



































- ➔  **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**
 -  *(introduction...)*
 -  **La collection « Le point sur »**
 -  **Ouvrages parus dans la collection « Le point sur »**
 -  **REMERCIEMENTS**
 -  **Avant propos**
 -  **Introduction**
 - Première partie: L'environnement d'une activité de séchage**
 - Chapitre I: L'évolution des pratiques de séchage**
 -  **L'intérêt du séchage des produits alimentaires**
 -  **Quelques enseignements et éléments de méthode tirés des expériences passées**
 -  **Les voies actuelles de la recherche**
 - Chapitre II: La filière de séchage. Du produit frais à la consommation du produit séché**
 -  **Définir une filière de séchage**
 -  **La pratique du séchage**
 -  **Des conseils pour la consommation des produits secs**
 -  **Fiches produits**
 - Chapitre III: Avant tout' bien définir le projet**
 -  **Présentation des différents systèmes de séchage**
 -  **Établir le cahier des charges à partir d'une analyse**

- ▢ **détail de la filière**
 - ▢ **Une méthode pour apprécier un système de séchage**
- ▢ **Deuxième partie: Notions de base sur le séchage des produits alimentaires**
 - ▢ **Introduction**
 - ▢ **Chapitre IV: Les grands principes du séchage**
 - ▢ **(introduction...)**
 - ▢ **Principes du comportement des produits alimentaires**
 - ▢ **L'eau dans le produit**
 - ▢ **L'eau dans l'air**
 - ▢ **Les trois phases de séchage**
 - ▢ **Actions du séchage sur la qualité du produit alimentaire**
 - ▢ **Le cas du séchage solaire direct**
 - ▢ **Jusqu'où mener le séchage?**
 - ▢ **En résumé**
 - ▢ **Chapitre V: Eléments pour le dimensionnement des séchoirs**
 - ▢ **Avertissement**
 - ▢ **Rythme de production, température de séchage, débit d'air et énergie requise**
 - ▢ **Production de l'énergie requise**
 - ▢ **Chapitre: exemples de séchoirs types**
 - ▢ **(introduction...)**
 - ▢ **Contenu des « fiches séchoirs »**
 - ▢ **Les « fiches séchoirs »**
 - ▢ **Chapitre VII: Conduire une activité de séchage**

-  **(introduction...)**
 -  **tapes amont**
 -  **♦ tapes aval**
 -  **L'organisation et le dimensionnement des locaux**
 -  **L'organisation du travail dans une unit♦ de s♦chage**
- Chapitre VIII: El♦ments d'♦valuation ♦conomique des projets**
 -  **(introduction...)**
 -  **Doit-on attendre la fin d'une proc♦dure de choix pour proc♦der ♦ une analyse ♦conomique?**
 -  **L'♦valuation ♦conomique « approfondie »**
 -  **O♦ implanter une unit♦ de s♦chage?**
- Troisi♦me partie: Quelques notions approfondies sur le s♦chage**
 - Chapitre IX: ♦l♦ments d'approfondissement de la th♦orie du s♦chage**
 -  **(introduction...)**
 -  **Lectures du diagramme enthalpique de l'air humide**
 -  **Lecture de courbes de sorption-d♦sorption**
 -  **Utilisation conjointe des courbes de sorption-d♦sorption et du diagramme de l'air pour ♦valuer la fin du s♦chage et le pouvoir s♦chant moyen de l'eau**
 -  **Compl♦ments sur l'♦nergie solaire**
 - Chapitre X: Mesurer et contr♦ler le s♦chage**
 -  **(introduction...)**
 -  **Le bilan mati♦re**
 -  **Le rendement thermique**
 - CHAPITRE XI: Exemples de calculs**

 **Exemple n°1: Sèchage tout solaire (9 heures de rayonnement suffisant par jour)**

 **Exemple n° 2: Données**

 **Annexes**

 **Annexe 1: Tableau de conversion des unités**

 **Annexe 2: Calcul de l'énergie solaire reçue par une surface**

 **Annexe 3: Caractérisation des matériaux de construction**

 **Annexe 4: Une grille d'analyse de la disponibilité en énergie solaire sur le site de séchage**

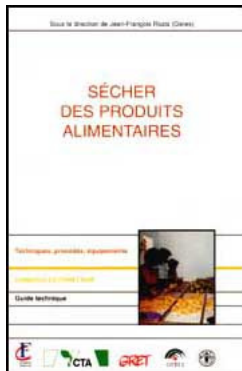
 **Annexe 5: Quelques exemples de projets de séchage**

 **Annexe 6: Table psychrométrique**

 **Annexe 7: Pour en savoir plus**




Home":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">



 **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**

  **(introduction...)**

 **La collection « Le point sur »**

 **Ouvrages parus dans la collection « Le point sur »**

 **REMERCIEMENTS**

 **Avant propos**

 **Introduction**

 **Première partie: L'environnement d'une activité de séchage**

- **Deuxième partie: Notions de base sur le séchage des produits alimentaires**
- **Troisième partie: Quelques notions approfondies sur le séchage**
- **Annexes**

Sous la direction de Jean-François Rozis (GERES)

Techniques, procédés, équipements

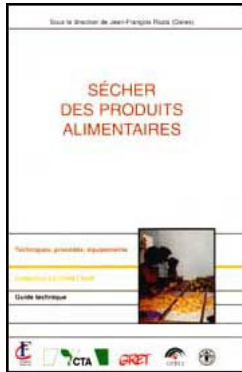
Guide technique

Collection *Le point sur*

GRET • MINISTRE DE LA COOPÉRATION • CTA



[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">



 **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**

➔ □ **Annexes**

 **Annexe 1: Tableau de conversion des unités**

 **Annexe 2: Calcul de l'énergie solaire reçue par une surface**

 **Annexe 3: Caractérisation des matériaux de construction**

 **Annexe 4: Une grille d'analyse de la disponibilité en énergie solaire sur le site de séchage**

 **Annexe 5: Quelques exemples de projets de séchage**

 **Annexe 6: Table psychrométrique**

 **Annexe 7: Pour en savoir plus**

Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)

Annexes

Annexe 1: Tableau de conversion des unités

Pour éviter les erreurs et les complications, il est conseillé d'utiliser le système international (SI) basé sur les quatre unités suivantes:

- le mètre (m): unité de longueur;
- le kilogramme (kg): unité de masse;
- la seconde (s): unité de temps;
- l'ampère (A): unité d'intensité de courant électrique.

Ainsi, par l'intermédiaire des lois de la physique, on obtient les autres unités suivantes:

- le newton (N): unité de force;
- le newton par m² ou bar (N/m²): unité de pression;
- le joule (J): unité d'énergie;
- le watt (W): unité de puissance.

Le joule (J), et même le kilo joule (Kj) sont des unités très petites, aussi préfère-t-on utiliser le kilowatt-heure (kWh) pour désigner une quantité d'énergie, avec 1 kWh = 3 600 Kj.

Nous donnons les correspondances suivantes:

- **1 kilocalorie (Kcal) = 4,18 Kj**
- **1 kilocalorie/heure (Kcal/h) = 1,16 W**
- **1 thermie (th) = 1 000 kilocalories = 1,16 Kwh**
- **1 cheval = 736 W**
- **1 foot (pied) = 30,48 cm (abréviation')**
- **1 inch (pouce) = 2,54 cm (abréviation")**
- **1 BTU (British Thermal Unity) = 1 054,35 Joules**
- **1 BTU/h = 0,2928 W**
- **°F = 9/5 °C + 32**
- **°C = 5/9 (°F - 32)**
- **1 bar = 105 Pa**
- **1 mm Hg = 133,3 Pa**
- **1 atm = 101,325 K Pa**

Annexe 2: Calcul de l'énergie solaire reçue par une surface

Pour un calcul plus précis de l'énergie solaire que la méthode qualitative fournie par l'institut Brace, en l'absence de données météorologiques, le concepteur dispose de

divers outils théoriques (cf. Le gisement solaire de M. Brichambaut).

Une méthode graphique pratique utilisant des diagrammes solaires cylindriques pour les différentes latitudes et des indicatrices d'irradiation fournies pour différentes conditions de ciels (de très clair à blanc laiteux) et d'inclinaison de surface. Cette méthode a été abondamment explicitée avec les divers diagrammes nécessaires dans « Le chauffage solaire dans les régions froides », GERES, éditions du GRET.

La surface de captation devra être positionnée pour recevoir le plus possible d'énergie solaire (perpendiculaire au rayonnement, non masquée du soleil par des obstacles environnants: maison, arbre...).

Pour dimensionner un sçhoir, on a besoin généralement de connaître l'énergie journalière moyenne mois pour mois pour une surface inclinée.

étape 1. énergie mensuelle journalière moyenne reçue par une surface horizontale.

On suppose cette énergie connue (atlas météorologique, station météorologique voisine, d'après la connaissance des énergies moyennes maximales le mois considéré...).

étape 2. énergie mensuelle journalière moyenne pour une surface inclinée.

$$E_i = R \times H$$

avec:

E_i : énergie mensuelle journalière moyenne sur une surface inclinée.

H : énergie mensuelle journalière moyenne sur une surface horizontale.

et

$$R = \frac{1 - H_d}{H} \cdot RD + \frac{H_d}{H} \cdot \left(1 + \frac{\cos s}{2}\right) + \rho_s \left(1 + \frac{\cos s}{2}\right)$$

H_d: énergie mensuelle journalière moyenne diffuse sur une surface horizontale.

RD: rapport du rayonnement direct moyen mensuel sur une surface inclinée et du rayonnement direct moyen mensuel sur une surface horizontale.

s: inclinaison de la surface.

ρ_s: réflectivité du sol.

On calcule le rapport H_d/H par la relation:

$$\frac{H_d}{H} = 1,39 - 4,03 K_T + 5,53 K_T^2 - 3,11 K_T^3$$

, relation dans laquelle K_T vaut:

$$K_T = \frac{H}{H_0}$$

H₀ est l'énergie mensuelle journalière moyenne extraterrestre (aux limites de l'atmosphère). Les valeurs de H₀ sont données par le tableau de la page ci-contre.

$$RD = \frac{\cos(\varnothing - s) \cos \delta \sin ws' + \frac{\pi}{180} ws \cdot \sin(\pi - s) \sin \delta}{\cos \varnothing \cos \delta \sin ws + \frac{\pi}{180} ws \sin \varnothing \sin \delta}$$

avec:

- \varnothing : latitude du lieu;
- δ : déclinaison angulaire au moment considérée;
- ws : arc $\cos(-\text{tang} \varnothing \text{ tang} \delta)$;
- ws' : ws si $ws < \arcsin(-\text{tang}(\varnothing - s) \text{ tang} \delta)$;
- et ws' : $\arcsin(-\text{tang}(\varnothing - s) \text{ tang} \delta)$ dans le cas contraire.

Rayonnement extraterrestre mensuel journalier moyen MJ/m²) - H₀

Latitude	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décember
0	36,4	37,6	40,0	36,8	34,9	33,6	34,0	35,6	37,1	37,4	36,6	35,
5	34,4	36,3	37,7	37,6	36,4	35,4	35,7	36,7	37,3	36,5	34,8	33,
10	32,1	34,7	37,0	38,0	37,6	37,1	37,1	37,5	37,1	35,4	32,8	31,
15	29,7	32,9	36,1	38,2	38,6	38,5	38,4	38,1	36,7	33,9	30,6	33,
20	27,1	30,8	35,0	38,0	39,4	39,6	39,3	38,3	36	32,2	28,1	25,
25	23,9	28,2	33,0	37,1	39,4	40,1	39,6	37,9	34,4	29,5	24,9	22,
30	21,1	25,7	31,3	36,5	39,6	40,7	40,1	37,6	33,1	27,3	22,1	19,

35	18,1	23,1	29,3	35,5	39,6	41,2	40,3	37,0	31,5	24,9	19,2	16,
40	15,1	20,3	27,2	34,3	39,3	41,4	40,3	36,2	29,7	22,3	16,3	13,
45	12,0	17,5	24,8	32,8	38,8	41,3	40,0	35,1	27,7	19,6	13,3	10,
50	9,0	14,5	22,3	31,2	38,1	41,2	39,6	33,8	25,4	16,7	10,3	7,6
55	6,1	11,5	19,5	29,3	37,2	40,9	39,1	32,4	23,0	13,8	7,3	4,8

◆tape 3. Calcul de l'◆nergie mensuelle horaire.

On suppose que la distribution de l'◆nergie re◆ue a la forme d'une sinuso◆de tronqu◆e, l'◆nergie re◆ue ◆tant maximale ◆ midi (solaire) et nulle au lever et au coucher du soleil.

Pour les surfaces orient◆es au sud, on calcule l'◆nergie re◆ue pendant une branche d'une heure pour la formule suivante:

$$E_{im} h = \frac{\pi}{2N} E_{im} \rho \cos\left(\frac{180}{N} t\right) \text{ si } t < \frac{N}{2}$$

et

$$E_{im} h = 0 \text{ si } t < \frac{N}{2}$$

avec:

N longueur du jour exprim◆e en heures jour la p◆riode consid◆r◆e.

N = 2/15 Arcos (- tang ◆ tang δ)

♦ ♦ tant la latitude du lieu, μ la d♦clinaison angulaire au moment consid♦r♦.

Rappel:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360 \cdot 284 + n}{365}\right) = -21,27^\circ$$

, n ♦ tant le jour de l'ann♦e.

Eim q = ♦nergie totale re♦ue au cours de la journ♦e exprim♦e en Wh ou kWh. t = heure correspondant au milieu de la p♦riode pour laquelle on calcule l'♦nergie re♦ue compt♦e ♦ part* du midi solaire ($t = 1$ pour 13 h et 11 h. $t = 2$ pour 14 h et 10 h. etc.).

Eim h = ♦nergie totale re♦ue au cours de l'heure centr♦e sur t (1/2 heure avant et 1/2 heure apr♦s) exprim♦e en Wh ou en kWh en fonction de l'unit♦ choisie pour E_i .

Exemple: Si l'♦nergie totale re♦ue par une surface orient♦e au sud au cours d'une journ♦e du mois de janvier (15 janvier) ♦ une latitude de 45°N , est de $5\,000 \text{ Wh/m}^2$, l'♦nergie re♦ue de 10 h 30 ♦ 11 h 30 et de 12 h 30 ♦ 13 h 30 ($t = 1$) est calcul♦e comme suit:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360 \cdot 284 + n}{365}\right) = -24,27^\circ$$

$\tan \mu = -0,389$

$\tan \delta = 1$

$N = 8,95$ heures

E_i = 824 Wh/m²

Annexe 3: Caractérisation des matériaux de construction

Propriétés thermophysiques des matériaux

Matériaux	Conductivité thermique (W/m/°C)	Densité (kg/dm ³)	Chaleur spécifique	Coefficient d'absorption (Wh/kg/°C)		Coefficient d'émission
Acier doux	45,3	7,83	0,14	0,3-0,8		0,12
Air (20°C)	0,024	1,29·10 ³	0,28			
Aluminium	221	2,74	0,25	0,04		0,09
Asphalte	0,74	2,11	0,26	0,9		0,9
Bakélite	16,78	1,3	0,41	0,9		0,9
Béton plein	1,2	2,31	0,18	0,6		0,9
Bois	0,11-0,25	0,37-1,12	0,5-0,75	0,6		0,9
Brique (terre cuite)	0,7	1,97	0,23	0,68		0,9
Calcaire	0,93	1,65	0,25	clair	sombre	
				0,35	0,5	
Carton	0,07					
Cendre de bois	0,071	0,64	0,23			
Chaume	0,09	0,27	0,28			
Charbon de	0.052	0.24	0.23	0.9		0.8

Bois	0,029	1,92	0,19	0,6	0,9
Ciment (Portland)					
Coton (fibres)	0,042	1,52	0,37		
Eau (20°C)	0,6	1	1,16		
Fer (fonte)	78	7,21	0,14	0,3-0,8	
Glace (0°C)	2,25	0,92	0,56		0,95
Laines (fibres)	0,04	1,31	0,38		
Laine de verre	0,038	0,05	0,18		
Liège	0,048	0,09	0,56		
Papier	0,13	0,93	0,37		0,9
Paraffine	0,24	0,9	0,80		
Roche dure	2,5	2,6	0,25	0,4-0,6	0,9
Sable	0,33	1,52	0,22	0,8(sec)-0,91	
Sciure	0,06	0,19	0,4		
Terre sèche et compacte	0,64-1	1,5-1,9	0,23	0,75	
Verre	1,028	2,47	0,2		0,84

AIR

Température (°C)	Chaleur massique à pression constante (J/kg/°C)	Conductivité (W/m/°C)
0	1 004	$17,19 \cdot 10^{-3}$

20	1 006	$19,2610^{-3}$
40	1010	$21,2410^{-3}$
60	1 025	$25,1210^{-3}$
80	1 045	$28,8610^{-3}$
100	1 069	$32,4510^{-3}$
200	1 092	$35,7010^{-3}$
300	1 184	$49,3310^{-3}$

EAU

Température (°C)	Masse volumétrique (kg/m³)	Chaleur massique à pression constante (J/kg/°C)	Conductivité thermique (W/m/°C)
0	1 000	4 220	0,55
20	998	4 183	0,60
40	992	4 178	0,63
60	983	4 191	0,65
80	972	4 199	0,67
100	958	4 216	0,68
200	863	4.501	0,67
300	700	5 694	0,56

Coefficients d'absorption solaire

Une valeur approchée peut être déterminée en fonction de la couleur de la surface (type lisse, unie)

Couleur	Coefficient d'absorption
Blanc	0,25 à 0,4
Gris ou gris foncé	0,4 à 0,5
Vert, rouge, brun	0,5 à 0,7
Brun ou bleu foncé	0,7 à 0,8
Bleu foncé au noir	0,8 à 0,89

Énergie de vaporisation de l'eau

0°C	2,494.10 ⁶ J/kg	140°C	2,143.10 ⁶ J/kg
20°C	2,448	160°C	2,081
40°C	2,402	180°C	2,015
60°C	2,357	200°C	1,942
80°C	2,309	250°C	1,717
100°C	2,258	300°C	1,403
120°C	2,202	350°C	0,894

Annexe 4: Une grille d'analyse de la disponibilité en énergie solaire sur le site de séchage

1. Connaissez-vous l'ensoleillement moyen journalier (ES) sur un plan horizontal, du site sur lequel doit être implanté le séchoir, pendant la période de la récolte (en kWh par jour et par mètre carré)?

< 2 (0)

2 ♦ 4 (3)

4 ♦ 6 (6)

>6 (9)

Si vous avez pu répondre ♦ cette question, allez directement ♦ la question n° 5. Sinon, nous allons essayer d'en faire une estimation ♦ l'aide des questions suivantes.

2. Combien en moyenne y-a-t-il d'heures d'ensoleillement par jour?

<4 (0)

4 ♦ 7 (1)

7 ♦ 10 (2)

> 10 (3)

3. Dur♦e totale d'une journ♦e solaire (heure de coucher-heure de lever du soleil)?

< 8 (0)

8 ♦ 10 (1)

10 ♦ 12 (2)

>12 (3)

4. ♦ quelle sorte de nuage a-t-on ♦ faire?

◆pais (0)

l◆gers ou brumeux (2)

pas de nuage (3)

Un nuage ◆pais obscurcit enti◆rement le ciel: seul persiste le rayonnement diffus.

Soit T1 = le total des r◆ponses 2 + 3 + 4.

T1 =

On peut appr◆cier l'ensoleillement:

T1 < 3	ES 2 kWh
3 < T1 < 6	2 < ES < 4 kWh
6 < T1 < 8	4 < ES < 6 kWh
T1 > 8	ES > 6 kWh

La valeur estim◆e de ES peut alors ◆tre report◆e dans la case appropri◆e de la question 1.

5. Quelle est en moyenne le nombre de jours successifs pendant lesquels l'ensoleillement est inf◆rieur ◆ 4 heures?

0 (0)	3 (3)
1 (1)	> 4 (4)
2 (2)	

6. ♦ quelle latitude se situe le site du s♦choir (en degr♦ Sud ou Nord)?

>45 (0)

30 ♦ 15 (2)

45 ♦ 30 (1)

<15 (3)

7. Quelle est son altitude (en m♦tres)?

<500 (0)

1 (1)

2 (2)

3 (3)

>4 (4)

8. Comment se caract♦rise le climat?

♦quatorial ou tropical humide (0)

maritime ou temp♦r♦ (1)

continental (2)

d♦sertique ou semi-aride (3)

Un climat équatorial est chaud et humide avec de très faibles variations de température. Le maritime est plus doux. Dans le désertique, les écarts deviennent très grands mais l'humidité est très faible. Le continental a des caractéristiques voisines mais moins excessives.

9. Quelle est en moyenne l'humidité relative de l'air pendant la période de séchage? (en %)

> 85 très humide (0)

85 à 65 assez humide (1)

65 à 45 assez sec (2)

< 45 très sec (3)

Un air dont l'humidité relative est supérieure à 85 % est difficilement supportable par les hommes. À haute température, les objets collent à la peau, la sensation est voisine du bain de vapeur, il est très difficile de sécher. Un air à moins de 45 % est, par contre, très desséchant.

11. Existe-t-il des particules en suspension dans l'air (pollution par fumées, gaz - voiture - poussière ou sable)?

forte concentration (0)

faible (1)

pas du tout (2)

Soit le total T2 = le total des réponses 6 + 7 + 8 + 9 + 10

T2 =

T3 =T1+T2+5 =

Si T3 < 6, les conditions physiques ne sont pas réunies pour envisager un séchage solaire, on doit rechercher une énergie différente. Si 6 < T < 20, une énergie d'appoint doit être envisagée. Si T3 > 20, les conditions sont favorables à l'utilisation du solaire.

Source: Institut de recherche Brace

Annexe 5: Quelques exemples de projets de séchage

Un programme d'appui aux groupements de marchands à Koumbidia, au Sénégal

Le programme s'est donné pour objectif d'apporter une réponse aux préoccupations de petits exploitants:

- éviter de perdre des légumes qui, sans moyens de transformation, le seraient irrémédiablement, problème qui va aller en s'amplifiant avec la croissance désordonnée de l'activité marchande, surtout dans les zones enclavées;
- maîtriser les prix du frais en période de surproduction en disposant, grâce au séchage, d'une alternative à la braderie de produits périssables;
- améliorer la qualité de vie en zone rurale, en particulier en allongeant la période de consommation de légumes, grâce à la conservation en sec;
- pour l'avenir, ouvrir de nouveaux marchés dans la zone et, plus loin, dans les villes. Les légumes séchés sont faciles et économiques à transporter et à distribuer;

- enfin s'agissant d'une activité féminine, le séchage apparaît comme un des rares moyens, pour elles, de se constituer une réserve financière, de se doter collectivement d'une capacité d'investissement. Koumbidia, par exemple, le groupement de marchandes projette l'achat collectif d'une charrette pour commercialiser les légumes.

Les deux cas suivants présentent la démarche d'ONG qui ont mis en place de nouvelles filières d'export en direction d'un marché bien spécifique: les marchés solidaires européens, marchés de promotion volontariste des produits du Sud. Elles aident des petits producteurs de Puits tropicaux à exporter, vers ces marchés, leur production sèche grâce à des séchoirs solaires simples et en fournissant une filière de commercialisation.

L'expérience du CEAS, ONG suisse, au Burkina Faso

Face aux pertes importantes subies en période de surproduction (mai/juin), le séchage, très répandu, restait, en milieu rural, le seul moyen de transformation sur place. Le modèle de séchoir retenu (séchoir en banco de 16 m² avec couverture plastique) a été élaboré par l'Institut burkinabé de l'énergie (IBE) et installé au sein de groupements Naam. Le CEAS propose de mieux valoriser ce séchoir en étalant sa durée d'utilisation grâce notamment au séchage des mangues.

Dès 1988, un premier lot de 20 kg de mangues sèches est testé sur le marché solidaire suisse, le réseau OS3. Devant l'accueil des consommateurs suisses, une commande ferme d'une tonne a été fixée pour 1989. Le tableau suivant résume les évolutions de cette activité.

Année	Quantité de produits	Chiffre d'affaires
	exportés	(en million de FCFA)

1986		
1987		
1988	20 kg (◆chantillon)	1,4
1989	0,7 tonnes	5,1
1990	2,5 tonnes	8,7
1991	4,3 tonnes	17,8
1992	8,9 tonnes	20,4
1993	10,2 tonnes	56 *
1994	14 tonnes	(* d◆valuation du FCFA)

Peu ◆ peu, ce march◆ porteur va modifier, structurer l'activit◆.

La production

◆ partir du 1992, le CEAS organise les producteurs ◆ travers une structure d◆nomm◆e « Cercle des s◆cheurs ». Apr◆s un appui technique et structurel subventionn◆, le cercle prend progressivement en charge son fonctionnement et se regroupe officiellement en un groupe d'int◆r◆t ◆conomique. Gr◆ce notamment ◆ des actions de formations, l'◆tape transformation du produit (hygi◆ne, productivit◆) a ◆t◆ professionnalis◆e.

L'outil de s◆chage

L'option initiale tout solaire s'est av◆r◆e risqu◆e, du fait de la d◆pendance aux conditions climatiques. En 1991, avec une saison tr◆s humide, une grande partie de la production a ◆t◆ perdue. Pour ne plus conna◆tre ce type de probl◆me, des syst◆mes tout gaz ont ◆t◆ d◆velopp◆s.

La promotion/contrôle de la qualité

Deux marques ont été créées « Régaldise » et « Aromandise ». Un contrôle de qualité est opéré (couleur, teneur en eau, analyse microscopique). Un agent commercial, rattaché au Cercle des sécheurs, prend en charge la recherche de nouveaux marchés et assure l'approvisionnement en intrants (soufre, sachets, cartons...). Ces efforts ont rendu possibles des ouvertures sur de nouveaux marchés, sous-régionaux (Côte d'Ivoire) et européens (Grande Bretagne, Belgique). La difficulté a été de sensibiliser les petits producteurs aux notions de marketing, de gestion rationnelle d'unités de transformation pour permettre une réelle adéquation de la production locale aux exigences d'un marché d'exportation (notamment en terme de régularité de la fourniture en produits séchés). Les résultats sont très encourageants.

L'expérience de Tropical Wholefoods, compagnie anglaise, en Ouganda

L'action a débuté sensiblement à la même époque, en Ouganda, avec la diffusion de séchoirs tout solaire simples, auprès de petits producteurs.

Le séchoir a été amélioré à partir du modèle existant localement (séchoir Kawanda). De construction simple, il n'en représente pas moins un investissement important pour le transformateur. Il a donc, dès le départ, paru nécessaire d'assurer un débouché, pour des produits de bonne qualité finale, avec une démarche commerciale à chaque échelon de la transformation.

Définition des objectifs

L'activité de séchage et donc l'achat du séchoir dépendaient de la disponibilité et du prix des fruits, au plan local. L'objectif était de sécher systématiquement les produits peu chers (en période de forte production), en évitant un surcoût important lié au transport (approvisionnement possible à bicyclette), ceci tout en jouant sur la plus ou

moins grande facilité à sécher, selon les produits, ainsi que sur les conditions climatiques. Pour rentabiliser le séchoir, il a été établi qu'il fallait le faire fonctionner six à neuf mois. Le tableau suivant a été conçu pour guider les transformateurs.

Les critères:

Qualification	Fruit	Climat
Bon	Grande quantité un prix raisonnable	Temps très ensoleillé
Moyen	Petite quantité un prix raisonnable	Temps plutôt ensoleillé
Faible	Faible quantité un prix élevé	Temps plutôt nuageux et pluvieux

Exemple (une qualification « faible » pour l'un des deux critères induit un signe « - »):

Mois	Critère fruit	Critère climat	Résultat
Janvier	Bon	Bon	+
Février	Bon	Moyen	+
Mars	Bon	Faible	-
Avril	Moyen	Bon	+
Mai	Moyen	Moyen	+
Juin	Moyen	Faible	-
Juillet	Faible	Bon	-
Août	Faible	Moyen	-
Septembre	Faible	Faible	-
Octobre	Bon	Bon	+
Novembre	Moyen	Moyen	+

U	Centimetre		Centimetre		-
Résultat: nombre de mois positifs = 6					

La vente/contrôle de qualité/conditionnement

Le marché local des produits séchés est très réduit. Une marque dénommée «Fruits of the Nile » a été créée pour l'exportation vers les marchés solidaires et biologiques anglais (Health Food Wholesalers).

Des critères de qualité simples ont été définis. Après test de dégustation et d'aspect visuel, les fruits sont exportés puis, en Angleterre, sont vérifiés et emballés dans des sachets de qualité.

Le marché « solidaire » offre donc la possibilité de mettre en place des filières porteuses pour des petits producteurs utilisant des outils solaires simples. La clientèle « sensibilisée » est prête à payer un surplus et est moins exigeante sur la qualité des produits finis. L'existence de ces marchés d'expert a permis de dynamiser considérablement l'activité de séchage, la préparant à une étape semi-industrielle (on pourrait aussi citer l'exemple de FAKT, en Bolivie, qui exporte vers l'Allemagne des bananes séchées par le biais du réseau GEPA).

Le séchoir coquillage au Burkina Faso

Le GERES a lancé, en 1992, un programme d'appui aux pratiques de séchage en zone sahélienne, centré au Burkina Faso. Ce programme est conduit par le biais d'une cellule locale, ABAC-GERES, qui a pour fonctions de répondre aux diverses attentes des opérateurs locaux (formation technique, appui/conseil, études de marché...) et d'assurer la promotion de produits séchés.

Le GERES avait participé (avec le GRET) à la mise au point d'un « séchoir coquillage »,

séchoir qui représente un bon compromis comme séchoir individuel en milieu rural. Sa diffusion se résumait à quelques exemplaires au Sénégal, au Mali et au Burkina Faso. Pour en assurer une plus large diffusion, le problème a été traité sous plusieurs angles.

La fabrication du séchoir

Il est apparu nécessaire de garantir la qualité du séchoir, notamment sur le plan des performances de séchage, et donc d'assurer l'homogénéité de sa production. Un guide de fabrication pour les trois modèles proposés a été mis au point. Un contrôle systématique et une labellisation ont été mis en place en vue de protéger le fabricant (artisan forgeron) et le client. Un véritable contrat est passé avec l'artisan qui s'engage à respecter les normes techniques. Un système de garantie d'une durée de six mois a pu être mis en place. Les artisans, conscients de l'enjeu économique, se sont regroupés en collectif afin de mieux gérer leur approvisionnement en matériaux, de disposer d'un stock de produits finis et de faciliter la commercialisation des séchoirs. Ce sont eux qui assurent la promotion de leur production.

L'acquisition des équipements

Plusieurs formules ont été proposées pour faciliter l'acquisition: de la subvention totale au paiement comptant en passant par le crédit. On peut retenir que l'acquisition doit être motivée. En ce sens, la subvention induit des effets pervers (démotivation des bénéficiaires, incompréhension et sentiment d'injustice des groupements ne bénéficiant pas de cette subvention) et ne permet pas la prise d'autonomie de la diffusion (objectif premier). Avec un temps de retour réduit (3 mois) il est facile de faire appel aux systèmes de crédits locaux.

Mise en œuvre de l'activité

Des sessions de formation pour une utilisation correcte du séchoir sont assurées par les

animatrices d'ABAC-GERES. Des guides de recettes et d'utilisation des produits sèches ont été élaborés. Les utilisatrices sont appuyées pour la commercialisation de leurs produits. Une marque a été déposée pour le marché local: PALSEC.

Au cours de cette phase de large diffusion et en s'appuyant sur les remarques des premiers utilisateurs, des modifications ont été apportées afin d'améliorer l'outil. L'université de Ouagadougou (EIER) et le CNRS Perpignan ont été impliqués (modélisation, expérimentation, optimisation) dans cette amélioration technique.

Cette expérience a permis de lever les différents points de blocages d'une diffusion efficace de ce sêchoir dans la zone concernée. L'ustensile est actuellement connu, sa fabrication est maîtrisée. Les mécanismes d'acquisition par le biais de structures locales de crédit ou par paiement direct sont autonomes. Le sêchoir est actuellement dupliqué d plus de 1 000 exemplaires. La deuxième phase de ce programme débute. L'objectif est d'atteindre une diffusion de 8 000 sêchoirs coquillages.

Annexe 6: Table psychrométrique

15	18	21	24	27	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	Delta T
94	95	95	96	96	96	96	96	96	97	97	97	97	98	98	98	98	98	98	0,6
89	90	90	91	91	92	93	93	93	94	94	94	95	95	95	96	96	96	96	1,1
82	85	85	86	87	88	89	90	90	91	92	92	92	93	93	94	94	94	94	1,7
78	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	89	90	90	91	91	92	92	92	2,2
73	75	77	78	79	80	82	83	84	85	86	87	87	88	88	89	90	90	90	2,8
66	70	72	74	75	76	79	80	81	82	83	84	85	86	86	87	87	88	88	3,3
61	65	68	69	71	72	75	77	79	81	82	83	84	84	86	86	86	86	86	4,0
54	58	61	63	65	67	70	73	74	75	77	78	79	80	81	83	83	83	83	5,0
46	51	54	57	59	61	65	69	70	71	73	74	75	76	77	80	80	80	80	6,0

40	51	54	57	59	61	65	68	70	71	73	74	75	76	77	80	79	80	80	8,0
37	43	47	51	53	55	60	63	65	67	69	70	71	72	73	76	75	76	77	7,0
29	35	40	44	47	50	55	58	60	63	65	66	67	69	70	72	72	73	74	8,0
21	27	33	37	41	45	50	53	55	58	60	62	63	65	67	68	69	70	71	9,0
13	20	25	30	35	39	45	48	51	54	56	58	60	61	63	64	65	67	68	10,0
5	13	18	23	29	34	40	44	47	51	53	54	56	58	60	61	63	64	66	11,0
3	5	12	17	23	29	35	40	43	47	50	51	53	55	57	58	60	61	63	12,0
	3	6	11	17	24	30	36	39	43	47	48	50	52	54	55	57	58	60	13,0
		3	6	12	19	25	33	35	39	43	45	47	49	51	52	54	55	57	14,0
			3	7	13	20	27	31	35	39	41	43	45	47	49	51	52	54	15,5
				4	7	15	21	26	31	35	37	39	42	43	45	47	48	50	17,0
					4	9	15	22	27	31	34	36	39	40	41	43	44	46	18,5
						6	12	18	23	27	30	32	35	37	38	40	41	43	20,0
						5	9	14	18	23	24	28	31	34	34	37	38	40	22,0
							6	10	12	17	19	22	25	28	29	32	35	36	25,0
								6	8	11	14	17	20	23	25	27	30	31	28,0
									6	8	11	13	15	18	21	23	25	26	31,0
										6	8	11	12	14	17	19	20	21	34,0
											6	8	10	11	13	15	16	17	28,0
												5	8	9	10	11	13	15	42,0
													5	6	7	8	10	13	46,0
														4	5	6	8	11	50,0
															3	4	7	9	54,0

Annexe 7: Pour en savoir plus**LES DOCUMENTS TECHNIQUES**

ALAIS (C.), LINDEN (G.), *Biochimie alimentaire*, d. Masson, 1991.

nergies solaire

DUFFIE John A., BECKMAN William A., *Solar engineering of thermal process*, 1980, 750 p. Méthodes de calcul pour le dimensionnement des systèmes énergétiques (solaire thermique).

PERRIN DE BRICHAMBAUT (C.), VANGE (C.), *Le gisement solaire*, éditions Lavoisier, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, 1982, 222 p.

Données scientifiques pour le calcul de l'ensoleillement au niveau du globe terrestre.

Aérologie

IDELCIK (I.-E.), *Memento des pertes de charges*. éditions Eyrolles, 57 boulevard Saint-Germain 75006 Paris.

Séchage

***Solar dryers. Their role in post harvest processing*, Commonwealth Science Council, Londres, 1987, 298 p.**

***Le séchage solaire en Afrique*, Compte rendu du colloque tenu à Dakar, éditions CRDI, CP 8500 Ottawa, Canada K1G 3H9, 1987, 300 p.**

Séchage, manuel de technologies du cycle alimentaire n° 6. UNIFEM, 304 East 45th Street, New York NY10017, USA, 1993, 65 p.

Conditionnement, manuel de technologies du cycle alimentaire n° 7. UNIFEM, 304 East 45th Street, New York NY10017, USA, 1993, 52 p.

Conserver et transformer le poisson, coll. « Le point sur », éditions du GRET, ministère de la Coopération, CTA, ACCT, 1993, 282 p.

FRANÇOIS Martine, Transformer les fruits tropicaux, coll. « Le point sur », éditions du GRET, ministère de la Coopération, CTA, ACCT, Paris, 1993, 222 p.

SOLAGRO, GEFOSAT, ARCHIMED, Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales, 1989.

Revues

Spore, bulletin bimestriel du Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA). Agropolis International 34394 Montpellier Cedex 5, France.

TPA, bulletin du réseau Technologie et partenariat en agroalimentaire, s/c GRET.

VAUCHON, PUIGGALI (Université de Bordeaux I). « Détermination d'une orientation optimale d'un capteur solaire: relation entre rendement quotidien d'insolation et inclinaison pour les jours de ciel clair », Revue générale de thermique, 30 rue de la Source 75016 Paris, n° 234-235 juin-juillet 1981.

Guides pratiques

Série ABAC-GERES , Séchage domestique

- Recettes culinaires ♦ base de produits s♦ch♦s au Burkina Faso
- Guide de fabrication des s♦choirs coquillage
- Comment s♦cher vos produits avec le s♦choir coquillage

S♦rie NRI , S♦chage artisanal

- D♦bouch♦s des produits s♦ch♦s
- Guide de construction du s♦choir cadre
- Techniques de s♦chage
- Gestion d'une unit♦

PERSONNES/ORGANISMES RESSOURCES

Europe

- **Allemagne**

FAKT Association for Appropriate Technologies
Ge♦nsheidestrasse 43, D-70184 Stuttgart

GATE/GTZ German Appropriate Technology Exchange
Postfach 5180, D-6236 Eschborn 1

Universit♦ d'Hohenheim (Prof. Dr Ing. M♦lbaner, A. Esper)
Institut fur Agrartechnik D-70593 Stuttgart

- **France**

ASDER
Association savoyarde pour le d♦veloppement des ♦nergies renouvelables
299, rue Granier 73230 St Alban Leysse

CIRAD-SAR (Anne Lucie Wack)
Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le
développement
BP 5035, 34032 Montpellier

ENSIAA école nationale supérieure des industries agricoles et alimentaires
1, avenue des Olympiades 91305 Massy

GEFOSAT
Groupement d'étude des fours, des outils solaires et d'assistance en
technologies appropriées

Domaine de Grammont, Route de Mauguio, 34100 Montpellier

GERES Groupe énergies renouvelables et environnement
73, avenue Corot 13013 Marseille

Laboratoire de Physique appliquée (Michel Fournier)
Université de Perpignan 66025 Perpignan

SOLAGRO (J.-L. Bochu)
219, avenue de Muret 31300 Toulouse

- **Italie**

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations
Agricultural Services Division
Via della Terme di Caracalla 00100 Rome

- **Royaume Uni**

ITDG Intermediate Technology Development Group Myson House, Railway Terrace, Rugby CV21 3HT

NRI Natural Ressources Institute (Kate Seborg, Andrew Brett) Central Avenue, Chatham Maritime, Chatham-Kent ME4 4TB

- **Suisse**

**CEAS Centre ♦cologique Albert Schweitzer
CH-2000 Neuchatel**

**SKAT Swiss Centre for Appropriate Technology
Varnbuelstrasse 14, CH-9000 St-Gallen**

AFRIQUE

- **B♦nin**

**Laboratoire de recherche sur l'♦nergie solaire
Universit♦ du B♦nin, BP 1515 Porto-Novo**

- **Burkina Faso**

**ABAC-GERES Association burkinab♦ d'action communautaire
01 BP 4171 Ouagadougou 01**

**EIER ♦cole inter-♦tats de l'♦quipement rural
03 BP 7023 Ouagadougou 03**

**IBE Institut burkinab♦ de l'♦nergie
03 BP 7047 Ouagadougou 03**

- **Burundi**

Centre d'études burundais des énergies alternatives Ministère des Travaux publics, de l'énergie et des Mines

- **Cameroun**

**École nationale supérieure polytechnique
Département de Physique et Chimie, Laboratoire énergétique, Yaoundé**

- **Centrafrique**

**ISDR Institut supérieur de développement rural
Université de Bangui, BP 909 Bangui**

- **Congo**

**Faculté des Sciences, département de Physique
Université de Marien Ngouabi, Brazzaville**

- **Côte d'Ivoire**

**UNICEF United Nations Children Fund
Bureau régional pour l'Afrique centrale et occidentale
BP 433 Abidjan 04**

- **Éthiopie**

**SEDOC
Service de documentation et communication pour le développement
PO Box 5788 Addis-Abeba**

- **Gabon**

Faculté des Sciences de l'Université Omar Bongo

- **Ghana**

**Department of Agricultural Engineering and Mechanics
University of Sciences and Technology, Kumasi**

**TCC Technology Consultancy Centre
Department of Mechanical Engineering
University of Science and Technology, Kumasi**

- **Kenya**

**Appropriate Technology Centre
Kenyatta University College
PO Box 43 844 Nairobi**

- **Mali**

**CRES Centre régional de l'énergie solaire
BP 1872 Bamako**

**Institut supérieur de formation et de recherches appliquées
BP 241 Bamako**

**Laboratoire de l'énergie solaire
BP 134 Bamako**

- **Maroc**

**Institut agronomique et vétérinaire Hassan II
BP 6202 Rabat**

- **Niger**

**ONERSOL Office National de la recherche solaire
BP 621 Niamey**

- **Nigeria**

**Ministry of Lands, Survey and Town, Plannings Lands Division
Ikom - Cross River State, PO Box 5255 Marina, Lagos, Lagos State**

**NHRI National Horticultural Research Institute IDI-ISHIN
PMB 543Z Ibadan**

- **Nouvelle Guinée**

**ATDI Appropriate Technology Delevopment Institute
The Papua New Guinea University of Technology
PO Box 793 Lae - Papouasie**

- **Ouganda**

**Department of Geological Survey and Mines
PO Box 9 Entebbe**

**National Research Coucil
Ministry of Planning and Economy Developing, PO Box 6884 Kampala**

- **Rwanda**

**Centre d'étude et d'application de l'énergie
Université nationale du Rwanda, Butare**

- **Senegal**

**CIEPAC Centre pour l'éducation permanente et l'aménagement concerté
1, avenue Cheik Anta Diop - BP 1718 Dakar**

**ITA Institut technologique alimentaire
BP 2765, Route des Pères Maristes, Dakar Hann**

**Université de Dakar Hann
Faculté des Sciences, département de Physique, Dakar**

- **Soudan**

**Food Processing Research Center
Khartoum**

- **Tanzanie**

**National Construction Conseil
PO Box 40465 Dar-es-Salaam**

- **Zambie**

**Department of Agricultural Engineering
University of Zambia, Lusaka**

- **Zimbabwe**

**Department of Energy Development
PO Box 7758 Houseway Harare**

LE CENTRE TECHNIQUE DE COOPÉRATION AGRICOLE ET RURALE (CTA)

Le Centre technique de coopération agricole et rurale a été fondé en 1983 dans le cadre de la Convention de Lomé entre les États membres de l'Union européenne et les États du groupe ACP (Afrique, Caraïbes, Pacifique).

Le CTA est à la disposition des États ACP pour leur permettre un meilleur accès à l'information, à la recherche, à la formation et aux innovations dans les domaines du développement agricole et rural et de la vulgarisation.

Siège:

**Posthus 380
6700 AJ Wageningen, Pays-Bas
Tél.: (31) 317 467 100
Télex: (44) 30169 CTA NL
Fax: (31) 317 460 067**

SÉCHER DES PRODUITS ALIMENTAIRES

Ce livre fait le point sur les techniques et méthodes pour améliorer et développer des activités de séchage des produits alimentaires. Les analyses et informations présentées reposent sur le bilan des principaux programmes de séchage réalisés en Afrique ces dernières années.

Sans négliger les autres sources d'énergie, il met l'accent sur le séchage solaire: la source d'énergie la moins coûteuse et la plus facile à mettre en place.

Cet ouvrage présente les différentes étapes nécessaires au montage d'un projet de séchage. Il combine:

- des informations économiques: types d'activités et de techniques à privilégier selon les contextes;
- des informations techniques: choix du matériel, conduite technique de l'activité de séchage;
- des informations scientifiques: éléments théoriques sur le séchage; principes de dimensionnement; mesure et contrôle de séchage.

GRET

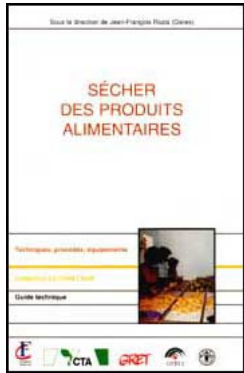
**211-213, rue La Fayette 75010 Paris France
Tél.: 33 (1) 40 05 6161. Fax: 33 (1) 40 05 61 10**

**Photo de couverture: Nicolas Cebrian
ISBN: 2 - 86844 - 072 - X
Prix: 175 FF**



[Home](http://www24.brinkster.com/alexweir/):81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

 Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés,



◆quipements. (GRET, 1995)

◆ (introduction...)

➔ ◆ La collection « Le point sur »

◆ Ouvrages parus dans la collection « Le point sur »

◆ REMERCIEMENTS

◆ Avant propos

◆ Introduction

◆ Première partie: L'environnement d'une activité ◆ de s◆chage

◆ Deuxième partie: Notions de base sur le s◆chage des produits alimentaires

◆ Troisième partie: Quelques notions approfondies sur le s◆chage

◆ Annexes

La collection « Le point sur »

Cette collection est copubli◆e par le minist◆re fran◆ais de la Coop◆ration et le GRET (Groupe de recherche et d'◆changes technologiques), association priv◆e ◆ but non lucratif.

Les titres publi◆s dans cette collection sont principalement destin◆s aux techniciens et d◆cideurs, mais peuvent ◆tre utiles aux scientifiques, professeurs et ◆tudiants. Ils sont r◆dig◆s et con◆us de la fa◆on suivante:

- l'essentiel du contenu est accessible ◆ des personnes n'ayant pas suivi d'◆tudes sup◆rieures ou scientifiques;

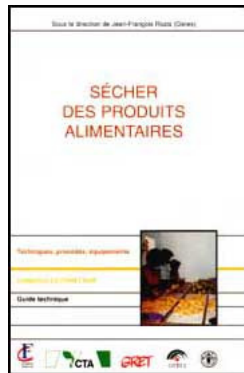
- les technologies sont situ◆es dans le contexte ◆conomique, social et culturel dans lequel elles peuvent contribuer au d◆veloppement;

- le lecteur trouve en annexe d'abondants renseignements pour l'aider dans sa recherche d'informations (bibliographies, adresses de centres de recherche, de spécialistes, de constructeurs...).

Soucieux d'élargir la diffusion et le rayonnement de cette collection, les éditeurs sont ouverts à toutes suggestions et collaborations.



[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">



 **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**

 *(introduction...)*

 **La collection « Le point sur »**

  **Ouvrages parus dans la collection « Le point sur »**

 **REMERCIEMENTS**

 **Avant propos**

 **Introduction**

Première partie: L'environnement d'une activité de séchage

Deuxième partie: Notions de base sur le séchage des produits alimentaires

Troisième partie: Quelques notions approfondies sur le séchage

Annexes

Ouvrages parus dans la collection « Le point sur »

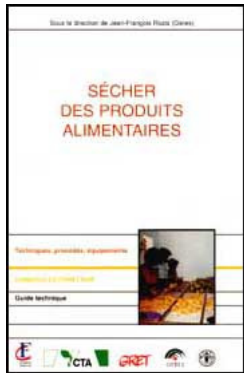
• **Du grain à la farine (1988, 140 FF)**

- **Les éoliennes de pompage (1989, 100 FF)**
- **Danger, termites ! Préserver les constructions des dégâts des termites. (1990, 100 FF)**
- **L'irrigation villageoise. Gérer les petits périmètres irrigués au Sahel. (1992, 170 FF)**
- **Produire du savon. Technique de production à l'échelle artisanale et micro-industrielle. (1992, 80 FF)**
- **Diagnostic rapide pour le développement agricole (1993, 95 FF)**
- **Conserver et transformer le poisson (1993, 130 FF)**
- **La culture des champignons (1993, 130 FF)**
- **Jardins des villes, jardins des champs. Maraîchage en Afrique de l'Ouest, du diagnostic à l'intervention. (1994, 190 FF)'**
- **Transformer les fruits tropicaux (1995, 140 FF)**
- **Guide d'aide à la décision en agroforesterie (1995, Tome 1: 125 FF - Tome 2, Fiches techniques: 125 FF)**



[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

 **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**



- 📄 **(introduction...)**
- 📄 **La collection « Le point sur »**
- 📄 **Ouvrages parus dans la collection « Le point sur »**
- ➔ 📄 **REMERCIEMENTS**
- 📄 **Avant propos**
- 📄 **Introduction**
- 📄 **Première partie: L'environnement d'une activité de séchage**
- 📄 **Deuxième partie: Notions de base sur le séchage des produits alimentaires**
- 📄 **Troisième partie: Quelques notions approfondies sur le séchage**
- 📄 **Annexes**

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a été rédigé par Jean-François Rozis, GERES (Groupe énergies Renouvelables et Environnement) avec l'appui d'Alain Guinebault (GERES), auteur de la première édition (« Le point sur le séchage solaire », éditions du GRET, 1986) dont certaines parties sont conservées.

Ce travail a été rendu possible grâce au concours de:

- la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), Italie;
- le ministère de la Coopération et du Développement des Pays-Bas;
- le CTA (Centre technique de coopération agricole et rurale), Pays-Bas.

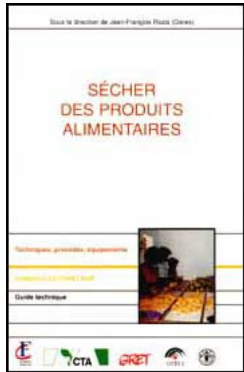
Nous remercions pour leurs différentes contributions:

- la cellule **Séchage ABAC-GERES, Burkina Faso;**
- l'**AFDI (Association française pour le développement international), France;**
- **ITDG (Intermediate Technology Development Group), Royaume Uni;**
- **SOLAGRO, France;**
- l'**Université d'Hohenheim, Allemagne;**
- **Fabrice Thuillier, GEFOSAT, France;**
- **CEAS (Centre écologique Albert Schweitzer), Suisse;**
- **Kate Sebag et Adam Brett, Tropical Wholefoods, Royaume Uni;**
- **Raymond Cartier, France;**
- **Philippe Duzet, GRET (Groupe de recherche et d'échanges technologiques), France.**

Et tout particulièrement le reste de l'équipe du GERES: Nicolas Cobrian (contribution rédactionnelle), Cédric Comte (réalisation des schémas) et Elisabeth Aillaud (saisie informatique du texte).



[Home](http://www24.brinkster.com/alexweir/):81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/">



📖 **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**

📄 *(introduction...)*

📄 La collection « Le point sur »

📄 Ouvrages parus dans la collection « Le point sur »

📄 **REMERCIEMENTS**

➔ 📄 **Avant propos**

📄 **Introduction**

Première partie: L'environnement d'une activité de séchage

Deuxième partie: Notions de base sur le séchage des produits alimentaires

Troisième partie: Quelques notions approfondies sur le séchage

Annexes

Avant propos

Tout comme l'édition de 1986, ce livre s'adresse d'abord aux techniciens ou ingénieurs qui sont confrontés à des choix techniques et opérationnels dans le domaine du séchage des produits alimentaires. Il peut aussi intéresser les responsables de projets qui cherchent à développer des activités de séchage.

Il s'agit avant tout d'un ouvrage technique. Il s'adresse, à l'exception de la première partie plus générale, à un public disposant d'un bagage scientifique de base. Le lecteur non scientifique désireux de disposer des informations essentielles sur le séchage des produits alimentaires s'orientera avec profit vers l'ouvrage de vulgarisation complémentaire: « Le séchage solaire des produits maraîchers et fruitiers », édité dans la collection *Guides pratiques aux conditions du GRET*.

La technique du sêchage des produits alimentaires, prêsentêe en dêtail dans cet ouvrage, ne s'entend cependant pas au sens le plus êtroit du terme. Tout au contraire, la technique est apprêhendêe ici non pas comme une fin en soi, mais:

- **comme un moyen de rêpondre ê des objectifs clairement dêtfinis (quel projet souhaite-t-on ?);**
- **comme un outil dont la dêtfiniion doit dêtpendre des paramêtres de son environnement (savoir-faire, disponibilitê locale en matêriels, contraintes d'approvisionnement en produit frais...);**
- **comme un investissement qui doit rapporter plus que ce qu'il ne coête, au sens large (c'est-ê-dire sur la base de coêts et d'avantages qui ne sont pas que monêtaires);**
- **comme un choix qui doit être meilleur que d'autres options envisageables (le sêchage n'est pas une panacêe, et encore moins un type de sêchoir particulier. Ils ne doivent être envisagês que si ils correspondent bien au choix optimal).**

Cet ouvrage a beaucoup empruntê ê l'ancienne êdition de 1986. Il en diffêre nêanmoins sur plusieurs points:

- **les rêussites enregistrêes ces dix derniêres annêes la conduite de projets de sêchage ont pu être « capitalisêes ». Il existe maintenant de nombreux types de sêchoirs bien êprouvês qui peuvent être soumis ê l'apprêciation du lecteur;**
- **une place plus grande a êtê donnêe aux conditions de rêussite des projets de sêchage, en particulier sur les plans de leur adêquation aux contextes locaux et de leur intêrêt socio-êconomique;**

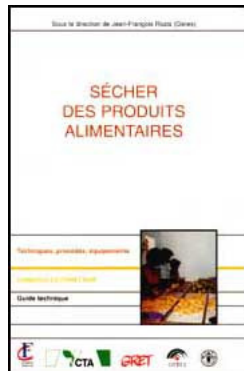
- une place particulière a été réservée aux grands séchoirs utilisés pour des productions commerciales, principalement vers les marchés des pays du Nord;
- un effort a été fourni pour rendre la lecture de cette ouvrage accessible au plus grand nombre.

L'information contenue dans ce document est forcément incomplète. Il est en effet difficile de rassembler toute l'information disponible sur le sujet. Nous sommes cependant convaincus de l'importance d'en faciliter une meilleure circulation, ne serait-ce que pour limiter les trop nombreux écueils recensés en ce domaine.

Nous vous convions donc à participer à cet effort de communication et à nous faire part de vos expériences, de vos suggestions, de vos critiques pour nous permettre d'apporter des réponses plus pertinentes dans une édition ultérieure.




[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">



 **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**

 *(introduction...)*

 La collection « Le point sur »

 Ouvrages parus dans la collection « Le point sur »

 **REMERCIEMENTS**

 **Avant propos**

  **Introduction**



- **Deuxième partie: Notions de base sur le séchage des produits alimentaires**
- **Troisième partie: Quelques notions approfondies sur le séchage**
- **Annexes**

Introduction

La conservation des produits alimentaires constitue un enjeu primordial dans les pays où la production agricole est concentrée sur quelques périodes de récolte. Il faut pouvoir « répartir » cette offre alimentaire dans le temps.

Le séchage des produits alimentaires est la plus ancienne et la plus répandue des méthodes employées pour les conserver. Il demeure pour cela l'une des options les moins onéreuses. Ce procédé trouve de nos jours, dans les pays en développement, une forme de « second souffle », pour plusieurs raisons:

- **Le séchage traditionnel (exposition au soleil sans équipement pour améliorer le séchage) peut maintenant être rendu plus efficace, au moyen de quelques améliorations relativement simples et peu coûteuses. Ces gains d'efficacité jouent plusieurs niveaux:**

- **le temps de conservation du produit peut être prolongé;**
- **la qualité nutritionnelle de l'aliment séché peut être nettement améliorée (de même pour le goût);**
- **le produit séché de façon artisanale, mais avec des méthodes améliorées, est plus facile à commercialiser. Les femmes, qui gèrent habituellement les opérations de séchage traditionnel, sont les premières**

bénéficiaires des revenus d'appoint ainsi générés.

• De nombreux efforts ont été fournis pour développer des techniques de séchage plus performantes que le séchage traditionnel, et toujours à coût modéré, surtout ces deux dernières décennies. On peut en particulier maintenant, avec des séchoirs de type artisanal ou semi-industriel, offrir des produits séchés de qualité, susceptibles d'intéresser:

- le marché international;

- les marchés urbains nationaux en pleine expansion.

• Les producteurs nationaux ont souvent répondu à l'expansion de la demande des marchés urbains nationaux en produits frais. Mais un manque de régulation dans les équilibres entre cette offre et cette demande, conduit de façon chronique à des invendus de production. À défaut de pouvoir entreposer des stocks sur le moyen terme, ces invendus se transforment rapidement en « pertes agricoles ». Le séchage est un moyen de différer la vente de ces produits dans le temps.

• Le développement de l'économie de marché dans les campagnes se fait toujours essentiellement dans les zones qui ont accès au marché (urbain et/ou international). En effet, au-delà d'un certain coût de transport jusqu'à ces marchés, il existe peu d'opportunités de vente de produits agricoles à bon prix. Les produits séchés disposent de ce titre de deux avantages:

- ce sont des produits à « haute valeur ajoutée » par kilogramme, si bien que le coût du transport est peu influent sur le prix de vente;

- ce sont des produits dérivés de produits frais qui ne souffrent généralement pas comme eux des mauvaises conditions de transport (qui

peuvent entraîner de sévères pertes par dégradation du produit).

◆ ce double titre, la promotion du séchage solaire peut devenir, sous certaines conditions, un outil du développement économique dans les zones les plus reculées.

Le présent document vise à faire le point sur les, différentes étapes de réflexion nécessaires au montage d'un projet de séchage solaire, qu'il s'agisse:

- d'un projet d'amélioration d'une unité de séchage existante;
- d'un projet de création d'une telle unité;
- d'un projet d'expansion d'une activité de séchage;
- d'un programme de diffusion ou de promotion des séchoirs pour aliments.

Le présent document traite essentiellement du séchage par arrivée d'air sur le produit sécher, car c'est la technique la plus simple et la plus efficace pour les gammes de production envisagées ici (traditionnel et semi-industriel). Par ailleurs, et sans pour autant négliger les autres sources d'énergie, l'accent est mis sur le séchage solaire. C'est la source d'énergie la moins coûteuse et la plus facile à mettre en place.

Le plan retenu dérive de deux préoccupations:

- proposer ces étapes de réflexion de façon progressive et dans leur ordre chronologique;
- faire en sorte que le lecteur technicien qui ne dispose pas d'un bagage scientifique approfondi puisse néanmoins bénéficier des informations essentielles et ne pas être « arrêté » en cours de lecture par des notions trop abstraites.

La première partie traite ainsi des aspects liés à l'environnement d'un projet de séchage. Cet environnement induira la définition du projet bien plus que l'inverse:

- quel est l'intérêt du séchage ?
- quelles sont les contraintes, physiques, économiques ou socioculturelles, qui peuvent influencer sur la nature d'un projet de séchage ?
- quels sont les objectifs assignés au projet ?

La deuxième partie présente les principaux éléments nécessaires d'une part à une bonne compréhension des mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui interviennent au cours du séchage mais aussi à l'amont et à l'aval de celui-ci, et d'autre part à une bonne formulation des choix économiques à opérer. Elle se compose en cinq chapitres:

- le chapitre IV, qui expose les phénomènes biochimiques susceptibles d'induire une dégradation du produit frais, l'impact séchage sur ces phénomènes, et la façon dont l'air circulant sur le produit peut entraîner ce séchage;
- le chapitre V, qui explique, au prix parfois de quelques simplifications, les principaux mécanismes physiques sur lesquels s'appuie le dimensionnement d'un séchoir adapté aux besoins de l'utilisateur;
- le chapitre VI, qui présente les types de séchoir parmi les plus répandus et/ou les mieux éprouvés par l'expérience de ces dix dernières années;
- le chapitre VII, qui précise les termes de l'organisation d'une activité de séchage, qui ne se limite pas au strict fonctionnement technique du séchoir (importance des activités à l'amont et à l'aval du séchage, organisation du

travail, organisation des locaux, respect des contraintes socioculturelles et/ou techniques qui pèsent sur l'activité...);





- le chapitre VIII enfin, dans lequel sont précisées les règles qui permettent de comparer les coûts et les avantages (non obligatoirement tous monétaires) de toutes les options techniquement identifiées auparavant.

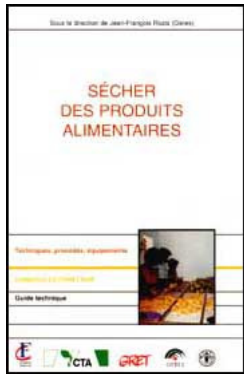
La troisième partie s'adresse à un public plus « averti », soit parce qu'il dispose d'une formation scientifique suffisante pour comprendre des informations plus abstraites (chapitre IX), soit parce qu'en tant que praticien du séchage, il s'intéresse tout particulièrement aux instruments et protocoles de mesure associés à l'activité de séchage (chapitre X).

Le chapitre XI sera l'occasion de mettre en pratique les informations théoriques présentées, au moyen de quelques exemples de calculs de dimensionnement technique commentés.



[Home](http://www24.brinkster.com/alexweir/)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/">

-  **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**
- ➔ **Première partie: L'environnement d'une activité de séchage**
 - Chapitre I: L'évolution des pratiques de séchage**
 -  **L'intérêt du séchage des produits alimentaires**
 -  **Quelques enseignements et éléments de méthode tirés des expériences passées**
 -  **Les voies actuelles de la recherche**



- **Chapitre II: La filière de séchage. Du produit frais à la consommation du produit séché**
 - ☰ Définir une filière de séchage
 - ☰ La pratique du séchage
 - ☰ Des conseils pour la consommation des produits secs
 - ☰ Fiches produits
- **Chapitre III: Avant tout' bien définir le projet**
 - ☰ Présentation des différents systèmes de séchage
 - ☰ Établir le cahier des charges à partir d'une analyse détaillée de la filière
 - ☰ Une méthode pour apprécier un système de séchage

Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)

Première partie: L'environnement d'une activité de séchage

Chapitre I: L'évolution des pratiques de séchage

L'intérêt du séchage des produits alimentaires

UNE TECHNIQUE ANCESTRALE BIEN IMPLANTÉE DANS LES PAYS DU SUD

La technique du séchage des denrées alimentaires est la plus répandue et la plus ancienne des méthodes de conservation des produits périssables. Son usage est communément partagé de par le monde pour la conservation des céréales et légumineuses.

Pour les autres produits (viande, poisson, légumes, fruits), la différence de contexte

socio-économique a permis, dans les pays industrialisés, l'émergence de nouveaux modes de conservation avec notamment la mise en place de chaînes du froid, relayée par l'implantation généralisée de réfrigérateurs et de congélateurs chez le consommateur.

Le producteur (transformateur) des pays du Sud, afin de conserver sa production non vendue ou non consommée en frais, doit pouvoir disposer d'une technique performante, facilement maîtrisable et peu coûteuse au regard de sa capacité d'investissement. Le séchage traditionnel, dit à l'air libre, reste une solution économiquement apte à répondre à ses attentes. Il présente toutefois des inconvénients importants, d'où l'intérêt des techniques et pratiques améliorées.

EN QUOI CONSISTE LE SÉCHAGE ?

Il s'agit, pour réduire fortement les réactions diverses participant à la décomposition de l'aliment, d'extraire une part importante de l'eau contenue dans le produit. Cette eau est éliminée par évaporation dans l'air environnant. Pour cela, il faut fournir de l'énergie (énergie d'activation) et, grâce à cette énergie, faire en sorte que cette eau migre au sein du produit, se transforme, en surface, en vapeur d'eau et soit entraînée par l'air extérieur.

Où trouver cette énergie? Suivant les conditions climatiques locales, il est fait appel soit au soleil et/ou au vent chaud, soit à la chaleur d'un foyer à combustion.

Bien sécher, c'est pouvoir maîtriser trois paramètres fondamentaux:

- l'énergie thermique apportée qui chauffe le produit et provoque la migration de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau;**
- la capacité de l'air environnant (appelé aussi air d'entraînement) à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de**

vapeur d'eau déjà contenue dans l'air avant son arrivée dans le séchoir et de la température à laquelle il a été porté;

- la vitesse de cet air au niveau du produit qui, surtout en début de séchage, doit être élevée (jusqu'à une certaine limite) de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau.

Il faut pouvoir sécher suffisamment rapidement (pour éviter le pourrissement du produit) mais pas trop vite (une croûte risque alors de se former en surface) ni à trop haute température (le produit se dénature, noircit).

Il faut aussi, pour bien conduire l'opération de séchage, prendre en compte les caractéristiques du produit frais (on ne sèche: pas un poisson gras comme un légume-feuille), se demander quelles doivent être celles du produit final (texture, couleur, goût spécifique).

Bien maîtriser un processus de séchage, c'est aussi contrôler la qualité des produits frais et sec, à l'amont et à l'aval du séchage lui-même (approvisionnement en produits frais, tri de ces produits, parage, prétraitements, stockage aval, contrôle du produit sec, éventuelle incorporation d'agents de saveur et de conservation, conditionnement, stockage amont, éventuellement chaîne de distribution...).

PRINCIPAUX ENJEUX LIÉS AU SÉCHAGE

Les processus de conservation qui résultent des pratiques traditionnelles de séchage sont sophistiqués. Il faut absolument se garder de minimiser des savoir-faire et des techniques qui ont su s'adapter et tirer parti des contraintes du milieu. Il est toutefois toujours possible d'améliorer les pratiques et les outils du séchage pour mieux s'adapter aux nouvelles exigences de qualité du produit final.

Les limites du séchage traditionnel à l'air libre

La forte implantation du séchage traditionnel à l'air libre repose sur:

- la bonne maîtrise locale de cette technique;
- l'absence d'outillages, d'équipements onéreux;
- le faible coût final et la bonne acceptation du produit séché obtenu.

Mais en contrepartie le séchage traditionnel présente des inconvénients:

- la forte dépendance vis-à-vis des conditions climatiques. Sécher un produit en saison sèche (air sec et chaud, fort rayonnement solaire) donne de bons résultats. Mais dès l'arrivée de la saison des pluies, ou lors d'une dégradation momentanée des conditions climatiques, le séchage à l'air libre s'avère inopérant et les pertes sont importantes;
- la faible qualité nutritionnelle et microbiologique du produit séché, ainsi que ses caractéristiques parfois médiocres de goût, d'aspect, voire d'odeur. Les effets cumulés d'une exposition directe au soleil (perte en vitamines, brunissement), d'activités enzymatiques (déstructuration du produit) et du développement microbien (risque de présence d'éléments pathogènes) donnent un produit de piètre qualité. Il est d'ailleurs généralement consommé en sauce (tomate, oignon, chou, légumes-feuilles...), pour le goût qu'il apporte. Le plus souvent, le produit n'est pas suffisamment valorisé pour pouvoir atteindre de nouveaux marchés (milieu urbain, export) et sa durée de conservation ne permet pas la constitution de stocks assurant une sécurité alimentaire en période creuse;
- la mauvaise protection face aux nuisibles. Le séchage à l'air libre sans système

de protection efficace expose le produit à toutes sortes d'attaques extérieures (prélèvements par les rongeurs, infestation par les insectes, etc.);

- l'importance du temps que nécessite cette pratique. Les personnes chargées du séchage emploient une grande partie de leur temps en préparation, manipulation, protection contre les nuisibles...

Les conséquences sont multiples:

- durée de conservation réduite et pertes importantes;

- manque d'un moyen de conservation fiable et de circuits de distribution appropriés;

- risques de déficit en produits vitaminés particulièrement chez les enfants, notamment en période de culture uniquement.

Des enjeux nouveaux, liés à l'apparition de nouveaux marchés

Des études de marchés récentes, notamment en Europe, ont mis en évidence une demande importante en produits tropicaux séchés (fruits, condiments).

L'approche de ces marchés porteurs suppose tout à la fois des qualités de produits répondant à des normes très rigoureuses et des niveaux d'approvisionnement tels que cela nécessiterait la mise en place, dans les pays du Sud, d'unités de séchage semi-industrielles. Les enjeux sont multiples: création d'emplois, apport de devises, valorisation de produits dont la production locale est parfois excédentaire (mangue par exemple). Il ne faut toutefois pas se cacher que l'accès à ces marchés demeure difficile.

Le développement accéléré de l'urbanisation dans les pays du Sud a par ailleurs modifié

considérablement les termes de la demande de produits alimentaires, en particulier:

- la demande pour les produits vitaminés ou protéines a fortement augmenté, du fait de l'apparition de nouveaux crêneaux de consommation et de l'apparition de nouvelles couches sociales;
- pour les mêmes raisons, il y a une demande pour une diversité dans l'alimentation.

Le produit sec peut répondre en partie de telles attentes.

Par ailleurs, le développement parfois spectaculaire de la demande urbaine en produits périssables tels que les fruits et les légumes frais modifie aussi les modalités de leur production, qui a sensiblement augmenté en volume dans de nombreux pays. Mais, du fait des difficultés de réguler l'équilibre de l'offre et de la demande de tels produits, ils sont souvent surabondants en période de pleine récolte. Le séchage peut être un moyen efficace de mieux répartir dans le temps leur offre.

Quelques enseignements et éléments de méthode tirés des expériences passées

Face à ces enjeux et en réponse de multiples sollicitations de la part des partenaires locaux (groupements villageois, associations locales, structures de recherche, organismes internationaux, pouvoirs publics, promoteurs...), de nombreux programmes de promotion de pratiques de séchage améliorées ont été lancés, avec des résultats inégaux.

De ces expériences l'on peut tirer quelques enseignements, cerner les écueils à éviter, dresser une méthodologie d'action et dessiner les voies d'une recherche-action en la matière.

SE GARDER DES APPROCHES TROP TECHNICISTES

Combien de sècheurs tous plus ingénieux les uns que les autres sont en train de finir paisiblement leurs jours dans un coin d'atelier, sur le terrain vague d'un groupement villageois. Le mythe de l'intervention technologique a conduit à une série d'échecs. C'est ainsi qu'ont été conçus et réalisés des objets de laboratoire, lesquels se sont vite avérés incompatibles avec le contexte d'application.

Il y a encore un travail de conception et de mise au point d'outils de séchage à faire, mais à condition de respecter une méthodologie de recherche interactive et des cahiers des charges qui mettent au moins au même niveau, les aspects culturels, sociaux, économiques et les performances techniques (rendement thermique de séchage), surtout pour un séchoir à usage domestique.

Parmi les multiples prototypes, il y en a peu qui puissent servir de référence pour une action de diffusion de sècheurs.

Dans un rapport sur les sècheurs solaires diffusés au Sahel (1) en 1988, seuls trois sècheurs de petite taille ont été retenus pour faire l'objet d'une diffusion massive pour le séchage domestique. Force est de constater qu'en 1995, la liste ne s'est pas beaucoup allongée.

(1) CEAO/CILSS/CRES, Madibo Diko, 1988. objectifs précis établis au cas par cas. Prenons l'exemple d'un séchoir familial destiné à une zone rurale d'un pays en développement. Ce séchoir devra être:

On peut avancer plusieurs raisons à cette succession d'échecs:

- **améliorer l'outil ne résout pas tous les problèmes, il faut prévoir des mesures d'accompagnement. Face à des pertes de produits après récolte, à des problèmes de qualité ou de débouchés pour des produits secs, les personnes**

concernés pensent souvent qu'un outil plus perfectionné permettra de tout résoudre. Mais un outil ne représente une solution que si sa diffusion est correctement faite, ce qui signifie, pour un nouveau séchoir:

- former les fabricants, contrôler l'homogénéité et la qualité de sa fabrication, assurer un réseau de maintenance;

- prévoir le cas échéant, des systèmes de crédit adaptés, pour faciliter les investissements;

- former les utilisateurs.

• les approches produit/consommateur/marché ont été trop négligées. Il faut adapter les produits aux différentes catégories de consommateurs, élaborer des guides de recettes, améliorer le conditionnement des nouveaux produits pour une meilleure présentation/conservation, assurer leur promotion;

• les réseaux d'information, bases de données ouvertes au plus grand nombre font défaut. Un organisme ou un consultant abordant pour la première fois la problématique du séchage a tendance à raisonner de la manière suivante: si la pratique du séchage n'est pas suffisamment utilisée ou performante, il faut inventer un nouveau séchoir. Et l'on est reparti dans une série d'expérimentations déjà faites par ailleurs, ce qui équivaut à une perte de temps lorsque cela n'aboutit pas directement à une impasse technologique;

• les éléments devant servir à la définition d'un séchoir ne sont pas tous pris en compte. La mise au point d'un séchoir ne doit pas servir à mettre en valeur la maîtrise technique de son inventeur mais répondre au mieux à des

- individuel;

- **adapté et apprécié par les femmes, qui en sont les principales utilisatrices (formes, dimensions, maniabilité, simplicité d'utilisation...);**
- **fiable et résistant;**
- **d'entretien faible ou nul;**
- **reproductible en matériaux locaux;**
- **utilisable pour des produits différents;**
- **abordable pour une famille rurale...**

Chaque facteur a son importance. Il n'y aura pas d'appropriation d'un séchoir, même peu coûteux, s'il faut changer régulièrement sa couverture plastique, si un coup de vent le renverse et le détruit.

La conception et la mise au point d'un séchoir ne constituent qu'une partie d'un programme de promotion du séchage. Pour apporter des réponses satisfaisantes, il faut être innovant et impliquer des différents acteurs (ce qui va souvent de pair) sur chaque volet du programme.

BIEN DÉFINIR LES GRANDS OBJECTIFS

Avant toute chose, il est nécessaire de savoir quels sont les objectifs visés, et donc les pratiques concernées, car cela conditionnera la conception du séchoir, s'il y a lieu, et les diverses mesures d'accompagnement pour l'amélioration des pratiques.

Sécher pour vendre ou pour consommer la production

Avant de conclure sur l'opportunité d'une amélioration ou d'une introduction d'outils de

séchage, il faut se poser la question suivante: l'objectif est-il d'accroître la vente de produits secs, voire d'introduire une nouvelle activité économique ou surtout de limiter les pertes après une récolte destinée à l'autoconsommation et donc, éventuellement, vendre quelques excédents de produits secs?

Dans le premier cas, l'outil doit être conçu, en réponse aux besoins du producteur-commerçant comme un outil de production permettant d'assurer la satisfaction du consommateur. Dans le second cas, il s'agit de penser un outil en réponse aux besoins du producteur-consommateur qui cherche à limiter les pertes en séchant les produits frais non consommés non vendus. Il faut alors raisonner en termes de services rendus et non en termes strictement commerciaux. On ne demande pas à son réfrigérateur de procurer des revenus.

Un système pour conserver ou pour raffiner le produit

On verra par la suite que l'on ne conçoit pas nécessairement un séchoir destiné à améliorer la conservation pour des besoins domestiques comme un séchoir à finalité commerciale. Ce dernier doit permettre d'obtenir des produits de qualité supérieure, raffinés, par rapport à ceux séchés traditionnellement:

- un système de conservation à usage domestique sera certainement plus rustique, son rôle sera d'amener le produit à un taux d'humidité relativement bas avec une bonne qualité, l'aspect final (brunissement, croûtage, hétérogénéité...) ayant moins d'importance et le coût du séchoir étant déterminant;

- un système visant à raffiner un produit destiné à la vente nécessitera un contrôle plus fin des divers paramètres de: séchage. Il devra permettre de définir l'allure idéale permettant d'obtenir un produit qui soit non seulement stabilisé mais qui, de plus, présente des caractéristiques (goût, arôme, couleur, texture, forme...) propres à satisfaire la clientèle visée. Le coût du séchoir est de moindre

importance (un séchoir plus performant, éventuellement plus cher, permettra de vendre un produit de meilleure qualité, donc plus cher).

Un usage domestique, artisanal ou semi-industriel

Une conception appropriée du séchoir est aussi fonction du type d'utilisateur (culture, habitudes, sexe, connaissances techniques, mode d'organisation...):

- pour un usage domestique, les notions de facilité d'emploi, d'entretien, de poids, d'esthétique vont être mises en avant, le séchoir étant le plus souvent utilisé par les femmes;

- dans un contexte artisanal, semi-industriel, ce sont les questions de quantité et de qualité des produits séchés qui priment. Les utilisateurs devront alors apprendre à utiliser et à gérer ce séchoir au même titre que pour n'importe quelle autre activité économique.

BIEN CONNAÎTRE LES CONDITIONS DE PRODUCTION AGRICOLE

Il est particulièrement important de bien connaître les conditions de production (organisation du travail, périodes de récolte, rendements, etc.) ainsi que les qualités et quantités produites.

Programme de séchage de mangues au Sénégal

Cette action, menée par l'AFDI, avait pour but de permettre, par la diffusion de petits s choirs solaires performants, de valoriser la mangue, afin de la vendre au niveau national, voire à l'étranger. Le « séchoir cadre », adapté aux matériaux disponibles localement, a été sélectionné et diffusé auprès de groupements villageois.

Une **étude de la production de mangues** a été établie que celle-ci s'étale d'avril à septembre, avec une pointe en juin-juillet, mois pendant lesquels se posent les problèmes d'écoulement qui ont motivé le projet de séchage.

Les variétés que l'on rencontre le plus fréquemment sont les variétés locales: Sierra Leone, tendouk, diourou et papaye (fin mai à mi-juin); pesso (mi-juin à mi-juillet). Moins fréquentes mais en très forte progression, les variétés améliorées keitt et kent sont plus tardives (mi-juillet) et fin septembre).

L'ensoleillement journalier moyen est maximum en mars, avril et mai (9,5 à 10 h par jour). Il diminue en juin (7 h par jour). C'est en juillet, août et septembre qu'il est le plus faible (5,5 h en juillet/septembre et 4,7 h en août). Ainsi, l'ensoleillement est suffisant pour permettre le séchage solaire des mangues en une journée durant les mois de mai, juin et jusqu'à mi-juillet). Après cette date, le couvert nuageux et l'installation progressive des pluies rendent le séchage solaire plus difficile.

Nombre de jours de pluie mensuel moyen à Ziguinchor (observation de 1931 à 1960)

Mois	mai	juin	juillet	août	septemb.	octobre	nov.
Jours de pluie	1,5	10,5	21,1	25,4	21,4	11,2	1,7

Avec les techniciens de l'AFDI on peut donc conclure que **les conditions climatiques limitent le séchage solaire des mangues et celui des variétés locales. La période favorable s'étend de mi-mai à mi-juillet**). Les mangues greffées tardives, qui fournissent un produit séché de qualité supérieure, sont mûres à une époque où le séchage solaire est difficile. Les alternatives suivantes ont donc été proposées en conclusion de l'étude: **Pour rentabiliser au maximum les séchoirs**, il faut sécher d'autres produits en plus de la mangue. **Pour profiter au mieux du marché existant**, il faut conserver les mangues greffées tardives par d'autres moyens que le séchage solaire (sirops, jus, confitures, marmelade, purées...).

BIEN CONNAÎTRE LES MODES DE CONSOMMATION ET LES MARCHÉS

Lorsqu'il s'agit de développer une filière économique, les règles fondamentales sont:

- d'adapter le produit au goût du consommateur;
- d'obtenir un coût de production compatible le prix auquel le produit pourra être vendu;
- de promouvoir le produit;
- d'assurer sa distribution.

Pour les produits séchés des pays en développement, on peut distinguer trois grands types de marchés:

- le marché local sur lequel s'écoulent les produits séchés traditionnellement, souvent caractérisés par leur courte durée de conservation et leurs faibles qualités de goût et d'aspect, mais vendus à un prix très bas;
- le marché urbain national pour lequel le produit doit être mieux présenté et avoir des qualités finales acceptables pour une clientèle plus exigeante, mais prête à payer plus cher pour ce type de produit;
- le marché hors du pays producteur et vers les pays du Nord pour lequel le produit doit être homogène et respecter des normes qualitatives très rigoureuses. On distingue alors une grande variété de modes de commercialisation (en tant que produit fini ou intermédiaire, intégré ou non à d'autres aliments, visant une clientèle bien définie...). On sait qu'atteindre ces marchés se révèle très

difficile..

D◆FINIR UNE STRAT◆GIE DE DIFFUSION IDES S◆CHOIRS

Il ne suffit pas de disposer d'un mod◆le adapt◆ aux besoins et ayant fait ses preuves pour le voir s'autodiffuser rapidement. Tout outil technologique, aussi simple soit-il, demande que des actions d'encadrement soient mises en œuvre pour accompagner sa diffusion et permettre une modification p◆renne des pratiques.

Pour d◆passer le stade du prototype ou de la dizaine d'exemplaires, c'est une d◆marche indispensable.

Les voies actuelles de la recherche

Depuis une trentaine d'ann◆es, de multiples travaux ont ◆t◆ men◆s dans les diff◆rents domaines techniques de la pratique du s◆chage:

- mise au point de s◆choirs;**
- traitement des produits;**
- d◆termination d'allures de s◆chage;**
- m◆thodes de conditionnement...**

En ce qui concerne la mise au point des s◆choirs, il reste encore des am◆liorations et des adaptations ◆ faire (utilisation de sels dessinateurs, am◆lioration des couvertures transparentes ◆ co◆t faible, stockage thermique...). Comme on l'a vu pr◆c◆demment, il faut, afin d'apporter la meilleure r◆ponse possible, opter syst◆matiquement pour une recherche interactive impliquant les personnes concern◆es. Les m◆thodologies de recherche dans ce domaine ont ◆volu◆ (association aux recherches de socio-

◆conomistes...).

Le développement de la pratique du séchage se fera aussi grâce à la réalisation de transferts scientifiques en direction des universités des pays en développement. L'impact, aussi, une nette évolution se dessine: de la recherche fondamentale sans grand rapport avec les besoins du pays, on s'oriente vers une recherche plus appliquée. La promotion du séchage amélioré dans les pays du Sud passe par un soutien des organismes de recherche locaux, en leur fournissant le matériel adéquat (boucle de séchage...) pour apporter les informations adaptées aux contextes: détermination des allures de séchage «idéales» pour les produits locaux, conditionnements spécifiques...

Chapitre II: La filière de séchage. Du produit frais à la consommation du produit séché

Définir une filière de séchage

On désigne par filière l'ensemble du parcours suivi par un produit, de sa production à sa consommation, en passant par sa transformation et sa commercialisation, et ce pour une utilisation donnée. La filière diffère si le produit est consommé frais directement après récolte, ou s'il subit une transformation pour une conservation de plus ou moins longue durée (pasteurisation, déshydratation, transformation en jus, confiture, etc.), s'il est destiné à l'alimentation humaine ou animale, etc.

On parle de filière de séchage lorsque le principal procédé de conservation utilisé est le séchage.

DESCRIPTION D'UNE FILIÈRE DE SÉCHAGE

Pour un même produit, il y a plusieurs filières de transformation possibles. Il conviendra en premier lieu d'opérer un choix entre les différentes possibilités existantes, le séchage amélioré en est une parmi beaucoup d'autres. En s'en tenant au séchage, il existe,

ensuite, diverses qualités de produit. Chaque qualité correspond une gamme de clientèle, un mode de consommation, un réseau de distribution, un mode de commercialisation, etc.

L'analyse du « cahier des charges » du projet envisagé (cf. chapitre III) permettra de préciser la filière requise. Il est donc important de bien appréhender les composantes d'une filière de séchage. Pour en faire une première description, il faut considérer le produit et les différentes étapes qu'il va devoir franchir avec tous les éléments de contexte.

Le produit

Quatre sortes d'informations doivent être prises en compte pour déterminer la qualité qu'il est possible et souhaitable d'atteindre:

- données relatives à la production agricole. Pour chaque produit et chaque variété, on doit connaître les périodes de culture/récolte ainsi que les quantités disponibles au niveau local, dans les zones voire les pays environnants. On établit ainsi un calendrier de récolte;
- données relatives à la nature du produit et à son comportement au séchage. Chaque produit a ses propres caractéristiques (teneur en eau initiale, état de maturation, texture, comportement au séchage, fragilité par rapport aux attaques extérieures, pH...). De la nature du produit dépendra le choix du modèle de séchoir adapté à son traitement, le processus de séchage à suivre, les additifs éventuels à utiliser pour une meilleure conservation, ainsi que le mode de conditionnement le plus approprié;
- informations relatives au contexte économique. Le séchage est particulièrement intéressant si l'on peut disposer de grandes quantités de produits frais, à bas

prix. Qu'il s'agisse de rentabiliser son séchoir (vente différée) ou d'assurer sa sécurité alimentaire (consommation différée), il est important de connaître le prix de vente du produit frais, les quantités en vente, les variétés disponibles, la situation du marché, etc.;

- informations relatives au contexte sociologique. Il s'agit ici de considérer le degré d'acceptation d'un produit alimentaire dans une société donnée. Celui-ci est souvent lié à l'ancienneté de son implantation. L'approche est différente s'il s'agit d'un produit traditionnellement cultivé et ou s'il s'agit d'un produit nouveau (produit maraîcher en zone sahélienne, par exemple) pour lequel les habitudes culinaires sont en cours d'assimilation ou subissent une modification.

La pratique du séchage

La « filière séchage » fait appel au séchage comme procédé de transformation. Celui-ci se compose en plusieurs phases comprenant, outre le séchage proprement dit, la préparation, le prétraitement et le conditionnement du produit. Ces différentes étapes sont brièvement décrites ci-après. Elles seront présentées plus en détail dans la partie suivante.

LA PRÉPARATION DES PRODUITS AVANT SÉCHAGE

Le lavage permet d'enlever les souillures et une grande partie des micro-organismes superficiels. L'eau doit être propre et assainie, sans quoi le résultat sera l'inverse de celui escompté.

Le triage permet de sélectionner les produits en bon état et pas trop mûrs, qui supporteront l'attente d'être en phase avancée du séchage pour n'être plus alors susceptibles de se dégrader.

Le découpage en dés, tranches, lamelles ou filets facilite le séchage. Pour les produits épais, cette opération est indispensable sinon le séchage se fait trop lentement et l'inhibition des micro-organismes risque d'être incomplète.

Le prétraitement a pour but d'améliorer la conservation, le goût ou l'apparence du produit. Il permet en particulier d'adapter les produits à la demande. Il se pratique de différentes manières (le blanchiment, la sulfuration, le sucrage, le salage, le fumage, etc.). Elles sont abordées au chapitre VII.

LA CONDUITE DU SÉCHAGE

Le séchage augmente la durée de conservation du produit mais modifie sa qualité : aspects, texture, goût, composition nutritionnelle. L'appréciation de la qualité des produits dépend fortement des habitudes alimentaires des consommateurs. Telle caractéristique pourra être rejetée ici et au contraire appréciée là.

Les critères à retenir sont fonction de la nature même du produit et de l'usage qui doit en être fait : pour les fruits séchés, par exemple, il s'agira surtout de la teneur en vitamines et de l'aspect, pour le cacao de l'arôme...

Les dégradations du produit sont principalement liées à la durée et à la température de séchage. Pour chaque produit, on peut définir une température maximale admissible (T_m) qu'il est recommandé de ne pas dépasser. Les « coups de chaleur » brefs, pratiquement inévitables en séchage solaire, sont cependant tolérables.

Une température élevée pendant un certain temps entraîne en particulier deux réactions qui seront précisées au chapitre IV (le brunissement non enzymatique et le croûtage), qui entraînent une dégradation de la qualité du produit, et pour la deuxième peut empêcher le séchage de se poursuivre correctement.

Les autres modifications peuvent concerner la perte d'arômes, la destruction de vitamines ou la dénaturation des protéines...

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE APRÈS LE SÈCHAGE

Le conditionnement doit bien sûr être réalisé le plus rapidement possible de manière à limiter les contaminations (poussière, microbes...). Il est effectué dès que les produits sortant du séchoir sont refroidis.

Outre l'incitation à la vente et l'information du consommateur (quantité, date de fabrication, etc.), l'emballage du produit doit permettre de remplir deux fonctions essentielles:

- protéger le produit contre les souillures (microbes, insectes, poussières...), contre la vapeur d'eau, la lumière, contre l'oxygène pour les produits gras, et contre les détériorations physiques;**
- faciliter la manutention, pour le transport et le stockage du produit.**

Le choix des matériaux utilisés pour le conditionnement dépend:

- de la nature de l'aliment;**
- des conditions de stockage et de manutention (température, humidité, risques de détérioration physique...);**
- des propriétés protectrices des matériaux;**
- de sa facilité d'emploi;**
- de sa disponibilité et de son coût sur les marchés locaux.**

Des conseils pour la consommation des produits secs

LÉGUMES ET CÉRÉALES

Trempage

On recouvre d'eau froide et on laisse tremper pour que le produit reprenne l'eau perdue lors du séchage. Un trempage d'une demi-heure à deux heures donne un produit acceptable. Un trempage de deux à six heures donne un produit plus tendre. On rajoute de l'eau au fur et à mesure que celle-ci est absorbée par le produit, de façon à ce que celui-ci ne soit jamais à l'air libre.

Cuisson

On cuit les produits dans l'eau de trempage car celle-ci contient les sels minéraux utiles à l'organisme humain. On ajoute de l'eau au fur et à mesure de la cuisson. On peut faire cuire les tomates, choux et légumes verts séchés sans trempage préalable. La cuisson est arrêtée lorsqu'ils sont tendres.

Assaisonnement

Au cours du séchage, les légumes perdent beaucoup de leur saveur. Il est recommandé de les relever avec de l'ail, oignon et autres herbes.

FRUITS

Les fruits secs peuvent être consommés tels quels ou cuits (un trempage préalable est possible). Habituellement, on rajoute 1/4 de tasse de sucre par tasse de fruit sec. Le sucre doit être rajouté en fin de cuisson pour qu'il n'empêche pas la réabsorption de l'eau par le fruit. Quelques grains de sel aident à retrouver la douceur du fruit. On peut ajouter du

jus de citron, orange ou pamplemousse: cela augmente la saveur et permet d'ajouter de la vitamine C.

Fiches produits

Chaque produit réagit différemment au séchage. Il existe, de ce point de vue, plusieurs grandes familles, fonction des caractéristiques intrinsèques des produits considérés (forme, capillarité, homogénéité, teneur en sucre, en sels minéraux, état de maturité...). En leur sein, les diverses variétés présentent elles-mêmes des différences de comportement au séchage.

Les fiches fournissent des informations de base concernant le traitement à appliquer aux produits les plus couramment séchés:

- la préparation avant séchage;**
- les caractéristiques du processus de séchage (les humidités sont données en base humide);**
- l'utilisation du produit séché.**

Liste des fiches produits

**Viande
Poisson**

**Blé, maïs, mil et sorgho
Abricot et pêche
Banane
Mangue et papaye**

Chou
Gombo
Haricot vert
Oignon
Piment et poivron
Pomme de terre
Tomate
Carotte

NOM DU PRODUIT

VIANDE

S ♦ CHAGE

Assez d ♦ licat

SOURCES DES INFORMATIONS

GERES

Ingr ♦ dients	- eau
----------------------	-------

	- sel facultatif
--	------------------

LES ♦ TAPES DE PR ♦ PARATION CONSEILL ♦ ES

1. D ♦ coupage de la viande au choix:

- en morceaux cubiques de 2 ♦ 3 cm de c ♦ t ♦
- en lani ♦ res fines rie 1 ♦ 1,5 cm d' ♦ paisseur

2. Mettre directement dans le séchoir, un prétraitement préalable est possible:

- fumage et/ou salage
- trempage pendant 1 minute dans une solution saline saturée et ébullition

PARAMÈTRES DE SÈCHAGE

Teneur en eau initiale	75 %
Teneur en eau finale recommandée	30 %
Température maximale	50 à 60°C

CONSERVATION	Quelques mois
---------------------	---------------

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Nettoyer la viande avec de l'eau si nécessaire.
- Laisser tremper à froid ou à chaud.
- Laisser mijoter. La viande peut être dorée à la poêle auparavant.

OBSERVATIONS

1. La viande est un produit assez difficile à sécher car elle est facilement altérable par les micro-organismes.
2. Éviter les viandes jeunes qui donnent un produit séché de qualité médiocre. Les viandes vieilles sont plus dures après séchage et plus faciles à conserver.

3. Préférer des viandes maigres et enlever la graisse quand c'est possible afin de limiter le rancissement de la viande après séchage.

4. Le choix du salage, du fumage dépend fortement des goûts et des habitudes culinaires des consommateurs.

NOM DU PRODUIT	POISSON
----------------	----------------

SÉCHAGE	Délicat
---------	----------------

SOURCES INFORMATIONS	GERES
----------------------	--------------

Ingrédients	- eau
	- sel facultatif

LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1.  vidage du poisson

2. Lavage

3. Découpage en fonction de la grosseur du poisson:

- en dessous de 500 g. le poisson peut être laissé entier surtout s'il est maigre

- au-delà, on le coupe une ou plusieurs fois dans le sens de la longueur

4. Mettre directement dans le séchoir, un prétraitement préalable est possible:

- fumage et/ou salage

PARAMÈTRES DE SÈCHAGE

Teneur en eau initiale	75 %
Teneur en eau finale recommandée	25-30 %
Température maximale	55°C
Rapport de séchage	1/3 ou 1/4
Critère de fin de séchage	Les morceaux de poisson ne doivent pas se plier facilement

CONSERVATION	Quelques mois
---------------------	---------------

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Nettoyer le poisson à l'eau chaude.
- Laisser mijoter. Le poisson peut être frit à la poêle auparavant.

OBSERVATIONS

1. Le poisson est un produit très difficile à sécher car il est très altérable: c'est un produit très favorable au développement des microbes, qui a tendance à rancir facilement.
2. Les poissons gras sont moins aptes au séchage car ils rancissent très vite.
3. Le choix du salage, du fumage ou du sucrage dépend fortement des goûts et des

habitudes culinaires des consommateurs.

4. En général, la fermentation est recherch e pour le goût particulier qu'elle procure.

NOM DU PRODUIT **BLÉ, MAÏS, MIL et SORGHO**

SÉCHAGE **Facile**

SOURCES DES INFORMATIONS **GERES, GRET**

PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

	BLÉ	Maïs	Mil et sorgho
Teneur en eau initiale	20 %	35 %	21 %
Teneur en eau finale recommandée	16 %	13-15 %	14 %
Température maximale	45�C	60�C pour la germination	60�C

OBSERVATIONS

- Laisser refroidir avant stockage.
- Ne pas stocker avant séchage.

NOM DU PRODUIT **ABRICOT et PECHE**

SÉCHAGE **Facile**

SOURCES DES INFORMATIONS	GERES
--------------------------	--------------

Ingrédients	- bicarbonate de potassium facultatif
--------------------	---------------------------------------

LES TAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Pluchage

2. Dénoyautage

3. Découpage au choix:

- coup en deux

- tranches de moins de 1 cm d'épaisseur

- quartiers

4. Mettre directement dans le séchoir, un prétraitement préalable est possible

PARAMÈTRES DE SÈCHAGE

Teneur en eau initiale	85 %
Teneur en eau finale recommandée	15 à 18 %
Température maximale	65°C
Rapport de séchage	1/5 à 1/4
Critère de fin de séchage	Produit flexible et coriace

CONSERVATION	1 à 2 ans maximum
---------------------	-------------------

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Utiliser tel quel en produit de bouche.
- Utiliser après trempage pour faire des pâtisseries.

OBSERVATIONS

- Un prétraitement au bicarbonate de potassium est conseillé (7 % pendant 180 secondes) pour l'abricot.

NOM DU PRODUIT	BANANE
----------------	---------------

SÉCHAGE	Délicat
---------	---------

SOURCES INFORMATIONS	CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES
----------------------	---------------------------------

Ingrédients	- eau
	- sucre conseillé

LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage
2. Épluchage
3. Découpage en rondelle
4. Prétraitement avant séchage conseillé. Au choix:

- trempage 5 heures dans de l'eau additionnée de jus de citron (jus d'un citron/ litre d'eau)
- trempage 5 heures dans une solution sucrée (700 g/litre d'eau) et contenant du jus de citron (jus d'un citron/litre d'eau)

PARAMETRES DE SÉCHAGE

Teneur en eau initiale	70 %
Teneur en eau finale recommandée	15 %
Température maximale	70°C
Rapport de séchage	1/10 pour séchage sans trempage préalable
	1/5 pour séchage avec trempage préalable

CONSERVATION 1 an

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Utiliser tel quel comme produit de grignotage.
- Utiliser après un trempage de 30 mn comme garniture de pâtisseries.

OBSERVATIONS

1. Le trempage préalable est recommandé car le séchage de la banane est difficile à réussir: le produit brunit très facilement.
2. Le trempage préalable dans la solution sucrée améliore le goût qui se rapproche de la banane fraîche, et facilite la conservation.

3. Le jus de citron peut être remplacé par une solution de métabisulfite raison de 3 g de métabisulfite par litre d'eau utilisé.

NOM DU PRODUIT **MANGUE et PAPAYE**

SÉCHAGE **Assez facile**

SOURCES DES INFORMATIONS **CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES**

Ingrédients	- eau
	- sucre facultatif
	- jus de citron

LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage

2. Épluchage

3. Découpage au choix

- lamelles de 1,5 cm d'épaisseur
- dés

4. Mettre directement dans le séchoir, un prétraitement préalable est facultatif

PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

Teneur en eau initiale	80-85 %
Teneur en eau finale recommandée	12 - 15 %
Température maximale	70°C, 55°C en dernière phase de séchage
Rapport de séchage	1/10 pour séchage sans trempage préalable 1/5 pour séchage avec trempage préalable
Critère de fin de séchage	Consistance élastique, couleur brun doré

CONSERVATION 1 - 2 ans

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Utiliser tel quel comme produit de grignotage.
- Utiliser après un trempage de 30 mn comme garniture de pâtisseries.

OBSERVATIONS

1. La mangue et la papaye sont des fruits sujets au croûtage et au bruissement.
2. Prétraitements possibles: trempage pendant 30 mn dans une solution de métabisulfite de sodium 3 g/litre d'eau; trempage pendant 5 heures dans une solution de sucre (700 g/litre d'eau) et de jus de citron (1 citron pressé par litre d'eau).
3. Le prétraitement au métabisulfite permet de limiter le brunissement de la mangue et le risque de développement microbien.
4. Le choix du trempage dans une solution de sucre est une affaire de goût mais il est recommandé pour la papaye car il en augmente la durée de conservation.

NOM DU PRODUIT	CHOU
----------------	-------------

S	CHAGE	Facile
---	-------	--------

SOURCES INFORMATIONS	CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES
----------------------	---------------------------------

Ingrédients	- eau
--------------------	-------

LES TAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. **Lavage** (écarter les feuilles abîmées et le cœur)

2. **Découpage au choix:**

- **feuilles: séchage plus rapide si on enlève la nervure**
- **principale (cette nervure sèche difficilement et est souvent noire. Les feuilles se présentent alors moins joliment dans les plats)**
- **quartiers: méthode bien adaptée aux habitudes culinaires mais le séchage est long et il est difficile d'évaluer si le cœur du quartier est bien sec (risques microbiens)**
- **tranches fines (4 mm d'épaisseur): sèche vite et bien, bonne présentation**

PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

Teneur en eau initiale	80 %
------------------------	------

Teneur en eau finale recommandée	4 %
Température maximale	55°C
Rapport de séchage	1/18
Critère de fin de séchage	Dur et cassant; la couleur est très proche du produit frais en séchage indirect

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Trempage nécessaire dans de l'eau chaude pendant 30 mn avant utilisation.

OBSERVATIONS

1. Les rondelles peuvent être blanchies avant le séchage:

- laisser 3 minutes dans de l'eau bouillante ou 5 minutes à la vapeur.
Attention ne pas blanchir trop longtemps: les choux risqueraient de cuire et de fermenter
- il est possible également d'ajouter du bicarbonate à l'eau bouillante à raison de 10 g par litre d'eau

2. Paradoxalement, le blanchiment donne une couleur plus foncée au chou séché.

3. Le blanchiment accélère le séchage. Il est toutefois recommandé de conseiller dans le cas d'un séchage lent car le chou blanchi risque de fermenter.

NOM DU PRODUIT	GOMBO
----------------	--------------

SÉCHAGE Facile

SOURCES DES INFORMATIONS CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

Ingrédients - eau

LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES**1. Lavage****2. Tri****3. Découpage en rondelles de 1 cm d'épaisseur, en tranches ou entier pour les petits spécimens****4. Mettre directement dans le séchoir**

Teneur en eau initiale	87 %
Teneur en eau finale recommandée	4 à 5 %
Température maximale	66°C
Rapport de séchage	1/10 pour séchage sans trempage préalable

CONSERVATION 12 mois maximum**CONSEILS POUR LA CONSOMMATION**

- Le trempage avant utilisation n'est pas nécessaire.
- utiliser directement ou légèrement plié.

- Temps de cuisson: 30 mn.

OBSERVATIONS

1. Choisir des gombos frais bien verts afin d'obtenir un bel aspect.
2. Le blanchiment à la vapeur est possible mais il n'est pas recommandé car le séchage direct est satisfaisant. Le blanchiment donne une couleur plus foncée au gombo séché.
3. Le gombo sec peut être réduit en poudre.

NOM DU PRODUIT	HARICOT VERT
----------------	---------------------

SÉCHAGE	Facile
---------	---------------

SOURCES DES INFORMATIONS	CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES
--------------------------	---------------------------------

Ingrédients	- eau
	- bicarbonate facultatif

LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage
2. Équeutage (élever les fils)
3. Découpage facultatif: morceaux de 2 cm de longueur

4. Mettre directement dans le séchoir, un prétraitement est facultatif: -

- blanchiment: 3 mn dans de l'eau bouillante. L'eau peut être additionnée de bicarbonate (10 g de bicarbonate/litre d'eau)
- trempage pendant 1 mn dans une solution de métabisulfite (12 g/litre d'eau)

PARAMÈTRES DE SÈCHAGE

Teneur en eau initiale	70 %
Teneur en eau finale recommandée	5 %
Température maximale	70°C
Rapport de séchage	1/8 pour séchage sans trempage préalable
Critère de fin de séchage	produit cassant et foncé

CONSERVATION	12 mois maximum
---------------------	-----------------

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Avant utilisation, faire tremper les haricots 30 mn dans de l'eau chaude.
- Temps de cuisson: 30 mn environ.

OBSERVATIONS

- Le blanchiment et le trempage sont facultatifs. Ils permettent de réduire la durée de séchage et de mieux conserver la couleur du produit.

NOM DU PRODUIT	OIGNON
----------------	---------------

SÛCHAGE	Facile
---------	---------------

SOURCES DES INFORMATIONS	CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES
--------------------------	---------------------------------

Ingrédients	- eau
	- sel facultatif

LES TAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. pluchage

2. Lavage

3. Découpage au choix:

- rondelles (séchage rapide et forme adaptée à l'utilisation courante)
- lamelles (séchage moins rapide) e moins rapide)
- pilé avec du sel (séchage lent, conservation moindre mais conservation du goût de l'oignon: utilisation en sauces)

4. Mettre directement dans le séchoir, un trempage préalable dans de l'eau salée est possible

PARAMÈTRES DE SÛCHAGE

Teneur en eau initiale	80 %
------------------------	------

Teneur en eau finale recommandée	4 %
Température maximale	55°C
Rapport de séchage	1/10 pour séchage sans trempage préalable
	1/8 pour séchage avec trempage préalable

CONSERVATION 12 mois maximum

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Le trempage n'est pas nécessaire avant utilisation.
- Utiliser directement, piler ou faire mariner.

OBSERVATIONS

1. Les rondelles peuvent être mises à tremper avant le séchage: préparer l'eau de trempage en ajoutant 50 g de sel par litre d'eau, laisser tremper l'oignon découpé pendant 10 mn. Le trempage dans l'eau salée à température ambiante réduit la durée de séchage et permet une meilleure conservation de la couleur de l'oignon.

2. L'oignon pilé, mis en petites boulettes et séché, conserve très bien son arôme.

NOM DU PRODUIT **PIMENT et POIVRON**

SÉCHAGE **Facile**

SOURCES DES INFORMATIONS **CILSS ***

* **ALEWTINA BA Valkova, DOUMBIA Bakary** (chercheurs de la section de Recherches fruitières et maraîchères au ministère de l'Agriculture du Mali, « Comment conserver et transformer les fruits et légumes au Sahel. Guide technique. », CILSS, Institut du Sahel, Programme Resadoc, Bamako (Mali), 1991, 24 p.

Ingrédients - eau

LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage

2. Découpage au choix (retirer les pépins):

- rondelles
- lamelles de 1 cm de largeur

Le piment peut être séché entier. Le poivron entier peut être blanchi pendant 2-3 minutes dans de l'eau bouillante puis ouvert et étalé tel quel sur la claie de séchage.

3. Mettre directement dans le séchoir.

PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

Teneur en eau initiale	85 %
Teneur en eau finale recommandée	5 %
Température maximale	65 à 70°C
Rapport de séchage	1/11 à 1/14
Critère de fin de séchage	Produit secant pour les poivrons

CONSERVATION 12 mois minimum**CONSEILS POUR LA CONSOMMATION**

- Pas de trempage nécessaire avant utilisation.
- Utiliser tel quel ou plier.

OBSERVATIONS

- Le piment ou le poivron peuvent être réduit en poudre après séchage.

NOM DU PRODUIT **POMME DE TERRE**SÉCHAGE **Assez délicat**SOURCES DES INFORMATIONS **IBE ***

* « Utilisation des séchoirs solaires », IBE, Ouagadougou, 1987.

Ingrédients	- eau
	- sel
	- metabisulfite

LES TAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage**2. Pelage****3. D**

- en rondelles fines de 3 d 5 d'aisseur

- en forme de frites

4. Pr

- blanchir 9 mn dans une eau bouillante sal

- blanchiment pendant 5 mn dans de l'eau bouillante puis trempage pendant 1 mn dans une solution de mabisulfite d 8 g/litre d'eau

PARAM

Teneur en eau initiale	75 %
Teneur en eau finale recommand	13 %
Température maximale	70°C
Rapport de s	1/7
Critère de fin de s	Produit croustillant et cassant

CONSERVATION 4 d 6 mois

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- **Faire tremper avant utilisation.**
- **On peut faire revenir les pommes de terre et/ou les cuire.**

OBSERVATIONS

- **Le séchage peut se faire sans prétraitement mais les pommes de terre noircissent.**

NOM DU PRODUIT **TOMATE**

SÉCHAGE **Délicat**

SOURCES DES INFORMATIONS **CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES**

Ingrédients - eau

LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

- 1. Lavage**
- 2. Découpage de 1 cm d'épaisseur, au choix:**
 - **rondelles**
 - **lamelles**
- 3. Mettre directement dans le séchoir**

PARAMÈTRES DE SÈCHAGE

Teneur en eau initiale	95 %
Teneur en eau finale recommandée	10 %
Température maximale	65°C
Rapport de sèchage	1/10
Critère de fin de sèchage	Consistance du cuir

CONSERVATION 12 mois maximum

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Pas de trempage nécessaire avant utilisation de la tomate sèchée.
- La tomate peut être broyée avant utilisation.

OBSERVATIONS

1. Les tomates ne supportent pas un temps de sèchage trop long (3 jours). Au-delà, elles brunissent. Des moisissures peuvent également être source d'altérations.
2. La tomate une fois sèchée peut être réduite en poudre.
3. À partir du produit sèché à 40 %, il est possible de conserver facilement la tomate sous forme de concentré salé à 10 %.

NOM DU PRODUIT **CAROTTE**

S	CHAGE	Facile
---	-------	--------

SOURCES DES INFORMATIONS	CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES
--------------------------	--------------------------

Ingrédients	- eau	
	- m	tabisulfite

LES TAPES DE PRPARATION CONSEILL

1. Lavage

2. pluchage

3. D

- d (1 2 cm)
- rondelles
- lamelles de 2 cm d'paisseur

4 Un pr

- blanchiment la vapeur pendant 8 mn des carottes d
- trempage pendant 1 mn des morceaux dans une solution de m
- (12 g/litre d'eau)

PARAMTRES DE S

Teneur en eau initiale	75 %
Teneur en eau finale recommandée	5 %
Température maximale	75°C
Rapport de séchage	1/10 pour séchage sans trempage préalable
Critère de fin de séchage	Produit cassant et croustillant

CONSERVATION 12 mois maximum

CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

- Avant utilisation, un trempage de 30 mn dans de l'eau chaude est nécessaire.

OBSERVATIONS

1. Par séchage sans traitement, le produit devient pèle: il se forme une légère croûte blanche. Le blanchiment ou le trempage sont donc recommandés malgré le surplus de travail qu'ils occasionnent.

2. Le blanchiment ou le trempage préserve la couleur des carottes. La conservation est améliorée.

Chapitre III: Avant tout' bien définir le projet

Présentation des différents systèmes de séchage

Il existe quatre grands systèmes de séchage:

- le séchage tout solaire et convention naturelle;

- le séchage tout solaire convention forcée;
- le séchage tout combustible fossile;
- le séchage hybride solaire/autre énergie.

LE SÉCHAGE TOUT SOLAIRE CONVECTION NATURELLE

On entend par séchage tout solaire un système ne faisant appel qu'à l'usage de l'énergie solaire pour extraire l'eau du produit. Dans cette famille, on trouve:

- le séchage traditionnel l'air libre (sans équipement);
- les séchoirs solaires directs (les rayons solaires frappent directement les produits sécher, après avoir traversé une couverture transparente);
- les séchoirs solaires indirects (un air chaud est envoyé sur le produit, qui n'est pas exposé au soleil);
- les séchoirs solaires mixtes (combinaison des deux systèmes précédents; la chambre de séchage permet aussi une exposition directe du produit au soleil).

Dans le séchage l'air libre, on se contente simplement de poser le produit sécher au soleil. Le rayonnement solaire augmente la température du produit. Les mouvements de l'air et le vent entraînent l'eau du produit affluant sa surface. On l'appelle séchage au soleil.

Dans le séchage solaire direct, le produit est placé sous une couverture transparente (vitre, feuille de plastique). Le processus est identique au cas précédent: mais l'air et le produit sont plus chauds du fait de l'effet de serre (« piégeage » de la chaleur du soleil), et des faibles mouvements de l'air dans l'enceinte de séchage. Si ces mouvements sont

trop faibles, il n'y a pas séchage car l'eau n'est pas évacuée: il y a cuisson. Ceci arrive souvent avec les séchoirs mal conçus où on privilégie la température sans favoriser les mouvements d'air.

Dans le séchage solaire indirect, l'air est chauffé par un capteur, qui peut être distinct de l'enceinte de séchage. Le produit reste à l'ombre, isolé du rayonnement solaire. Il n'est donc pas réchauffé par le soleil. Le séchage se produit par échange d'eau avec l'air chaud. Cf. le schéma page ci-contre.

LE SÉCHAGE TOUT SOLAIRE ET CONVECTION FORCÉE

Ce système permet d'accroître l'extraction de la vapeur d'eau. L'énergie solaire fournit l'énergie thermique de séchage; une source d'énergie mécanique est utilisée pour actionner un ventilateur destiné à propulser l'air d'entraînement. On peut utiliser soit un moteur à combustion soit un moteur électrique.

LES SÉCHOIRS TOUT COMBUSTIBLE FOSSILE

L'énergie solaire n'est plus utilisée, même en appoint; un combustible fournit seul l'énergie thermique nécessaire au chauffage de l'air.

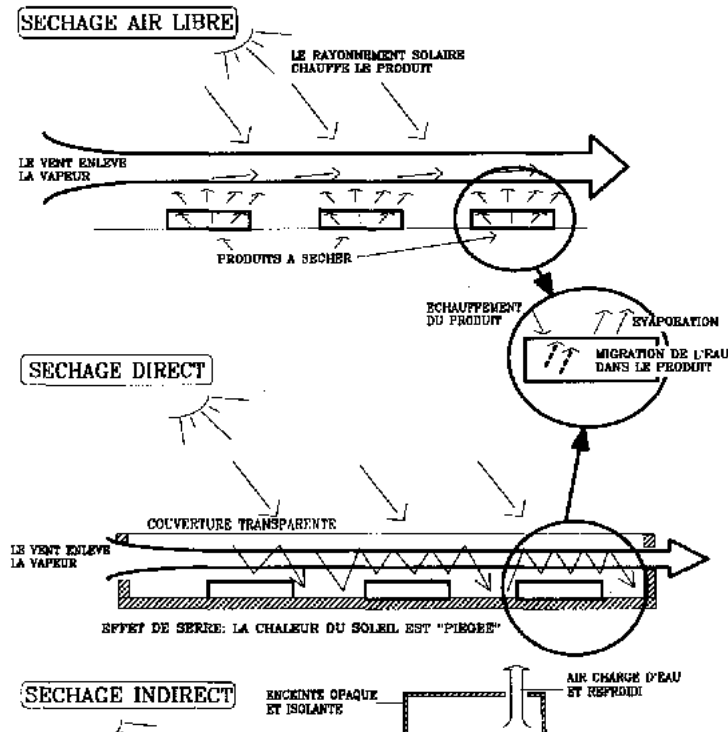
Seul le gaz (butane, propane...), convenablement brûlé, peut être utilisé directement pour réchauffer l'air d'entraînement. Pour les autres combustibles (bois, résidus agricoles, biogaz, fuel, charbon minier...), un échangeur de chaleur gaz de combustion/air d'entraînement doit être utilisé.

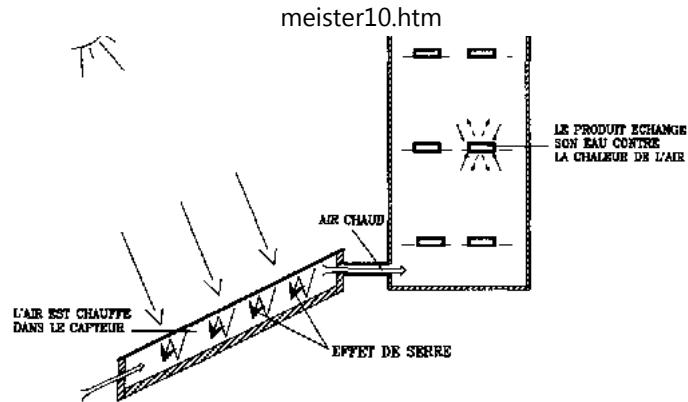
LE SÉCHAGE HYBRIDE SOLAIRE/AUTRE ÉNERGIE

Il ne faut pas confondre un séchoir hybride combinant deux types d'énergie (hybride solaire/autre énergie) avec un procédé de séchage combinant un séchoir tout solaire et

un séchoir tout combustible.

Dans le cas d'un système de séchage hybride, l'énergie solaire est combinée avec une autre source d'énergie pour pallier aux variations de l'ensoleillement (période nocturne, météorologie défavorable...). On peut aussi concevoir un séchoir avec un système de récupération d'énergie:





Un système de séchage hybride

- utilisés dans des unités industrielles, des réseaux de chaleur permettent une récupération de l'énergie de la vapeur d'eau produite dans les cuves de traitements thermiques. D'aubes types d'échangeurs peuvent être utilisés (air/eau...);

- les séchoirs avec système de recyclage de l'air permettent, grâce au recyclage d'une partie de l'air après séchage, de contrôler le taux d'humidité dans le séchoir et/ou de récupérer la chaleur déjà fournie en premier passage.

L'utilisation de ces différents systèmes est présente et illustrée dans la deuxième partie.

établir le cahier des charges à partir d'une analyse détaillée de la filière

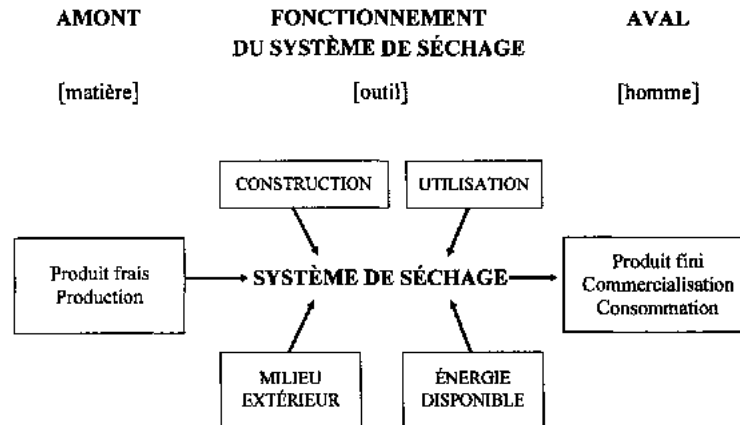
L'objectif est d'avoir, dans un contexte donné, une filière de séchage opérationnelle. Une

analyse détaillée de la filière va permettre de dresser le cahier des charges du futur séchoir.

C'est la première étape d'un montage de projet de séchage, qui permet de mieux définir ce qu'on en attend exactement.

Il est nécessaire d'appréhender tout l'environnement du système de séchage.

Cette présentation va nous servir de fil conducteur pour l'analyse de la filière. Cette dernière est scindée en trois grandes parties. On distingue l'aval de la filière, l'amont de la filière et, au coeur de la filière, tout ce qui a trait au fonctionnement même du système: la question de l'énergie, celle de la construction, celle de l'utilisation et, enfin, tout ce qui concerne le milieu extérieur. Chacune des composantes de la filière doit faire l'objet d'une étude poussée.



Système de séchage

L'AMONT

Connaître la filière amont c'est connaître les caractéristiques du ou des produits mais aussi tout ce qui a trait « à la production, jusqu'au moment où le produit parvient sur le lieu de séchage.

Les conditions de production

On peut s'apercevoir qu'une amélioration du produit séché fini passe par une modification du procédé de production. En pisciculture par exemple, un problème d'alimentation des poissons peut être l'origine du fait que les produits sont trop gras et donc difficiles à sécher.

Il est important de bien connaître la population productrice (étude socio-économique) et les moyens cultureux utilisés pour savoir dans quelle mesure on peut intervenir à ce niveau (meilleure qualité, rendement de la production...).

Les conditions de récolte et d'approvisionnement

Les informations à réunir sont les suivantes:

- périodes de récolte;
- durée, rythme et conditions d'approvisionnement;
- possibilités de stockage avant séchage.

Déterminantes pour ce qui est de l'état du produit (maturité, fraîcheur...), de ces informations dépendent aussi le choix du séchoir (possibilité d'utiliser l'énergie solaire, capacité...), son utilisation (rythme de séchage ou débit-produit...), sa rentabilité dans un contexte commercial (durée et rendement de son utilisation par campagne de

séchage).

Le produit

Pour chaque produit, il faut réunir toutes les informations utiles à la conduite du séchage, et notamment son comportement hygroscopique (1) ainsi que son humidité initiale. Quelques points de variation de ce taux d'humidité ont une grande incidence sur la durée de séchage nécessaire. Il faut procéder à une analyse sur un échantillon représentatif du produit. Les principaux critères sont:

(1)Comportement hygroscopique: évolution du degré d'humidité par adsorption-résorption, en réaction au milieu ambiant (degré d'humidité de l'air) et/ou du traitement subi.

- humidité initiale;**
- forme/dimension;**
- degré de maturité;**
- composition biochimique.**

UTILISATION

Pour l'implantation d'un nouveau séchoir, la première question à se poser est de savoir si le coût total du séchoir est en accord avec l'usage qu'on veut en faire.

De façon générale, on ne dispose de l'information sur les coûts du séchage qu'en fin de procédure d'identification technique du projet. On peut cependant s'en faire une première idée, et vérifier par une évaluation économique sommaire que le projet présente bien

plus d'avantages que d'coûts (cf. chapitre VIII pour l'évaluation économique d'un projet), et dans un rapport plus favorable que pour d'autres filières envisageables.

Les avantages et les coûts à prendre en compte ne sont pas toujours monétaires. Dans le cas d'un séchoir à usage domestique par exemple, les avantages à considérer sont principalement liés aux services rendus et non aux recettes de commercialisation. Des critères non monétaires peuvent compter du point de vue de l'utilisateur. Ils vont conditionner l'acceptation du séchoir et donc le succès du transfert technologique.

Un séchoir domestique destiné à une femme, par exemple, devra répondre des impératifs différents de ceux auxquels devra répondre un séchoir destiné à un groupement de marchands.

Chaque groupe social aura ses propres exigences sur divers points:

- la technologie à laquelle il est fait appel ne doit pas être un obstacle à l'utilisation ni poser des problèmes de maintenance. Il convient de consulter les futurs utilisateurs et de prévoir des formations à l'utilisation;
- la solidité/durabilité, critère de première importance, dépend du choix des matériaux, question qui ne peut être isolée d'autres considérations (coût, disponibilité, performance énergétique). Il convient de veiller particulièrement à la robustesse des parties mobiles (ouverture/fermeture du couvercle...). La prise en compte de cet impératif peut conduire parfois à écarter, pour le capteur, le verre (fragilité, coût) et les plastiques de mauvaise qualité (certains vieillissent rapidement);
- l'entretien/maintenance (nettoyage des surfaces de séchage, protection contre l'humidité...) ne doit pas être trop long, trop malaisé, etc. Son coût est donc à prendre en compte dans les calculs économiques à la fois sur le plan des

amortissements pour renouvellement/réparations et sur le plan du coût de la main d'œuvre;

- le temps requis par l'activité, ce temps qu'il faut pour faire fonctionner le séchoir ne doit pas excéder le temps dont dispose l'utilisateur pour cette tâche. Dans un contexte commercial, la charge correspondante au temps consacré au chargement, la surveillance et l'entretien du séchoir sera intégrer dans le calcul des coûts;

- la facilité de transport du séchoir, parce que, dans certains cas, le terrain affecté au séchage n'est pas réservé à cet usage et aussi pour pouvoir, le cas échéant, mettre le séchoir à l'abri de bourrasques, poussières, fortes pluies, présence d'animaux... Il est recommandé de se préoccuper de savoir si le séchoir aura être transporté ou non et d'en tenir compte (poids, dimensions);

- l'esthétique, il peut être important de considérer l'aspect du séchoir et sa bonne intégration dans son environnement immédiat (formes architecturales, ustensiles de cuisine...).

L'AVAL

On entend par aval de la filière toutes les étapes suivies par le produit, de la sortie du séchoir jusqu'au consommateur.

L'objectif étant de satisfaire un besoin, il faut s'attacher bien le définir. L'analyse de l'aval est tout particulièrement importante lorsqu'il s'agit de mettre en place une unité but commercial. Les réponses à la question: quelles sont les attentes du consommateur? conditionneront tout le reste. Si l'utilisateur du séchoir est aussi le consommateur (autoconsommation), ce sont ses goûts et attentes qu'il faut prendre en compte.

Il y a quatre éléments à considérer:

- le produit (son utilisation, ses qualités nutritionnelles, microbiennes, son aspect, son goût, la gamme, la marque, le type de conditionnement, les quantités...);
- le prix de vente aux consommateurs (prix réel de produits concurrents, prix de vente acceptable pour un produit nouveau appelé aussi « prix psychologique »);
- le réseau de distribution (quantités concernées, transport, intermédiaires, sites de mise en vente, organismes de contrôle...);
- la promotion du produit (les aspects valorisés ou à valoriser, la campagne publicitaire, le « packaging » c'est-à-dire l'emballage, l'habillage du produit tels que conçus pour attirer le client...).

Seule une étude de marché permet de cerner les attentes du consommateur de ces différents points de vue. Elle comportera:

- une étude socio-économique des consommateurs;
- une enquête pour déterminer le « prix psychologique » (appelée test d'acceptabilité si le produit final est utilisé pour la mener), qui est le prix que le consommateur est prêt à payer pour disposer du produit;
- un test de marché sur un échantillon de la population visée (fiche d'appréciation, suivi des ventes).

Les informations recueillies vont indiquer comment et où intervenir.

Exemple d'une enquête-test sur la mangue sèche menée auprès de consommateurs

français au Burkina Faso

Informations générales

- Date et lieu de la dégustation:
- Avez-vous déjà consommé la mangue fraîche?
- Appréciez-vous les fruits secs habituellement en vente?
- Avez-vous déjà consommé de la mangue sèche?
- Si oui, était-ce ce produit?

Qualités du produit

- Pouvez-vous donner votre avis sur chacun des critères suivants en y associant un qualificatif?
 - le goût (exotique, fruité, fade, acide...)
 - la texture (agréable, élastique, collante...)
 - la forme (originale, hétérogène...)
- Avez-vous d'autres critères ou des remarques à faire sur la qualité (odeur, couleur, aspect hygienique, autres qualités ou défauts)?

Perspectives

- Pensez-vous acheter ce produit?

- Si oui, pour quelles utilisations et/ou quelles circonstances (grignotage, réception, aliment sportif, confiture...)?
- Si non, pour quelles raisons? Quels facteurs peuvent vous faire changer d'avis (prix, qualité, rapport qualité/prix, labellisation biologique...)?
- Avez-vous d'autres remarques?

◆ ENERGIE DISPONIBLE

Une source ◆nergétique est ◆cessaire pour chauffer l'air d'entraînement. On ◆termine au préalable la puissance de chauffe ◆cessaire puis, en fonction de la disponibilité et du coût des ◆quipements rapporté au kWh, ◆ déterminer quelle sera la ou les sources d'◆nergie les mieux adaptées.

Disponibilité◆

Pour chaque type de combustible, il s'agit de connaître les conditions d'approvisionnement et de stockage. De mauvaises conditions d'approvisionnement ◆cessitent une importante capacité◆ de stockage alourdissant les coûts d'investissement. L'annexe 4 propose une méthode simplifiée d'analyse de la disponibilité◆ en ◆nergie solaire sur le site de s◆chage.

Pour faire face ◆ un problème de disponibilité◆, on peut envisager de combiner deux ou plusieurs sources ◆nergétiques (cas des s◆choirs hybrides).

Dans un contexte artisanal (semi-industriel), le choix du système est conditionné par la disponibilité◆ en ◆lectricité◆ qui seule permet l'utilisation d'un ventilateur puissant et performant pour des débits d'air ◆levés. L'expérience acquise dans la mise au point de s◆choirs de grande capacité◆ montre en effet que l'usage de l'◆lectricité◆ est

incontournable pour l'entraînement forcé de l'air. Si l'on s'en tient à l'énergie solaire, même avec des systèmes imposants (hautes cheminées solaires par exemple, ci expérience ONUDI/ITA au Sénégal), il est difficile d'atteindre une vitesse de ventilation élevée. Avec des combustibles fossiles et des températures de gaz de combustion élevées, une construction judicieuse de la chambre de séchage permet des vitesses d'écoulement acceptables (proches de 2 m/s).

évaluation des besoins et de la rentabilité

Selon le système choisi pour le chauffage de l'air d'entraînement, les rendements énergétiques varient. Selon les conditions de séchage (vitesse et humidité de l'air chaud...), il faudra déterminer les quantités de combustibles nécessaires, rapportées à une quantité de matière à sécher donnée.

C'est en théorie lors du dimensionnement technique du projet que cette donnée peut être établie (cf. chapitre V). Il est toutefois utile de s'en faire une première idée pour mener une évaluation économique sommaire en début de processus de montage du projet, de façon à mieux orienter les réflexions par la suite.

CONSTRUCTION-MAINTENANCE

Il faut aussi se demander si les moyens d'assurer, localement, la réalisation et la maintenance du séchoir existent. Cette considération peut s'avérer déterminante dans le choix d'un système de séchage (cas d'une autoconstruction en zone rurale en particulier).

Les principaux critères sont:

- la disponibilité, les coûts et les facilités d'approvisionnement en matériaux entrant dans la construction du séchoir;**

- la maîtrise technique des constructeurs;
- les coûts liés au transport du séchoir jusqu'à son lieu d'utilisation.

Des mesures d'accompagnement (formation des artisans, amélioration de l'outillage) peuvent s'avérer nécessaires. Il est aussi possible que certains éléments techniques ne soient pas disponibles ou ne puissent être réalisés sur place (ventilateur, échangeur de chaleur...). Dans un programme de diffusion de séchoirs, il est important de veiller à la proximité constructeur/utilisateur. Enfin, si l'utilisateur ne peut assurer la maintenance ou la réparation de certaines pièces, il faudra se préoccuper de savoir si le constructeur peut assurer un service après-vente.

LE MILIEU EXTÉRIEUR

Les performances du séchoir dépendront en partie de son environnement physique immédiat.

Humidité relative de l'air

Le pouvoir évaporatoire de l'air dépend de l'humidité ambiante. C'est un élément essentiel à considérer pour opérer des choix concernant le séchoir et la source d'énergie qui le fera fonctionner. En effet, plus l'humidité de l'air est

élevée plus il faudra élever la température (dans la limite du maximum acceptable pour le produit) pour atteindre un pouvoir évaporatoire satisfaisant.

Dans certains cas, l'énergie ne saurait suffire, même avec un bon ensoleillement, du fait d'une trop forte humidité de l'air (cas de la saison des pluies en zone tropicale, cas de la zone équatoriale). Un système mixte (solaire/énergie fossile) ou seulement à énergie fossile devra être préféré.

Vent et intempéries, poussière et insectes

Le vent peut être un facteur favorable ou défavorable au bon fonctionnement du séchoir. Orienté dans le sens de la circulation de l'air dans le séchoir, en convention naturelle, il exerce une pression supplémentaire en complément de la pression motrice de l'air chaud, qui provoque son mouvement. Mais cet effet bénéfique peut être contrecarré par le refroidissement occasionné sur la caisse de séchage. D'autre part, dans le cas d'un chauffage par combustion, il faudra veiller à assurer la protection de la flamme tout en conservant un bon mélange air/combustible. Dans la majorité des cas, on a intérêt à positionner le séchoir dans un endroit abrité des effets du vent.

Tout particulièrement pour un séchoir de grande dimension, il faut prévoir une protection efficace contre les intempéries, contre la pluie en premier lieu (couverture étanche, traitement des supports, coffrage contre l'humidité...).

La présence d'insectes nuisibles ou de poussières obligera à une protection des ouvertures de circulation de l'air (chicanes pour la poussière, moustiquaires...).

Une méthode pour apprécier un système de séchage

Au moment de la définition du projet et avant de procéder à une étude technico-économique plus poussée, il est possible d'évaluer la pertinence du système envisagé. Il s'agit, à l'aide de la liste de questions (cf. encadré ci-contre), de définir les critères auxquels le système devra répondre et, dans un deuxième temps, de comparer les différentes solutions possibles, au regard de ces critères. Chaque système peut, par exemple, être noté en fonction de sa capacité à répondre aux exigences qui auront été définies (le système obtenant la plus haute note sera retenu):

Récapitulatif des principales questions à se poser lors de la définition du projet

A-1: Quelles sont les attentes du consommateur (goût, aspect et qualité micro-biologique du produit séché) et les normes de qualité du pays de commercialisation, quelles en sont les conséquences en termes de filière?

A-2: Le système de séchage sera-t-il, si nécessaire, suffisamment polyvalent pour pouvoir traiter toute la gamme des produits à sécher (différents produits, différents variétés, différentes qualités...)?

A-3: Les capacités du système choisi permettront-elles de répondre aux besoins du marché tels que préalablement définis (quantités et qualités commercialisables, et quel prix)?

B-1: Le prix du séchoir sera-t-il acceptable par l'utilisateur, compte tenu du temps de retour sur l'investissement, des capacités d'emprunts de l'acheteur et des autres éléments à prendre en considération, hors logique commerciale?

B-2: Le séchoir satisfait-il aux autres attentes de l'utilisateur (technologie, solidité/durabilité, entretien/maintenance, transportabilité, disponibilité de la main d'œuvre, esthétique)?

C-1: Le système de séchage est-il adapté au(x) produit(s) à sécher, à leurs caractéristiques (comportement hygroscopique, humidité initiale...)?

C-2: Une modification des modes de production pour une meilleure adaptation du produit au processus de séchage sera-t-elle nécessaire au fonctionnement du système, est-ce envisageable?

C-3: La capacité, le temps de séchage et le rythme d'utilisation du séchoir sont-ils adaptés aux rythmes d'approvisionnement?

D-1: Quelle source d'énergie vaut-il mieux que le système fasse appel compte tenu des besoins et de la situation locale (coût, disponibilité, souplesse d'utilisation, performance); l'électricité est-elle disponible?

E-1: Peut-on construire le séchoir localement à un coût et avec une qualité acceptables, en tenant compte de la disponibilité en matériaux, de la maîtrise technologique et du surcoût lié au transport éventuel du séchoir?

E-2: La maintenance peut-elle être, en cas de besoin, assurée par les constructeurs?

F-1: Quels sont les impératifs posés par l'humidité de l'air ambiant (degré hygrométrique), le système envisagé permet-il d'y répondre?

F-2: Quelles protections faut-il prévoir contre les effets du vent, les intempéries, la poussière et les insectes, est-ce faisable et à quelles conditions

0 = le système envisagé ne satisfait pas cette exigence;

1 = le système envisagé répond plutôt à cette exigence;

2 = le système envisagé répond tout à fait à cette exigence.

Remarques:

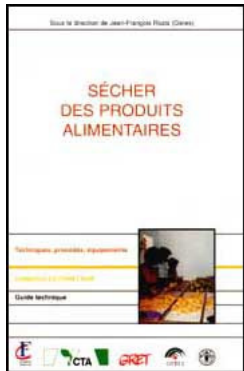
Les exigences auxquelles le système doit répondre ou se soumettre doivent être hiérarchisées. Certaines conditions doivent obligatoirement être remplies (0 éliminatoire). L'amont et l'aval, le milieu extérieur et l'énergie disponible seront déterminants, l'utilisation et la construction peuvent plus facilement faire l'objet d'adaptations. Ainsi, pour une filière commerciale, les attentes du consommateur sont à prendre comme premier critère. Autre exemple, on a pu constater que, dans le contexte d'une diffusion en milieu rural, en zone sahelienne, d'un séchoir solaire domestique, les s choirs les plus performants (rendement énergétique et de séchage) sont d lass s au profit de s choirs moins performants mais fonctionnels et surtout beaucoup plus adaptés au milieu d'accueil (cas typique du séchoir coquillage).












Les situations peuvent évoluer (formation des constructeurs, programme d'électrification en cours, coût des matériaux variable...). Il faut donc connaître les marges d'évolution possibles, et considérer l'adaptabilité du système aux situations à venir ainsi que les actions à envisager (programme d'encadrement, innovation) pour accompagner une meilleure intégration d'un savoir.


















On peut parfois arriver à la conclusion qu'il y a plus à gagner à améliorer des techniques et pratiques simples (meilleure exposition à l'air chaud, meilleure protection par rapport aux nuisibles, usage de prétraitement, meilleur conditionnement...) qu'à adopter un système de séchage plus sophistiqué.



[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">



-  **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**
 -  **Deuxième partie: Notions de base sur le séchage des produits alimentaires**
 -  **Introduction**
 -  **Chapitre IV: Les grands principes du séchage**
 -  **(introduction...)**
 -  **Principes du comportement des produits alimentaires**
 -  **L'eau dans le produit**
 -  **L'eau dans l'air**
 -  **Les trois phases de séchage**
 -  **Actions du séchage sur la qualité du produit alimentaire**
 -  **Le cas du séchage solaire direct**

-  **Jusqu'où mener le séchage?**
-  **En résumé**
- Chapitre V: Eléments pour le dimensionnement des séchoirs**
 -  **Avertissement**
 -  **Rythme de production, température de séchage, débit d'air et énergie requise**
 -  **Production de l'énergie requise**
- Chapitre: exemples de séchoirs types**
 -  **(introduction...)**
 -  **Contenu des « fiches séchoirs »**
 -  **Les « fiches séchoirs »**
- Chapitre VII: Conduire une activité de séchage**
 -  **(introduction...)**
 -  **étapes amont**
 -  **étapes aval**
 -  **L'organisation et le dimensionnement des locaux**
 -  **L'organisation du travail dans une unité de séchage**
- Chapitre VIII: Eléments d'évaluation économique des projets**
 -  **(introduction...)**
 -  **Doit-on attendre la fin d'une procédure de choix pour procéder à une analyse économique?**
 -  **L'évaluation économique « approfondie »**
 -  **Où implanter une unité de séchage?**

Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)

Deuxième partie: Notions de base sur le séchage des produits alimentaires

Introduction

Le cahier des charges du système de séchage pour la filière envisagée, abordé en fin de première partie, permet d'opérer une présélection des types de séchoir à retenir. Il permet en effet d'éliminer de l'analyse ceux qui ne répondent pas correctement aux attentes du projet. L'élaboration du cahier des charges constitue une phase importante dans la conception du projet, car elle clarifie les objectifs visés.

Il faut cependant encore préciser quel type de séchoir devra finalement être retenu, et ses caractéristiques précises (dimensions, matériaux...).

Ce choix dépend de deux familles de critères:

- des critères d'ordre technique: le séchoir doit satisfaire aux exigences requises pour un séchage adapté au produit traité, aux quantités à traiter, et au terrain (en particulier l'ensoleillement, le degré hygrométrique de l'air...);**
- des critères d'ordre économique: le séchoir doit satisfaire, et mieux que d'autres séchoirs envisageables sur le plan technique, les exigences économiques de l'activité (rentabilité financière en premier lieu, mais aussi souvent sur un plan équivalent qualité du produit et régularité de la production).**

Ces éléments du choix sont présentés ici de façon relativement linéaire. Les éléments techniques qui permettent de préciser les options envisageables sont exposés en chapitre V, après une présentation des notions de base sur les mécanismes physico-chimiques qui interviennent dans le séchage (chapitre IV). Le chapitre VI présente pour sa part les

caractéristiques des principaux types de séchoirs actuellement bien éprouvés dans les pays en développement.

Les réponses apportées aux exigences techniques et une bonne connaissance des modalités de la production (organisation du travail, activités en amont et en aval du séchage...), abordées au chapitre VII, sont les paramètres sur lesquels on peut asseoir une analyse économique, dont les principes sont exposés au chapitre VIII.

Précisons enfin que cette partie a été rédigée dans le souci de la rendre accessible au plus grand nombre. Les principes physiques qui interviennent dans le séchage, ainsi que les calculs théoriques de dimensionnement de certaines grandeurs, sont relativement complexes. Ils ne sont traités dans cette partie que de façon simplifiée.

Certaines informations doivent de ce fait être considérées avec prudence, en particulier au chapitre V. Elles correspondent en effet parfois des « raccourcis » qui permettront au lecteur de se faire une idée des ordres de grandeur du dimensionnement d'un projet de séchage, sans avoir à passer par des formulations trop complexes, mais ne peuvent en aucun cas s'y substituer. L'exposé détaillé de ces formulations est proposé en troisième partie.

Chapitre IV: Les grands principes du séchage

Sécher un produit consiste à éliminer une grande partie de l'eau qu'il contient de façon à permettre sa bonne conservation. Il existe plusieurs procédés pour éliminer cette eau. Le procédé le plus aisé à mettre en œuvre dans les PED, et présenté dans cet ouvrage, repose sur l'évaporation de l'eau en surface du produit par l'air environnant (vent, convection libre ou forcée par ventilateur) réchauffé au préalable. Le produit sec doit avoir une teneur en eau finale suffisamment faible de façon à ce que les micro-organismes, moisissures, levures et bactéries, ne puissent pas se développer.

Le premier paragraphe précise les altérations majeures qui interviennent lors d'une dégradation d'un produit alimentaire. Cela permet de bien préciser les raisons pour lesquelles le séchage présente un « caractère conservateur », et d'introduire la notion de traitements complémentaires, éventuellement nécessaires, abordés plus en détail au chapitre VII.

Les quatre paragraphes suivants traitent le cas du séchage par l'air environnant lorsque le produit n'est pas lui-même chauffé par une autre source de chaleur, comme c'est le cas pour le séchage solaire direct. Dans ce dernier cas, les grands principes décrits restent valables; mais certaines particularités sont précisées en paragraphe 6. Le dernier paragraphe enfin expose les critères qui permettent de définir la fin d'un cycle de séchage. Un résumé des points qui conditionnent fortement la pratique du séchage termine ce chapitre.

Principes du comportement des produits alimentaires

Les produits destinés à l'alimentation humaine présentent une grande diversité dans leur forme, leur taille, leur homogénéité et leur composition biochimique. Ces caractéristiques conditionnent l'évolution du produit et donc induisent des contraintes dans les possibilités et le choix de traitements de conservation.

COMPOSITION BIOCHIMIQUE DES ALIMENTS

Tout composé biologique est constitué de molécules et d'assemblages moléculaires pouvant être regroupés en plusieurs familles. Ce sont:

- l'eau;**
- les lipides (ex: huiles, graisses...);**

- les protéines;
- les glucides (ou sucres);
- les éléments minéraux et les vitamines.

Toute différence de composition entraîne une évolution différente du produit.

La table de la page suivante indique la composition moyenne de quelques produits représentatifs. On peut voir sur cette table que la composition des produits végétaux (fruits et légumes) diffère très sensiblement de celle des produits carnés (viandes et poissons): teneur en eau et en glucides plus élevée, teneur en protéines et en lipides plus faible. C'est pourquoi on distingue ces deux groupes d'aliments. Le comportement des produits végétaux est très différent de celui des produits carnés.

On s'aperçoit aussi que dans ces deux grands groupes, certains produits diffèrent nettement.

| Aliment | % eau | % protéines | % lipides | % glucides | % minéraux |
|----------------------|-------|-------------|-----------|------------|------------|
| <i>Légumes frais</i> | | | | | |
| Tomate | 93 | 1 | 0,3 | 4,6 | 0,6 |
| Haricot vert | 89 | 2,4 | 0,2 | 8,4 | 0,5 |
| <i>Fruits frais</i> | | | | | |
| Orange | 87 | 1 | 0,2 | 9,8 | |
| Mangue | 81 | 0,4 | 0,1 | 17,5 | |
| Banane | 75 | 1,4 | 0,5 | 20 | |

| | | | | | |
|---------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| Chataigne 52 | 4 | 2,6 | | 42 | |
| <i>Viandes mi-grasses</i> | | | | | |
| Boeuf, mouton | 60 | 17 | 20 | 0,5 | 1,3 |
| Porc | 55 | 16 | 25 | 0,5 | 1,2 |
| <i>Viandes maigres</i> | | | | | |
| Cheval | 75 | 21 | 2 | 1 | 1 |
| Poulet | 70 | 21 | 8 | - | 1,4 |
| Poisson maigre (colin) | 80 | 17 | 2* | - | 1,6 |
| Poisson gras (thon) | 60 | 26 | 31* | - | 1,6 |

* Taux élevé de lipides très fortement oxydables (= lipides insaturés).

Source: C. Alais. G. Linden, « Biochimie alimentaire », éd. Masson, 1991.

Ainsi les fruits ont une teneur en eau plus faible que celle des légumes mais contiennent beaucoup plus de glucides.

De même la chair de poisson se différencie des viandes par un taux élevé de lipides qui s'oxydent très facilement, etc.

Les conséquences de ces différences de composition sont abordées ci-après.

ALTÉRATION DU PRODUIT

Le maintien de l'intégrité des tissus, leur fonctionnement nécessitent de l'énergie. La mort de l'animal ou la « récolte » du végétal vont empêcher les apports d'énergie. On

assiste alors une modification de leur physiologie qui provoque une dégénérescence des tissus. Ainsi vont apparaître les premiers problèmes de conservation.

D'autres phénomènes interviennent également. Certains apparaissent spontanément, suite aux modifications physiologiques des tissus et sont par la suite favorisés ou défavorisés en fonction des traitements et des conditions de stockage du produit.

C'est le cas:

- des altérations microbiennes;
- des réactions d'oxydation des lipides;
- des réactions de brunissement enzymatique.

D'autres phénomènes, comme le brunissement non enzymatique abordé plus loin, sont essentiellement dus aux traitements thermiques subis par les aliments.

Avant d'aborder plus en détail les problèmes spécifiques au séchage, il est important d'avoir une connaissance globale de ces phénomènes car ils entrent également en jeu dans le choix de traitements d'appoint adaptés à la nature de l'aliment.

évolution physiologique

L'ampleur et la rapidité des modifications physiologiques du produit après la récolte du végétal ou la mort de l'animal sont fonctions de chaque type d'aliment. La dégénérescence entraîne une perte de la valeur alimentaire du produit (critères de goût [organoleptiques], hygiéniques, nutritifs et d'appétit aux traitements technologiques...).

Comportement physiologique des végétaux après récolte

Après « récolte », le végétal ne va plus recevoir ni eau ni nutriments et la photosynthèse s'arrête. On assiste à une diminution de sa masse, à une production de chaleur et à la libération d'eau à la surface du produit. Le produit a tendance à se flétrir et offre un terrain favorable aux proliférations microbiennes. L'intensité du phénomène est liée à l'activité métabolique du végétal: elle est limitée dans le cas des végétaux en état de dormance (graines, tubercules, pommes, agrumes...) qui peuvent donc se conserver assez longtemps. En revanche, cette activité est très élevée pour la plupart des fruits et légumes qui, sans traitement, vont s'altérer assez vite.

Comportement physiologique des produits animaux: viandes et poissons

Les modifications physiologiques les plus importantes atteignent surtout les muscles. À la mort de l'animal, l'arrêt de la circulation sanguine va priver le muscle d'un apport en oxygène et en molécules énergétiques. Dans un premier temps, le muscle va mobiliser ses substances de réserve. Avec l'épuisement des réserves énergétiques, les fibres musculaires sont dans l'incapacité de se relaxer: le muscle va se durcir. Sa qualité diminue. On peut limiter ce phénomène en maintenant le produit carné entre 15 et 20°C.

Toutefois, après plusieurs jours, selon les conditions ambiantes, le produit carné perd de sa rigidité et s'attendrit: cette étape est favorable au développement microbien et aux réactions biochimiques d'altération.

Cas particulier du poisson: à cause de la composition et de la structure particulière du muscle de poisson, la rigidité puis l'attendrissement interviennent plus rapidement que dans le cas des viandes. Le poisson est ainsi rapidement exposé aux réactions d'altération et au développement microbien. C'est l'un des produits animaux les plus difficiles à conserver.

Altérations microbiennes

Les altérations microbiennes sont sans doute le facteur le plus limitant de la conservation des aliments. Elles modifient le goût et les caractéristiques hygiéniques de l'aliment. On distingue trois grands groupes de micro-organismes:

- les bactéries;
- les levures;
- les moisissures.

Ces micro-organismes sont naturellement présents sur les aliments mais peuvent être également apportés par des agents extérieurs (vent, sol, eau, insectes, manipulations de l'homme...).

Si les levures et les moisissures sont essentiellement responsables d'altérations du goût du produit, beaucoup de bactéries peuvent être extrêmement nocives pour l'homme, voire mortelles. L'ampleur des altérations ou de la nocivité de l'aliment dépend en grande partie du nombre de microbes qu'il contient. Or la population microbienne croît extrêmement vite. Quand les conditions sont favorables, 100 bactéries peuvent donner naissance à 3 millions de bactéries en moins d'une demi-journée!

D'une manière générale, les milieux les plus favorables au développement microbien sont constitués par des milieux liquides ou à forte humidité, riches en sucres, maintenus à des températures comprises entre 20 et 50°C. On comprend dès lors, compte tenu de l'effet de l'humidité, l'intérêt du séchage pour la conservation des aliments.

Les micro-organismes peuvent être partiellement détruits:

- par des agents chimiques spécifiques;

- par la chaleur, par des températures de produit supérieures à 65°C: pour un temps donné de maintien à température, plus la température sera haute, plus le taux de destruction sera élevé.

Pour une température donnée, plus le temps de maintien à température sera important, plus le taux de destruction sera élevé.

La croissance microbienne est d'autant plus limitée que:

- la présence d'eau non liée fortement au produit (et donc susceptible d'être facilement utilisée par la population microbienne) est faible dans ce produit;
- la température du produit est basse.

Remarques:

1. Le dernier point n'est pas en contradiction avec le fait que de hautes températures permettent d'éliminer les microbes: pour des gammes de température inférieures à 50-60°C, plus la température est élevée, plus les microbes sont actifs. En revanche, une température plus élevée les détruit.

2. Le premier facteur de limitation de la croissance microbienne mentionné ci-dessus fait appel à la notion d'activité de l'eau, plus ou moins liée au produit. Ce terme sera défini plus en détail par la suite. Nous conservons pour la suite de cette section l'idée que l'activité de l'eau dans un produit mesure le degré de liberté de mouvement de l'eau dans le produit. Elle est égale à 1 lorsque l'eau est totalement libre dans le produit, comme de l'eau liquide ordinaire, et très faible lorsqu'elle est « accrochée » à la matière sèche du produit par de très fortes liaisons électrochimiques.

Evolutions biochimiques

Il existe trois grands types de réactions biochimiques:

Oxydation et dégradation des lipides

Les lipides vont s'oxyder, donnant un mauvais goût de rance et abaissant la qualité nutritionnelle de l'aliment. Ce phénomène est influencé par divers facteurs:

- le degré d'insaturation des lipides: plus les lipides sont insaturés plus l'aptitude à l'oxydation est forte;
- la température: plus la température du produit est basse, plus l'oxydation est favorisée;
- l'oxygène, la lumière, le sel, le sang et certains métaux (fer, cuivre...) favorisent le rancissement;
- l'activité de l'eau dans le produit influence l'oxydation des lipides qui est minimale quand cette activité est comprise entre 0,2 et 0,4 (pour la commodité de l'exposé, la définition de l'activité de l'eau a été reportée à la section suivante);
- les protéines, les phosphates ou certains composés chimiques ont une action antioxydante vis-à-vis des lipides.

Le brunissement enzymatique

Caractérisé par l'apparition de pigments bruns du fait de réactions enzymatiques, il n'intervient cependant que pour les produits végétaux. Parfois recherché (dattes...), il est en général indésirable cause de la couleur qu'il donne au produit.

Il est favorisé par l'oxygène, par un pH compris entre 5 et 7 et par les manipulations qui blessent le produit (chocs, pluchage, parage...). Il est limité par les faibles teneurs en eau dans le produit, les traitements thermiques à température de produit supérieure à 65°C (blanchiment, pasteurisation...), les pH bas et par l'acide ascorbique.

Les réactions de Maillard (ou brunissement non enzymatique)

Ces réactions, encore appelées brunissement non enzymatique, interviennent essentiellement sous l'action de traitements thermiques. Elles sont caractérisées par l'apparition de pigments bruns ou noirs et par des modifications du goût et de l'odeur de l'aliment.

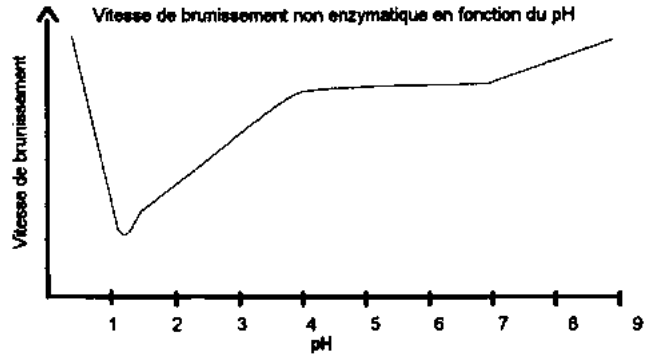
Elles sont par exemple en partie responsables de la transformation du sucre en caramel, de la croûte dorée du pain, de la couleur, du goût, de la saveur des pommes frites ou des viandes rôties...

Elles peuvent cependant aussi modifier le goût d'un aliment jusqu'à le rendre inconsommable. Selon les aliments et les habitudes culinaires d'une population, elles peuvent donc être recherchées ou non.

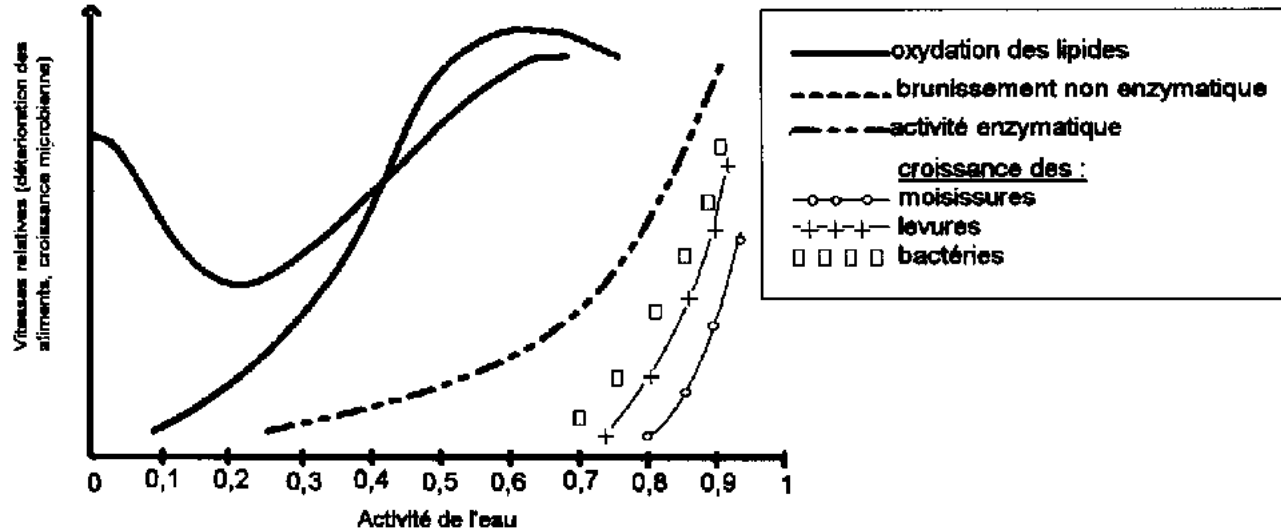
En général, elles constituent plutôt un facteur limitant pour la conservation des aliments déshydratés. Elles abaissent également leur valeur nutritionnelle.

Il est à noter que ces réactions se déroulent en deux phases principales:

- une phase pendant laquelle il y a production et accumulation de composés réactifs;**
- une phase de brunissement sous l'action de ces composés accumulés.**



Vitesse de brunissement non enzymatique en fonction du pH



Vitesse relative (de détérioration des aliments croissance microbienne)

Le brunissement non enzymatique se produit en général lors du traitement thermique, de manière plus ou moins rapide (quelques minutes à plusieurs heures) selon la sévérité du traitement. Toutefois, à cause de la possibilité d'accumulation de composés réactifs, un brunissement non enzymatique peut se révéler et s'intensifier au fil des jours et des mois qui suivent le traitement, alors qu'il n'était pas visible tout de suite après.

Les réactions de Maillard sont favorisées par:

- les glucides (sucres) et les protéines;

- pour une durée de traitement donnée, plus la température du produit est élevée, plus ces réactions sont importantes. Pour une température de produit donnée, plus le temps de traitement est grand, plus les réactions de Maillard seront favorisées; le seuil de température à partir duquel la vitesse de ces réactions s'accroît est de l'ordre de 50-60°C;
- l'activité de l'eau (entre 0,5 et 0,7) et le pH (entre 1 et 7);
- certains métaux (fer et cuivre...);
- l'acide ascorbique et autres acides organiques.

L'anhydride sulfureux est le seul inhibiteur (1) efficace.

(1) Inhibiteur: substance permettant de bloquer ou de ralentir une réaction chimique.

L'eau dans le produit

DÉTERMINER LA QUANTITÉ D'EAU À VACUER

On fait pour cela appel à une grandeur physique, la *teneur en eau*, appelée aussi *degré d'humidité*. C'est un paramètre fondamental du séchage. Il s'agit du rapport entre la masse d'eau dans le produit et la masse totale de ce produit, qui est la somme de la masse d'eau et de la masse de matière sèche qu'il contient.

Remarque:

Il ne faut pas confondre la matière sèche, qui est ce qui reste lorsque le produit a perdu la totalité de son eau (obtenue par un long séjour en étuve) et le produit sec, qui est le produit final après séchage et qui contient encore un peu d'eau.

La quantité d'eau à évacuer du produit peut être déterminée à partir:

- de la quantité de produit que l'on désire sécher;
- de la teneur en eau initiale, avant le séchage (c'est une caractéristique du produit, indiquée sur les « fiches produit ». À titre indicatif, elle est de 95 % pour la tomate et de 20 % pour le blé);
- de la teneur en eau finale. Cette dernière est une norme technique, en grande partie caractéristique du produit. Elle précise le niveau d'humidité du produit considéré à atteindre pour garantir sa conservation sur une longue période. Elle est elle aussi indiquée sur les « fiches produit », pour des conditions standard de stockage. À titre indicatif, elle est de l'ordre de 10 % pour la tomate et de 16 % pour le blé.

Remarque:

La teneur en eau finale recommandée dépend cependant aussi des conditions de stockage. En particulier, il peut être souhaitable de procéder à un séchage plus sévère que celui qui est recommandé sur les « fiches produit », dans le cas d'un stockage en air relativement humide. Il sera en effet alors parfois nécessaire de prévoir une éventuelle ré-humidification du produit, du fait de cette humidité de l'air ambiant, lors du stockage sur une longue période.

À titre d'exemple de calcul, cherchons à déterminer la quantité d'eau à extraire de 20 kg de bananes, déjà pluchées et préparées, pour un séchage efficace. Selon les données de la « fiche produit » de la banane en page 45, la teneur en eau initiale de ce produit est de 72 %, et la teneur en eau finale recommandée est de 15 %. On procède dès lors comme suit.

Le poids de matière sèche contenue dans les 20 kg de banane est de: $(1 - 0,72) \times 20 = 5,6$ kg, et le poids de l'eau contenue dans les mêmes 20 kg de banane fraîche est de: $0,72 \times 20 = 14,4$ kg. La matière sèche n'étant pas éliminée lors du séchage, il en reste toujours 5,6 kg en fin de séchage. Cette matière sèche doit représenter 100 % - 15 % de la masse de banane séchée, si on veut respecter les recommandations de la « fiche produit ». Le poids de banane séchée obtenue est donc de: $5,6 / (1 - 0,15) = 6,6$ kg et le poids de l'eau restant dans ce produit séché est de: $6,6 - 5,6 = 1$ kg.

On peut ainsi facilement calculer deux grandeurs importantes dans un même temps:

- la quantité de produit élaboré qui sera obtenu à partir d'une quantité donnée de matière première préparée (ici 6,6 kg de banane sèche pour 20 kg de banane fraîche et préparée). Ce calcul ne suffit cependant pas pour calculer l'approvisionnement nécessaire en matière première: il faut encore évaluer les pertes et déchets issus du tri et de la préparation du produit, ou utiliser les rapports produit sec/produit frais fournis dans les «fiches produit »;
- la quantité totale d'eau à extraire de cette matière première pour obtenir le produit final désiré (on a dans le cas précédent 14,4 kg d'eau dans la banane sèche, et il doit en rester 1 kg à la fin du séchage, soit 13,4 kg à enlever)

La première donnée est utile pour calculer la rentabilité économique de l'opération, pour estimer le rapport « matière élaborée/matière première ». La deuxième donnée est d'importance première pour le dimensionnement du séchoir, puisqu'elle conditionne fortement les paramètres du séchage (température et débit de l'air, durée du séchage).

De façon générale, la quantité d'eau à évacuer d'une quantité donnée de produit est d'autant plus grande:

- que cette matière première est en quantité importante: les deux quantités sont

proportionnelles;

- que le degré d'humidité initial du produit est élevé: pour un même degré d'humidité final de 15 %, il faudra enlever deux fois moins d'eau dans un produit teneur initiale de 75 % plutôt que de 85 %, et trois fois moins pour un produit teneur initiale de 65 %;
- que le degré d'humidité final requis est faible.

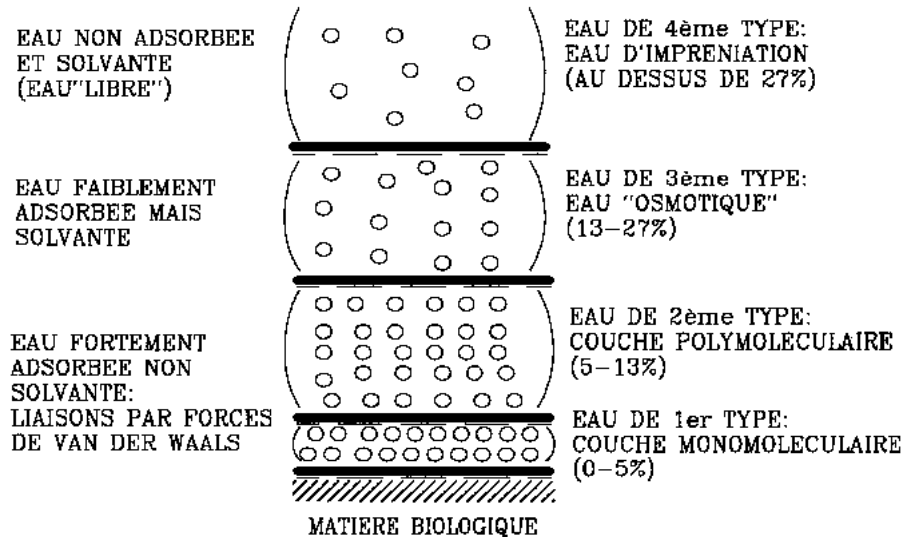
NOTION DE DISPONIBILITÉ DE L'EAU

L'eau contenue dans un produit animal ou végétal est plus ou moins «disponible ». Cette « disponibilité » varie pour un même produit en fonction de sa teneur en eau. Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis-à-vis de l'eau. Un fruit mûr ne se comporte pas comme un fruit vert. Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique: certaines structures ou molécules retiennent l'eau plus que d'autres. Cette « disponibilité » apparente est quantifiée par une grandeur physique: *l'activité de l'eau du produit*. Celle-ci se définit par rapport à un état de référence qui est celui de l'eau pure, pour laquelle l'activité est égale à 1.

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

Un produit alimentaire contient en général dans le même temps plusieurs sortes d'eau: de l'eau libre, des eaux faiblement liées et des eaux fortement liées, ces dernières étant

retenues aux molécules de matière sèche par des forces relativement importantes. Le graphique ci-dessous en fournit une illustration dans le cas d'un maïs.



Différents types d'eau pour du maïs à 15°C (d'après Rodriguez)

Les proportions d'eau plus ou moins adsorbée dépendent de chaque produit. Pour les produits les plus hydratés tels la plupart des fruits et les gumes, une partie importante de l'eau sera sous forme d'eau libre, en surface du produit ou dans des « poches », et de l'eau faiblement adsorbée, retenue par capillarité dans les tissus du produit. Pour les produits les plus secs, et selon leur texture et leur composition chimique, une part plus importante de l'eau sera fortement adsorbée par le produit (cas de la plupart des

cordales).

Un produit qui ne contiendrait que de l'eau dite « du premier type », très fortement liée au produit par des forces électrochimiques (liaisons de Van Der Waals) serait très fortement protégé des risques de dégradation: l'eau est si fortement liée à la matière sèche que les microbes ne peuvent en disposer pour leur développement. D'autre part, cette eau a perdu une part de ses caractéristiques physico-chimiques, car elle partage partiellement ses électrons avec la matière sèche.

POUR VAPORER L'EAU IL FAUT DE L'ÉNERGIE

L'eau existe sous différentes formes: solide, liquide, gazeuse. La transformation d'une forme en une autre, encore appelée changement d'état, absorbe ou fournit de l'énergie suivant le cas.

Dans l'eau liquide, les molécules sont liées entre elles par des forces qui les empêchent de se séparer. Lorsqu'on chauffe l'eau, mais que l'apport de chaleur reste modéré, les molécules s'agitent de plus en plus, mais ces forces ne sont pas rompues. Lorsque l'eau s'évapore, ces forces sont rompues et les molécules se séparent. Pour rompre ces forces, il faut fournir un apport conséquent de chaleur, c'est-à-dire d'énergie.

Lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure: il suffit pour la vaporiser de relativement peu d'énergie (de l'ordre de 2 400 KJ/kg d'eau libre). En revanche, lorsque l'eau contenue dans un produit a une activité nettement inférieure à 1, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit d'eau liée, des forces la maintiennent davantage au produit. L'évaporation de cette eau est de ce fait plus difficile et demande plus d'énergie.

Au cours du séchage, c'est d'abord l'eau libre qui va être évaporée, puis l'eau de plus en plus liée. La quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente donc au cours du séchage. Le dernier gramme d'eau évaporée coûte beaucoup

plus d'énergie que le premier.

Ceci est un point important pour comprendre que le séchage n'est pas une opération homogène dans le temps, mais doit plutôt être considéré comme une succession de phases assez différentes, sur lesquelles il sera nécessaire de revenir après avoir précisé la façon dont se font les échanges d'eau entre le produit et l'air.

L'eau dans l'air

LE POUVOIR ÉVAPORATOIRE DE L'AIR

Dans le séchage par entraînement, l'air est avant tout chargé d'évacuer la vapeur d'eau en surface du produit. L'évaporation de cette eau a nécessité de la chaleur provenant uniquement de l'air, au dessus du produit (cas du séchage indirect), ou provenant, en supplément, du rayonnement solaire frappant le produit (cas du séchage direct).

L'air à l'état naturel contient de l'eau sous forme de vapeur invisible. Cette quantité d'eau est variable (selon le climat local, les mouvements d'air dans l'atmosphère, la présence de grands lacs, de nuages...). Sa capacité à absorber de l'eau est par contre totalement déterminée par sa température et la pression. Par exemple, 1 m³ d'air, à la pression atmosphérique, et à 26°C, ne peut contenir plus de 24,5 g de vapeur d'eau. Au-delà, la vapeur d'eau se condense en fines gouttelettes: c'est le brouillard. On dit alors que l'air est à saturation d'eau.

On définit par « pouvoir évaporatoire » de l'air sa capacité à absorber de l'eau placée en son contact, mesurée en grammes d'eau supplémentaires qu'il peut absorber, par mètre cube d'air, jusqu'à atteindre la saturation d'eau.

Deux paramètres sont introduits pour quantifier les proportions entre l'air sec et la vapeur d'eau contenue dans cet air:

- l'humidité absolue (teneur en eau), qui s'exprime en grammes d'eau par kg d'air sec. Par exemple si elle est de $x = 10 \text{ g/kg}$ d'air sec, dans $1,01 \text{ kg}$ d'air on a 1 kg d'air sec et 10 g de vapeur d'eau.

- l'humidité relative (degré qui s'exprime en pour cent (%)). Cette valeur précise le niveau d'humidité absolue de l'air par rapport au niveau d'humidité absolue maximal qu'il pourrait avoir, compte tenu de la température de l'air et de la pression. Elle permet donc de connaître le niveau de saturation de l'air en eau.

Pour une humidité relative de l'air de 100% , celui-ci ne peut plus absorber d'eau sans que celle-ci ne se condense en buée ou gouttelettes. Son pouvoir évaporatoire est alors nul. Plus le degré d'humidité relative de l'air s'éloigne de cette valeur, plus l'air dispose d'une capacité d'absorption de nouvelles quantités d'eau, et plus son pouvoir évaporatoire est fort.

Lorsque l'air est réchauffé, son humidité relative diminue (bien que son humidité absolue reste la même). Son pouvoir évaporatoire augmente donc. On comprend dès lors l'intérêt de réchauffer l'air qui sera utilisé pour le séchage.

Le tableau ci-contre fournit les ordres de grandeur du pouvoir évaporatoire de l'air pour différents niveaux de sa température et de son degré d'humidité relative (d° hygrométrique) qui se présentent pour l'air ambiant. Les pouvoirs évaporatoires d'airs portés à plus haute température sont précisés au chapitre suivant.

La capacité de l'air à enlever l'eau du produit se détermine normalement de façon plus complexe, sur la base de la lecture du « diagramme de l'air humide ». Ces éléments seront abordés en troisième partie, plus théorique.

Le pouvoir évaporatoire, tel que défini ci-dessus, permet de préciser la vitesse de séchage dans les premières phases de l'opération. L'air en sortie du séchoir peut en

effet \diamond tre relativement proche de son niveau de saturation en eau tant qu'il y a de l'eau libre dans le produit, ce qui est le cas au d \diamond but du s \diamond chage. De la sorte, et pour ce d \diamond but de s \diamond chage, le pouvoir \diamond vaporatoire exprime, en premi \diamond re approximation, la quantit \diamond d'eau extraite du produit par nombre de m \diamond tres cubes d'air ayant travers \diamond le s \diamond choir. Pour affiner cette approximation, il faut par la suite tenir compte de ce que l'air ne sortirait du s \diamond choir \diamond saturation que si:

- les \diamond changes d'eau \diamond la surface air/produit \diamond taient parfaits, ce qui n'est pas le cas dans la r \diamond alit \diamond ;
- tout l'air passait un temps suffisant au contact direct du produit pour se charger totalement en eau, ce qui n'est pas non plus le cas (de l'air passe pr \diamond s des parois et relativement loin du produit et n'a pas le temps, lors de sa progression dans le s \diamond choir, d'accumuler toute l'eau dont il peut se charger).

Pouvoir \diamond vaporatoire de l'air en grammes d'eau par m \diamond tre cube d'air

Froid et sec: la Sib \diamond rie Chaud et sec: le Sahara

| Humidit \diamond relative | Temp \diamond rature de l'air en $^{\circ}$ C | | | | | | | |
|-----------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 10 | | | | | | 8,2 | 9,2 | 9,9 |
| 20 | | | | | 6 | 7,3 | 8 | 8,6 |
| 30 | | | | 5 | 5,6 | 6,2 | 6,6 | 6,9 |
| 40 | 2,7 | 3,2 | 3,7 | 4,2 | 4,6 | 5,1 | 5,5 | 6,1 |
| 50 | 2,2 | 2,6 | 3 | 3,4 | 3,7 | 3,9 | 4,1 | |
| 60 | 1,8 | 2,1 | 2,3 | 2,6 | 2,9 | 3,1 | | |

| | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|
| 70 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 2,1 | 2,1 | | | |
| 80 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,2 | | | | |
| 90 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | | | | | |

Froid et humide: l'Irlande

Chaud et humide: Amazonie

(d'après « Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales », SOLAGRO, GEFOSAT, ARCHIMED, 1989)

L'approximation première ne fournit donc ici qu'un ordre de grandeur par excès de la capacité de l'air à enlever l'eau du produit. Cette surestimation peut être de l'ordre de 10 (contact air/produit très efficace et peu d'air « inutile », mal focalisé sur le produit dans le séchoir) à 50 %.

Comme il a déjà été mentionné, le séchage se produit d'autre part en plusieurs phases, et les « règles du jeu » sont plus difficilement calculables lorsqu'il n'y a pas d'eau libre ou très peu liée dans le produit.

Les trois phases de séchage

Quel que soit le mode de séchage solaire (naturel, direct ou indirect), les produits agro-alimentaires subissent trois périodes de séchage de durée variable suivant les caractéristiques de l'air et du produit. La vitesse de séchage, exprimée en kg d'eau extrait par heure, la température du produit et l'humidité de l'air évoluent dans le temps de façon très distincte selon ces phases.

PÉRIODE DE MISE EN TEMPÉRATURE DU PRODUIT (PHASE I)

La première phase (vitesse de séchage croissante) est courte, éventuellement inexistante, et correspond à la montée en température du produit jusqu'à atteindre une température d'équilibre, lorsque le produit reçoit autant de chaleur de l'air qu'il doit en fournir à l'eau lors de sa vaporisation. Cette température d'équilibre ne s'atteint pas tout de suite, puisque le produit avait au départ du séchage une température plus basse, et qu'il existe une inertie thermique. La vitesse de séchage sera croissante puisque l'échange d'eau entre le produit et l'air sera d'autant plus efficace que le produit sera réchauffé.

PHASE DE VITESSE DE SÉCHAGE CONSTANTE (PHASE II)

La deuxième phase, à vitesse constante, correspond à l'évaporation de l'eau libre (activité de l'eau = 1) en surface du produit, sans cesse renouvelée par de l'eau venant de l'intérieur du produit (en partie similaire au phénomène de transpiration). La température du produit reste constante.

Du point de vue de l'évolution des températures, on peut comparer les phases I et II aux phases du chauffage d'une casserole d'eau: la température de l'eau monte dans un premier temps puis se stabilise lorsque l'eau bout (à 100°C sous pression atmosphérique). Il est important de noter que l'analogie s'arrête là et qu'il ne faut pas confondre la vaporisation et l'ébullition. Ce n'est pas en effet, dans le cas du séchage, une ébullition de l'eau à l'intérieur du produit qui provoque sa vaporisation. C'est plutôt un jeu « subtil » de lutte d'influence entre le produit et l'air dans l'attraction de cette eau. 100°C n'est pas une température de séchage recommandée!

En phase II, la vitesse de séchage est constante tant que les caractéristiques de l'air et sa vitesse de passage sur le produit sont constantes. Cette vitesse de séchage peut être accélérée soit en réchauffant davantage l'air avant son arrivée sur le produit (ce qui provoque une augmentation du pouvoir évaporatoire de l'air), soit en augmentant la

vitesse de circulation de l'air au niveau du produit (ce qui augmente le débit d'air, donc la quantité d'air susceptible d'emporter avec lui de l'eau du produit en un temps donné).

Remarque:

Le choix d'augmenter ou non la vitesse de séchage dépendra:

- du rythme de production nécessaire pour rentabiliser l'activité;
- du coût des options d'accélération de la vitesse de séchage;

Le choix d'augmenter cette vitesse par augmentation de la température de l'air ou par augmentation de son débit dépendra, entre autres choses:

- des coûts relatifs de chaque option. Par exemple: augmenter la surface de captage de l'énergie solaire ou introduire une source supplémentaire de réchauffement de l'air (gaz) pour la première option, et choisir un ventilateur plus puissant ou une cheminée solaire plus haute pour augmenter le débit d'air pour la deuxième;
- des contraintes associées à chaque produit, qui conditionnent la gamme de températures de séchage admissibles (sans risque d'altération du produit).

Précisons que ces deux options sont liées. On peut augmenter la température de l'air en diminuant le débit d'air. L'air restera alors plus longtemps en phase de réchauffement avant d'arriver sur le produit. Mais la vitesse de séchage n'augmentera pas pour autant. Au contraire, elle diminuera: l'impact de la diminution du débit d'air sera plus fort que l'impact du réchauffement de l'air. Dans le même ordre d'idée, une augmentation du débit d'air sans modification de l'apport d'énergie pour le chauffage de l'air conduit à une diminution de température (L'air restera moins longtemps en phase de

réchauffement), qui affectera l'efficacité de cette option.

- des risques de dégradation du produit encourus (cf. paragraphe suivant «Actions du séchage sur la qualité du produit alimentaire »).

Toutefois, la phase II est une phase qui présente un risque de dégradation spécifique du produit: le croûtage.

Le croûtage: un problème spécifique du séchage à éviter absolument

Ce phénomène est spécifique à la phase II du séchage après extraction de l'eau libre du produit.

Origine et manifestation: Le croûtage est d  à la capacité limitée de diffusion de l'eau dans le produit. Si la capacité évaporatoire: de l'air est très forte, l'eau va s'évaporer plus vite à la surface du produit qu'à l'intérieur: la surface deviendra dure et sèche. Elle empêchera la diffusion ultérieure de l'eau contenue dans le produit.

Le comportement du produit au séchage sera alors similaire à celui qu'il a normalement en phase finale, pr sent e ci-dessous, sans pour autant que l'humidité du produit diminue. Dans certaines conditions, le croûtage peut survenir très rapidement, en quelques minutes. Or, c'est un phénomène qu'il faut à tout prix chercher à éviter car il a une grande incidence sur les altérations du produit (voir ci-dessous).

Facteurs favorables au croûtage: Le risque de croûtage est d'autant plus grand que l'humidité de l'air au niveau du produit est faible, que la vitesse de circulation de l'air sur le produit est élevée et que le produit est épais.

Prévention et résorption du croûtage: Dans le cas de s choirs artisanaux, le suivi de l'humidité en sortie de séchoir permet de limiter les risques de croûtage. D'une manière

générale, dès que l'humidité relative de l'air en sortie descend en dessous de 60 % en phase II, il y a risque de croûtage.

Toutefois, cette valeur est à déterminer pour chaque type de séchoir et de produit. Le suivi de la température du produit à l'aide d'une sonde de contact (cf. troisième partie, chapitre X) permet d'affiner la connaissance du comportement du produit pour un type de séchoir donné.

Un léger croûtage peut souvent être résorbé en interrompant le processus de séchage avant qu'il ne soit irréversible, pour laisser le temps à l'eau contenue à l'intérieur du produit de rehumidifier la surface. On peut également disposer le produit quelques heures dans une atmosphère à forte humidité relative (90-95 %).

PÉRIODE DE RALENTISSEMENT DU SÉCHAGE (PHASE III)

La troisième phase (ralentissement de la vitesse de séchage) correspond à l'évaporation de l'eau libre. L'eau libre, qui migrait de l'intérieur vers l'extérieur du produit pour être alors transformée en vapeur d'eau, a complètement disparu en fin de phase II. Ne reste plus dans le produit que l'eau libre, plus « accrochée » au produit. L'eau ne s'évapore plus à la surface du produit mais à l'intérieur de celui-ci. Un front d'évaporation s'enfonce vers le cœur du produit. La vapeur d'eau est ensuite évacuée en surface par l'air. Plus le front s'éloigne de la surface extérieure du produit, plus le transfert d'eau est difficile.

Par ailleurs, l'eau faiblement liée au produit, et donc la plus facile à extraire, s'évapore le plus vite. Au cours de cette phase de séchage, l'eau à éliminer du produit est de plus en plus liée, et de plus en plus difficile à évaporer.

Un troisième facteur intervient parfois pour expliquer le ralentissement de la vitesse de séchage à mesure que l'on approche de la fin de l'opération. Les corps solubles, transportés en surface par le mouvement de l'eau, obstruent les pores du produit et il se

forme parfois une croûte sur sa surface, qui gêne le transfert de l'eau vers l'air extérieur.

Dans cette phase, et si débit d'air et température d'arrivée de l'air restent les mêmes qu'auparavant, la température du produit augmente et tend à devenir égale à la température d'arrivée de l'air. En effet, l'air fournit un flux de chaleur constant au produit, alors que l'effet refroidissant de l'évaporation de l'eau contenue dans le produit s'estompe (du fait d'une moindre vitesse de cette évaporation). Si on poursuivait le séchage jusqu'à disparition complète de l'eau dans le produit, celui-ci n'aurait plus de source de refroidissement (la vaporisation de son eau), et sa température deviendrait celle de son milieu ambiant, c'est-à-dire la température de l'air d'arrivée. Elle peut alors dépasser largement la température admissible du produit au-delà de laquelle se produisent des altérations profondes de sa qualité. Il faut donc impérativement contrôler cette augmentation de température pour ne pas dépasser la température maximale admissible par le produit, afin d'éviter la dégradation du produit.

Lors de cette phase, une température de l'air chaud légèrement inférieure de quelques degrés à cette température maximale permet de garantir cette sécurité tout en optimisant la vitesse d'évaporation.

Remarquons enfin que la détermination de la vitesse de séchage ne peut plus se faire sur les mêmes bases qu'en phases I et II (multiplication du débit d'air par la différence de taux d'humidité relative entre un air saturé d'eau et l'air à l'arrivée sur le produit). En effet, du fait des difficultés rencontrées dans l'extraction l'eau libre, l'air de sortie du séchoir n'est plus chargé d'eau à sa pleine capacité (saturation).

ALLURES DE SÉCHAGE

Selon les produits, d'importantes variations peuvent exister dans les durées respectives de ces trois phases. Dans le cas des produits à particules ou à feuilles, la phase I est quasiment inexistante. La phase II n'existe pas toujours. Enfin, la phase III peut être

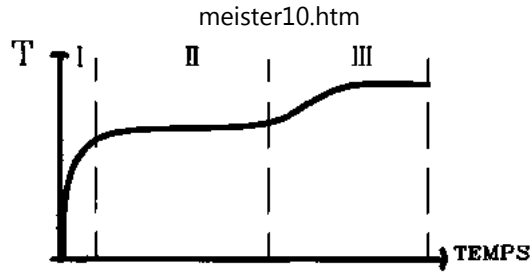
divisée en plusieurs périodes.

Les évolutions en cours de séchage de paramètres tels que la masse d'eau dans le produit, sa température ou la vitesse du séchage, sont propres à chaque produit. Elles sont déterminées expérimentalement en laboratoire, en séchage continu, et sont représentées sous forme de courbes appelées allures de séchage. Les trois courbes présentées ci-contre fournissent un exemple type d'allures de séchage.

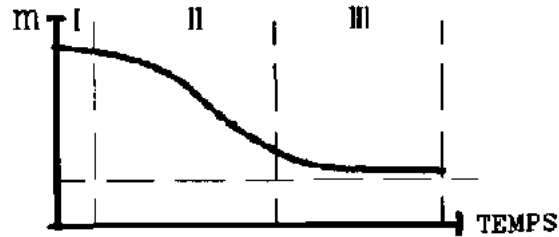
INFLUENCE DE LA TAILLE ET DE LA DISPOSITION DU PRODUIT LORS DES TROIS PHASES

En règle générale, quelle que soit la phase de séchage, on a intérêt à augmenter la surface d'échange air/produit (petits morceaux, également sans que les morceaux se touchent, couches minces...). Ceci présente plusieurs avantages qui seront précisés par la suite, au chapitre V][I. Ne sont présentés ici que les avantages qui ont trait aux mécanismes décrits dans les trois phases du séchage:

- une telle mesure permet de diminuer la durée de la première phase: plus les morceaux sont petits et en couche mince, plus le produit atteindra rapidement la température à partir de laquelle le séchage est efficace (moindre inertie thermique);**
- en deuxième phase, l'évaporation s'effectue en surface du produit, et est d'autant plus rapide que la somme des surfaces de contact entre l'air et le produit est élevée et que l'air peut accéder facilement à toutes ces surfaces. D'autre part, le risque de croûtage du produit, évité plus haut, est nettement amoindri lorsque les morceaux de produit sont de petite taille;**
- en troisième phase, l'élimination de l'eau en profondeur dans le produit sera d'autant plus facile que le front d'évaporation reste proche de la surface (donc que les morceaux sont de taille réduite).**



◊volution dans le temps de la masse d'eau (m , en kg) contenue dans une couche mince.



◊volution dans le temps de la vitesse de s̄chage (V) d'une couche mince (en kg d'eau par heure).



évolution dans le temps de la température T du produit sécher.

| PHASE I | PHASE II | PHASE III |
|--|---|--|
| La chaleur de l'air sert surtout à chauffer le produit (T augmente). L'évaporation augmente progressivement. | Le produit est chaud et cède son eau libre à vitesse constante. Le refroidissement du produit par la vaporisation de son eau compense exactement la chaleur qu'il reçoit de l'air: la température du produit reste constante. | Toute l'eau libre est évaporée. L'extraction de l'eau est plus difficile et la vitesse du séchage diminue. Le rythme de vaporisation de l'eau n'est plus suffisant pour compenser, par refroidissement, l'apport de chaleur par l'air: la température du produit augmente. |

De telles mesures sont cependant parfois difficiles à prendre. C'est le cas pour le séchage des coréales, qui sont traitées en couche épaisse. Les produits séchés en couche épaisse ont en effet un comportement complexe. Si on décompose la couche épaisse en une succession de couches minces, on constate que seule la couche d'entrée a le comportement d'une couche mince (vitesse de séchage constante, puis ralentissement).

En effet, l'air se charge d'humidité et se refroidit au fur et à mesure qu'il traverse la couche épaisse. Quand la couche d'entrée amorce sa phase de ralentissement, l'air qui la traverse en sort moins saturé d'eau. Alors commence le séchage à vitesse constante de la couche suivante. Ainsi progresse peu à peu le front de séchage, de l'entrée vers la sortie. L'application de la théorie suppose donc de décomposer la couche épaisse en une succession de couches minces. D'où des calculs complexes, qu'il faut valider par l'expérimentation.

Une autre conséquence directe de la spécificité du séchage en couche épaisse est que

l'air de séchage ne doit pas être porteur d'une température supérieure à la température maximale admissible par le produit: les premières couches du produit sont très vite en phase III du séchage.

Actions du séchage sur la qualité du produit alimentaire

L'effet du séchage sur la qualité du produit alimentaire est abordé successivement sous deux angles: l'évolution de sa population microbienne, et l'évolution de ses caractéristiques gustatives et nutritionnelles.

ACTION DU SÉCHAGE SUR LES MICRO-ORGANISMES

Les traitements de conservation sont d'autant plus difficiles que la population microbienne est élevée. Si certains traitements peuvent permettre de réduire cette population, ils ne peuvent en aucun cas atteindre la stérilité totale.

En revanche, tous les traitements de conservation doivent empêcher le développement des micro-organismes avant qu'ils ne soient trop nombreux.

Parmi les traitements qui stabilisent la population microbienne, on peut citer des traitements chimiques (acidification, salaison, sucrage, inhibiteurs chimiques...) et des traitements physiques (froid, stérilisation, déshydratation...).

Les conditions les plus propices au développement des micro-organismes se situent aux fortes activités de l'eau du produit (0,8) et dans une gamme de température comprise entre 20 et 50°C.

Pour la conduite du séchage, il faut:

- éviter que l'air de sortie du séchoir soit trop humide (80-95 %) car cela indique

qu'une partie au moins du produit se situe dans une atmosphère humide propice au développement microbien: le produit ne doit pas rester plus d'une demi-journée en début de séchage de tels taux d'humidité relative de l'air;

• essayer d'arriver rapidement de faibles activités de l'eau dans le produit; cependant, il existe deux obstacles majeurs une telle conduite.

- Il peut se produire un croûtage du produit aux allures de séchage rapide: la surface sera dure et sèche. Elle empêchera la diffusion de l'eau contenue l'intérieur du produit. L'intérieur de l'aliment restera donc de fortes teneurs en eau et ne sera pas stable microbiologiquement.

- Un séchage rapide est en général lié des températures de l'air assez élevées (jusqu'à 70-80°C). Cela peut entraîner en phases II et III des modifications du goût indésirables. Ce risque est amplifié par le phénomène de croûtage s'il survient (cuisson, réactions de brunissement).

Remarque:

Pour des raisons techniques ou économiques, il peut être intéressant:

- d'effectuer un préséchage rapide permettant de stabiliser le produit quelques jours puis, ultérieurement, un séchage complémentaire pouvant être plus lent et permettant de descendre de très faibles teneurs en eau;**
- d'effectuer un cycle de séchage complexe quand le séchoir est réglable.**

Exemples: En phases I et II, séchage rapide température élevée condition que:

- la température du produit reste inférieure à la température maximale admissible par le produit (on préconise une température d'arrivée de l'air de 10° supérieure à cette température maximale);

- l'humidité relative de l'air après passage sur le produit reste comprise entre 60 et 80 % pour éviter le croûtage d'un côté et le développement microbien de l'autre.

En phase III, séchage à température réduite pour que la température du produit reste inférieure à la température critique de brunissement non enzymatique.

Dans des conditions particulièrement défavorables (conditions climatiques défavorables, produit particulièrement altérable, mauvaises conditions de stockage, etc.) il est recommandé d'utiliser un traitement anti-microbien d'appoint spécifique (précisé au chapitre VII).

Les produits qui doivent être le plus surveillés sont les viandes et surtout les poissons à cause du terrain favorable qu'ils offrent au développement des microbes pathogènes (entraînant des maladies).

ACTION DU SÉCHAGE SUR LES TRANSFORMATIONS DU GOUT DU PRODUIT

Ces transformations sont inévitables mais selon la composition de l'aliment et les paramètres du séchage, certaines réactions vont être favorisées tandis que d'autres vont être limitées. L'essentiel est de savoir quelles réactions vont constituer le facteur prédominant d'altération afin de mieux cibler les caractéristiques que doit avoir le traitement de conservation.

Les réactions d'oxydation des lipides

Au point de vue de la conduite du séchage, elles seront limitées par un séchage:

- haute température (le croûtage et le risque de brunissement non enzymatique tant des facteurs limitants);
- men l'abri de la lumière (le séchage solaire direct est donc éviter pour les produits les plus sujets ces réactions);
- conduit des activités de l'eau dans le produit entre 0,2 et 0,5.

Parmi les produits pour lesquels ces réactions peuvent être un facteur limitant, on peut citer:

- les produits forte teneur en lipides et surtout en lipides insaturés (viande de porc, de volaille, poissons - surtout les poissons gras -, pommes de terre...);
- les produits présentant une grande surface d'échange par rapport leur volume, condition que la teneur en lipide soit suffisamment élevée: produits poreux, farine de poisson.... En effet, quand l'eau s'évapore, elle va faciliter le contact et la diffusion de l'oxygène dans l'aliment et donc le rancissement.

Ces réactions peuvent être limitées par des prétraitements employant des antioxydants et par un conditionnement adapté (cf. chapitre VII).

Le brunissement enzymatique

Le séchage men jusqu' des activités de l'eau inférieures 0,4 va limiter l'action des enzymes. Cependant, ce brunissement peut intervenir très rapidement (quelques dizaines de minutes pour certains produits). C'est pourquoi un prétraitement permettant de stopper ces réactions dès le début du procédé de conservation est souvent souhaitable

(ex: blanchiment).

Les produits concernés sont essentiellement des fruits (bananes, abricots, pommes...) et quelques légumes (pommes de terre...).

Les réactions de Maillard (ou réactions non enzymatiques)

Les produits les plus concernés par les réactions de Maillard sont les fruits et les produits carnés. Elles seront d'autant plus favorisées que le produit est acide, riche en acide ascorbique (vitamine C), en glucides et en protéines.

Ces réactions seront d'autant plus limitées que le séchage permettra d'abaisser rapidement l'activité de l'eau, en dessous de 0,5 dans la mesure du possible, et que la température du produit reste inférieure à la température « critique » de 50-55°C. Cette température est à préciser et à adapter en fonction du produit.

Un séchage à basse température ne limite pas forcément le brunissement non enzymatique car le temps de séchage est en général plus élevé. Le produit reste plus longtemps à des niveaux d'humidité favorisant à la fois les réactions de Maillard et le développement microbien. De plus, l'oxydation des lipides (du fait d'un séchage à basse température) peut également être un facteur limitant.

Un séchage rapide à haute température reste donc préférable tant que la température du produit reste inférieure à la température « critique ».

Rappelons que le brunissement non enzymatique peut se révéler au cours du stockage sur un produit apparemment « sain » juste après séchage. Pour les fruits, l'emploi d'anhydride sulfureux avant ou après séchage peut s'avérer intéressant pour ralentir ces réactions.

Autres conséquences du séchage

On peut citer:

- **une perte assez limitée des composés aromatiques;**
- **une modification de la pigmentation et de la texture du produit;**
- **une perte en vitamines notamment en vitamines A et C, limitée par un séchage indirect;**
- **une conservation de la quantité de sels minéraux.**

Le cas du séchage solaire direct

Les éléments de la théorie du séchage solaire indirect présentés plus haut sont valables pour le séchage solaire direct ou pour le séchage au soleil, avec quelques modifications.

En effet, le produit est alors chauffé non seulement par l'air, mais aussi directement par le soleil. On applique donc la théorie précédente, mais en considérant une température fictive, résultat de l'échauffement du produit. Cette température fictive est difficile à calculer.

Sa détermination repose sur la connaissance de trois paramètres:

- **le flux solaire arrivant sur le produit;**
- **la surface de produit exposée;**
- **le coefficient d'absorption du flux solaire par le produit; il dépend de l'état de surface du produit (couleur, lisse ou rugueux) et du comportement de cette surface**

aux différentes longueurs d'onde du rayonnement solaire. Il semble que l'absorption du rayonnement soit plus forte en fin de séchage, ce qui renforce la contrainte de la température maximale admissible par le produit en phase III, puisque c'est encore un facteur qui tend à augmenter la température du produit.

Dans la pratique, on la déduit des observations. Le pouvoir séchant de l'air est donc plus fort dans le cas du séchage solaire direct que dans le cas du séchage solaire indirect. Le séchage est alors plus rapide, ce qui peut présenter des avantages. Cependant, le séchage solaire direct présente aussi des risques, que l'on peut éviter en prenant certaines précautions:

| Risques | Précautions |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Le produit peut être dégradé en phase III du séchage, par un échauffement excessif. - Si l'humidité relative s'élève la nuit (brusque chute de température, pluie) la couche sèche du produit peut réabsorber de l'eau (c'est la résorption nocturne). Cela peut allonger considérablement la durée du séchage. | <ul style="list-style-type: none"> - En fin de séchage, couvrir partiellement le produit ou le capteur quand le soleil est au plus haut. - Couvrir complètement le séchoir pendant la nuit pour l'isoler des conditions climatiques nocturnes. |

Jusqu'où mener le séchage?

Le séchage d'un produit doit être mené jusqu'à l'obtention de la teneur en eau recommandée pour son stockage sur le long terme. Il existe plusieurs méthodes envisageables pour savoir quand ce stade est atteint.

- **Analyse de la teneur en eau d'échantillons du produit. C'est la méthode la plus fastidieuse. Elle consiste à retenir quelques produits témoins dans chaque lot de**

séchage et analyser leur teneur en eau régulièrement en cours du séchage.

Cette démarche peut être nécessaire pour analyser le comportement d'un séchoir pilote, mais n'est pas compatible ni avec les attentes des petits producteurs, ni avec les contraintes de production des plus gros.

- **Suivi de l'évolution du degré d'humidité relative de l'air en sortie de séchoir. La teneur en eau du produit et l'humidité relative de l'air en sortie de séchoir sont liées par des relations qui sont précisées en troisième partie. Pendant la phase II, l'humidité relative de l'air dans le séchoir doit être assez élevée (environ supérieure à 60 %). Quand on approche de la phase III, l'humidité relative va avoir tendance à chuter. La mesure de l'humidité relative de l'air en sortie de séchoir peut donc fournir des indications sur le degré de séchage obtenu.**
- **Suivi de l'évolution du poids du produit. On a montré dans le premier paragraphe comment le poids du produit et sa teneur en eau sont liés. Une méthode simple consiste donc à relever le poids d'un échantillon de produit avant séchage et à effectuer des pesées régulières de cet échantillon vers la fin de la phase II de séchage. On stoppera le séchage lorsque le poids du produit sera en correspondance avec la teneur en eau finale recommandée.**
- **Analyse des caractéristiques externes du produit. Les caractéristiques extérieures de certains produits dépendent fortement de leur teneur en eau. Il suffit alors de procéder dans un premier temps à l'analyse de produits séchés disposant de la teneur en eau recherchée, et observer les caractéristiques de ces produits. On pourra par la suite, sans avoir à réaliser de mesures, arrêter le séchage lorsque le produit aura ces mêmes caractéristiques. Ce critère peut être, par exemple: on peut arrêter le séchage lorsque le produit a une consistance élastique, est souple, de couleur brun doré, et que les morceaux ne se collent pas**

ensemble (cas établi pour une variété de mangue). Par mesure de prudence, il convient cependant de réaliser de temps en temps une analyse pour surveiller la teneur en eau des produits finis.

• Pour les petites productions et pour des séchoirs à comportement relativement stable, on pourra parfois se contenter de se rappeler la durée de séchage nécessaire dans les conditions d'ensoleillement et d'humidité de l'air présentes, sur la base d'une expérience accumulée suffisante.

En résumé

Les principaux éléments théoriques mentionnés qui conditionnent la pratique du séchage sont les suivants:

• La présence d'eau dans un produit alimentaire est l'un des principaux facteurs de sa dégradation potentielle, par multiplication des micro-organismes. De façon à disposer de produits séchés de bonne tenue dans le temps, il est nécessaire d'abaisser la teneur en eau jusqu'à un niveau caractéristique, en premier lieu, du produit lui-même, et dont la valeur standard est fournie dans les « fiches produits ».

• L'abaissement de la teneur en eau doit être d'autant plus élevé que l'on envisage de stocker le produit dans une atmosphère humide ou chaude (chez le producteur, le commerçant ou le consommateur).

• La teneur en eau initiale du produit étant elle-même une caractéristique du produit, il est facile de déterminer la quantité d'eau que l'on doit extraire à partir de:

- la quantité totale de produit que l'on envisage de traiter par cycle de

séchage;

- la teneur en eau initiale du produit;
- sa teneur en eau finale recommandée.

• L'eau est associée au produit de différentes façons. Une partie de cette eau n'est pas véritablement retenue par lui et se comporte comme de l'eau ordinaire (eau libre). Elle s'évapore de ce fait relativement facilement au contact de l'air extérieur, tant que ce dernier peut accroître sa teneur en humidité.

• L'évaporation de cette eau libre est suffisamment facile pour que l'air qui circule dans le séchoir ait tendance à se charger du maximum d'eau qu'il peut contenir. Cette quantité maximale dépend directement des paramètres de température et de l'air. On peut donc déterminer, en première approximation, les relations qui existent entre débit d'air, température de l'air, degré hygrométrique et vitesse de séchage, du moins tant qu'il reste de l'eau libre dans le produit (la vitesse de séchage est alors donnée, en première approximation, par le débit d'air que multiplie son pouvoir évaporatoire). Dans deuxième temps, il faut tenir compte de ce que les échanges de masse et de chaleur ne sont pas parfaits. La première estimation n'est de ce fait qu'une estimation par excès de cette vitesse. Mais cette surestimation peut parfois atteindre 50 %.

• Lorsque toute l'eau libre, qui est la plus rapide à s'évacuer du produit, a disparu, le séchage devient plus difficile car l'eau qui reste dans le produit lui est attachée par des forces qu'il faut vaincre. Cette dernière phase du séchage est à contrôler tout particulièrement, car le produit a tendance à s'échauffer. Si sa température dépasse un maximum admissible, précisé sur les « fiches produit », la dégradation de la qualité du produit devient très probable. Il ne faut cependant pas chercher à diminuer trop la température de séchage dans cette phase. Le

séchage est en effet d'autant plus efficace que la température de l'air est élevée.

- **Ce contrôle de la température en fin de séchage doit être particulièrement prononcé dans le cas d'un séchage solaire direct, car le produit s'échauffe du fait de son contact avec l'air chaud, mais aussi du fait de son réchauffement direct par le soleil.**
- **Le séchage est, pour chacune de ses phases, d'autant plus efficace que le produit est découpé en petits morceaux, etal sans que les morceaux se touchent et en couches minces.**
- **La fin du séchage peut se déterminer par plusieurs méthodes, mais est dictée en premier lieu par l'obtention de la teneur finale en eau du produit recommandée pour sa conservation sur le long terme.**

Chapitre V: Eléments pour le dimensionnement des séchoirs

Avertissement

La conception et le dimensionnement d'un séchoir sont des problèmes délicats. D'une part les éléments théoriques à prendre en compte sont parfois complexes, d'autre part ils n'apportent pas toutes les réponses, pour plusieurs raisons:

- **certains mécanismes, comme l'efficacité du transfert de masse et de chaleur entre le produit et l'air, l'efficacité d'un capteur solaire, ou les résistances au passage de l'air, sont connus dans leur principes, mais difficiles à transcrire avec précision dans la pratique;**
- **il existe de nombreuses variantes de chaque produit. Chacune peut réagir différemment des autres dans le processus de séchage. Et on ne peut pas, en**

l'état actuel des connaissances, délivrer une fiche technique pour chacune d'elles;

- le mode opératoire du sçhoir dépendra d'habitudes et d'attentes socioculturelles diverses. Ce mode opératoire doit être intégré dans la conception du sçhoir lui-même;

- la conception du sçhoir repose aussi sur des critères autres que techniques. Il y a bien entendu les critères d'ordre économique (abordés au chapitre VIII). Mais d'autres interviennent, comme la disponibilité locale en matériaux pour l'élaboration du sçhoir ou pour sa maintenance, et le savoir-faire des artisans.

On peut donc difficilement proposer des règles précises de dimensionnement de sçhoir qui permettraient de répondre à une demande particulière dans un environnement spécifique.

Cela étant dit, il faut considérer que, pour la gamme de sçchoirs abordée dans ce document (sçchoirs au plus semi-industriels), peu d'entre eux coûtent plus de 3000 FF. C'est le prix d'une journée de travail d'un expert expatrié...

Les options envisageables pour faciliter la diffusion des sçchoirs en pays en développement sont de ce fait limitées. On pourrait:

- développer des « sçchoirs types », sur le principe du « clé en main », sur la base de modèles éprouvés dans des conditions données d'environnement et d'utilisation. Mais on contraint alors le futur utilisateur à se restreindre au type et à la gamme de production et au contexte pour lesquels ils ont été déclarés fiables. Compte tenu du faible nombre de sçchoirs types et de la faible variation dans l'usage de chacun d'eux, cela limite les choix. Les principaux sçchoirs qui répondent à des exigences de fiabilité sont exposés au chapitre VI;

- former des experts qualifiés locaux, dont on peut penser qu'ils coûteront moins cher qu'un expatrié. C'est l'un des objectifs de ce document d'y contribuer. Il faudra cependant attendre encore quelques années pour qu'ils soient en nombre suffisant, et qu'un marché du séchoir se développe suffisamment pour que leurs bureaux d'études soient rentables;
- attendre encore quelques années que la gamme de séchoirs éprouvés soit plus étendue et/ou que l'on soit en mesure de suggérer leurs modifications envisageables pour répondre à tel ou tel besoin dans tel ou tel environnement;
- utiliser quelques principes physiques simples pour dimensionner soi-même un séchoir, ou modifier soi-même les dimensions de séchoirs existants, au risque probable d'obtenir un séchoir inadapté, non fonctionnel, irréalisable ou trop coûteux.

Le choix de cette dernière option n'appartient ni à l'auteur, ni à l'éditeur de cet ouvrage, mais au concepteur qui accepte les risques encourus d'obtenir un séchoir qui ne fonctionne pas, ou plus souvent d'avoir par la suite à consacrer du temps à tester lui-même et améliorer au fur et à mesure le séchoir ou son mode d'utilisation.

L'objectif de ce chapitre est d'apporter le maximum de précisions sur les relations qui interviennent dans le dimensionnement, sans pour autant proposer des indications chiffrées sur les redimensionnements envisageables de tel ou tel type de séchoir existant. Ces relations sont le plus souvent présentées de façon simplifiée, pour être accessibles au plus grand nombre, et n'indiquent que des ordres de grandeur. Les aspects les plus complexes, dont la compréhension reste nécessaire pour une bonne maîtrise des procédures de dimensionnement, sont abordés dans la troisième partie.

Ce chapitre a aussi pour objectif de compléter les éléments de compréhension du séchage qui ont été développés au chapitre IV, en se concentrant maintenant sur le

séchoir lui-même.

Les principaux éléments requis pour l'analyse sont:

- le rythme de la production de produit sec que l'on envisage;
- le temps que le produit frais peut passer sans se dégrader, en stockage amont et dans le séchoir, tant que son humidité n'est pas encore assez réduite;
- le rythme d'enlèvement de l'eau du produit, qui résulte de ces contraintes et des caractéristiques du produit;
- la température de l'air envisagée pour le séchage;
- le débit d'air circulant dans le échoir;
- la vitesse de l'air que cela suppose;
- la puissance du ventilateur requis, le cas échéant, pour fournir cette vitesse à l'air;
- la puissance thermique nécessaire pour extraire l'eau du produit au rythme envisagé;
- le dimensionnement des capteurs qui transmettent la puissance solaire à l'air;
- la puissance thermique d'une source d'énergie complémentaire, le cas échéant.

Dans la pratique des calculs de dimensionnement technique, de nombreuses étapes se réalisent conjointement. La température d'arrivée de l'air sur le produit et le débit de l'air dans le séchoir, par exemple, sont liés par des relations qui empêchent de les traiter

séparément. La présentation est ici relativement linéaire, mais les éventuels nécessaires « allers-retours » seront précisés en temps voulu.

Les questions se posent lors du dimensionnement technique d'un projet, 24 au total, sont présentées sur deux sections:

- Rythme de production, température de séchage, débit d'air et énergie requise;
- Production de l'énergie requise.

Rythme de production, température de séchage, débit d'air et énergie requise

1. Quel produit veut-on sécher, quels sont les objectifs?

Ce point n'est rappelé ici que pour mémoire: la réponse a été apportée dès le début de la procédure, lors de l'élaboration du cahier des charges du projet.

2. Quelle quantité de produit frais le séchoir doit-il pouvoir traiter en moyenne par jour?

Cela dépend des circonstances. Si la personne qui s'engage dans une activité de séchage alimente son unité à partir de sa propre production, et n'envisage pas d'acheter le produit frais d'autres producteurs parce que cela lui reviendrait trop cher, il doit se poser deux premières questions:

- **quelles sont les périodes de l'année où le produit est disponible, et en quelles quantités?**
- **doit-on chercher à sécher toute la production qui ne peut pas être vendue en frais à un bon prix?**

Des éléments méthodologiques pour répondre à ces questions sont précisés par la

suite. Dans le cas d'un entrepreneur qui prévoit d'acheter au moins une partie des produits frais, le problème du dimensionnement est posé en termes similaires, mais plus complexes. Cela est discuté plus loin.

Le calendrier de récolte

Un calendrier de récolte/approvisionnement provisionnel pour la campagne de séchage de référence va permettre une première estimation de la capacité de production du séchoir à retenir.

C'est un tableau provisionnel de récolte par espèce (produit) et pour une échelle de temps prédéfinie (hebdomadaire, tous les dix jours, tous les mois...).

Le débit de récolte/production journalière va varier durant la saison et passer par un ou plusieurs maxima. Deux options peuvent alors être envisagées:

- traiter la totalité de la récolte de produit frais; il faudra alors retenir un séchoir capable d'absorber ces « pics de récolte », ce qui impose de caler son rythme de production sur le débit de produit frais en période de pointe;**
- ne traiter qu'une partie du produit frais; on peut alors retenir un séchoir de capacité de production adapté au débit journalier moyen de produit frais (par exemple).**

L'intérêt relatif de ces options extrêmes dépend des circonstances.

Si les « pics de récolte » sont nombreux et/ou de durée importante et/ou si le produit est bien valorisé par le séchage, la première option est souhaitable pour ne pas perdre des opportunités de vente. Si par contre il n'y a qu'un pic de récolte de durée modeste (une semaine par exemple) et dont l'amplitude dépasse largement le niveau moyen de la

production sur les autres moments de la période de récolte, la deuxième option devient préférable. Il est en effet difficile d'amortir un investissement important s'il n'est utilisé à capacité normale qu'une semaine par an.

Si le produit envisagé peut être stocké avant le séchage sans risque de dégradation pendant un temps suffisant, on pourra davantage étaler dans le temps les pics d'approvisionnement du séchoir en produits frais. On aura de même, de toutes façons, intérêt à répartir les récoltes dans le temps, en étalant les semis et/ou en adoptant plusieurs variétés, voire plusieurs produits ayant des périodes de maturité différentes.

Le rapport de parage

Pour transformer le calendrier des récoltes en calendrier des approvisionnements du séchoir en produit frais, il faut aussi connaître les rapports de « parage » entre le produit frais récolté et le produit frais prêt à sécher. Il s'agit de connaître les pertes par prélèvement de la peau, du noyau, des os, des matières grasses, des arêtes... et par découpage (en filets, dés, lamelles, rondelles...) suivant le produit à sécher.

Exemple:

Calendrier prévisionnel d'approvisionnement en mangues (objectif de production: 4,7 tonnes de mangues séchées)

| Mois | avril | mai | juin | juillet | août | sept. | oct. | Total |
|-------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|
| Amélie (T) | 3,2 | 10,5 | 5,8 | | | | | 19,5 |
| Kent (T) | | 2,3 | 7 | 9 | 2,3 | | | 20,6 |
| Brooks (T) | | | | 3,8 | 10,5 | 12,8 | 3 | 30,1 |
| Total matière première | 3,2 | 12,8 | 12,8 | 12,8 | 12,8 | 12,8 | 3 | 70,2 |
| Pulpe enclavée (T) | 1.3 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 1.2 | 28.1 |

| | | | | | | | | |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Eau enlevée (T) | 1,1 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 1,0 | 23,4 |
| Mangue sèche produite | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 2,7 | 4,7 |

Le cas d'un séchage de produits frais achetés d'autres producteurs

Si l'entrepreneur qui labore un projet de séchage prévoit d'acheter au moins une partie de la matière première auprès d'autres producteurs, les termes du problème sont modifiés dans deux directions opposées:

- il n'y a plus de limite *a priori* son approvisionnement en produit frais, tant qu'il consent à en payer le prix;
- la contrainte forte est par contre ce coût de l'approvisionnement.

Il devra par exemple analyser:

- les capacités de la zone dans laquelle il se situe à satisfaire les objectifs de production de produit sec qu'il envisage;
- les périodes de l'année où le produit frais devient trop cher pour son activité;
- les coûts du transport (et sa faisabilité) de la matière première s'il la fait venir d'autres zones de production.

Certains de ces éléments seront repris au chapitre VIII, sur l'évaluation économique des projets, avec les problèmes de localisation d'une activité de séchage.

Autres déterminants du rythme de la production de produits secs

En premier lieu, l'argument les avantages comparatifs d'une vente du produit frais plutôt

que du produit sec n'intervient pas que pour l'entrepreneur décrit ci-dessus. Il intervient aussi pour l'agriculteur qui envisage de se lancer dans le séchage à vocation commerciale. Il devra toujours se demander s'il est plus rentable de vendre le produit frais ou de le sécher. Si c'est le cas à certaines périodes de l'année, cela peut modifier l'estimation du rythme de production de produit sec, puisqu'alors la matière première sera disponible en quantité plus réduite.

D'autre part, le séchage peut être tributaire des conditions climatiques (cas du séchage solaire notamment). Il faut donc prévoir que le rythme de séchage sera plus faible à certaines périodes, du fait d'une moindre performance du séchoir lorsque l'air est plus humide ou lorsque l'ensoleillement est moindre. Si la dégradation des conditions climatiques se produit lors de périodes de pics de récolte du produit frais, il faudra éventuellement soit prévoir un surdimensionnement du séchoir, soit une possibilité d'énergie d'appoint.

Enfin, il faut aussi tenir compte des possibilités d'évolution de l'unité de séchage. Il peut par exemple être intéressant de pouvoir augmenter la production de l'unité après une première période d'essai, sans avoir à investir dans un nouveau séchoir mieux adapté aux nouveaux objectifs.

En résumé, il est plutôt conseillé de surdimensionner au début la capacité de séchage pour faire face aux pointes de production, à des conditions climatiques défavorables, et se conserver une marge de manœuvre pour une éventuelle expansion de l'activité à l'avenir.

3. De quel temps d'attente dispose-t-on avant un séchage suffisant pour éviter que le produit frais ne commence à se dégrader?

Le rythme de production d'une unité de séchage est donné par la division de la quantité de produit frais traité à chaque cycle de séchage par la durée de ce cycle (incluant le

temps de chargement et de déchargement du séchoir, ainsi que les « temps morts »). On peut donc fournir le même rythme de différentes manières (durée de cycle plus courte et moins de produit traité chaque cycle, ou durée de cycle plus longue et plus de produit traité chaque cycle). Pour de nombreux produits alimentaires, une contrainte forte pèse sur la durée du cycle de séchage: le séchage doit être suffisamment rapide pour que le produit atteigne vite un état d'humidité où il est préservé des risques de dégradation. À titre indicatif, on considère que la durée de séchage de la tomate ne doit pas dépasser trois jours. C'est parmi les légumes le plus difficile maintenir longtemps avant un séchage suffisant (risques de moisissure). Parmi les fruits, les plus sensibles de ceux qui sont usuellement séchés sont la mangue et l'abricot. Les viandes, mais surtout les poissons, sont particulièrement sensibles à des durées trop longue d'attente.

La durée pendant laquelle le produit reste sujet au développement microbien n'est pas le seul paramètre qui influe sur le risque de dégradation du produit avant son séchage total. Cela est aussi fonction de:

- la température du produit pendant le séchage (le développement microbien est le plus intense pour les températures comprises entre 30°C et 55°C. Au-delà de 65°C, le risque est limité);
- l'activité de l'eau du produit: le risque de dégradation est très élevé pour les produits présentant une activité de l'eau de plus de 0,9; il est fort de 0,9 à 0,75, limité entre 0,75 et 0,6, et pratiquement inexistant en dessous de 0,6;
- la variété du produit considéré;
- la population microbienne initiale;
- la qualité du parage;

- etc.

Remarque:

♦ dur♦e identique, le temps pass♦ dans le s♦choir compte beaucoup plus que le temps pass♦ en stockage amont: les microbes se d♦veloppent beaucoup plus facilement aux temp♦ratures ♦lev♦es (du moins, tant que l'on n'atteint pas une temp♦rature de « st♦rilisation thermique » qui les tue).

4. Quelle quantit♦ d'eau doit-on enlever du produit?

La question de la quantit♦ d'eau ♦ extraire selon les produits a d♦j♦ ♦t♦ abord♦e au chapitre pr♦c♦dent. La m♦thode de calcul est reprise ici sous une forme plus math♦matique.

La masse d'eau ♦ extraire correspond ♦ ce qu'il faut retirer du produit pour le faire passer d'une teneur en eau initiale donn♦e, caract♦ristique du produit frais et indiqu♦e sur les « fiches produit », ♦ une teneur en eau finale donn♦e, fournie par une norme technique assurant la conservation du produit consid♦r♦, elle aussi fournie dans les « fiches produit ». La relation qui s'♦tablit entre ces termes s'♦crit:

$$M_e = \frac{(m_i - m_f)M_i}{100 - m_f}$$

(en kg d'eau par kg de produit frais ♦ s♦cher)

avec:

- m_i : teneur en eau initiale du produit frais (en %);

- m_f : teneur en eau finale du produit séché (en %);
- M_e : quantité d'eau extraire du produit (en kg);
- M_i : quantité de sécher de produit frais après parage (en kg), le parage tant l'opération initiale de retrait de la peau et des déchets du produit frais.

Remarque:

La teneur en eau, ou degré d'humidité, du produit définie ici est appelée teneur en eau en base humide, car elle est le rapport de la masse d'eau contenue dans le produit sur la masse totale du produit (masse de sa matière sèche et de son eau). On utilise parfois dans les calculs une teneur en eau dite « en base sèche », qui est le rapport de la masse d'eau sur la seule masse sèche du produit. La conversion entre ces deux teneurs, en base humide et en base sèche, est rapide:

$$X(\text{en}\%) = \frac{m \cdot 100}{100 - m}$$

et

$$m = \frac{X \cdot 100}{100 + X}$$

avec:

- m : teneur en eau en base humide (la plus courante, utilisée ici);
- X : teneur en eau en base sèche.

5. Quelle doit-être la durée du séchage?

Elle dépend de plusieurs facteurs:

- le premier facteur, et sans doute le plus déterminant, est le rythme de la production de matière sèche, déterminé au point 2. Le rythme de la production s'exprime comme la quantité de produit frais à traiter à chaque cycle de séchage divisé par la durée de ce cycle. Il doit correspondre à la capacité de production envisagée, à un éventuel léger surdimensionnement près. Pour chaque grand type de séchoir, la quantité de produit frais traitée par cycle s'inscrit dans une gamme précise (par exemple, la charge d'une claie, la charge d'un chariot ou de deux chariots selon le type de séchoir). Il devient dès lors facile d'estimer la durée de séchage qui correspond aux objectifs de production;

- le deuxième facteur est la contrainte d'une durée suffisamment faible pour éviter les risques de dégradation du produit, avant qu'il n'atteigne un degré suffisant de séchage pour le préserver du développement microbien (durée maximale abordée au point 3.) ci-dessus;

- le troisième facteur est une contrainte opposée sur la vitesse d'enlèvement de l'eau, qui ne doit pas être trop rapide si on veut éviter les problèmes de croûtage, phénomène qui intervient lorsque l'eau quitte trop rapidement l'intérieur du produit. Cette contrainte n'est néanmoins pas vraiment déterminante pour la durée du séchage: pour une même vitesse d'enlèvement d'eau, le risque de croûtage sera bien moindre si le séchage se produit avec un air plus humide mais à débit plus élevé, plutôt qu'avec un air très sec et à débit faible. La mangue est un fruit qui présente des risques élevés de croûtage au séchage. La durée minimale de séchage sans risque de croûtage obtenue sur séchoir à gaz type tunnel pour ce produit est de l'ordre d'une quinzaine d'heures.

Pour les deux derniers points, la recherche expérimentale permet d'établir des allures de

séchage pour atteindre en un temps minimum un produit séché aux qualités prédéfinies (humidité finale, qualités de goût et d'apparence, caractéristiques microbiologiques).

Dans la pratique, on retiendra plutôt les éléments suivants:

- la durée doit être, pour chaque type de séchoir envisageable dans l'étude de dimensionnement, déterminée en fonction du rythme de production envisagé et de la capacité de chargement de ce type de séchoir en produits frais;
- si cette durée est trop élevée, par rapport à la durée maximale admissible d'attente d'un séchage suffisant, il faudra prévoir soit un séchoir de moindre capacité dans la gamme envisagée, mais dimensionné pour sécher plus rapidement (si une telle modulation est possible), soit un traitement de conservation plus sévère, soit une modification des objectifs de production, soit un abandon de ce type de séchoir pour la suite de l'étude technique;
- le risque de croûtage peut être éliminé par d'autres moyens (débit d'air plus élevé avec un air plus humide, obtenu soit en humidifiant la chambre de séchage dans des proportions raisonnables, soit par un recyclage de l'air de sortie, plus humide mais non totalement saturé d'eau).

6. Quelle est la vitesse d'enlèvement de l'eau du produit?

On peut, sur la base des données des points 4. et 5., faire une estimation de la vitesse d'enlèvement de l'eau du produit:

$$V_{em} = \frac{M_e}{T_s}$$

en kg d'eau enlevée par heure, avec:

- V_{em} : vitesse d'enlèvement de l'eau (en kg/h);
- M_e : masse d'eau extraire (en kg);
- T_s : durée idéale du séchage pour le produit considéré (en heures).

Remarque: La vitesse d'enlèvement V_{em} est indiquée « m », car il s'agit d'une vitesse moyenne sur la totalité du séchage. On a vu au chapitre précédent que le séchage s'effectue en plusieurs phases distinctes. En particulier, l'enlèvement de l'eau est beaucoup plus difficile en phase finale du séchage (phase III), car l'eau restante dans le produit en est plus solidaire, et donc la vitesse d'enlèvement de l'eau plus faible. Une lecture plus détaillée des courbes d'allure de séchage doit permettre de mieux préciser les teneurs en eau à chaque début et fin d'une phase de séchage, ainsi que leurs durées respectives. On peut alors calculer sur cette base des vitesses moyennes d'enlèvement de l'eau pour chacune des phases, et affiner ainsi les calculs.

7. Quelle doit être la température de l'air à son arrivée sur le produit?

Le titre de rappel d'éléments du chapitre précédent: le passage de l'air sur le produit provoque d'autant plus d'évaporation que l'air a été au préalable réchauffé. La température de l'air à l'arrivée sur le produit à sécher doit être:

- la plus élevée possible, pour garantir un séchage rapide en phases I et II, où le produit est encore « fragile », et pour le rendre efficace en phase III, où l'autre facteur d'enlèvement d'eau, le débit d'air, est peu influent;
- telle que la température du produit ne dépasse pas sa température maximale admissible, fournie sur les « fiches produit ».

La température du produit est peu éloignée de la température de l'air à l'arrivée sur le produit en phase III du séchage, car alors il y a peu d'évaporation pour contribuer à son refroidissement. En phases I et II par contre, elle sera moins élevée pour la raison inverse, sauf éventuellement dans le cas où le produit est exposé directement aux rayons du soleil (cas du séchage solaire direct) et où le débit d'air est faible, car alors le produit s'échauffe aussi du fait de cette source de chaleur.

De façon générale, et à défaut de disposer des courbes d'allure de séchage du produit considéré, on recommandera de retenir une température de l'air à l'arrivée sur le produit de 10°C au dessus de la température maximale admissible par le produit lors des phases I et II, et légèrement inférieure à cette température maximale pour la phase III.

8. Quel est le pouvoir évaporatoire de l'air ?

Le titre de rappel d'éléments du chapitre précédent: le pouvoir évaporatoire de l'air, qui mesure la quantité maximale d'eau que peut emporter un mètre cube d'air lors de son contact avec un produit humide, dépend:

- de la densité de vapeur d'eau déjà contenue dans l'air ambiant, avant son entrée dans le séchoir;
- des conditions de pression (ici: pression atmosphérique, dont les fluctuations sont d'effet totalement négligeable);
- de la température à laquelle est porté l'air.

Sa valeur, pour un taux d'humidité relative donné et une température donnée de l'air, peut être fournie en première approximation par le tableau 3 ci-contre. Pour les températures et degrés d'humidité intermédiaires, il faudra soit procéder à des interpolations des données de ce tableau, soit adopter l'approche plus complexe d'une

lecture du diagramme enthalpique de l'air humide, présentée en troisième partie, chapitre IX.

Rappel: Lorsqu'on porte l'air d'une température donnée à une autre plus élevée par apport de chaleur, comme c'est le cas pour le séchage, l'humidité absolue de l'air ne change pas (l'air contient toujours la même quantité de vapeur d'eau). En revanche, son humidité relative n'est pas la même; elle est plus faible. L'humidité relative de l'air qui arrive sur le produit après avoir été réchauffé n'est donc pas l'humidité relative de l'air extérieur.

Tableau 1: Teneur en eau de l'air (ou humidité absolue), en fonction de sa température et de son humidité relative (en grammes d'eau par kg d'air sec)

| Humidité
relative en % | Température de l'air en °C | | | | | | | |
|---------------------------|----------------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 10 | 1,0 | 2,5 | 4,5 | 8,0 | 12,5 | 20,0 | 32,0 | 48,0 |
| 20 | 2,5 | 4,5 | 8,5 | 15,5 | 27,0 | 42,5 | 63,5 | 100,0 |
| 40 | 5,5 | 9,5 | 18,0 | 31,5 | 53,0 | 88,5 | | |
| 60 | 8,5 | 16,5 | 30,0 | 50,5 | 83,0 | | | |
| 80 | 12,0 | 22,5 | 40,0 | 68,5 | 118,0 | | | |

Tableau 2: Teneur en eau maximale (d saturation) d'un air, en fonction de sa température initiale et de son humidité relative initiale, lorsqu'il se charge d'eau sans apport ni perte d'énergie extérieure (en grammes d'eau par kg d'air sec)

| Humidité
relative en % | Température de l'air en °C | | | | | | | |
|---------------------------|----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| 10 | 5,5 | 9,5 | 13,5 | 18,5 | 25,0 | 34,5 | 48,0 | 67,0 |
| 20 | 6,5 | 11,0 | 16,5 | 24,5 | 37,5 | 54,0 | 75,0 | 116,0 |
| 40 | 9,0 | 15,0 | 23,0 | 37,0 | 61,0 | 97,0 | | |
| 60 | 11,0 | 19,5 | 33,0 | 54,0 | 88,0 | | | |
| 80 | 13,0 | 23,0 | 42,0 | 71,0 | 120,0 | | | |

Tableau 3: Pouvoir \diamond vaporatoire de l'air, en fonction de sa temp \diamond rature et de son humidit \diamond relative (en grammes d'eau par kg d'air sec): diff \diamond rence « Tableau 2 - Tableau 1 »

| Humidit \diamond
relative en % | Temp \diamond rature de l'air en °C | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| | 4,5 | 7,0 | 9,0 | 10,5 | 12,5 | 14,5 | 16,0 | 19,0 |
| 20 | 4,0 | 5,5 | 8,0 | 9,0 | 10,5 | 11,5 | 12,0 | 16,0 |
| 40 | 3,5 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 8,0 | 8,5 | | |
| 60 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 5,0 | | | |
| 80 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | | | |

9. Quelle quantit \diamond d'eau du produit peut-on retirer avec un m \diamond tre cube d'air?

Le cas simple

\diamond titre de rappel, si l' \diamond change de vapeur d'eau entre le produit et l'air \diamond tait parfait et concernait la totalit \diamond de l'air circulant dans le s \diamond choir, l'air pourrait se charger d'autant d'eau qu'il peut en contenir tant que subsiste de l'eau libre dans le produit, c'est- \diamond -dire

lors des phases I et II.

La quantité d'eau du produit que peut retirer un mètre cube d'air serait, dans un cas parfait, relativement facile à calculer. Elle correspondrait exactement au pouvoir évaporatoire d'un mètre cube d'air, dont les données sont fournies au point 8. (au coefficient de masse volumique pris pour la conversion kg/m^3).

Les problèmes

Le calcul de la quantité d'eau que l'on peut extraire du produit par mètre cube d'air utilisé lors du séchage est en fait plus complexe pour trois raisons.

a) Il existe en fait un continuum entre l'eau libre et l'eau fortement liée dans le produit. L'eau du produit en phase II est partiellement liée au produit, ne serait-ce que par les tensions de capillarité, et ne se comporte donc pas comme une eau totalement libre (et de moins en moins à mesure que le séchage progresse). Même si l'échange d'eau entre l'air et le produit était parfait, l'air ne peut pas se charger d'autant d'eau qu'il le pourrait en passant au-dessus d'un récipient rempli d'eau (totalement libre donc), et l'humidité relative de l'air en sortie de séchoir ne peut donc jamais atteindre 100 %.

b) à mesure que l'on entre dans la phase III du séchage, l'eau restante dans le produit lui en est de plus en plus solidaire. L'activité de l'eau décroît peu à peu. Or, l'activité de l'eau dans le produit détermine les règles de l'équilibre de l'eau entre le produit et l'air: plus l'activité de l'eau est faible, plus le produit offre une résistance à ce que l'air s'« empare » de cette eau, et moins l'air peut en emporter. De ce fait, plus le séchage progresse, moins l'air sort du séchoir chargé d'eau. à l'extrême, si on poussait le séchage au point qu'il n'existe quasiment plus d'eau dans le produit, l'air ne sortirait pas du séchoir avec plus d'eau au mètre cube qu'en y entrant.

c) Par ailleurs, les changements d'eau entre le produit et l'air présents aux points a) et b) sont des principes de base qu'il faut moduler au regard de plusieurs considérations:

- l'isolation thermique n'est jamais parfaite entre le séchoir et l'extérieur, de ce fait l'air se refroidit avant d'arriver sur le produit (donc dispose d'un moindre pouvoir évaporatoire);

- il y a des pertes d'énergie du fait des frottements de l'air dans le séchoir, d'autant plus élevées que la vitesse d'écoulement de l'air est grande (on verra plus loin que les « pertes de charge » sont proportionnelles au carré de cette vitesse);

- l'équilibre de la vapeur d'eau entre le produit et l'air n'a pas le temps de se réaliser totalement. Plus la vitesse de circulation de l'air est importante, moins c'est le cas puisque cela limite le temps de contact de l'air avec le produit. Il faudrait en effet d'une part laisser l'eau du produit du temps pour migrer correctement de l'intérieur vers l'extérieur du produit. Il faudrait d'autre part laisser l'air le temps de récolter l'eau arrivée en surface du produit. Il faudrait enfin laisser l'air qui ne passe pas à proximité immédiate du produit le temps de se charger de l'eau dont l'air plus proche s'est chargé, permettant ce dernier de se recharger de nouveau, etc.

Pour résoudre le problème, on adopte une approximation pour traiter les points a) et b), et une approche plus empirique pour traiter le point c).

Premier niveau d'approximation

De façon à traiter le problème de la diminution de l'activité de l'eau dans le produit

mesure que le séchage progresse, qui influe sur l'humidité relative de l'air en sortie de séchoir, on procédera en première approximation comme suit:

- l'air sort un niveau proche de la saturation en début de séchage;
- l'air sort en phase finale du séchage avec une humidité relative qui est celle qui correspond à l'équilibre air/produit lorsque l'eau de ce dernier a atteint un niveau d'activité qui le rend propre à la conservation. Cette humidité relative se lit sur le diagramme de sorption-désorption du produit, qui sera présenté dans la troisième partie, chapitre IX;
- on considère à titre d'approximation que l'humidité relative de l'air de sortie du séchoir est, en moyenne sur la durée du séchage, la moyenne de ces deux humidités relatives extrêmes, soit:

$$H_{rm} = \frac{1}{2}(100 + H_m)$$

avec:

- H_{rm} : humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en moyenne sur la durée totale du séchage (en %);
- H_{rs} humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, à la fin du séchage (paramètre fourni sur les courbes de sorption-désorption);
- 100: humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en début de séchage (saturation d'eau: 100 % d'humidité relative).

On peut, connaissant ainsi la valeur de l'humidité relative en sortie de séchoir, en moyenne pendant le séchage (H_{rm}), déterminer l'humidité absolue x_m (ou teneur en eau moyenne) laquelle elle correspond, compte tenu de la température moyenne de l'air en sortie de séchoir, à partir du tableau 1 de la page 121. Si l'échange d'eau entre l'air et le produit était parfait lors du séchage, la quantité d'eau enlevée en moyenne pendant le séchage par un mètre cube d'air pourrait s'écrire:

$\rho_{air} \cdot (x_m - x_a)$, exprimée en grammes d'eau par mètre cube d'air ayant circulé dans le séchoir, avec:

- ρ_{air} masse volumique de l'air sec: 1,2 kg/m³;

- x_m : teneur en eau de l'air en sortie de séchoir, en moyenne sur la durée du séchage, en gramme par kilogramme d'air sec;

- x_a : teneur en eau de l'air, à l'entrée du séchoir, en grammes par kilogramme d'air sec.

Second niveau d'approximation

Si on ne dispose pas de la courbe de sorption-désorption du produit pour déterminer le niveau de l'humidité relative de l'air en sortie de séchoir en fin de séchage (H_{rs}), on pourra dans la majorité des cas faire l'approximation suivante.

En fin de séchage, l'eau résiduelle dans le produit est une eau très fortement liée au produit, et un mètre cube d'air circulant dans le séchoir ne peut emporter que très peu d'air. Donc, si on fait l'approximation qu'un mètre cube d'air peut emporter l'équivalent du pouvoir vaporatoire de l'air, rapporté au mètre cube d'air, en début de séchage, et

quasiment 0 en fin de séchage, on peut exprimer en approximation plus sommaire encore que la première, que si les échanges d'eau entre l'air et le produit étaient parfaits, un mètre cube d'air emporterait en moyenne: $1/2 \times \rho_{\text{air}} \times e_{\text{air}}$ avec:

- ρ_{air} : masse volumique de l'air sec (1,2 kg/m³ en première approximation aux températures usuelles de séchage);
- e_{air} : pouvoir vaporatoire de l'air de séchage (en gramme par kg d'air sec), obtenu par interpolation des données du tableau 3 de la page 121.

Cette approximation n'est valable que pour les produits très secs en fin de séchage.

L'approche empirique

Les échanges d'eau entre l'air et le produit dans le séchoir n'étant pas parfaits, on introduit un coefficient correcteur appelé rendement de séchage.

Ce rendement noté η dépend de nombreux facteurs évoqués ci-dessus (point c). Il dépend donc de ces faits:

- de la nature du produit;
- de son humidité relative (et donc du degré de séchage atteint);
- du séchoir envisagé lui-même.

À titre indicatif, les « fiches séchoirs » présentées dans le chapitre VI exposent l'ordre de grandeur du rendement de séchage de chaque grand type de séchoir, pour un cycle complet de séchage dans ses conditions usuelles d'utilisation.

La formulation

En s'en tenant à la première approximation, la quantité d'eau que peut extraire un mètre cube d'air, en moyenne sur la durée du séchage, s'écrit :

$$\rho_{se} = \rho_{air} \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s$$

avec :

- q_{se} : quantité d'eau extraite en moyenne par un mètre cube d'air (g/m^3);
- ρ_{air} : masse volumique de l'air sec: $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- x_m : teneur en eau de l'air en sortie de séchoir, en moyenne sur la durée du séchage, en gramme par kilogramme d'air sec (déterminé ci-dessus);
- x_a : teneur en eau de l'air, à l'entrée du séchoir, en grammes par kilogramme d'air sec;
- η_s : rendement de séchage.

Le calcul détaillé par phases

Le rendement dépend de l'activité de l'eau dans le produit, différente à chaque étape du séchage, et dont dépend aussi le degré d'humidité relative de l'air en sortie de séchoir.

La connaissance précise de l'allure de séchage conseillée pour le type de produit sécher permettrait de déterminer la proportion d'eau à extraire pour chaque phase, donc de connaître de manière plus précise le fonctionnement du séchoir. Cependant, les

allures de séchage sont encore mal connues pour la plupart des produits tropicaux.

10. Quel débit d'air doit-on avoir dans le séchoir?

Le débit d'air moyen dans le séchoir doit être tel qu'il permet l'évacuation de l'eau du produit à la vitesse moyenne V_{em} évaluée au point 6.

Cette vitesse d'évacuation est d'autre part déterminée par le produit « débit d'air x eau enlevée en moyenne par mètre cube d'air ». En reprenant la formulation du point 9., on a:

$$V_{em} = \frac{M_e}{T_s} = \rho_{air} \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s \cdot \frac{D_s}{1000}$$

d'où:

$$D_s = 1000 \cdot \frac{M_e}{(T_s \cdot \rho_{air} \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s)}$$

avec:

- **D_s** : débit d'air recherché (en m³/h);
- **V_{em}** : vitesse d'enlèvement de l'eau (en kg/h);
- **M_e** : masse d'eau à extraire (en kg);
- **T_s** : durée idéale du séchage pour le produit considéré (en heures);
- **ρ_{air}** : masse volumique de l'air sec: 1,2 kg/m³;

- x_m : teneur en eau de l'air en sortie de séchoir, en moyenne sur la durée du séchage, en gramme par kilogramme d'air sec;
- x_a : teneur en eau de l'air, à l'entrée du séchoir, en grammes par kilogramme d'air sec;
- η_s : rendement de séchage.

11. Ce débit peut-il être fourni sans équipement annexe (cheminée solaire, ventilateur)?

On considère que, de façon générale, si le débit d'air nécessaire est inférieur à $20 \text{ m}^3/\text{h}$, le séchage pourra être assuré de façon naturelle, par les mouvements de convection de l'air chaud. Les mouvements de convection sont cependant alors très complexes et dépendent de nombreux paramètres. Il n'est de ce fait souvent pas possible de savoir exactement quel sera le débit de l'air dans le séchoir sans une expérimentation.

On peut seulement dire que le débit sera d'autant plus grand:

- qu'est grande la hauteur qui sépare l'entrée d'air de la sortie d'air;
- qu'est importante la différence de température entre l'air qui entre et l'air qui sort;
- qu'est faible la vitesse de l'air au niveau des entrées et sorties et du produit. En effet, plus cette vitesse est faible, moins les frottements sont importants: on peut diminuer la vitesse, et donc les frottements, sans diminution du débit, en dimensionnant largement les entrées et sorties (système de « venturi »). On ne surdimensionnera pas cependant la chambre de séchage elle-même, sinon une

partie importante de l'air passera trop loin de la zone d'échange d'eau avec le produit pour s'en charger efficacement.

Compte tenu des incertitudes, il se peut que la durée de séchage devienne trop importante. Il peut alors être souhaitable de mieux garantir une circulation de l'air adéquate en l'assistant.

On peut l'aider soit en accentuant les causes de la convection naturelle (une différence de température de l'air entre deux points), soit en « forçant » la circulation de l'air par un moyen mécanique. On parle ainsi de convection naturelle pour des systèmes tels que le système « sans rien » (ci-dessus) ou la cheminée solaire, et de convection forcée dans les autres cas (ventilateurs). Le choix dépend du compromis élaboré entre le coût de ces équipements et un rythme de séchage plus élevé.

Au-delà du seuil critique de débit d'air de $20 \text{ m}^3/\text{h}$, potentiellement accessible en convection naturelle, il faudra de toutes façons envisager d'aider l'air à circuler dans le sillon par de tels équipements périphériques.

12. Une cheminée solaire est-elle appropriée?

Pour un débit d'air nécessaire situé entre 20 et $60 \text{ m}^3/\text{h}$, une cheminée solaire peut fournir l'aide nécessaire pour la circulation de l'air. Le mode de dimensionnement d'une cheminée solaire requiert des calculs complexes qui ne seront précisés qu'en troisième partie.

Le principe d'une cheminée solaire est relativement simple. Elle est comme une cheminée ordinaire, mais constituée d'un matériau qui capte la chaleur fournie directement par le soleil et en transmet une partie à l'air. L'air qui est en haut de la cheminée, et qui a reçu de la chaleur supplémentaire, est donc plus chaud que l'air situé à l'entrée de cette

cheminée. Selon les principes de base de la thermodynamique et le principe d'Archimède, l'air situé en haut est moins dense que l'air situé en bas, et l'air subit dans la cheminée une poussée vers le haut, du fait d'une pression différentielle sur l'air (« terme moteur »).

Cette pression (ou « terme moteur ») est donnée par:

$$\Delta mc = (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot H$$

(en Pascal (Pa))

avec:

- Δmc : différentiel de pression entre le bas et le haut de la cheminée en Pa;
- ρ_1 est la masse volumique de l'air en bas de la cheminée (kg/m^3);
- ρ_2 est la masse volumique de l'air en haut de la cheminée (kg/m^3);
- H est la hauteur de la cheminée (m);
- g est l'accélération de la pesanteur ($\approx 10 \text{ m/s}^2$).

En première approximation, le rapport p_1/p_2 des masses volumiques de l'air est donné par le rapport « température de sortie/température d'entrée », si les températures sont exprimées en degrés Kelvin (t degrés Celsius = 273 + t degrés Kelvin).

Précisons que, contrairement aux cheminées ordinaires qui sont droites, une cheminée solaire fonctionne mieux si elle est penchée, de façon à présenter le maximum de

surface d'exposition aux rayons du soleil. Le calcul de l'angle d'inclinaison optimal de la cheminée sera précisé dans la troisième partie XXX.

Malgré les multiples efforts de recherche, les cheminées solaires se sont révélées peu adaptées à l'extraction de l'air de séchage. Elles nécessitent des dimensions conséquentes pour être efficaces. L'efficacité des systèmes de convection naturelle est en effet limitée par la limite de vitesse imposée par les résistances à l'écoulement de l'air, appelées pertes de charges, dans les différents éléments du séchoir. Ces pertes de charge sont présentées par la suite.

13. À partir de quand doit-on envisager d'installer un ventilateur?

Au-delà d'un débit d'air de 60 m³/h, un ventilateur s'impose. En deçà de cette valeur, cela dépendra du compromis entre le coût des options (convection naturelle, cheminée solaire ou ventilateur), le rythme de production recherché et sa régularité (le ventilateur étant la seule option qui garantisse un débit d'air donné quelles que soient les circonstances).

14. Quelles sont les composantes du dimensionnement du ventilateur à installer?

Les deux composantes essentielles du dimensionnement d'un ventilateur sont:

- le débit d'air recherché;**
- les frottements divers de l'air, qui freinent le mouvement, appelés « pertes de charge ».**

Dans le cas purement imaginaire où les molécules d'air ne subiraient aucun frottement, ni à l'amont ni à l'aval du ventilateur, la puissance de celui-ci pourrait n'être que celle nécessaire pour fournir à chaque molécule son énergie cinétique ($1/2 m v^2$).

L'énergie cinétique de l'air ne représente en fait qu'une très faible partie de l'énergie qu'il faut fournir. L'essentiel est constitué de l'énergie perdue dans les frottements:

- le frottement des particules d'air contre les autres particules d'air, d'autant plus important que l'écoulement de l'air est « turbulent », c'est-à-dire que les différentes molécules n'ont pas des trajets parallèles les uns aux autres (et donc risquent plus de se « choquer »);
- le frottement des particules d'air sur la surface du produit à sécher;
- le frottement des particules d'air le long des parois du séchoir.

C'est de loin le premier type de frottement qui est le plus important. Mais il est pour beaucoup occasionné par les déformations des trajets de l'air lorsque celui-ci contourne un objet (le produit, les parois du séchoir et des claies, la grille du ventilateur...), qui provoquent les « turbulences » dans l'écoulement de l'air. Ces pertes de charge sont d'autant plus fortes que la vitesse d'écoulement de l'air est importante. Elles sont, en première approximation, proportionnelles au carré de cette vitesse.

15. Comment calculer les pertes de charge?

Le cas du séchage en couche mince

Les pertes de charge sont malheureusement très difficiles à calculer dans ce cas. Elles sont certes proportionnelles au carré de la vitesse de l'air, mais dans quelles proportions?

Dans le cas du séchage en couche mince (produit étalé sur une claie), le produit ne crée qu'une partie des pertes de charge, et c'est l'ensemble produit-claies-séchoir et ses interférences avec les flux d'air qu'il faut analyser. Pour les séchoirs de type artisanal ou semi-industriel, on ne pourra pas pousser l'étude au point de sophistication requis

(calculs de l'écoulement par éléments finis...). On devra le plus souvent se contenter des indications des constructeurs pour les grands types de séchoirs existants.

Le cas du séchage en couche épaisse

Paradoxalement, c'est dans le cas du séchage en couche épaisse (produit en vrac), comme pour les céréales, fèves, etc., que le calcul est le plus simple. Les pertes de charge lors du passage de l'air dans le produit représentent en effet alors l'essentiel des frottements de l'air.

Elles peuvent être dès lors estimées lorsque l'on connaît la résistance qu'oppose un mètre d'épaisseur du produit au passage de l'air pour une vitesse d'écoulement donnée.

La perte de charge dans le produit s'écrit dans ce cas:

$$\Delta P_p = w \cdot d \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot V_p^2$$

en Pa

avec:

- ρ_a : masse volumique de l'air ($\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$);
- w : résistance à l'air du produit (en m);
- d : épaisseur de la couche (en m);
- V_p : vitesse de l'air à travers le produit (en m/s).

La résistance à l'air du produit est un paramètre propre au produit, donnée ci-dessous pour les principaux produits séchés couramment en couche épaisse. Elle dépend essentiellement de quatre facteurs:

- la forme du produit;
- ses caractéristiques de surface (rugueux, lisse...);
- le volume de vides dans un mètre cube de produit en vrac;
- le volume moyen de ces vides.

Résistance (w) par un produit en vrac au passage de l'air (en m-1)

| | |
|-----------------------|--------|
| Riz paddy | 60 000 |
| Maïs en grain | 33 000 |
| Fèves de cacao humide | 60 000 |
| Fèves de cacao sèche | 27 000 |
| Arachides | 10 000 |
| Arachides en coques | 2 500 |
| Épis de maïs | 1 500 |

Dans la pratique du séchage en couche épaisse, il faut une vitesse de l'air de l'ordre de 0,1 m/s pour que l'échange air/produit soit correct. Pour obtenir cette vitesse, la surface de l'entrée d'air du bac de séchage (S_{bc}) et l'épaisseur de la couche (d) doivent être:

$$S_{bc} = \frac{D_s}{3600 \cdot V_p}$$

,

$$d = \frac{3600 \cdot m_i \cdot v_p}{\rho_p \cdot D_s}$$

(d en m)**o :**

- m_i est la masse de produit \diamond s \diamond cher (en kg);
- ρ_p est la densit \diamond du produit \diamond s \diamond cher (en kg/m³);
- v_p est la vitesse de l'air \diamond travers le produit (fix \diamond e \diamond 0,1 m/s
- D_s est le d \diamond bit souhait \diamond (en m³/h) d \diamond j \diamond calcul \diamond ;
- 3600: conversion heures/secondes.

16. Quelle doit- \diamond tre la puissance du ventilateur?

La puissance fournie par le ventilateur doit \diamond tre le produit du d \diamond bit de l'air par les pertes de charge. La puissance \diamond lectrique du ventilateur n \diamond cessaire est cette puissance, \diamond un coefficient de rendement du ventilateur pr \diamond s:

$$P_v = \frac{1}{\eta_{\text{vent}}} \cdot \frac{D_s}{3600} \cdot \Delta P_t$$

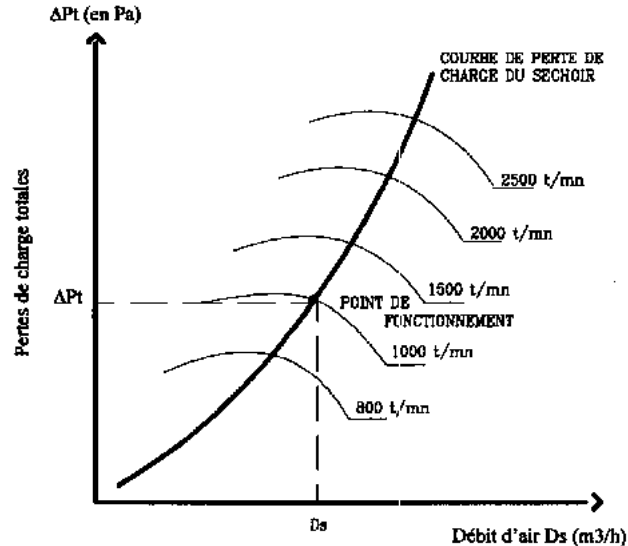
, en W

avec:

- D_s débit recherché en m^3/h ;
- ΔP_t : pertes de charge totale en Pascals;
- η_{vent} : rendement du ventilateur (d'après indications du fournisseur);
- 3600: conversion heures/secondes.

Sachant que les pertes de charge (ΔP_t) sont, pour un choix donné, fonctions du carré de la vitesse de l'air, donc du débit, la puissance électrique est proportionnelle au débit à la puissance trois. Ainsi, chaque fois que le débit double, la consommation électrique est multipliée par huit!

17. Quelle doit être la vitesse de rotation du ventilateur?



Vitesse de rotation du ventilateur

On peut tracer la courbe des pertes de charges du séchoir en fonction du débit (courbe en gras sur le tableau). Les constructeurs de ventilateurs fournissent parfois les courbes de fonctionnement de leurs ventilateurs pour différentes vitesses de rotation. Chacune de ces courbes donne, pour chaque débit, la valeur des pertes de charges auxquelles peut s'opposer le ventilateur.

Dans l'exemple fourni sur le graphique ci-dessus, on veut assurer un débit D_s en s'opposant des pertes de charges DP_t , on voit que le ventilateur dispose d'une puissance suffisante et que sa vitesse nominale sera de 1000 t/mn.

18. Comment limiter les pertes de charge?

Il faut veiller à limiter le plus possible les pertes de charge (les frottements de l'air) dans le schéma :

- en convention naturelle, pour rendre cette convention la plus facile possible;
- en convention forcée, pour limiter le coût de l'investissement dans un ventilateur puissant et les coûts de l'électricité.

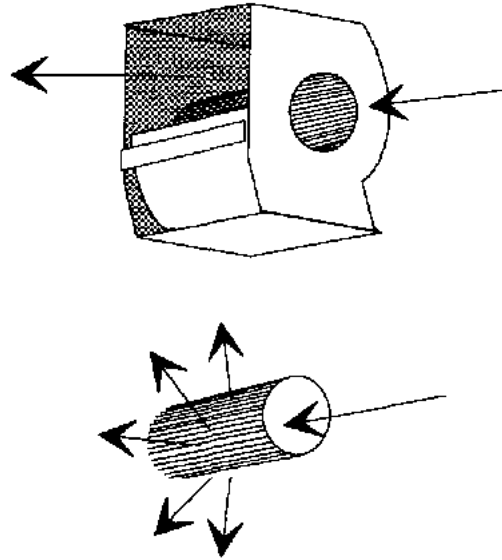
Les actions envisageables pour limiter les pertes de charge ont cependant toutes un coût, et c'est en définitive lors de l'évaluation économique des intérêts respectifs des différentes options que l'on pourra déterminer s'il vaut mieux investir dans des mesures de réduction de pertes de charge, dans une cheminée solaire plus importante, un ventilateur plus puissant, etc.

Hormis la vitesse de l'écoulement de l'air (qui est en partie imposée par les choix de production), les pertes de charge dépendent du choix du type de ventilateur, de l'installation d'éléments tels qu'un diffuseur, de l'architecture du schéma et de la nature de l'absorbeur de chaleur.

Critères de choix d'un ventilateur

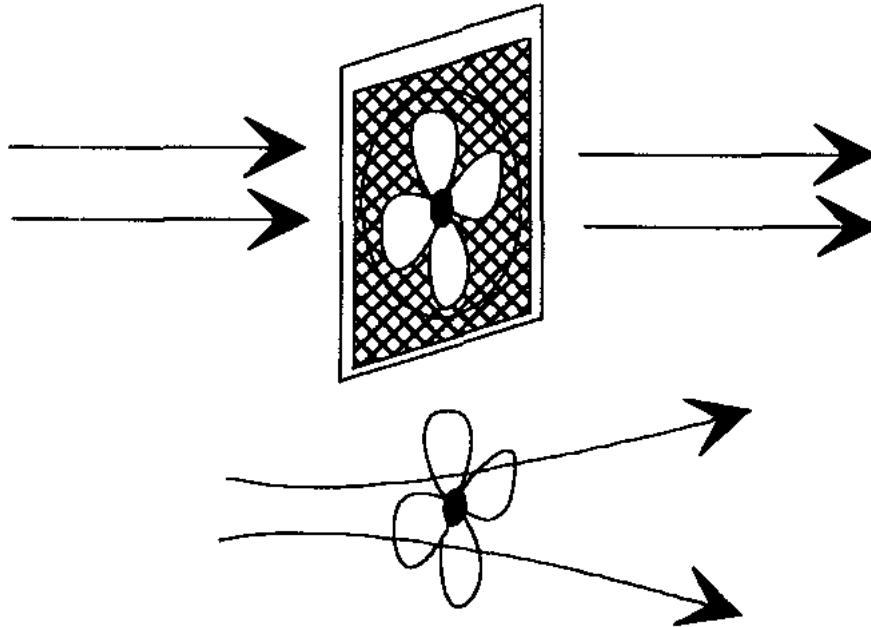
Cf. schéma page suivante.

Remarque: Au-dessus de 3 kW de puissance, l'alimentation électrique doit être triphasée.



Ventilateur axial

Le lignes de flux sont rejetées sur les parois du conduit. Il y a beaucoup de turbulences.



Ventilateur centrifuge

Les lignes de flux redeviennent rapidement parallèles à la conduite.

| Ventilateur axial | Ventilateur centrifuge |
|--|---|
| Avantages | |
| <ul style="list-style-type: none"> - coût moins élevé - rendement plus élevé | <ul style="list-style-type: none"> - moins de bruit - variation de puissance facile |

- encombrement réduit

- températures très élevées
- changement du moteur facile
- profil du flux d'air plus régulier
- plus grande puissance pour un même débit

Caractéristiques

- alimenté uniquement en courant alternatif
- débits de 450 à 10 000 m³/h
- pertes de charges de 10 à 100 Pa

- débits de 500 à 50 000 m³/h
- pertes des charges de 1 000 à 15 000 Pa

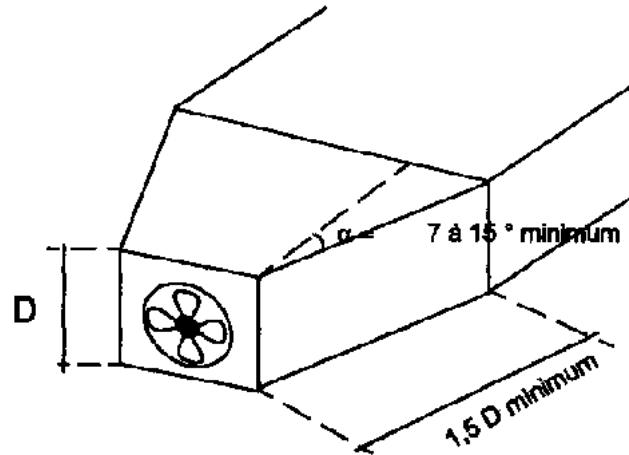
Dans les deux cas, il est conseillé de séparer le moteur du flux d'air (transmission par courroie).

Un diffuseur en aval du ventilateur permet parfois d'utiliser un ventilateur plus petit

L'air qui traverse le ventilateur a une vitesse élevée à sa sortie. En revanche, l'air qui se situe juste à l'arrière du ventilateur, mais au dessus, en dessous ou sur le côté, ne l'a pas traversé et circule à vitesse réduite. Il se crée de nombreux frottements entre ces deux airs de vitesses distinctes, ainsi que des turbulences, qui peuvent entraîner des pertes de charge élevées. Un diffuseur (ou divergent) tel celui représenté ci-dessous et placé à l'aval du ventilateur permet d'éviter les frictions entre l'air de sortie du ventilateur et l'air avoisinant en créant une séparation physique entre eux.

Le diamètre du ventilateur étant D, la longueur L du divergent doit être au moins égale à 1,5. D et l'angle de paroi du divergent doit être compris entre 7 et 15°.

Le divergent permet de plus une meilleure homogénéisation du flux d'air qui est turbulent en sortie de ventilateur.



Proportions donner un divergent pour ventilateur

L'architecture du séchoir

De nombreuses pertes de charge ne peuvent être évitées, en particulier celles qui sont induites par la présence du produit sur le chemin de l'air (ou alors on remet en cause l'intérêt du séchage). En revanche, la forme du séchoir peut être étudiée de façon à présenter des profils aérodynamiques dans le sens de l'écoulement de l'air.

Pour les gammes de séchage envisagées, il faut cependant réaliser que la construction d'un séchoir disposant de formes complexes pour bien pousser le mouvement de l'air peut revenir cher. Le choix ne pourra donc être fait qu'au terme d'une évaluation économique de l'intérêt de cet effort, et d'une analyse des capacités locales de construction et/ou réparation d'un tel séchoir. Dans la pratique, on se contentera surtout

d'éviter les cheminements de l'air trop tortueux, sauf s'ils sont prévus pour améliorer l'efficacité du séchage: par exemple, un système de chicanes pour focaliser l'arrivée d'air sur le produit provoque des pertes de charge supplémentaires, mais permet d'améliorer la qualité de l'échange d'eau entre le produit et l'air (donc le rendement du système).

Parmi les pertes de charge importantes à contrôler, se trouvent celles occasionnées par le grillage de protection sur la prise d'air extérieure à l'amont du ventilateur. Ce grillage est impératif pour éviter l'introduction de corps étrangers dans le séchoir (insectes, feuilles, brindilles...), mais ne devra pas être d'un maillage trop fin. Les trous de ce maillage devront avoir une superficie d'au moins 5 mm^2 à 1 cm^2 , selon l'importance du débit d'air.

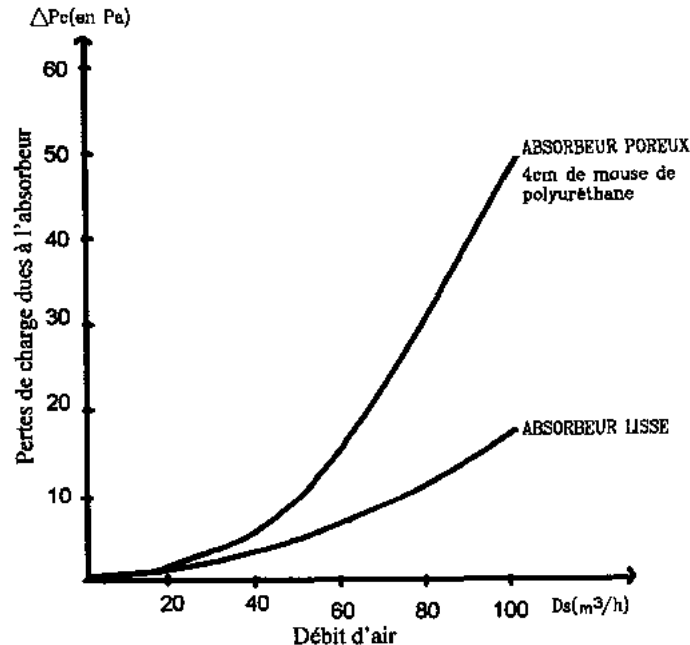
La nature de l'absorbeur de chaleur

L'absorbeur de chaleur sera abordé plus loin. C'est un matériau inclus dans le capteur solaire, dont la fonction est d'absorber la chaleur émise par le soleil, afin de la restituer à l'air et ainsi de le réchauffer.

Il existe plusieurs sortes de capteurs. Le graphique en page ci-contre présente les pertes de charge en fonction du débit d'air pour deux capteurs: un capteur à absorbeur poreux (l'air passe à travers un matériau poreux chauffé par le soleil au sein du capteur) et un capteur à absorbeur lisse (l'air circule au-dessus du matériau absorbeur).

La conclusion à tirer de ce graphe quant à l'emploi d'un absorbeur poreux ou d'un absorbeur lisse n'est cependant pas immédiate. Parce que l'air passe dans de multiples pores du premier, l'échange de chaleur entre l'absorbeur et l'air est plus efficace que dans l'autre cas (pour un même débit d'air): l'absorbeur est mieux refroidi par l'air à qui il transmet sa chaleur, et les fuites thermiques sont donc moindres, d'où un meilleur

rendement du séchage. Le choix final passe donc par un compromis qui dépend pour une grande part du débit envisagé.



Un absorbeur poreux s'oppose plus au passage de l'air qu'un absorbeur lisse

19. Quelle est l'énergie requise par la seule évaporation de l'eau?

Avant d'atteindre la chambre de séchage, l'air doit être élevé à la température maximale admissible par le produit. L'énergie nécessaire à l'élevation de température

d'un kilogramme de l'air utilisé est déterminé par la différence d'énergie contenue dans un kilogramme d'air entre l'état final et l'état initial. Les énergies contenues dans l'air à ces deux étapes sont appelées enthalpies de l'air. En fonction du débit, on peut alors déterminer la puissance nécessaire pour atteindre ce niveau de température.

$$P_n = 1,2 \cdot \frac{(h_s - h_a)}{3600} \cdot D_s$$

avec:

- D_s : débit d'air (en m^3 /heure);
- h_s et h_a : énergie contenue dans l'air à l'entrée et en sortie du séchoir (en kJ/kg d'air sec);
- P_n : puissance nécessaire pour le séchage (en kW);
- $\rho_{air} = 1,2 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de l'air;
- 3600: conversion heures/secondes.

Approximation

La détermination des enthalpies de l'air, en entrée et en sortie du séchoir, s'effectue par la lecture du diagramme humide de l'air, qui est exposé dans la troisième partie. Elle fait appel à des notions et définitions trop complexes pour apparaître ici.

On peut cependant proposer une première approximation de la différence d'énergie de

l'air entre l'entrée et la sortie, en supposant que les pertes thermiques sont minimales. Cette différence d'énergie correspond alors à l'énergie qu'il a été nécessaire de fournir pour porter l'air d'une température initiale (température extérieure généralement, sauf dans le cas d'un recyclage d'air) à la température de séchage.

On écrira alors la puissance nécessaire de la façon suivante:

$$P_n = 1,2 \times C_{p_{\text{air}}} \times (T_2 - T_1) \times \frac{D_s}{3600}$$

avec:

- P_n : puissance nécessaire en première approximation;
- $C_{p_{\text{air}}}$: chaleur massique de l'air (en J/kg/°C);
- T_2 : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en °C);
- T_1 : température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage (en °C);
- D_s : débit d'air (en m³/h).

La chaleur massique de l'air, à pression atmosphérique, évolue peu en fonction de la température (du moins pour les gammes de température envisagées).

On retiendra: $C_{p_{\text{air}}}$: 1030 J/kg/°C.

On peut affiner cette estimation en évaluant la chaleur nécessaire pour porter l'eau

contenue dans l'air de la température de départ à la température de séchage. Mais dans la majorité des cas, elle est négligeable ou faible (sauf cas d'un air recyclé): l'air extérieur a très rarement une teneur en eau supérieure à 40 grammes par kilogramme (valeur obtenue à 100 % d'humidité relative et température de 35°C). À titre indicatif, la chaleur massique de l'eau est approximativement de 4 200 J/kg/°C sur la plage de températures envisagées. Dans le cas extrême d'une teneur en eau de 40 g/kg d'air sec, l'erreur sur la première estimation est donc de 17 %.

On cherchera surtout à améliorer cette approximation de la puissance nécessaire par une évaluation des pertes de chaleur de l'air par les parois du séchoir.

L'énergie nécessaire est pour sa part:

$$E_n = P_n \cdot t_s$$

- P_n : puissance nécessaire en kW;
- t_s durée du séchage en heure;
- E_n : énergie nécessaire en kWh.

20. Quelle énergie doit-on fournir à l'air?

Mais toute l'énergie fournie à l'air d'entraînement ne sert pas uniquement à sécher le produit. Une partie est dissipée sous forme de pertes thermiques (dans les parois du capteur, de la chambre de combustion, dans l'échangeur thermique s'il existe....). On introduit la notion de rendement thermique (η_{therm}) qui est lié à la différence de température et au débit souhaités.

$$E_{\text{reelle}} = \frac{E_n}{\eta_{\text{therm}}}$$

en kWh

Seule l'expérimentation peut donner des informations précises sur ce rendement.

Production de l'énergie requise

PRINCIPE DU CAPTEUR SOLAIRE à AIR

Les séchoirs solaires peuvent avoir des formes très diverses, les éléments de captation du rayonnement solaire aussi.

En séchage solaire, on utilise le plus souvent, pour des raisons de coût et de mise en œuvre, des capteurs « à air », ce qui signifie que c'est l'air qui transporte la chaleur du capteur vers le produit à sécher.

Un capteur à a* associe en général un absorbeur et une couverture transparente.

L'absorbeur doit convertir en chaleur la plus grande partie possible du rayonnement solaire, en réfléchir vers l'avant ou en transmettre vers l'arrière le moins possible. En pratique, un corps métallique recouvert de peinture noire convient très bien.

La couverture a pour rôle de canaliser sur l'absorbeur l'air qui entre froid dans le capteur et doit en sortir chaud. Elle doit aussi protéger l'absorbeur et servir d'isolant thermique.

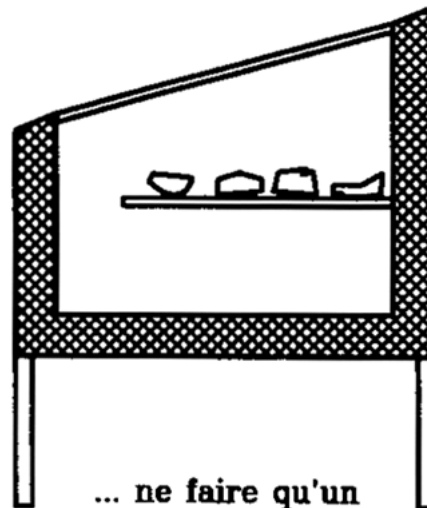
Elle joue enfin un rôle d'effet de serre: l'énergie reçue par l'absorbeur est partiellement conservée dans le capteur du fait de la couverture. Cela tient aux propriétés de certains matériaux utilisés en couverture d'être transparents à la lumière

visible mais opaques aux infrarouges. L'énergie qui entre sous forme de lumière visible est donc plus ou moins « piégée » une fois qu'elle a été transformée en chaleur (rayonnement infrarouge). Ci schémas page ci-contre.

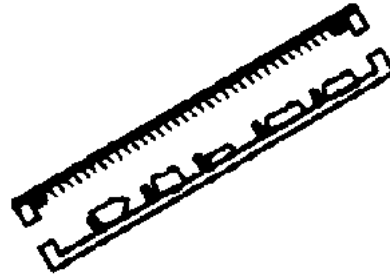
LA COUVERTURE PIÈGE LE RAYONNEMENT

Le matériau de couverture idéal doit:

- être transparent au rayonnement;
- absorber ou réfléchir les infrarouges;
- isoler l'air chaud du capteur de l'air ambiant;

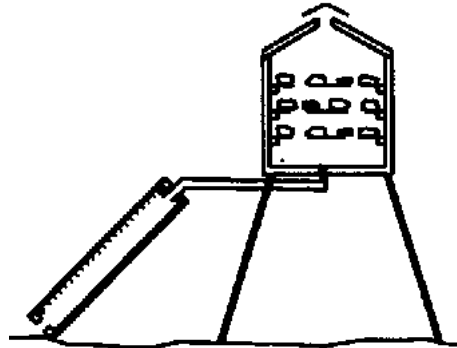


Séchoirs et capteurs peuvent ne faire qu'un



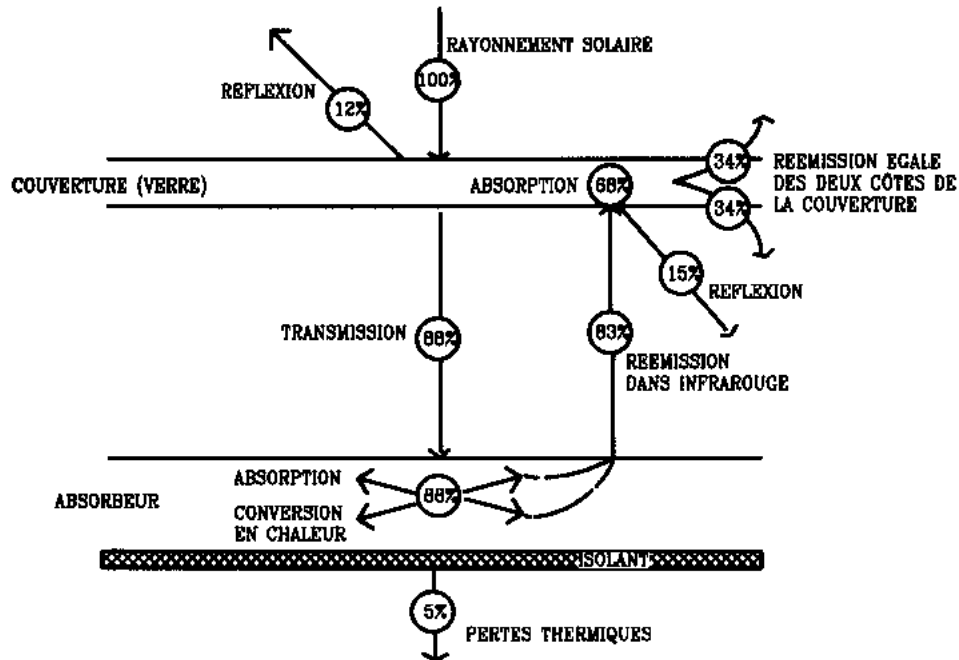
**... être séparés mais
dans la même enceinte**

Séchoirs et capteurs peuvent être séparés mais dans la même enceinte



... être séparés

Séchoirs et capteurs peuvent être séparés



Exemple de bilan pour un capteur à effet de serre

- être durable;
- être solide;

- **supporter la chaleur;**
- **être bon marché.**

Aucun produit ne réunit toutes ces qualités. Il faut faire des choix en privilégiant certains critères, en fonction de la situation et des buts de l'opération.

- **La transparence:** les verres et matières plastiques transmettent 80 à 90 % du rayonnement tant que l'angle d'incidence de celui-ci est inférieur à 45-50°. Au-delà, le taux de transmission décroît très vite. Certaines matières plastiques jaunissent ou blanchissent à l'usage: leur transparence diminue.
- **L'absorption - réflexion des infrarouges:** le verre est le matériau le plus efficace de ce point de vue. Il absorbe 82 % des infrarouges et n'en réfléchit de 18 %, n'en transmettant quasiment aucun. Les plastiques ont des comportements très divers: le polyéthylène de 0,15 mm d'épaisseur laisse passer 73 % des infrarouges, tandis que l'acétate de 0,10 mm n'en laisse passer que 20 %. Les autres films plastiques se situent entre ces deux extrêmes.
- **L'isolation:** elle a, en ce qui concerne le chauffage solaire, peu d'importance. Les mesures susceptibles de l'améliorer ne sont pas justifiées économiquement. Il faut surtout placer le capteur à l'abri du vent.
- **La durabilité:** le verre est le matériau le moins sensible au vieillissement. Parmi les plastiques, les plus résistants sont les acryliques (Plexiglas).
- **La résistance mécanique:** le verre, fragile sous sa forme ordinaire, est plus résistant lorsqu'il a été trempé (verre Sécurit). Les films plastiques sont sensibles aux déchirures (le Tevlar et le Mylar moins que les autres). Leur fragilité peut être réduite si on les colle sur un grillage textile ou autre. Le polycarbonate

est particulièrement résistant aux chocs. Les stratifiés polyester ont une tenue mécanique excellente. Les matériaux alvéolaires sont très rigides dans le sens des alvéoles.

• **La résistance à la chaleur: tous les matériaux se dilatent à la chaleur. Il faut donc prévoir du jeu dans le montage, spécialement pour le verre (sinon il cassera). La plupart des films plastiques s'affaisse rapidement. Le polycarbonate alvéolaire en revanche a une excellente tenue thermique.**

• **Le prix de revient: il faut l'évaluer par rapport à la durabilité du produit: un film bon marché qu'on doit remplacer chaque saison revient très cher.**

La tableau ci-contre présente les principales caractéristiques de quelques matériaux.

Propriétés des différentes couvertures transparentes

| Matériau | Verre ordinaire | Verre trempé | Verre armé | Polyester armé de fibre de verre | Polycarbonate double paroi | Polypropylène double paroi | Polymère double (acryli |
|---|-----------------|--------------|------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Transmission rayonnement solaire sous incidence normale % | 86/91 (4 mm) | 86 (4 mm) | 72 | 83 | 80 | 65 | 80 |
| Transmission rayonnement thermique % | 3 | 3 | 3 | 6 | 6 | ≈10 | 6 |
| Transparent | P | P | P | L | L | L | L |

| | | | | | | | |
|--|----------------------------|----------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------|
| (P)
Translucide
(L) | | | | | (simple paroi:
P) | | (simple p |
| ◆paisseurs
standard
disponibles | 3 ◆ 6 mm | 4 ◆ 8 mm | 6 mm | 1 mm | 4 ◆ 16 mm | 4 mm | 8 ◆ 16 |
| Température
maximale
d'utilisation | 200°C | 200°C | 200°C | 70°C | 100°C+ | ≈60°C | 90° |
| Résistance
au fa | bonne | bonne | bonne | mauvaise | moyenne | mauvaise | mauv |
| Poids kg/m ² | (e = 4
mm) 11
faible | (e = 4
mm) 11
faible | (e = 6
mm) 6
faible | (e = 1
mm) 1,5
importante | (e = 6 mm)
1,2
importante | (e = 4 mm) 0,7
importante | (e = 16
import |
| Longévité
(durée au-
delà de
laquelle
transmission
rayonnement
solaire =
90% de la
valeur
initiale) | 100 ans + | 100 ans + | 7-10 ans
≈15 ans
avec
protection
UV | 6 ans | ≈2 ans
très mauvaise | 15 ans+ | 1 ◆ 3 |
| Règle de | masticage | masticage | masticage | agrafage | profil spécial | profil spécial ou | profil sp |

| | | | | | | | |
|---------|--|--|--|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|
| pose | baguettes | baguettes | baguettes | clouage | ou
mastic +
baguettes | mastic +
baguettes | mastic+ba |
| Outils | diamant,
martelette,
couteau ♦
mastic | diamant,
martelette,
couteau ♦
mastic | diamant,
martelette,
couteau ♦
mastic | agrafage
clouage | baguettes
scie | scie, mastic +
baguettes | scie, m
bague |
| Coût(2) | * | ** | ** | * | * | ** | *> |

(1) Les valeurs entre parenthèses correspondent au polyéthylène traité UV, d'après B. Yanda.

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

L'ABSORBEUR CAPTE LA CHALEUR ET RECHAUFFE L'AIR

Son rôle est d'absorber la plus grande partie possible du rayonnement solaire. Un absorbeur est donc d'autant meilleur que son taux d'absorption est élevé. Il devra toujours être peint en noir ou foncé. La peinture (choisie mate de façon à réfléchir le moins possible les rayons du soleil) doit résister à la chaleur pour ne pas contaminer les aliments en se décomposant, ni en altérer le goût. L'absorbeur doit aussi communiquer sa chaleur à l'air qui circule dans le capteur.

En règle générale, l'efficacité du capteur solaire sera d'autant meilleure que:

- la surface de contact entre l'air et l'absorbeur est importante (surface globale, mais aussi état de surface: un corps rugueux offre davantage de surface de contact qu'un corps lisse pour une même taille);
- la vitesse de l'air est importante, pour deux raisons: (a) il se crée alors des

turbulences dans la zone d'échange de chaleur entre l'absorbeur et l'air, et davantage de molécules d'air peuvent rentrer en contact avec lui et (b) l'absorbeur est davantage refroidi par l'air, ce qui diminue d'autant les pertes thermiques par diffusion de la chaleur de l'absorbeur à travers l'isolant (qui ne l'est jamais totalement) ou le cadre du capteur.

D'un autre côté, ces paramètres tendent à augmenter les pertes de charge dans le système, qui sont d'autant plus élevées que l'écoulement de l'air se fait avec des turbulences (augmentation des frottements air/air) et que la vitesse est rapide (frottements proportionnels au carré de la vitesse).

On a déjà évoqué (section précédente, point 18.) les avantages et inconvénients des absorbeurs poreux par rapport aux absorbeurs lisses. Le choix de l'absorbeur (poreux ou lisse) n'est pas immédiat.

Dans la pratique, et sauf pour des vitesses de l'air particulièrement élevées, l'absorbeur poreux est celui qui permet d'utiliser le ventilateur le moins puissant pour une même performance au séchage: les pertes de charge sont plus élevées, mais le séchage peut se faire à moindre débit d'air, compte tenu d'une meilleure efficacité de l'échange de chaleur entre l'absorbeur et l'air. Cela dit, si l'efficacité des absorbeurs poreux est indéniable quand la circulation de l'air est forcée par un ventilateur, ce n'est pas le cas en circulation naturelle pour deux raisons:

- le débit et la vitesse de l'air sont plus faibles, de sorte que les échanges de chaleur avec un absorbeur lisse sont eux aussi efficaces;**
- les pertes de charge dans l'absorbeur poreux empêchent les mouvements de convection de l'air de se produire de façon optimale.**

L'efficacité d'un capteur dépend beaucoup de son orientation et de son inclinaison.

L'idéal serait qu'il soit toujours perpendiculaire aux rayons du soleil, ce qui supposerait un capteur orientable. Les capteurs étant le plus souvent fixes, on cherchera à orienter et incliner le plan du capteur de façon à ce qu'il soit perpendiculaire aux rayons du soleil de midi pour la période de séchage. On trouvera en bibliographie les sources pour une méthode de choix de l'orientation (MM. Vauchon et Puiggali, Université de Bordeaux I).

Mentionnons qu'une autre condition essentielle de l'efficacité des capteurs est l'homogénéité des flux d'air dans l'absorbeur, pour éviter les passages préférentiels d'air. L'intérêt d'un absorbeur poreux est en effet de multiplier les probabilités que chaque molécule d'air rentre en contact avec lui, ce qui ne sera pas le cas si se présente une brèche par laquelle l'air s'engouffre sans avoir le temps de prendre la chaleur de l'absorbeur.

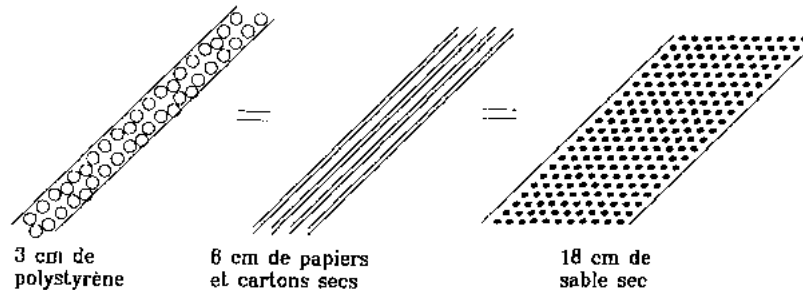
L'ISOLATION LIMITE LES PERTES

L'isolation est destinée à limiter les pertes de chaleur par les côtés et l'arrière de l'absorbeur. Elle n'est pas toujours nécessaire en pays chaud (en zone très chaude, au sol très sec et sableux par exemple). Si elle est nécessaire, on a intérêt à utiliser ce qui est disponible localement: polystyrène de récupération, journaux, cartons, sable, etc.

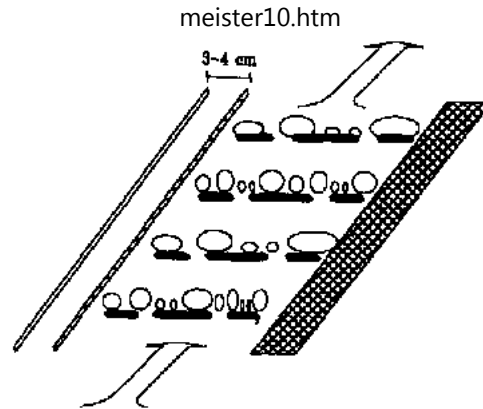
Mais ces matériaux doivent toujours être secs pour conserver tout leur pouvoir isolant et éviter les dommages à la structure. Ils doivent être soit changés régulièrement, soit pouvoir être nettoyés, pour des raisons sanitaires évidentes. Le polystyrène est à ce titre un matériau avantageux.

Placer une feuille métallique réfléchissante entre absorbeur et isolant diminue les pertes. Il faut enfin éviter tout « pont thermique »: il suffit qu'un matériau de petite taille mais dans lequel la chaleur se diffuse rapidement soit en contact avec l'absorbeur pour que l'isolation soit mauvaise (discontinuités dans l'isolation, par exemple vis métalliques).

L'assemblage des différentes parties du capteur doit se faire en respectant les valeurs de la deuxième figure page suivante. La distance couverture-absorbeur doit être de 3 à 4 cm pour minimiser le transfert de chaleur de l'absorbeur vers la couverture. La valeur de l'intervalle caisson/isolant-absorbeur dépend du type de séchoir. Quand le capteur est séparé de l'enceinte de séchage, il doit être de 5 à 15 cm pour favoriser un bon échange absorbeur-air tout en limitant les pertes de charges. Une vitesse minimale de 3 m/s est alors requise, ce qui suppose l'emploi d'une cheminée solaire ou plutôt d'un ventilateur.

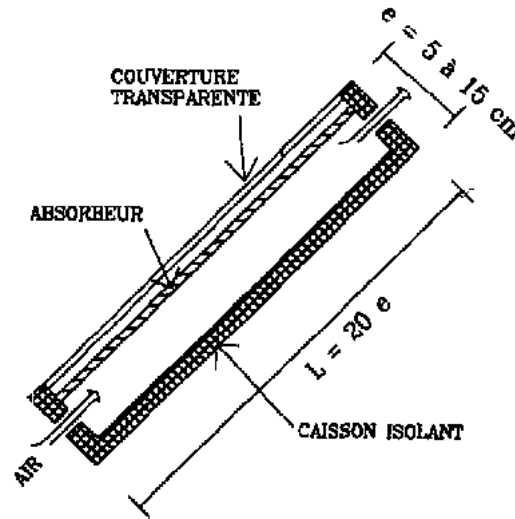


équivalences en pouvoir d'isolation thermique des principaux matériaux utilisés



◆◆ments du dimensionnement des capteurs 1

Lorsque le capteur et l'enceinte ne font qu'un, la surface de séchage impose la distance caisson-absorbeur.



◆◆lements du dimensionnement des capteurs 2

Lorsque le capteur est séparé de l'enceinte de séchage, il faut respecter les valeurs ci-dessus.

LA COURBE DE RENDEMENT D'UN CAPTEUR

Pour évaluer l'efficacité d'un capteur à collecter l'énergie solaire, à la transformer en chaleur après absorption et à chauffer l'air le traversant, on définit le rendement thermique d'un capteur selon le même principe que pour le séchoir entier comme suit:

$$\eta_{\text{therm}} = \frac{\text{Puissance thermique utile par m}^2 \text{ de capteur}}{\text{Puissance solaire incidente par m}^2 \text{ sur le plan du capteur}} = \frac{E_u}{G_n} \times 100$$

avec G_N : \diamond clairement global reçu par m \diamond tre carr \diamond de capteur (W/m^2).

La puissance thermique utile totale du capteur est celle qui a permis de transmettre \diamond l'air sa chaleur pour passer de la temp \diamond rature T_1 \diamond l'entr \diamond e du capteur \diamond la temp \diamond rature T_2 en sortie de capteur. On retrouve donc une expression similaire \diamond celle d \diamond j \diamond utilis \diamond e ci-dessus lors de l'approximation de la variation d'enthalpie de l'air dans le s \diamond choir:

$$E_u = 1,2 \times C_{p_{air}} \times (T_2 - T_1) \times (3600 \cdot A)$$

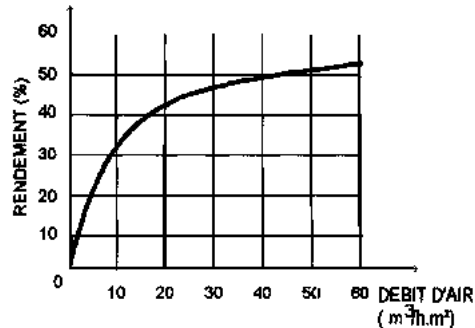
avec:

- E_u : puissance thermique utile par m 2 de capteur (en W/m^2);
- $C_{p_{air}}$: chaleur massique de l'air (en $J/kg/^\circ C$);
- T_2 : temp \diamond rature de s \diamond chage (\diamond l'arriv \diamond e sur le produit) (en $^\circ C$);
- T_1 : temp \diamond rature de l'air utilis \diamond pour le s \diamond chage, avant son chauffage (en $^\circ C$);
- D_s : d \diamond bit d'air (en m $^3/h$);
- A : superficie totale de captage des rayons solaires (en m 2).

On rappelle: $C_{p_{air}} = 1030 J/kg/^\circ C$, peu d \diamond pendant de la temp \diamond rature pour la gamme envisag \diamond e pour le s \diamond chage.

Le rendement du capteur ainsi exprimé est peu différent du rendement thermique du séchoir complet. La seule différence est que le rendement du séchoir doit intégrer les pertes thermiques à l'intérieur de la chambre de séchage, et les pertes dues aux interactions entre le produit à sécher et l'air.

Le rendement d'un capteur dépend de ses caractéristiques intrinsèques, mais aussi du débit de l'air. Une courbe importante est la courbe de rendement du capteur en fonction du débit, rapporté au mètre carré de capteur. Cette courbe est définie pour un capteur donné; le graphe ci-dessous en fournit un exemple.



Le rendement d'un capteur augmente d'abord très fortement avec le débit, puis beaucoup moins vite

La lecture de ce type de courbe fournit plusieurs indications.

- Pour un type de capteur donné, et connaissant le débit d'air souhaité pour le séchage, on a tout intérêt à choisir la surface de capteur qui offre un bon rendement, c'est-à-dire de l'ordre ou au-delà de $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ pour le type de

capteur considéré ci-dessus. Si on envisage de fournir un débit d'air de $90 \text{ m}^3/\text{h}$ dans la chambre de séchage, il faudra retenir au maximum une surface de captage des rayons solaires de 6 m^2 .

- Pour ce type de capteur et pour la gamme des débits d'air rapportés au m^2 de capteur de plus de $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, le rendement thermique du capteur est quasiment constant. De la sorte, débit d'air rapporté au mètre carré de capteur et gain de température de l'air dans le capteur sont alors intimement liés. Dans ce cas, le débit d'air que multiplie le gain de température reste en effet relativement constant, pour une irradiation solaire donnée. Cela s'explique par le fait que le capteur fonctionne alors à son régime nominal, et que l'énergie fournie à l'air est totalement proportionnel à l'irradiation solaire. Soit le système porte moins d'air à une température plus élevée, soit il porte plus d'air à une température moins élevée, par unité de temps. Cette remarque est importante à deux titres.
- Elle permet de simplifier les calculs de dimensionnement en considérant un rendement du capteur constant dans sa plage d'utilisation « efficace » (ici 50%).
- Elle permet de réaliser que la manipulation d'un paramètre du séchage peut entraîner des effets parfois inattendus. Par exemple, il se peut que l'utilisateur d'un séchoir s'aperçoive que le séchage se produit trop rapidement, ou à température trop forte. Si, pour limiter le rythme du séchage, il diminue le débit d'air (« moins j'envoie d'air chaud, moins je provoque d'évaporation »), mais que ce débit reste supérieur à $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ pour le séchoir envisagé ici, il risque d'obtenir les résultats inverses de ceux qu'il escomptait. Le rendement thermique du capteur sera en effet le même que précédemment, donc l'apport de chaleur pour le séchage sera le même, et la température aura augmenté, et non diminué. Cette augmentation de la température sera vite préjudiciable au produit, puisque

le séchage doit se faire à une température proche de la température maximale admissible. En revanche, si l'utilisateur réduit le débit d'air à des proportions telles que, rapporté au mètre carré de captage, celui-ci ne représente plus que $5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, alors il obtiendra l'effet escompté d'une réduction du rythme de séchage, du fait d'une forte baisse dans le rendement du capteur, donc de l'énergie fournie pour le séchage pour un niveau donné de l'ensoleillement.

ÉLÉMENTS DE DIMENSIONNEMENT

Reprenons les questions associées au problème du dimensionnement du séchoir.

21. Le séchage peut-il être réalisé directement par la seule exposition du produit au soleil?

Pour les puissances nécessaires au séchage supérieures à 0,3 ou 0,7 kW par mètre carré de claie (selon la zone considérée, et son ensoleillement en particulier), le séchage direct par les seuls rayons du soleil ne suffira pas. Il faudra alors envisager un système de capteurs solaires à air, voire un système d'échauffement de l'air à l'aide d'un combustible fossile. C'est pour le moment dans le cadre d'un séchoir solaire fonctionnant uniquement avec un capteur solaire que nous nous plaçons.

On supposera, suite aux développements de la partie précédente « La courbe de rendement d'un capteur », que le capteur du séchoir solaire sera dimensionné de telle façon que son rendement soit optimal (surface de captage telle que le débit d'air souhaité rapporté à la surface de captage soit supérieur à $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ pour le type de capteur envisagé dans l'exemple ci-dessus).

22. Quelle est la surface de captation nécessaire?

La surface de captation nécessaire pour obtenir la puissance nécessaire au séchage qui a été exposée au point 19. de la section précédente, est donnée par:

$$A = \frac{P_n}{\eta_c \cdot G_n}$$

avec:

- **A: surface de capteur (en m²);**
- **P_n: puissance nécessaire au séchage (en kW);**
- **G_n: puissance de rayonnement disponible (en kW/m²);**
- **η_c: rendement du capteur solaire, pouvant varier de 0,4 à 0,6 selon le capteur, si on admet qu'on l'utilise à sa capacité nominale (sinon moins).**

23. Quelle élévation de température permet la surface de captation A?

C'est là une question annexe, dans la mesure où, en théorie, les calculs précédents ont conduit à déterminer la surface du capteur précisément pour une température de séchage optimale (de l'ordre de la température maximale admissible, avec une marge de sécurité supplémentaire en phase III du séchage).

On en fournit la réponse pour deux raisons:

- **dans les cas simples, la totalité du calcul du dimensionnement ne sera pas effectuée;**

- l'ensoleillement évolue dans le temps, et le séchoir n'est généralement pas « géométrie variable »: il ne peut pas s'adapter aux fluctuations climatiques. Connaître les relations entre la température de séchage, la température de l'air ambiant, le débit d'air, la surface de captage et le niveau d'ensoleillement permet ainsi de mieux savoir comment réagir de telles fluctuations.

Il suffit de reprendre la formule du rendement thermique du capteur indiquée ci-dessus d'une part, et de la puissance utile d'autre part.

On obtient:

$$T_2 = \frac{T_1 + A \cdot \eta_{\text{capt}} \cdot G_n \cdot 3600}{(1,2 \cdot C_{p_{\text{air}}} \cdot D_s)}$$

avec:

- $C_{p_{\text{air}}}$: chaleur massique de l'air (en J/kg/°C) = 1030 J/kg/°C;
- T_2 : température de séchage (l'arrivée sur le produit) (en °C);
- T_1 : température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage (en °C);
- D_s : débit d'air (en m³/h);
- A : superficie totale de captage des rayons solaires (en m²);
- η_{capt} : rendement thermique du capteur;

- G_n : irradiation solaire moyenne (en W/m).

Une telle expression peut être utile pour contrôler rapidement si la température de séchage sera bien ou non de l'ordre de la température maximale admissible. On pourra, selon les cas, augmenter le débit d'air pour diminuer la température, ou le diminuer dans le cas contraire (rappel pour ces cas contraires: diminution de débit dans des proportions telles que le capteur reste dans sa plage de fonctionnement nominal, sinon la température peut au contraire chuter, du fait d'une forte baisse du rendement du capteur). Une autre mesure pour limiter la température (par exemple dans les périodes de trop fort ensoleillement) peut être de couvrir une partie des capteurs dans une proportion proche de celle du « surensoleillement » épisodique.

24. Comment aborder le cas des séchoirs hybrides?

Nous avons vu que dans certaines conditions (mauvaises conditions climatiques, capacité et rythme de séchage élevés...), il est nécessaire de faire appel à une source énergétique complémentaire à l'énergie solaire. Ces séchoirs sont donc nommés séchoirs hybrides.

La puissance totale est alors:

$$P_n = P_{\text{solaire}} + P_{\text{appoint}}$$

$$P_{\text{appoint}} = P_u \cdot \eta_a$$

, avec:

- P_u : puissance du système d'appoint (chaudière, fourneau, échangeur

électrique) en kW;

- η_a : rendement global du système d'appoint incluant le rendement de la production de chaleur (chaudière) et le rendement de transfert de la chaleur à l'air (échangeur).

L'énergie d'appoint requise pour l'opération de séchage est:

$$E_a = P_u \cdot t_s$$

(en kWh) où t_s est le temps de séchage (en h).

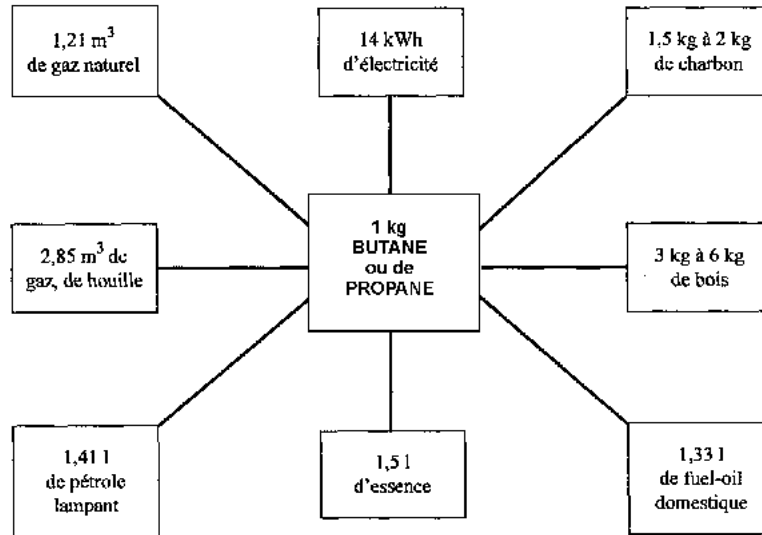
Si l'appoint est électrique, on peut calculer directement le coût en énergie d'une opération de séchage. Si l'appoint est un combustible, la masse de combustible nécessaire (en kg) est donnée par:

$$m = \frac{E_a}{PCI}$$

(m en kg, E_a en kWh)

où PCI = Pouvoir calorifique inférieur du combustible (en kWh/kg).

Le graphique ci-dessous précise les équivalences de pouvoirs calorifiques pour les différents combustibles envisageables.



Les \diamond équivalences th \diamond oriques de pouvoirs calorifiques inf \diamond érieurs \diamond pression et temp \diamond érature ambiante

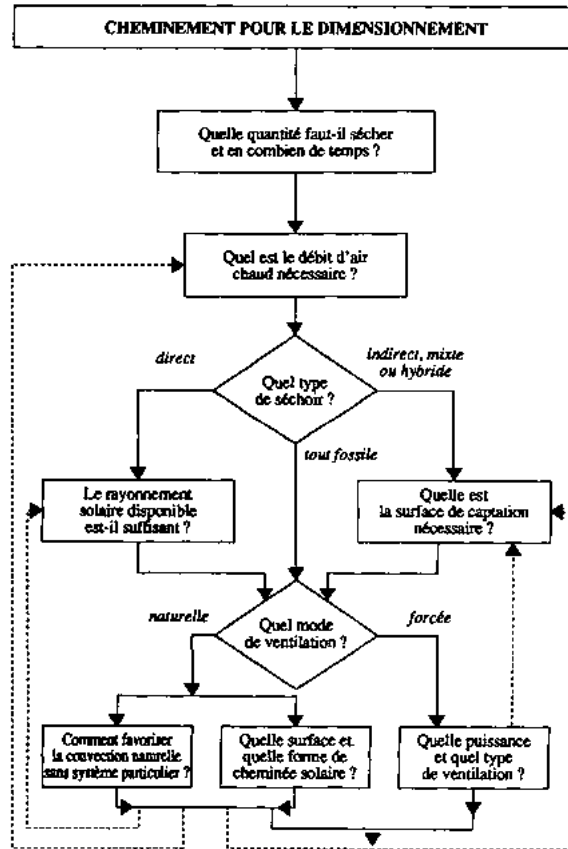
(Source: Ren \diamond Mass \diamond « Le butane et le k \diamond ros \diamond ne en chiffres », \diamond d. GRET, Paris, 1990)

On tiendra compte des remarques suivantes:

- le PCI ou propane est de 12,7 kWh/kg;
- les rendements de combustion de ces diff \diamond érentes sources d' \diamond nergie varient, pour des installations artisanales ou semi-industrielles de 50 % (pour les combustibles solides) \diamond 80 % (pour les combustibles liquides).

Récapitulatif de la méthode de dimensionnement

| | Données de base |
|---|--|
| <i>Produits:</i> | <ul style="list-style-type: none"> - humidité initiale-finale - température de l'air maximale admissible - courbe sorption-désorption |
| <i>Air ambiant:</i> | <ul style="list-style-type: none"> - température sèche et humide - humidité relative et absolue |
| <i>Conditions de séchage imposées par la filière amont et aval.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - masse de produits à sécher - durée de séchage |



Récapitulatif de la méthode de dimensionnement

Chapitre: exemples de séchoirs types

La technologie du séchage amélioré appliqué aux produits alimentaires est relativement récente dans de nombreux pays en développement. Le développement d'un séchoir nécessite de nombreux efforts:

- adaptation aux caractéristiques climatiques locales;
- adaptation, dans la mesure du possible, aux matériaux locaux;
- adaptation aux compétences locales dans la fabrication des séchoirs;
- adaptation aux produits traités;
- adaptation aux besoins (quantité, apparence du produit...);
- adaptation aux exigences de l'utilisateur du séchoir;
- etc.

Les séchoirs qui sont ici présentés ont fait l'objet de nombreux tests pour les rendre adaptés à des situations relativement précises, mais qu'on rencontre suffisamment souvent qu'ils soient aptes à assurer une large diffusion à l'avenir.

Contenu des « fiches séchoirs »

Plusieurs types de séchoirs sont présentés: convection directe ou indirecte, convection forcée. Trois modèles tout fossile et gaz sont présentés parce qu'ils permettent la réalisation de produits séchés de qualité, même pendant la saison humide.

L'évolution actuelle des séchoirs artisanaux tend vers des processus mixtes (pré-séchage rapide en séchoir tout fossile, finition en séchage solaire amélioré) ou vers des séchoirs hybrides solaire/tout fossile. Alors qu'en Europe des systèmes performants de séchoirs hybrides (solaire/gaz notamment) sont fonctionnels, peu de réalisations sont encore opérationnelles en PED mis à part quelques prototypes. Pourtant, cette conception mixte se justifie économiquement avec des temps de retour sur l'investissement normaux (5 à 10 ans) pour une unité artisanale visant un produit de qualité.

Parmi les séchoirs présents, on peut aussi faire la distinction entre séchoir à une seule fournée (système « batch »), semi-continu (les fournées se suivent, on peut enfourner des produits humides en remplacement de certaines claies où les produits sont suffisamment secs). Les systèmes continus (tapis roulant...) sont essentiellement des applications industrielles ne se justifiant que sur des tonnages conséquents.

Les fiches comprennent une partie descriptive où le lecteur trouvera les éléments essentiels pour cerner l'usage du séchoir (fonctionnement, caractéristiques, durée de vie, historique, références) et une partie donnant des éléments de performance de séchage en vue d'une comparaison avec d'autres systèmes.

Ces fiches ont pour but de donner au concepteur les informations basiques nécessaires à son étude d'analyse et de sélection du séchoir convenant à son cas. Elles ne suffisent en aucun cas pour réaliser le modèle présent. Pour chacun, des plans précis et des guides de fabrication sont disponibles auprès des organismes mentionnés en référence dont les adresses figurent en annexe 7. Les paramètres techniques mentionnés dans ces fiches sont définis ci-dessous.

Consommation spécifique du séchoir (C_s en kWh/kg d'eau extrait)

Dans la conception d'un séchoir polyvalent (plusieurs types de produits à sécher), on a coutume d'utiliser la quantité d'eau à extraire par période de temps donnée.

Pour connaître la facture énergétique, la connaissance de la « consommation spécifique » donne la quantité d'énergie à fournir associée à cette quantité d'eau à extraire. Cette valeur est bien sûr une valeur moyenne sur la durée de l'opération de séchage et sur une campagne de séchage où les conditions climatiques et les caractéristiques du produit varient. En particulier, l'énergie à fournir par kilogramme d'eau à extraire est plus élevée en phase III du séchage.

N.B. Pour les séchoirs à convection forcée, on tient compte de l'énergie électrique consommée par le ventilateur dans l'expression de la consommation spécifique.

Rendement énergétique global (REG en %)

Il est défini comme le rapport entre l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau libre, appelée chaleur latente de vaporisation de l'eau, et la consommation spécifique définie précédemment.

$$\text{REG} = \frac{L_V}{CS}$$

$L_V = 0,65 \text{ kWh/kg eau (à } 60^\circ\text{C, à la pression atmosphérique)}$.

Dans une phase expérimentale, on ne peut se contenter de ce terme global. Il est nécessaire de travailler sur les caractéristiques de l'air à l'entrée et en sortie. On calcule alors la différence d'enthalpies pour connaître l'énergie ayant participé au séchage du produit (cf. troisième partie). On peut ainsi définir l'efficacité du séchage séparément du rendement d'échauffement de l'air d'entraînement.

Liste des neuf séchoirs présents

- Fiche A Séchage traditionnel amélioré
- Fiche B Séchoir cadre NRI/Tropical Wholefood
- Fiche C Séchoir coquillage GERES/GRET
- Fiche D Séchoir banco CEAS/ATESTA
- Fiche E Séchoir solaire tunnel type Hohenheim
- Fiche F Séchoir toiture craies GERES (1)
- Fiche G Séchoir gaz type armoire CEAS
- Fiche H Séchoir semi-continu ITDG
- Fiche I Séchoir tunnel gaz type Cartier (2)

(1) Ce modèle a été retenu, bien qu'il ne soit pas destiné au séchage de produits alimentaires, pour son principe très fonctionnel prouvé en Europe et pouvant s'adapter des systèmes mixtes.

(2) Ce modèle a été mis en place au Burkina Faso pour le séchage des mangues sans traitement (sec et mi-cuit) d'après le savoir technologique développé pour le séchage du pruneau en France.

Les « fiches séchoirs »

FICHE A: Sèchage traditionnel amélioré

Il nous a paru intéressant, compte tenu de l'importance de l'activité concernée, de présenter une fiche générale sur l'amélioration des pratiques traditionnelles sans la mise en place d'un outil technologique.

Cette amélioration réside en trois points:

- 1. La préparation et le traitement des produits à sécher pour limiter les pertes.**
- 2. Une meilleure exposition du produit à l'air chaud ou au soleil et une meilleure protection vis-à-vis des agents extérieurs (insectes, rongeurs...).**
- 3. Un conditionnement/stockage permettant une conservation plus longue.**
 - 1. Les pré-traitements, qui permettent d'éviter et de repousser toute contamination du produit et d'améliorer le séchage, sont abordés dans le détail au chapitre suivant.**
 - 2. Beaucoup de pratiques persistent consistant à étaler directement le produit à sécher sur la terre battue, le sable, la paille. Des systèmes simples permettent d'éloigner le produit de ces sources d'infestation.**
 - 3. Le conditionnement, ainsi que les conditions de stockage, seront abordés au chapitre suivant, et ont une portée générale quel que soit le type de séchoir utilisé.**

Des critères de fin de séchage simples doivent être établis dans le cas du séchage traditionnel amélioré, car il est difficilement envisageable de procéder à des tests compliqués pour ce type de séchage. On pourra opter pour un critère de caractéristiques

extérieures du produit (c): fin du chapitre IV).**FICHE B: Séchoir cadre NRI****USAGE:** artisanal**ÉNERGIE:** séchoir solaire direct ☞ convection naturelle**RÉFÉRENCES:** NRI-Tropical Wholefood**HISTORIQUE****Zone d'implantation:** Ouganda**Début d'expérimentation:** 1989**Utilisation régulière:** depuis sa création**Nombre de séchoirs diffusés (1994):** 120**CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR**

Description générale: Le séchoir est composé d'un cadre en bois dur recouvert d'une toile plastique transparente en polyéthylène. La base du cadre est composée de bûtons de papyrus recouverts d'une toile en polyéthylène noir. L'ensemble du cadre repose à 1 m du sol, sur quatre pieds en bois tendre. Les dimensions du cadre (L x l x h) sont de 4,3 x 1,5 x 0,75 m.

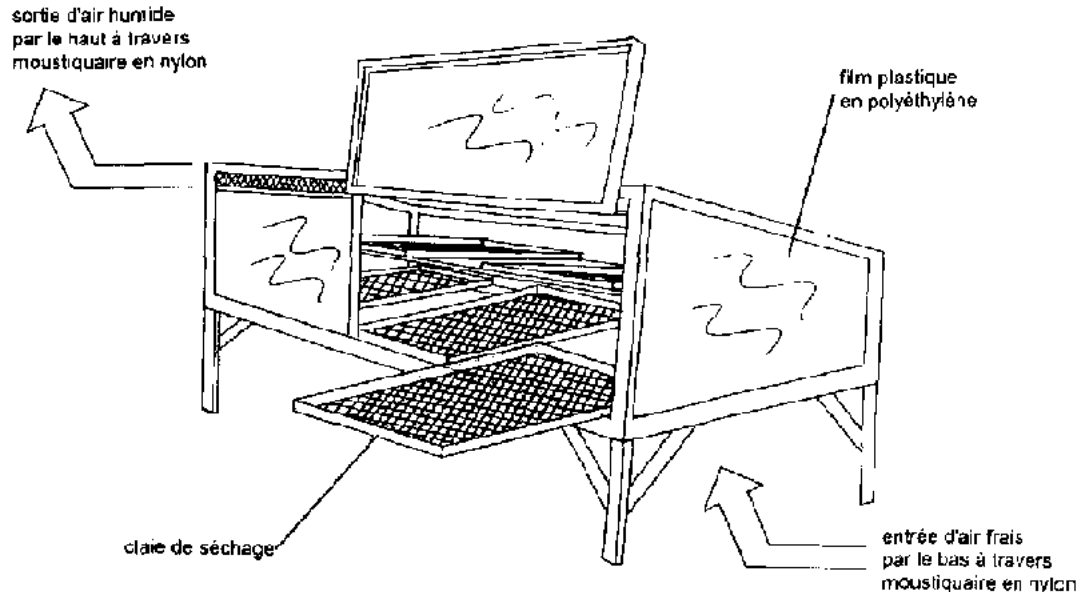
Le cadre peut contenir deux étages de six claies soit une surface de séchage de 10 m².

Système d'aération: Deux ouvertures de 20 x 400 cm sont ménagées sur la base et le haut du cadre. Elles sont recouvertes d'une moustiquaire en nylon pour protéger le produit de l'attaque des insectes. L'air frais rentre par le bas. L'air chaud et humide sort par le haut.

Capacité: 2 ♦ 3,5 kg de produit frais/m² de claie soit 20 ♦ 35 kg de produit frais par s♦choir

Approvisionnement du s♦choir: Par fourn♦e. Deux battants situ♦s sur un des grands c♦t♦s du cadre permettent d'introduire les claies dans le s♦choir.

Mat♦riaux: Bois dur et bois tendre, toile plastique en poly♦thyl♦ne transparent, toile en poly♦thyl♦ne noir. tamis en nylon pour les claies et les entr♦es et sorties d'air.



S♦choir cadre NRI

Réalisation: facile. Utilise des matériaux disponibles localement.

Durée de vie: 5 ans et 2 à 3 ans pour la couverture en plastique transparent. Le tamis en nylon des claies représente également un matériel d'usure.

Cout de fabrication: 2 500 FF environ.

Cout d'entretien : 125 FF/an.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Ouganda

Utilisateurs: coopératives, groupements, familles.

Produits séchés: bananes, tomates, ananas, mangues, champignons.

Destination: marché national et exportation en Europe.

Période d'utilisation: toute l'année pour une période effective de 6 à 8 mois/an.

Mode d'utilisation: par fourneau.

| Pays: Ouganda | Saison sèche |
|---|----------------------|
| Températures: minima/maxima, moyenne (°C) 20/30 | |
| Ensoleillement journalier (kWh/m ²) | 4 à 6 |
| Humidité relative: minima/maxima, moyenne (%) | 35/80 |
| Température dans le séchoir (°C) | Gain de 15°C/35 à 45 |
| Consommation spécifique du séchoir (C _s) (kWh/kg d'eau extrait) | 2,1 environ |
| Rendement énergétique global (REG) (%) | 30 |
| Durée d'un cycle de séchage (h) | 36 |
| Débit de produit frais par cycle (kg) | 20 à 35 |

CAPACITÉ DE DIFFUSION

Facteurs favorables

- Réalisation simple.
- Faible coût de fabrication et d'entretien.
- Utilisation simple.
- Protection contre les insectes et les poussières.
- Qualité des produits séchés satisfaisante pouvant convenir à l'exportation.

Facteurs défavorables

- Entretien de la couverture plastique peut poser des problèmes de coût et de disponibilité dans certaines régions.
- Séchage dépendant des conditions climatiques sur le site: ne permet pas de sécher en saison des pluies.
- Paramètres de séchage peu réglables: qualité organoleptique du produit difficilement maîtrisable.
- Séchage solaire direct affectant la qualité du produit (couleur, vitamines).

SYNTHÈSE

- Séchoir solaire direct à vocation artisanale. Convection naturelle. Paramètres de

séchage peu réglables.

- Facilité de construction. Utilise des matériaux locaux.
- Entretien limité au renouvellement de la couverture plastique et du bois des claies: le coût d'entretien est lié à la disponibilité de ces matériaux.
- Efficacité dépendant des conditions climatiques sur le site.
- Peut être utilisé pour une gamme étendue de produits végétaux (fruits et légumes). Qualité obtenue satisfaisante mais difficilement maîtrisable.
- Diffusion en cours.
- Plans, rapports, manuels techniques et économiques disponibles à NRI.

FICHE C: Séchoir coquillage GERES/GRET

USAGE: domestique

ÉNERGIE: séchoir solaire indirect à convection naturelle

RÉFÉRENCES: GRET, GERES

HISTORIQUE

Zone d'implantation: Sénégal, Burkina Faso, Mali

Début d'expérimentation: 1983

Utilisation régulière: depuis 1984

Nombre de séchoirs diffusés (1994): 170 au Sénégal un millier An Burkina Faso

CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

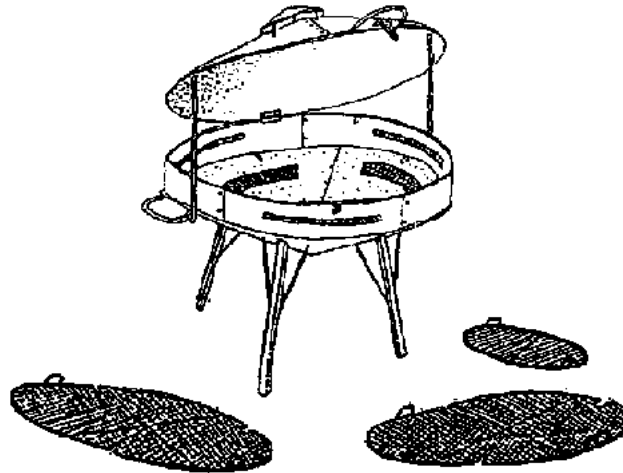
Description générale: Il est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière. Il est conçu pour protéger les aliments des insectes et de la poussière. Diamètre: 70, 90 et 110 cm selon les modèles. Surface de séchage: 0,5; 1,4 ou 2,2 m².

Système d'aération: La circulation d'air par convection naturelle est faible (quelques m³/h). Cela contribue à la montée en température de l'air et à l'efficacité du séchoir en fin de séchage.

Capacité: Environ 5 kg de produit frais/m² de claie en saison sèche soit 2,5 à 10 kg de produit frais selon les modèles de séchoir. La capacité de chargement est réduite par ciel couvert.

Chargement: Opération discontinue ou semi-continue (claie de finition dans le bas du séchoir).

Matériaux: Tôle 10/10, fers de 6 et 8 mm de diamètre et cornières, claie avec tamis en fibre de verre, grillage galvanisé maille fine, peinture noire mate, antirouille.



Schoir coquillage GERES/GRET

Réalisation: Le schoir coquillage est réalisable à partir de matériaux disponibles localement. Toutefois une attention particulière doit être portée au respect précis des plans par les artisans afin de conserver des performances du schoir.

Durée de vie: Matériel robuste: la durée de vie est estimée à dix ans. L'entretien du schoir est très limité: il est lié au renouvellement du tamis des claies et de la peinture noire des toles (doit résister aux UV, couche antirouille recommandée).

Cout de fabrication: de 130 à 440 FF selon la capacité.

Cout d'entretien: 30 FF par an environ.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Burkina Faso

Utilisateurs: familles, coopératives, groupements de femmes.

Produits séchés: fruits (mangues), légumes (tomates, oignons, gombo, légumes feuilles), produits céréaliers (fonio, farine), viandes, poissons.

Destination: autoconsommation et vente locale.

Période d'utilisation: période de production couvrant la saison sèche: de décembre à juin. Utilisation du séchoir en fin de saison pluvieuse pour le séchage des feuilles et du gombo: de septembre à octobre.

| | Saison sèche | |
|---|--------------------------------|---------------------|
| Pays: Burkina Faso. Produit: mangue. | Ciel clair | Ciel nuageux |
| Températures: minima/maxima, moyenne (°C) | 25/33 | |
| Ensoleillement journalier (kWh/m ²) | 6,0 | 4,0 |
| Humidité relative: minima/maxima, moyenne (%) | 15/50 | 40/80 |
| Température dans le séchoir (°C) | Gain de 10 à 20°C
40 à 60°C | |
| Consommation spécifique du séchoir (C _s) (kWh/kg d'eau extrait) | 1,5 | |
| Rendement énergétique global (REG) (%) | 40 | |
| Durée d'un cycle de séchage (h) | 36 | 60 |
| Débit de produit frais par cycle (ka) | 10 | 10 |

CAPACITÉ DE DIFFUSION

Facteurs favorables

- Réalisable à partir de matériaux disponibles localement.
- Fiable et résistant.
- Coût de fabrication et d'entretien peu élevé.
- Le séchoir peut être amorti par une famille rurale en moins d'une saison de séchage.
- Forme très bien acceptée par les utilisatrices.
- Ne nécessite aucune intervention en cours de séchage.
- Peut être utilisé en semi-continu (claire de finition).
- Permet de sécher aussi bien les fruits et légumes que les produits carnés.
- Produits séchés de bonne qualité hygiénique et organoleptique. Pas de poussière ni d'infestation par les insectes..

Facteurs défavorables

- L'efficacité du séchage est fortement liée à la qualité de fabrication et au respect des plans du séchoir: une formation et un suivi temporaire des artisans est souhaitable.
- L'efficacité dépend fortement des conditions climatiques: effet défavorable des nuages, de l'humidité relative de l'air, du vent.

- Paramètres de séchage peu réglables: qualité organoleptique du produit difficilement maîtrisable.

SYNTHESE

- maîtrisable Séchoir solaire indirect a vocation domestique. Convection naturelle. Paramètres de séchage peu réglables. Un de mieux adaptés actuellement au séchage des aliments en zone sahélienne.
- Matériel très robuste. Utilise des matériaux disponibles localement. Entretien très réduit.
- Séchoir accepté et demandé par les populations au Burkina Faso. En cours d'autodiffusion.
- Livre de recette a base de produits séchés. Livret pratique: « Comment sécher vos produits avec le séchoir coquillage? ». Guide de construction et compléments d'information au GERES.

FICHE D: Séchoir banco CEAS/ATESTA

USAGE: artisanal

ÉNERGIE: séchoir solaire direct a convection naturelle

RÉFÉRENCES: CEAS, ATESTA

HISTORIQUE

Zone d'implantation: Burkina Faso
Début d'expérimentation: 1989
Utilisation régulière: depuis 1990
Nombre de séchoirs diffusés (1994): ≈ 50

CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Description générale: Il est constitué d'un bâti en briques de terre stabilisée appelée banco (6,2 x 2,5 m), de 5 arceaux de bois qui surmontent le bâti, d'une couverture en film transparent (14 x 3,4 m) fixée sur les arceaux, de 8 claies de 1,5 m² chacune disposées à environ 1 m du sol sur un même plan horizontal.

La hauteur du séchoir est variable dans le sens de la longueur: 1,90 m pour la plus petite hauteur (avant du séchoir) et 2,40 m pour la plus grande (arrière du séchoir).

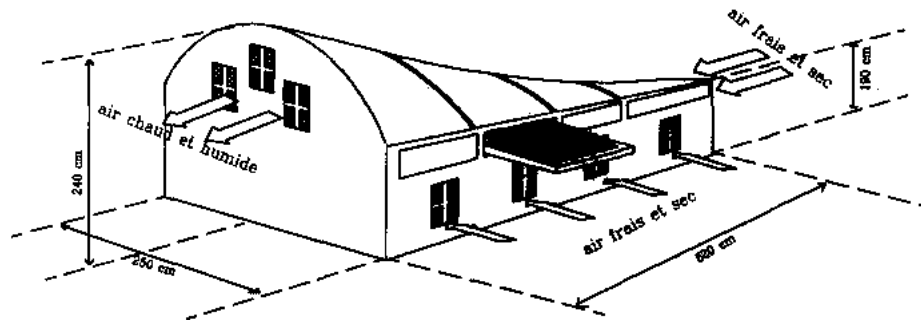
Système d'aération: • Air frais: 4 entrées par l'avant et 4 entrées sur les faces latérales. Elles sont protégées par une grilla en acier galvanisé (maillage fin). • Air humide: une sortie sur l'arrière du séchoir, à 2 m du sol environ.

Débit d'air non ajustage dépendant des conditions climatiques sur le site: entre 100 et 140 m³/h environ.

Capacité: 10 kg de produit frais/m² de claie soit 120 kg de produit frais par séchoir.

Chargement du séchoir: A partir des faces latérales du séchoir. Opération discontinue.

Matériaux: Banco, ciment, acier galvanisé, claies en bois, cardes nylon, tamis en nylon de type moustiquaire.



◆choir banco CEAS/ATESTA

R◆ALISATION: construit avec des mat◆riaux locaux. Couverture plastique de pr◆f◆rence import◆e (dure trois fois plus longtemps que celles fabriqu◆es dans le pays).

DUR◆E DE VIE : plusieurs ann◆es. Renouvellement de la couverture plastique tous les deux ou trois ans. Le tamis en nylon des claies constitue ◆galement une pi◆ce d'usure.

COUT DE FABRICATION : 6 400 FF environ.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Burkina Faso.

Utilisateurs: coop◆ratives, groupements de femmes., « priv◆s ».

Produits s◆ch◆s: mangues.

Destination: exportation en Europe, vente locale.

Période d'utilisation: période de production couvrant la saison sèche (mars-avril) et le début de la saison humide (mai-juin).

Mode d'utilisation: le chargement du séchoir se fait en discontinu. Comme le produit est destiné à l'exportation, un prétraitement au soufre est effectué essentiellement pour éviter le brunissement et le développement de moisissures sur le produit.

| Pays: Burkina Faso.
Produit: mangue. | Saison sèche |
|--|--------------------------------|
| Températures: minima/maxima, moyenne (°C) | 25/40 |
| Ensoleillement journalier (kWh/m ²) | 6,0 |
| Humidité relative: minima/maxima, moyenne (%) | 15/70 |
| Température dans le séchoir (°C) | Gain de 10 à 20°C
40 à 60°C |
| Consommation spécifique du séchoir (Cs) (kWh/kg d'eau extrait) | 2,1 |
| Rendement énergétique global (REG) (%) | 30 |
| Durée d'un cycle de séchage (h) | 36 à 60 |
| Débit de produit frais par cycle (kg) | 120 |

CAPACITÉ DE DIFFUSION

Facteurs favorables

- Réalisable avec des matériaux locaux.
- Les bénéfices dégagés peuvent permettre de rembourser le séchoir au bout de 2

saisons de séchage.

- Coût d'entretien limité.
- La couverture plastique est simplement fixée par des lastiques sur l'armature. Elle peut être enlevée et rangée à l'abri des vents et des pluies dès la fin de la saison de séchage.
- Bien qu'utilisé pour le séchage des mangues, ce séchoir peut convenir à d'autres fruits et au séchage des légumes.
- La qualité des produits séchés est satisfaisante: il n'y a pas de dépôt de poussières, ni d'altérations par les insectes ou par les rongeurs.
- Débit en produits séchés relativement élevé pour un séchoir solaire de ce type.

Facteurs défavorables

- Entretien de la couverture plastique peut poser des problèmes de coût et de disponibilité dans certaines régions.
- Séchage dépendant des conditions climatiques sur le site: ne permet pas de sécher en saison des pluies.
- Paramètres de séchage peu réglables: qualité organoleptique du produit sec difficilement maîtrisable.
- Séchage solaire direct affectant la qualité du produit (couleur, vitamines).

SYNTHESE

- S \diamond choir solaire direct \diamond vocation artisanale. Convection naturelle. Param \diamond tres de s \diamond chage peu r \diamond gulables.
- Facilit \diamond de construction. Utilise en grande partie des mat \diamond riaux locaux. Couverture plastique en g \diamond n \diamond ral import \diamond e (dur \diamond e de vie 2 \diamond 3 fois sup \diamond rieure \diamond celle fabriqu \diamond e dans le pays).
- Entretien pour l'essentiel limit \diamond au renouvellement de la couverture plastique et du bois des claies: le co \diamond t d'entretien est li \diamond \diamond la disponibilit \diamond de ces mat \diamond riaux.
- Efficacit \diamond d \diamond pendant des conditions climatiques: sous des conditions de ciel d \diamond gag \diamond et de faible humidit \diamond relative de l'air, ce s \diamond choir a un bon fonctionnement.
- Peut \diamond tre utilis \diamond pour une gamme \diamond tendue de produits v \diamond g \diamond taux (fruits, l \diamond gumes). Qualit \diamond obtenue satisfaisante mais difficilement ma \diamond trisable.
- Actuellement, la diffusion de ce s \diamond choir n'est plus poursuivie au profit d'un mod \diamond le \diamond armature m \diamond tallique.
- Plans, rapports et compl \diamond ments d'informations disponibles au CEAS.

FICHE E: S \diamond choir solaire tunnel type Hohenheim**USAGE:** domestique **\diamond NERGIE:** s \diamond choir solaire direct \diamond convection forc \diamond e**REFERENCES:** Universit \diamond de Hohenheim

HISTORIQUE

Zone d'implantation: Europe, Afrique, Asie

Début d'expérimentation: 1982

Utilisation régulière: depuis 1990

Nombre de séchoirs diffusés (1994): environ 70

CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Description générale: Une rigole de 10 cm de profondeur est ménagée dans la face supérieure d'une dalle horizontale en béton armé (L*1: 30 x 1,9 m). La dalle est recouverte d'une couche de liège de 20 mm. Sur le liège, il a une autre couche de béton de 10 mm. La rigole est surmontée d'une couverture plastique.

On peut distinguer deux parties distinctes: la zone de chauffe (10 m), en avant de laquelle est placé un ventilateur et la zone de séchage proprement dite (20 m).

Système d'aération: Ventilateur radial (70 W max., 1400 tr/mn). Débit d'air ajustable (0-1 360 m³/h).

- Air frais aspiré, filtré et refoulé vers la zone de chauffe puis de séchage par le ventilateur. L'air circule en dessous et au-dessus du produit.
- Air humide évacué en bout de séchoir au travers d'une moustiquaire métallique.

Zone de chauffe: La rigole est peinte en noir et surmontée d'une feuille de polyéthylène (épaisseur = 0,2 mm) fixée à la dalle grâce à un profilé de serrage. Surface utile de capteur:

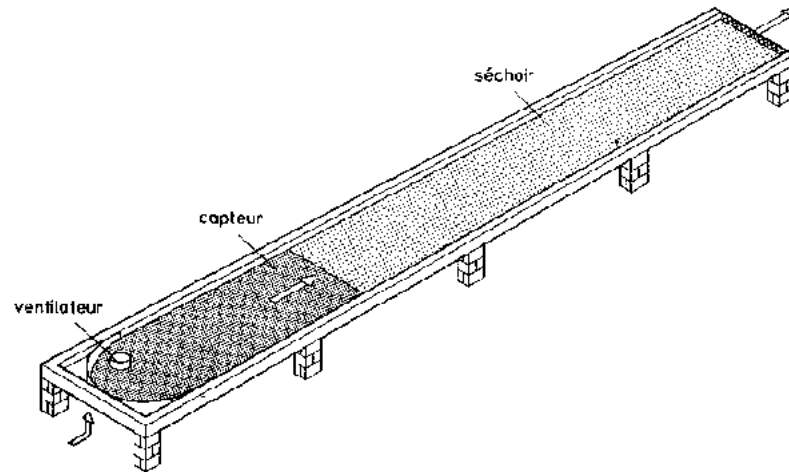
18,6 m².

Zone de séchage: Sur la rigole, des baguettes de 20 x 20 mm permettent de disposer un grillage métallique couvert d'une moustiquaire en nylon. La rigole est surmontée d'une couverture plastique polyéthylène de 0,2 mm fixée d'un côté à la dalle grâce à un profil de serrage, de l'autre côté à un tube d'enroulement avec manivelle. Surface utile de séchage: 40 m².

- Capacité: 15 à 20 kg de produit frais/m² soit 600 à 800 kg au total.

- Chargement: après avoir enroulé la couverture plastique de polyéthylène, le produit est déposé sur la moustiquaire en nylon dans la zone de séchage. Opération discontinue.

Matériaux: Béton, acier (fer en T, fer cornière, tiges...), tôle galvanisée, bois, liège, film plastique en polyéthylène, tamis en nylon.



Séchoir solaire tunnel type Hohenheim

Réalisation: nécessite le travail de trois artisans pendant vingt jours. Ventilateur importé.

Durée de vie: estimée plus de dix ans pour le bâti, deux ou trois ans pour la couverture plastique.

Cout de fabrication: 12 000 FF environ.

Cout d'entretien: 80 FF/an.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Maroc.

Utilisateurs: coopératives, grandes fermes.

Produits sèchés: abricots et raisins.

Destination: exportation en Europe.

Période d'utilisation: mai-juin pour les abricots, septembre-octobre pour les raisins (30 cycles de séchage par an environ).

Mode d'utilisation: le chargement du séchoir se fait en discontinu. Pendant le séchage du raisin, la ventilation est arrêtée la nuit, en phase finale de séchage, afin d'éviter la rehumidification du produit. Comme le produit est destiné à l'exportation, les opérateurs utilisent souvent des prétraitements.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES (suite)

| Pays: Maroc | Abricots | Raisins |
|---|-----------------|----------------|
| Températures: minima/maxima, moyenne (°C) | 15/38 | 10/38 |
| Ensoleillement journalier (kWh/m ²) | 7,7 | 4,2 |
| Humidité relative: minima/maxima, moyenne (%) | 25/80 | 24/100 |
| Température dans le séchoir (°C) | 65 | 60 |
| Débit d'air du ventilateur (m ³ /h) | 1 050 | 900 |
| Puissance du ventilateur: consommation moyenne (kW) | 0,04 | 0,04 |
| Consommation spécifique du séchoir (C _s) (kWh/kg d'eau extrait) | 1,8 | 1,8 |
| Rendement énergétique global (REG) (%) | 35 | 35 |
| Durée d'un cycle de séchage (h) | 48 | 150 |
| Débit de produit frais par cycle (kg) | 600 | 800 |

CAPACITÉ DE DIFFUSION

Facteurs favorables

- Réalisable en grande partie avec des matériaux disponibles localement.. Coût limité de fabrication et d'entretien. Faible consommation électrique du ventilateur.
- Régulation du débit d'air permettant un contrôle partiel de la température de chauffe.
- Convient au séchage de la plupart des fruits et légumes, au séchage des viandes.
- Bonne qualité des produits séchés.
- Bon rendement énergétique.
- Débit élevé de produits pour un séchoir solaire.. Existence de plusieurs modèles de séchoirs.

Facteurs défavorables

- Entretien de la couverture peut poser des problèmes de coût et de disponibilité dans certaines régions.
- Fonctionnement et performances dépendant des conditions climatiques sur le site.
- Séchage solaire direct affectant la qualité du produit (couleur, teneur en vitamines).

SYNTHÈSE

- Séchoir artisanal. Convection forcée. Paramètres de séchage partiellement réglables.

- Construction assez facile nécessitant toutefois une main d'œuvre qualifiée. Ventilateur importé.
- Efficacité dépendant des conditions climatiques sur le site. Bon rendement énergétique par ciel dégagé.. Bonne qualité de séchage.
- Diffusion déjà importante en zone subtropicale. Existence de plusieurs modèles de capacité différente ou utilisant d'autres matériaux.
- Plans, rapports et compléments d'informations à l'Université de Hohenheim.

FICHE F: Séchoir toiture à crics GERES

USAGE: artisanal

ÉNERGIE: séchoir solaire indirect à convection forcée

RÉFÉRENCES: GERES

HISTORIQUE

Zone d'implantation: Mali

Début d'expérimentation: 1986

Utilisation régulière: 1989

Nombre de séchoirs diffusés (1994): 1

CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Le séchoir solaire comporte:

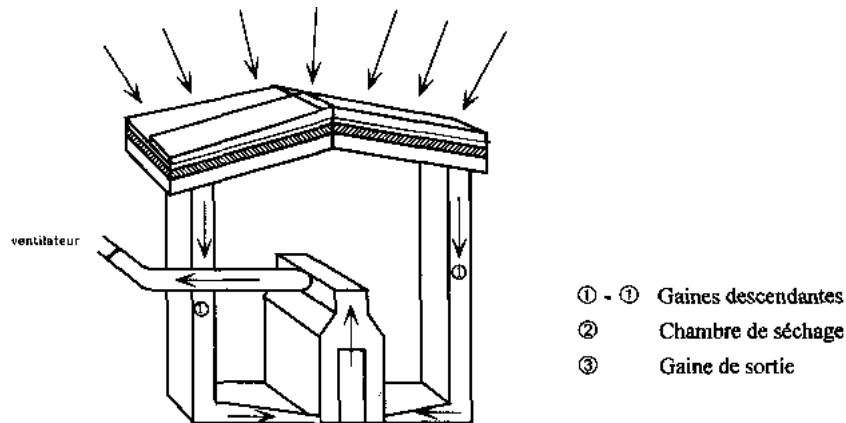
Une zone de chauffe constituée d'une toiture solaire à air adaptée au bâtiment existant. Elle est composée, depuis la face extérieure du toit: d'un absorbeur en tôle galvanisée ondulée, d'une couche d'air circulant (8 cm d'épaisseur), d'une tôle ondulée galvanisée, isolée en sous-face par de la mousse phénolique (2 cm d'épaisseur). La surface de captation est de 85 m².

Une chambre de séchage constituée en tôle 10/10, recouverte d'un isolant en plaque d'épaisseur 2 cm. 6 chariots comportant 20 claies de séchage peuvent y être introduits ce qui représente une surface de séchage de 60 m². Dimensions intérieures L*1*h: 1,95 x 1,65 x 2,90 m.

Capacité journalière: 5,5 kg de craie humide/m² de claie soit 330 kg au total.

Un système d'aération par ventilation forcée: Aspiration de l'air humide du séchoir par un ventilateur double débit piloté manuellement (3 kW max., 4 000 ou 8 000 m³/h) et situé à l'extérieur.

Vitesse de circulation d'air: 1 m/s   l'entrée du séchoir, 6 m/s   la sortie.



◆ choix toiture ◆ cries GERES

R◆ALISATION: n◆cessite les comp◆tences d'une entreprise locale exp◆riment◆e dans la r◆alisation de toitures m◆talliques.

DUR◆E DE VIE: le s◆choir est toujours en service.

COUT DE FABRICATION: en 1987: 120 000 FF environ, dont 95 000 FF de mat◆riaux et travaux locaux (capteur toiture ◆ 80 FF/m²) et 21 000 F d'◆quipements import◆s (ventilateur, isolation thermique).

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Utilisateurs: Union malienne des aveugles.

Produits s◆ch◆s: craies (b◆tons).

Destination: marché national.

Période d'utilisation: toute l'année y compris pendant la saison des pluies.

Mode d'utilisation: le chargement du séchoir se fait 9 heures le matin en une seule fois. Le ventilateur est arrêté en fin de journée. En saison des pluies, un séchage en un jour peut être difficile: soit on achève le séchage le lendemain matin, soit on introduit moins de craies sécher.

Remarque: le faible rendement énergétique global peu élevé s'explique par le choix d'un capteur toiture rustique et bon marché. Le rendement d'un tel capteur est environ 30 % moins élevé que celui de capteur-toitures performants. La légitimité d'un tel choix est économique et pratique: coût trois quatre fois plus faible, entretien limité.

| | |
|---|-----------------|
| Pays: Mali. | Produit: craie |
| Températures: minima/maxima, moyenne (°C) | [17-26] [32-40] |
| Ensoleillement journalier (kWh/m ²) | [5-6] |
| Humidité relative: minima/maxima, moyenne (%) | [12-60] [40-90] |
| Température dans le séchoir (°C) | [50-60] |
| Débit d'air du ventilateur (m ³ /h) | 8 000 |
| Puissance du ventilateur (consommation moyenne) (kW) | 2,2 |
| Consommation spécifique du séchoir (C _s) (kWh/kg d'eau extrait) | 3* |
| Rendement énergétique global (REG) (%) | 20 |
| Durée d'un cycle de séchage (h) | 9 |
| Débit de produit frais par cycle (kg) | 330 |

* dont 4 % environ en électricité.

CAPACITÉ DE DIFFUSION

Facteurs favorables

- Entretien limité et coût de fabrication pouvant être amorti en un an.
- Régulation partielle de l'humidité dans le séchoir.. Adaptable au séchage des produits alimentaires (un séchoir fonctionne à la Barbade depuis 1985).. Bonne qualité de séchage.
- Séchage solaire indirect préservant mieux la qualité du produit (couleur, teneur en vitamines).

Facteurs défavorables

- Réalisation pouvant s'avérer délicate.
- Investissement de départ très important.
- Fonctionnement et performances dépendant des conditions climatiques sur le site.

SYNTHÈSE

- Séchoir solaire à vocation artisanale. Convection forcée. Régulation partielle des paramètres de séchage.
- Réalisation nécessitant un savoir-faire dans la pose des toitures métalliques. Utilise en majeure partie des matériaux locaux. Ventilateur importé.. Fonctionnement dépendant

des conditions climatiques.. Diffusion limitée.

- Plans, rapports et compléments d'informations disponibles au GERES.

FICHE G: Séchoir gaz type armoire CEAS

USAGE: artisanal

ÉNERGIE: séchoir gaz convention naturelle

RÉFÉRENCES: CEAS

HISTORIQUE

Zone d'implantation: Burkina Faso

Début d'expérimentation: 1992

Utilisation régulière: depuis 1992

Nombre de séchoirs diffusés (1994): environ 30 au Burkina Faso

CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Description générale: Le séchoir est constitué par un bâti en briques (dimensions L*1*h: 2,3 x 1,1 x 2,2); deux cellules de séchage concomitantes, pourvues chacune d'une entrée d'air, d'un brûleur et d'une gaine de séchage recevant 10 claies de 0,7 m² chacune.

Système de chauffe: Brûleur domestique rampe.

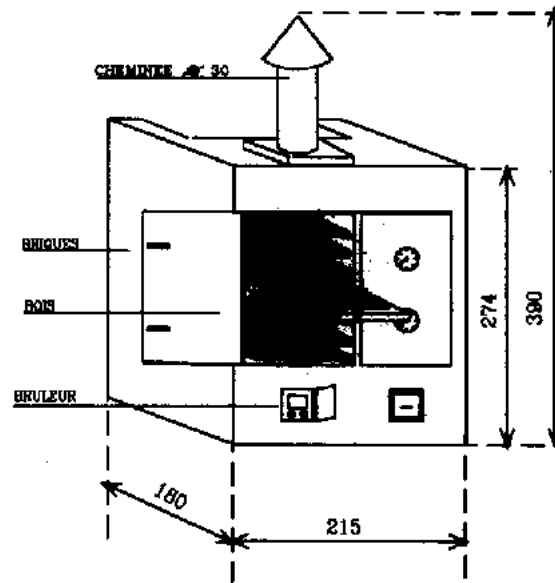
Système d'aération: Entrée d'air par le bas, l'avant du séchoir. Débit d'air ajustable: 250 m

³/h maximal.

Capacit : 6,5 kg de produits frais/m² de claie soit 46 kg de produits frais par cellule.

Chargement du s : Frontal, apr s ouverture de la porte d'acc s la gaine de s chage. Op ration discontinue.

Mat : Banco, acier, claie en bois avec tamis en corde ou de type moustiquaire.



S

Réalisation: peut facilement être construit en fonction de la disponibilité locale des matériaux.

Durée de vie: inconnue mais matériel solide. La moustiquaire des claies doit être changée tous les ans environ.

Cout de fabrication: 4 000 FF environ.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Burkina Faso.

Utilisateurs: coopératives, groupements de femmes, << privés >>.

Produits sèches: fruits (surtout des mangues), légumes (oignons, gombo).

Destination: exportation en Europe, vente locale.

Période d'utilisation: période de production couvrant la saison sèche (décembre-avril) et le début de la saison humide (mai-septembre).

Mode d'utilisation: le chargement du séchoir se fait en discontinu. Comme le produit est destiné à l'exportation, un traitement au soufre est effectué essentiellement pour éviter le brunissement et le développement de moisissures sur le produit.

| Produit: mangues | Saison humide |
|---|-----------------|
| Températures: minima/maxima, moyenne (°C) | [24-28] [31-39] |
| Humidité relative: minima/maxima, moyenne (%) | [32-60] [60-95] |
| Température dans le séchoir (°C) | 60 - 65 |

| | |
|---|-----------------|
| Consommation spécifique du séchoir (C_s) (kWh/kg d'eau extrait) | 1,8 à 2,2 |
| Rendement énergétique global (REG) (%) | 30 à 35 |
| Durée d'un cycle de séchage (h) | 18 |
| Débit de produit frais par cycle (kg/cycle) | 46 x 2 cellules |

CAPACITÉ DE DIFFUSION

Facteurs favorables

- Facilement réalisable, utilise des matériaux locaux.
- Faible coût de fabrication et d'entretien.
- Régulation du séchage à deux niveaux: entrée d'air frais et brûleur.
- L'emploi de gaz permet de sécher même en saison humide.
- Utilisation facile pour une vaste gamme de produits: produits végétaux (fruits, légumes) ou animaux (viandes, poissons).
- Qualité de produit séché satisfaisante: pas de poussière, pas d'altération par les insectes ou les rongeurs. Le séchage en moins de 24 heures limite le risque microbien.

Facteurs défavorables

- Existence de passages préférentiels d'air sur les côtés de la cellule de séchage entraînant une hétérogénéité de séchage.
- Ce problème a été limité grâce à l'installation d'un système de chicanes pour forcer le passage de l'air.

SYNTHESE

- Séchoir à gaz à vocation artisanale. Convection naturelle. Régulation possible des paramètres de séchage (réglage de l'entrée d'air, du débit de gaz).
- Facilité de construction. Utilise des matériaux locaux.
- Entretien limité au renouvellement des claies.
- Fonctionnement peu dépendant des conditions climatiques mais lié à la disponibilité et au coût du gaz.
- Gamme étendue de produits pouvant être séchés (produits animaux et produits végétaux).
- Diffusion en cours. Un séchoir mixte solaire-gaz avec échangeur est en voie de réalisation.
- Plans, rapports et compléments d'informations disponibles au CEAS

FICHE H: Séchoir semi-continu ITDG**USAGE:** artisanal**ÉNERGIE:** séchoir au gaz ou au fioul   convention forcée**RÉFÉRENCES:** ITDG

HISTORIQUE

Zone d'implantation: Amérique latine (Pérou, Colombie, Cuba...), Asie (Inde, Bangladesh...)
Nombre de séchoirs diffusés (1994): 60 à 80

CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Description générale: Le séchoir est composé :

- d'une cellule de séchage en acier non oxydable (dimensions L*1*h = 140 x 120 x 220 cm) recevant 15 claies de 0,8 m² chacune. Elle est conçue de manière à pouvoir charger et retirer les claies en semi-continu;
- d'un système de chauffage et de ventilation.

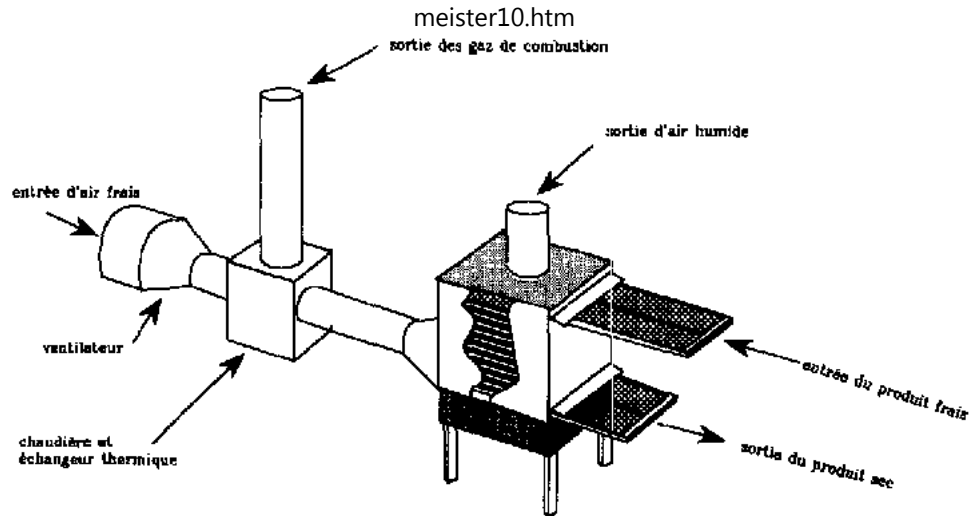
Système de chauffe: Brûleur au gaz ou au fioul de puissance maximale 60 kW. L'air frais est chauffé par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur dans le cas d'un chauffage au fioul.

Système d'aération: Entrée d'air chaud par le bas, à l'arrière de la cellule. Débit d'air fixe à 2 800 m³/h.

Capacité: 3,75 kg de produit frais/m² de claie soit 45 kg de produit frais par cellule.

Approvisionnement du séchoir: Frontal. Une par une, les claies sont introduites par le haut de la cellule de séchage et retirées par le bas après séchage. Opération semi-continue: une claie toutes les 12 minutes environ.

Matériaux: Plaques et barres d'acier galvanisé, bois dur et bois tendre, claies en bois dur avec tamis en nylon (mailles fines).



Séchoir semi-continu ITDG

RÉALISATION: délicate, réalisable en partie selon la disponibilité des matériaux et le savoir-faire technique local.

DURÉE DE VIE: inconnue mais matériel solide. La moustiquaire des claies doit être changée tous les ans environ.

COÛT DE FABRICATION: 30 000 FF environ.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Guatemala.

Utilisateurs: petits producteurs ou groupes de producteurs.

Produits sèchés: fruits, légumes, plantes aromatiques et médicinales.

Destination: marché local et national.

Mode d'utilisation: semi-continu.

| Produit: plantes aromatiques/ médicinales | |
|---|---------|
| Température moyenne (°C) | 18 |
| Humidité relative moyenne (%) | 60 |
| Température dans le séchoir (°C) | 50-55 |
| Consommation spécifique du séchoir (C _s) (kWh/kg d'eau extrait) | > 2,4 * |
| Rendement énergétique global (REG) (%) | 26 |
| Temps de passage moyen du produit (h) | 3 à 4 |
| Débit moyen de produit frais par heure (kg/h) | 20 |

* Consommation du ventilateur inconnue.

CAPACITÉ DE DIFFUSION

Facteurs favorables

- Régulation de la température de séchage au niveau du brûleur: permet de sécher en saison humide et d'adapter la température de chauffe au produit séché.
- Permet de sécher une vaste gamme de produits végétaux (fruits, légumes, plantes aromatiques...). Peut être envisagé pour le séchage de viandes ou de poissons.
- Très bonne qualité hygiénique des produits séchés: pas de poussières, pas

d'altérations par les insectes ou les rongeurs, développement microbien très vite empêché.

- Bonne homogénéité des caractéristiques organoleptiques des produits séchés.

Facteurs défavorables

- Construction plus difficile que la plupart des séchoirs fonctionnant en discontinu.
- Investissement de départ assez important.
- Peut être inadapté au contexte car il nécessite: un approvisionnement régulier et important du séchoir en matières premières, de bonnes capacités techniques pour conduire et entretenir le séchoir, une capacité à la gestion de l'activité.

SYNTHÈSE

- Séchoir à gaz à vocation artisanale. Convection forcée. Régulation des paramètres de séchage.
- Construction assez facile. Ventilateur et système de chauffe en général importés. Utilisation supposant une bonne capacité à gérer l'unité de séchage.
- Peu dépendant des conditions climatiques mais utilisation liée à la disponibilité et au coût d'une énergie fossile (gaz, fioul).
- Gamme étendue de produits pouvant être séchés. Bonne qualité du produit sec. Accès au marché des produits biologiques (non traités).

- Nombre assez important de séchoirs déjà fabriqués et diffusion plus large en cours.
- Plans, rapports et compléments d'information disponibles chez ITDG.

FICHE 1: Séchoir tunnel gaz type Cartier

USAGE: artisanal

ÉNERGIE: séchoir gaz convention forcée

RÉFÉRENCES: GERES

HISTORIQUE

Zone d'implantation: Europe, Turquie, Afrique

Début d'expérimentation: 30 ans en Europe, 1985 en Afrique

Utilisation régulière: depuis sa création

CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

Description générale: Le séchoir est composé :

- d'un bâti en briques cuites (L *1* h: 4,6 x 2,2 x 2 m). Les briques du toit sont soutenues par des barres métalliques en T de 5 x 2,4 cm;
- d'une cloison intérieure en briques cuites permettant la circulation de l'air en boucle et délimitant deux couloirs: un couloir dans lequel l'air est chauffé puis propulsé et un couloir pouvant recevoir 2 chariots de 32 claies chacun pour le séchage des produits.

Système de chauffe: Un brûleur torche (puissance moyenne: 40 kW) incorporé dans un foyer avec pare-flamme.

Système d'aération: Il est constitué de:

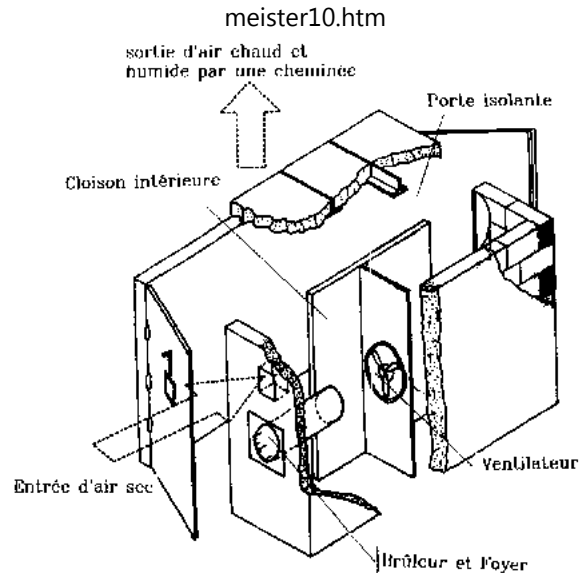
- 1 moteur électrique (220 V, triphasé);
- 1 ventilateur tripale (1 500 tours/mn, 8 000 m³/h) relié au moteur par une courroie;
- 1 trappe d'entrée d'air frais ouverture modulable pour contrôler le taux de recyclage de l'air et d'humidité dans le séchoir;
- 1 conduit de sortie d'air humide par le toit.

Système de contrôle et de régulation: Le séchoir est conçu de manière à assurer la sécurité de l'installation (contrôle de flamme, protection électrique, etc.) et la régulation des paramètres de séchage (régulation automatique de la température, contrôle de l'humidité dans le séchoir).

Capacité: 1 à 2 chariots de 32 claies chacun. 8 kg de produit frais/m² de claie soit 130 kg de produits frais par chariot.

Approvisionnement du séchoir: Par fourniture ou en semi-continu.

Matériaux: Bâti et portes: briques cuites, ciment, fers en T, tôles plates de 2 mm d'épaisseur, fers carrés de 3 cm de côté, isolant. Chariots: roulettes folles, fers cornière et fers plats de 2 cm. Claies: bois dur pour le cadre, moustiquaire nylon ou en acier non oxydable pour le tamis



◆choir tunnel ◆ gaz type Cartier

R◆ALISATION: assez facile. Un respect scrupuleux des plans par un ma◆on comp◆tent est indispensable. Syst◆me de ventilation et de chauffe en g◆n◆ral import◆s.

DUR◆E DE VIE: plusieurs dizaines d'ann◆es pour le b◆ti, les syst◆mes de chauffe et de ventilation. Le tamis des claies repr◆sente le mat◆riel d'usure.

COUT DE FABRICATION: 65 000 FF dont 38 000 FF de mat◆riel import◆.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Burkina Faso.

Utilisateurs: coopérative.

Produits séchés: mangue, papaye, banane.

Destination: marché national et exportation en Europe.

Période d'utilisation: d'avril à octobre pour les mangues.

Mode d'utilisation: par fourneaux. Aucun prétraitement n'est actuellement employé lors du séchage des mangues.

Produit: mangues

| | |
|---|-------|
| Température moyenne (°C) | 25-34 |
| Humidité relative moyenne (%) | 60-98 |
| Température dans le séchoir (°C) | 50-70 |
| Consommation spécifique du séchoir (C_s) (kWh/kg d'eau extrait) | 1,5 * |
| Rendement énergétique global (REG) (%) | 40 |
| Temps de passage moyen du produit (h) | 18 |
| Débit moyen de produit frais par heure (kg/h) | 8 |

* Dont 0,25 kWh/kg d'eau extrait dus à la consommation du ventilateur.

CAPACITÉ DE DIFFUSION

Facteurs favorables

- Entretien limité. Durée de vie de plusieurs dizaines d'années.
- Régulation et contrôle des paramètres de séchage: température, hygrométrie. Le débit d'air peut être ajusté.
- Manipulation simple du séchoir. Souplesse d'utilisation (par fourne ou en semi-continu, co-courant ou contre-courant).
- Convient au séchage des fruits, des légumes, des viandes et des poissons.
- Homogénéité du séchage. Produits séchés de très bonne qualité, même sans prétraitement.
- Très bon rendement énergétique.
- Débit élevé de produits.
- Le séchoir peut servir à pasteuriser des produits séchés à humidité intermédiaire (30-35 %).
- Existence de plusieurs modèles de séchoirs (capacité différente, utilisation du fioul...).

Facteurs défavorables

- Investissement de départ important.
- Peut être inadapté au contexte car il nécessite:
 - un approvisionnement régulier et important du séchoir en matières premières;
 - de bonnes capacités techniques pour conduire et entretenir le séchoir;

- une capacité de la gestion de l'activité.

SYNTHÈSE

- Séchoir à gaz à vocation artisanale. Convection forcée. Régulation des paramètres de séchage.
- Construction assez simple. Utilise en partie des matériaux disponibles localement. Brûleur, système de ventilation et de régulation en général importés.
- Fonctionnement indépendant des conditions climatiques mais utilisation liée à la disponibilité et au coût du gaz.
- Permet de sécher à débit élevé la plupart des produits alimentaires. Très bonne qualité de séchage.
- Séchoir déjà largement diffusé dans le pourtour méditerranéen. Diffusion en cours en Afrique.
- Plans, rapports et compléments d'informations disponibles au GERES.

Chapitre VII: Conduire une activité de séchage

Les chapitres précédents nous ont permis de cerner les différents éléments techniques à prendre en compte pour la mise en place d'une activité de séchage qu'elle soit de dimension domestique, artisanale ou semi-industrielle.

Après ces étapes de diagnostic pour choisir et dimensionner l'outil de séchage, il reste concevoir et dimensionner les équipements annexes ainsi que les locaux en correspondance. Des règles d'hygiène, de fonctionnalité, de situation géographique sont alors prendre en compte. Il faut aussi s'attacher gérer correctement une unité de séchage pour assurer la pérennité de la nouvelle structure avec les emplois ainsi générés. Ces éléments vont intervenir dans le calcul de la rentabilité économique de l'activité, et doivent donc être appréhendés au préalable

Nous allons donc aborder maintenant les aspects relatifs à la conduite d'une unité de séchage.

Pour une activité domestique destinée essentiellement à l'autoconsommation et au marché de proximité, le problème sera surtout de bien s'organiser pour parvenir à sécher le stock des produits frais suivant les impératifs journaliers (excédents non vendus en frais au marché, produits récemment récoltés...). Il s'agira aussi d'améliorer la qualité du produit (propreté, qualité nutritionnelle, conservation...).

Pour une unité artisanale ou semi-industrielle, il faut optimiser la fonctionnalité du système, c'est-à-dire adapter l'organisation des bâtiments, le rythme du travail, le respect des délais, des quantités et de la qualité en accord avec l'attente du marché potentiel (respect des commandes, maximisation de la productivité...). Les recommandations de ce chapitre s'adresse particulièrement à ce niveau d'activité. Elles ont été distinguées en deux parties: concevoir et dimensionner les infrastructures d'une unité de séchage, et gérer les différentes étapes de production et de commercialisation.

La définition préalable de l'outil de séchage et de la filière de transformation dans lequel il s'inscrit sous-entend la connaissance du processus (procédé) de séchage en soi. Mais ce n'est pas la seule étape du processus complet. Quel que soit le produit et le type de séchoir envisagés, il faudra toujours concevoir et gérer les étapes amont (avant

séchage) et les étapes aval (après séchage).

étapes amont

LE TRI DES PRODUITS FRAIS

Cette opération constitue la première intervention au sein de l'unité après l'arrivée de la matière première. Elle peut se décomposer en deux étapes:

- la première à l'arrivée de la matière première et avant le stockage initial, en fonction de différents critères (variétés, calibres, degré de maturité...);**
- la deuxième au moment du déstockage qui écarte les produits inexploitable pour la transformation, souvent cause du pourrissement.**

Pour les niveaux de production envisagés (artisanal et semi-industriel), cette opération est essentiellement manuelle. Le poste de travail correspondant reste donc une activité humaine qui demande une formation précise en rapport au cahier des charges du produit, et une rigueur constante. Une erreur de tri se répercute sur chaque étape ultérieure avec une baisse de qualité et une perte de temps. En particulier, un produit altéré et soumis au pourrissement peut contaminer ses voisins, lors du stockage avant séchage, et éventuellement pendant et après le séchage.

Des critères simples de détermination de l'état de fraîcheur seront adoptés.

LE LAVAGE DES PRODUITS

Le lavage est nécessaire, quel que soit le produit à sécher, afin de garantir une hygiène constante pour limiter tout développement de micro-organismes. Une eau de lavage chlorée (dosage de 100 ppm) est préconisée avec un trempage de quelques minutes suivi

d'un rinçage de l'eau propre.

LA PRÉPARATION DES PRODUITS

Suivant le produit à traiter, il existe une grande diversité de préparations. Elles sont souvent rattachées aux usages et goûts locaux. Un compromis est recherché entre la présentation finale et la facilité de séchage (épaisseur minimale, grande surface exposée à l'air dentraînement, simplicité de disposition dans la chambre de séchage...).

Au cours de cette opération, trois facteurs sont à prendre en compte:

- l'hygiène;**
- le taux de déchets;**
- l'homogénéité de la préparation.**

Le produit étant mis à nu, débarrassé généralement de sa peau protectrice, il est alors très sensible à l'altération microbienne.

Outre la propreté des outils et supports mis en œuvre, la rapidité et la précision sont de rigueur afin de limiter les risques de perte par dégradation du produit, soit parce que le temps d'attente avant l'enclayage aura été trop long, soit parce que le produit n'aura pas été suffisamment nettoyé (restes de peau, de saletés...), soit parce que l'eau utilisée était elle-même infestée.

Le responsable a le choix entre un fort recours à la main-d'œuvre pour limiter les charges d'investissement et la compétence des employés requise, ou le recours à une unité de parage très mécanisée pour accroître la productivité de l'opération. Le deuxième choix

est rarement opportun dans les pays en développement compte tenu d'un coût salarial réduit et du fait que, pour certains produits tropicaux, il n'existe pas encore d'outillage de parage (découpe) automatisé.

Néanmoins, le personnel chargé de la préparation devra disposer d'outillage simple, robuste et adapté :

- couteaux aiguisés et adaptés à écorcher la peau (type économe, Gaudillet), en acier inoxydable;
- tambours rotatifs de pelage pour produits non meurtrissables (pommes de terre, carottes...);
- instruments de découpe (tranchoirs, fils à découper, tamis...).

LE PRÉTRAITEMENT DU PRODUIT À SÉCHER

Le prétraitement représente un intérêt notable, même pour des activités de séchage traditionnel de taille modeste, et mérite qu'on lui consacre une place importante. Il permet de modifier la structure du produit en vue de faciliter le séchage, d'éviter la contamination microbienne avant et en première (voire deuxième) phase de séchage (forte activité de l'eau), de limiter les réactions biochimiques ultérieures.

Le cahier des charges du produit fini imposera le type de pré-traitement. Bien sûr, s'il s'agit d'aborder le marché avec un label « produit écologique », tout prétraitement sera limité à l'usage de produits naturels (vinaigre, jus de citron, blanchiment à l'eau simple, salage, sucrage...). Ces produits étant généralement moins efficaces que les produits chimiques, il faudra alors être d'autant plus vigilant sur l'hygiène et la rapidité de séchage. Après une phase d'expérimentation, cette étape permet de proposer une gamme variée de produits et d'affiner les paramètres du séchage. Comme le séchage lui-

même, elle apporte une réponse pour améliorer la conservation et la qualité finale du produit fini.

Généralités

On n'abordera ici que les traitements ayant pour but la conservation du produit, soit en augmentant sa durée de conservation, soit en limitant la durée du séchage. Le tableau de la page suivante en donne un aperçu.

Les composés de nature chimique peuvent être utilisés par fumigation, saupoudrage, trempage en solution plus ou moins concentrée. Chaque procédé a ses avantages et ses inconvénients:

- **le saupoudrage, bien que très facile à réaliser, est, si possible, à éviter: il nécessite de plus grandes quantités de composés pour un résultat au mieux équivalent;**
- **le trempage de l'aliment dans une solution diluée en additif permet de contrôler la quantité de composé qui se dépose sur le produit. Il permet également une adsorption homogène de l'additif donc une plus grande efficacité de ce dernier. Cependant, cette méthode nécessite une eau propre et une connaissance de la cinétique d'adsorption du composé sur l'aliment concerné;**
- **la fumigation est facile à réaliser mais elle peut poser des problèmes de dosage de la quantité d'additif à utiliser et des problèmes d'adsorption homogène du composé sur l'aliment.**

| | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| PROCÉDÉS
ET COMPOSÉS | Développement
microbien | Oxydation
des
lipides | Réactions
de
Maillard | Brunissement
enzymatique | Diminution
de l'Aw | Autres effets |
|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------|

| | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|---------------------------------------|
| Blanchiment | --- (B, L, M)* | | | | | séchage ultérieur plus rapide |
| Fumage | -- (B, L, M) | -- | | | | |
| Fermentation | -- (1) (B, L, M) | -- | | | | produits carnés |
| NaCl (salage) | -- (B, L, M) | + | | - | +++ | risque de réhumidification du produit |
| Sucrage | --- (4) (B, L, M) | | +++ | | +++ | risque de réhumidification du produit |
| SO₂ et sulfite | -- (B, M) | -- | -- | - | + | |
| Phosphates | -- | --- | | - | + | augmente la tendreté |
| Acide acétique (vinaigre) | --- (B, L) | | + | - | + | diminue le pH |
| Acide propinique | ---(M) | | + | - | + | diminue le pH |
| Acide sorbique | ---(B, L) | | + | - | + | diminue le pH |
| Acide citrique | - | - | + | | | diminue le pH |
| | en svneraie | en | + | --- | + | |

| | | | | | | |
|-------------------------|-----------|----------|---|-----|---|---------------|
| | | synergie | | | | |
| Acide ascorbique | ---(M, L) | - | + | --- | + | diminue le pH |

- limite faiblement

-- limite

--- limite fortement

+ favorise faiblement

++ favorise

+++ favorise fortement

M = moisissures

L = levures

B = bactéries

(1) La fermentation favorise le développement d'espèces microbiennes utiles et limite le développement des espèces indésirables.

(2) Pour le salage des produits carnés sensibles à l'oxydation des lipides, utiliser un sel le plus pur possible (NaCl), et éviter le gros sel marin.

(3) Le brunissement enzymatique des fruits est limité par trempage dans un bain d'eau légèrement salé.

(4) Le sucrage limite le développement microbien en abaissant l'activité de l'eau du produit. Il faut pour cela utiliser des doses suffisamment élevées de sucre sous peine de favoriser au contraire le développement des micro-organismes (voir paragraphe cet effet).

Le choix du conservateur doit donc être fonction:

- de chaque aliment et des altérations qui vont être susceptibles de limiter sa conservation. va pas utiliser d'antioxydant pour sécher des haricots verts car l'oxydation des lipides n'est pas un facteur limitant pour la conservation de ce produit;
- des conditions de stockage et de la durée de conservation désirée;
- de son efficacité;
- de sa facilité d'emploi dans un contexte socio-économique donné;
- de sa toxicité (1).

(1) Certains composés ou traitements d'emploi délicat et pouvant menacer directement la santé humaine ont volontairement été omis (nitrates, antioxydants de synthèse...).

Parfois, certains conservateurs peuvent avoir une action complémentaire ou synergique. Dans tous les cas, pour chaque conservateur et pour chaque produit, il est nécessaire de connaître avec précision le contexte et les limites d'emploi du conservateur (consulter les normes officielles).

Quelques traitements couramment employés

Le blanchiment

Le blanchiment ou pré-cuisson (surtout pour les légumes et les viandes) permet d'attendrir les produits, d'en fixer les couleurs, d'éliminer les gaz intercellulaires responsables de réactions d'oxydation et de détruire les enzymes pouvant provoquer des détériorations. Le blanchiment à l'eau bouillante, plus simple, est préférable au blanchiment à la vapeur. L'incorporation future ou simultanée d'additifs est favorisée. Ainsi l'eau peut être additionnée de soufre sous forme de sel de métabisulfite de potassium (5 g/l) ou d'acide citrique (3 g/l).

La sulfuration

Elle est utilisée pour les fruits et légumes. Elle est surtout employée pour favoriser la conservation de la couleur du produit en limitant le brunissement. Elle a également une action anti-microbienne. Après séchage, la teneur en soufre résiduelle dans le produit ne doit pas dépasser 1000 ppm (en partie par million soit 1 g/kg de produit sec). Le soufrage peut se faire soit par fumigation, soit par trempage.

- **Le soufrage fumigation:**

Le principe consiste à brûler du soufre solide (en poudre) dont les fumées vont imprégner la surface des produits à sécher. Pour cela, on dispose les produits frais découpés dans une enceinte (souffoir) qui doit être hermétique, une fois la combustion entamée. En moyenne, un dosage de 5 à 6 g de SO₂/kg de produit frais permet une imprégnation de 700 à 900 ppm de soufre par kg de produit sec en 2/3 heures.

Pour chaque cycle, il faut doser précisément la quantité de soufre en fonction de la masse de produits frais et du type de produit. Le dosage approximatif et systématique de la petite cuillère souvent préconisé pour sa simplicité est à proscrire.

La fumigation a pour principal inconvénient de ne pas donner une imprégnation homogène du soufre sur le produit. Elle a toutefois l'avantage d'être facile à mettre en œuvre, de se faire par voie sèche pour un coût relativement faible.

- **Le soufrage par trempage au métabisulfite:**

Le trempage des produits en solution à base de soufre est une alternative à la méthode précédente. Il s'agit de tremper un lot de produits pendant 10 à 30 minutes dans une solution aqueuse concentrée en métabisulfite de potassium ou de sodium de 3 à 9 g/l (1g/l de $K_2S_2O_5$ équivaut à 500 ppm SO_2 1 g/l de $Na_2S_2O_5$ équivaut à 660 ppm de SO_2)

Cette méthode permet une grande souplesse d'utilisation en faisant varier les ratios concentration/temps d'immersion et volume de solution/masse de produit frais. Elle a l'avantage d'une imprégnation homogène.

L'immersion en solution peut paraître paradoxale avant le séchage des produits, mais elle permet de travailler en semi-continu avec la chaîne de découpe, ce qui évite l'attente à l'air libre. L'ajout d'acide citrique à 3 g/l (1 gr équivaut à 20 ml de jus de citron) a un effet synergique avec le métabisulfite. Pour éviter la fuite de substances du produit, on peut ajouter du sucre ou du sel à la solution.

Le sucrage par trempage

Pour les fruits, il existe une technique qui consiste à tremper les produits dans une solution fortement concentrée en sucre. La différence de concentration entre les deux milieux provoque une migration de l'eau vers la phase la plus concentrée, en l'occurrence du produit vers l'eau sucrée. On obtient ainsi une déshydratation du produit accompagnée d'un sucrage. Ainsi la pomme trempée pendant 6 heures à 50°C dans une

solution sucrée (60 g de sucre/100 g de solution) permet:

- d'enlever 40 g d'eau par 100 g de produit frais;
- de sucrer le produit à raison de 10 g de sucre en plus par 100 g de produit frais.

Ce procédé est très utilisé en Asie du Sud-Est pour les fruits semi-confits mais il nécessite un blanchiment préalable. En Afrique, plusieurs contraintes limitent l'utilisation de ce procédé à l'échelle artisanale. Le coût du sucre est parfois élevé et oblige à un recyclage des sirops dont la gestion est souvent difficile (stockage au froid, inversion du saccharose).

Le salage pour les viandes et les poissons

Il empêche, par diminution de l'activité de l'eau du produit, la prolifération microbienne. Deux méthodes de salage sont possibles: en saumure ou à sec.

- Le salage en saumure:

Le produit est plongé dans l'eau salée (environ 100 g de sel/litre) pendant une durée de plusieurs jours qui dépend du produit.

- Le salage à sec:

Le produit est frotté et recouvert de sel. Il est ainsi protégé de l'air ambiant par une enveloppe. L'action du sel est plus lente qu'en saumure car il n'agit qu'après dissolution dans l'eau exsudée par le produit. Avant le séchage, il faut retirer l'excès de sel.

Le fumage pour les viandes et les poissons

Il permet un séchage par entraînement et une action spécifique de la fumée par la

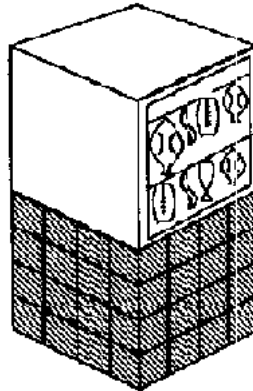
production de composés antiseptiques, d'arômes et de couleurs particuliers. Le fumage peut se faire à chaud ou à froid.

- Le fumage à chaud:

Température des fumées: entre 60 et 100° C. Dans ces conditions, les produits subissent également une cuisson. Ce procédé relativement violent provoque une certaine dénaturation des protéines et la destruction de quelques vitamines.

- Le fumage à froid:

Température des fumées: inférieure à 30° C. La perte en eau est moins importante que dans le cas du fumage à chaud et la conservation des produits ne dépasse pas une semaine. Ce procédé évite le croûtage et permet une bonne pénétration de la fumée dans les produits.



Le fumage ❖ froid

Les opérations de fumage, pratiquées de manière traditionnelle, nécessitent un contrôle fréquent de la fumée. De plus, les consommations de bois sont très importantes, ce qui contribue à la détérioration du potentiel forestier, phénomène d'autant plus grave que de nombreuses régions sont déjà touchées par la crise du bois de feu.

LES CLAIES

Le séchage ❖ entraînement par air chaud nécessite de disposer les fruits et légumes prêts à sécher sur des claies introduites dans le séchoir. La configuration des claies est fonction du dimensionnement du séchoir (notamment par rapport à la vitesse de l'air).

Un dimensionnement de l'ordre de 0,8 m² par claie est recommandé pour une meilleure homogénéité du séchage. En tout état de cause, les claies ne devront pas dépasser 1,5 m² pour des questions de manipulation et de durabilité. Si le support couramment utilisé est en bois, il doit être de bonne qualité et traité pour éviter son gauchissement (déformation) en milieu humide. La propreté des claies est un facteur d'hygiène et l'emploi d'une toile amovible permet un nettoyage fréquent sans altérer le support. Pour le séchage ventilé de plantes ou de feuilles, on utilise des caissons où la hauteur de produit est fonction du débit d'air.

Passons maintenant aux opérations en « aval », après le séchage.

❖ tapes aval

LE TRI APRÈS SÉCHAGE

Le tri après séchage constitue la dernière sélection avant le conditionnement et la consommation. En fonction du cahier des charges visuelles imposé au produit (forme,

texture, couleur), certains produits hors normes vont être viciés. Comme les unités de séchage en régions chaudes (autres qu'industrielles) n'ont généralement pas les moyens de contrôler en laboratoire la qualité du produit, notamment bactériologique, la responsabilité de retirer les produits douteux revient au personnel affecté. En effet, si le séchage n'a pas été totalement homogène (c'est rarement le cas), certains produits plus humides et infestés peuvent contaminer les autres ultérieurement.

LE STOCKAGE AVAL

Dernier maillon de la chaîne au sein de l'unité, une bonne conservation du produit sec passe par un stockage dans un endroit propre et l'abri de l'humidité et de la lumière. Compte tenu des conditions difficiles en régions chaudes et humides, il faut tenir compte, lors d'un entreposage prolongé, d'une possible re-humidification. D'un point de vue formel, ce phénomène doit être étudié à partir des conditions hygrométriques prévues lors du stockage et de la courbe de sorption du produit. La teneur en eau finale du produit après séchage fournit la valeur d'activité de l'eau du produit à respecter. Cette valeur correspond un degré d'hygrométrie de l'air en équilibre avec le produit. Si elle est maintenue au-delà de cette consigne, il y aura re-humidification du produit. Dans la pratique, et en l'absence de pouvoir procéder à de telles analyses, on cherchera :

- augmenter légèrement les exigences de séchage, de façon à mieux se prémunir de risques de re-humidification préjudiciables;**
- améliorer les conditions de stockage, notamment par un emplacement adéquat dans les bâtiments (cf. plus loin);**
- porter sur l'emballage du produit les instructions de stockage que doivent respecter les consommateurs;**
- apporter un soin particulier au conditionnement du produit (protection contre**

l'air ambiant).

Un produit correctement entreposé doit conserver une bonne tenue de ses qualités visuelles, odorantes et gustatives. Il n'existe pas de normes relatives à la durée limite de conservation. En règle générale, le produit doit pouvoir se conserver un an.

LE CONDITIONNEMENT

Pour la plupart des produits secs, notamment fruits et légumes, le conditionnement en vrac, dans de grands récipients, ne doit être que temporaire (quelques heures) en attendant un emballage adapté.

Le problème de la reprise en eau lors du stockage est fonction de la perméabilité du contenant. Le sachet plastique reste le mode de conditionnement le plus utilisé. Celui en polyéthylène de 50 à 100 microns a l'avantage d'être souvent fabriqué localement, ce qui facilite son approvisionnement. Il n'a cependant pas les qualités de protection contre l'air et l'eau qu'offre le sachet en polypropylène, qu'il faut importer.

Le choix du matériau utilisé pour le conditionnement dépend dans la pratique:

- de la nature de l'aliment;**
- des conditions de stockage et de manutention (température, humidité, détériorations physiques possibles...);**
- des propriétés protectrices du matériau;**
- de sa facilité d'emploi;**
- de sa disponibilité et de son coût sur les marchés locaux.**

Protection offerte par divers matériaux d'emballage convenablement fermés

| | Protection des aliments contre... | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----|----------|-------|----------|----------|------------------|
| Type d'emballage | Perforation
d'encrasement | Lumière | Air | Humidité | Odeur | Insectes | Rongeurs | Micro-organismes |
| Boîtes | E | E | E | E | E | E | E | E |
| Verre
(bouteille)
Bocal | E-M | E (verre
coloré) | E | E | E | E | E | E |
| Papier Sac | F | M | F | M | F | F | F | M |
| Sachet | F | M | F | F | F | F | F | F |
| Carton | M | E | F | F | F | F | F | M |
| Bois (caisse) | E | E | F | F | F | F | F | M |
| Poterie | E-M | E | E | E | E | E | E | E |
| Papier
d'aluminium | F | E | E | E | E | M | F | M |
| Films
plastiques | F | F | E | E-M | E-M | F | F | M |
| Bac de
plastique | F | M | E | E | E | M | F | M |

E = Protection élevée**M = Protection moyenne****F = Protection faible**

Source: « Conditionnement. Manuel de technologies du cycle alimentaire n° 7. », UNIFEM, New York 1993, 52 p.



La mise œuvre: conditionnement/stockage

Enlever les produits des plateaux et les mettre dans un grand récipient très propre. On recouvre ensuite ce récipient d'un morceau de tissu propre ou d'un filet protégeant les produits des poussières et insectes. On remue les produits deux à trois fois par jour. On les laisse huit à dix jours dans le récipient.

On introduit les produits dans les récipients dans lesquels ils sont stockés. Ces récipients doivent être entièrement secs. Il faut aussi protéger les produits des insectes et de la

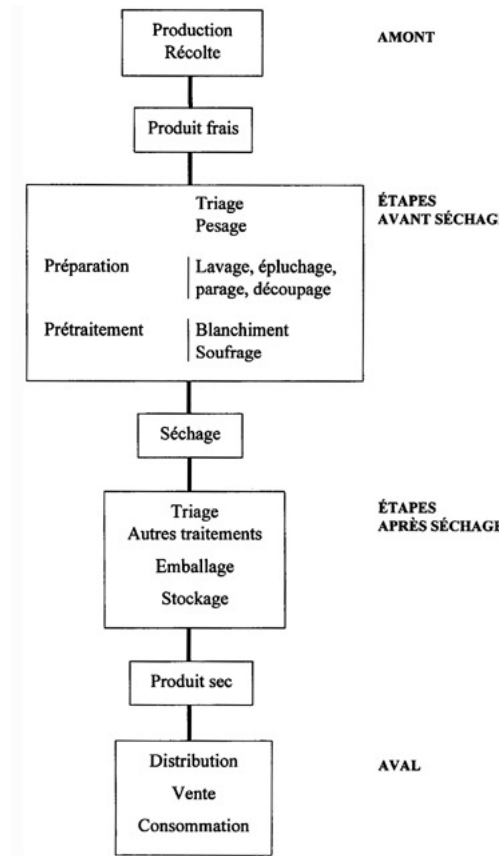
saleté.

Les récipients usuels sont: le pot en pierre; le pot d'argile ou métallique, gourde sèche, sac en papier ou tissu; des bocaux en verre, une boîte métallique avec couvercle étanche bien ajusté.

Scellage des récipients: une fois le couvercle fixé, on l'entoure d'un épais anneau de tissu (2,5 cm) que l'on a baigné dans de la parafine ou de la cire d'abeille. On enroule l'anneau pendant que la parafine est chaude, en s'assurant que tout l'espace entre le récipient et le couvercle est rempli.

Si on a mis les produits séchés dans des sacs en papier ou en tissu, on met ces sacs dans un plus grand récipient. On scelle le grand récipient, une fois qu'il est rempli de sacs.

Le graphe de la page ci-contre résume ces différentes composantes amont et aval d'une activité de séchage.



Différentes composantes amont et aval d'une activité de séchage

Ce rapide aperçu va nous permettre de présenter la conception d'une unité artisanale ou semi-industrielle:

- **organisation et dimensionnement des locaux;**
- **choix du site.**

L'organisation et le dimensionnement des locaux

L'organisation des locaux de l'unité constitue un problème à considérer dès l'étude préalable de faisabilité d'une activité de séchage. Cela conditionne la qualité du produit et la performance de l'unité. Les objectifs à retenir dans la conception d'une activité sont les suivants:

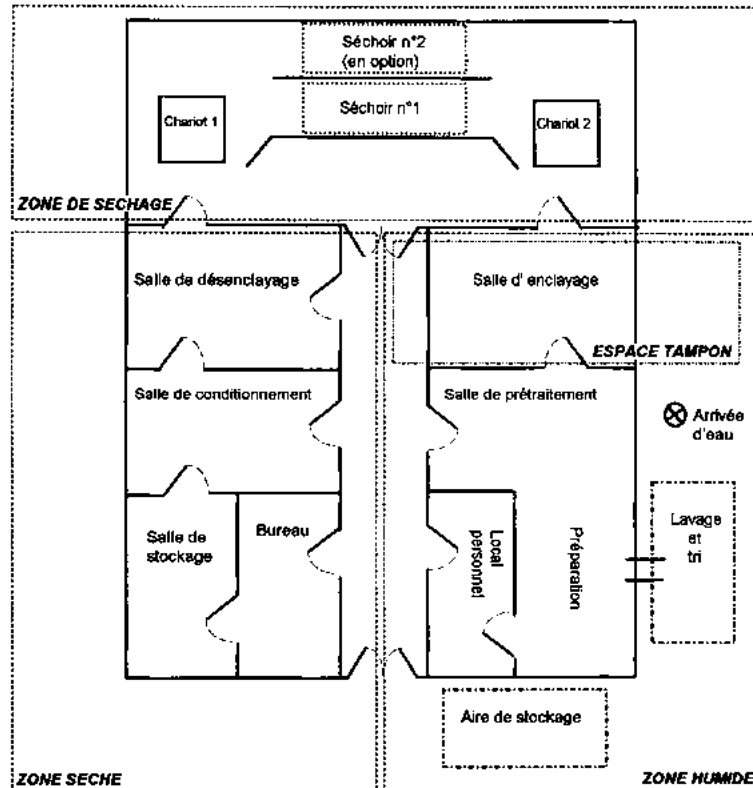
- **hygiène du travail (limitation des risques de contamination du produit);**
- **fonctionnalité (facteur de productivité et de qualité).**

La répartition d'une unité en trois zones: la conception d'un bâtiment de séchage doit, quelle que soit sa taille, pouvoir se dissocier en trois zones pour répondre aux différents états du produit traité:

- **une zone de travail de la matière première;**
- **une zone de séchage qui contient le séchoir et des « espaces tampon »;**
- **une zone de travail de la matière sèche.**

Cette répartition a l'avantage de pouvoir cloisonner physiquement les zones pour y appliquer des règles de travail spécifiques en fonction de l'étape de l'élaboration du produit.

Le schéma de principe présent page suivante est un exemple de bâtiment au Burkina Faso qui illustre bien ce concept et permet de préciser chaque zone spécifique.



Plan type d'une unité artisanale

LA ZONE DE TRAVAIL DE LA MATIÈRE PREMIÈRE DITE « ZONE HUMIDE »

Cette zone est la première et certainement la plus importante de l'unité. Elle regroupe les opérations multiples en amont du séchage qui concernent le produit et l'état frais (facteur d'hygiène prépondérant).

Selon les types et les quantités de produit, le stockage, le tri amont et le lavage peuvent se faire à l'extérieur (cas décrit dans l'exemple). Le stockage devra néanmoins être fait sous un appentis s'il y a des risques de pluie.

Le produit arrive ensuite dans la première pièce pour être préparé au séchage (pluchage, éviscerage...). La vulnérabilité du produit à ce stade oblige à la plus grande rigueur dans la conception des locaux:

- prévoir une protection face au milieu extérieur, source de contamination microbienne en limitant et protégeant les ouvertures (contre les insectes, les animaux, la poussière...);**
- prévoir une évacuation facile des déchets vers l'extérieur par une trappe prévue uniquement à cet effet;**
- prévoir que le nettoyage des sols et des murs doit être facile, parce que fréquent: surface enduite contre la poussière, inclinaison du sol pour un nettoyage à grande eau.**

La surface de cette pièce qui accueille le personnel et le matériel de préparation doit être précisément calculé en fonction:

- de l'organisation de ce poste (quantité de produit, durée quotidienne de traitement);**

- de la productivité du personnel qui, avec le point précédent, détermine le nombre de postes de travail;
- du besoin d'espace pour bien isoler la matière fraîche et les déchets courants;
- de la place prise par le matériel (tamis, tables et chaises).

Pour une entreprise de petite taille, cette pièce pourra contenir si besoin les opérations de prétraitement, qui mobilisent une surface supplémentaire.

LA ZONE DE SÈCHAGE QUI CONTIENT LE SÈCHOIR

Le produit traité en zone humide est maintenant prêt pour le séchage. Il faut pour cela « enclayer » le produit (le disposer dans le séchoir). Il est préférable de ne pas réaliser cette opération dans la zone humide pour limiter la fois les risques de contamination (hygiène) et d'encombrement gênant pour la circulation (fonctionnalité).

La zone de séchage commence donc par un espace tampon, antichambre du séchoir, la salle d'enclayage. Rappelons que les séchoirs doivent être installés à l'abri du vent.

La conception de la zone de séchage est tributaire du type de séchoir prévu. Entre autres, il faut tenir compte:

- de la disposition des entrées/sorties « air » du séchoir dans le bâtiment pour faciliter l'arrivée d'air frais et éviter l'évacuation d'air humide dans la zone de séchage et les risques de condensation de la vapeur d'eau;
- de la disponibilité de l'énergie de chauffage de l'air, qui, dans le cas d'énergies fossiles comme le gaz, le bois, le fuel doit être stockée à proximité et facile à acheminer;

- du nombre d'entre/sortie « produit » dans le séchoir. La solution est d'avoir une sortie du produit sec différente de l'entrée du produit humide pour une meilleure distinction spatiale des zones, qui facilite l'aménagement des locaux;
- de l'espace nécessaire de circulation autour du séchoir fonction de la dimension des claies voire des chariots mobiles (dimension des portes, angles morts);
- de l'isolation des murs du séchoir, notamment ceux qui donnent sur l'extérieur (contre l'humidité).

Remarque: Dans le cas de l'installation d'un séchoir solaire avec rayonnement direct, le séchoir est construit à l'extérieur, indépendant du bâtiment. Cette configuration pose le problème du contact de la matière fraîchement pluchée avec l'air ambiant extérieur au moment où elle est la plus sensible aux risques microbiologiques. Il convient de prendre le maximum de précautions pour diminuer les risques (distances courtes, surface au sol propre, abri voire tunnel de passage).

Dans notre exemple, le séchoir est à l'intérieur du bâtiment. L'accès est alors direct à partir de la pièce d'enclayage, qui permet le cas échéant d'entreposer chariot et claies.

LA ZONE DE TRAVAIL DE LA MATIÈRE SÈCHE DITE « ZONE SÈCHE »

Une fois sec et stabilisé, le produit doit pouvoir être déclayé rapidement. Afin de respecter le parcours « physiologique » du produit, il convient de ne pas utiliser la même pièce que pour l'enclayage. Par conséquent, la zone sèche commence par une pièce tampon similaire à celle avant l'entrée en séchoir. Ce sera le lieu pour réaliser un premier tri aval.

Au-delà, la salle de conditionnement est la dernière pièce où le produit sera travaillé avec si nécessaire une transformation secondaire (broyage...) pour répondre au cahier

des charges du client. La conception de cette pièce est semblable à celle de préparation dans la zone humide, hormis la contrainte de nettoyage à grande eau.

Une fois emballée, le produit doit être stocké jusqu'à l'expédition. Cette opération doit répondre à des exigences qui se traduisent dans la conception de la pièce de stockage. Le produit sec peut être stocké plus de six mois dans ce même endroit. Il convient de conserver cette pièce propre (protection de l'extérieur) et la moins sensible possible aux variations climatiques saisonnières (pièce à l'abri du rayonnement solaire et de l'humidité, forte inertie thermique: murs épais, éventuellement isolés, non orientés au soleil si possible). Le projet de bâtiment, ou sa localisation dans un bâtiment existant, devra tenir compte de ces contraintes.

PIÈCES ANNEXES ET RÈGLES GÉNÉRALES

En plus des pièces dites « techniques », l'aménagement du bâtiment peut comprendre, selon la taille de l'unité:

- un local pour le personnel;**
- un bureau pour la direction de l'unité.**

Le premier permet aux ouvriers de se préparer aux activités de l'unité, le second est nécessaire pour une gestion ordonnée des activités de l'unité.

Parmi les commodités à prendre en compte dans la conception de l'unité, les éclairages, la ventilation et les arrivées de l'eau dans chaque pièce doivent être correctement dimensionnés et situés dans un souci de confort de travail et d'hygiène.

ENVIRONNEMENT DU BÂTIMENT

Dans notre exemple, une partie des activités se déroule à l'extérieur, comme le stockage amont, le tri amont ou le lavage de la matière première. Pour chacune de ces opérations, au même titre que celles à l'intérieur, leur emplacement devra être conçu en fonction de plusieurs niveaux de contraintes:

- dimensionnement de l'espace nécessaire;
- protection minimum du milieu extérieur;
- respect de la répartition en trois zones.

***Par exemple:* l'aménagement de l'aire de stockage se fera avec le souci d'une bonne conservation du produit pendant l'entreposage avec si nécessaire la construction d'un hangar et de bacs pour une répartition selon le degré de maturité.**

L'accès immédiat au bâtiment est aussi un élément à prendre en compte dans la gestion d'une unité.

***Par exemple:* chemin impraticable en saison des pluies, voie unique d'entrée/sortie sont des exemples de problèmes qui peuvent entraver la bonne marche de l'unité s'ils ne sont pas intégrés avant le démarrage de l'activité.**

Enfin, et même si cela peut paraître évident, rappelons que les bâtiments doivent être éloignés de tous lieux de contamination microbienne (latrines, points d'eau stagnante, lieux de stockage des déchets...).

L'exécution de toutes ces recommandations peut paraître fastidieuse et surtout onéreuse lorsque l'on sait que le niveau d'aménagement d'une unité dépend généralement des moyens financiers mobilisables par le promoteur auprès d'une banque, sous forme de crédit. Mais, à l'échelle artisanale ou semi-industrielle, cette approche

trouve sa justification pour deux raisons majeures:

- la durée de vie d'un bâtiment est suffisamment longue pour amortir l'investissement initial sur une longue période;
- la charge financière d'amortissement des investissements périphériques du séchoir (bâtiment, outillage...) est souvent très faible par rapport aux charges variables annuelles d'exploitation. Les efforts consentis ne représentent qu'une faible part dans le résultat d'exploitation. Ne pas les consentir peut être une erreur de gestion. Ce sera le cas si, du fait de locaux trop petits ou d'outils inadaptés au rythme de production, la productivité du travail, la productivité du séchoir et la qualité du produit final s'en ressentent. Si les investissements périphériques d'une unité de séchage représentent 10 % des charges annuelles de l'exploitation, il suffit qu'une réduction de 50 % de l'investissement consenti sur ce poste entraîne un surcoût de plus de 5 % sur l'ensemble de l'activité pour que ce soit là un mauvais choix

L'organisation du travail dans une unité de séchage

Les facteurs susceptibles de contrarier les objectifs « qualité » et « rentabilité » d'une activité de séchage sont nombreux. Il peut s'agir de conditions climatiques, mais aussi de facteurs liés à la gestion des ressources humaines.

Pour faire face aux facteurs impondérables, le promoteur d'une activité de séchage doit pouvoir analyser le fonctionnement de cette activité. Dès le démarrage de son unité, des méthodes de suivi de: gestion propre à chaque phase de l'opération sont nécessaires.

LA PLANIFICATION DE L'APPROVISIONNEMENT EN MATIÈRE PREMIÈRE

Cette étape va conditionner systématiquement la suite des opérations. Un retard

imprévu de l'arrivage en matière première et la plupart de l'activité est bloquée. Une mauvaise qualité de cette matière première se répercute directement sur la qualité du produit fini et sur la rentabilité de l'unité (baisse de la demande).

La difficulté à ce niveau réside dans la capacité à planifier l'approvisionnement. Au niveau domestique, le choix est souvent guidé par l'utilisation des surplus de production invendus, ou l'achat en petite quantité de produits frais au cours le plus bas. L'approvisionnement peut donc être relativement aléatoire.

À l'échelle artisanale ou industrielle par contre, il faut élaborer une véritable stratégie d'approvisionnement en matière première. L'objectif d'obtenir la matière première au prix le plus bas n'est pas suffisant, il faut plutôt raisonner en terme de coût global d'un approvisionnement en temps opportun en matière première, et intégrer cette donnée dans le calcul du prix de revient final. Cette approche permet d'intégrer le coût du transport et le surcoût des pertes en amont et de remarquer que cette étape peut représenter entre 15 et 20 % des charges dans une unité semi-industrielle. À ce stade, il faut pouvoir distinguer deux cas, pour un même niveau de production:

- un approvisionnement peu fréquent, mais en grosses quantités. Lorsque l'unité de stockage est éloignée des lieux de récolte, il est parfois nécessaire de faire venir la matière première par camion de tonnage conséquent plutôt que de procéder à de multiples voyages avec à chaque fois des quantités réduites transportées. L'économie sur les coûts de transport alors réalisée peut être importante. Cela pré suppose cependant des capacités de stockage suffisantes en amont du stockage, un tri « amont » relativement sévère et une capacité de stockage de l'unité adéquate pour traiter la totalité du chargement reçu avant sa dégradation;

- un approvisionnement plus fréquent. Il convient lorsque la matière première

disponible est proche. La sélection n'en est que plus facile, mais le coût est souvent élevé: mobilisation d'un responsable en permanence pour des transports répétés.

Par ailleurs, l'éloignement n'est pas le seul facteur qui joue sur la qualité du produit. L'expérience a prouvé qu'il valait mieux un transport de 300 km sur une route goudronnée de bonne qualité avec un véhicule disposant de bons amortisseurs que 30 km sur un chemin chaoteux, provoquant une dégradation très rapide du produit frais malmené par le transport.

LE STOCKAGE/DÉSTOCKAGE DE LA MATIÈRE PREMIÈRE

Avec l'entassement des produits, le problème se pose souvent d'une maturation incontrôlée en cours de stockage, qui peut aller jusqu'au pourrissement.

La gestion quotidienne du stock de matière première est un facteur prépondérant dans la réussite d'une activité de séchage. Outre la sélection, chaque jour, des produits à préparer, le suivi quantitatif du stock à l'aide d'une simple fiche d'entrée/sortie permet la planification de l'approvisionnement. Après quelques temps, et l'expérience aidant, cela permet de calculer avec justesse les quantités nécessaires afin d'éviter les ruptures de stocks tout en limitant les pertes (surplus, déchets).

LA PRÉPARATION DU PRODUIT

À ce stade, il faut pouvoir suivre l'évolution du produit au cours de la préparation (taux de déchets) et l'organisation du travail (nombre d'ouvriers, temps de travail par opération unitaire).

LE CHARGEMENT DU SÉCHOIR

C'est l'occasion de peser les quantités de matière à sécher par claie ou par charriot, afin de respecter les charges nominales de produits qui conditionnent les performances du séchoir.

Que ce soit des claies, un tapis roulant ou des caissons (pour les plantes), la qualité du séchage va dépendre de la densité de chargement du produit dans le séchoir. En séchage par lots, une surcharge des claies (à titre indicatif: supérieure à 10 kg/m^2 pour les fruits et légumes) peut perturber le séchage (modification des vitesses d'air, saturation en humidité) jusqu'à provoquer l'apparition de moisissures.

Pour chaque produit, il est nécessaire de déterminer la densité optimale de chargement qui devra être respectée pour chaque cycle de séchage. Par exemple, dans le cas d'un séchage par claies, une pesée systématique du produit frais à déposer par claie devra être effectuée.

MAÎTRISE DU SÉCHAGE

Au stade artisanal ou semi-industriel, obtenir un produit fini conforme au cahier des charges (qualité, homogénéité, prix de revient) nécessite la maîtrise de tous les paramètres du séchage.

Cette maîtrise du séchage est fonction de l'outil de production mais aussi de la conduite par l'opérateur. La diversité des séchoirs présentés au chapitre précédent illustre la difficulté à établir des règles générales. À chaque séchoir correspond un mode d'intervention. Selon le degré de technicité du séchoir, l'utilisateur pourra agir sur certains des paramètres physiques qui influencent le séchage: Température de séchage (T_s), Humidité Relative de l'air (HRs), Débit d'air (Da).

Dans le cas du séchage naturel voire du séchage solaire amélioré (direct ou indirect), la

maîtrise du séchage reste très limitée. Le flux et l'échauffement de l'air sont directement fonctions du rayonnement solaire, ce qui laisse peu de place à la régulation par l'utilisateur. Ce type de séchage est donc à réserver plutôt aux activités domestiques mettant en jeu de faibles quantités sans autres contraintes.

Au stade artisanal ou semi-industriel, l'utilisation d'un système de séchage aussi simple (et peu coûteux) que les précédents se justifie rarement face aux risques encourus sur le produit fini (problème de qualité et d'homogénéité, qui peuvent nuire à l'image de la société auprès de ses clients). Il sera rappelé au prochain chapitre que:

- le séchoir le moins cher n'est pas obligatoirement le plus rentable pour une entreprise;
- le séchoir le plus rentable sur le plan strictement financier n'est pas obligatoirement le plus recommandé s'il ne permet pas une bonne qualité homogène du produit, et une production régulière (ou du moins en temps voulu par le client).

Au-delà de la conception du séchoir et des caractéristiques du produit, il est nécessaire d'acquérir l'expérience qui donne le savoir-faire. De nombreux facteurs influent sur le résultat final parmi lesquels:

LA TEMPÉRATURE DE CONSIGNE DE SÉCHAGE (TC)

Elle est établie pour chaque produit, en fonction de la phase de séchage et de la température maximale admissible par le produit (cf. chapitre V). Cette température ne doit pas être dépassée au risque de provoquer une dégradation de la qualité du produit (brûlures, brunissement, croûtage...).

C'est pourquoi un séchage de qualité ne peut se maîtriser qu'avec un contrôle assidu de

la valeur de la température de séchage pendant le cycle de déshydratation.

Le type de thermomètre et sa position par rapport au flux d'air détermine la représentativité de la valeur mesurée. Pour cela, on emploiera plutôt des thermomètres - type sonde - (thermocouple ou résistance au platine) et la prise de température se fera généralement, juste avant l'arrivée sur la première claie. Les protocoles et appareils de mesure seront exposés dans le détail en troisième partie.

LA PERMUTATION DES CLAIES

Au cours du séchage, l'air se charge en humidité au fur et à mesure qu'il traverse des produits. Il est donc logique qu'au cours d'un même cycle, les produits les « premiers servis » en air sec, c'est-à-dire les plus proches de l'arrivée d'air chaud, séchent plus vite que les derniers. Dans les séchoirs de type « Batch » (séchage statique par opposition au système semi-continu ou continu), pour remédier à l'hétérogénéité de ce type de séchage, l'utilisateur est obligé de permuter régulièrement les claies.

En moyenne, sur un séchoir armoire, il faut une permutation de haut en bas, toutes les 3 à 4 h pour un cycle de 24 à 36 h. Le système de chicanes permet de travailler par étage (lot de 3 à 4 claies quasi homogènes), mais l'expérience a prouvé qu'il fallait tout de même numérotter les claies pour ne pas s'y perdre. Pour un séchoir tunnel à chariot utilisé en *batch*, la contrainte est moins lourde puisqu'il faut permuter les chariots seulement une fois en cours de séchage, vers la fin de la phase II.

LE TAUX DE SÉCHAGE

La valeur finale de la teneur en eau du produit est importante, car elle caractérise le degré de séchage (très sec, sec, humidité intermédiaire). Arrêter le séchage au moment voulu permet d'éviter le sur séchage qui dégrade le produit (durcissement) ainsi que le gaspillage d'énergie et de temps.

Il n'existe pas de système de mesure en continu de cette teneur en eau. En unité artisanale, une méthode expérimentale consiste à préparer et isoler quelques échantillons (3 minimum) calibrés (masses de produit connu). Disposés correctement dans le séchoir, ils serviront en fin de séchage de lots « témoin ». On pourra calculer la teneur en eau du produit à chaque pesée de ces échantillons (au moment des permutations par exemple).

En effet, connaissant la teneur en eau et le poids initiaux de l'échantillon, on en déduit la teneur finale (calcul exposé sur un exemple au chapitre IV, et rappelé au chapitre V sous forme mathématique). Lorsque les lots sont homogènes, les pesées précises et un carnet de relevé mis à jour, on obtient un résultat satisfaisant. (cf. chapitre X).

LE CONTRÔLE DE LA TEMPÉRATURE DE SORTIE ET LA RÉGULATION DU DÉBIT D'ENTRÉE

Au fur et à mesure de l'opération de séchage, l'air de sortie devient de moins en moins saturé en vapeur d'eau. Ceci abaisse le rendement énergétique. Il est alors possible d'opter pour un système de recyclage d'air où une partie de l'air humide de sortie est conservée afin d'utiliser au mieux l'énergie fournie à l'air pour le séchage. En effet, même si cet air est plus chargé d'eau que l'air extérieur (s'étant chargé de l'eau du produit), il peut disposer d'un meilleur pouvoir vaporatoire puisqu'il a, lui, été déjà réchauffé.

Sans un tel système il faudra veiller, lorsque c'est possible, à moduler le couple débit d'air/puissance de chauffe au fur et à mesure du séchage (en fonction du degré d'humidité du produit).

Dans un séchoir armoire à gaz, cette régulation manuelle permet une diminution de 20 % de la consommation de gaz pour atteindre en moyenne 2,5 kwh/kg d'eau extrait. Ces efforts ne permettent pas d'empêcher un rendement très mauvais, lorsqu'il faut enlever

les derniers grammes d'eau, pour lesquels on met en jeu environ 10 kwh/kg d'eau!

TRI/CONDITIONNEMENT

Il est utile de ce stade de mesurer le taux de produits hors normes, qui ne peuvent être commercialisés selon le cahier des charges clients. Si ce taux reste important (soit titre indicatif: 10 % par rapport à la sortie séchoir) après la phase d'expérimentation, il faudra rechercher la cause entre l'outil de séchage, la matière première et la conduite des activités.

S'il faut modifier le système, il est toujours utile de procéder à une évaluation économique sommaire des différentes options qui se présentent.

On peut avoir, par exemple, de choisir entre:

- acheter une matière première plus chère, mais de meilleure qualité ou plus apte au séchage;**
- consacrer davantage d'attention (donc de main-d'œuvre) au tri en amont du séchage;**
- investir dans une amélioration du séchoir;**
- se contenter d'éliminer les produits hors normes lors d'un tri plus prononcé en aval du séchage;**
- conserver le système et son mode de fonctionnement en l'état et accepter de vendre moins cher un produit final de moindre qualité;**
- etc.**

STOCKAGE AVAL

Le suivi des stocks de produits finis est pr pondrante dans la gestion de l'activité.   ce stade, il est même recommande de faire un suivi dans le temps de la qualité des produits par lot (cycle de séchage...) de façon à déceler d'éventuels défauts et en rechercher les causes.

Chapitre VIII: Eléments d'évaluation économique des projets

L'intérêt de l'évaluation économique

Afin de réaliser le choix d' nitif, après examen et dimensionnement du séchoir, il faut se donner des règles d'évaluation économique pour réaliser le meilleur choix. Cela permet d'une part de vérifier que le projet techniquement identifié répond bien aux exigences économiques que l'on s'est fixé, d'autre part de vérifier que ce projet est bien le plus intéressant parmi toutes les options de séchage qui satisfont aux critères techniques et aux objectifs de production.

Ces exigences seront différentes selon les objectifs poursuivis.

LE CAS DU SÉCHAGE POUR LA CONSERVATION SANS OBJECTIF DE VENTE MARQUÉ

S'il s'agit essentiellement d'assurer une meilleure conservation des aliments produits localement, sans objectif particulier de les vendre, il faudra veiller à ce que le projet final satisfasse bien, et mieux que d'autres, les attentes de l'utilisateur en termes de services rendus par le séchoir. On comparera en particulier les coûts de chaque option et leurs avantages respectifs.

Les coûts et avantages à considérer ne se limitent pas aux seuls aspects mon taires. C'est du reste ce qui distingue une analyse économique d'une analyse purement

financière. Certains coûts peuvent être non monétaires, comme ce peut être le cas du travail pour le séchage, si cette activité ne rentre pas en concurrence avec une autre activité rémunérée. Dans le cas du séchage pour l'autoconsommation, la plupart des avantages envisageables seront non monétaires:

- amélioration de la durée de vie du produit alimentaire;
- amélioration de sa qualité (par rapport à un séchage traditionnel par exemple);
- amélioration de ses caractéristiques hygiéniques;
- moindre temps consacré à cette activité qu'avec d'autres systèmes de séchage;
- esthétique et fonctionnalités particulières de tel ou tel séchoir.

Un critère d'ordre financier pourra être inclus dans l'analyse, si l'utilisateur prévoit d'utiliser occasionnellement ce séchoir pour commercialiser de petites quantités de produit séché sur les marchés.

Dans un tel cas d'usage non commercial d'un séchoir, et sauf si le séchoir est fourni gracieusement par un donateur qui ne veut « payer » que pour des types bien définis (par lui) de services rendus par le séchoir, ce sera à l'utilisateur de se prononcer sur la façon de comparer les différentes options techniques envisageables au regard de critères multiples et souvent non quantifiables.

CAS DU SÉCHAGE POUR UNE PRODUCTION DE TYPE COMMERCIAL

Si l'objectif principal assigné au projet est la production d'aliments séchés pour un marché, les règles de la comparaison seront modifiées au profit de critères essentiels dans ce cas, tels que la rentabilité strictement financière de l'opération. L'évaluation

économique devra néanmoins toujours inclure des critères qui ne sont qu'indirectement financiers ou pas du tout.

- **La régularité de l'approvisionnement et l'homogénéité de la qualité du produit élaboré sont des critères qui ne sont pas directement monétaires, mais peuvent le devenir bien vite... si du fait de manque de régularité dans la qualité ou dans la fourniture du produit au client, celui-ci réduit ses commandes. Un tel critère peut conduire à choisir finalement un scénario qui, bien que moins rentable qu'un autre pour un même niveau de production, respecte mieux les contraintes imposées par la clientèle.**
- **L'incertitude sur les performances du scénario est aussi un critère important. Un tel critère peut conduire à l'abandon d'une option de construire un scénario nouveau, adapté aux conditions spécifiques d'usage envisagées, et estimé plus performant que d'autres. À cet égard, pour un scénario peut-être moins performant, peut-être moins rentable, mais déjà éprouvé de longue date, et dont on connaît avec plus de certitude le comportement dans la réalité.**
- **L'incertitude sur les paramètres du calcul de la rentabilité financière peut aussi influencer fortement le choix final. Il peut exister une forte incertitude sur le prix de la matière première (N'y a-t-il pas de risques de mauvaise récolte pour les années à venir, ou d'augmentation de la demande qui risqueraient de rendre plus difficile l'approvisionnement à des prix relativement bas à l'avenir?), ou sur le prix de vente du produit final (Est-on garanti de pouvoir couler la production au prix que l'on a estimé? Quel est le rythme de développement de la concurrence?). La prise en considération d'un tel critère peut induire un choix *a priori* « sous-optimal » de scénario: moindre niveau d'investissement pour limiter les risques, ou moindre niveau de production initiale, de façon à « voir venir ».**

- **L'adaptabilité du choix aux contraintes locales, de fabrication, d'utilisation, d'entretien, a été abordé lors de l'élaboration du cahier des charges, mais elle doit être reconsidérée plus en détail au moment du choix final du type de choix à implanter, lorsque les paramètres précis du choix technique sont disponibles.**
- **Lorsque la personne qui envisage de monter ou d'agrandir une unité de séchage a d'autres activités (par exemple la production agricole), elle devra par ailleurs évaluer si le surplus de travail sur le séchage posera un problème de concurrence entre les diverses activités qu'elle exerce. Cette concurrence s'exprimera, selon les circonstances, soit en termes d'incompatibilités dans l'emploi du temps, soit en termes de manque à gagner à se consacrer plus à une activité qui, pour les moments requis, rapporte moins qu'une autre. Dans tous les cas, cela peut induire des modifications dans le choix du projet.**

Doit-on attendre la fin d'une procédure de choix pour procéder à une analyse économique?

UNE ÉVALUATION ÉCONOMIQUE APPROFONDIE NE PEUT SE FAIRE QU'EN CONNAISSANCE DES PARAMÈTRES ESTIMÉS EN AMONT DANS LA PROCÉDURE

Une évaluation économique doit toujours clore la conception d'un projet de séchage. C'est une règle d'or, même si pour les investissements les plus modestes et les problèmes les plus simples elle ne doit pas obligatoirement être très sophistiquée. Elle devra être menée pour s'assurer que le projet est:

- **intéressant sur le plan économique (un exemple d'une telle évaluation est présenté dans la section suivante);**
- **plus intéressant que d'autres projets envisageables sur le plan technique (un exemple de comparaison économique entre deux options est présenté dans la**

section suivante).

L'évaluation économique approfondie prend place en fin de processus. Ce n'est que lorsque les paramètres du système de séchage sont identifiés (caractéristiques physiques, organisation de l'activités dans son ensemble...) que l'on peut véritablement estimer les paramètres qui doivent être pris en compte dans l'analyse économique (coût du séchoir, main-d'œuvre, approvisionnement...), et donc faire cette analyse.

Cela dit, cela ne doit pas cantonner l'analyse économique à la fin du processus, pour au moins deux raisons.

La première est que les résultats de l'analyse économique peuvent conduire à réexaminer les objectifs et les choix techniques. Il se peut que l'analyse économique montre que les solutions envisagées ne sont pas si intéressantes qu'elles pouvaient le paraître. Il peut être alors nécessaire de revenir (presque) au point de départ du processus, en formulant autrement le projet. Ce nouveau projet passera son tour par une phase de dimensionnement physique et de réflexion sur l'organisation de l'activité, et sera à nouveau « testé » par l'évaluation économique. C'est un processus itératif.

La deuxième raison, pour ne pas fixer de façon trop rigide la position de l'évaluation économique en fin de conception du projet, est qu'il est fortement recommandé d'en effectuer une première, sommaire, au début du processus (en même temps que l'élaboration du cahier des charges).

Cette évaluation économique sommaire, et son intérêt, sont précisés dans le paragraphe ci-dessous.

L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE SOMMAIRE EN DÉBUT DU PROCESSUS DE MONTAGE D'UN PROJET

Éviter de se lancer dans une étude technico-économique détaillée si quelques considérations simples permettent de conclure à un manque d'intérêt du projet

La définition complète d'un projet de séchage nécessite, on l'a vu tout au long de cette première partie, un effort important de réflexion pour répondre à de multiples questions:

- quel produit?
- quel volume de production?
- selon quel échéancier?
- quel séchoir?
- quelle unité de séchage?
- quel mode d'organisation de l'activité?
- etc.

Cet effort de réflexion ne sera engagé que si l'on a *a priori* l'idée que le projet envisagé peut présenter un intérêt économique au sens large. Une évaluation économique simplifiée et sommaire peut aider à se faire une idée de ce sujet.

Un exemple d'évaluation économique sommaire peut être le suivant: un entrepreneur, qui n'est pas producteur lui-même, envisage d'implanter une unité de séchage dans une zone de production du produit envisagé.

Les paramètres dont il dispose avant une étude plus détaillée sont les suivants:

- la matière première s'achète entre 50 et 75 FCFA/kg ⁽¹⁾;
- il faut 10 à 15 kg de matière fraîche pour produire 1 kg de produit sec;
- le prix de vente du produit séché se situe entre 1 750 et 2 500 FCFA/kg.

⁽¹⁾ 100 FCFA = 1 franc français = 0,2 dollar américain (août 1995).

Dans le cas le plus favorable qui se présente à lui, le produit est vendu à 2 500 FCFA/kg, la matière première achetée à 50 FCFA/kg, et le rendement du séchoir est de 10 kg de produit frais pour 1 kg de produit séché. La différence entre prix de vente et prix d'achat, rapportés au kilogramme de produit séché, est donc de: $2\,500 - 10 \cdot 50 = 2\,000$ FCFA/kg. Dans le cas le plus défavorable par contre, elle n'est que de: $1\,750 - 15 \cdot 75 = 675$ FCFA/kg

Ce que suggèrent ces données, c'est que si les coûts unitaires du séchage, hors l'achat de la matière première, reviennent à plus de 675 FCFA/kg, il existe un risque que l'opération ne soit pas rentable. L'évaluation économique sommaire en début de montage du projet permet ainsi, même si elle doit être remise en cause par la suite, de savoir à l'avance s'il est nécessaire d'engager une analyse technico-économique poussée. Dans le cas présent, et compte tenu des gammes de coûts du séchage, il est légitime de poursuivre l'analyse: de nombreux séchoirs offrent la possibilité de sécher à un coût unitaire moindre que cette limite, pour un volume de production suffisant, du moins.

Exemple d'évaluation économique préalable sur un cas concret

Au Niger, l'oignon séché traditionnellement, le *gabou*, s'achète à 100 FCFA/kg. L'oignon obtenu par la technique du séchage solaire, de meilleure qualité, doit être vendu à 400 FCFA/kg pour

que l'activité soit rentable. Après une mini-étude sur les marchés locaux, le « consommateur moyen » s'estime prêt à acheter l'oignon solaire, mais à 200 FCFA/kg seulement. Il y a donc en première analyse incompatibilité entre le prix de revient et le prix que l'acheteur est prêt à payer.

Avant d'abandonner le projet, il faudra tout de même évaluer les impacts d'une campagne de promotion du produit nouveau, et regarder s'il n'existe pas une clientèle « aisée » qui acceptera de payer un prix plus élevé pour bénéficier de la meilleure qualité du produit. Il faudra de plus une filière adéquate pour accéder à cette clientèle (vente dans les magasins d'alimentation par exemple, plutôt que vente dans la rue ou sur un marché de quartier).

Quelques estimations rapides permettent d'orienter dès le début l'analyse technico-économique vers les solutions les plus adaptées

Des évaluations économiques sommaires peuvent être réalisées pour apporter des éléments de réponse à d'autres questions que celle de savoir si le projet sera rentable. On peut par exemple s'interroger sur le degré de qualité du produit qu'il faut atteindre, qui déterminera partiellement le choix du séchoir. De façon à illustrer ce propos, reprenons le cas d'exemple précédent et supposons que deux techniques de séchage ont été identifiées, permettant de mieux préciser les coûts unitaires et les prix de vente probables:

- une première technique, relativement traditionnelle, permet d'obtenir un produit séché de qualité modeste au coût unitaire de fabrication estimé, avant une analyse plus précise, entre 400 à 500 FCFA par kg de produit séché; le prix de vente d'un tel produit a été estimé entre 1 750 et 1 900 FCFA/kg;
- une deuxième technique, plus laborieuse, permet de toucher une clientèle plus exigeante avec un produit de meilleure qualité, mais pour un coût unitaire

d'élaboration plus élevée, évalué a priori entre 600 et 700 FCFA/kg Le prix de vente probable est par contre situé dans une fourchette plus élevée que précédemment: 2 400 à 2 500 FCFA/kg.

Pour un rendement de 1/13e et un prix de la matière première de 60 FCFA/kg (hypothèses moyennes compte tenu des fourchettes d'estimation), le bénéfice unitaire pour la première technique est dans le meilleur des cas de:

1 900 - 13.60 - 400 = 720 FCFA/kg. Le bénéfice unitaire pour la deuxième option est dans le pire des cas de: 2400 - 13.60 - 700 = 920 FCFA/kg. Cette évaluation rapide permet à l'entrepreneur de savoir, malgré l'incertitude de départ sur les données exactes du problème, que c'est davantage vers un séchage de bonne qualité qu'il devra s'orienter, et donc diriger les analyses technico-économiques dans ce sens.

Cf. l'encadré de la page suivante.

Premières « analyses de sensibilité »

Dans les premières étapes d'une analyse de projet, les incertitudes sont encore grandes. Certaines pourront être levées au cours de l'étude, d'autres non. Par exemple, l'incertitude climatique ne peut pas être contrôlée. Des analyses rapides de sensibilité visent à fournir des ordres de grandeur de l'effet des incertitudes de telle ou telle variable sur les résultats économiques du projet. Elles peuvent de ce fait être très utiles dès le début de l'étude, pour permettre de mieux identifier les paramètres les plus importants pour la réussite économique du projet.

Exemple d'un tel type d'évaluation économique sommaire sur un cas concret:

Dans la zone Ouest-saharienne, les mangues arrivent à maturité d'avril à septembre. La saison

des pluies débute à la mi-juillet et le séchage solaire devient alors difficile. Il n'est donc possible que d'avril à mi-juillet, ce qui laisse peu de temps pour assurer le volume de production nécessaire pour rentabiliser l'investissement, d'au moins 30 000 FCFA pour le seul séchoir.

Cette évaluation économique sommaire permet d'orienter les études technico-économiques:

- soit vers un séchoir plus cher, mais polyvalent, qui permettra de sécher d'autres produits le reste de l'année (bananes, ananas, légumes...);
- soit vers un séchoir « mixte » ou un séchoir « tout combustible fossile », de façon à éliminer les contraintes de manque d'ensoleillement entre juillet et fin septembre.

Le choix final dépendra de nombreux autres facteurs, en particulier le volume de la production envisagée, dont dépendra en partie la possibilité de recourir à un investissement important. Sur le projet AFDI-AJAC au Sénégal par exemple, c'est vers la première solution que l'on s'est orienté. Dans le cas d'un projet à Orodara au Burkina Faso, qui sera décrit par la suite, c'est vers la deuxième.

Ce propos est illustré ici en reprenant l'exemple précédent. On se place dans une hypothèse médiane: tous les paramètres du problème sont supposés se situer au milieu de leurs positions extrêmes, à l'exception du paramètre sur lequel porte l'analyse de sensibilité. Considérons le problème de la sensibilité du bénéfice unitaire du séchage à une fluctuation de prix de la matière première. Pour cela, on se place dans l'hypothèse suivante:

- le rendement du séchage s'établit à 12,5 kg de matière fraîche pour 1 kg de produit sec (moyenne des extrêmes estimés: rapports de 1 à 10 et de 1 à 15);
- le prix de vente du produit est de 2 450 FCFA/kg (hypothèse moyenne entre 2 400 et 2 500 FCFA/kg si on considère que l'entrepreneur a déjà fait le choix d'une

option technique visant une bonne qualité du produit final, tel que motivé par les résultats présentés ci-dessus);

- le coût unitaire de l'élaboration du produit final est de 650 FCFA/kg (moyenne sur la fourchette de coûts estimés pour la deuxième option technique de séchage: 600 et 700 FCFA par kg de produit élaboré).

L'analyse sommaire de la sensibilité de l'activité aux fluctuations du prix des matières premières est dès lors simple.

Le bénéfice par kilogramme de produit séché est de $2\,450 - 12,5 \cdot 50 - 650 = 1\,175$ FCFA/kg si le prix de la matière première est 50 FCFA/kg.

Il est de $2\,450 - 12,75 \cdot 50 - 650 = 862,5$ FCFA/kg.

La différence de bénéfice reste acceptable. Cela suggère que le projet en cours de conception a des chances de résister des fluctuations des prix de la matière première, du moins dans la fourchette estimée. L'exemple présenté plus loin pour une comparaison économique de projets, et tiré d'un cas concret, montre qu'un projet peut être parfois beaucoup plus sensible de telles fluctuations.

L'AFFINEMENT DES ESTIMATIONS MESURE QUE PROGRESSE L'ANALYSE

En début d'analyse, les estimations sont naturellement imprécises. Les conclusions qui pourront être dégagées n'auront d'intérêt que si elles sont vraiment pertinentes:

- une activité ne pourra être véritablement considérée comme *a priori* rentable que si elle l'est dans le pire des cas envisageables;**
- un choix de séchoir ne pourra être véritablement considéré comme *a priori***

meilleur que d'autres que si c'est le cas dans la situation la plus défavorable pour lui, relativement aux autres.

Ces incertitudes ne seront probablement plus du même ordre de grandeur à un stade plus avancé de la réflexion sur le projet.

- **On aura alors mieux évalué le prix d'achat de la matière première:**
 - **après une analyse plus approfondie des prix de cette matière première aux différentes périodes de l'année;**
 - **après une analyse comparative des opportunités de s'approvisionner à partir de productions locales ou de faire transporter le produit frais depuis d'autres zones (supposées moins chères), ou de modifier la localisation de l'unité pour se rapprocher de ces dernières zones;**
 - **après avoir éventuellement analysé l'opportunité de passer des contrats d'approvisionnement avec les producteurs locaux (par exemple: achat garanti à 60 FCFA/kg sur toute 1 année, mais avec obligation pour le fournisseur de délivrer la matière première même aux périodes où les commerçants lui proposent un prix plus élevé).**
- **On aura mieux évalué le rendement de séchage lorsque l'on disposera d'une idée plus précise du type de séchoir à envisager.**
- **On aura mieux évalué le prix de vente du produit final, après:**
 - **une étude de marché plus approfondie permettant d'évaluer le prix que le consommateur serait prêt à payer pour l'acquies;**

- une analyse du coût de l'« accès » à cette clientèle (transport du produit fini, éventuelle campagne de promotion, qui prend en charge et quel coût la commercialisation?...);

- une analyse comparative de l'intérêt qu'il y a à produire un produit de haute qualité (donc à prix de vente potentiellement élevé) ou de qualité plus modeste, sachant que les coûts unitaires de l'élaboration seront plus élevés dans le premier cas.

L'évaluation économique « approfondie »

LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE L'ÉVALUATION

Les différentes étapes préalables à une évaluation économique détaillée ont permis de définir les nombreux paramètres qui lui sont nécessaires. L'évaluation est résumée ici à l'analyse de la rentabilité financière par commodité pour le lecteur.

Au terme de l'élaboration du cahier des charges, d'un dimensionnement technique du séchoir et d'une analyse des investissements et activités en amont et en aval du séchage à réaliser, on dispose, en théorie, des données listées ci-dessous.

Pour le séchoir choisi

- sa consommation énergétique par kg de produit séché;
- son coût initial;
- les frais d'entretien par kg de produit séché;
- le temps de l'amortissement souhaité de cet investissement (généralement 5 à 10 ans pour des investissements lourds, 3 à 6 mois pour de petits équipements),

et les charges du crédit.

Pour le produit

- le prix d'achat du kilogramme de produit frais;
- le rendement du séchage, en termes de kilogrammes de produit frais nécessaires pour produire un kilogramme de produit sec (en tenant compte du tri, des pertes, de la préparation, de la perte de poids due à l'évaporation de l'eau...);
- le prix de vente du kilogramme de produit séché;
- les divers coûts annexes (intrants, emballages) rapportés au kg de produit séché.

Les équipements annexes

Le coût est généralement constitué ici par l'amortissement et les charges du crédit du bâtiment et de ses infrastructures. Il est aussi composé de l'amortissement de l'ensemble de l'outillage qui dure plus longtemps qu'une année, et le cas échéant du coût des informations (expertise technique, enquêtes de marchés...). Les coûts sur ce poste seront ventilés entre les « frais annexes » pour le petit matériel et l'amortissement des équipements lourds.

La masse salariale

Il s'agira de définir le coût de chaque poste rapporté au kg de produit séché. On pourra noter un surcoût lié à un séchoir nécessitant plus de manipulation ou une spécialisation de la main d'œuvre.

Les frais annexes

- frais de gestion courante (hors remboursement du crédit, d'ajout comptabilisé plus haut);
- frais de commercialisation;
- impôts, taxes diverses.

LES PRINCIPAUX INDICATEURS FINANCIERS UTILISÉS

Les outils financiers les plus élaborés, tels le bénéfice actualisé ou le taux de rentabilité interne ne sont pas présentés ici: l'usage de tels instruments de mesure des performances économiques ne se justifie, et ne s'impose, que pour des unités de séchage de taille conséquente. Dans ce cas, de bonnes compétences en gestion seront de toutes façons requises.

Les indicateurs présentés sont les outils simplifiés les plus courants à l'échelle artisanale ou semi-industrielle.

Le bénéfice, qu'il soit rapporté à l'activité annuelle ou rapporté au kilogramme de produit séché, s'écrit comme la différence des recettes et des coûts annuels, rapportés ou non à ce kilogramme de produit final:

Bénéfice = Recettes - Coûts, soit:

Bénéfice = Recettes - (Coût annexe + Coût énergie + Coût amortissement + Coût crédit + Coût salaires + Coût matières premières et intrants)

Le coût d'un investissement, rapporté à l'année, comprend le coût de l'amortissement et le coût du crédit.

Le coût d'amortissement se calcule, de façon simplifiée, en divisant l'investissement initial par le nombre d'années de vie de l'équipement concerné (le bâtiment, le choix...). Il mesure la somme qu'il faut « mettre de côté » chaque année pour assurer un renouvellement de l'équipement au terme de sa vie, ou la somme qu'il faut déboursé chaque année pour rembourser le principal du capital emprunté.

Les équipements n'ayant pas tous la même durée de vie, il faut faire les calculs pour chaque gamme d'investissement (investissements de 3 ans, de 5 ans, de 10 ans...). Le coût total de l'amortissement est la somme des coûts d'amortissement de chaque équipement spécifique.

Le coût du crédit est soit un coût réel, un coût d'opportunité. Si l'entrepreneur a fait un emprunt pour monter son unité de séchage, c'est un coût réel, le versement des annuités au taux d'intérêt fixé. Si l'entrepreneur a utilisé des fonds propres, il lui faudra évaluer, le cas échéant, ce que cet argent lui aurait rapporté s'il avait été utilisé d'une autre façon (placement financier par exemple). Il arrive que ce coût du crédit soit porté directement dans les « frais annexes ». Dans le cas d'une évaluation économique visant à comparer des projets, il est préférable de la considérer séparément, de façon à bien faire ressortir ce qui constitue les coûts de l'investissement lui-même.

Il faut enfin préciser qu'une partie des coûts annexes dépendent du bénéfice lui-même (impôt sur le bénéfice par exemple). Selon les cas à traiter, deux bénéfices peuvent être calculés pour des usages et significations différents: un bénéfice avant imputation des taxes et impôts, et un bénéfice après.

Le prix de revient est le coût de production du kilogramme de produit sec. Il ne permet pas de déterminer le prix de vente de ce produit, qui dépend en premier lieu des décisions des consommateurs. Il permet par contre de connaître le prix de vente minimal en dessous duquel le produit sera vendu à perte.

Le temps de retour d'un investissement est, en première approximation, le nombre d'années nécessaires à un remboursement intégral de l'investissement. Soit, de façon simplifiée:

Temps de retour = Total investissement / (Bénéfice annuel net total + Coût d'amortissement annuel total)

Le calcul du temps de retour est surtout utile lorsque l'on n'envisage pas d'amortir l'investissement sur toute sa durée de vie. Compte tenu des coûts élevés de l'emprunt dans certains pays en développement, il peut en effet être préférable de faire un emprunt au plus court terme possible. Le temps de retour fournit alors une indication sur la durée minimale de l'emprunt à contracter. Cette dernière devra cependant être plus grande:

- pour se prémunir des risques de non-paiement dans les temps, si la rentabilité de l'activité n'a pas été *in fine* celle escomptée;
- pour disposer de marges de trésorerie suffisantes;
- pour dégager un revenu monétaire dès le début de l'activité (pour une durée de crédit égale au temps de retour, tout le bénéfice sera consacré au remboursement du crédit dans les premiers temps).

EXEMPLES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE SUR DES CAS CONCRETS

Les deux exemples fournis dans ce paragraphe illustrent le calcul du bénéfice d'un projet de séchage, et son usage. Ils sont tous deux extraits de cas concrets d'entreprises au Burkina Faso. Dans le premier cas, l'évaluation a pour but de vérifier l'intérêt économique d'une amélioration précise des conditions de production, et ne comporte donc pas de « variantes techniques ». Dans le deuxième cas, l'objectif est non seulement

de vérifier la rentabilité financière, mais aussi de déterminer laquelle de deux options techniquement envisageables est la plus pertinente sur le plan financier.

Le budget prévisionnel de l'entreprise artisanale de Koalba au Burkina Faso

L'unité de Koalba est une entreprise familiale qui s'est engagée dans l'activité de séchage des mangues en 1993 avec l'appui du CEAS (2). Koalba a exporté un peu moins d'une tonne en 1993 et 2,8 tonnes en 1994. Cette expérience encourageante pousse aujourd'hui Koalba à envisager une amélioration de son unité. En effet, des problèmes se posent au niveau de l'hygiène des locaux de préparation et de l'insuffisance des équipements. Après avoir trouvé des solutions techniques, l'entreprise dresse un budget prévisionnel pour vérifier la validité du projet. Le plan de production prévoit une augmentation de 10 à 12 tonnes à partir de la troisième année ce qui explique l'accroissement des recettes mais aussi des charges proportionnelles (cf. le tableau de la page ci-contre).

(2) Ci adresse en annexe.

L'unité de Koalba vend en Europe les mangues de premier choix à un prix de 4 000 FCFA/kg Le deuxième choix est commercialisé localement à un prix de 2 000 FCFA. L'emballage est différent suivant la destination du produit. À l'exportation les sachets ont une plus grande contenance et sont de meilleure qualité que ceux destinés au marché local. Leur coût est donc plus élevé (70 FCFA contre 40 FCFA), mais cela est largement compensé par la différence de prix de vente.

Koalba adhère au Cercle des sécheurs. Cette structure regroupe l'ensemble des unités de séchage et assure l'approvisionnement et la commercialisation des produits. Le coût de l'adhésion s'élève à 240 FCFA/kg de produit séché.

En milliers de FCFA | Années I | Années II | Années III

| EN MILLIERS DE FCFA | Année I | Année II | Année III |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| Recettes | 38 880 | 38 880 | 46 656 |
| Exportation | 34 560 | 34 560 | 41 472 |
| Vente intérieure | 4 320 | 4 320 | 5 184 |
| Charges | 31 011 | 30 862 | 35 542 |
| Mangues | 8 100 | 8 100 | 9 720 |
| Emballage export | 2 764 | 2 764 | 3 317 |
| Emballage vente int. | 540 | 540 | 648 |
| Soufre | 324 | 324 | 388 |
| Gaz | 2 268 | 2 268 | 2 721 |
| Main d'œuvre | 2 330 | 2 330 | 2 330 |
| Divers et imprévu | 1 080 | 1 080 | 1 296 |
| Entretien | 432 | 432 | 518 |
| Frais CDS | 2 592 | 2 592 | 3 110 |
| Transport en Europe | 8 640 | 8 640 | 10 368 |
| Amortissement crédit | 1 493 | 1 493 | 1 493 |
| Frais financiers | 447 | 298 | 149 |
| Bénéfice | 7 868 | 8 017 | 11 113 |

Enfin, le crédit contracté pour l'achat des séchoirs, du matériel et l'aménagement du bâtiment d'un montant de 4 479 000 FCFA sera remboursé sur trois ans avec un taux de 10 %. Les annuités comprennent le remboursement du capital constant sur les trois ans (1 493 000 FCFA) et les intérêts dégressifs que l'on retrouve dans le compte frais financier du budget provisionnel.

(D'après Charles Yvan Tougouma, coordinateur du Cercle des sècheurs, Burkina Faso).

Le cas d'une comparaison de deux options techniques pour deux rythmes de production envisagés

Le deuxième exemple est extrait d'une étude comparative entre deux séchoirs gaz pour établir un comparatif économique entre les différentes versions. Les coûts sont actualisés à l'année 1995.

Ces séchoirs sont le séchoir gaz CEAS et le séchoir tunnel type Cartier. L'entreprise concernée est située à Orodara, toujours au Burkina Faso.

Hypothèses de base

On se place dans le cadre de la production de mangue séchée à Orodara (Burkina Faso) et destinée au marché national. Nous allons réaliser une simulation économique à partir de deux hypothèses de production: 5 et 10 tonnes/an de mangue séchée.

Hypothèses technico-économiques concernant les deux séchoirs

• Hypothèses communes aux deux séchoirs:

- le rendement de séchage de la mangue est de l'ordre de 15: il faut approximativement 15 kg de matière première à maturité pour obtenir 1 kg de mangue séchée;**
- la matière première est achetée 15 FCFA/kg;**
- la mangue séchée est revendue à 2 500 FCFA/kg;**
- les deux types de séchoir fonctionnent par cycles de 18 heures, 20 jours**

par mois pendant 6 mois (période de maturité de la mangue locale);

- on suppose qu'ils produisent le même taux de déchets (13 % de la production);

- on suppose également qu'ils nécessitent le même nombre d'employés:

8 ouvriers + 2 cadres dans le cas de l'option 5 T/an,

12 ouvriers + 2 cadres pour l'option 10 T/an.

• Hypothèses spécifiques au séchoir gaz CEAS:

- consommation de gaz: 0,6 kg de gaz/kg de mangue séchée/cellule de séchage;

- capacité de production: environ 9 kg de mangue séchée/cycle de séchage/cellule;

- coût d'une cellule équipée: 400 000 FCFA;

- option 5 T/an: 5 cellules nécessaires soit un coût de 2 000 000 FCFA;

- option 10 T/an: 10 cellules nécessaires soit un coût de 4 000 000 FCFA;

- durée d'amortissement: 5 ans.

• Hypothèses spécifiques au séchoir tunnel type Cartier:

- consommation de gaz: 0,45 kg de gaz/kg de mangue séchée/cellule de séchage;

- capacité variable de production de la même cellule: jusqu'à 90 kg de mangue s ch e/cycle de séchage/cellule;
- coût d'une cellule équipée: 6 500 000 FCFA;
- durée d'amortissement: 10 ans.

 valuation économique des deux s choirs

Les résultats de cette simulation sont présentés de façon simplifiée dans les tableaux suivants. Nous retiendrons deux paramètres essentiels:

- le temps de retour de l'investissement;
 - le bénéfice prévisionnel cumulé après dix ans d'exploitation.
- Option 5 T/an:

Charges:

| | Séchoir gaz CEAS | | Séchoir tunnel type Cartier | |
|------------------|------------------|---|-----------------------------|---|
| | Quantité | Charges annuelles d'exploitation (FCFA) | Quantité | Charges annuelles d'exploitation (FCFA) |
| Intrants, dont: | | 2 518 750 | | 2 518 750 |
| Matière première | 86 250 kg | 1 293 750 | 86 250 kg | 1 293 750 |
| Utilités, dont: | | 1 070 000 | | 1 005 000 |
| Gaz | 3.450.kg | 1 035 000 | 2 588 kg | 776 250 |

| | | | | |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Electricité du ventilateur | 0 kWh | 0 | 1 944 kWh | 194 400 |
| Personnel | 10 p/mois | 1 185 000 | 10 p/mois | 1 185 000 |
| | * 6 mois | | * 6 mois | |
| Frais généraux | | 720 000 | | 720 000 |
| Total charges | | 5 493 750 | | 5 428 750 |

Investissements:

| | Séchoir gaz CEAS | | | Séchoir tunnel type Cartier | | |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| | Quantité | Coût total (FCFA) | Temps d'amortissement | Quantité | Coût total (FCFA) | Temps d'amortissement |
| Bâtiment de séchage | 80 m ² | 450 000 | 10 ans | 80 m ² | 450 000 | 10 ans |
| Séchoir | 5 | 2 000 000 | 5 ans | 1 | 6 500 000 | 10 ans |
| Équipements annexes, petit matériel et instrumentation | | 1 186 000 | 2 à 5 ans selon le matériel | | 1 186 000 | 2 à 5 ans selon le matériel |
| Total des investissements (FCFA) | | 9 636 000 | | | 12 136 000 | |

Bilan:

| | Séchoir gaz CEAS | Séchoir tunnel type Cartier |
|-------------------------------------|------------------|-----------------------------|
| Temps de retour de l'investissement | 3 ans | 4 ans |

| Temps de retour de l'investissement | 5 ans | 7 ans |
|--|-----------------|-----------------|
| Bénéfice cumulé après dix ans d'exploitation | 12 316 000 FCFA | 10 891 000 FCFA |

• **Option 10 T/an:**

Charges:

| | Séchoir gaz CEAS | | Séchoir tunnel type Cartier | |
|----------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Quantité | Charges annuelles (FCFA) | Quantité | Charges annuelles (FCFA) |
| Intrants dont: | | 5 037 500 | | 5 037 500 |
| Matière première | 172 500 kg | 2 587 500 | 172 500 kg | 2 587 500 |
| Utilités dont: | | 2 105 000 | | 1 781 000 |
| Gaz | 6 900 kg | 2 070 000 | 5 176 kg | 1 552 000 |
| Électricité du ventilateur | 0 kWh | 0 | 1 944 kWh | 194 400 |
| Personnel | 15 p/mois | 1 665 000 | 15 p/mois | 1 665 000 |
| | * 6 mois | | * 6 mois | |
| Frais généraux | | 720 000 | | 720 000 |
| Total charges | | 9 527 500 | | 9 203 500 |

Investissements:

| | Séchoir gaz CEAS | | | Séchoir tunnel type Cartier | | |
|--|------------------|------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-----------------------|
| | Quantité | Coût total | Temps d'amortissement | Quantité | Coût total | Temps d'amortissement |
| | | | | | | |

| | | (FCFA) | | | (FCFA) | |
|---|-------------------|-----------|-----------------------------|-------------------|------------|-----------------------------|
| Bâtiment de séchage | 50 m ² | 450 000 | 10 ans | 80 m ² | 4 450 000 | 10 ans |
| Séchoir | 5 | 4 000 000 | 5 ans | 1 | 6 500 000 | 10 ans |
| Équipements annexes petit matériel et instrumentation | | 1 186 000 | 2 ✦ 5 ans selon le matériel | | 1 186 000 | 2 ✦ 5 ans selon le matériel |
| Total des investissements (FCFA) | | 9 636 000 | | | 12 136 000 | |

Bilan:

| | Séchoir gaz CEAS | Séchoir tunnel type Cartier |
|--|------------------|-----------------------------|
| Temps de retour de l'investissement | 2 ans | 2 ans |
| Bénéfice cumulé après dix ans d'exploitation | 40 790 000 FCFA | 44 446 000 FCFA |

Commentaires

- Les charges:

Pour chacune des options de production - 5 T ou 10 T -, les charges en intrants, personnel et frais généraux sont les mêmes pour les deux séchoirs. Les différences entre les deux séchoirs pour le total des charges s'expliquent donc par le poste énergie. Toutefois, malgré une consommation spécifique de gaz plus faible pour le séchoir tunnel, l'écart dans le coût des charges énergétiques est réduit par le coût élevé du kWh électrique nécessaire pour le fonctionnement de son ventilateur.

- **Les investissements:**

De même, du fait des hypothèses précédemment formulées, les différences entre les deux scénarios concernant le montant des investissements s'expliquent uniquement par le type de scénario choisi. Le scénario tunnel n'est en effet pas modulable comme le scénario CEAS.

On s'aperçoit alors que l'option de production 5 T/an est particulièrement défavorable au scénario tunnel: le coût du scénario tunnel, dimensionné pour une production de 10 T/an, devient trop important lorsque rapporté à une production de seulement 5 T/an. En revanche, dans le cas, de l'option de production 10 T/an, l'écart de rentabilité entre les deux types de scénarios devient insignifiant.

On retiendra que plus un scénario est utilisé au maximum de sa capacité, plus il devient intéressant en termes économiques.

- **Synthèse:**

Pour les deux types de scénario, on s'aperçoit qu'une production seulement deux fois plus élevée permet de diminuer le temps de retour des investissements, et peut permettre d'obtenir un bénéfice cumulé quatre fois plus important après dix ans d'exploitation.

- **Une option de production 5 T/an destinée au marché local est désavantageuse pour le scénario tunnel: celui-ci est surdimensionné, nécessite un investissement beaucoup plus élevé pour obtenir un bénéfice cumulé après dix ans d'exploitation un peu plus faible que le scénario gaz CEAS.**

Dans le cas de l'option de production 5 T/an, le choix se porterait sur le scénario gaz CEAS.

- **L'option 10 T/an devient par contre favorable au choix tunnel: même temps de rentabilisation de l'investissement, bénéfice cumulé après dix ans d'exploitation un peu plus élevé.**

Dans le cas de l'option 10 T/an, le choix peut se porter sur l'un ou l'autre des choix.

- **Dans un contexte différent - exemple: prise en compte de la qualité du produit pour la détermination du prix de vente, prix du gaz plus élevé, production à l'export -, le choix pourrait se porter sur le choix tunnel, même dans le cas d'une hypothèse de production de 5 T/an. Le même type de raisonnement peut être tenu entre les choix solaires et les choix gaz.**

Il n'existe pas de choix sur lequel le choix puisse s'effectuer de manière systématique.

Conclusion

Le choix d'un choix ne peut être fait *a priori* uniquement sur la base des performances énergétiques et sur le coût d'investissement. Il faut également tenir compte des paramètres clés déterminant ce choix: contexte géoclimatique et socio-économique du pays et perspectives d'évolution de ces paramètres.

Enfin, il est absolument nécessaire d'utiliser un choix au maximum de ses capacités et, chaque fois que cela est possible, de maximiser la production.

Remarques complémentaires sur ce cas d'évaluation

- **Dans cet exemple, le bâtiment est le même pour les deux régimes de production simultanés (5 et 10 tonnes par an). On part ici du principe que, quel que soit le choix**

de rythme de production, l'entrepreneur restera dans ses locaux. Un local de 80 m² peut cependant ne pas être très bien adapté à une production de 10 tonnes par an (une surface de 180 m² est conseillée). Il peut donc être utile pour l'entrepreneur de poursuivre la simulation en estimant les pertes de productivité de l'unité qui résulteront de locaux trop exigus. Si les pertes estimées apparaissent plus élevées que le surcoût d'un amortissement de locaux plus grands, il peut être intéressant pour lui d'envisager un déménagement pour réaliser dans de bonnes conditions matérielles et économiques une production de 10 tonnes par an de produit sec.

- Le calcul de la rentabilité dépend de l'estimation que l'on se fait de la durée de vie des équipements lourds. Elle doit donc être estimée avec le maximum de précision. Il faut aussi toujours s'assurer que la comparaison de deux options n'ayant pas la même durée de vie n'est pas trop fortement biaisée en utilisant des instruments financiers simplifiés. En toute rigueur, seul un bénéfice actualisé (non présenté ici) permet de comparer correctement des projets de durée de vie différée.

- Le prix de la matière première n'est parfois pas un paramètre déterminant de la rentabilité d'un projet. Dans le cas présent, ce n'est pas le cas. Une analyse de sensibilité montre en particulier qu'il suffit que le prix de la mangue fraîche passe de 15 à 30 FCFA/kg pour que le projet cesse d'être rentable, pour les deux options techniques et les deux rythmes de production. L'entrepreneur Orodara dispose d'une situation avantageuse, car il se situe dans une zone où la mangue est abondante, et éloignée des marchés, de sorte qu'il peut s'approvisionner à très bon marché en mangues fraîches. Mais il faut garder en mémoire que le prix au producteur de la mangue fraîche peut aller jusqu'à 200 FCFA/kg dans certaines zones (pour un prix de vente sur le marché de l'ordre de 400 FCFA/kg De tels

♦ carts sugg♦rent que l'entreprise n'est peut-♦tre pas bien prot♦g♦e des fluctuations du prix de la mati♦re premi♦re, et qu'il lui faudra peut-♦tre ♦ l'avenir se reconvertir dans le s♦chage d'autres produits.

LE CAS PARTICULIER DU S♦CHEUR-AGRICULTEUR

Les performances ♦conomiques d'une unit♦ de s♦chage peuvent, on vient de le voir, ♦tre tr♦s sensibles au co♦t de l'approvisionnement de la mati♦re premi♦re. Dans le cas d'une personne r♦alisant des activit♦s de s♦chage ♦ but commercial, mais ♦tant par ailleurs producteur du produit frais envisag♦, la question se pose de savoir quel est ce co♦t. Doit-on le consid♦rer comme nul, appliquer le prix au producteur moyen sur la zone...? Cela d♦pendra fortement des circonstances.

- Si cette personne dispose d'une production propre suffisante pour approvisionner le s♦choir, plusieurs cas se pr♦sentent:

- s'il peut vendre la totalit♦ de ses surplus en frais, il devra porter leur prix de vente comme co♦t de la mati♦re premi♦re pour le s♦chage (c'est un « co♦t d'opportunit♦ »);

- s'il dispose de surplus qu'il ne peut pas vendre en frais, par exemple parce qu'il est trop ♦loign♦ des march♦s ou que la route est impraticable en cette p♦riode, et si ce surplus n'a pas ♦t♦ produit intentionnellement (il est li♦ aux al♦as climatiques, mais le producteur n'a pas cherch♦ au d♦part ♦ disposer d'un surplus), il pourra consid♦rer dans son ♦valuation ♦conomique que le co♦t de la mati♦re premi♦re est nul, aux co♦ts de r♦colte pr♦s;

- s'il dispose de surplus qu'il ne peut pas vendre en frais et qu'il a intentionnellement cultiv♦s pour l'approvisionnement de son s♦choir, il

devra retenir le coût de production agricole de ces surplus comme coût de l'approvisionnement en matière première. Ce coût n'est pas obligatoirement monétaire, si par exemple le surplus de travail que cela occasionne ne représente pas une perte monétaire du fait d'une concurrence avec d'autres activités économiques. Mais cela représentera quand même un coût (le travail supplémentaire, au moins).

- **Si cette personne ne produit pas, et n'a pas l'intention de produire à l'avenir lui-même la totalité de la matière première dont il a besoin pour le séchage, il devra considérer comme coût de l'approvisionnement complémentaire le prix consenti par les autres producteurs de la zone, ou le prix additionné des coûts de transport de produits frais qu'il fait acheminer depuis d'autres zones. Le coût de la part de l'approvisionnement qu'il assure lui-même est défini par les règles précédentes.**

Remarque:

Les surplus occasionnels « non intentionnels » dont peut bénéficier un producteur agricole-sécheur ne représentent d'ordinaire qu'un faible volume: de 10 % à 30 % de sa production pour l'autoconsommation. Ils pourront être beaucoup plus élevés lors d'années particulièrement favorables sur le plan climatique, et nuls les mauvaises années.

Ce surplus moyen (10 à 30 %) provient de ce qu'un producteur qui ne veut assurer que son autoconsommation cultive cependant généralement un peu plus que ce dont il a besoin pour l'alimentation de sa famille, de façon à se prémunir des fluctuations de rendements et pertes agricoles, associées notamment aux aléas climatiques. Ce comportement face au risque est, en règle générale, d'autant plus marqué que les aléas sont importants et que l'agriculteur dispose de faibles réserves financières. Une part importante des pertes après récolte s'explique ainsi: le producteur ne peut évaluer qu'

l'étape ultime de sa production agricole si l'année a été bonne ou non. S'il n'envisage aucun usage pour les surplus d'une année, et que personne ne s'en porte acquéreur, il ne les récoltera probablement même pas.

Où implanter une unité de séchage?

Pour les unités de séchage de taille conséquente (plus de 10 tonnes par an de produit séché, titre indicatif), il faudra toujours se poser la question de savoir où implanter l'activité. Les coûts et la possibilité du transport sont en effet des données qui influent parfois très fortement sur la rentabilité économique de l'activité.

Cette question de la localisation reçoit ici une place relativement importante pour cette raison, mais aussi pour une autre: le séchage n'est pas seulement un moyen de conserver plus longtemps un produit alimentaire. C'est aussi, sous certaines conditions exposées par la suite, un moyen d'obtenir un produit commercialisable dont les caractéristiques rendent son prix de vente peu sensible à l'éloignement des marchés. Le séchage peut alors constituer une source de revenus monétaires dans des zones où la commercialisation de produits frais est quasiment impossible, du fait des coûts de transport et des risques de dégradation lors du trajet qui pèsent sur ces derniers.

La promotion de ce type de projets peut ainsi constituer un volet important du développement économique des régions les plus marginales, parce que les plus éloignées des centres de l'activité économique.

LES PARAMÈTRES DU PROBLÈME

Le choix de localisation va déterminer les besoins de transport, à l'amont de la chaîne première), et à l'aval (produit élaboré).

Doit-on se localiser plutôt à proximité des zones de production du produit frais ou à

proximité du marché? Et dans le premier cas, dans une zone de production conséquente où l'approvisionnement est garanti, ou une zone de moindre importance, mais où les prix du produit frais sont moins élevés?

Plusieurs aspects sont à analyser conjointement.

Le coût économique de l'acheminement des matières premières depuis des zones éloignées de l'unité de séchage

Le premier élément à considérer est le tarif du transport. Le tarif à la tonne-kilomètre (tonne de produit transportée, rapportée au kilomètre roulé) évolue en Afrique de l'Ouest de 30 FCFA/tonne-kilomètre pour une route goudronnée bien entretenue à 150 FCFA/tonne-kilomètre pour une piste de mauvaise qualité (en ordre de grandeur, pour un produit moyen et en francs CFA d'avant la dévaluation). Pour des pistes rurales de bonne tenue ou des routes goudronnées mal entretenues, l'ordre de grandeur est de 60 FCFA/tonne-kilomètre. Pour des produits tels que les fruits et légumes, ces ordres de grandeur doivent être augmentés de 30 % à 50 % (conditionnement et remplissage dans le camion plus difficiles). Cela signifie que transporter un kilogramme de tomates sur 300 kilomètres par une route de qualité moyenne revient approximativement à 25 FCFA. À titre de comparaison, on se rappellera que dans le cas précédent, une augmentation de 15 FCFA par kilogramme de mangues fraîches pouvait réduire à néant la marge bénéficiaire de l'entreprise d'Orodara au Burkina Faso.

Le deuxième élément des coûts d'acheminement de la matière première, et qui peut avoir plus d'implications sur les résultats économiques de l'entreprise, est la dégradation du produit au cours du transport. Si les routes sont particulièrement cahoteuses, il peut suffire d'un trajet de quelques dizaines de kilomètres pour rendre le produit frais, malmené, impropre à sa conservation, quel que soit l'efficacité de son séchage par la suite. Le coût économique de l'approvisionnement est alors beaucoup

plus élevé, puisqu'au coût du transport lui-même s'ajoute le coût d'achat d'une matière première qui sera éliminée en grande partie au premier tri.

Le troisième élément à considérer dans l'évaluation des coûts de cet acheminement est la durée du transport. Si les conditions de circulation sont difficiles, deux à trois jours, voire plus, peuvent devenir nécessaires pour acheminer le produit frais jusqu'à l'unité depuis des zones de production distantes de seulement une centaine de kilomètres. Si on ajoute à cette durée la durée du stockage amont, avant que la totalité du chargement du camion puisse être traitée et le temps passé par le produit dans le sêchoir avant qu'il ne soit « hors de danger », il peut s'écouler plus d'une semaine. Le produit sera alors sans doute impropre à la conservation.

La sécurité de l'approvisionnement

Une unité de séchage doit fonctionner au maximum de ses capacités si on veut pouvoir amortir convenablement ses frais fixes. L'approvisionnement doit donc être régulier, ou le stock de matière première suffisant pour assurer une relative autonomie. Dans le cas du séchage de produits frais qui se dégradent rapidement (c'est généralement le cas), ce stock ne peut malheureusement pas être très élevé, le produit devant être au plus vite séché. La régularité des livraisons de matière première doit donc être, à une ou deux journées près, parfaite. C'est parfois loin d'être possible en période de relative impraticabilité des pistes, en saison des pluies dans de nombreux pays.

Le coût de l'acheminement du produit jusqu'aux marchés

- Le coût du transport s'applique aussi bien aux intrants qu'au produit final.
- Le produit jusqu'au marché est beaucoup moins sensible aux chocs subis lors du trajet que ne l'est le produit frais. Il faudra toutefois s'assurer qu'il en est de même pour le conditionnement du produit, ce qui peut être un élément important lorsque l'on

viser une clientèle haut de gamme. Le produit peut par ailleurs souffrir du fait de dommages non mécaniques induits par le transport, par exemple s'il a été trempé accidentellement au cours du trajet.

- **Il n'existe que peu de risques de dégradation du produit séché du fait d'une trop longue durée de transport, excepté du fait d'une exposition prolongée aux intempéries ou du fait de la poussière du voyage (ce qui peut être aisément contrôlé par un bon conditionnement du produit et une bonne protection du chargement).**

La régularité de l'expédition du produit vers les marchés

Certaines filières de commercialisation, la filière d'exportation en particulier, sont très exigeantes quant au respect des délais de livraison du produit fini. Un retard de livraison du fait de mauvaises conditions de circulation peut nuire à l'image de l'entreprise.

La proximité de services annexes

À l'exception de la matière première, il existe peu d'intrants de production de l'activité de séchage qui exigent un approvisionnement régulier tout au long de l'année (la majeure partie des produits de traitement peuvent être stockés sur de longues périodes).

Il peut en revanche s'avérer utile de disposer de proximité de l'unité de services annexes, tel un artisan capable de réparer rapidement un dégât occasionné sur le séchoir, un garagiste pour l'entretien-réparation des moyens de transport, ou parfois simplement un téléphone qui fonctionne...

La mobilité du séchoir

Dans certains cas, le problème ne sera pas de choisir la bonne localisation d'une nouvelle unité de séchage, mais d'évaluer l'opportunité de modifier la localisation d'une unité préexistante. Ce peut être le cas si, par exemple, l'entrepreneur s'aperçoit, l'expérience aidant, que la localisation de l'unité n'est finalement pas la meilleure. Ce peut être aussi le cas si l'entrepreneur, après une période de « montée en puissance » de son activité de séchage, entreprend d'augmenter son volume de production et que cela n'est plus compatible avec, par exemple, le volume de la matière première disponible localement.

Il est moins de décider d'abandonner purement et simplement le séchoir actuel et d'en construire un nouveau sur le nouveau site envisagé, il faudra se poser la question de savoir si le séchoir, ou du moins ses parties les plus coûteuses, peut être transporté.

Les motivations de l'entrepreneur à changer de localisation ou des personnes appelées à suivre l'unité dans le cas de son implantation dans une autre zone

Quand bien même l'analyse montrerait l'intérêt de localiser le séchoir dans une zone qui n'est pas la zone de résidence de l'entrepreneur, celui-ci peut avoir de multiples et bonnes raisons de s'en tenir à une localisation de l'unité sur son lieu actuel de résidence:

- le séchage peut n'être qu'une des activités de cette personne;
- il peut y avoir un attachement à un lieu, à des personnes, ou une simple réticence à la migration;
- etc.

Dans la mesure où l'appréciation de ces derniers éléments appartient en propre à la personne concernée, il ne sera présent ici que les arguments qui permettent de mieux préciser les choix de localisation à faire, indépendamment de l'aptitude à la mobilité des personnes.

LES ÉLÉMENTS DU CHOIX

Le simple énoncé, non exhaustif, des paramètres qui peuvent intervenir dans un choix de localisation, suggère la complexité du problème, et la nécessité d'y répondre avec des nuances. La diversité des situations qui se présentent en zone rurale dans les pays en développement est telle qu'il n'est pas possible de fournir une réponse adaptée à chaque cas précis avant de le connaître dans le détail. Il est cependant utile de présenter ici quelques arguments relativement théoriques. Ils serviront de support à la réflexion plutôt que de réponse toute faite. De façon à contourner la difficulté qui consiste à traiter tous les cas concrets qui peuvent se présenter, ce paragraphe sera centré sur des « cas d'école » purement fictifs, mais où l'intéressé pourra retrouver certaines caractéristiques du problème auquel il est confronté.

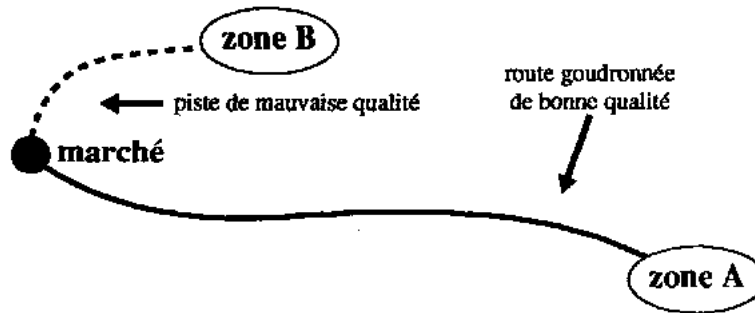
Pour l'instant, on n'a besoin que d'une donnée: le rendement du produit au séchage est de 15 kilogrammes de produit frais pour produire un kilogramme de produit sec.

Premier cas d'école

Je me situe dans un « pays imaginaire » représenté sur le schéma ci-dessous où il y a:

- un marché (une ville, un port à l'exportation...) où sont tous les clients du produit sec;
- une zone de production du produit frais appelée « zone A », située à 300 kilomètres du marché, et reliée par une route goudronnée de bonne qualité à celui-ci;
- une autre zone de production du produit frais appelée « zone B », est située à 100 kilomètres du marché et reliée à celui-ci par une piste de mauvaise qualité.

On considère d'autre part que le prix au producteur du produit frais est le même dans les deux zones, et que le produit ne peut être cultivé que dans ces deux zones.



Premier cas d'écoulement

En supposant que les coûts du transport sont ceux que l'on observe en moyenne en Afrique de l'Ouest, on cherche à savoir où implanter l'unité de séchage: dans la zone A, dans la zone B. ou à proximité immédiate du marché?

Il suffit pour cela de faire le calcul de la somme des coûts du transport du produit frais et du produit sec rapportés à un kilogramme de produit fini dans les trois cas de localisation.

Pour une localisation en zone A, le produit frais est disponible à coût de transport nul; le coût de transport total est donc celui du produit fini jusqu'au marché: $300 \text{ km} \times 0,025 \text{ FCFA/km}$, soit 7,5 FCFA par kilogramme de produit sec. Il en est de même pour une localisation dans la zone B. mais le coût de transport doit tenir compte des tarifs plus élevés sur une piste de mauvaise qualité, soit: $100 \text{ km} \times 0,150 \text{ FCFA/km} = 15 \text{ FCFA/kg}$ de produit sec.

Pour une localisation en proximité du marché, le transport du produit fini est négligeable, mais il faut faire venir la matière première depuis la zone A (plus proche sur le plan des coûts de transport, bien que plus éloignée géographiquement). Pour produire un kilogramme de produit fini, il faut 15 kilogrammes de produit frais. Le coût du transport est donc de: $(15 \times 300 \text{ km}) \times 0,025 \text{ FCFA/km} = 112,5 \text{ FCFA}$ par kilogramme de produit sec.

On peut tirer deux remarques de ce cas d'école:

- la distance géographique n'est pas le seul paramètre qui intervienne dans les coûts du transport. La qualité des infrastructures de transport importe tout autant. Ici, l'option « localisation en zone B » induit des coûts de transport deux fois plus élevés que pour la zone A, alors que cette zone est trois fois plus proche du marché;

- l'option d'une localisation en proximité du marché ne se justifie pas dans ce cas d'école: cela coûte quinze fois plus cher en coûts de transport par rapport à une localisation en A, sans compter les risques de dégradation du produit frais transporté sur 300 kilomètres.

Deuxième cas d'école

On suppose maintenant qu'il existe une troisième zone de production, appelée « zone C », en proximité du marché.

On suppose de nouveau que le prix au producteur pour le produit frais est le même dans les trois zones. La réponse est alors immédiate: c'est la proximité du marché, en zone C, qu'il faut s'implanter (coûts de transport négligeables pour le produit frais comme pour le produit sec).

Troisième cas d'écoulement

Conservons le cas des trois zones A, B et C. Supposons maintenant que les prix au producteur du produit frais sur les trois zones sont déterminés par des règles de marché simplifiées :

- il existe un prix de marché en C du produit frais de 50 FCFA/kg;
- les marges de la commercialisation sont de 15 FCFA/kg;
- les prix proposés aux producteurs par les commerçants dans les trois zones sont égaux au prix de marché, diminués des marges de commercialisation et des coûts de transport du produit frais de chaque zone jusqu'au marché.

Quelle est alors la localisation la plus rentable?

Il suffit dans ce cas de calculer la somme du coût de l'achat de la matière première dans chacune des trois zones, et le coût de transport du produit fini depuis ces trois zones.

Le prix du produit frais en A est calculé par: prix d'achat - marges de commercialisation - coûts de transport, soit: $50 - 15 - (300 \times 0,025) = 27,5$ FCFA par kilogramme de produit frais.

Son prix en zone B est de: $50 - 15 - (100 \times 0,15) = 20,0$ FCFA par kilogramme de produit frais.

Son prix en zone C est de: $50 - 15 = 35,0$ FCFA par kilogramme de produit frais.

Il faut 15 kilogrammes de produit frais pour produire un kilogramme de produit sec. Le coût total de l'approvisionnement en produits frais et d'écoulement du produit fini est donc de:

- **300. 0,025 + 15 x 27,5 = 420 FCFA par kilogramme de produit sec pour l'option « zone A »;**

- **100. 0,150 + 15 x 20,0 = 315 FCFA par kilogramme de produit sec pour l'option « zone B »;**

- **0. 0 + 15 x 3 5,0 = 525 FCFA par kilogramme de produit sec pour l'option « zone C ».**

Dans ce cas d'écologie, c'est en zone B. la plus éloignée du marché du point de vue des coûts de transport, que la localisation de l'unité de séchage est la plus intéressante sur le plan économique. Cela s'explique par le fait que, dans le cas traité, c'est la zone où le séchage entre le moins en concurrence avec la vente de produit frais.

Le rapport avec la réalité

Les données des deuxième et troisième cas d'écologie, pour extrêmes qu'elles puissent paramétrer les unes par rapport aux autres en ce qui concerne la «géographie des prix », n'en ont pas moins leur équivalent dans la réalité. Dans un contexte national de surproduction de produits maraîchers, c'est le cas au Burkina Faso en ce moment, le prix des produits maraîchers est au plus bas pendant les périodes de récolte. Le déséquilibre entre offre et demande est à ce moment tel que les prix au producteur sont très faibles, même dans les zones les plus proches des villes. Les unités de séchage se développent donc assez naturellement plutôt à proximité des marchés, puisque les inconvénients sont réduits et les avantages nombreux (en particulier, présence à proximité d'une production suffisante pour garantir l'approvisionnement du séchoir, proximité des services annexes et du marché). Mais il faut tout de même, dans ce cas précis, conserver à l'esprit qu'il peut ne s'agir que d'une situation temporaire.

Dans d'autres pays où la production de produits maraîchers pour le marché est

stabilisé de longue date (cas du nord Nigeria dans la zone sahélienne par exemple), la réalité se rapprochera bien plus des hypothèses du troisième cas d'école. Ce dernier n'est en effet pas si éloigné de la réalité que la simplicité de ses hypothèses semble le suggérer. L'exemple de la formation dans l'espace des prix du mil au Mali, fourni ci-dessous, en est une illustration.

Formation spatiale des prix d'un produit alimentaire Le cas du mil au Mali

Les différences de prix du mil sur les marchés du Mali sont relativement spectaculaires. En considérant les données hebdomadaires des prix de marché du mil, mises en moyennes corrigées des variations saisonnières sur la période début 1991- début 1995, on s'aperçoit que le prix du mil est de 45 FCFA/kg sur les marchés ruraux de l'Ouest du Mali, qui est la principale zone de surplus de cette céréale dominante au Mali, atteint 55 FCFA/kg sur le marché de San, 60 FCFA/kg sur le marché de Ségou, et 75 FCFA/kg sur le marché de Bamako. L'exception d'une marge supplémentaire de 5 FCFA/kg sur le marché de Bamako, ces différences de prix moyens sur les marchés s'expliquent totalement par les différences de coût de transport jusqu'à Bamako, capitale du pays et principal marché final pour le mil.

Dans le cas d'un produit alimentaire et d'un pays pour lesquels les offres, demandes et prix sont relativement stabilisés, il apparaît a priori préférable d'implanter les unités de séchage au-delà de la zone où cette activité entre en concurrence avec la commercialisation de produits frais. Un certain nombre d'éléments doivent être pris en compte pour moduler cette première appréciation:

- un entrepreneur dynamique n'aura peut-être pas envie de s'installer dans une zone très reculée (le choix lui appartient);
- le manque de proximité de services annexes peut devenir une contrainte majeure pour le bon fonctionnement de l'unité;

- le volume de production de surplus alimentaires n'est pas levé dans les zones éloignées des consommateurs de ces surplus (les marchés urbains ou l'exportation); peut alors se poser un problème d'approvisionnement en quantités suffisantes de matière première pour le séchage. L'entrepreneur sera alors peut-être amené à proposer dans cette zone des prix d'achat du produit frais incitatifs pour augmenter la production de la zone (tout dépend ici de la taille de l'unité qu'il a envisagé, de savoir si les agriculteurs de la zone ne produisaient pas de surplus auparavant uniquement parce qu'il n'y avait pas de demande, etc.).

