

# Intégration des outils du génie industriel dans l'optimisation de la conception de séchoirs pour les produits agroalimentaires en climat tropical

---

Tchamye Tcha-Esso BOROZE<sup>1</sup>, Yaovi Ouézou AZOUMA<sup>2</sup>,  
Jean Michel MEOT<sup>3</sup>, Hélène DESMORIEUX<sup>4</sup>, Kossi NAPO<sup>1</sup>

## Résumé

La recherche de principes de solutions est souvent absente dans les démarches de conception dans les pays du sud et le choix d'un principe fait intervenir différentes disciplines et détermine à 80% le coût de développement d'un équipement. Pour résoudre ce problème, nous avons réalisé des enquêtes auprès de 38 acteurs au Togo et au Bénin afin d'identifier les besoins en séchage de produits agricoles et avons mené des essais de séchage sur l'ananas pour déterminer des règles de séchage. Dix dispositifs de séchage solaire et à gaz ont été recensés et caractérisés. Ils sont tous alimentés par batch et conçus avec des matériaux locaux. Les quantités de céréales, de légumes et de morceaux de tubercules séchées sont de 5 kg à 40 kg pour les séchoirs solaires par cycle de 2 à 3 jours entre 45 °C et 60 °C. Pour les séchoirs à gaz, 26 kg à 100 kg de fruits tropicaux à forte teneur en eau, supérieure à 300 % (b.s.) sont séchés par cycle de 12 h à 36h à 80°C au début du séchage puis entre 40°C et 50°C en fin de séchage. Ensuite, à partir de l'analyse du besoin de l'utilisateur et de l'analyse fonctionnelle du séchoir, réalisées à l'aide des outils de génie industriel, croisées avec les règles de séchage, nous avons proposés des principes de solutions pour la conception de séchoirs pour produits agroalimentaires. Cette démarche de conception basée sur une approche pluridisciplinaire conduit à une prise en compte des besoins de l'utilisateur de séchoir.

**Mots-clés :** séchoirs, produits agroalimentaires, règles de séchage, principes de solutions.

## Industrial engineering integration in the optimization of the design of dryers for agrifood products in tropical climate

### Abstract

The research of principles of solutions is often missed in the steps of design in developing countries. The choice of a principle requires knowledge from different disciplines and determines to 80% the final cost of the equipment. To solve this problem, we carried out tests of drying on pineapple to determine drying rules and we have conducted a survey. Data were collected from a sample of 38 users of dryers in Togo and in Benin to identify the requirements in drying of agricultural products. Ten driers using solar energy and gas energy were listed and characterized. They all are fed by batch and are made of local materials. The quantities of cereals, vegetables and pieces of tubers dried are 5 kg to 40 kg for the solar driers by cycle from 2 to 3 days between 45°C and 60°C. For the driers which use gas, 26 kg to 100 kg of tropical

---

<sup>1</sup> Laboratoire sur l'Energie Solaire, Faculté des Sciences, Université de Lomé, BP : 1515 Lomé - Togo. Tél : (00228) 235 64 11 ; Fax : (00228) 221 85 95 ; Email : tchamye@gmail.com et silnapo@yahoo.fr

<sup>2</sup> Département de Génie rural et Machinisme agricole, Ecole Supérieure d'Agronomie, Université de Lomé, BP : 1515 Lomé - Togo. Tél : (00228) 225 41 97 ; Fax : (00228) 221 85 95 ; Email : azouma@yahoo.com

<sup>3</sup> Cirad, UMR Qualisud, TA B695/15, 34398 Montpellier Cedex 5 France. Tél : (0033) 4 67 61 57 15 ; Fax : (0033) 4 67 61 44 49 ; Email : jean-michel.meot@cirad.fr

<sup>4</sup> Laboratoire d'Automatisme et de Génie des Procédés. CNRS UMR 5007-CPE, Université C B de Lyon I, France. Tél : (0033) 4 72 43 18 67 ; Fax : (0033) 4 72 43 16 99 ; Email : desmorieux@lagep.univ-lyon1.fr

fruits with high water content, higher than 300% (b.s.) are dried by cycle of 12h with 36h with 80°C at the beginning of drying then between 40°C and 50°C at the end of the drying. Then, crossing the drying rules with the analysis of the requirements and the functional analysis of the dryer, carried out with the tools of Industrial Engineering, we have proposed principles of solutions for the design of dryer for food products. This step of design based on a multidisciplinary approach led to an integral taking into account the need of the user of a dryer.

**Keywords:** dryer, food products, drying rules, principles of solutions.

## Introduction

La conception de séchoirs adaptés à un besoin est une démarche complexe car devant tenir compte de nombreux facteurs tels que les caractéristiques du produit, la météorologie du lieu d'utilisation (température et humidité relative de l'air ambiant, ensoleillement), l'organisation du travail, la qualité du produit fini (LUNA-SANCHEZ, 2008 ; BOROZE *et al.*, 2009). La recherche de principes de solutions pour la conception d'un séchoir de produits agricoles intègre des connaissances hétérogènes provenant de plusieurs disciplines : sciences des aliments, génie industriel, génie des procédés et de processus de natures diverses dont les relations ne sont connues que de façon à la fois partielle et souvent imprécise (TRAVE-MASSUYES *et al.*, 1997). En outre, le choix de principe de solutions détermine à 80% le coût de développement d'un équipement (BERLINER and BRIMSON, 1988 ; ZABLIT and ZIMMER, 2001). D'une façon générale, dans les pays du sud, les concepteurs intègrent très peu les outils du génie industriel. Ils procèdent fréquemment par la méthode « essai-erreurs » qui suppose la réalisation d'abord de l'équipement sur lequel sont effectués les tests en vue de son amélioration (MAROUZE, 1999). Ces méthodes sont souvent coûteuses, fastidieuses et moins efficaces. Certains opérateurs font appel à des experts qui sur la base de leurs connaissances et expériences procèdent à l'identification de principes de solutions pouvant répondre au mieux au besoin ciblé pour la réalisation de l'équipement. La diversité des critères à prendre en compte rend la prise de décision difficile et conduit la plupart des acteurs à se limiter uniquement à leur domaine de compétence (SCARAVETTI, 2004). Face aux différents problèmes sus relevés, une solution serait de disposer d'un outil d'aide à la décision en conception de séchoirs pour les pays du Sud. A cet effet, nous avons réalisé des essais de séchage sur l'ananas dont les résultats sont croisés avec une revue de la littérature pour déterminer des règles de séchage. Ensuite, des enquêtes auprès des utilisateurs de séchoirs ont été effectuées puis traitées à l'aide des outils de génie industriel tels que les lois d'évolution de système technique de la méthode TRIZ et l'analyse fonctionnelle. Enfin, à partir de l'analyse des résultats de ces travaux de recherche, sont proposés des principes de solutions pouvant être utilisés dans la conception de séchoirs de produits agricoles tropicaux.

## Matériels et méthodes

### Analyse du besoin et analyse fonctionnelle d'un séchoir

La démarche méthodologique est basée sur des outils de génie industriel qui intègrent :

- la description fonctionnelle de séchoirs (Atesta, Coquillage, Maxicoq, Geho, etc.) disponibles au Togo, au Bénin et au Burkina Faso et des entretiens avec des utilisateurs ;
- la revue de la littérature sur les critères en conception de séchoirs ;
- le diagramme pieuvre, le Function Analysis System Technique (FAST) et la méthode TRIZ.

La méthode des enquêtes à l'aide d'un guide d'entretien s'inspire de celle de SHIBA (1995) qui consiste à « se plonger dans le milieu des acteurs du séchage dans les pays du Sud pour comprendre de l'intérieur, par imprégnation ». L'entretien a été mené auprès de 38 acteurs assez diversifiés dont 7 concepteurs, 8 Petites et Moyennes Industries Agroalimentaires (PMIA) et 23 groupements. L'échantillon de ce public cible largement supérieur à la douzaine d'acteurs que préconise la méthode permet de considérer que ce travail a pu recueillir au moins 70 % de la richesse des informations (SHIBA, 1995). Le diagramme pieuvre (figure 1) qui est un outil d'analyse systématique des milieux extérieurs d'un équipement a permis de répertorier les différentes fonctions de service et de contrainte que doit remplir le séchoir. Cet outil a été développé par le cabinet APTE (DE LA BRETESCHE, 2000). Le FAST qui permet d'identifier et de représenter les fonctions techniques d'un système (TASSINARI, 2003) a été utilisé pour l'analyse fonctionnelle interne du séchoir. La définition d'un système technique selon la méthode TRIZ a servi pour la description d'un séchoir (figure 2). Globalement, la démarche d'élaboration de l'outil d'aide à la décision pour la conception des séchoirs de produits agricoles sera développée à partir des principes de solutions basés sur l'analyse du besoin, l'analyse fonctionnelle et des règles de séchage. Cette approche prend en compte la caractérisation des séchoirs et du besoin des utilisateurs. Aussi, le concepteur d'un séchoir a besoin de critères pour faire un choix parmi les principes de solutions proposés.

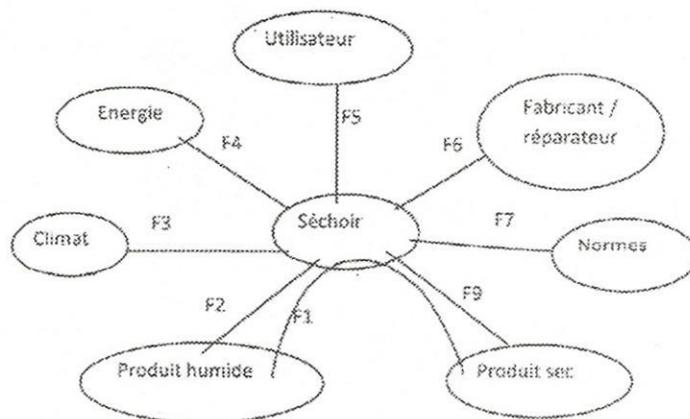


Figure 1. Diagramme pieuvre du séchoir.

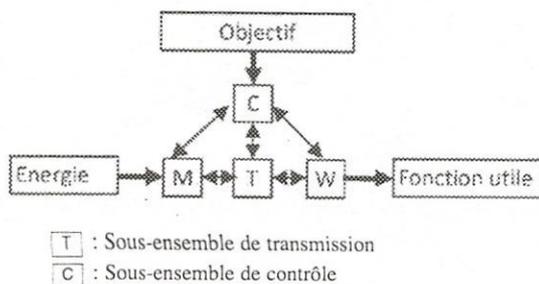


Figure 2. Représentation d'un système technique selon la méthode TRIZ.

## Détermination des conditions optimales de séchage

Le matériel utilisé pour les expérimentations est présenté dans le tableau I. Pour la détermination des règles de choix, nous avons choisi de travailler sur un produit à forte teneur en eau, l'ananas, car posant plus de contrainte en séchage. Les expériences se sont déroulées au Cirad à Montpellier sur un séchoir électrique à température et à débit d'air variables. La figure 3 montre le principe de fonctionnement du séchoir utilisé ainsi que la position des différents capteurs. Les échantillons sont des rondelles d'ananas de diamètre extérieur (80 mm), intérieur (35 mm) et d'épaisseur (70 mm). Quatre (4) claies superposées les unes sur les autres dans un flux d'air léchant constituent les supports des produits. Les conditions ambiantes moyennes sont : 29 °C de température et 52 % d'humidité. Trois températures de l'air de séchage (40 °C, 50 °C et 60 °C) et quatre vitesses de l'air (0,27 m/s, 0,5 m/s ; 1 m/s ; 1,8 m/s) ont été utilisées durant les expériences menées au Cirad. Les vitesses de l'air choisies couvrent les plages allant de la ventilation naturelle : 0,2 à 0,5 m/s à la ventilation forcée supérieure à 1m/s au niveau du produit. Le tirage par effet cheminé correspond à la plage située entre les deux. La masse initiale des tranches d'ananas étalées sur chaque claie était de  $600,0 \pm 0,1$  g. Des échantillons prélevés avant et après le séchage ont permis de déterminer la teneur en eau initiale ( $X_i$ ) et d'équilibre ( $X_{eq}$ ) de l'ananas. Les caractéristiques de l'air sont mesurées toutes les minutes à l'aide de sondes de température, de vitesse et d'humidité. Ces sondes sont raccordées à une centrale d'acquisition Almemo 2250 permettant un enregistrement automatique des données. Pour suivre l'évolution de la masse ( $m$ ) du produit au cours du séchage, une pesée de chaque claie est effectuée toutes les 30 minutes. A partir des masses obtenues par pesée, nous avons calculé les teneurs en eau en base sèche ( $X$ ) à partir de l'équation (1).

$$X = \frac{(m - m_s)}{m_s} \quad (1)$$

$m_s$  : masse sèche du produit ;  $X_{eq}$  : teneur en eau d'équilibre = 17 % (base sèche). La teneur en eau réduite ( $X_r$ ) qui est une grandeur adimensionnelle s'obtient à l'aide de l'équation (2).

$$X_r = \frac{(X - X_{eq})}{X_s - X_{eq}} \quad (2)$$

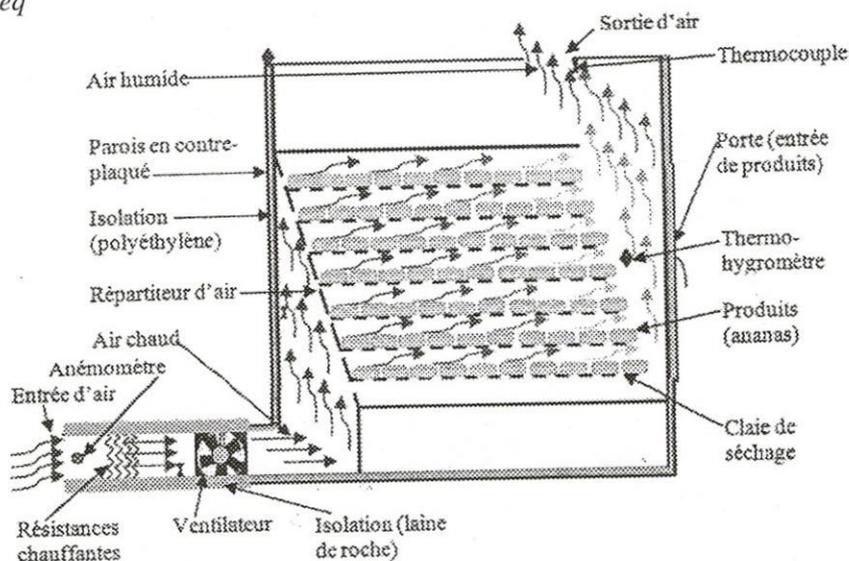


Figure 3. Séchoir électrique expérimental à température et flux d'air variables.

**Tableau I.** Matériel utilisé pour les essais de séchage de l'ananas.

Matériel	Caractéristique	Fonction
Balance	OHAUS Pionner précision 0,1g	Mesure de la masse des claies et des produits
Balance	Sartorius Précision 0,001g	Mesure de la masse d'échantillons de produits avant et après passage à l'étuve
Capteur de température	Thermocouple K	Mesure de la température
Capteur d'humidité	Sonde d'humidité capacitive, plage (5% à 98%)	Mesure de l'humidité relative
Centrale d'acquisition	Almemo 2250	Relevé et enregistrement automatique des valeurs mesurées par les capteurs
Etuve		Dessiccation des échantillons

## Résultats et discussions

### Caractérisation des séchoirs et du besoin des utilisateurs

#### Caractérisation des séchoirs recensés

Dix types de dispositifs ont été recensés et caractérisés : le séchage à l'air libre avec des variantes et 9 autres types de séchoirs (tableau II). On distingue le séchage traditionnel à l'air libre, les séchoirs solaires directs, indirects, mixtes et hybrides et les séchoirs à gaz.

L'activité de séchage de produits agricoles tropicaux se fait à petite et moyenne échelle et ne concerne que des produits solides.

- Le séchage à l'air libre est pratiqué surtout par les familles et groupements à faible capacité d'investissement.
- Les séchoirs solaires (séchoir coquillage, séchoir armoire direct et indirect, séchoir serre, séchoir tente, séchoir chambre et Geho) sont utilisés surtout par les groupements de femmes et de maraîchers pour sécher des fruits et des légumes. Les séchoirs solaires utilisés par les (PMIA) sont des séchoirs à grande capacité permettant de sécher par mauvais temps ou pendant la nuit. Il s'agit par exemple du séchoir chambre d'une capacité de 1 tonne pouvant stocker la chaleur pour permettre le séchage en période non ensoleillée. Le séchoir Geho utilise à la fois l'énergie solaire et le gaz, sa capacité est de 50 à 150 kg en fonction des produits.
- Les séchoirs à gaz (Atesta et Maxicoq) sont utilisés uniquement par les PMIA pour le séchage des fruits (Atesta) et des tubercules (Maxicoq).

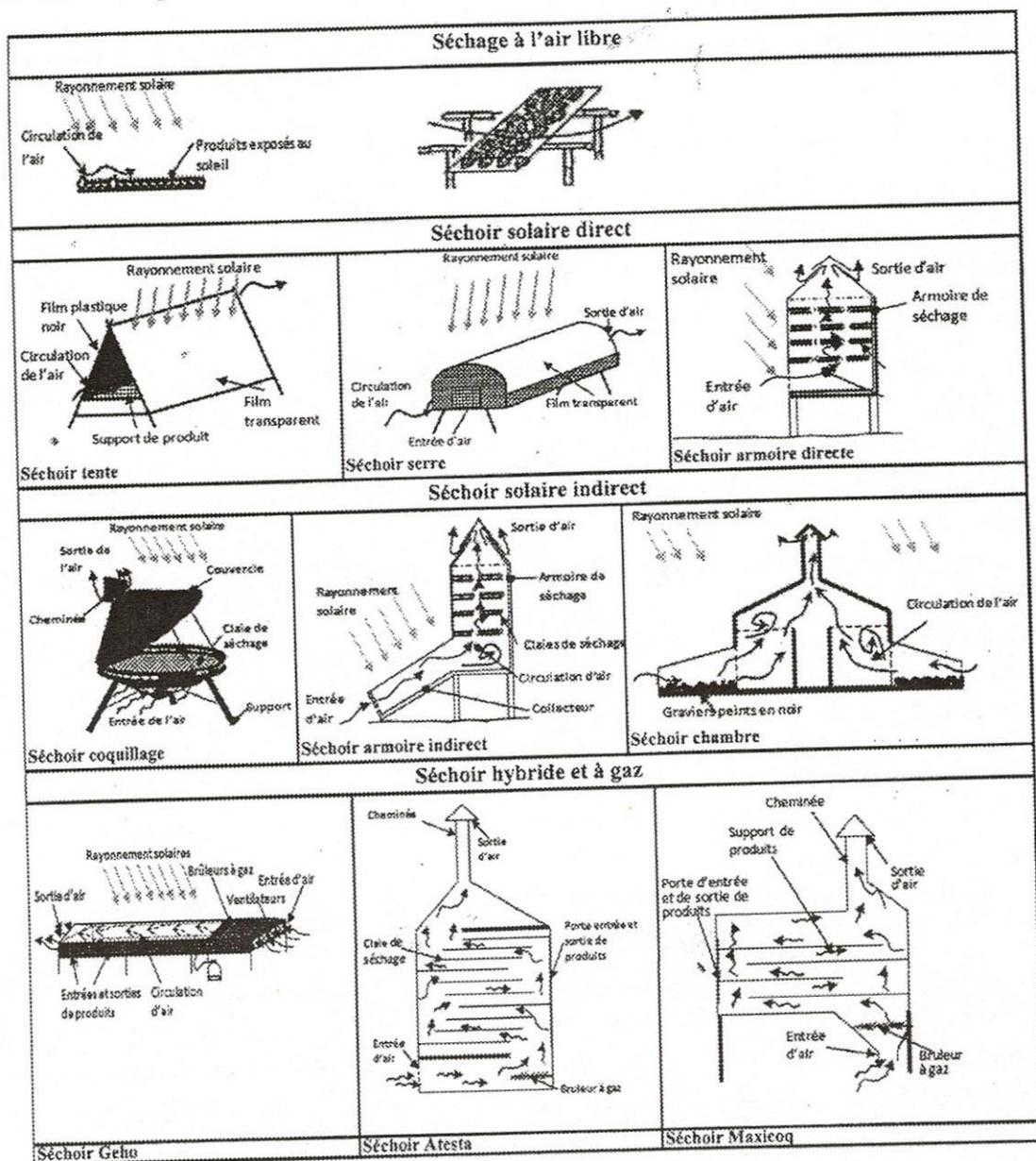
Tous les séchoirs sont à convection naturelle sauf le séchoir Geho et le séchoir serre sur lequel la ventilation forcée est optionnelle.

L'alimentation des séchoirs en produit se fait par batch. Les durées de séchage sont de plusieurs heures : de 12 h à 36 h pour les séchoirs à gaz et les séchoirs solaires hybrides et de 2 à 3 jours pour les séchoirs solaires. Le séchage à l'air libre peut parfois dépasser 7 jours.

Les quantités traitées sont de 5 à 40 kg par cycle en moyenne pour les séchoirs solaires et 26 à 100 kg pour les séchoirs à gaz et solaire hybride. Les débits les plus élevés sont de 4,2 kg de fruits frais séchés par heure avec l'Atesta, 2,8 kg de fruits ou légumes frais séchés par heure pour le séchoir armoire indirecte et 28 kg/h pour les céréales dans le séchoir chambre.

Le séchage se fait à l'air chaud et les températures sont inférieures à la température d'ébullition de l'eau. Les moyennes sont entre 45 °C et 60 °C pour les séchages solaires et 80 °C pour les séchoirs à gaz mais réduit entre 40 °C et 50 °C en fin de séchage. La chaleur est apportée aux produits par rayonnement, convection et aussi par conduction.

Tableau II. Dispositifs de séchage recensés.



Les matériaux utilisés pour la conception des séchoirs sont disponibles localement de même que la main d'œuvre pour la fabrication et la réparation.

Les produits séchés concernent des céréales, des tubercules, des légumes et des fruits parmi lesquels on distingue les produits à forte teneur en eau (ananas, mangues, tomates, bananes, papayes), les produits à moyenne teneur en eau (igname, manioc, patate douce) et ceux à faible teneur en eau (maïs, sorgho, riz, feuilles de plantes). La répartition des produits suivant les séchoirs dépend de la finalité du séchage :

- pour la consommation des ménages, le séchage solaire à l'air libre est pratiqué et concerne les céréales, les tubercules et les légumes ;
- pour la vente sur le marché local, le séchage solaire à l'air libre est utilisé pour les céréales et les tubercules alors que les séchoirs solaires sont utilisés pour les légumes et les fruits ;
- pour l'exportation, il s'agit essentiellement de fruits séchés (ananas, mangues, bananes, etc.) avec les séchoirs à gaz et des céréales séchées avec le séchoir chambre.

En ce qui concerne le coût, les séchoirs se répartissent en deux groupes. On distingue les séchoirs solaires ayant un coût d'achat inférieur à 750 000 F CFA et les séchoirs à gaz et le séchoir chambre dont le coût d'achat est compris entre 750 000 et 5 000 000 F CFA et un coût de fonctionnement élevé dû à l'utilisation d'énergie coûteuse.

### **Besoin des utilisateurs**

Trois catégories d'utilisateurs de séchoir se distinguent : les familles qui pratiquent le séchage pour leur consommation et la commercialisation sur le marché local ; les groupements sont des associations soit de producteurs agricoles, de femmes ou de maraîchers qui se rassemblent pour obtenir un appui financier et technique de la part d'ONG ou de structures gouvernementales ; les PMIA dont l'activité principale est le séchage de produits destinés principalement à l'exportation. Les besoins exprimés par les utilisateurs concernent : la recherche de subventions pour acquérir des séchoirs de plus grandes capacités (fruits et légumes : 50 à 200 kg ; céréales : 4 à 10 tonnes), la réduction du temps de séchage et l'homogénéité du séchage des produits.

Pour l'outil d'aide à la conception, il est indispensable de connaître les valeurs des facteurs objectifs d'un acquéreur de séchoir qui sont : les masses de produits séchés en kg par cycle, les marchés visés pour les produits secs, les prix de produits secs, les durées de cycle, la capacité d'investissement de l'utilisateur. Toutefois, l'utilisateur accorde aussi une importance à d'autres facteurs de satisfaction tels que : le coût de possession du séchoir, sa facilité d'utilisation et sa simplicité.

### **Analyse fonctionnelle et critères de choix des principes de solutions**

L'analyse fonctionnelle externe réalisée à partir du diagramme pieuvre (figure 1) a permis de répertorier les fonctions essentielles (tableau III) : une fonction de service (F1) et huit fonctions contraintes auxquelles doit satisfaire un séchoir. La définition d'un système technique selon la méthode TRIZ (figure 2) a conduit à la description du séchoir en sous-ensembles : la source d'énergie, le système de transmission, le sous ensemble d'opérations et le système de contrôle (tableau IV). Le FAST (figure 4) a été utilisé pour l'analyse fonctionnelle interne du séchoir.

Il a permis de déterminer les fonctions techniques et de définir les principes de solutions pouvant les réaliser. Ainsi, chaque fonction répertoriée par le diagramme pieuvre est traitée par le FAST. A titre d'exemple de résultats de la méthode, le FAST de la fonction de service F1 est illustré par la figure 4.

La définition de critères est indispensable pour un choix judicieux de principes de solutions en conception de séchoir. La revue de la littérature fait ressortir comme critères d'évaluation ou de choix des séchoirs : la puissance installée, le rendement thermique du séchoir, le rendement de séchage, la capacité évaporatoire journalière, la durée du séchage, la température et le débit de l'air de séchage et la quantité de produits séchés en fonction du temps, les dimensions, la qualité des produits, la consommation énergétique et le coût du séchoir (SOPONRONNARIT *et al.*, 1993 ; SHARMA *et al.*, 1999 ; SCHIRMER *et al.*, 1996). GNANARANJAN *et al.*, 1997 ; ARINZE *et al.*, 1999 ; AUGUSTUS *et al.*, 2002).

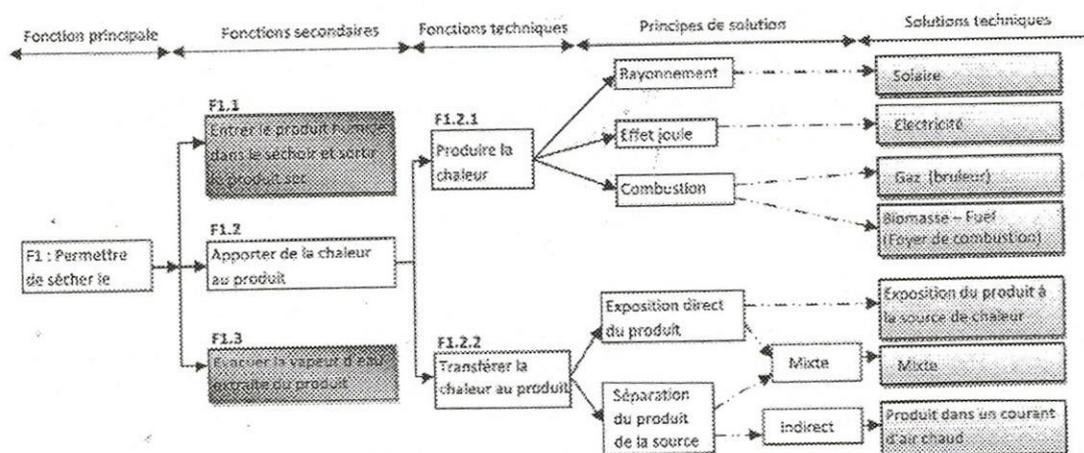


Figure 4. FAST de la fonction principale 1 détaillant la fonction F1.2

Tableau III. Liste des fonctions répertoriées par le diagramme pieuvre.

N°	Fonction
F1	permettre de sécher le produit
F2	permettre d'introduire les produits humides
F3	être efficace aussi bien en saison sèche qu'en saison humide
F4	utiliser l'énergie disponible
F5	être rentable pour l'utilisateur
F5	être simple d'utilisation
F6	être fabriqué localement
F7	garantir la sécurité des utilisateurs
F8	éviter la contamination des produits, les intempéries
F9	permettre de sortir les produits secs

**Tableau IV.** Principes de solutions en conception de séchoir.

Sous-ensemble TRIZ	Entités fonctionnelles	Principes de solutions				
		Production d'énergie (moteur)	Production de chaleur	Energie électrique	Energie solaire	Biomasse
Transmission de la chaleur	Transfert de chaleur	Contact direct	Contact indirect		Mixte	
			Avec ou sans échangeur			
		Ventilation	Naturelle	Naturelle améliorée	Forcée	
Opérations de séchage	Mise en contact	Flux traversant		Flux léchant		
	air-produit	Co-courant	Contre courant	Courant croisé	Co-courant	Contre courant
	Alimentation du séchoir	Bâche	Semi-continue		Continue	
Système de contrôle	Contrôle	Réglage de la température	Réglage de la ventilation		Contrôle de l'alimentation	

Ces critères ne rendent pas entièrement compte du besoin réel des utilisateurs. Les enquêtes réalisées ont permis de faire ressortir en plus, d'autres critères tels que le débouché envisagé pour les produits séchés, la disponibilité de l'énergie, le niveau de compétence de la main d'œuvre requise. En Génie Industriel, en proposant une formalisation de la conception préliminaire d'équipement, SCARAVETTI (2004) a identifié 23 critères pour évaluer les principes de solutions. Dans le but d'assurer une parcimonie à notre modèle et compte tenu du contexte (transformation à petite et moyenne échelle de produits agricoles), nous avons retenu uniquement les critères strictement importants (nécessaires et suffisants). Un brainstorming de l'équipe de recherche pluridisciplinaire (sciences physiques, génie des procédés et génie industriel), les co-auteurs de l'article, a permis d'analyser les critères issus de la littérature sur l'étude des séchoirs, des enquêtes et de la conception préliminaire en génie Industriel et de retenir 11 critères structurants décrits dans le tableau V. Les critères d'élimination concernent surtout : le niveau technologique et de concurrence des équipementiers, la capacité technique et d'investissement des utilisateurs.

**Tableau V. Critères de choix de principes de solutions.**

Critères de choix		Caractérisation
Critère produit	Type de produit	Etat du produit – liquide, pâteux, solide, teneur en eau, composition du produit, température maximale de séchage, cinétique de séchage du produit
	débit de séchage souhaité par les opérateurs	en fonction des types de produits (en unité de masse de produit frais ou produit sec par unité de temps)
Critères économiques	capacité d'investissement	coût de possession : coût d'achat, de fonctionnement et de maintenance
	spécification de qualité du produit séché suivant les marchés (débouchés)	couleur, texture, goût, composition, condition d'hygiène (consommation directe, vente sur le marché local, dans les supermarchés ou sur le marché international).
	coût de vente des produits	coût de production, loi de l'offre et de la demande
	temps de retour	
Critères technique et énergétique	disponibilité des différentes sources d'énergie	pouvoir calorifique (gisement solaire), coût, accessibilité (régularité d'approvisionnement ou variabilité du gisement solaire)
	disponibilité des matériaux	local (pays), régional (Afrique de l'Ouest), pays industrialisés (UE, USA, Canada, Chine, Inde, etc.)
	compétence de fabrication et de maintenance	artisan, technicien, ingénieur, équipe de recherche
	niveau de formation de la main d'œuvre d'utilisation	sur le tas, collège ou centre d'apprentissage, lycée technique ou enseignement supérieur
	disponibilité de l'espace (encombrement)	dimensions minimum (ou maximum) du séchoir, volume

## Règles de séchage

Les règles de séchage présentées dans cet article sont déduites des cinétiques de séchage obtenues à partir des essais que nous avons réalisés sur l'ananas à différentes températures et différentes vitesses de l'air présentées par les figures 5 et 6. Des cinétiques de séchage, les temps de séchage correspondant à  $X_r = 1$  (teneur en eau réduite initiale), à  $X_r = 0,5$ , à  $X_r = 0,3$  et à  $X_r = 0,1$  ont été déterminés (tableaux VI et VII) pour les différentes températures et vitesse d'air. Les résultats du tableau VI montrent que pour une élimination de 50 % de l'eau à évaporer du produit, une augmentation en température de 40 °C à 50 °C réduit le temps de séchage de 38 %. En considérant toujours  $X_r$  comprise entre 0,5 et 1, une augmentation de 50 °C à 60 °C permet de réduire le temps de séchage de 40 %. Lorsque le séchage est conduit de  $X_r = 0,5$  à  $X_r = 0,3$ , une augmentation de 40 °C à 50 °C entraîne une réduction du temps de séchage de 44 %. Pour le même intervalle de teneur en eau réduite, une augmentation de 50 °C à 60 °C de la température permet de réduire le temps de séchage de 38 %. En séchant jusqu'à  $X_r = 0,1$  à 50 °C au lieu de 40 °C, on obtient une réduction en temps de séchage de 27 %. En comparant dans le même intervalle de teneur en eau réduite, le séchage à 60 °C à celui de 50 °C, on remarque une réduction de temps de séchage de 36%.

Il en résulte qu'une augmentation de température entraîne une réduction de temps de séchage confirmé par NICOLETI *et al.* (2001) sur l'ananas, AKPINAR *et al.* (2003) sur les patates, DISSA *et al.* (2008) sur les mangues et DOYMAZ (2004) sur les carottes. Nos résultats font ressortir que cette réduction est plus marquée dans les deux dernières phases de séchage. Les résultats du tableau VII montrent que, pour une élimination de 50 % de l'eau à évaporer du produit, une augmentation de la vitesse de l'air au niveau des produits de 0,27 m/s à 0,5 m/s entraîne une réduction du temps de séchage de 52 %. Pour une variation de vitesse de 0,5 m/s à 1,17 m/s, on observe une réduction du temps de séchage de 29 %. Cependant, en variant la vitesse de l'air de 1,17 m/s à 1,8 m/s toujours pour  $1 > X_r > 0,5$ , la réduction du temps de séchage n'est que de 7%.

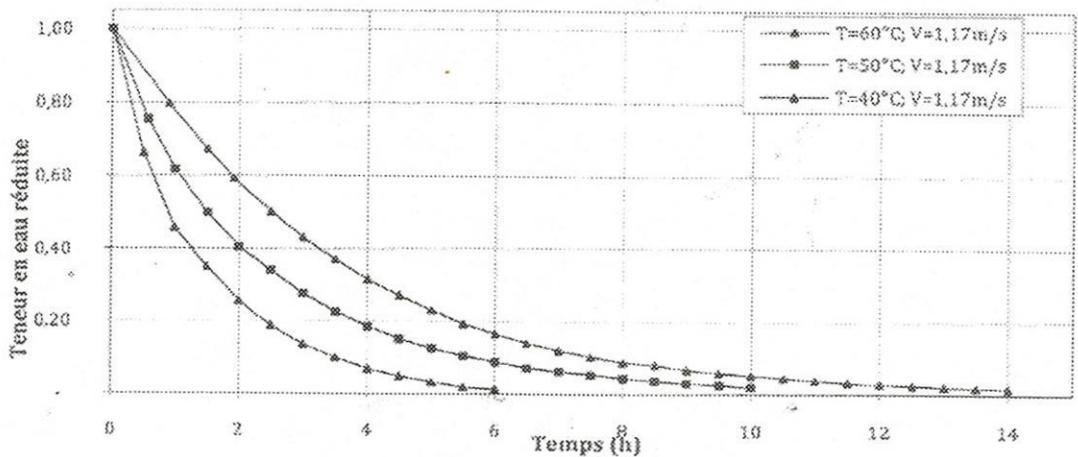


Figure 5. Cinétique de séchage de l'ananas à 40 °C, 50 °C et 60 °C.

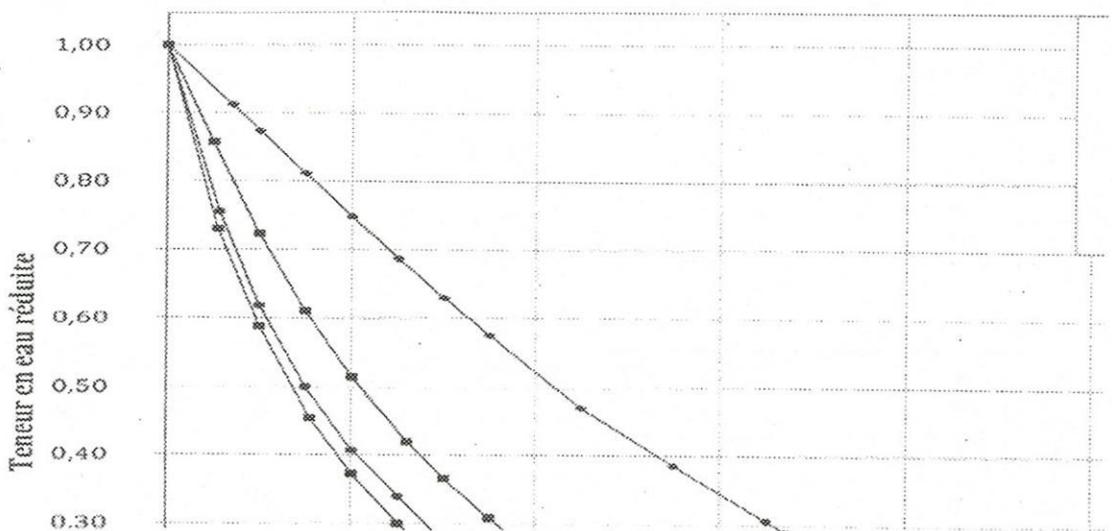


Figure 6. Cinétique de séchage de l'ananas à 0,27m/s ; 0,5m/s ; 1,17m/s ; et 1,8m/s.

Lorsque le séchage se poursuit de  $X_r = 0,5$  à  $X_r = 0,3$ , à une vitesse de 0,5 m/s au lieu de 0,27 m/s l'on obtient une réduction du temps de séchage de 42%. Pour le même intervalle de teneur en eau, une augmentation de 0,5 m/s à 1,17 m/s permet de réduire le temps de séchage de 20 %. Quant au séchage entre  $0,5 > X_r > 0,3$  se fait à 1,8 m/s au lieu de 1,17 m/s, la réduction de temps est de 11%. Il ressort du tableau VII que le séchage de l'ananas pour  $X_r = 0,3$  à  $X_r = 0,1$  ; à 0,5 m/s au lieu de 0,27 m/s permet aussi une réduction du temps de séchage de 40 %. En comparant dans le même intervalle de teneur en eau réduite, le séchage à 1,17 m/s à celui de 0,5 m/s, on remarque une réduction de temps de séchage de 16 %. En passant à 1,8 m/s, le temps est réduit en plus de 11 % par rapport à un séchage à 1,17 m/s. L'influence de la vitesse de l'air sur le séchage du produit est très significative quand on passe du séchage en convection naturelle (autour de 0,27 m/s) à une ventilation moyenne (0,5 m/s). Sur l'ensemble des variations de vitesses d'air étudiées, on relève que l'influence de la vitesse de l'air sur le séchage est plus marquée en début de séchage qu'en fin de séchage où elle est inférieure à 20 %. Les travaux de TALLA *et al.* (2001) et de NICOLETI *et al.* (2001) pour des vitesses plus élevées (1,5 à 4 m/s) ont montré que la variation du débit d'air n'avait pas d'influence significative sur le séchage ce qui n'est pas le cas entre 0,27 m/s et 1,5 m/s.

Des résultats similaires pour d'autres produits ont été trouvés. KARIM et HAWLADER (2005) pour le séchage de la banane en flux léchant ont montré qu'à 0,3 m/s, le temps de séchage diminue de 25 % en passant de 40 °C à 50 °C et de 33 % lorsqu'on passe de 50 °C à 60 °C. A 0,7 m/s, de 40 °C à 50 °C, le temps de séchage diminue de 31% et de 35 % de 50°C à 60°C. L'influence de l'épaisseur sur le temps de séchage des mangues est montrée par KAMENIA *et al.* (2003) à Ouagadougou dans un séchoir à gaz à flux léchant avec une vitesse de 1,3 m/s à 70 °C sur la variété Amélie. Une variation d'épaisseur de 4 à 10 mm entraîne une augmentation du temps de séchage de 140 % ; et de 50 % pour une variation de 10 mm à 15 mm. Ces travaux sont confirmés par AKPINAR *et al.* (2003) pour la patate et par DOYMAZ (2004) pour les carottes.

**Tableau VI.** Temps de séchage pour différentes valeurs de  $X_r$  en fonction de la température de l'air.

De $X_r = 1$ à $X_r = 0,5$	T = 40 °C	T = 50 °C	T = 60 °C
Temps de séchage t (h)	2,50	1,50	0,90
De $X_r = 0,5$ à $X_r = 0,3$			
Temps de séchage t (h)	4,00	2,80	1,75
De $X_r = 0,3$ à $X_r = 0,1$			
Temps de séchage t (h)	7,50	5,50	3,5

**Tableau VII.** Temps de séchage pour différentes valeurs de  $X_r$  en fonction de la vitesse de l'air.

De $X_r = 1$ à $X_r = 0,5$	V = 0,27m/s	V = 0,5m/s	V = 1,17m/s	V = 1,8m/s
Temps de séchage t (h)	4,38	2,12	1,50	1,40
De $X_r = 0,5$ à $X_r = 0,3$				
Temps de séchage t (h)	6,00	3,50	2,80	2,50
De $X_r = 0,3$ à $X_r = 0,1$				
Temps de séchage t (h)	11,20	6,70	5,50	5,00

## Principes de solutions en conception de séchoir

Les principes de solutions identifiés à partir de l'analyse fonctionnelle pour chaque sous-ensemble TRIZ sont présentés dans le tableau IV. La revue de la littérature sur la conception de séchoirs dans les pays du Sud présente une classification du séchoir tout entier : séchoir conventionnel ou solaire direct, indirect ou mixte (SHARMA *et al.*, 1995 ; EKECHUKWU and NORTON, 1999 ; SHARMA *et al.*, 2009). Cependant, la définition de principes de solution à partir des sous-ensembles a l'avantage de rendre possible différentes combinaisons et de multiplier les solutions techniques potentielles puis d'accroître l'innovation. Cette approche permet un développement indépendant des différentes parties du séchoir et la gestion du couple « efficacité-coût » du système de séchage. LUNA-SANCHEZ (2008), pour la conception préliminaire de séchoir solaire à bois a procédé par entité pour assurer une meilleure efficacité et une innovation par rapport aux systèmes existants. La prise en compte de la satisfaction du besoin des utilisateurs et de l'environnement est évaluée à l'aide de plusieurs critères de choix de principes (tableau V). Les critères que nous proposons visent à évaluer lors de la conception les différentes solutions techniques pour ne retenir que celles qui répondent le mieux au cahier des charges de l'utilisateur. Les règles de séchage définies à partir des cinétiques de séchage issues des essais sur l'ananas permettent d'identifier lors de la conception, les paramètres optimums de séchage en fonction du cahier des charges de l'utilisateur afin d'orienter les choix technologiques. Ces résultats combinés avec une revue de la littérature (AUGUSTUS *et al.*, 2002 ; KARABULUT *et al.*, 2007 ; SARSAVADIA, 2007 ; BECHOFF *et al.*, 2009 ; RIVIER *et al.*, 2009 ; ARSLAN *et al.*, 2010) ont permis de définir des principes de solutions relatifs aux produits à sécher :

- l'énergie à apporter pour sécher une quantité donnée de produit croît avec le débit d'air chaud de séchage et décroît avec la température de cet air chaud ;
- pour un produit à forte teneur en eau, il faut utiliser une source d'énergie de forte puissance (énergie sur un intervalle de temps très court) en début de séchage ;
- pour un produit à faible teneur en eau, une source d'énergie de faible puissance (énergie sur un intervalle de temps relativement long) pouvant apporter juste l'énergie nécessaire au séchage peut être utilisée ;
- des températures de 55 à 65°C au niveau du produit sont indiquées pour le séchage de fruits et de légumes pour ne pas détériorer leur qualité ;
- pour les produits de couleur (mangue, tomate, etc.) ou à forte teneur en sucre, en vitamine A et C ou produits aromatiques ou médicinaux et pour lesquels les spécifications du cahier des charges précisent la conservation de ces qualités après le séchage, il faut éviter une exposition directe d'une part au rayonnement solaire et d'autre part à de fortes températures (supérieures à 60 °C) pendant la phase II de séchage.

Sur le plan sociotechnique, selon que les utilisateurs ont une formation (scolaire ou professionnelle) ou non, le concepteur aura le choix entre deux principes de solutions : la conduite simple du séchage avec un suivi manuel du produit (agitation du produit, permutation de claies, etc.) ou l'introduction de la notion de phase dans la conduite du séchage avec variation de température et de débit d'air. Ces différents principes de solutions relatifs aux produits permettront de choisir de meilleures solutions techniques de conception de séchoirs. Une analyse ex post en considérant quelques exemples de séchoirs sur le terrain nous montre l'importance de ces principes

de solutions en conception. L'exemple du séchoir Atesta qui est largement diffusé en Afrique subsaharienne intègre grâce à son système de réglage du brûleur à gaz et à son capteur de température la possibilité de fixer les paramètres optimums selon les phases de séchage (ANON, 2005). Ceci constitue un atout majeur mais la convection naturelle dans le séchoir Atesta limite le rendement du séchoir à 30 - 35 %. Le séchoir Atesta étant destiné au séchage de produits à forte teneur en eau (supérieure à 70 %), ce rendement pourrait être amélioré en adaptant lors de la conception une ventilation forcée au séchoir surtout pour la première phase de séchage (ANON, 2008). Un autre exemple concerne le séchoir tente : séchoir solaire pour les légumes à faible et moyenne teneur en eau (inférieur à 60 %). Les produits sont destinés à la consommation ou à la vente sur le marché local donc il n'y a pas une forte contrainte sur la qualité des produits secs. La conduite manuelle du séchage telle que réalisée traditionnellement ne nécessite aucune qualification. La convection naturelle et l'utilisation de film plastique et tige de bambou (bois) sont suffisantes pour réduire le coût d'acquisition (usage rural). Dans le cas du séchage solaire, pour une PMIA ayant une capacité d'investissement assez élevée, on optera pour un capteur solaire avec du verre sélectif, une solution technique qui procure un meilleur rendement.

## Conclusion

Les enquêtes ont permis d'identifier les principes de fonctionnement des séchoirs existants et de déterminer les besoins des utilisateurs. Les essais de séchage de l'ananas et l'analyse des cinétiques de séchage obtenues à différentes températures et vitesses d'air ont permis de caractériser le comportement d'un produit à sécher et de déterminer les conditions limites de séchage indispensables pour l'élaboration d'un algorithme d'outil d'aide à la décision en conception de séchoirs. La combinaison de l'analyse fonctionnelle et des règles de séchage nous a permis de définir les principes de solutions relatifs aux produits et aux utilisateurs pour la conception de séchoirs pour la transformation à petite et moyenne échelle de produits agricoles tropicaux. Ce travail sera complété par une étude thermo-économique des séchoirs et l'élaboration d'un algorithme en vue de proposer un outil d'aide à la décision pour le choix de principes de solutions et de solutions techniques en conception de séchoirs pour la transformation de produits agricoles tropicaux.

## Remerciements

Nous remercions le Service de Coopération et d'Action Culturelle de France au Togo, le Cirad et l'Université de Lomé pour leur soutien financier et logistique.

## Références citées

- AKPINAR E., MIDILLI A. and BICER Y., 2003. «Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling.» *Energy Conversion and Management* 44(10): 1689-1705.
- ANON, 2005. Guide de l'entreprise de séchage de mangue au Burkina Faso.
- ANON, 2008. Guide de l'entreprise de séchage de mangue au Burkina Faso.
- ARINZE E. A., SCHOENAU G. J. and SOKHANSANJ S., 1999. «Design and experimental evaluation of a solar dryer for commercial high-quality hay production." *Renewable Energy* 16(1-4): 639-642.

- ARSLAN D., ÖZCAN M. M. and MENGES H. O., 2010.** « Evaluation of drying methods with respect to drying parameters, some nutritional and color characteristics of peppermint (*Mentha x piperita* L.) » *Energy Conversion and Management* 51(12): 2769-2775.
- AUGUSTUS LEON M., KUMAR S. and BHATTACHARYA S. C., 2002.** «A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6(4): 367-393.
- BECHOFF A., DUFOUR D., DHUIQUE-MAYER C., MAROUZÉ C., REYNES M. and WESTBY A., 2009.** «Effect of hot air, solar and sun drying treatments on provitamin A retention in orange-fleshed sweet potato.» *Journal of Food Engineering* 92(2): 164-171.
- BERLINER C. and BRIMSON J., 1988.** *Cost management for Today's Advanced Manufacturing*. H. B. Press. Boston.
- BOROZE T., MAROUZÉ C., MÉOT J. M. and NAPO K., 2009.** ACSPA : outil d'Aide au Choix de Principes de Séchoirs solaires pour Produits Agroalimentaires XII<sup>e</sup> Congrès de la Société Française de Génie des Procédés, SFGP 2009. Marseille, France.
- DE LA BRETESCHE B., 2000.** la méthode APTE d'analyse de la valeur et d'analyse fonctionnelle.
- DISSA A. O., DESMORIEUX H., BATHIEBO J. and KOULIDIATI J., 2008.** « Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera indica* L. cv. [ ]Amelie') with correction for shrinkage.» *Journal of Food Engineering* 88(4): 429-437.
- DOYMAZ I., 2004.** « Convective air drying characteristics of thin layer carrots. » *Journal of Food Engineering* 61(3): 359-364.
- EKECHUKWU O. V. and NORTON B., 1999.** «Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology.» *Energy Conversion and Management* 40(6): 615-655.
- GNANARANJAN N. P., RAKWICHIAN W., O'DONOGHUE J., KUMAR S., 1997.** Field performance of a solar tunnel dryer. ISES Solar world congress, Taejon, Korea.
- KAMENIA A., MBOFUNGB C. M., NGNAMTAMB Z., DOASSEMA J. and HAMADOUA L., 2003.** « Aptitude au séchage des fruits de quelques variétés de manguiers cultivées au Cameroun.» *Fruits* 58: 89-98
- KARABULUT I., TOPCU A., DURAN A., TURAN S. and OZTURK B., 2007.** « Effect of hot air drying and sun drying on color values and [beta]-carotene content of apricot (*Prunus armenica* L.) » *LWT - Food Science and Technology* 40(5): 753-758.
- KARIM M. A. and HAWLADER M. N. A., 2005.** « Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation.» *Journal of Food Engineering* 70(1): 35-45.
- LUNA-SANCHEZ D., 2008.** Modélisation et conception préliminaire d'un séchoir solaire pour bois de pin avec stockage d'énergie. Sciences des métiers de l'ingénieur. Bordeaux, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers. Thèse de doctorat.
- MAROUZE C., 1999.** Proposition d'une méthode pour piloter la trajectoire technologique des équipements dans les pays du Sud. Application au secteur agricole et agroalimentaire. Génie Industriel. Paris, France., Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers.
- NICOLETI, J. F., J. TELIS-ROMERO and V. R. N. TELIS, 2001.** « Air-drying of fresh and osmotically pretreated pineapple slices: Fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. » *Drying Technology* 19(9): 2175 - 2191.
- RIVIER M., MEOT J.-M., FERRÉ T. and BRIARD M., 2009.** Le séchage des Mangues. Montpellier.
- SARSAVADIA P. N., 2007.** « Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion » *Renewable Energy* 32(15): 2529-2547.
- SCARAVETTI D., 2004.** Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire. Mécanique des métiers de l'ingénieur. Bordeaux, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers. Thèse de doctorat.

**SCHIRMER P., JANJAI S., ESPER A., SMITABHINDU R. and MUHLBAUER W., 1996.** « Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas » *Renewable Energy* 7(2): 119-129.

**SHARMA A., CHEN C. R. and VU LAN N., 2009.** « Solar-energy drying systems: A review .» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6-7): 1185-1210.

**SHARMA V. K., COLANGELO A. and SPAGNA G., 1995.** « Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying. » *Renewable Energy* 6(4): 413-424.

**SHIBA S., 1995.** La conception à l'écoute du marché, Paris.

**SOPONRONNARIT S., RACKWICHIAN W., SUKCHAI, ASSAYO M., 1993.** Performance of a solar dryer for peeled bananas. Energy perspectives in plantation industry, Bangalore, India, Interline.

**TALLA A., JANNOT Y., KAPSEU C. and NGANHOU J., 2001.** « Étude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage de fruits tropicaux: Application à la banane et à la mangue » *Sciences des aliments* 21 (5): 499-518.

**TASSINARI R., 2003.** Pratique de l'analyse fonctionnelle. Paris.

**TRAVE-MASSUYES L., DAGUE P. and GUERRIN F., 1997.** Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur. Paris, HERMES.

**ZABLIT P. and ZIMMER L., 2001.** Global aircraft predesign based on constraint propagation and interval analysis. CEAS Conference on Multidisciplinary Aircraft Design and Optimization. Köln, Allemagne.