#### 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)

#### 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 Dudez, GRET (Groupe de recherche et d'échanges technologiques), France.

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

## 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 éditions du GRET.

La technique du séchage des produits alimentaires, présentée en détail dans cet ouvrage, ne s'entend cependant pas au sens le plus étroit du terme. Tout au contraire, la technique est appréhendée ici non pas comme une fin en soi, mais :

- comme un moyen de répondre à des objectifs clairement définis (quel projet souhaite-t-on ?);
- comme un outil dont la définition doit dépendre des paramètres de son environnement (savoir-faire, disponibilité locale en matériaux, contraintes d'approvisionnement en produit frais...);
- comme un investissement qui doit rapporter plus que ce qu'il ne coûte, au sens large (c'est-à-dire sur la base de coûts et d'avantages qui ne sont pas que monétaires);
- comme un choix qui doit être meilleur que d'autres options envisageables (le séchage n'est pas une panacée, et encore moins un type de séchoir particulier. Ils ne doivent être envisagés que si ils correspondent bien au choix optimal).

Cet ouvrage a beaucoup emprunté à l'ancienne édition de 1986. Il en diffère néanmoins sur plusieurs points :

- les réussites enregistrées ces dix dernières années dans la conduite de projets de séchage ont pu être « capitalisées ». Il existe maintenant de nombreux types de séchoirs bien éprouvés qui peuvent être soumis à l'appréciation du lecteur;
- une place plus grande a été donnée aux conditions de réussite des projets de séchage, en particulier sur les plans de leur adéquation aux contextes locaux et de leur intérêt socio-économique;
- 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.

## Sommaire

#### 15. Introduction

#### PREMIÈRE PARTIE

## L'environnement d'une activité de séchage

- 19. *Chapitre I*L'évolution des pratiques de séchage
- 33. Chapitre II

  La filière de séchage. Du produit frais à la consommation du produit séché.
- 55. Chapitre III

  Avant tout, bien définir le projet

#### DEUXIÈME PARTIE

## Notions de base sur le séchage des produits alimentaires

- 75. Chapitre IV
  Les grands principes du séchage
- 107. Chapitre V Éléments pour le dimensionnement des séchoirs
- 155. *Chapitre VI*Exemples de séchoirs types

1 1

187. *Chapitre VII*Conduire une activité de séchage

215. Chapitre VIII Éléments d'évaluation économique des projets

#### TROISIÈME PARTIE

#### Ouelques notions approfondies sur le séchage

253. Chapitre IX Éléments d'approfondissement de la théorie du séchage

281. *Chapitre X*Mesurer et contrôler le séchage

305. *Chapitre XI* Exemples de calculs

#### **ANNEXES**

- 319. Annexe I

  Tableau de conversion des unités
- 321. Annexe 2
  Calcul de l'énergie solaire reçue par une surface
- 325. Annexe 3
  Caractérisation des matériaux de construction
- 328. Annexe 4
  Une grille d'analyse de la disponibilité en énergie solaire sur le site de séchage
- 331. Annexe 5
  Quelques exemples de projets de séchage
- 337. Annexe 6
  Table psychrométrique
- 338. Annexe 7
  Pour en savoir plus

#### 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 à 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 s marchés urbains nationaux en produits frais. Mais un manque de régulation ns les équilibres entre cette offre et cette demande, conduit de façon chronique les invendus de production. À défaut de pouvoir être stockés sur le moyen me, ces invendus se transforment rapidement en « pertes agricoles ». Le chage 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 ujours essentiellement dans les zones qui ont accès au marché (urbain et/ou ternational). En effet, au delà d'un certain coût de transport jusqu'à ces archés, il existe peu d'opportunités de vente de surplus agricoles à bon prix. Es produits séchés disposent à 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).

À ce double titre, la promotion du séchage solaire peut devenir, sous certaines onditions, un outil du développement économique dans les zones les plus eculées.

Le présent document vise à faire le point sur les différentes étapes de réflexion écessaires 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 roduit à sécher, car c'est la technique la plus simple et la plus efficace pour les ammes de production envisagés ici (traditionnel à semi-industriel). Par illeurs, et sans pour autant négliger les autres sources d'énergie, l'accent est nis sur le séchage solaire. C'est la source d'énergie la moins coûteuse et la plus acile 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 influer 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 décompose en cinq chapitres :

- le chapitre IV, qui expose les phénomènes biochimiques susceptibles d'induire une dégradation du produit frais, l'impact du 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.

## PREMIÈRE PARTIE

L'environnement d'une activité de séchage



# 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

•

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 energie, raire 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 (approvision-nement 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 (destructuration 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 céréalière.

### es enjeux nouveaux, liés à l'apparition de nouveaux marchés

Des études de marché récentes, notamment en Europe, ont mis en évidence ne 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'approvisionment tels que cela nécessiterait la mise en place, dans les pays du Sud, l'unités de séchage semi-industrielles. Les enjeux sont multiples : création l'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 protéïnés a fortement augmenté, du fait de l'apparition de nouveaux créneaux 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 à 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 à 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 séchoirs 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 séchoirs.

Dans un rapport sur les séchoirs solaires diffusés au Sahel (1) en 1988, seuls trois séchoirs 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.

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 concernées 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

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 :

- 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 détériore.

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 à l'écoute 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

<sup>(1)</sup> CEAO/CILSS/CRES, Madibo Diko, 1988.

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 ou 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 a 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 séchoirs 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 établi 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 à 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 avec 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.

#### DÉFINIR UNE STRATÉGIE DE DIFFUSION DES SÉCHOIRS

Il ne suffit pas de disposer d'un modèle adapté 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 pérenne des pratiques.

Pour dépasser le stade du prototype ou de la dizaine d'exemplaires, c'est une démarche indispensable.

## Les voies actuelles de la recherche

Depuis une trentaine d'années, de multiples travaux ont été menés dans les différents domaines techniques de la pratique du séchage :

- mise au point de séchoirs;
- traitement des produits;
- détermination d'allures de séchage ;
- méthodes de conditionnement...

En ce qui concerne la mise au point des séchoirs, il reste encore des améliorations et des adaptations à faire (utilisation de sels dessicateurs, amélioration des couvertures transparentes à coût faible, stockage thermique...). Comme on l'a vu précédemment, il faut, afin d'apporter la meilleure réponse possible, opter systématiquement pour une recherche interactive impliquant les personnes concernées. Les méthodologies de recherche dans ce domaine ont évolué (association aux recherches de socio-économistes...).

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. Là 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...

## 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



## Définir une filière de séchage

THE PARTY

\*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. À 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 décompose 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 (Tm) 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 SÉCHAGE

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 séchoirsont 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** 

SÉCHAGE

Assez délicat

SOURCES DES INFORMATIONS

**GERES** 

#### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Découpage de la viande au choix :

- en morceaux cubiques de 2 à 3 cm de côté
- en lanières fines de 1 à 1,5 cm d'épaisseur

#### Ingrédients

- eau
- sel facultatif
- 2. Mettre directement dans le séchoir, un prétraitement préalable est possible :
  - fumage et/ou salage
  - trempage pendant 1 minute dans une solution saline saturée à ébullition

#### PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

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.

- 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.

-- PEOPERMICE

**POISSON** 

SÉCHAGE Délicat

SOURCES DES INFORMATIONS

Ingrédients

- sel facultatif

- eau

GERES

## LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Évidage 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 SÉCHAGE

Teneur en eau initiale

Teneur en eau finale recommandée

Température maximale

Rapport de séchage

Critère de fin de séchage

75 %

25-30 %

55°C

1/3 ou 1/4 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
- 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 recherchée 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 Teneur en eau finale recommandée Température maximale	20 % 16 % 45°C	35 % 13-15 % 60°C pour la germination	21 % 14 % 60°C

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

ABRICOT et PÊCHE

SÉCHAGE

Facile

SOURCES DES INFORMATIONS

**GERES** 

Ingrédients

- bicarbonate

facultatif

de potassium

#### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

- 1. Épluchage
- 2. Dénoyautage
- 3. Découpage au choix :
  - coupé en deux
  - tranches de moins de 1 cm d'épaisseur
  - quartiers
- 4. Mettre directement dans le séchoir, un prétraitement préalable est possible

#### PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

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

CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

SOURCES DES INFORMATIONS

Ingrédients

- sucre conseillé

- eau

#### 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)

#### PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

Teneur en eau initiale 70 % 15% Teneur en eau finale recommandée 70°C Température maximale

1/10 pour séchage sans trempage préalable Rapport de séchage

1/5 pour séchage avec trempage préalable

1 an CONSERVATION

#### CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

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

- 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 à raison de 3 g de métabisulfite par litre d'eau utilisé.

MANGUE et PAPAYE

séchage Assez facile

SOURCES DES INFORMATIONS
CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

Ingrédients

- sucre facultatif

- jus de citron

- eau

### 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 à 15 %

Température maximale Rapport de séchage

70°C, 55°C en dernière phase de séchage

1/10 pour séchage sans trempage préalable

Critère de fin de séchage

1/5 pour séchage avec trempage préalable

Consistance élastique, couleur brun doré

CONSERVATION

1 à 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 brunissement.
- 2. Prétraitements possibles : trempage pendant 30 mn dans une solution de métabisulfite de sodium à 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** 

SÉCHAGE

Facile

SOURCES DES INFORMATIONS
CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

#### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

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

Ingrédients

- eau

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.

- 1. Les rondelles peuvent être blanchies avant le séchage :
  - laisser 3 minutes dans de l'eau bouillante ou 5 minutes à la vapeur. Attention à 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 à déconseiller dans le cas d'un séchage lent car le chou blanchi risque de fermenter.

Ingrédients

- bicarbonate

facultatif

- eau

NOM DU PRODUIT

**GOMBO** 

SÉCHAGE Facile

SOURCES DES INFORMATIONS

CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

#### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

Ingrédients

- eau

1. Lavage

2. Tri

3. Découpage en rondelles de 1 cm d'épaisseur, en tranches ou entier pour les petits specimens

4. Mettre directement dans le séchoir

#### PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

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.
- À 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.

SÉCHAGE

Facile

SOURCES DES INFORMATIONS
CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

#### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage

2. Équeutage (ôter les fils)

NOM DU PRODUIT

HARICOT VERT

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 SÉCHAGE

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.

**OIGNON** 

SÉCHAGE

Facile

SOURCES DES INFORMATIONS

CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

Ingrédients

sel facultatif

eau

#### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

- 1. Épluchage
- 2. Lavage
- 3. Découpage au choix :
  - rondelles (séchage rapide et forme adaptée à l'utilisation courante)
  - lamelles (séchage 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 SÉCHAGE

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 \*

#### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage

2. Découpage au choix (retirer les pépins) :

- rondelles

- lamelles de 1 cm de largeur

Ingrédients

- eau

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

Température maximale 65 à 70°C Rapport de séchage 1/11 à 1/14

Critère de fin de séchage Produit cassant 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.

<sup>\*</sup> ALEWTINA BA Valkova, DOUMBIA Bakary (chercheurs à 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.

المارية المراجعة المارية المارية

POMME DE TERRE

SÉCHAGE

Assez délicat

SOURCES DES INFORMATIONS

IBE \*

Ingrédients

- métabisulfite

- eau

- sel

#### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage

2. Pelage

3. Découpage

- en rondelles fines de 3 à 5 mm d'épaisseur

- en forme de frites

4. Prétraitement conseillé, au choix :

- blanchir 9 mn dans une eau bouillante salée

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

#### PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

Teneur en eau initiale 75 % Teneur en eau finale recommandée 13 % Température maximale 70°C Rapport de séchage 1/7

Critère de fin de séchage Produit croustillant et cassant

CONSERVATION 4 à 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.

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

NOM DU PRODUIT

**TOMATE** 

SÉCHAGE

Délicat

SOURCES DES INFORMATIONS CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

### LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

1. Lavage

2. Découpage de 1 cm d'épaisseur, au choix :

- rondelles

- lamelles

3. Mettre directement dans le séchoir

Ingrédients

- eau

#### PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

Teneur en eau initiale	95 %
Teneur en eau finale recommandée	10 %
Température maximale	65°C
Rapport de séchage	1/10

Consistance du cuir Critère de fin de séchage

12 mois maximum CONSERVATION

#### CONSEILS POUR LA CONSOMMATION

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

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

**CAROTTE** 

SÉCHAGE Facile

SOURCES DES INFORMATIONS

CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES

Ingrédients

métabisulfite

- eau

## LES ÉTAPES DE PRÉPARATION CONSEILLÉES

- 1. Lavage
- 2. Épluchage
- 3. Découpage au choix :
  - dés (1 à 2 cm)
  - rondelles
  - lamelles de 2 cm d'épaisseur
- 4. Un prétraitement est recommandé avant le séchage :
  - blanchiment à la vapeur pendant 8 mn des carottes découpées
  - trempage pendant 1 mn des morceaux dans une solution de métabisulfite (12 g

### PARAMÈTRES DE SÉCHAGE

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 prétraitement, le produit devient pâle : 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



## 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

## Présentation des différents systèmes de séchage

Il existe quatre grands systèmes de séchage :

- le séchage tout solaire à convection naturelle ;
- le séchage tout solaire à convection forcée;
- le séchage tout combustible fossile;
- le séchage hybride solaire/autre énergie.

#### LE SÉCHAGE TOUT SOLAIRE À 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 à l'air libre (sans équipement);
- les séchoirs solaires directs (les rayons solaires frappent directement les produits à 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 à l'air libre, on se contente simplement de poser le produit à sécher au soleil. Le rayonnement solaire augmente la température du produit. Les mouvements de l'air et le vent enlèvent l'eau du produit affluant à 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 À CONVECTION FORCÉE

Ce système permet d'accélérer 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

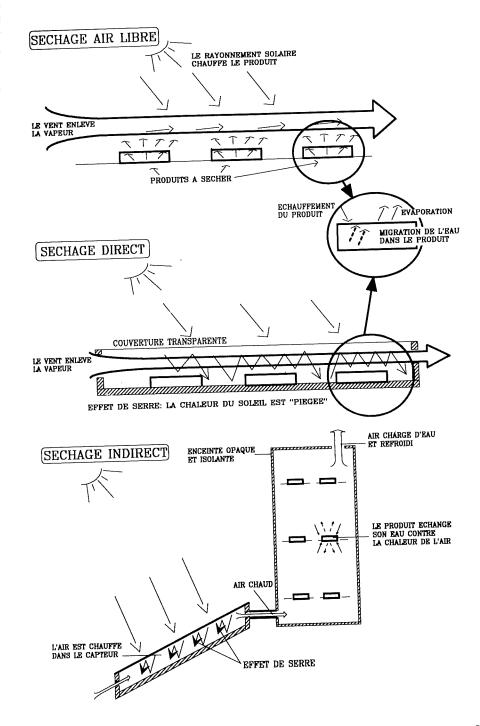
L'énergie solaire n'est plus utilisée, même en appoint; un combustible fournit seul l'énergie thermique nécessaire au chauffage de l'air.

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 :

- 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'autres 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.

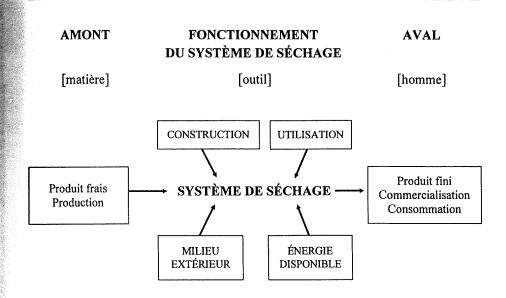
L'utilisation de ces différents systèmes est présentée et illustrée dans la deuxième partie.

# 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

C'est la première étape d'un montage de projet de séchage, qui permet de la contraction 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.



#### 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 à 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 culturaux utilisés pour savoir dans quelle mesure on peut intervenir à ce niveau (meilleure qualité, étalement 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 :

- 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 de 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

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

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 à des impératifs différents de ceux auxquels devra répondre un séchoir destiné à un groupement de maraîchers.

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, à la surveillance et à l'entretien du séchoir sera à 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 à 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 à bien le définir. L'analyse de l'aval est tout particulièrement importante lorsqu'il s'agit de mettre en place une unité à 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 séchée 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 ?
- Aviez-vous déjà consommé de la mangue séchée ?
- Si oui, était-ce ce produit ?

#### Qualités du produit

- $\bullet\,$  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 hygiénique, 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 ?

#### ÉNERGIE DISPONIBLE

Une source énergétique est nécessaire pour chauffer l'air d'entraînement. On détermine au préalable la puissance de chauffe nécessaire puis, en fonction de la disponibilité et du coût des équipements rapporté au kWh, à déterminer quelle sera la ou les sources d'énergie 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 nécessitent une importante capacité de stockage alourdissant les coûts d'investissement. L'annexe 4 propose une méthode simplifiée d'analyse de la disponibilité en énergie solaire sur le site de séchage.

Pour faire face à un problème de disponibilité, on peut envisager de combiner deux ou plusieurs sources énergétiques (cas des séchoirs hybrides).

Dans un contexte artisanal (semi-industriel), le choix du système est conditionné par la disponibilité en électricité qui seule permet l'utilisation d'un ventilateur puissant et performant pour des débits d'air élevés. L'expérience acquise dans la mise au point de séchoirs de grande capacité montre en effet que l'usage de l'électricité 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, cf. 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 solaire 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 convection naturelle, il exerce une pression supplémentaire en complément à 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

### 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, différentes 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 à 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 : À 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 ?

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):

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 sahélienne, d'un séchoir solaire domestique, les séchoirs les plus performants (rendement énergétique et de séchage) sont délaissés au profit de séchoirs 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 séchoir.

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.

## 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'écarter 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 à 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.



## Les grands principes du séchage

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

•

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'entraînement 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 échauffé 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
Légumes frais Tomate Haricot vert Fruits frais Orange Mangue Banane Chataîgne	93 89 87 81 75 52	1 2,4 1 0,4 1,4 4	0,3 0,2 0,2 0,1 0,5 2,6	4,6 8,4 9,8 17,5 20 42	0,6 0,5 - -
Viandes mi-grasses Boeuf, mouton Porc Viandes maigres Cheval Poulet Poisson maigre (colin) Poisson gras (thon)	60 55 75 70 80 60	17 16 21 21 17 26	20 25 2 8 2 * 13 *	0,5 0,5 1 -	1,3 1,2 1 1,4 1,6 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 à 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'aptitude 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
- 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.

# Évolutions 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...)
- 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 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 à cause de la couleur qu'il donne au

Il est favorisé par l'oxygène, par un pH compris entre 5 et 7 et par les manipulations qui blessent le produit (chocs, épluchage, parage...). Il est limité par les faibles teneurs en eau dans le produit, les traitement 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 compart de l'aliment.

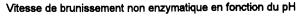
Elles sont par exemple en partie responsables de la transformation du sucre en caramel, de la croûte dorée du pain, de la couleur, du goût, de la saveur des pommes frites ou des viandes rôties...

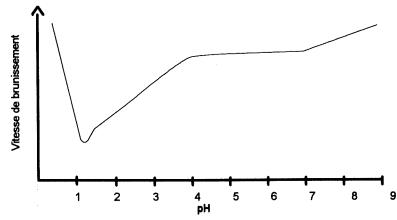
Elles peuvent cependant aussi modifier le goût d'un aliment jusqu'à le rendre inconsommable. Selon les aliments et les habitudes culinaires d'une population, elles peuvent donc être recherchées ou non.

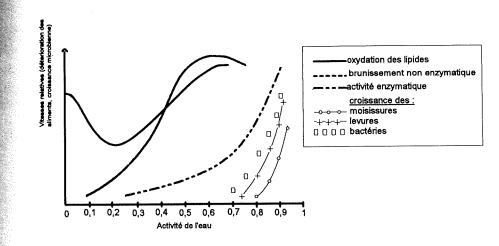
En général, elles constituent plutôt un facteur limitant pour la conservation des aliments déshydratés. Elles abaissent également leur valeur nutritionnelle.

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.







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'accélère 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.

# L'eau dans le produit

# DÉTERMINER LA QUANTITÉ D'EAU À ÉVACUER

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 épluchées 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.

<sup>(1)</sup> Inhibiteur : substance permettant de bloquer ou de ralentir une réaction chimique.

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 épluchée 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 à teneur initiale de 75 % plutôt que de 85 %, et trois fois moins pour un produit à 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 adsorption.

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)

EAU NON ADSORBEE ET SOLVANTE (EAU"LIBRE")		EAU DE 4ème TYPE: EAU D'IMPRENIATION (AU DESSUS DE 27%)
EAU FAIBLEMENT ADSORBEE MAIS SOLVANTE		EAU DE 3ème TYPE: EAU "OSMOTIQUE" (13-27%)
EAU FORTEMENT ADSORBEE NON SOLVANTE: LIAISONS PAR FORCES DE VAN DER WAALS		EAU DE 2ème TYPE: COUCHE POLYMOLECULAIRE (5-13%)
DE TAN DER HARDE	(00 0000000) (00 0000000)	EAU DE 1er TYPE: COUCHE MONOMOLECULAIRE (0-5%)

MATIERE BIOLOGIQUE

Les proportions d'eau plus ou moins adsorbée dépendent de chaque produit. Pour les produits les plus hydratés tels la plupart des fruits et légumes, 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 capilarité 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 céréales).

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 ÉVAPORER 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 maximale 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 à 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 g/kg d'air sec, dans 1,01 kg d'air on a 1 kg d'air sec et 10 g de vapeur d'eau.

- l'humidité relative (degré hygrométrique), 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 être 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 début du séchage. De la sorte, et pour ce début de séchage, le pouvoir évaporatoire exprime, en première approximation, la quantité d'eau extraite du produit par nombre de mètres cubes d'air ayant traversé le séchoir. Pour affiner cette approximation, il faut par la suite tenir compte de ce que l'air ne sortirait du séchoir à saturation que si :

- les échanges d'eau à la surface air/produit étaient parfaits, ce qui n'est pas le cas dans la réalité;
- 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 près des parois et relativement loin du produit et n'a pas le temps, lors de sa progression dans le séchoir, d'accumuler toute l'eau dont il peut se charger).

### Pouvoir évaporatoire de l'air en grammes d'eau par mètre cube d'air

Froid et sec : la Sibérie

Chaud et sec : le Sahara

Humidité relative			Tem	pérature	de l'air ei	ı°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	1,9	2,1			
80	0,9	. 1	1,1	1,2				
90	0,5	0,5	0,7	7 Tigori 18 Tigori 18 Tigori				3

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 agroalimentaires 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.

# PÉRIODE 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. le 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 dû 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, présentée 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 résorbtion du croûtage: Dans le cas de séchoirs 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 réhumidifier 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 liée. 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 liée, 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 à 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 de l'eau liée, l'air de sortie du séchoir n'est plus chargée d'eau à sa pleine capacité (saturation).

### ALLURES DE SÉCHAGE

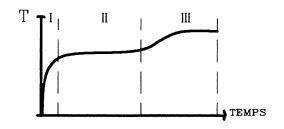
Selon les produits, d'importantes variations peuvent exister dans les durées respectives de ces trois phases. Dans le cas des produits à particules ou à feuilles, la phase I est quasiment inexistante. La phase II n'existe pas toujours. Enfin, la phase III peut être divisée en plusieurs périodes.

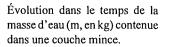
Les évolutions en cours de séchage de paramètres tels que la masse d'eau dans le produit, sa température ou la vitesse du séchage, sont propres à chaque produit. Elles sont déterminées expérimentalement en laboratoire, en séchage continu, et sont représentées sous forme de courbes appelées allures de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

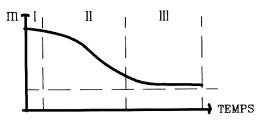
# INFLUENCE DE LA TAILLE ET DE LA DISPOSITION DU PRODUIT LORS DES TROIS PHASES

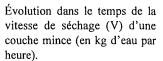
En règle générale, quelle que soit la phase de séchage, on a intérêt à augmenter la surface d'échange air/produit (petits morceaux, étalement sans que les morceaux se touchent, couches minces...). Ceci présente plusieurs avantages qui seront précisés par la suite, au chapitre VII. Ne sont présentés ici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

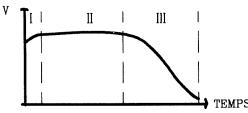
- une telle mesure permet de diminuer la durée de la première phase : plus les morceaux sont petits et en couche mince, plus le produit atteindra rapidement la température à partir de laquelle le séchage est efficace (moindre inertie thermique);
- en deuxième phase, l'évaporation s'effectue en surface 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, évoqué 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).











Évolution dans le temps de la température T du produit à sécher.

### PHASE I

La chaleur de l'air sert surtout à chauffer le produit (T augmente). L'évaporation augmente progressivement.

### PHASE II

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.

### PHASE III

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 céréales, 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 porté à 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 abordée 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 à de tels taux d'humidité relative de l'air ;
- essayer d'arriver rapidement à de faibles activités de l'eau dans le produit ; cependant, il existe deux obstacles majeurs à 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 à l'intérieur du produit. L'intérieur de l'aliment restera donc à de fortes teneurs en eau et ne sera pas stable microbiologiquement.
  - Un séchage rapide est en général lié à 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 à de très faibles teneurs en eau;
- d'effectuer un cycle de séchage complexe quand le séchoir est régulable. Exemples : En phases I et II, séchage rapide à température élevée à 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 GOÛT 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 :

- à haute température (le croûtage et le risque de brunissement non enzymatique étant des facteurs limitants);
- mené à l'abri de la lumière (le séchage solaire direct est donc à éviter pour les produits les plus sujets à ces réactions);
- conduit à 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 à 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 à leur volume, à 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 mené jusqu'à des activités de l'eau inférieures à 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 arômatiques ;
- 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> <li>Le produit peut être dégradé en phase III du séchage, par un échauffement excessif.</li> <li>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.</li> </ul>	<ul> <li>En fin de séchage, couvrir partiellement le produit où le capteur quand le soleil est au plus haut.</li> <li>Couvrir complètement le séchoir pendant la nuit pour l'isoler des conditions climatiques nocturnes.</li> </ul>

# Jusqu'où mener le séchage?

Le séchage d'un produit doit être mené jusqu'à 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 élevée 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 ai 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 hygrométri-

que 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 un 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 attaché 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, étalé 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.



# Éléments pour le dimensionnement des séchoirs

Avertissement

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

Production de l'énergie requise

# 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 variétés 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 séchoir dépendra d'habitudes et d'attentes socioculturelles diverses. Ce mode opératoire doit être intégré dans la conception du séchoir lui-même;
- la conception du séchoir 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 séchoir ou pour sa maintenance, et le savoir-faire des artisans.

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

Cela étant dit, il faut considérer que, pour la gamme de séchoirs abordée dans ce document (séchoirs 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 séchoirs en pays en développement sont de ce fait limitées. On pourrait :

- développer des « séchoirs 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 séchoirs types et de la faible variation dans l'usage de chacun d'eux, cela limite les choix. Les principaux séchoirs 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 soimême 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 séchoir ;
- 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 à se poser 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 à 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 prévisionnel 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 prévisionnel 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 Variété	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	Total
Amélie (T) Kent (T) Brooks (T)	3,2	10,5 2,3	5,8 7	9 3,8	2,3 10,5	12,8	3	19,5 20,6 30,1
Total matière première	3,2	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	3	70,2
Pulpe enclayée (T) Eau enlevée (T)	1,3 1,1	5,1 4,3	5,1 4,3	5,1 4,3	5,1 4,3	5,1 4,3	1,2 1,0	28,1 23,4
Mangue séchée produite	0,2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,2	4,7

Le cas d'un séchage de produits frais achetés à d'autres producteurs

Si l'entrepreneur qui élabore un projet de séchage prévoit d'acheter au moins une partie de la matière première auprès d'autres producteurs, les termes du problèmes sont modifiés dans deux directions opposées :

- il n'y a plus de limite a priori à 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 sur 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 à chaque cycle, ou durée de cycle plus longue et plus de produit traité à 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 à 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:

À durée identique, le temps passé dans le séchoir compte beaucoup plus que le temps passé en stockage amont : les microbes se développent beaucoup plus facilement aux températures élevées (du moins tant que l'on n'atteint pas une température de « stérilisation thermique » qui les tue).

# 4. Quelle quantité d'eau doit-on enlever du produit ?

La question de la quantité d'eau à extraire selon les produits a déjà été abordée au chapitre précédent. La méthode de calcul est reprise ici sous une forme plus mathématique.

La masse d'eau à extraire correspond à ce qu'il faut retirer du produit pour le faire passer d'une teneur en eau initiale donnée, caractéristique du produit frais et indiquée sur les « fiches produit », à une teneur en eau finale donnée,

fournie par une norme technique assurant la conservation du produit considéré, elle aussi fournie dans les « fiches produit ». La relation qui s'établit entre ces termes s'écrit :

$$M_e = \frac{(m_i - m_f) M_i}{100 - m_f}$$
 (en kg d'eau par kg de produit frais à sécher)

### avec:

- m<sub>i</sub>: teneur en eau initiale du produit frais (en %);
- m<sub>f</sub>: teneur en eau finale du produit séché (en %);
- M<sub>e</sub>: quantité d'eau à extraire du produit (en kg);
- M<sub>i</sub>: quantité à sécher de produit frais après parage (en kg), le parage étant l'opération initiale de retrait de la peau et des déchets du produit frais.

# **Rem**arque :

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 (en %)** = 
$$\frac{\text{m. }100}{100 - \text{m}}$$
 et  $\text{m} = \frac{\text{X. }100}{100 + \text{X}}$ 

### 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 divisée par la durée de ce cycle. Il doit correspondre à la capacité de production envisagée, à un éventuel léger surdimensionne-

ment 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 prétraitement 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 :

 $V_{em} = M_e / T_s$  en kg d'eau enlevée par heure, avec :

- V<sub>em</sub> : vitesse d'enlèvement de l'eau (en kg/h) ;
- Me: masse d'eau à extraire (en kg);
- T<sub>s</sub>: durée idéale du séchage pour le produit considéré (en heures).

Remarque: La vitesse d'enlèvement V<sub>em</sub> est indicée « 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 ?

À 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 ?

À 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				Tempér	ature de l'a	ir en °C		
relative en %	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 (à 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				Tempéra	ature de l'a	ir en °C		
relative en %	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 évaporatoire de l'air, en fonction de sa température et de son humidité relative (en grammes d'eau par kg d'air sec) : différence « Tableau 2 - Tableau 1 »

Humidité				Tempéra	ature de l'a	ir en °C		
relative en %	20	30	40	50	60	70	80	90
10	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 quantité d'eau du produit peut-on retirer avec un mètre cube d'air ?

# Le cas simple

À titre de rappel, si l'échange de vapeur d'eau entre le produit et l'air était parfait et concernait la totalité de l'air circulant dans le séchoir, 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-à-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 près pour la conversion kg/m³).

# 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 échanges d'eau entre le produit et l'air présentés 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 à l'eau du produit du temps pour migrer correctement de l'intérieur vers l'extérieur du produit. Il faudrait d'autre part laisser à l'air le temps de récolter l'eau arrivée en surface du produit. Il faudrait enfin laisser à 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 à 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 à 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 à 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 :

$$H_{rm} = \frac{1}{2} (100 + H_{rs})$$

### avec:

- H<sub>rm</sub>: humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en moyenne sur la durée totale du séchage (en %);
- H<sub>rs</sub>: 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) à 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 :

 $\rho_{air}$ .  $(x_m - x_a)$ , exprimée en grammes d'eau par mètre cube d'air ayant circulé dans le séchoir, avec :

- $\rho_{air}$ : masse volumique de l'air sec : 1,2 kg/m<sup>3</sup>;
- x<sub>m</sub>: 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<sub>a</sub>: 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<sub>rs</sub>), 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 évaporatoire de l'air, rapportée 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 :  $1/2 \times \rho_{air} \times e_{air}$  avec :

- ρ<sub>air</sub>: masse volumique de l'air sec (1,2 kg/m³ en première approximation aux températures usuelles de séchage);
- e<sub>air</sub>: pouvoir évaporatoire 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  $\eta_S$  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'écrira :

$$q_{se} = \rho_{air} \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s$$
 avec:

- q<sub>se</sub>: quantité d'eau extraite en moyenne par un mètre cube d'air (g/m<sup>3</sup>);
- $\rho_{air}$ : masse volumique de l'air sec : 1,2 kg/m<sup>3</sup>;
- x<sub>m</sub>: teneur en eau de l'air en sortie de séchoir, en moyenne sur la durée du séchage, en gramme par kilogramme d'air sec (déterminée ci-dessus);
- x<sub>a</sub>: teneur en eau de l'air, à l'entrée du séchoir, en grammes par kilogramme d'air sec;
- ηs : 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 à 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  $V_{\rm em}$  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 :

$$\begin{aligned} &V_{em} = M_e / T_s = \rho_{air} \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s \cdot D_{s/1000} \quad d'où : \\ &D_S = 1000 \cdot M_e / (T_s \cdot \rho_{air} \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s) \end{aligned}$$

### avec:

- Ds : débit d'air recherché (en m³/h) ;
- $V_{em}$  : vitesse d'enlèvement de l'eau (en kg/h) ;
- Me: masse d'eau à extraire (en kg);
- T<sub>s</sub>: durée idéale du séchage pour le produit considéré (en heures);
- $\rho_{air}$ : 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<sub>a</sub> : teneur en eau de l'air, à l'entrée du séchoir, en grammes par kilogramme d'air sec ;
- η<sub>s</sub>: rendement de séchage.

# 11. Ce débit d'air 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 m³/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 m³/h, potentiellement accessible en convection naturelle, il faudra de toutes façons envisager d'aider l'air à circuler dans le séchoir par de tels équipements périphériques.

# 12. Une cheminée solaire est-elle appropriée ?

Pour un débit d'air nécessaire situé entre 20 et 60 m³/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 subi 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).g.H (en Pascal (Pa)) avec :
```

- Δmc : différentiel de pression entre le bas et le haut de la cheminée en Pa;
- ρ<sub>1</sub> est la masse volumique de l'air en bas de la cheminée (kg/m³);
- ρ<sub>2</sub> est la masse volumique de l'air en haut de la cheminée (kg/m³);
- H est la hauteur de la cheminée (m);
- g est l'accélération de la pesanteur (≈ 10 m/s²).

En première approximation, le rapport  $\rho 1/\rho 2$  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 Celcius = 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 partieXXX.

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 efficientes. 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. Quelle 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  $(1/2mV^2)$ .

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-claiesséchoir 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 :

$$\Delta P_p = w \cdot d \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot V_p^2 \text{ en Pa}$$

# avec:

- $\rho_a$ : masse volumique de l'air ( $\rho_a$  = 1,2 kg/m<sup>3</sup>);
- 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) opposée par un produit en vrac au passage de l'air (en m-1)

000
000
000
000
000
2 500
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 (Sbc) et l'épaisseur de la couche (d) doivent être:

$$S_{bc} = \frac{D_s}{3600.V_p}$$
,  $d = \frac{3600.m_i.V_p}{\rho_p.D_s}$  (d en m)

où:

- m<sub>i</sub> est la masse de produit à sécher (en kg);
- $\rho_p$  est la densité du produit à sécher (en kg/m<sup>3</sup>);
- V<sub>p</sub> est la vitesse de l'air à travers le produit (fixée à 0,1 m/s);
- D<sub>s</sub> est le débit souhaité (en m<sup>3</sup>/h) déjà calculé;
- 3600 : conversion heures/secondes.

# 16. Quelle doit-être la puissance du ventilateur ?

La puissance fournie par le ventilateur doit être le produit du débit de l'air par les pertes de charge. La puissance électrique du ventilateur nécessaire est cette puissance, à un coefficient de rendement du ventilateur près :

$$P_V = \frac{1}{\eta_{vent}} \cdot \frac{D_s}{3600} \cdot \Delta P_t$$
, en W

### avec:

- D<sub>s</sub>: débit recherché en m<sup>3</sup>/h;

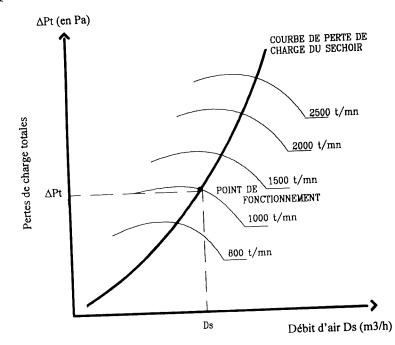
 $-\Delta P_t$  : pertes de charge totale en Pascals ;

–  $\eta_{vent}$ : rendement du ventilateur (d'après indications du fournisseur);

- 3600: conversion heures/secondes.

Sachant que les pertes de charge ( $\Delta P_t$ ) sont, pour un séchoir 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 ?



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<sub>s</sub> en s'opposant à des pertes de charges  $\Delta P_t$ , 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 séchoir:

- en convection naturelle, pour rendre cette convection la plus facile possible;
- en convection 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 séchoir et de la nature de l'absorbeur de chaleur.

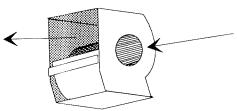
Critères de choix d'un ventilateur

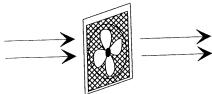
Cf. schéma page suivante.

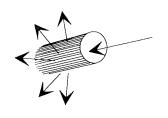
Remarque : Au-dessus de 3 kW de puissance, l'alimentation électrique doit être triphasée.

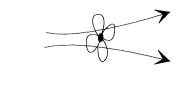
### Ventilateur axial

# Ventilateur centrifuge









Le lignes de flux sont rejetées sur les parois du conduit. Il y a beaucoup de turbulences.

Les lignes de flux redeviennent rapidement parallèles à la conduite.

# **Avantages**

- coût moins élevé
- rendement plus élevé
- encombrement réduit

# **Avantages**

- moins de bruit
- variation de puissance facile
- températures très élevées
- changement du moteur facile
- profil du flux d'air plus régulier
- plus grande puissance pour un même débit

Dans les deux cas, il est conseillé de séparer le moteur du flux d'air (transmission par courroie).

# Caractéristiques

- alimenté uniquement en courant alternatif
- débits de 450 à 10 000 m<sup>3</sup>/h
- pertes de charges de 10 à 100 Pa

# Caractéristiques

- débits de 500 à 50 000 m<sup>3</sup>/h
- pertes des charges de 1 000 à 15 000 Pa

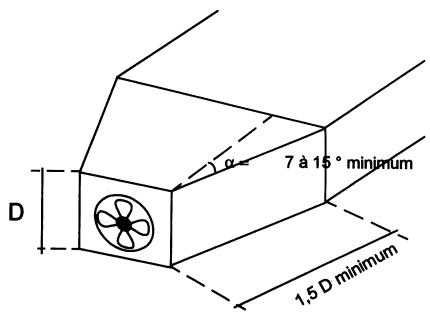
Un diffuseur en aval du ventilateur permet parfois d'utiliser un ventilateur plus petit

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. Det 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 à donner à 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 épouser 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 mm² à 1 cm², selon l'importance du débit d'air.

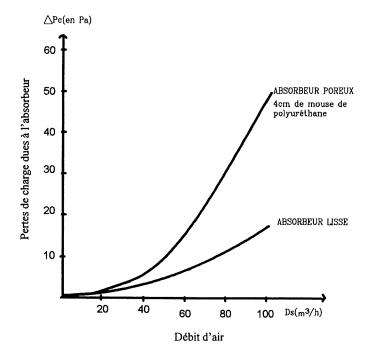
# La nature de l'absorbeur de chaleur

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

# Un absorbeur poreux s'oppose plus au passage de l'air qu'un absorbeur lisse



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.

# 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'élévation de température d'un kilogramme de l'air utilisé est déterminée 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<sub>s</sub>: débit d'air (en m<sup>3</sup>/heure);
- h<sub>s</sub> et h<sub>a</sub>: énergie contenue dans l'air à l'entrée et en sortie du séchoir (en kJ/kg d'air sec);
- P<sub>n</sub>: 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 minimes. 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 :

$$P_n' = 1.2 \times Cp_{air} \times (T2 - T1) \times D_s / 3600$$

### avec:

- P<sub>n</sub>': puissance nécessaire en première approximation;
- $Cp_{air}$  : chaleur massique de l'air (en J/kg/°C) ;
- T2 : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en °C) ;
- T1: température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage (en °C);
- $D_s$ : débit d'air (en m<sup>3</sup>/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: Cpair: 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 :

 $E_n = P_n \cdot t_s$ avec: - P<sub>n</sub>: puissance nécessaire en kW; - t<sub>s</sub>: durée du séchage en heure; - E<sub>n</sub>: 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 (n therm ) qui est lié à la différence de température et au débit souhaités.

$$E_{r\acute{e}elle} = \frac{En}{\eta \cdot therm} \quad en \ kWh$$

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 air 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.

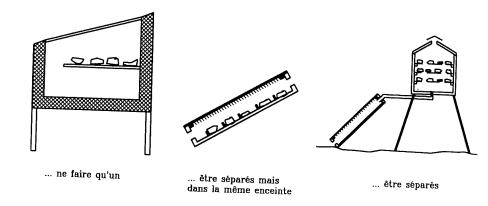
Elle joue enfin un rôle d'effet de serre : l'énergie réémise par l'absorbeur est partiellement conservée dans le capteur du fait de la couverture. Cela tient aux propriétés de certains matériaux utilisés en couverture d'être transparents à la lumière visible mais opaques aux infrarouges. L'énergie qui entre sous forme de lumière visible est donc plus ou moins « piégée » une fois qu'elle a été transformée en chaleur (rayonnement infrarouge). Cf. schémas page ci-contre.

### LA COUVERTURE PIÈGE LE RAYONNEMENT

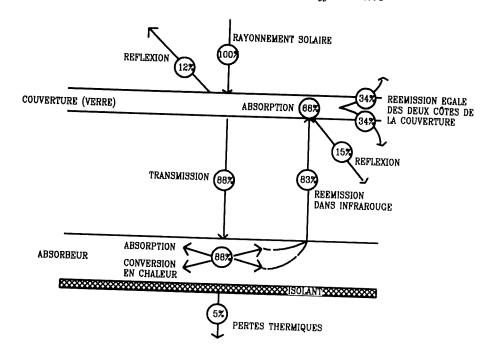
Le matériau de couverture idéal doit :

- être transparent au rayonnement;
- absorber ou réfléchir les infrarouges;
- isoler l'air chaud du capteur de l'air ambiant ;

Séchoirs et capteurs peuvent...



# 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 séchage 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	Vепе trempé	Vепе ате́	Polyester armé de fibre de verre	Polycarbonate double paroi	Polypropylène double paroi	Polymétacrylate double paroi (acrylique)	Polyéthylène
Transmission rayonnement solaire sous incidence normale %	86/91 (4 mm)	86 (4 mm)	72	83	80	65	83	85 (75)
Transmission rayonnement thermique %	3	3	3	9	9	≈ 10	9	70 (30)
Transparent (P) Translucide (L)	А	P	Ь	Т	L (simple paroi : P)	h	L (simple paroi : P)	h
Épaisseurs standard disponibles	3 à 6 mm	4 à 8 mm	6 mm	1 mm ·	4 à 16 mm	4 mm	8 à 16 mm	0,1 à 0,3 mm
Température maximale d'utilisation	200°C	200°C	200°C	70°C	100°C +	≈ 60°C	2.06	O.09
Résistance au feu	bonne	ponne	bonne	mauvaise	moyenne	mauvaise	mauvaise	très mauvaise
Poids kg/m <sup>2</sup> Dilatation	(e = 4 mm) 11 faible	(e = 4 mm) 11 faible	(e = 6 mm) 16 faible	(e = 1 mm) 1,5 importante	(e = 6 mm) 1,2 importante	(e = 4 mm) 0,7 importante	(e = 16 mm) 5 importante	(e = 1 mm) 0,17 très importante
Longévité (durée au-delà de laquelle transmission rayonnement solaire = 90% de la valeur initiale)	100 ans +	100 ans +	100 ans +	7-10 ans ≈ 15 ans avec protection UV	6 ans	≈ 2 ans très mauvaise	15 ans +	là3ans
Règle de pose	masticage baguettes	masticage baguettes	masticage baguettes	agrafage clouage	profil spécial ou mastic+baguettes	profil spécial ou mastic+baguettes	profil spécial ou mastic+baguettes	agrafe
Outils	diamant, martelette, couteau à mastic	diamant, martelette, couteau à mastic	diamant, martelette, couteau à mastic	agrafage clouage	scie	scie, mastic + baguettes	scie, mastic + baguettes	ciseaux agrafeuse
Coût (2)	•	*	:	•	•	:	*	0

(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 RÉCHAUFFE 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.

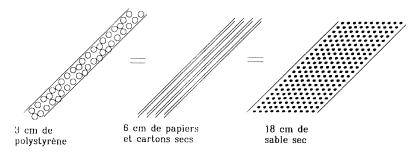
Mais ces matériaux doivent toujours être secs pour conserver tout leur pouvoir isolant et éviter les dommages à la structure. Ils doivent être soit changés régulièrement, soit pouvoir être nettoyés, pour des raisons sanitaires évidentes. Le polystyrène est à ce titre un matériau avantageux.

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).

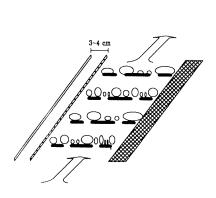
L'assemblage des différentes parties du capteur doit se faire en respectant les valeurs de la deuxième figure page suivante. La distance couverture-absorbeur doit être de 3 à 4 cm pour minimiser le transfert de chaleur de l'absorbeur vers

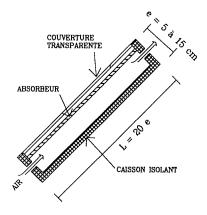
la couverture. La valeur de l'intervalle caisson/isolant-absorbeur dépend du type de séchoir. Quand le capteur est séparé de l'enceinte de séchage, il doit être de 5 à 15 cm pour favoriser un bon échange absorbeur-air tout en limitant les pertes de charges. Une vitesse minimale de 3 m/s est alors requise, ce qui suppose l'emploi d'une cheminée solaire ou plutôt d'un ventilateur.

# Équivalences en pouvoir d'isolation thermique des principaux matériaux utilisés



### Éléments du dimensionnement des capteurs





Lorsque le capteur et l'enceinte ne font qu'un, la surface de séchage impose la distance caisson-absorbeur.

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<sub>N</sub>: éclairement global reçu par mètre carré de capteur (W/m²).

La puissance thermique utile totale du capteur est celle qui a permis de transmettre à l'air sa chaleur pour passer de la température T1 à l'entrée du capteur à la température T2 en sortie de capteur. On retrouve donc une expression similaire à celle déjà utilisée ci-dessus lors de l'approximation de la variation d'enthalpie de l'air dans le séchoir :

$$E_u = 1.2 \times Cp_{air} \times (T2 - T1) \times Ds / (3600.A)$$

avec:

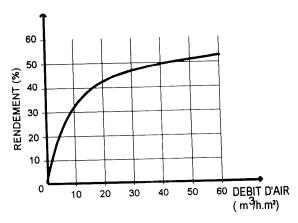
- E<sub>u</sub>: puissance thermique utile par m<sup>2</sup> de capteur (en W/m<sup>2</sup>);
- Cpair: chaleur massique de l'air (en J/kg/°C);
- T2 : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en °C) ;
- T1 : température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage (en °C);
- D<sub>s</sub>: débit d'air (en m<sup>3</sup>/h);
- A : superficie totale de captage des rayons solaires (en m²).

On rappelle : Cp<sub>air</sub> = 1030 J/kg/°C, peu dépendant de la température pour la gamme envisagée pour le séchage.

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 m³/h/m² pour le type de capteur considéré ci-dessus. Si on envisage de fournir un débit d'air de 90 m³/h dans la chambre de séchage, il faudra retenir au maximum une surface de captage des rayons solaires de 6 m².
- Pour ce type de capteur et pour la gamme des débits d'air rapportés au m² de capteur de plus de 20 m³/h/m², 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 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>, 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 m³/h/m² 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 m<sup>2</sup>);
- P<sub>n</sub>: puissance nécessaire au séchage (en kW);
- G<sub>n</sub>: puissance de rayonnement disponible (en kW/m<sup>2</sup>);
- η<sub>c</sub>: 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 à « géométrie variable » : il ne peut pas s'adapter aux fluctutations 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 à 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:

$$T2 = T1 + A.\eta_{capt}.G_{n}.3600 / (1,2.Cp_{air}.Ds)$$

#### avec:

- Cp<sub>air</sub>: chaleur massique de l'air (en  $J/kg/^{\circ}C$ ) = 1030  $J/kg/^{\circ}C$ ;
- T2 : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en °C) ;
- T1 : température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage (en °C);
- Ds: débit d'air (en m<sup>3</sup>/h);
- A : superficie totale de captage des rayons solaires (en m²) ;
- $-\eta_{capt}$ : rendement thermique du capteur;
- G<sub>n</sub>: 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 dénommés séchoirs hybrides.

La puissance totale est alors :  $P_n = P_{solaire} + P_{appoint}$ 

$$P_{appoint} = Pu \cdot \eta a$$
, avec:

- P<sub>u</sub>: puissance du système d'appoint (chaudière, fourneau, échangeur électrique) en kW;
- $-\eta_a$ : 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 :

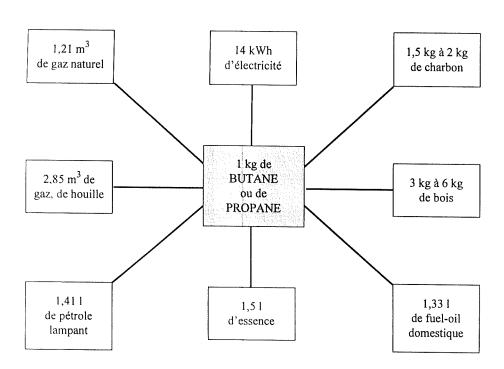
$$m = \frac{E_a}{PCI}$$
 (m en kg,  $E_a$  en kWh)

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 équivalences théoriques de pouvoirs calorifiques inférieurs à pression et température ambiante

(Source : René Massé « Le butane et le kérosène en chiffres », Éd. GRET, Paris, 1990)



On tiendra compte des remarques suivantes :

- le PCI butane ou propane est de 12,7 kWh/kg;
- les rendements de combustion de ces différentes sources d'énergie varient, pour des installations artisanales ou semi-industrielles de 50 % (pour les combustibles solides) à 80 % (pour les combustibles liquides).

#### Récapitulatif de la méthode de dimensionnement

Données de base

Produits:

- humidité initiale-finale

- température de l'air maximale

admissible

- courbe sorption-désorption

Air ambiant:

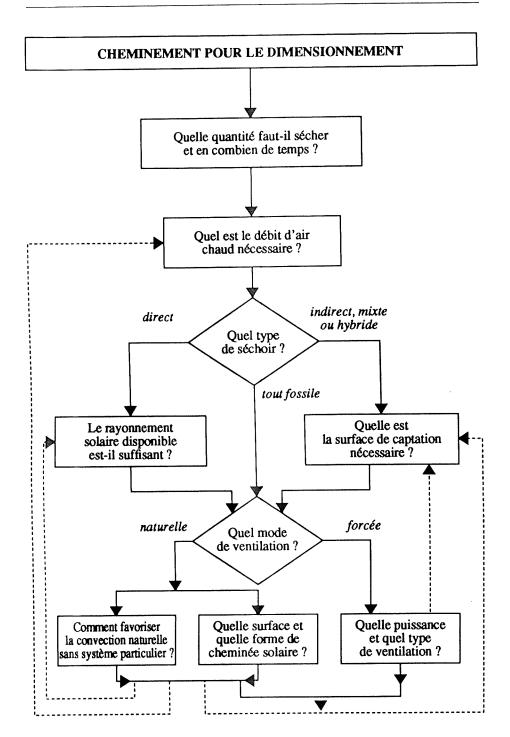
- température sèche et humide

- humidité relative et absolue

Conditions de séchage imposées par la filière amont et aval :

- masse de produits à sécher

- durée de séchage





# Exemples de séchoirs types

Contenu des « fiches séchoirs »

Les « fiches séchoirs »

•

L'a 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, goût, 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 :à convection naturelle, directe ou indirecte, à convection forcée. Trois modèles tout fossile à 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 présentés, 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 étape d'analyse et de sélection du séchoir convenant à son cas. Elles ne suffisent en aucun cas pour réaliser le modèle présenté. 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 (Cs 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 donné.

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.

$$REG = \frac{LV}{CS}$$

 $L_V = 0.65 \text{ kWh} / \text{kg}$  eau (à 60°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 présentés

- Fiche A Séchage traditionnel amélioré
- Fiche B Séchoir cadre NRI / Tropical Wholefood
- Fiche  ${\bf C}$  Séchoir coquillage GERES / GRET
- Fiche D Séchoir banco CEAS / ATESTA
- Fiche  ${\bf E}\;$  Séchoir solaire tunnel type Hohenheim
- Fiche F Séchoir toiture à craies GERES (1)
- Fiche  ${\bf G}$  Séchoir gaz type armoire CEAS
- Fiche H Séchoir semi-continu ITDG
- Fiche I Séchoir tunnel à gaz type Cartier (2)

 <sup>(1)</sup> Ce modèle a été retenu, bien qu'il ne soit pas destiné au séchage de produits alimentaires, pour son principe très fonctionnel éprouvé en Europe et pouvant s'adapter à 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: Séchage 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 (*cf.* fin du chapitre IV).

#### FICHE B: Séchoir cadre NRI

USAGE: artisanal

ÉNERGIE: séchoir solaire direct à convec-

tion 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

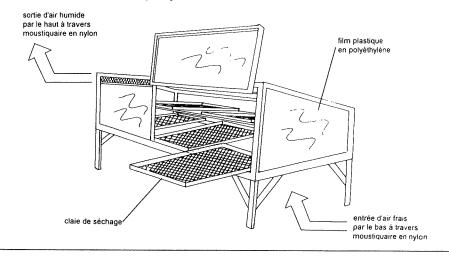
Description générale : Le séchoir est composé d'un cadre en bois dur recouvert d'une toile plastique transparente en polyéthylène. La base du cadre est composée de bâtons de papyrus recouverts d'une toile en polyéthylène noir. L'ensemble du cadre repose à 1 m du sol, sur quatre pieds en bois tendre. 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 m<sup>2</sup>.

**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 à 3,5 kg de produit frais / m² de claie soit 20 à 35 kg de produit frais par séchoir Approvisionnement du séchoir: Par fournée. Deux battants situés sur un des grands côtés du cadre permettent d'introduire les claies dans le séchoir.

**Matériaux**: Bois dur et bois tendre, toile plastique en polyéthylène transparent, toile en polyéthylène noir, tamis en nylon pour les claies et les entrées et sorties d'air.



EXEMPLES DE SÉCHOIRS TYPES

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.

COÛT DE FABRICATION: 2 500 FF environ. COÛT D'ENTRETIEN: 125 FF / an.

#### CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays : Ouganda Utililisateurs : 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 fournée.

Pays : Ouganda	Saison sèche
Températures : minima / maxima, moyenne (°C)	20 / 30
Ensoleillement journalier (kWh/m²)	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 (Cs) (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 régulables : 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 régulables.
- 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 produit 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 con-

vection 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 au Burkina Faso

#### CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

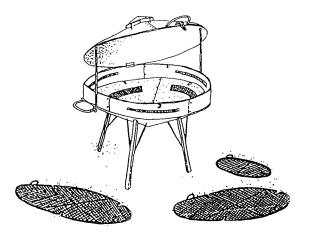
Description générale: Il est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière. Il est conçu pour protéger les aliments des insectes et de la poussière. Diamètre: 70, 90 et 110 cm selon les modèles. Surface de séchage: 0,5; 1,4 ou 2,2 m².

Système d'aération: La circulation d'air par convection naturelle est faible (quelques m<sup>3</sup>/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.



**RÉALISATION**: Le séchoir 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 séchoir.

**DURÉE DE VIE :** Matériel robuste : la durée de vie est estimée à dix ans. L'entretien du séchoir est très limité : il est lié au renouvellement du tamis des claies et de la peinture noire des tôles (doit résister aux UV, couche antirouille recommandée).

COÛT DE FABRICATION: de 130 à 440 FF selon la capacité.

COÛT 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.

Pays : Burkina Faso. Produit : mangue.	Ciel clair  25 / 6,0  15 / 50  Gain de 1 40 à	n sèche	
_	Ciel clair	Ciel nuageux	
Températures : minima / maxima, moyenne (°C)	25	/ 33	
Ensoleillement journalier (kWh/m²)	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 (Cs) (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 (kg)	10 10		

#### EXEMPLES DE SÉCHOIRS TYPES

#### 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 (claie 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 régulables : qualité organoleptique du produit difficilement maîtrisable.

#### **SYNTHÈSE**

- Séchoir solaire indirect à vocation domestique. Convection naturelle. Paramètres de séchage peu régulables. Un des 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 à 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 à convec-

tion naturelle

RÉFÉRENCES: CEAS, ATESTA

#### **HISTORIQUE**

Zone d'implantation : Burkina Faso Début d'expérimentation : 1989

Utilisation régulière : depuis 1990

Nombre de séchoirs diffusés (1994) :  $\approx 50$ 

#### 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 m<sup>2</sup> chacune disposée 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).

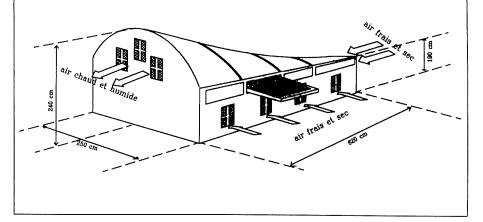
Système d'aération : • Air frais : 4 entrées par l'avant et 4 entrées sur les faces latérales. Elles sont protégées par une grille en acier galvanisé (maillage fin). • Air humide : une sortie sur l'arrière du séchoir, à 2 m du sol environ.

Débit d'air non ajustable 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 : À partir des faces latérales du séchoir. Opération discontinue.

Matériaux : Banco, ciment, acier galvanisé, claies en bois, cordes nylon, tamis en nylon de type moustiquaire.



RÉALISATION: construit avec des matériaux locaux. Couverture plastique de préférence importée (dure trois fois plus longtemps que celles fabriquées dans le pays).

DURÉE DE VIE: plusieurs années. Renouvellement de la couverture plastique tous les deux ou trois ans. Le tamis en nylon des claies constitue également une pièce d'usure.

COÛT DE FABRICATION: 6 400 FF environ.

#### CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Burkina Faso.

Utililisateurs: coopératives, groupements de femmes, « privés ».

Produits séchés: 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/m²)	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 élastiques 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 régulables : qualité organoleptique du produit sec 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 régulables.
- Facilité de construction. Utilise en grande partie des matériaux locaux. Couverture plastique en général importée (durée de vie 2 à 3 fois supérieure à celle fabriquée dans le pays).
- Entretien pour l'essentiel 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 : sous des conditions de ciel dégagé et de faible humidité relative de l'air, ce séchoir a un bon fonctionnement.
- Peut être utilisé pour une gamme étendue de produits végétaux (fruits, légumes). Qualité obtenue satisfaisante mais difficilement maîtrisable.
- $\bullet\,$  Actuellement, la diffusion de ce séchoir n'est plus poursuivie au profit d'un modèle à armature métallique.
- Plans, rapports et compléments d'informations disponibles au CEAS.

## FICHE E: Séchoir solaire tunnel type Hohenheim

USAGE: domestique

ÉNERGIE: séchoir solaire direct à con-

vection forcée

RÉFÉRENCES: Université de

Hohenheim

HISTORIQUE

Zone d'implantation: Europe, Afrique,

Asie

Début d'expérimentation : 1982 Utilisation régulière : depuis 1990

Nombre de séchoirs diffusés (1994): envi-

ron 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:  $30 \times 1.9 \text{ m}$ ). 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 m<sup>3</sup>/h).

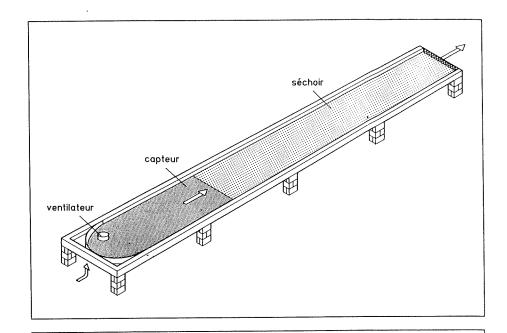
- Air frais aspiré, filtré et refoulé vers la zone de chauffe puis de séchage par le ventilateur. L'air circule en dessous et au-dessus du produit.
- Air humide évacué en bout de séchoir au travers d'une moustiquaire métallique.

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 m<sup>2</sup>.

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 profilé 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/m $^2$  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.



 $\textbf{R\'{E}ALISATION}:$  nécessite le travail de trois artisans pendant vingt jours. Ventilateur importé.

 $\mathbf{DUR\acute{E}E}$   $\mathbf{DE}$   $\mathbf{VIE}$ : estimée à plus de dix ans pour le bâti, à deux ou trois ans pour la couverture plastique.

COÛT DE FABRICATION: 12 000 FF environ. COÛT D'ENTRETIEN: 80 FF/an.

#### CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Maroc.

Utililisateurs: coopératives, grandes fermes.

Produits séchés : 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 réhumidification 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/m²)	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 (m³/h)	1 050	900
Puissance du ventilateur : consommation moyenne (kW)	0,04	0,04
Consommation spécifique du séchoir (Cs) (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 régulables.
- 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 craies GERES

USAGE: artisanal

ÉNERGIE: séchoir solaire indirect à con-

vection 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 galvanisé 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 m<sup>2</sup>.

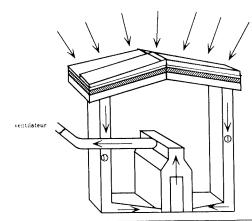
Une chambre de séchage constituée en tôle 10/10, recouverte d'un isolant en plaque d'épaisseur 2 cm. 6 chariots comportant 20 claies de séchage peuvent y être introduits ce qui représente une surface de séchage de 60 m<sup>2</sup>.

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 à l'entrée du séchoir, 6 m/s à la sortie.



- ① ① Gaines descendantes
- ② Chambre de séchage
- 3 Gaine de sortie

**RÉALISATION**: nécessite les compétences d'une entreprise locale expérimentée dans la réalisation de toitures métalliques.

DURÉE DE VIE : le séchoir est toujours en service.

COÛT DE FABRICATION: en 1987: 120 000 FF environ, dont 95 000 FF de matériaux et travaux locaux (capteur toiture à 80 FF/m²) et 21 000 F d'équipements importés (ventilateur, isolation thermique).

#### CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Utilisateurs: Union malienne des aveugles. Produits séchés: craies (bâtons).

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 à 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 à 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 à quatre fois plus faible, entretien limité.

Pays : Mali.	Produit : craie
Températures : minima / maxima, moyenne (°C)	[17-26] [32-40]
Ensoleillement journalier (kWh/m²)	[5-6]
Humidité relative : minima / maxima, moyenne (%)	[12-60] [40-90]
Température dans le séchoir (°C)	[50-60]
Débit d'air du ventilateur (m³/h)	8 000
Puissance du ventilateur (consommation moyenne) (kW)	2,2
Consommation spécifique du séchoir (Cs) (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

<sup>\*</sup> dont 4 % environ en électricité.

#### EXEMPLES DE SÉCHOIRS TYPES

#### 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 à gaz à convection

naturelle

**RÉFÉRENCES:** CEAS

#### HISTORIQUE

Zone d'implantation: Burkina Faso Début d'expérimentation: 1992 Utilisation régulière: depuis 1992

Nombre de séchoirs diffusés (1994): envi-

ron 30 au Burkina Faso

#### CARACTÉRISTIQUES DU SÉCHOIR

**Description générale :** Le séchoir est constitué par un bâti en briques (dimensions  $L^*l^*h$ : 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  $m^2$  chacune.

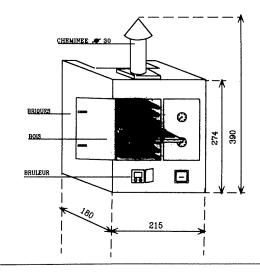
Système de chauffe : Brûleur domestique à rampe.

Système d'aération: Entrée d'air par le bas, à l'avant du séchoir. Débit d'air ajustable : 250 m<sup>3</sup>/h maximal.

Capacité: 6,5 kg de produits frais/m<sup>2</sup> de claie soit 46 kg de produits frais par cellule.

**Chargement du séchoir :** Frontal, après ouverture de la porte d'accès à la gaine de séchage. Opération discontinue.

Matériaux : Banco, acier, claie en bois avec tamis en corde ou de type moustiquaire.



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.

COÛT DE FABRICATION: 4 000 FF environ.

#### CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Burkina Faso.

Utilisateurs: coopératives, groupements de femmes, « privés ».

Produits séchés: 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 prétraitement 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 à 65
Consommation spécifique du séchoir (Cs) (kWh / kg d'eau extrait)	1,8 à 2,2
Rendement énergétique global (8FG) (%)	30 A 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.

#### **SYNTHÈSE**

- 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 à

convection 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  $L^*l^*h = 140 \times 120 \times 220 \text{ cm}$ ) recevant 15 claies de 0,8 m² chacune. Elle est conçue de manière à pouvoir charger et retirer les claies en semi-continu ;

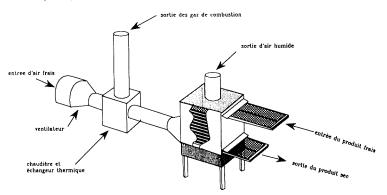
- d'un système de chauffage et de ventilation.

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 fixé à 2 800 m<sup>3</sup>/h.

Capacité: 3,75 kg de produit frais/m<sup>2</sup> 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).



**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 séchés: 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 (Cs) (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

<sup>\*</sup> Consommation du ventilateur inconnue.

#### CAPACITÉ DE DIFFUSION

#### Facteurs favorables

- Régulation de la température de séchage au niveau du brûleur : permet de sécher même 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 arômatiques...). 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 approvisionement 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 importé. 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 écologiques (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 à gaz type Cartier

USAGE: artisanal

ÉNERGIE: séchoir à gaz à convection

forcée

**RÉFÉRENCES:** GERES

#### HISTORIOUE

Zone d'implantation : Europe, Turquie,

Afrique

Début d'expérimentation: 30 ans en Eu-

rope, 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 :  $4,6 \times 2,2 \times 2$  m). Les briques du toit sont soutenues par des barres métalliques en T de  $5 \times 2,4$  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 :

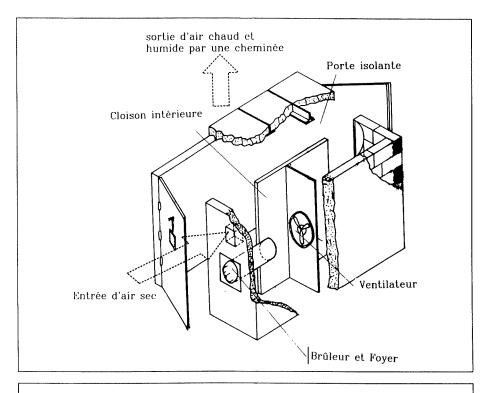
- 1 moteur électrique (220 V, triphasé);
- 1 ventilateur tripale (1 500 tours/mn, 8 000 m³/h) relié au moteur par une courroie;
- 1 trappe d'entrée d'air frais à ouverture modulable pour contrôler le taux de recyclage de l'air et d'humidité dans le séchoir ;
- 1 conduit de sortie d'air humide par le 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/m<sup>2</sup> de claie soit 130 kg de produits frais par chariot.

Approvisionnement du séchoir : Par fournée 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.



**RÉALISATION:** assez facile. Un respect scrupuleux des plans par un maçon compétent est indispensable. Système de ventilation et de chauffe en général importés.

**DURÉE DE VIE :** plusieurs dizaines d'années pour le bâti, les systèmes de chauffe et de ventilation. Le tamis des claies représente le matériel d'usure.

COÛT DE FABRICATION: 65 000 FF dont 38 000 FF de matériel importé.

#### CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES

Pays: Burkina Faso.

Utililisateurs: 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 fournée. Aucun prétraitement n'est actuellement employé lors du séchage des mangues.

CONDITIONS D'UTILISATION ET PERFORMANCES (suite)

Produit: mangues	
Température moyenne (°C)	25-34
Humidité relative moyenne (%)	60-98
Température dans le séchoir (°C)	50-70
Consommation spécifique du séchoir (Cs) (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

<sup>\*</sup> 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 fournée ou en semi-continu, à 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 à la gestion de l'activité.

#### CHAPITRE VII

#### 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 importé.
- 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.

# Conduire une activité de séchage

Étapes amont

Étapes aval

L'organisation et le dimensionnement des locaux

L'organisation du travail dans une unité 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 à concevoir et à dimensionner les équipements annexes ainsi que les locaux en correspondance. Des règles d'hygiène, de fonctionnalité, de situation géographique sont alors à prendre en compte. Il faut aussi s'attacher à 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 inexploitables pour la transformation, souvent à cause du pourrissement.

Pour les niveaux de production envisagés (artisanal à 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 à 100 ppm) est préconisée avec un trempage de quelques minutes suivi d'un rinçage à 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 à rechercher entre la présentation finale et la facilité de séchage (épaisseur minimale, grande surface exposée à l'air d'entraînement, 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 ôter 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 prétraitements 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.

PROCÉDÉ ET COMPOSÉ	Développement microbien	Oxydation des lipides	Réactions de Maillard	Brunissement enzymatique	Diminution de l'Aw	Autres effets	Produits concernés
Blanchiment	 (B, L, M)*					séchage ultérieur plus rapide	légumes sauf oignons et ail
Fumage	(B, L, M)	-					produits camés
Fermentation	① (B, L, M)	ı					produits carnés
NaCl (salage)	— (B, L, M)	+			‡	risque de réhumidi- fication du produit	produits camés ©, fruits ©
Sucrage	& (B, L, M)		‡		‡	risque de réhumidi- fication du produit	fruits
So2 et sulfite	(B, M)		ı	1	+		fruits/légumes
Phosphates	-			,	+	augmente la tendreté	viandes
Acide acétique (vinaigre)	— (B, L)		+	•	+	diminue le pH	produits carnés
Acide propionique	(M)		+	ı	+	diminue le pH	fruits/légumes
Acide sorbique	(B, L)		+	•	+	diminue le pH	produits carnés/fruits
Acide citrique	- en synergie	- en synergie	+	1	+	diminue le pH	viandes rouges/ fruits/légumes
Acide ascorbique	(M, L)	ŧ	+		+	diminue le pH	

limite faiblement

++ favorise + favorise faiblement - limite fortement

sensibles à l'oxydation La fermentation favorise le développement d'espèces <u>e</u>

plus pur possible (NaCl), et éviter le gros des lipides, utiliser un sel le plus pur possil npage dans un bain d'eau légèrement salée

de l'eau du produit. Il faut pour cela utiliser des doses suffisamment élevées de sucre sous (voir paragraphe à cet effet). brunissement enzymatique des fruits est limité par trempage dans un ba sucrage limite le développement microbien en abaissant l'activité de l'er de favoriser au contraire le développement des micro-organismes (voir

Le choix du conservateur doit donc être fonction :

- de chaque aliment et des altérations qui vont être susceptibles de limiter sa conservation. On ne 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).

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 prétraitements couramment employés

#### Le blanchiment

Le blanchiment ou précuisson (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.

<sup>(1)</sup> Certains composés ou prétraitements d'emploi délicat et pouvant menacer directement la santé humaine ont volontairement été omis (nitrates, antioxydants de synthèse...).

#### • Le soufrage par 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 (soufroir) qui doit être hermétique, une fois la combustion entamée. En moyenne, un dosage de 5 à 6 g de  $SO_2/kg$  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 à 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 équivalent 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  $50^{\circ}$ 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

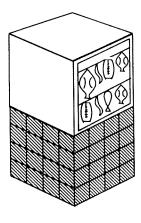
Il permet un séchage par entraînement et une action spécifique de la fumée par la production de composés antiseptiques, d'arômes et de couleurs particuliers. Le fumage peut se faire à chaud ou à froid.

#### • 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.



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 à 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.

## Étapes 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 évacués. 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 à 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 ré-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. À 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 ré-humidification du produit. Dans la pratique, et à défaut de pouvoir procéder à de telles analyses, on cherchera à :

- augmenter légèrement les exigences de séchage, de façon à mieux se prémunir de risques de ré-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

		P	rotectio	n des ali	ments c	ontre		
Type d'emballage	Perforation Écrasement	Lumière	Air	Humidité	Odeur	Insectes	Rongeurs	Micro-organismes
Boîtes	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е
Verre (bouteille)		E (verre						
Bocal	E-M	coloré)	Е	Е	Е	Е	E	Е
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)	Е	Е	F	F	F	F	F	M
Poterie	E-M	E	Е	Е	Е	Е	Е	E
Papier d'aluminium	F	E	E	Е	Е	M	F	М
Films plastiques	F	F	E	E-M	E-M	F	F	М
Bac de plastique	F	M	Е	E	E	M	F	М

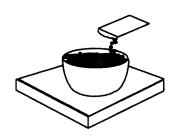
E = Protection élevée

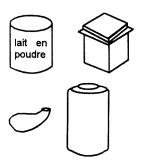
M = Protection movenne

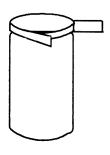
F = Protection faible

Source : « Conditionnement. Manuel de technologies du cycle alimentaire n° 7. », UNIFEM, New York, 1993, 52 p.

### La mise en 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.

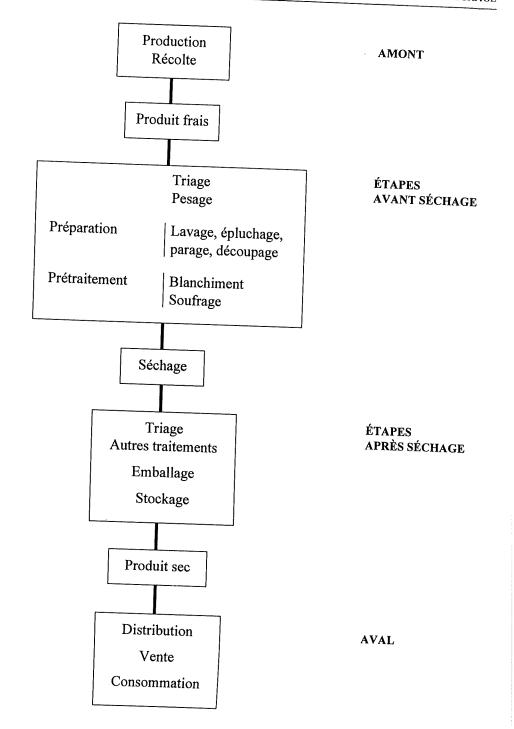
On introduit les produits dans les récipients dans lesquels ils sont stockés. Ces récipients doivent être entièrement secs. Il faut aussi protéger les produits des insectes et de la saleté.

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.



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).

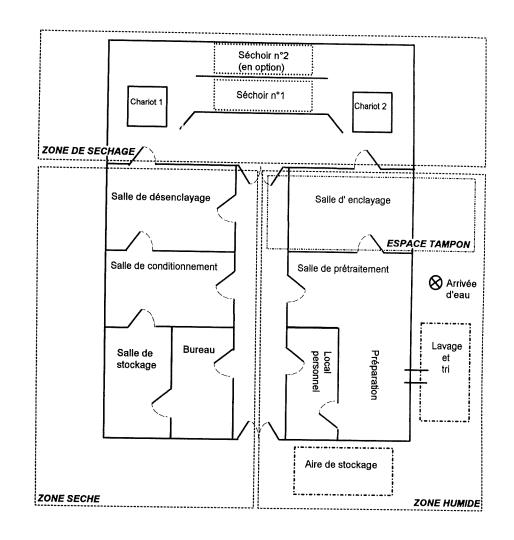
La répartition d'une unité en trois zones : la conception d'un bâtiment de séchage doit, quelle que soit sa taille, pouvoir se dissocier en trois zones pour répondre aux différents états du produit traité :

- 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 présenté 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 à 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 (épluchage, eviscérage...). 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 SÉCHAGE QUI CONTIENT LE SÉCHOIR

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 à 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'entrée/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 épluchée 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 emballé, 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 au 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 déjà 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 dès 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 PRE-MIÈRE

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 séchage 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 présuppose cependant des capacités de stockage suffisantes en amont du séchage, un tri « amont » relativement sévère et une capacité de séchage 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 MATIÉRE PREMIÉRE

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/m² 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 (Ts), 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 limité. 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 à 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, sèchent 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 numéroter 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 surséchage 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 à 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 évaporatoire 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 à 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 à 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, à 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 prépondérante dans la gestion de l'activité. À ce stade, il est même recommandé 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.



## Éléments d'évaluation économique des projets

L'intérêt de l'évaluation économique

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?

## L'intérêt de l'évaluation économique

Afin de réaliser le choix définitif, 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 monétaires. 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 fonctionnalité particulières de tel ou tel séchoir.

Un critère d'ordre financier pourra être inclu à 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 séchoir 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 séchoir est aussi un critère important. Un tel critère peut conduire à l'abandon d'une option de construire un séchoir nouveau, adapté aux conditions spécifiques d'usage envisagé, et estimé plus performant que d'autres à cet égard, pour un séchoir 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 écouler 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 séchoir : moindre niveau d'investissement pour limiter les risques, ou moindre niveau de production initiale, de façon à « voir venir ».
- L'adaptabilité du séchoir aux contraintes locales, de fabrication, d'utilisation, d'entretien, a été abordée lors de l'élaboration du cahier des charges, mais elle doit être reconsidérée plus en détail au moment du choix final du type de séchoir 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 activité (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 lorque les paramètres du système de séchage sont identifiés (caractéristiques physiques, organisation de l'activité 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 à son tour par une phase de dimensionnement physique et de reflexion 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 à 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.

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 élaboré, est donc de : 2 500 – 10.50 = 2 000 FCFA/kg. Dans le cas le plus défavorable par contre, elle n'est que de : 1750 – 15.75 = 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'école 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 d'élaboration 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 élaborée, permet de toucher une clientèle plus exigente avec un produit de meilleur qualité, mais pour un coût unitaire d'élaboration plus élevé, 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 1/13° 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 :

 $1\ 900\ -13.60\ -400\ =720\ \text{FCFA/kg}$ . Le bénéfice unitaire pour la deuxième option est **dans le pire des cas** de :  $2400\ -13.60\ -700\ =920\ \text{FCFA/kg}$ . 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

<sup>(1) 100</sup> FCFA = 1 franc français = 0,2 dollar américain (août 1995).

## Exemple d'un tel type d'évaluation économique sommaire sur un cas concret

Dans la zone Ouest-sahélienne, 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.

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.

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 où :

- 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 à 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  $2\,450 - 12,5.50 - 650 = 1\,175\,FCFA/kg$  si le prix de la matière première est à  $50\,FCFA/kg$ .

Il est de 2 450 - 12,5.75 - 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 à 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 à de telles fluctuations.

#### L'AFFINEMENT DES ESTIMATIONS À MESURE QUE PROGRESSE L'ANALYSE

En début d'analyse, les estimations sont naturellement imprécises. Les conclusions qui pourront en 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 l'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'acquérir;
- une analyse du coût de l'« accès » à cette clientèle (transport du produit fini, éventuelle campagne de promotion, qui prend en charge et à 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, déjà 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 <sub>annexe</sub> + Coût <sub>énergie</sub> + Coût <sub>amortissement</sub> + Coût <sub>crédit</sub> + Coût <sub>salaires</sub> + Coût <sub>matières</sub> 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 séchoir...). 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 débourser 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 à 3 ans, à 5 ans, à 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, soit 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).

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	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 prévisionnel.

(D'après Charles Yvan Tougouma, coordinateur du Cercle des sécheurs, 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.

<sup>(2)</sup> Cf. adresse en annexe.

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 séchée / cycle de séchage / cellule ;
- coût d'une cellule équipée : 6 500 000 FCFA ;
- durée d'amortissement : 10 ans.

#### Évaluation économique des deux séchoirs

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:

	Séc	choir 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	
Électricité du ventilateur	0 kWh	0	1 944 kWh	194 400	
Personnel	10 p/mois * 6 mois	1 185 000	10 p/mois * 6 mois	1 185 000	
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'amortissemen
Bâtiment de séchage	80 m <sup>2</sup>	4 450 000	10 ans	80 m <sup>2</sup>	4 450 000	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)		7 636 000			12 136 000	

#### Bilan:

	Séchoir gaz CEAS	Séchoir tunnel type Cartier	
Temps de retour de l'investissement	3 ans	4 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 d'exploitation (FCFA)	Quantité	Charges annuelles d'exploitation (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 * 6 mois	1 665 000	15 p/mois * 6 mois	1 665 000	
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 (FCFA)	Temps d'amor- tissement	Quantité	Coût total (FCFA)	Temps d'amor- tissement
Bâtiment de séchage	80 m <sup>2</sup>	4 450 000	10 ans	80 m <sup>2</sup>	4 450 000	10 ans
Séchoir	5	4 000 000	5 ans	1	6 500 000	10 ans
Équipements anne- xes, 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
2 ans	2 ans
40 790 000 FCFA	44 446 000 FCFA
	2 ans

#### 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 séchoirs concernant le montant des investissements s'expliquent uniquement par le type de séchoir choisi. Le séchoir tunnel n'est en effet pas modulable comme le séchoir CEAS.

On s'aperçoit alors que l'option de production 5 T/an est particulièrement défavorable au séchoir tunnel : le coût du séchoir 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 séchoirs devient insignifiant.

On retiendra que plus un séchoir est utilisé au maximum de sa capacité, plus il devient intéressant en termes économiques.

#### • Synthèse:

Pour les deux types de séchoir, 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 séchoir 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 séchoir gaz CEAS.

Dans le cas de l'option de production 5 T/an, le choix se porterait sur le séchoir gaz CEAS.

• L'option 10 T/an devient par contre favorable au séchoir tunnel : même temps de rentabilisation de l'investissement, bénéfice cumulé après dix ans d'exploitation un peu plus élevée.

Dans le cas de l'option 10 T/an, le choix peut se porter sur l'un ou l'autre des séchoirs.

• 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 séchoir tunnel, même dans le cas d'une hypothèse de production de 5 T/an. Le même type de raisonnement peut être tenu entre les séchoirs solaires et les séchoirs gaz.

Il n'existe pas de séchoirs sur lequel le choix puisse s'effectuer de manière systématique.

#### Conclusion

Le choix d'un séchoir 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 séchoir 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 simulés (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 différente.
- 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 à 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 écarts suggèrent que l'entreprise n'est peut-être pas bien protégée des fluctuations du prix de la matière première, et qu'il lui faudra peut-être à l'avenir se reconvertir dans le séchage d'autres produits.

## LE CAS PARTICULIER DU SÉCHEUR-AGRICULTEUR

Les performances économiques d'une unité de séchage peuvent, on vient de le voir, être très sensibles au coût de l'approvisionnement de la matière première. Dans le cas d'une personne réalisant des activités de séchage à but commercial, mais étant par ailleurs producteur du produit frais envisagé, la

question se pose de savoir quel est ce coût. Doit-on le considérer comme nul, appliquer le prix au producteur moyen sur la zone...? Cela dépendra fortement des circonstances.

- Si cette personne dispose d'une production propre suffisante pour approvisionner le séchoir, plusieurs cas se présentent :
  - s'il peut vendre la totalité de ses surplus en frais, il devra porter leur prix de vente comme coût de la matière première pour le séchage (c'est un « coût d'opportunité »);
- s'il dispose de surplus qu'il ne peut pas vendre en frais, par exemple parce qu'il est trop éloigné des marchés ou que la route est impraticable en cette période, et si ce surplus n'a pas été produit intentionnellement (il est lié aux aléas climatiques, mais le producteur n'a pas cherché au départ à disposer d'un surplus), il pourra considérer dans son évaluation économique que le coût de la matière première est nul, aux coûts de récolte près;
- s'il dispose de surplus qu'il ne peut pas vendre en frais et qu'il a intentionnellement cultivés pour l'approvisionnement de son séchoir, 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'à 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, à 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 (matière 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 ordres 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 séchoir avant qu'il ne soit « hors de danger », il peut s'être écoulé 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 élaboré jusqu'aux marchés

- Le coût du transport s'applique aussi bien aux intrants qu'au produit final.
- Le produit élaboré 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 vise une clientèle haut de gamme. Le produit peut par ailleurs s'altérer 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 élaboré 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 à 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.

À 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 présenté 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. lls 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:

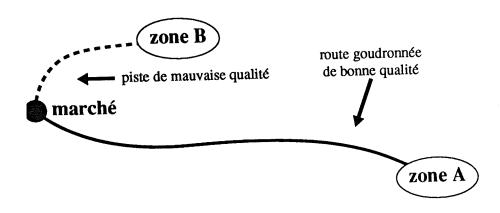
- un marché (une ville, un port à l'exportation...) où sont tous les clients du

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 relié 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.



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 km x 0,025 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 km x 0,150 FCFA/km = 15 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 x 300 km) x 0,025 FCFA/km = 112,5 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 à 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 Consumer 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 à 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'école

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 où :

- 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, diminué 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 :

- $300 \cdot 0.025 + 15 \times 27.5 = 420$  FCFA par kilogramme de produit sec pour l'option « zone A » ;
- $100 \cdot 0.150 + 15 \times 20.0 = 315$  FCFA par kilogramme de produit sec pour l'option « zone B » ;
- $0.0 + 15 \times 35,0 = 525$  FCFA par kilogramme de produit sec pour l'option « zone C ».

Dans ce cas d'école, 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'école, pour extrêmes qu'elles puissent paraître 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, comme 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 stabilisée 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. À 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 élevé dans les zones éloignées des consommateurs de ces surplus (les marchés urbains ou à 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.).

## TROISIÈME PARTIE

Quelques notions approfondies sur le séchage



# Éléments d'approfondissement de la théorie du séchage

Lectures du diagramme enthalpique de l'air humide

Lectures de courbes de sorption-désorption

Utilisation conjointe des courbes de sorption-désorption et du diagramme de l'air pour évaluer la fin du séchage et le pouvoir séchant moyen de l'eau

Compléments sur l'énergie solaire

Ce chapitre se compose d'informations qui, pour la plupart, ont été soit fournies de façon simplifiée dans la partie précédente, soit seulement évoquées.

Elles ont été regroupées en quatre sections :

- lectures du diagramme enthalpique de l'air humide;
- lectures des courbes de sorption-désorption ;
- utilisation conjointe des courbes de sorptiondésorption et du diagramme de l'air humide pour la détermination de la fin du séchage et de l'enlèvement moyen de l'eau au cours de ce séchage;
- compléments sur l'énergie solaire.

# Lectures du diagramme enthalpique de l'air humide

Le diagramme enthalpique de l'air est un abaque composé de plusieurs familles de courbes qui permettent de relier entre elles les principales variables caractéristiques de l'air humide : sa température humide, sa température sèche, son degré d'humidité relative, son degré d'humidité absolue, sa teneur en eau maximale, son pouvoir évaporatoire et son enthalpie. Il faut dans un premier temps rappeler la définition de chacune de ces grandeurs.

#### RAPPEL DES DÉFINITIONS

On définit par « **pouvoir évaporatoire** » de l'air sa capacité à absorber de l'eau placée à 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 l'air :

- l'humidité absolue (teneur en eau), qui s'exprime en grammes d'eau par kg d'air sec. Par exemple si x = 10 g/kg d'air sec, dans 1,01 kg d'air on a 1 kg d'air sec et 10 g de vapeur d'eau;
- l'humidité relative (degré hygrométrique), qui s'exprime en pourcentage. 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 évaluer le pouvoir évaporatoire d'une quantité d'air donné, il faut en connaître son degré hygrométrique  $(H_R)$ . On utilise alors la notion de température humide  $(T_h)$ .

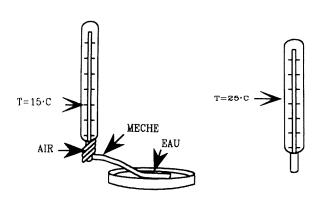
La température du mélange air sec + vapeur d'eau se mesure avec un thermomètre usuel (par exemple à alcool jusqu'à 50°C, à mercure jusqu'à 300°C). On l'appelle aussi température sèche.

Si l'on fait circuler cet air au-dessus d'eau libre suffisamment lentement, il s'établit un **équilibre énergétique** dans les transferts de chaleur et de matière entre l'air et cette eau libre.

L'air, lorsqu'il est plus chaud que l'eau, apporte l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau libre (en surface) et la vapeur d'eau ainsi formée se mélange à l'air. L'énergie fournie à l'eau par l'air est ainsi récupérée par celui-ci sous forme d'énergie contenue dans la vapeur d'eau (appelée chaleur latente).

À la surface de l'eau, l'air atteint une température d'équilibre appelée température de thermomètre humide de l'air. L'air est alors saturé de vapeur d'eau (humidité relative  $H_R = 100$  %), il n'y a plus d'évaporation, l'air ne se refroidit plus.

À chaque degré d'humidité relative de l'air correspond donc une température limite de refroidissement de l'air au contact de l'eau appelée température humide.



La température sèche se mesure avec un thermomètre. Ici, T = 25°C.

La température humide se mesure avec un thermomètre dont l'ampoule est entourée d'une mèche humide. Les lacets de chaussures en coton font d'excellentes mèches. Il faut que la vitesse de l'air autour du thermomètre soit d'au moins 2 m/s pour que la mesure soit juste.

L'énergie contenue dans l'air est dénommée **enthalpie**. Une opération de séchage où il y a conservation du niveau énergétique de l'air est appelée **isenthalpique** (du grec « iso » signifiant pareil). De même, une transformation des caractéristiques de l'air dans laquelle la température est restée constante s'appelle une transformation **isotherme**.

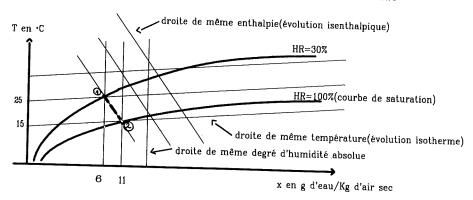
## RELATIONS ENTRE CES VARIABLES : LE DIAGRAMME DE L'AIR HU-MIDE

En toute rigueur, les relations qui s'établissent entre ces variables dépendent de la pression. Toutefois, dans le cadre des transformations envisagées ici, la pression peut être envisagée comme constante (pression athmosphérique, de fluctuations négligeables).

Il existe des expressions mathématiques reliant température sèche (T), température humide  $(T_h)$ , humidité relative  $(H_R)$  et humidité absolue (x). Pour plus de facilité, on utilise le diagramme de l'air humide qui permet, connaissant deux de ces valeurs, de connaître les deux autres.

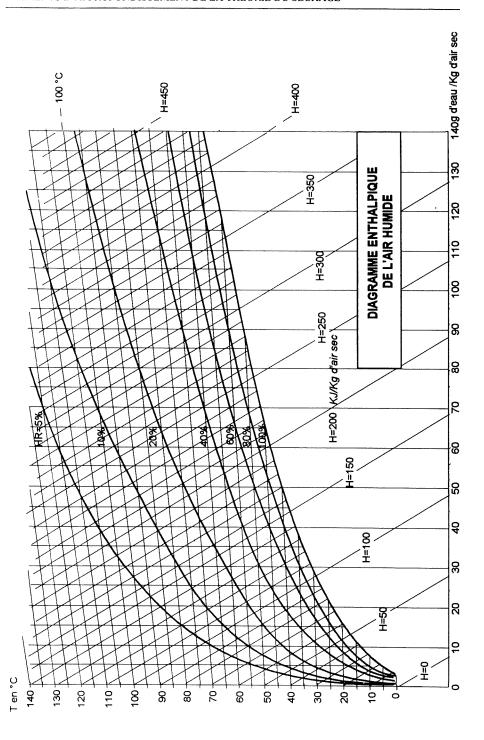
Le diagramme ci-dessous fournit une représentation simplifiée du diagramme de l'air humide, présenté plus en détail sur la page suivante.

## Représentation simplifiée du diagramme de l'air humide



#### Comment lit-on ce diagramme?

Prenons le cas, porté sur le graphique ci-dessus, d'un air dont la température sèche est de 25°C, et dont on cherche à connaître l'humidité relative. La mesure de la température humide de cet air et la lecture du diagramme de l'air humide permettent d'obtenir le résultat. Supposons que la mesure de la température humide de l'air fournisse la valeur de 15°C (cas représenté sur le diagramme). En portant cet air au contact d'eau libre, il subit une évolution ① vers ② de type isenthalpique (même enthalpie de l'air) jusqu'à atteindre une humidité relative de 100 %. Sa température est alors, par définition, la température humide de



l'air, soit 15°C. Ce point d'arrivée ② peut donc être représenté sur le diagramme, à l'intersection de la droite de même température de l'air de 15°C (droite de transformation isotherme) et de la courbe de l'air porté à saturation d'eau (HRs = 100 %). Le point ② est donc déterminé. À partir de ce point, et puisque l'on sait que la transformation a été isenthalpique (sans apport ni retrait d'énergie de l'air), on remonte par la droite isenthalpique jusqu'à l'intersection avec l'isotherme à la température  $T_{\scriptsize \textcircled{\tiny 1}}=25^{\circ}\text{C}$ . La position du point ① est alors connue. On trouve ainsi l'humidité relative de l'air recherchée  $H_{R}$ ①, soit 30 % dans le cas présent.

Le diagramme humide nous donne aussi les humidités absolues pour chaque état 1 et 2: respectivement 6 et 11 grammes d'eau par kilogramme d'air sec dans le cas présent.

Remarque: On peut aussi utiliser la table psychrométrique (cf. annexe 6) qui nous donnent directement  $H_R$  en fonction de la température sèche et de la température humide.

SUIVI DU PROCESSUS DE SÉCHAGE SUR LE DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE. DE LA THÉORIE AU CAS RÉEL.

#### La théorie

Supposons que l'on utilise pour le séchage de l'air extérieur, situé au point A0 sur le diagramme de l'air représenté ci-dessous. Ce point caractéristique de l'air est représenté par ses paramètres de départ : sa température sèche (T0) et sa teneur en eau initiale, ou degré d'humidité absolue (x0).

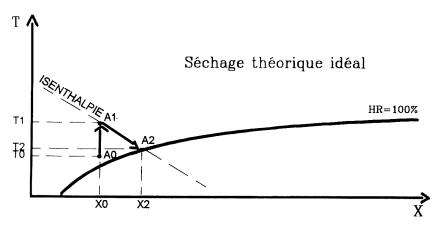
Lors de son passage par le capteur solaire, ou toute autre source de chaleur, cet air s'échauffe sans modification de son humidité absolue (il n'a pas encore atteint le produit et contient donc toujours la même quantité d'eau par kilogramme d'air sec). Juste avant son passage sur le produit, il est caractérisé par le point A1 (même teneur en eau x0, température sèche portée à T1).

Quand il se trouve en contact avec un produit humide, l'air se charge de son eau jusqu'à être saturé de vapeur et lui cède de sa chaleur : la température de l'air diminue. Dans l'enceinte de séchage opaque, il n'y a pas d'apport d'énergie. L'échange s'effectue à énergie (ou enthalpie) constante : la position de l'air

sur le diagramme de l'air humide évolue de la position A1 à la position A2, c'est-à-dire :

- selon une transformation isenthalpique le long d'une droite de même enthalpie de l'air (droite isenthalpe);
- jusqu'au contact de la courbe d'humidité relative de 100 %, l'air ayant atteint la saturation.

#### Le séchage isenthalpique



- A0 est le point coordonnée (To' xo) représentant l'air à l'entrée du capteur.
- Al est le point des coordonnées  $T_1$  et  $x_0$  représentant l'air à la sortie du capteur ou à l'entrée de l'enceinte de séchage. Son humidité absolue est la même que précédemment.
- A2 représente l'air à la sortie de l'enceinte. Saturé (HR = 100 %) il a absorbé de la vapeur  $(x_2 x_0)$  et perdu de la chaleur (différence de température  $T_1$  - $T_2$ ).

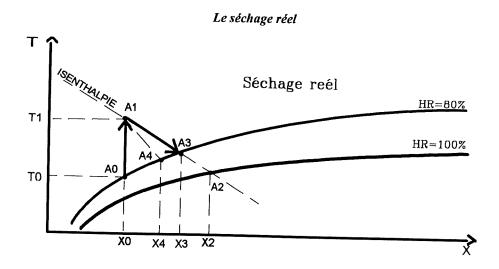
#### Le séchage réel

En réalité, rappelons que le séchage ne se produit pas exactement de cette façon. En effet :

- l'humidité relative de l'air à la sortie du séchoir est toujours inférieure à 100 %, et cela pour trois raisons :
  - l'humidité de l'air ne peut être supérieure à l'humidité relative d'équilibre du produit ; celle-ci variant au cours du séchage, l'humidité de l'air varie également, de près de 100 % au début jusqu'à l'humidité relative d'équilibre correspondant à la teneur en eau du produit sec en fin de séchage ;

- l'air n'a pas nécessairement le temps de se charger de toute la vapeur qu'il pourrait emporter;
- l'efficacité de l'échange air/produit n'est pas parfaite.
- le séchage ne se fait pas de manière parfaitement isenthalpique, c'està-dire sans perte de chaleur. Les pertes de chaleur par les parois du séchoir et le comportement variable du produit provoquent une perte d'enthalpie. Entre l'entrée et la sortie, le point A défini par ses paramètres de température sèche et d'humidité absolue ne suit pas parfaitement une droite isenthalpe.

Le plus souvent, à la sortie du séchoir, l'air n'est pas saturé. Il lui reste un pouvoir évaporatoire qui n'a pas été utilisé.



- A3 représente sur ce graphique la position finale qu'atteindrait l'air après son passage sur le produit si le séchage se produisait bien sans perte d'énergie (isenthalpique), mais en considérant qu'on ne peut atteindre un degré d'humidité relative de 100 % (on atteint 80 % sur cet exemple).
  A4 représente la position atteinte dans la réalité, en tenant compte du surcroît des pertes
- d'énergie qui font que la transformation n'est pas parfaitement isenthalpique.

#### LECTURES D'ENTHALPIES

L'évaluation des enthalpies de l'air (l'énergie de l'air) entre l'entrée et la sortie du séchoir fournit de nombreuses informations. Cela permet en effet d'apprécier le rendement de séchage, qui est le rapport entre l'énergie utilisée pour la vaporisation de l'eau et l'énergie qui a été fournie au système, dont on rappelle la formulation :

$$\eta = \frac{1.2.D_{s} (h_{f}.h_{a})}{3600.P}.100 \text{ (en \%)}$$

#### avec:

- Ds : débit d'air (en m<sup>3</sup>/h);
- h<sub>a</sub>: enthalpie de l'air à l'entrée du séchoir (en kJ/kg a.s.);
- h<sub>f</sub>: enthalpie de l'air à la sortie du séchoir (en kJ/kg a.s.);
- P: puissance fournie au système (en W).

L'évaluation des enthalpies est possible à partir des mesures de températures sèches et humides en entrée et sortie du séchoir. On a vu précédemment que ces données permettent de « positionner » le point caractéristique de l'air étudié sur le diagramme de l'air humide. On détermine alors les enthalpies d'entrée et sortie en identifiant les courbes isenthalpes qui passent par les deux points caractéristiques de l'air à l'entrée et à la sortie.

#### Remarque 1:

L'évaluation de ces enthalpies permet d'autre part de mieux séparer le rendement thermique entre ses deux composantes principales :

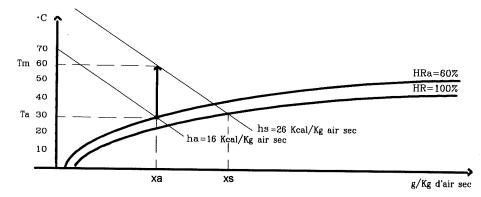
- le rendement du capteur solaire seul, qui reçoit la chaleur du soleil et fournit de la chaleur à l'air;
- l'efficacité du passage de l'air chaud sur le produit pour provoquer son séchage.

Il est en effet possible d'évaluer la différence d'enthalpie de l'air dans le « cas idéal », et de la comparer à la différence d'enthalpie effectivement mesurée. On a alors une mesure des pertes d'efficacité du passage de l'air pour le séchage du produit, à partir de la différence entre l'énergie que devrait contenir l'air en fin de séchage si la transformation avait été parfaitement isenthalpique, et celle

effectivement mesurée : c'est la différence d'enthalpie en sortie de séchoir entre le « cas idéal » et le cas réel. La dernière est évaluée selon la méthode décrite ci-dessus. La première s'évalue rapidement, comme montré sur l'exemple d'utilisation du diagramme ci-dessous.

Il présente l'évolution idéale d'un air, initialement à 30°C et de degré d'humidité relative 60 %, porté à 60°C. En reprenant les développements du paragraphe précédent, le point d'arrivée se situe sur la courbe d'enthalpie à 26 Kcal/kg d'air sec.

#### Lecture de l'enthalpie de l'air ambiant et de l'air chauffé sur le diagramme de l'air humide



#### Remarque 2:

Les enthalpies sont parfois fournies en kcal/kg a.s. Elles doivent être converties en kJ/kg a.s. pour être utilisées dans les formules de calcul qui sont exprimées dans le système d'unité international (1 kcal = 4,18 kJ).

## Lecture de courbes de sorption-désorption

#### NOTION DE COURBE DE SORPTION-DÉSORPTION

Lorsqu'on place un produit humide dans une boîte pleine d'air sec non saturé, refermée hermétiquement par la suite, ce dernier absorbe sous forme de vapeur une partie de l'eau du produit et celui-ci sèche. Au bout d'un moment, il n'y a plus d'échange d'eau : on dit qu'on a atteint l'état d'équilibre.

À l'état d'équilibre, il y a **égalité entre l'humidité relative de l'air et** l'activité de l'eau du produit. On l'appelle « humidité relative d'équilibre ». Elle est notée « φ » et exprimée en %.

Pour une température donnée, elle correspond à une teneur en eau précise du produit. Si on porte sur un graphique les différentes humidités relatives d'équilibre et les différentes teneurs en eau correspondantes du produit, on obtient une courbe.

La courbe obtenue lorsque le produit humide est placé dans un air sec (et donc perd son eau) est appelée courbe de désorption. Elle rend compte du comportement du produit lors du séchage.

La courbe obtenue lorsque le produit sec est placé dans un air humide et qu'il gagne de l'eau est appelée **courbe d'adsorption ou de sorption**. Elle est aussi utile puisqu'elle rend compte du comportement du produit lors du stockage. En fait, ces deux courbes sont très proches l'une de l'autre et on utilise en pratique une courbe moyenne appelée **courbe de sorption-désorption**.

Une telle courbe n'est valable que pour une température donnée. Ces courbes peuvent être tracées pour une teneur en eau rapportée à la masse humide (notée mc) ou pour une teneur en eau rapportée à la masse sèche (notée X).

Les courbes de sorption-désorption sont utilisées pour la conduite du séchage. Les conditions du stockage (température et humidité de l'air) fixent la teneur en eau du produit qu'il est nécessaire d'atteindre mais

## inutile de dépasser pour permettre un stockage sans dégradation du produit.

À titre indicatif, et pour une bonne partie des produits aptes au séchage, la teneur en eau qu'il est nécessaire d'atteindre correspond à une activité de l'eau dans le produit de l'ordre de 0,6. Cette valeur ne s'applique cependant pas à tous les produits.

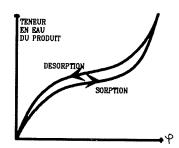
On peut également connaître, suivant le mode et le lieu de stockage, la température de l'air ambiant. On considère alors que la température du produit lui sera égale. Si, pour le produit considéré, l'humidité relative de l'air doit rester inférieure à 65 % (limite pour le développement des micro-organismes : moisissures, levures et bactéries), on détermine à l'aide de la courbe la teneur en eau finale du produit à atteindre pour que, à la température de stockage, l'humidité relative d'équilibre, et donc l'humidité relative de l'air, ne dépasse pas 65 %. Les valeurs de teneur en eau finale fournies dans les fiches produits correspondent à des humidités relatives d'équilibre variant de 20 à 50 % selon le type de produit et sa température.

Si l'humidité de l'air de stockage est supérieure à 65 % (par exemple en saison humide en pays équatoriaux), il faut envisager de stocker les produits dans des récipients étanches à l'air pour éviter des pertes et dégradations.

#### Remarque:

À titre de rappel : à même taux d'humidité relative, la conservation du produit sera d'autant plus longue que la température sera plus basse (moindre développement de la population microbienne).

#### Les courbes de sorption-désorption



La courbe de sorption représente le comportement du produit s'humidifiant.

La courbe de désorption représente le comportement du produit se séchant.

## Utilisation conjointe des courbes de sorption-désorption et du diagramme de l'air pour évaluer la fin du séchage et le pouvoir séchant moyen de l'eau

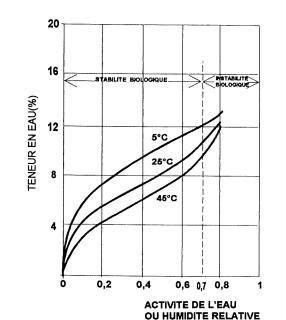
## ESTIMATION DE LA FIN DU PROCESSUS DE SÉCHAGE

Considérons le cas d'un produit dont la teneur en eau en base humide (masse d'eau / masse totale du produit) doit être de 15 % pour que sa conservation soit possible. On envisage un séchage à 60°C. Comment déterminer le moment où cette teneur en eau a été atteinte sans avoir à faire régulièrement des mesures de poids ou de teneur en eau du produit ? On peut obtenir l'information à partir de mesures de températures sèche et humide de l'air en sortie de séchoir, qui indiquent l'humidité relative de cet air, et donc l'activité de l'eau du produit.

## On procède comme suit :

- On convertit la teneur en eau en base humide de 15 % en teneur en eau en base sèche en utilisant la formule présentée au chapitre V :
- $x = 100 \cdot m / (100 m)$ , soit ici:  $x = 100 \cdot 15 / (100 - 15) = 17.5 \%$ .
- On prend la courbe de désorption du produit considéré pour la température de 60°C présentée ci-dessous (rappel : ces courbes dépendent de la température). On y lit l'humidité relative d'équilibre de l'air avec le produit pour la teneur en eau en base sèche calculée, soit ici 70 % (cf. schémas page ci-contre).
- On dispose maintenant d'une information mesurable pour arrêter le séchage en temps voulu : les mesures de température humide et de température de l'air en sortie de séchoir, qui permettent de déterminer l'humidité relative de l'air (cf. ci-dessus), et on arrête le séchage lorsque cette dernière est de 70 %.

#### Les courbes de sorption et désorption de la muscade à 25 et 45°C



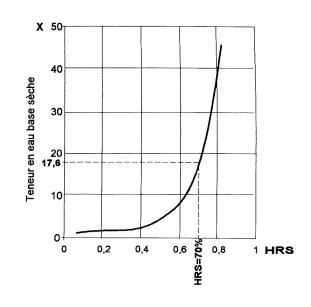
D'EQUILIBRE DE L'AIR (HRS)

Si la température prévue pour le stockage est de 25°C, il faudra sécher le produit jusqu'à une teneur en eau finale minimale (correspondant à Aw < 0.7) de 10 %.

Si on estime que le stockage se fera dans une ambiance à faible humidité relative (par exemple 50 %), il faudra alors sécher le produit jusqu'à X=8 %.

Si par contre le stockage se fait à 45°C, la teneur X minimale sera de 9 %.

#### Courbe type de désorption à 60°C



#### ESTIMATION DU POUVOIR SÉCHANT DE L'AIR EN MOYENNE PEN-DANT LA DURÉE DU SÉCHAGE

Rappel

L'activité de l'eau dans le produit évolue lors du séchage. Si elle était constamment égale à 1, et en supposant parfaits les échanges de masse et de chaleur entre l'air et le produit, le pouvoir évaporatoire de l'eau fournirait la mesure de l'eau qu'un kilogramme d'air peut emporter. Ce n'est pas le cas. En faisant abstraction des pertes thermiques (qui sont intégrées dans le rendement thermique), il est nécessaire de définir le pouvoir séchant de l'air, qui est toujours inférieur à son pouvoir évaporatoire puisque l'air ne sort jamais du séchoir à saturation d'eau. Pour corriger ce « problème », on retient une humidité relative de l'air de sortie du séchoir « moyenne » donnée par :

$$H_{\rm rm} = \frac{1}{2} (100 + H_{\rm rs})$$

avec:

- H<sub>rm</sub>: humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en moyenne sur la durée totale du séchage (en %);
- H<sub>rs</sub>: humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, à la fin du séchage;
- 100 : humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en début de séchage (saturation d'eau : 100 % d'humidité relative).

#### Calcul sur l'exemple précédent

En reprenant l'exemple traité plus haut, et en supposant que l'air était à 30°C et le degré d'humidité relative de 60 % à l'entrée du séchoir, on a  $H_{rm} = (100 + 70) / 2 = 85$  %.

Le degré d'humidité absolue de l'air à l'entrée du séchoir est lu sur le diagramme de l'air humide pour une humidité relative de 60 % et une température de 30°C, soit : 16,5 g/kg d'air sec.

Le degré d'humidité absolue de l'air en sortie du séchoir, et en moyenne sur la durée du séchage, est lu sur ce même diagramme, selon la méthode adoptée précédemment, et pour une humidité relative moyenne de 85 %, soit 28 g/kg d'air sec. Un mètre cube d'air enlève donc en moyenne : 1,2 x (28 – 16,5) = 13,8 grammes d'eau/m<sup>3</sup>. Le pouvoir séchant de l'air utilisé est alors de l'ordre de 14 grammes d'eau/m<sup>3</sup>, en moyenne sur la durée du séchage.

## Compléments sur l'énergie solaire

#### NOTIONS GÉNÉRALES

Le soleil émet une puissance d'environ 380 milliards de mégawatts <sup>(1)</sup> sous forme de rayonnement **électromagnétique**. La terre intercepte 170 milliards de Mw de cette source d'énergie.

Un rayonnement électromagnétique est émis par tout corps chargé d'une certaine quantité de chaleur. Ce rayonnement se caractérise par deux grandeurs :

- sa **longueur d'onde**, notée «  $\lambda$  » et exprimée en microns ( $1\mu_m = 1$  millième de mm =  $10^{-3}$  mm =  $10^{-6}$  m);
- son flux ou puissance, noté «  $\phi$  » et exprimé en watts (w).

Ce sont surtout les rayonnements dont la longueur d'onde est comprise entre 0.8 et  $200 \mu m$  qui transfèrent de la chaleur. On les appelle **infrarouges**.

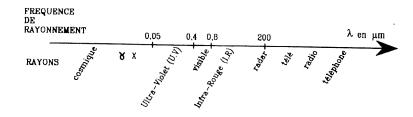
La longueur d'onde du rayonnement émis par un corps est directement fonction de sa température. La puissance du rayonnement dépend de l'état de surface, la couleur, la composition de ce corps.

Afin de classer les corps, on définit un corps idéal, fournissant le rayonnement le plus puissant dans des conditions de températures données : le corps noir. Le corps noir a les propriétés suivantes :

- il absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit ;
- la puissance qu'il rayonne est directement proportionnelle à sa température de surface et est identique dans toutes les directions.

Ainsi, le soleil se comporte comme un corps noir avec une température de surface de 5 500° C.

<sup>(1) 1</sup> mégawatt (MW) = 1000 kw.



#### COMMENT SE COMPORTE UN CORPS EXPOSÉ À UN RAYONNEMENT

Lorsqu'un corps reçoit un rayonnement, il en absorbe une partie, en réfléchit une autre, en transmet une troisième.

Les corps transparents transmettent le rayonnement sans modification essentielle de sa direction, alors que les corps translucides diffusent le rayonnement.

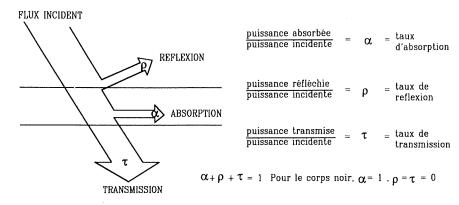
Le coefficient (ou taux) de transmission du rayonnement varie avec l'angle d'incidence du rayonnement. Pour le verre, il baisse fortement quand l'angle d'incidence dépasse 50°.

L'absorption s'accompagne d'une conversion d'énergie dans le corps récepteur. Par exemple, un corps peut recevoir de l'énergie sous forme de lumière visible, la convertir en chaleur et la rayonner sous forme d'infrarouges, invisibles.

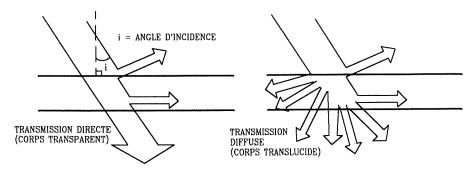
La réflexion peut être spéculaire, c'est-à-dire dans une direction précise (cas des métaux à surface polie...), ou diffuse, sans direction privilégiée. L'évolution des surfaces au cours du vieillissement tend à les rapprocher de la réflexion diffuse.

Le taux d'émission, ou émissivité, d'un corps représente sa propension à rayonner l'énergie qu'il contient sous forme de chaleur. Il est noté «  $\epsilon$  ». Pour le corps noir,  $\epsilon=1$  (maximum).

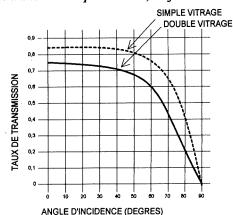
#### Comportement général d'un corps recevant un rayonnement



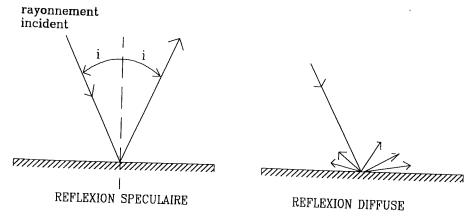
Différents modes de transmission du rayonnement



Variation du taux de transmission par le verre, en fonction de l'angle d'incidence



## Différents modes de réflexion du rayonnement



## CORPS GRIS, CORPS SÉLECTIFS, CORPS CHAUDS, CORPS FROIDS

Aucun corps dans la nature ne se comporte exactement comme un corps noir. En fait, on distingue essentiellement les corps « gris » et les corps « sélectifs ».

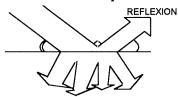
Le corps gris n'absorbe qu'une partie du rayonnement. Mais leur taux d'absorption est le même pour toute longueur d'onde. Inversement, ils émettent moins de rayonnement que le corps noir à la même température, mais ils le font également dans toutes les longueurs d'onde.

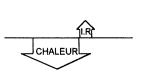
Au contraire, les corps sélectifs ne réagissent pas de la même façon aux différentes longueurs d'onde.

Cependant pour tout corps, le taux d'absorption dans une longueur d'onde donnée est égal au taux d'émission dans la même longueur d'onde. Cela permet de distinguer les corps sélectifs « chauds » des corps sélectifs « froids » :

- les corps « chauds » absorbent beaucoup le rayonnement solaire et donc s'échauffent fortement; par contre, ils rayonnent peu dans l'infrarouge et ne peuvent donc perdre leur chaleur de cette façon; ils la perdent plus facilement par contact avec l'air et sont donc tout indiqués pour réchauffer celui-ci: on les utilise comme absorbeurs dans les capteurs solaires;
- les corps « froids » absorbent peu le rayonnement solaire et s'échauffent donc peu; ils perdent facilement leur chaleur sous forme d'infrarouge; ils restent frais et refroidissent l'air à leur contact; on les utilise donc en climatisation naturelle (peinture blanche, chaux, plâtre, etc.)

#### Corps chauds et corps froids

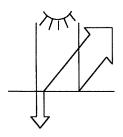


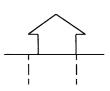


L'acier galvanisé absorbe 64% du rayonnement solaire  $(\alpha=0.64)$  et le transforme en chaleur.

L'acier émet alors dans l'infrarouge mais il ne rayonne que 25 % de sa chaleur.

Donc l'acier galvanisé placé au soleil accumule de la chaleur. Sa température augmente. On dit que c'est un corps chaud.

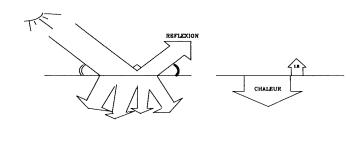


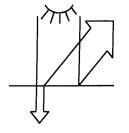


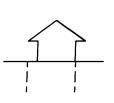
Le plâtre n'absorbe que 7 % du rayonnement solaire  $(\alpha=0.07)$ 

mais rayonne 91%(ε=0,91) de la chaleur qu'il contient

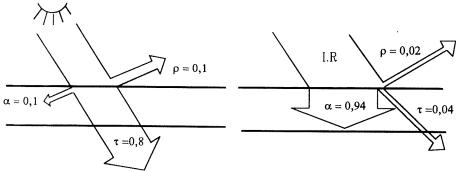
donc il reste froid placé au soleil. On dit que c'est un corps froid.







#### Le comportement particulier du verre



Le verre laisse passer la lumière solaire mais absorbe les infrarouges. Il pemet de réaliser l'effet de serre.

## LA RÉCEPTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR UNE SURFACE AU NIVEAU DU GLOBE TERRESTRE

Le rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère terrestre peut être considéré comme constant tout au long de l'année compte tenu de la précision recherchée dans les calculs de dimensionnement. On définit alors l'intensité de ce rayonnement par la constante solaire. Il s'agit d'une puissance par unité de surface égale à 1367 W/m².

L'atmosphère terrestre composée de différents types de gaz, de gouttes d'eau, de particules solides en suspension n'autorise pas la totalité du rayonnement solaire à atteindre le sol. Une partie est réémise vers l'espace. Au cours de sa traversée dans l'atmosphère, des phénomènes d'absorption, de réflexion et de diffusion se conjuguent. Le rayonnement global reçu au niveau du sol par m² a donc été atténué. D'autre part, on réalise une distinction au point de vue qualitatif en séparant le rayonnement global en rayonnement direct et en rayonnement diffus.

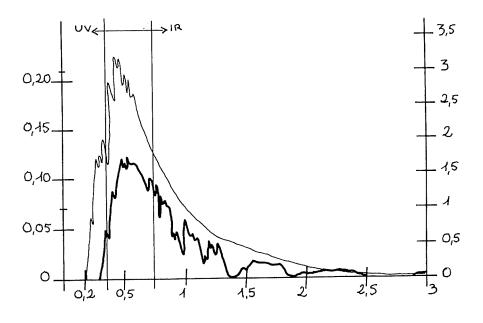
Le **rayonnement direct** est celui qui parvient directement sur une surface au sol sans avoir été ni réfléchi, ni diffusé.

Le rayonnement diffus regroupe tout rayonnement autre que le direct, reçu par une surface au sol après avoir été réémis par un corps intermédiaire dans l'atmosphère. Ces corps (molécules d'air, aérosols, poussières, gaz, vapeur d'eau) peuvent soit absorber complètement le rayonnement solaire, soit en absorber une partie et en réfléchir une autre. Tous ces phénomènes participent

à la diffusion du rayonnement solaire. Celui-ci n'a pas, contrairement au rayonnement direct, de direction privilégiée. On le note D (en Wh/m²).

L'éclairement global (G) est donné par la formule : G = I .  $\sin h + D$ , avec I (irradiation), G, D en Wh/m<sup>2</sup>, et h : angle que fait le soleil avec l'horizontale.

Répartition de l'énergie au niveau de la couche atmosphérique (trait fin) et au niveau de la surface terrestre (trait épais) suivant les différentes longueurs d'onde



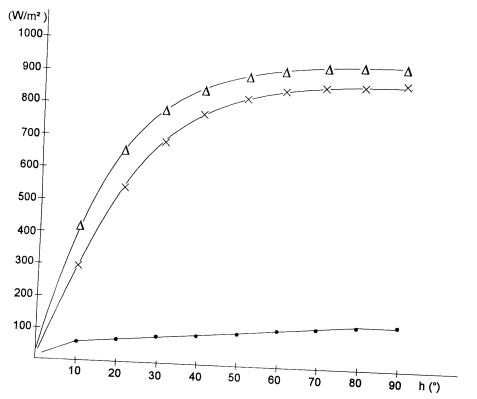
## CALCUL DE LA QUANTITÉ D'ÉNERGIE SOLAIRE DISPONIBLE SUR UNE SURFACE QUELCONQUE

Le calcul théorique précis de l'énergie solaire reçue au niveau d'une surface quelconque est en fait très complexe car il prend en compte une multitude de facteurs :

composition de l'atmosphère (présence de nuages, particules en suspension);

- épaisseur de l'atmosphère à traverser (altitude du lieu, angle de traversée de l'atmosphère suivant l'heure et le jour de l'année);
- angle d'incidence que fait la normale à la surface avec le rayonnement direct (plus cet angle est important, c'est-à-dire plus les rayons sont l'intensité du rayonnement reçu sera faible);
- albédo du relief environnant: on appelle albédo le pouvoir de réflexion que possède le relief environnant la surface réceptrice. Une partie du rayonnement global frappant le relief environnant est renvoyé proportionnellement à son albédo vers la surface réceptrice;
- masques éventuels (tout obstacle entre la source radiante, le soleil et la surface réceptrice).

Pour dimensionner la surface de captation d'un séchoir solaire, on réalise les calculs pour un jour clair de la saison de séchage (indication maximale). Pour plus de précision, on choisit une journée représentative de ciel clair pour chaque mois de la saison de séchage.



#### Concernant le schéma de la page précédente :

- Δ Rayonnement direct en saison sèche, entre 25° Nord et 25° Sud.
- X Rayonnement direct en saison des pluies entre 15° Nord et 15° Sud (il n'y a pas de données exploitables pour la saison des pluies entre 25° N et 25° S).
- Rayonnement diffus en toute saison, entre 25° Nord et 25° Sud.

Pour des cas particuliers :

- en bordure de mer, retirer 10 %;
- par brume, retirer 45 % (pour h = 90 %).

Ces résultats proviennent des travaux de M. de Brichambaut (cf. Bibliographie).

#### Exemple:

Latitude 10°, saison sèche,  $h = 60^\circ$ ,  $I = 960 \text{ W/m}^2$ ,  $D = 105 \text{ W/m}^2$ ,  $\sin h = 0.87$ . G = I.  $\sin h + D$ , donc  $G = 937 \text{ W/m}^2$ .

L'idéal est de posséder des données réelles provenant de stations météorologiques. Ce sont des données statistiques établies en faisant la moyenne des observations passées. L'irradiation est donnée pour un jour-type du mois ou de l'année. Les valeurs réellement observées varient autour de cette moyenne. Ces données sont disponibles pour tous les grands centres urbains des pays concernés par le séchage solaire. Néanmoins, si pour la zone étudiée, elles ne sont pas disponibles, on aura recours à des méthodes de calculs.

#### Elles permettront de calculer :

- les énergies maximales mensuelles journalières (ciel clair). Elles dépendent de la latitude, de l'altitude du lieu considéré ainsi que du facteur de trouble atmosphérique;
- les énergies moyennes mensuelles journalières. Elles dépendent en outre de la fraction d'insolation du lieu considéré (rapport entre la durée réelle d'ensoleillement et la durée théorique maximale).

Les différentes méthodes de calcul sont présentés dans les ouvrages de référence de la bibliographie (« Solar engineering of thermal process », « Le gisement solaire », « Ingénierie des systèmes solaires »).

Toutefois, les données météorologiques ne donnent que des indications pour des surfaces horizontales.

#### LA CHEMINÉE SOLAIRE

Rappel

L'air situé en haut de la cheminée est plus chaud, donc moins dense que celui situé en bas, qui ne l'a pas encore traversée, et également plus chaud que l'air ambiant. Suivant le principe d'Archimède, cet air plus léger subit la pression de l'air ambiant plus lourd. Cette pression (ou « terme moteur ») est donnée par:

$$\Delta mc = (\rho 1 - \rho 2).g.H$$
 en Pascal (Pa)

où :

- ρ1 est la masse volumique de l'air en bas de la cheminée (kg/m³);
- ρ2 est la masse volumique de l'air en haut de la cheminée (kg/m³);
- H est la hauteur de la cheminée (m);
- g est l'accélération de la pesanteur (≈ 10 m/s²).

Vitesse d'écoulement de l'air dans la cheminée

La vitesse V de l'air dans la cheminée est donnée par (d'après L. Bernard) :

$$V_{air} = \sqrt{\frac{e.g.H.\sin\alpha}{0.02.H+e}} \cdot \sqrt{\frac{T_s}{T_e} - 1} \quad \text{(en m/s)}$$

avec:

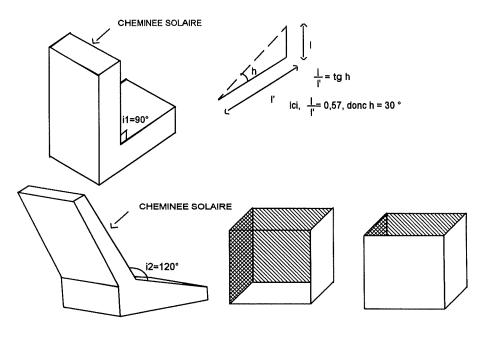
- e : largeur de la face de la cheminée exposée au soleil (en mètres) ;
- H : hauteur de la cheminée en mètres ;
- Ts: température de l'air en haut de la cheminée (en degrés Kelvin) (2);
- Te : température de l'air en bas de la cheminée (en degrés Kelvin);
- $-\alpha$ : angle que forme la cheminée par rapport à la hauteur du soleil.

#### L'angle $\alpha$ est donné par : $\alpha = i - h$ ,

où:

- i est l'angle que forme avec l'horizontale la surface de la cheminée exposée au soleil;
- h est la hauteur du soleil ; h se lit sur un diagramme solaire ou se déduit du rapport entre la longueur de l'ombre portée d'un mât et la longueur de ce mât.

#### Détermination de l'angle a



Dans le premier cas,  $i_1 = 90^{\circ}$ , donc  $\alpha 1 = i_1 - h = 60^{\circ}$ . Dans le deuxième cas,  $i_2 = 120^\circ$ , donc  $\alpha 2 = i_2 - \frac{1}{h} = 90^\circ$ 

(Les formules s'appliquent si i - h est positif).

<sup>(2)</sup>  $K = 273 + {}^{\circ}C$  (conversion degré Celsjus  $\rightarrow$  degré Kelvin).



# Mesurer et contrôler le séchage

Le bilan matière

Le rendement thermique

Les appareils de contrôle du processus de séchage

de techniques et la conduite d'une unité de séchage nécessitent des mesures de température, d'humidité, de vitesse et de rayonnement solaire. Ces mesures répondent à des besoins précis.

Au stade de la conception et de la mise en place de techniques de séchage, les mesures de terrain permettent de combler les vides de la théorie pour résoudre les problèmes de dimensionnement d'un séchoir, du mode de séchage le plus adapté à tel ou tel type de produit alimentaire, etc. Il est en effet, compte tenu du niveau actuel des connaissances théoriques et techniques sur le séchage, quasiment impossible de prédire à l'avance comment fonctionnera exactement tel ou tel séchoir dans tel ou tel environnement, et pour telle ou telle variété de tel ou tel produit. Une bonne campagne de mesures permettra de mieux évaluer le comportement effectif du séchoir dans le cas considéré.

Les mesures sont par ailleurs essentielles lors de la conduite de l'activité de séchage, en particulier pour des niveaux de production non domestique. Elles sont nécessaires pour contrôler l'évolution d'un cycle de séchage (et veiller en particulier à ce que certains paramètres ne dépassent pas les valeurs critiques admises pour une conservation des qualités du produit), et préciser le moment où le niveau de séchage requis a été atteint.

Les principaux protocoles et instruments de mesure sont précisés dans ce chapitre.

## Le bilan matière

Le bilan matière comprend la mesure des poids et l'appréciation qualitative du séchage, par un « rapport de séchage ».

#### LA MESURE DES POIDS

Elle sert essentiellement à déterminer deux rapports très utiles :

Le rapport de séchage :  $Rs = \frac{\text{poids initial}}{\text{poids au moment}}$ de la mesure

Le débit produit : Dp = 

| poids de produit séché | durée de séchage de la mesure |

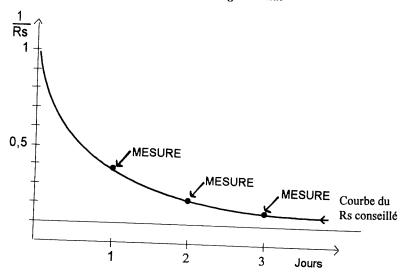
Les mesures des poids et des durées sont directement accessibles au sécheur. Il a un intérêt direct à les effectuer, pour préciser :

- le degré du séchage, qui peut être considéré comme satisfaisant lorsque le rapport poids initial/poids mesuré correspond au rapport poids initial/ poids final conseillé sur les « fiches produit » ;
- le rythme de la production, donc le rythme requis de l'approvisionnement en matière première et les capacités à satisfaire la demande du client dans les temps requis;
- la quantité de matière première dont il a besoin pour produire une certaine quantité de produit sec.

#### LE RAPPORT DE SÉCHAGE

Des mesures régulières du rapport de séchage et du débit produit permettent par ailleurs de contrôler l'efficacité du séchoir. On peut en effet reporter sur un même graphe l'évolution constatée de l'inverse du rapport de poids Rs pendant le séchage et l'évolution considérée comme satisfaisante de ce rapport 1/Rs pour le produit considéré. Si les points de mesure sont au-dessus de la courbe de rythme de séchage conseillé, cela signifie que le séchage est trop lent. S'ils sont au-dessous, c'est l'inverse.

#### Rythme de séchage normal



#### L'utilité du rapport de séchage

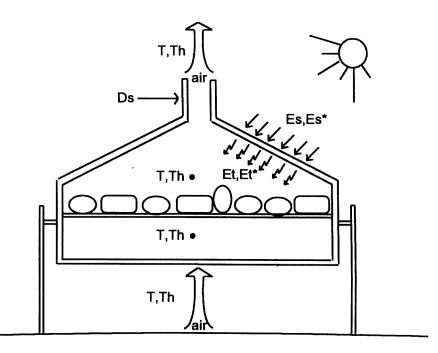
Le rapport de séchage est important pour le scientifique qui peut ainsi mieux identifier la phase du séchage qui ne se produit pas de façon conforme aux exigences du séchage du produit considéré, et proposer ainsi des solutions. Il est aussi utile pour l'utilisateur qui peut contrôler l'avance du séchage, et la bonne tenue dans le temps des caractéristiques du séchoir.

Il faut cependant éviter que les opérations de mesure perturbent le fonctionnement du séchoir. Une mesure matin, midi et soir est suffisante.

## Le rendement thermique

Le rendement thermique permet principalement de contrôler l'efficacité des transferts d'énergies entre les sources extérieures (soleil, gaz...), l'air et le produit.

Les informations nécessaires à l'établissement du rendement thermique



T, Th: température sèche et humide aux divers stades du séchage (en °C).

Ds: débit d'air dans le séchoir (m³/h).

G, Es, Et: éclairement solaire, respectivement au sol, au dessus et en dessous de la couverture transparente (en  $W/m^2$ ).

G\*, Es\*, Et\*: irradiation solaire (en Wh/m<sup>2</sup>).

On peut établir un rendement instantané, qui permet de mesurer l'efficacité du transfert de chaleur à chaque étape du séchage, ou un rendement intégré, qui mesure l'efficacité moyenne de ces transferts sur la durée totale du séchage.

## LE RENDEMENT THERMIQUE INSTANTANÉ

Il exprime le rapport entre l'énergie solaire reçue par le système et l'énergie effectivement utilisée pour dégager l'eau du produit au moment de la mesure.

Soit:

$$\eta \text{ is } = \frac{1.2 \cdot D_s (h_f - h_a)}{3600 \cdot Es \cdot S} \cdot 100 \text{ (en \%)}$$

avec:

- D<sub>s</sub>: débit d'air (en m<sup>3</sup>/h);
- ha: enthalpie de l'air à l'entrée du séchoir (en kJ/kg a.s.);
- h<sub>f</sub>: enthalpie de l'air à la sortie du séchoir (en kJ/kg a.s.);
- S: surface éclairée (en m<sup>2</sup>);
- Es: éclairement (W/m<sup>2</sup>);
- ha et hf sont déterminés sur le diagramme de l'air humide à partir des températures sèches et humides du produit.

ηis est le rendement thermique du séchoir complet, au moment de la mesure. 1,2.Ds.(hf-ha) est l'énergie fournie effectivement pour retirer l'eau du produit : la différence des enthalpies de l'air entre l'entrée et la sortie indique cette énergie par kilogramme d'air ayant traversé le séchoir. Le facteur 1,2 correspond à la masse volumique de l'air (1,2 kg/m<sup>3</sup>). 3600.Es.S mesure l'énergie solaire reçue par heure par le séchoir. Le terme 3 600 correspond à la conversion heure/secondes (1 h = 3 600 secondes). Ce rendement (ou rendement énergétique) n'est jamais égal à un : de nombreuses pertes interviennent et font que toute l'énergie fournie n'est pas utilisée pour le séchage lui-même.

Si l'on veut obtenir les rendements des différentes phases de séchage, il suffit de remplacer ha et hf par les enthalpies de l'air d'entrée et de sortie des phases correspondantes. Le rendement thermique instantané permet alors de mieux

préciser le comportement du séchoir lors de ces différentes phases.

Dans le cas d'un séchage mixte (solaire + gaz par exemple), il sera nécessaire d'intégrer l'énergie fournie par la source de chaleur complémentaire.

#### LE RENDEMENT THERMIQUE INTÉGRÉ

Le rendement instantané varie fortement avec les différentes périodes de séchage (phases I, II, III). Pour avoir une image plus globale de l'efficacité des transferts d'énergie dans le séchoir, on calcule le rendement thermique moyen sur toute la durée de séchage d'un produit (η<sub>ps</sub>).

Il suffit pour cela de « découper » (discrétiser) la durée totale du séchage en plusieurs périodes d'égale importance (par exemple une heure). On mesure à chaque milieu de période les enthalpies de l'air hf et ha à la sortie et à l'entrée du séchoir, le débit d'air Ds et l'éclairement Es, comme pour un rendement thermique instantané.

La somme des termes 1,2.Ds.(hf-ha) calculés pour chaque période, multipliée par leur durée (exprimée en heures) indique l'énergie totale qui aura été utilisée pour extraire l'eau du produit lors du séchage complet.

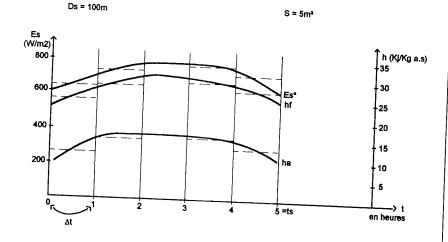
La somme des termes 3600. Es. S mesurés à chaque période, multipliée par leur durée (exprimée en heures), indique l'énergie solaire qui aura été reçue par le séchoir pour un cycle complet de séchage.

Le rendement thermique intégré est le rapport de ces deux sommes. Cf. l'encadré de la page suivante sur le calcul d'un rendement intégré.

La comparaison des mesures de G avec Es et Et, éclairements d'un mètre carré au sol, sur et sous la couverture transparente, permet d'apprécier l'effet de l'inclinaison de la surface de captation du séchoir et le taux de transmission de la couverture transparente (quand il y en a une).

## Exemple de calcul d'un rendement intégré

Découpage par périodes de 1 h d'un cycle de séchage s'opérant de 9 h 00 à 14 h 00. Les valeurs sont donc ici des moyennes horaires (par exemple : pour la tranche 9 h 00-10 h 00, on prend la moyenne des mesures opérées à 9 h 00 et à 10 h 00). Le débit d'air est ici de 100 m³/h, on a 5 m² de capteurs solaires, et le cycle de séchage s'arrête à 14 h 00.



	Es (Wh/m <sup>2</sup> )	hf-ha (kJ/kg)	1,2.Ds.(hf - ha)	
9 h 00-10 h 00	660	13,0	1 560	
10 h 00-11 h 00	780	13,5	1 620	
II h 00-12 h 00	820	13,5	1 620	
12 h 00-13 h 00	800	13,0	1 560	Rendement: 7956 / (3795 x 5)
13 h 00-14 h 00	735	13,3	1 596	soit: $\eta ps = 42 \%$
Total / cycle	3 795		7 956	1/ Po 72 /0

## Les appareils de contrôle du processus de séchage

Pendant le séchage, il est nécessaire de contrôler :

- la température de l'air de séchage : il faut la comparer à la température maximale admissible pour le produit, indiquée sur les « fiches produit ».
   Ce paramètre ne devra pas excéder cette limite en phase III du séchage ;
- la température du produit (pour éviter qu'elle soit supérieure à la température maximale du produit, à toutes les étapes du séchage);
- les températures sèche et humide de l'air à la sortie du séchoir avant, pendant et après le séchage, pour déterminer l'humidité de l'air (HR). Si celle-ci est nettement inférieure à l'humidité de l'air maximale, il faut envisager une diminution du débit Ds, de façon à laisser à l'air le temps de se charger de davantage d'eau dans le séchoir (lors des phases I et II);
- le débit d'air Ds pour permettre la recherche efficace de l'optimum précédent;
- la vitesse et la direction du vent sur le site qui ont une influence sur le fonctionnement d'une cheminée solaire, sur le débit d'air dans le séchoir, sur la température du séchoir lui-même, surtout quand il n'y a pas d'effet de serre.

Avant et après séchage:

- le taux d'humidité initial et final du produit, ou
- le poids initial et final pour contrôler le rapport de séchage (Rs) (chacune de ces mesures permet d'obtenir l'autre).

#### LA MESURE DE LA TEMPÉRATURE SÈCHE

L'instrument le plus simple est le thermomètre à alcool ou à mercure (alcool jusqu'à 50°C, mercure jusqu'à 300°C).

Le temps de réponse de ces appareils est assez long. Ces thermomètres usuels sont peu précis mais peu coûteux.

#### Les thermomètres à bilame

Ils sont constitués de deux rubans métalliques à coefficients de dilatation différents, soudés entre eux. Une variation de température induit une déformation transmise à un cadran d'affichage. Une sonde est placée à l'endroit requis. Le cadran peut se trouver jusqu'à 40 cm de l'endroit de la mesure. Ces appareils sont robustes et assez coûteux.

## 60 80 20 100 120

Thermomètre à bilame

## Les thermomètres à résistance électrique

Les thermomètres à résistance utilisent les propriétés des fils en métal (nickel ou platine pour des températures jusqu'à 500°C) dont la résistance électrique, mesurée, dépend de la température.

Ces appareils ont un temps de réponse assez court et sont précis.

#### Les thermomètres à thermistance

Selon le même principe que les précédents, ils utilisent le germanium ou le silicium. Ils sont très précis et réagissent presque instantanément. Ils permettent

un affichage digital. Ils sont très coûteux et leur degré de précision ne se justifie guère pour des opérations de séchage.

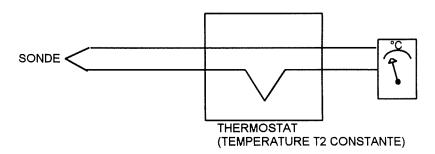
#### Les thermomètres à thermocouple

Lorsqu'on porte la soudure de deux fils de métaux différents (par exemple : cuivre et constantan) à une température T1 tout en maintenant les deux autres extrémités à température constante T2, il apparaît une différence de potentiel électrique entre les extrémités, proportionnelle à la différence (T1 – T2). L'affichage est digital ou analogique. Les thermocouples les plus usuels sont constitués de :

- fer et constantan;
- argent et constantan;
- nickel et nickel-chrome.

Ces appareils sont assez précis.

#### Principe d'un thermomètre à thermocouple



#### Où et comment mesurer une température ?

Il est toujours relativement simple de mesurer une température. Mais il n'est pas toujours évident de mesurer la bonne, pour plusieurs raisons précisées ci-dessous :

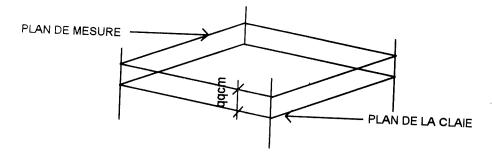
il faut éviter l'exposition du thermomètre au rayonnement solaire en l'entourant d'une surface réfléchissante (papier aluminium, etc.) et en laissant un espace entre l'enveloppe et l'instrument pour permettre une circulation de l'air. Faute de cela, le thermomètre indiquera une température plus

élevée que celle que l'on cherche à mesurer (chauffage direct par le soleil ou indirect par l'enveloppe);

- il faut attendre que la mesure du thermomètre soit stabilisée lorsque celui-ci ne présente pas une réponse immédiate;
- il faut toujours s'assurer que le thermomètre est bien sec pour mesurer la température de l'air. Faute de cela, une évaporation de l'eau de surface du thermomètre se produira au contact de l'air. Le thermomètre ne mesurera plus la température de l'air, mais un peu moins puisque l'évaporation de cette eau entraîne un refroidissement : la température sera plus proche de celle de l'air humide ;
- enfin, compte tenu des hétérogénéités dans les mouvements de l'air et dans les produits, la température peut varier sensiblement d'un lieu à l'autre (par exemple, entre le bord et le milieu d'une section du séchoir pour l'air, ou entre le centre et les extrémités d'une claie pour l'air et pour le produit).

Les quelques conseils qui suivent visent à préciser la façon de mesurer la température.

Au-dessus d'une claie ou à la sortie d'une cheminée

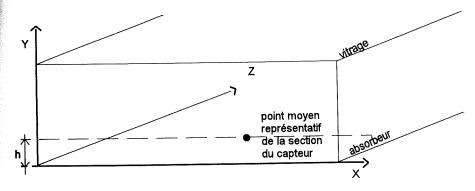


Plus le plan de mesure est grand, plus les hétérogénéités de température seront fortes. Il faut alors quadriller ce plan et mesurer la température à l'intérieur de chaque case. On détermine une température moyenne réellement représentative en effectuant la somme des températures de chaque case et en la divisant par le nombre de cases. On peut, pour des mesures ultérieures, mais dans des conditions identiques de répartition du produit sur les claies ou de débit d'air, mesurer

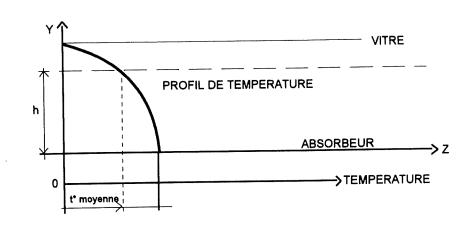
la température dans deux, trois ou quatre cases représentatives de la moyenne seulement. On gardera à l'esprit que les cases situées près des bords ne sont pas représentatives de la moyenne, du fait de l'hétérogénéité de la circulation de l'air et de l'isolation.

#### Dans un préchauffeur d'air

Si l'on veut connaître l'efficacité du collecteur solaire, il faut mesurer la température de l'air à sa sortie. À quel endroit ?



Dans un capteur à air, le profil de température est le plus souvent de la forme :



On détermine ainsi sur Oy la droite correspondant à la température moyenne de ce profil.

Ensuite, dans le plan xOy, sur la droite y = h, on effectue plusieurs relevés de température et on détermine le point représentatif de la température moyenne.

Nota: La méthode de recherche du point de référence doit être utilisée en régime permanent (niveau d'ensoleillement et débit d'air constant). Dans le cas contraire (régime variable), il est préférable de faire plusieurs mesures en plusieurs points.

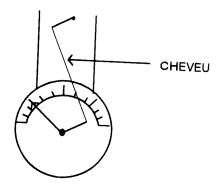
# LA MESURE DE L'HUMIDITÉ RELATIVE DE L'AIR

Les hygromètres à cheveux utilisent la propriété des cheveux de se raccourcir ou de s'allonger suivant l'humidité de l'air.

Ce sont des appareils simples, bon marché. Leur précision est de l'ordre de 5 %. Ils doivent être réétalonnés de temps en temps pour compenser la perte d'élasticité des cheveux.

Le domaine de fonctionnement s'établit dans la gamme de 30 à 90 % d'humidité relative.

## Schéma d'un hygromètre à cheveux



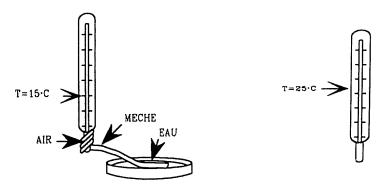
D'autres matériaux hygroscopiques sont utilisés pour la mesure de l'humidité : coton, cellophane, soie, etc.

Les appareils précédents ont un temps de réponse de quelques minutes. Pour obtenir une réponse rapide, précise et fiable, il faut employer les hygromètres à capteur capacitif. Ils sont beaucoup plus coûteux que les autres systèmes.

En l'absence de tout appareil spécifique pour la mesure de l'humidité, il est facile de fabriquer un **psychromètre à deux thermomètres** :

- l'un des thermomètres indique la température sèche (T);
- le bulbe de l'autre est entouré d'une mèche constamment humide (imbibée d'eau par capillarité). Le bulbe doit être placé dans un courant d'air à une vitesse supérieure à 2 m/s. Dans le cas contraire, la précision est mauvaise. Ce thermomètre indique la température humide Th.

#### Principe d'un psychomètre artisanal à deux thermomètres



Mesure de la température humide

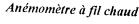
Mesure de la température sèche

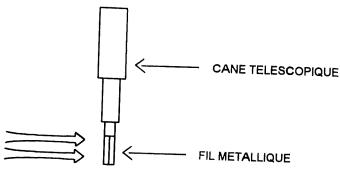
L'humidité relative est obtenue à partir de Ts et de Th à l'aide du diagramme de l'air humide ou de la table psychrométrique.

Nota: Ce principe peut également être utilisé avec les autres capteurs de température (thermocouples, résistances, etc.). Il est également appliqué dans le cas des psychromètres du type fronde qui servent à mesurer l'humidité de l'air en extérieur.

## LES MESURES DE VITESSES ET DE DÉBITS

Sur le terrain, le plus pratique des appareils de mesure de vitesse est l'anémomètre à fil chaud.





Le fil métallique chauffé par l'appareil se refroidit plus ou moins selon la vitesse du flux d'air.

La sonde doit être très petite pour ne pas perturber le flux d'air, et être bien dirigée perpendiculairement à ce flux.

La gamme théorique de vitesse mesurable par cet instrument est de 0,05 m/s à 30 m/s. Il faut noter que les appareils les plus communs ne sont fiables qu'à partir de 0,3 à 0,5 m/s, ce qui, le plus souvent, ne permet pas de mesurer des vitesses de convection naturelle.

#### Le moulinet à ailettes

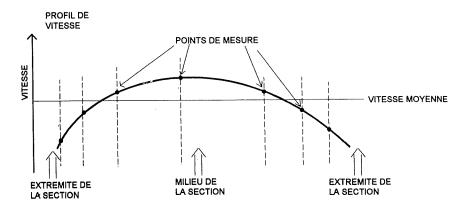
Les ailettes du moulinet placées dans le flux d'air tournent et transmettent un signal mécanique ou électrique à un afficheur. La gamme des vitesses mesurables est de 0,15 à 40 m/s. Il existe des mini-moulinets (diamètre de 10 à 15 mm) dont les interférences sur le flux d'air sont faibles, mais ils sont coûteux.

## La pratique de la mesure de vitesse

Il faut, dans une section donnée, mesurer plusieurs vitesses. La moyenne arithmétique de ces vitesses donne une vitesse moyenne significative.

#### Section circulaire

Diviser la section en plusieurs couronnes de même aire et mesurer les vitesses en différents points des circonférences.



Section circulaire ou carrée

Découper la section en surfaces d'aires égales.

#### Remarque

Que la section soit circulaire, carrée ou autre, l'anémomètre à fil chaud ou à ailettes, il faut essayer de faire la mesure dans des zones à écoulement régulier ; c'est-à-dire les plus éloignées de tout coude, rétrécissement de section, ventilateur, etc.

#### Le tube de Pitot

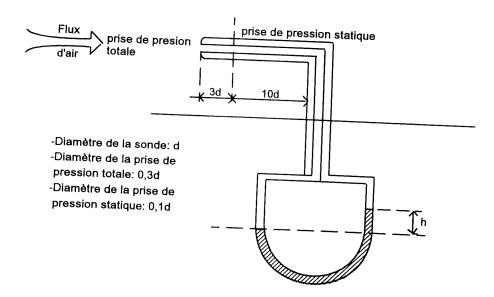
Cf. figure page suivante. Il ramène la mesure de vitesse à une mesure de pressions. Il est essentiellement utilisé en installation fixe pour des mesures dans des gaines de formes régulières. Il ne permet pas de mesurer correctement les faibles vitesses d'écoulement d'air (inférieures à 1 m/s).

La vitesse V dans la section est donnée par :

$$V = 4.4 \sqrt{(\frac{\rho 1}{\rho 0} - 1) \cdot h}$$
 (en m/s)

#### avec:

- h : différence de hauteur manométrique (en m) ;
- ρ 1 : masse volumique du liquide manométrique (eau, alcool, mercure)
   (en kg/m³);
- $\rho$  0 : masse volumique de l'air,  $\rho$  0 ≈ 1,2 kg/m<sup>3</sup>.



# LA MESURE DE L'HUMIDITÉ DES PRODUITS

La méthode la plus fiable mais très difficilement applicable sur le terrain est la méthode thermogravimétrique. Un petit échantillon du matériau est pesé, coupé en lambeaux si nécessaire, et séché complètement dans un four à environ 200°C pendant 1 ou 2 heures. L'échantillon est séché à nouveau et la perte de poids donne le degré d'humidité. Instruments nécessaires : balance et four.

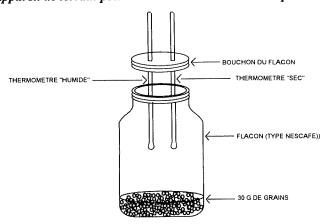
Une autre méthode, de terrain, qui n'est applicable qu'aux matériaux hygroscopiques, fait appel au degré d'humidité d'équilibre. Un récipient rempli du matériau réduit en petits morceaux est scellé hermétiquement.

Après 10 à 30 minutes, ou plus, l'air au-dessus du produit établit une certaine humidité relative qui est lue par un hygromètre. La courbe de sorption ou de désorption du produit permet alors de déterminer son degré d'humidité. Pour plus de facilité, l'échelle de l'hygromètre peut être calibrée pour lire directement le degré d'humidité du produit.

Ces appareils existent dans le commerce, mais ils peuvent être facilement autoconstruits, l'hygromètre pouvant être à papier ou à deux thermomètres (modèle de l'IRRI pour le riz).

On peut, selon le principe décrit ci-après, utiliser des hygromètres à cheveux munis d'une sonde que l'on place dans le flacon au-dessus du produit ou à l'intérieur de celui-ci pour les céréales.

#### Appareil de terrain pour la mesure de l'humidité des produits



# LA MESURE DE LA TENEUR EN EAU DU PRODUIT À L'AIDE D'UNE ÉTUVE (méthode FAO, 1981)

Cette méthode est valable quelle que soit la teneur en eau du produit. Il est important de bien découper ou broyer le produit afin que la dessiccation puisse se faire convenablement. Une fois le produit découpé ou broyé, il faut rapidement poursuivre le protocole afin d'avoir une bonne estimation de la teneur en eau (éviter les pertes d'eau par évaporation).

#### Matériel nécessaire

- 1 étuve « sèche » ;
- 1 balance de précision (ordre du décigramme);
- 3 coupelles de verre ou d'aluminium (8 cm);
- matériel pour découper et éventuellement broyer le produit (couteaux, broyeur électrique, pilon, etc.);
- 1 marqueur indélébile.

#### Protocole

- Numéroter les 3 coupelles au marqueur.
- Peser les coupelles, noter leurs poids respectifs (à vide), les garder au sec.
- Préparation des échantillons :
- prélever entre 50 et 100 g d'échantillon;
- découper le plus finement possible et broyer éventuellement;
- déposer immédiatement environ 10 g d'échantillon par coupelle, relever les poids avec précision (= poids avant étuvage);
- mettre à l'étuve à 105 110°C pendant 24 h.
- Après 24 h, relever les poids respectifs des 3 coupelles (= poids après étuvage).

Expression des résultats

# LA MESURE DE LA TENEUR EN SUCRE D'UN FRUIT

Cette méthode utilise un réfractomètre. Son fonctionnement est basé sur le principe selon lequel l'indice de réfraction d'une solution sucrée est proportionnel à sa concentration en sucre. Cet appareil permet de mesurer instantanément la teneur en sucre d'une solution sucrée (cf. figure page ci-contre).

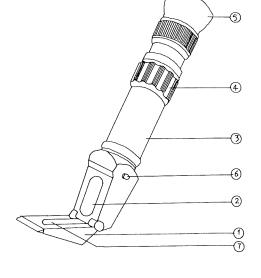
L'intérêt est de pouvoir contrôler rapidement la qualité de la matière première et du produit en fin de filtration. Dans le cas des fruits, la teneur en sucre fournit de plus une estimation de la teneur en matière sèche du produit.

### Obtention de la solution sucrée

- Cas de fruits juteux :
- presser la pulpe;
- recueillir quelques gouttes sur le prisme de l'appareil;
- facteur de dilution :  $F_D = 1$ .

#### Réfractomètre

- 1 Volet d'éclairage
- 2 Prisme de mesure
- 3 Tube
- 4 Bouton moleté (0-50 % et 50-80 %)
- ⑤ Oculaire réglable
- 6 Vis de réglage
- 7 Prisme d'éclairage



#### • Cas de fruits non juteux :

#### Matériel

- éprouvette graduée de 50 ml;
- balance de précision (g ou dgr);
- matériel de découpe (couteau et/ou broyeur : mixeur, pilon...);
- eau pure.

#### Protocole

- remplir l'éprouvette graduée d'eau pure, noter le volume avec précision (= volume d'eau initial);
- prélever 30 à 50 g de pulpe de fruit, noter le poids avec précision, découper la pulpe dans un récipient, broyer et ajouter de l'eau jusqu'à obtenir une solution liquide avec des morceaux homogènes en suspension, laisser tremper jusqu'à stabilisation du degré brix (quelques minutes à quelques heures);
- relever le volume d'eau restant dans l'éprouvette (= volume d'eau final);
- calculer le Facteur de dilution (volume d'eau en ml, poids en g) :

$$F_D = 1 + \frac{\text{Volume d'eau initial - Volume d'eau final (n)}}{\text{Poids de pulpe (a)}}$$

# Détermination de la teneur en sucre

Matériel

l réfractomètre.

Solution sucrée à tester

#### Protocole

- soulever le volet d'éclairage du réfractomètre ;
- nettoyer avec soin le prisme à l'aide d'un chiffon de coton doux ;
- agiter la solution sucrée si elle a été obtenue par dilution de la pulpe ;
- prendre quelques gouttes de la solution sucrée à tester et les déposer sur le prisme de l'appareil;
- refermer le volet d'éclairage et laisser la solution sucrée se répandre sur toute la surface du prisme;
- orienter le prisme d'éclairage face à une source lumineuse ;
- régler l'oculaire afin d'obtenir une graduation nette ;
- relever la teneur en sucre de la solution.

#### Résultats

Teneur en sucre (g/100 g de produit) = Teneur en sucre lue (%) x  $F_D$  (sans dimension).

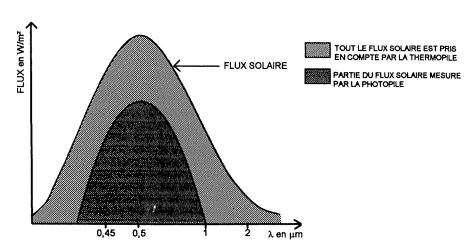
# LA MESURE DE L'ÉCLAIREMENT ET DE L'IRRADIATION SOLAIRE

Les modèles portatifs d'appareils de mesures de rayonnement solaire ne mesurent que le rayonnement global, ne dissociant pas le rayonnement direct du rayonnement diffus. Les séchoirs étant des systèmes à faible inertie, ce n'est pas un gros handicap.

Les appareils les plus répandus sont les pyranomètres qui mesurent l'éclairement (W/m²) et l'irradiation (Wh/m²). Ils sont généralement précis mais coûteux. Cf. figure page ci-contre.

Il existe maintenant des modèles à photopiles et à thermopiles. Les premiers sont moins chers mais moins fiables, car la cellule photovoltaïque a une réponse spectrale sélective. Les fabricants d'appareils de mesure à photopile ont intro-

#### Pyranomètre



duit un coefficient correctif moyen prenant en compte la sélectivité de leur matériel. Mais selon le lieu de la mesure (zones sahariennes ou sahéliennes, tropicales ou tempérées), des erreurs de 5 à 10 % peuvent être commises sans qu'il soit possible d'améliorer la mesure.



# Exemples de calculs

#### EXEMPLE N° 1 Séchage tout solaire (9 heures de rayonnement suffisant par jour)

#### Données

On veut sécher 9 kg de bananes, soit 5 kg de produit frais après tri et parage. L'ensoleillement est jugé satisfaisant pendant 9 heures par jour. L'air ambiant a une température de 30°C et une humidité relative de 60 %.

On considère, d'après lecture du diagramme de sorption-désorption de la banane (non fourni ici), que l'activité de l'eau dans le produit sec (final) doit être égale à 0,7.

On se place dans le cas d'un séchage direct, pour lequel la superficie de captage correspond à la superficie du produit en exposition, soit 0,8 m². On suppose d'autre part que le rendement de conversion thermique est de 0,4 (le rendement thermique pour ce type de séchage est toujours faible).

#### Questions

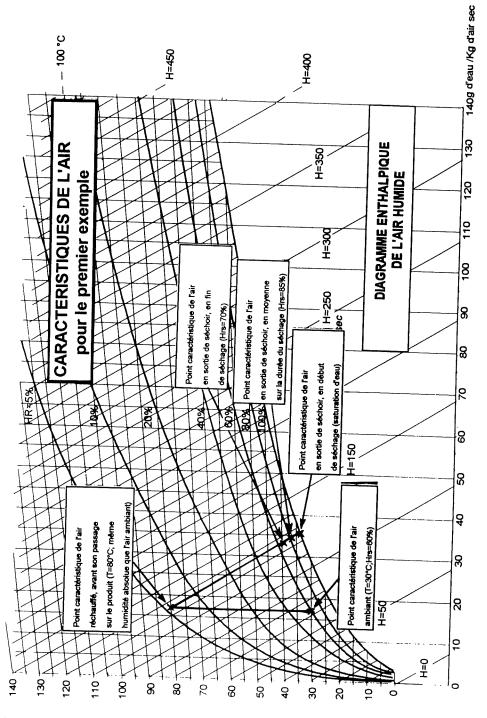
On cherche à savoir :

- 1. Quelle doit être la température de séchage ?
- 2. Quelle doit être la vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau?
- 3. Le débit d'air pourra-t-il être assuré par la convection naturelle de l'air ?
- 4. L'ensoleillement est-il suffisant pour autoriser l'utilisation d'un tel séchoir pour une telle application ?

#### **Solutions**

1. Température de séchage

En consultant la « fiche-produit » de la banane en page 45, on trouve une température maximale admissible de 70°C. On retiendra donc une **température** de 80°C (70+10) pendant les deux premières phases du séchage. On devra



seulement veiller à ce que la température du produit reste inférieure à 70°C, en particulier en phase III du séchage où les risques d'atteindre une telle température sont plus élevés.

#### 2. Vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau

La quantité d'eau extraite par heure en moyenne sur la durée du séchage s'obtient donc :

$$Q_{S_e} = m_i \cdot (mc_f - mc_i) / (100 - mc_i) / t_s$$

#### avec:

- m<sub>i</sub>: masse de produit frais, soit 5 kg de bananes après tri et parage ;
- mc<sub>i</sub>: teneur en eau du produit frais, donnée par la « fiche produit » de la page 45, soit 72 %;
- mc<sub>f</sub>: teneur en eau recommandée du produit séché, donnée par la « fiche produit » de la banane, soit 15 %;
- t<sub>s</sub>: durée du séchage, soit ici 18 heures (deux fois 9 heures).

D'où: 
$$Qs_e = 5 \text{ kg} \cdot (72 \% - 15 \%) / (100 \% - 15 \%) / 18$$
,  
soit:  $Qs_e = 0.19 \text{ kg d'eau/h}$ .

#### 3. Débit d'air nécessaire

On doit dans un premier temps évaluer les humidités absolues de l'air à l'entrée du séchoir, et en moyenne sur la durée du séchage en sortie de séchoir.

L'humidité absolue de l'air ambiant  $(x_a)$  se déduit sur le diagramme l'air humide en fonction de  $T_a$ , température de l'air ambiant  $(30^{\circ}\text{C})$  et  $Hr_a$ , humidité relative de l'air ambiant (60 %). On trouve :  $x_a = 16,5 \text{ g/kg a.s.}$  (grammes d'eau par kilogramme d'air sec).

Pour trouver  $x_m$ , l'humidité absolue de l'air en sortie de séchoir et en moyenne sur la durée du séchage, il faut connaître  $Hr_s$ , humidité relative de l'air en équilibre avec le produit sec (c'est-à-dire à la fin du séchage). En fin de séchage, l'air est en équilibre avec le produit, dont l'eau a alors une activité de 0,7. L'humidité relative d'équilibre en fin de séchage est égale à cette activité, donc :  $Hr_s = 70$  %.

On considère une humidité relative de l'air en sortie de séchoir et en moyenne sur la durée du séchage en faisant la moyenne des humidités relatives de l'air en sortie de séchoir en début et en fin de séchage, soit :  $Hr_m = (100 + Hr_s) / 2$ .

On a donc :  $Hr_m = 1/2$  . (100 + 70), d'où  $Hr_m = 85$  %.

Pour une température de séchage de  $80^{\circ}$ C, on lit sur le diagramme de l'air humide l'humidité absolue de l'air correspondant à une humidité relative moyenne de 85%, soit :  $x_m = 35 \text{ g/kg a.s.}$ .

On peut alors appliquer la formule qui donne le débit d'air :

 $D_s = 1000 \ Qs_e / (1,2 \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s)$ , avec  $\eta_s$ : rendement de séchage (80 %).

D'où:  $D_s = 1000 \cdot 0.19 / (1.2 \cdot (33 - 16.5) \cdot 0.8),$ 

soit :  $D_s = 12 \text{ m}^3/\text{h}$ . Un tel débit peut être assuré par les mouvements de convection naturelle de l'air.

4. Calcul de la puissance nécessaire au séchage

L'enthalpie de l'air ambiant  $h_a$  se lit sur la diagonale qui passe par le point  $(T_a = 30^{\circ}\text{C}, HR_a = 60 \%)$ . Donc :  $h_a = 71 \text{ kJ/kg a.s.}$ 

L'enthalpie de l'air chaud  $h_s$  se lit sur la diagonale qui passe par le point à 80°C (température de séchage) et d'humidité absolue  $x_a = 16,5$  g/kg (avant d'arriver sur le produit, l'humidité absolue de l'air chaud est toujours celle de l'air ambiant) :  $h_s = 125$  kJ/kg a.s.

La puissance nécessaire est :  $P_n = 1,2$  .  $(h_s - h_a)$  .  $D_s / 3600$ ,

d'où :  $P_n = 1,2$  . (125 - 71) . 12 / 3600. Soit :  $P_n = 0,2$  kW.

Le rendement de conversion thermique étant de 0,4, la puissance solaire nécessaire est :  $P_s = P_n/_{therm} = 0,2/0,4$  soit :  $P_s = 0,5$  kW.

La surface réceptrice étant de  $A=0.8~m^2$ , la puissance nécessaire par mètre carré est :  $G_n=P_s$  / A=0.5 / 0.8~soit :  $G_n=0.6~kW/m^2$ .

Un rayonnement de cette puissance est le plus souvent accessible. Cette puissance devra surtout être disponible en début de séchage pour évacuer rapidement l'eau libre.

## Remarques sur cet exemple de calcul

1. Le « deuxième niveau d'approximation » pour l'évaluation de la quantité d'eau du produit qu'enlève, en moyenne, un kilogramme d'air, qui consiste à l'exprimer comme la moitié du pouvoir évaporatoire (cf. p. 125), ne peut pas

être utilisée ici : l'hypothèse selon laquelle il n'y a pratiquement plus d'eau évacuée par mètre cube d'air en fin de séchage n'est pas valable. Dans le cas présent, l'air enlève presqu'autant d'eau en fin de séchage qu'en début.

- 2. Compte tenu de la remarque précédente, il y a peu de risques que la température du produit dépasse 70°C, même en maintenant la température d'arrivée de l'air à 80°C en fin de séchage : la vitesse d'enlèvement de l'eau sera encore suffisante pour assurer un bon refroidissement du produit par la vaporisation.
- 3. La différence d'enthalpie h<sub>s</sub> h<sub>a</sub> peut être fournie, en première approximation, sans la lecture du diagramme de l'air humide. Il suffit de considérer que l'énergie fournie à l'air correspond, pour l'essentiel, à l'apport de chaleur nécessaire pour faire passer l'air de la température extérieure à la température de séchage. Cette chaleur s'écrit :

$$E_{air} = 1030 \cdot (T2 - T1)$$
, avec :

- 1030 : chaleur massique de l'eau, en J/kg, relativement constante sur la gamme de températures envisagées;
- T2 : température de séchage (ici 80°C) ;
- T1: température de l'air ambiant (ici 30°C).

Soit  $E_{air} = 51,5 \text{ kJ/kg.a.s.}$ , contre 54 kJ/kg.a.s. obtenu par lecture des enthalpies (125 - 71). La différence s'explique essentiellement par l'énergie nécessaire pour porter l'eau contenue dans l'air de 30 à 80°C (non comptabilisée dans cette approximation).

#### EXEMPLE Nº 2

#### Données

On envisage de sécher 25 kg de tomates, soit 20 kg après parage, en 8 heures. La surface de captage solaire est encore la surface d'exposition directe au soleil, de 4 m². Le rendement de conversion thermique est de 0,5 et le rendement de séchage est de 80 %. L'air ambiant a une température de 30°C et une humidité relative de 50 %. La courbe de sorption-désorption de la tomate indique par ailleurs le taux d'humidité relative de l'air en sortie du séchoir qui indique un séchage suffisant : 50 %.

#### Questions

On cherche à savoir :

- 1. Quelle doit être la température de séchage ?
- 2. Quelle doit être la vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau?
- 3. Quel doit être le débit d'air ?
- 4. L'ensoleillement est-il suffisant pour autoriser l'utilisation d'un tel séchoir pour une telle application?
- 5. Si non, quelles mesures peut-on envisager?

#### Solutions

## 1. Température de séchage

La température maximale admissible par la tomate, indiquée sur la « fiche produit » de la page 53, est de 50°C. On retiendra donc une température de séchage de 60°C, du moins pour les deux premières phases du séchage.

# 2. Vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau

La quantité d'eau extraite par heure en moyenne sur la durée du séchage s'écrit:

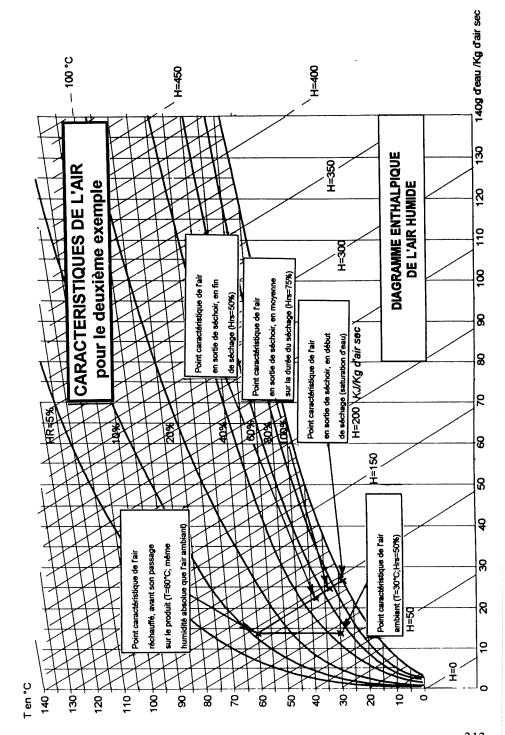
$$Qs_e = m_i \cdot (mc_f - mc_i) / (100 - mc_i) / t_s$$
, avec :

- m<sub>i</sub> : masse de produit frais, soit 20 kg de banane après tri et parage ;
- mci: teneur en eau du produit frais, donnée par la « fiche produit » de la page 53, soit 95 %;
- mc<sub>f</sub>: teneur en eau recommandée du produit séché, donnée par la « fiche produit » de la tomate, soit 7 %;
- ts : durée du séchage, soit ici 8 heures.

D'où :  $Qs_e = 20 \text{ kg}$  . (95 % - 7 %) / (100 % - 7 %) / 8, soit :  $Qs_e = 2,37 \text{ kg d'eau} / h$ .

#### 3. Débit d'air nécessaire

On déduit la teneur en eau de l'air ambiant x<sub>a</sub> de sa température T<sub>a</sub> (30°C) et de son humidité relative Hr<sub>a</sub> (50 %) sur le diagramme de l'air humide :  $x_a = 14 \text{ g/kg a.s.}$ 



L'humidité relative de l'air en sortie du séchoir est de  $Hr_s = 50$  % en fin de séchage. L'humidité relative en sortie du séchage et en moyenne sur la durée du séchage est donc de  $Hr_s = 1/2$ . (100 + 50), soit  $Hr_m = 75$  %.

On lit sur le diagramme, pour une température de séchage de  $60^{\circ}$ C et une humidité relative en sortie de séchoir de 75 %, la teneur en eau en sortie du séchoir, en moyenne sur la durée du séchage :  $x_m = 24,5$  g/kg a.s.

On peut alors appliquer la formule qui donne le débit d'air :

$$D_s = 1000 \ Qs_e / (1,2 \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s)$$
, avec  $\eta_s$ : rendement de séchage (80 %).   
D'où :  $D_s = 1000 \cdot 2.37 / (1.2 \cdot (24.5 - 14) \cdot 0.8)$ , soit :  $D_s = 235 \ m^3 / h$ .

4. Calcul de la puissance nécessaire au séchage

L'enthalpie de l'air ambiant  $h_a$  se lit sur la diagonale qui passe par le point  $(T_a = 30^{\circ}\text{C}, HR_a = 50 \%)$ . Donc :  $h_a = 65 \text{ kJ/kg a.s.}$ 

L'enthalpie de l'air chaud  $h_s$  se lit sur la diagonale qui passe par le point à  $60^{\circ}$ C (température de séchage) et d'humidité absolue  $x_a = 14$  g/kg (avant d'arriver sur le produit, l'humidité absolue de l'air chaud est toujours celle de l'air ambiant) :  $h_s = 96$  kJ/kg a.s.

La puissance nécessaire est : 
$$P_n = 1,2.(h_s - h_a).D_s / 3600$$
.  
D'où :  $P_n = 1,2.(96 - 65).235 / 3600$ , soit :  $P_n = 2,43$  kW.

Le rendement de conversion thermique étant de 0,5, la puissance solaire nécessaire est :

$$P_s = P_n/\eta_{therm} = 2.43 / 0.5 \text{ soit} : P_s = 4.9 \text{ kW}.$$

La surface réceptrice étant de  $A=4\ m^2$ , la puissance nécessaire par mètre carré est :

$$G_n = P_s/A = 4.9 / 4 \text{ soit} : G_n = 1.2 \text{ kW} / \text{m}^2.$$

Cette puissance solaire ne peut être atteinte que dans le meilleur des cas (pays à fort ensoleillement, et à midi).

Elle ne peut en aucun cas être fournie en moyenne pendant 8 heures, et en particulier aux heures du matin où elle est particulièrement requise pour lancer le séchage rapidement.

#### 5. Solutions envisageables

Deux solutions se présentent :

- allonger la durée du séchage en la portant à deux journées (16 heures par exemple), ce qui permet de diviser par deux la puissance solaire nécessaire, et devient tout à fait possible;
- utiliser un système de préchauffage avec un capteur solaire, dont le dimensionnement est précisé ci-dessous.

Supposons que le rendement de ce capteur est de 0,5 et que l'éclairement solaire est de 0,7 kW/m².

La surface totale de captage devra être donnée par :

$$A = \frac{P_n}{\eta c \cdot G_n}$$

#### avec:

- A : surface de captage solaire (en m<sup>2</sup>);
- P<sub>n</sub>: puissance nécessaire au séchage, ici 2,43 kW;
- G<sub>n</sub>: puissance de rayonnement disponible, ici 0,7 kW/m<sup>2</sup>;
- η<sub>c</sub>: rendement du capteur solaire, ici 0,5.

On obtient donc  $A = 2,43 / (0,5 \cdot 0,7) = 6,9 \text{ m}^2$ .

Le débit d'air à atteindre par mètre carré de capteur est égal à :

$$D^* = D_s / A = 235 / 6.9 = 34 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot \text{m}^2$$

Un ventilateur ou une cheminée solaire sera donc probablement nécessaire. On peut par ailleurs vérifier que la température de l'air en sortie du capteur sera proche de la température de séchage retenue. Elle s'écrit en effet :

$$T2 = T1 + A \cdot \eta_c \cdot G_n \cdot 3600 / (1,2 \cdot Cp_{air} \cdot D_s)$$

#### avec:

- Cp<sub>air</sub>: chaleur massique de l'air (en J/kg/°C): 1030 J/kg/°C pour les températures envisagées;
- T2 : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en °C) ;
- T1 : température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage, ici 30°C ;
- D<sub>s</sub>: débit d'air, ici 235 m<sup>3</sup>/h;

- A: superficie totale de captage des rayons solaires, ici 6,9 m²;

η<sub>c</sub>: rendement thermique du capteur, ici 0,5;
 G<sub>n</sub>: irradiation solaire moyenne, ici 700 W/m² (0,7 kW/m²).

On a donc:  $T2 = 30 + 6.9 \cdot 0.5 \cdot 700 \cdot 3600 / (1.2 \cdot 1030 \cdot 235) = 59.9$ °C.

La température de séchage préconisée est de 60°C.

# **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

#### 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  $m^2$  ou bar ( $N/m^2$ ): 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 Termal Unity) = 1 054,35 Joules
- -1 BTU/h = 0,2928 W

- °F = 9/5 °C + 32
- °C = 5/9 (°F 32)
- $-1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
- -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 séchoir, on a besoin généralement de connaître l'énergie journalière moyenne 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.

avec:

Ei : énergie mensuelle journalière moyenne sur une surface inclinée.

H: énergie mensuelle journalière moyenne sur une surface horizontale.

et 
$$\mathbf{R} = \frac{1 - Hd}{H}$$
.  $RD + \frac{Hd}{H}$ .  $(1 + \frac{\cos s}{2}) + \rho_s (1 + \frac{\cos s}{2})$ 

Hd: 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.

 $\rho_s$ : réflectivité du sol.

On calcule le rapport  $\frac{Hd}{H}$  par la relation :

$$\frac{Hd}{H} = 1,39 - 4,03 \text{ K}_{\overline{T}} + 5,53 \text{ K}_{\overline{T}}^2 - 3,11 \text{ K}_{\overline{T}}^3 \text{, relation dans laquelle K}_{\overline{T}} \text{ vaut} :$$

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

où  $\mathbf{H_0}$  est l'énergie mensuelle journalière moyenne extraterrestre (aux limites de l'atmosphère). Les valeurs de  $\mathbf{H_0}$  sont données par le tableau de la page ci-contre.

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

avec:

 $-\emptyset$ : latitude du lieu;

- δ : déclinaison angulaire au moment considéré ;

- ws: arc cos (- tang  $\emptyset$  tang  $\delta$ );

- ws': ws si ws < arcos (- tang ( $\emptyset$  - s) tang  $\delta$ );

- et ws': arcos (- tang ( $\emptyset$  - s) tang  $\delta$ ) dans le cas contraire.

## Rayonnement extraterrestre mensuel journalier moyen (MJ/m $^2$ ) - $H_0$

Latitude	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
0	36,4	37,6	40,0	36,8	34,9	33,6	34,0	35,6	37,1	37,4	36,6	35,8
5	34,4	36,3	37,7	37,6	36,4	35,4	35,7	36,7	37,3	36,5	34,8	33,6
10	32,1	34,7	37,0	38,0	37,6	37,1	37,1	37,5	37,1	35,4	32,8	31,2
15	29,7	32,9	36,1	38,2	38,6	38,5	38,4	38,1	36,7	33,9	30,6	33,6
20	27,1	30,8	35,0	38,0	39,4	39,6	39,3	38,3	36	32,2	28,1	25,9
25	23,9	28,2	33,0	37,1	39,4	40,1	39,6	37,9	34,4	29,5	24,9	22,7
30	21,1	25,7	31,3	36,5	39,6	10,7	40,1	37,6	33,1	27,3	22,1	19,7
35	18,1	23,1	29,3	35,5	39,6	41,2	40,3	37,0	31,5	24,9	19,2	16,7
40	15,1	20,3	27,2	34,3	39,3	41,4	40,3	36,2	29,7	22,3	16,3	13,6
45	12,0	17,5	24,8	32,8	38,8	41,3	40,0	35,1	27,7	19,6	13,3	10,6
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

#### Étape 3. Calcul de l'énergie mensuelle horaire.

On suppose que la distribution de l'énergie reçue a la forme d'une sinusoïde tronquée, l'énergie reçue étant maximale à midi (solaire) et nulle au lever et au coucher du soleil.

Pour les surfaces orientées au sud, on calcule l'énergie reçue pendant une tranche d'une heure pour la formule suivante :

Eim 
$$h = \frac{\pi}{2N}$$
 Eim  $q \cos(\frac{180}{N}t)$  si  $t < \frac{N}{2}$   
et Eim  $h = 0$  si  $t > \frac{N}{2}$ 

avec:

N longueur du jour exprimée en heures jour la période considérée.

$$N = \frac{2}{15} \quad Arcos (-tang \varnothing tang \delta)$$

 $\varnothing$  étant la latitude du lieu,  $\delta$  la déclinaison angulaire au moment considéré.

Rappel: 
$$\delta = 23,45 \sin \left( \frac{360.284 + n}{365} \right)$$
, n étant le jour de l'année.

Eim q = énergie totale reçue au cours de la journée exprimée en Wh ou kWh. t = heure correspondant au milieu de la période pour laquelle on calcule l'énergie reçue comptée à partir du midi solaire (t = 1 pour 13 h et 11 h, t = 2 pour 14 h et 10 h, etc.).

Eim h = énergie totale reçue au cours de l'heure centrée sur t (1/2 heure avant et 1/2 heure après) exprimée en Wh ou en kWh en fonction de l'unité choisie pour Ei.

Exemple: Si l'énergie totale reçue par une surface orientée au sud au cours d'une journée du mois de janvier (15 janvier) à une latitude de 45 °N, est de 5 000 Wh/m², l'énergie reçue de 10 h 30 à 11 h 30 et de 12 h 30 à 13 h 30 (t = 1) est calculée comme suit:

$$\delta = 23,45 \sin \left( \frac{360.284 + n}{365} \right) = -21,27^{\circ}$$

 $\tan \delta = -0.389$ 

 $\tan \varnothing = 1$ 

N = 8,95 heures

 $Ei = 824Wh/m^2$ 

# ANNEXE 3 Caractérisation des matériaux de construction

#### Propriétés thermophysiques des matériaux

Matériaux	Conductivité thermique (W/m/°C)	Densité (kg/dm3)	Chaleur spécifique (Wh/kg/°C)	Coefficient d'absorption	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 <sup>3</sup>	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 bois	0,052	0,24	0,23	0,9	0,8
Ciment (Porland)	0,029	1,92	0,19	0,6	0,9
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 compactée	0,64-1	1,5-1,9	0,23	0,75	
Verre	1,028	2,47	0,2		0,84

#### <u>AIR</u>

Température (°C)	Chaleur massique à pression constante (J/kg/°C)	Conductivité (W/m/°C)
0	1 004	17,1910 <sup>-3</sup>
20	1 006	19,2610-3
40	1 010	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 <sup>-3</sup>
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 <sup>6</sup> J/kg	140°C	2,143.10 <sup>6</sup> 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) ?

```
\leq 2 (0)
```

2 à 4 (3)

4 à 6 (6)

> 6 (9)

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

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

```
< 4 (0)
```

4 à 7 (1)

7 à 10 (2)

> 10 (3)

3. Durée totale d'une journée solaire (heure de coucher-heure de lever du soleil) ?

```
< 8 (0)
```

8 à 10 (1)

10 à 12 (2)

> 12 (3)

#### 4. À quelle sorte de nuage a-t-on à faire ?

épais (0)

légers ou brumeux (2)

pas de nuage (3)

Un nuage épais obscurcit entièrement le ciel : seul persiste le rayonnement diffus.

Soit T1 = le total des réponses 2 + 3 + 4.

T1 =

On peut apprécier 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 estimée de ES peut alors être reportée dans la case appropriée de la question 1.

# 5. Quelle est en moyenne le nombre de jours successifs pendant lesquels l'ensoleillement est inférieur à 4 heures ?

0 (0) 3 (3)

1 (1)

2 (2)

6. À quelle latitude se situe le site du séchoir (en degré Sud ou Nord)?

> 45 (0)

30 à 15 (2)

45 à 30 (1)

< 15 (3)

> 4 (4)

#### 7. Quelle est son altitude (en mètres)?

< 500 (0)

1 (1)

2 (2)

3 (3)

> 4 (4)

### 8. Comment se caractérise le climat ?

équatorial ou tropical humide (0) maritime ou tempéré (1) continental (2) désertique 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 maraîchères 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 maraîchère, 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. À Koumbidia, par exemple, le groupement de maraîchères 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 fruits tropicaux à exporter, vers ces marchés, leur production séchée 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 séchées 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 exportés	Chiffre d'affaires (en million de FCFA)
1986 1987		
1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994	20 kg (échantillon) 0,7 tonnes 2,5 tonnes 4,3 tonnes 8,9 tonnes 10,2 tonnes 14 tonnes	1,4 5,1 8,7 17,8 20,4 56 * (* dévaluation du FCFA)

Peu à peu, ce marché porteur va modifier, structurer l'activité.

#### La production

À partir du 1992, le CEAS organise les producteurs à travers une structure dénommée « Cercle des sécheurs ». Après un appui technique et structurel subventionné, le cercle prend progressivement en charge son fonctionnement

et se regroupe officiellement en un groupe d'intérêt économique. Grâce notamment à des actions de formations, l'étape transformation du produit (hygiène, productivité) a été professionnalisée.

#### L'outil de séchage

L'option initiale tout solaire s'est avérée risquée, du fait de la dépendance aux conditions climatiques. En 1991, avec une saison très humide, une grande partie de la production a été perdue. Pour ne plus connaître ce type de problème, des systèmes tout gaz ont été développés.

#### 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 à un prix raisonnable	Temps très ensoleillé
Moyen	Petite quantité à un prix raisonnable	Temps plutôt ensoleillé
Faible	Faible quantité à un prix élevé	Temps plutôt nuageux et pluvieux

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

Critère fruit	Critère climat	Résultat
Bon	Bon	+
Bon		+
Bon	1 -	,
Moyen	1	+
1 *		+
1 *	1 -	т
Faible		-
Faible		-
Faible		-
		-
		+
1 -	1 -	+
	Bon Bon Bon Moyen Moyen Moyen Faible	Bon Bon Moyen Bon Faible Moyen Bon Moyen Moyen Moyen Moyen Faible Faible Bon Faible Moyen Faible Faible Bon Bon Moyen Bon Moyen

#### 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 empaquetés 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'export 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 séchés 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 à une diffusion efficace de ce séchoir 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 séchoir est actuellement dupliqué à plus de 1 000 exemplaires. La deuxième phase de ce programme débute. L'objectif est d'atteindre une diffusion de 8 000 séchoirs coquillages.

# ANNEXE 6 Table psychrométrique

Delta T	9,0	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3	4,0	5,0	0,0	7,0	8,0	0,6	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	22,0	25,0	28,0	31,0	34,0	28,0	42,0	46,0	50,0	54,0
x	86	96	\$	25	8	88	8	83	8	7	7.4	7	8	8	ខ	ક	57	ž	52	46	43	40	36	31	97	21	17	15	13	11	6
8	86	8	8	25	8	88	8	83	8	9	73	۶	29	2	19	28	55	22	48	44	41	38	35	30	25	20	16	13	10	∞	7
88	86	8	8	25	06	8.2	98	83	62	22	22	8	જ	8	જ	57	¥	51	4	43	40	37	32	27	23	61	51	11	8	9	4
8	86	8	¥	91	68	87	98	83	80	76	.72	88	হ	19	58	55	52	49	45	41	38	34	59	57	21	17	13	2	7	5	3
75	88	25	93	91	88	98	22	81	77	73	70	29	63	8	57	54	51	47	43	\$	37	34	78	23	18	14	=	٥	9	4	
6	86	જ	93	8	88	8	2	8	92	72	69	65	61	28	55	25	49	45	42	39	35	31	25	20	15	12	2	∞	5		
23	8	જ	22	8	82	85	83	92	75	71	29	63	99	56	53	50	47	43	39	36	32	28	22	17	13	=	8	2			
8	97	2	22	8	83	ಷ	82	78	74	70	8	62	85	54	51	48	45	41	37	¥	30	77	19	14	=	•	٥				
\$\$	26	8	25	8	88	8	81	77	23	8	જ	જ	56	53	50	47	43	39	35	31	27	23	17	Ξ	∞	9					
8	8	¥	12	88	88	8	67	75	11	19	63	28	22	51	47	43	39	35	31	27	23	18	12	∞	9		L				
45	8	83	8	82	2	81	5	74	5	જ	ક	55	51	47	43	39	35	31	97	22	18	14	2	9							
8	98	8	8	98	8	8	12	52	89	63	88	53	84	4	9	36	33	27	21	15	12	6	9								
35	8	8	8	8	23	8	25	8	65	8	55	8	45	8	35	30	25	8	15	6	9	5									
S	8	8	2 8	2	8	92	12	જ	19	52	8	45	39	34	62	24	61	13	7	4											
2.2	3	ं ह	: [2	8	5	75	1	2	85	53	42	14	35	82	23	11	12	7	4												
7	१	3 5	:   %	8	, ×	17	: 8	3 8	57	15	4	37	R	23	12	=	9	~													
1	1 8	ि	2 %	3 =	1 5	3	: 8	3 2	2	.47	9	33	25	82	2	وا	"	·													
9	2 8	2 8	2 %	3 8	3 4	;   5	2 8	3 %	3 5	43	35	27	20	13	4	, [~															
,	2 2	1 8	3 6	3 8	5 2	3 3	3 5	3	3	33	, 2	2 2	13	2																	

#### ANNEXE 7

# Pour en savoir plus

#### LES DOCUMENTS TECHNIQUES

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

#### Énergie 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.), Mémento 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  $n^{\circ}$  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 à base de produits séchés au Burkina Faso
- Guide de fabrication des séchoirs coquillage
- Comment sécher vos produits avec le séchoir coquillage

#### Série NRI, Séchage artisanal

- Débouchés des produits séchés
- Guide de construction du séchoir cadre
- Techniques de séchage
- Gestion d'une unité

# PERSONNES / ORGANISMES RESSOURCES

#### Europe

• Allemagne

FAKT Association for Appropriate Technologies Geïnsheidestrasse 43, D-70184 Stuttgart

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

Université d'Hohenheim (Prof. Dr Ing. Mülbauer, A. Esper) Institut für Agrartechnik D-70593 Stuttgart

France

#### ASDER

Association savoyarde pour le développement des énergies 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 écologique Albert Schweitzer CH-2000 Neuchatel

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

#### **AFRIQUE**

Bénin

Laboratoire de recherche sur l'énergie solaire Université du Bénin, BP 1515 Porto-Novo

Burkina Faso

ABAC-GERES Association burkinabé d'action communautaire 01 BP 4171 Ouagadougou 01

EIER École inter-États de l'équipement rural 03 BP 7023 Ouagadougou 03

IBE Institut burkinabé de l'énergie 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 43844 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 Sénégal

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

DE COOPÉRATION AGRICOLE ET RURALE (CTA)

LE CENTRE TECHNIQUE

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 :

Postbus 380

6700 AJ Wageningen, Pays-Bas

Tél.: (31) 317 467 100

Télex: (44) 30169 CTA NL

Fax: (31) 317 460 067

Impressions DUMAS 42100 SAINT-ÉTIENNE Dépôt légal : décembre 1995 N° d'imprimeur : 32698 Imprimé en France