

N° d'ordre : 349

EXPOSE GENERAL

PRESENTE DEVANT

L'UNIVERSITE BORDEAUX I

POUR OBTENIR LE DIPLÔME D'

HABILITATION

A DIRIGER DES RECHERCHES

PAR

Yves JANNOT

**Du séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation
thermophysique des solides**

Soutenu le 7 juillet 2006, devant le jury :

Président :	G. VIGNOLES	Professeur (Université Bordeaux 1)
Rapporteurs :	A. DEGIOVANNI	Professeur (INPL, Nancy)
	P. GLOUANNEC	Professeur (UBS, Lorient)
	D. PETIT	Professeur (ENSMA, Poitiers)
Examineurs :	J.C. BATSALE	Professeur (ENSAM, Bordeaux-Talence)
	J.-R. PUIGGALI	Professeur (Université Bordeaux 1)

SOMMAIRE

NOMENCLATURE	3
PRESENTATION GENERALE ET INTRODUCTION	7
1. MODELISATION DU SECHAGE D'UN PRODUIT A HAUTE TENEUR EN EAU	11
1.1. INTRODUCTION	11
1.2. CHOIX D'UN MODELE	11
1.3. CARACTERISATION DE LA SORPTION	14
1.3.1. <i>Modèles théoriques</i>	14
1.3.2. <i>Identification d'isothermes de sorption</i>	15
1.3.3. <i>Caractérisation du retrait volumique</i>	16
1.4. MODELISATION DU SECHAGE	17
1.4.1. <i>Conditions expérimentales</i>	17
1.4.2. <i>Identification de CCS à température de séchage constante</i>	19
1.4.3. <i>Modélisation du séchage avec saut de température</i>	23
1.4.4. <i>Modélisation d'un séchoir</i>	25
1.5. ETUDE EXPERIMENTALE	28
1.5.1. <i>Validation du modèle</i>	28
1.5.2. <i>Etude du coût énergétique</i>	29
1.6. CONCLUSION	30
2. METROLOGIE THERMIQUE : OBJECTIFS, OUTILS ET METHODES	35
2.1. INTRODUCTION	35
2.2. OBJECTIFS VISES	35
2.3. INTERET D'UN MODELE QUADRIPOLAIRE COMPLET	37
2.4. ETUDE DE SENSIBILITE	40
2.5. METHODE D'ESTIMATION DES PARAMETRES	42
2.6. METHODE D'EVALUATION DE LA PRECISION DE L'ESTIMATION	44
2.7. CONCLUSION	46
3. FLUXMETRE TRANSITOIRE POUR L'ESTIMATION DE LA TEMPERATURE INTERNE D'UN SOLIDE	49
3.1. INTRODUCTION	49
3.2. DESCRIPTION DU CAPTEUR	51
3.3. MODELISATION DES TRANSFERTS THERMIQUES	53
3.4. CARACTERISATION DU CAPTEUR	54
3.5. ETUDE DE SENSIBILITE	57
3.6. ETUDE EXPERIMENTALE	58
3.7. CONCLUSION	59
4. METHODE DU RUBAN CHAUD AVEC MESURE DE LA TEMPERATURE AXIALE	63
4.1. INTRODUCTION : LES METHODES EXISTANTES	63
4.2. MODELISATION DE LA TEMPERATURE AU CENTRE DU RUBAN CHAUD	65
4.2.1. <i>Modèle complet</i>	65
4.2.2. <i>Cas d'un matériau anisotrope</i>	66
4.2.3. <i>Modèle simplifié</i>	67
4.3. ETUDE DE SENSIBILITE	67
4.4. METHODES D'ESTIMATION DES PARAMETRES	69
4.4.1. <i>Effusivité thermique</i>	69
4.4.2. <i>Conductivité thermique</i>	70
4.5. OPTIMISATION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES	71
4.5.1. <i>Dimensions du ruban chaud</i>	71
4.5.2. <i>Flux de chaleur dans la résistance chauffante</i>	73
4.6. VALIDATION EXPERIMENTALE	73
4.7. CONCLUSION	74
5. METHODE DU PLAN CHAUD AVEC MESURE DE DEUX TEMPERATURES	79

5.1.	INTRODUCTION	79
5.2.	MODELISATION.....	79
5.3.	ETUDE DE SENSIBILITE.....	81
5.4.	METHODE D'ESTIMATION DES PARAMETRES.....	83
5.5.	RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION.....	83
5.5.1.	<i>Matériaux isotropes</i>	83
5.5.2.	<i>Matériaux anisotropes</i>	86
5.6.	CONCLUSION	87
6.	MODELISATION DU HOT DISC PAR LA METHODE DES QUADRIPOLES THERMIQUES..	91
6.1.	INTRODUCTION	91
6.2.	MODELISATION.....	92
6.2.1.	<i>Modèle classique</i>	92
6.2.2.	<i>Modélisation par la méthode des quadripôles</i>	94
6.3.	ETUDE DE SENSIBILITE.....	96
6.4.	ETUDE EXPERIMENTALE	100
6.5.	CONCLUSION	102
7.	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	107
	BIBLIOGRAPHIE	113
	ANNEXE 1 : CURRICULUM VITAE	118
	ANNEXE 2 : CO-ENCADREMENT DE TRAVAUX DE RECHERCHE.....	118
	ANNEXE 3 : PUBLICATIONS.....	118
	ANNEXE 4 : ENSEIGNEMENT ET ADMINISTRATION.....	118
	ANNEXE 5 : ARTICLE SUR L'AMELIORATION DU CONFORT THERMIQUE EN ZONE TROPICALE	118
	ANNEXE 6 : ARTICLE SUR LES TRANSFERTS RADIATIFS DANS UN CAPTEUR SOLAIRE... 118	
	ANNEXE 7 : ARTICLE SUR LA MODELISATION DES CINETIQUES DE SECHAGE..... 118	
	ANNEXE 8 : ARTICLE SUR UN FLUXMETRE EN REGIME TRANSITOIRE..... 118	
	ANNEXE 9 : ARTICLE SUR LA METHODE DU RUBAN CHAUD	118
	ANNEXE 10 : CHAPITRE D'UN COURS DE « THERMIQUE SOLAIRE »..... 118	

Nomenclature

a	Diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
b	Largeur	m
c	Capacité calorifique	$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
D	Diamètre	m
D_w	Diffusivité massique de la vapeur d'eau	$m^2.s^{-1}$
D_m	Fonction caractéristique du hot disc à m spires	
D_{∞}	Fonction caractéristique du hot disc à nombre infini de spires	
e	Epaisseur	m
E	Effusivité thermique	$J.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}.s^{-1/2}$
f	Fonction de transfert	
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$
HR	Humidité relative de l'air	%
H_w	Chaleur latente de condensation de l'eau	$J.kg^{-1}$
H_m	Chaleur de sorption totale de la première couche	$J.kg^{-1}$
H_q	Chaleur de sorption totale des multicouches.	$J.kg^{-1}$
I, I_m	Fonctions de transfert du Hot disc	
I_0, I_1	Fonctions de Bessel	
J_1	Fonctions de Bessel	
K_0, K_1	Fonctions de Bessel	
L	Longueur	m
L[f]	Transformée de Laplace de la fonction f	
M	Masse molaire	$kg.mol^{-1}$
m	Masse	kg
\dot{m}	Débit massique	$kg.s^{-1}$
Nu	Nombre de Nusselt	
Pr	Nombre de Prandtl	
p	Variable de Laplace	
p_e	Périmètre	m
R	Constante des gaz parfaits	$N.m.K^{-1}.mol^{-1}$
Re	Nombre de Reynolds	
r, r_0	Rayon	m
R	Résistance électrique	Ω
R_0	Résistance électrique à $T = 0^{\circ}C$	Ω
R_c	Résistance thermique de contact	$W.^{\circ}C^{-1}$
S	Surface	m^2
t	Temps	s
T	Température	$^{\circ}C$
T_p	Température du produit à sécher	$^{\circ}C$
\bar{T}	Température moyenne	$^{\circ}C$
\hat{T}	Température mesurée	$^{\circ}C$
u	Vitesse	$m.s^{-1}$
U_p	Tension aux bornes de l'élément Peltier	V
[X]	Matrice de sensibilité	
V	Volume	m^3
V_s	Vitesse de séchage	$kg.kg_{ms}^{-1}.s^{-1}$
V^*	Vitesse de séchage réduite	
w	Teneur en eau de l'air	$kg.kg_{as}^{-1}$
\bar{W}	Teneur en eau d'un solide	$kg.kg_{ms}^{-1}$
\bar{W}	Teneur en eau moyenne	$kg.kg_{ms}^{-1}$
W_{cr}	Teneur en eau critique	$kg.kg_{ms}^{-1}$
W_{eq}	Teneur en eau équivalente	$kg.kg_{ms}^{-1}$
W^*	Teneur en eau réduite moyenne	

x, y, z	Variables d'espace	m
Z_c	Impédance dans l'espace de Laplace	

Lettres grecques

ϕ	Densité de flux de chaleur	$W.m^{-2}$
α	Pente du profil de température	$^{\circ}C.m^{-1}$
β	Coefficient de constriction	
β_c	Coefficient de contraction	
Φ	Transformée de Laplace du flux de chaleur	
φ	Flux de chaleur	W
λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
μ	Viscosité dynamique	$Pa.s^{-1}$
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
θ	Transformée de Laplace de la température	
σ_T	Ecart-type des erreurs de mesure de T	$^{\circ}C$
ΔT	Ecart de température	$^{\circ}C$
τ	Temps adimensionné	

Indices

a	Air
as	Air sec
mod	Modèle
ms	Matière sèche
p	Produit à sécher
ref	Référence
w	Eau
0	Initial

Chapitre 1

MODELISATION DU SECHAGE D'UN SOLIDE A HAUTE TENEUR EN EAU

1. MODELISATION DU SECHAGE D'UN PRODUIT A HAUTE TENEUR EN EAU

1.1. Introduction

Les résultats relatifs au séchage d'un solide à haute teneur en eau qui vont être présentés dans les chapitres suivants sont la synthèse de travaux principalement réalisés au Laboratoire d'Energétique (LAEN) de l'ENSP de Yaoundé dont j'ai assumé la responsabilité entre 1996 et 2001. L'objectif lié à cette activité de recherche était double :

- permettre à certains collègues camerounais récemment recrutés d'obtenir un doctorat,
- développer au sein du laboratoire une activité de recherche propre pour permettre l'obtention d'un doctorat à partir de travaux effectués localement, tout en continuant à bénéficier d'appuis extérieurs.

Les motivations qui nous ont amené à choisir ce thème de recherche sont les suivantes :

- Le choix d'un sujet présentant un intérêt local fort nous a semblé une condition nécessaire à la pérennisation de l'activité de recherche que nous voulions initier. Il se trouve que dans les pays en voie de développement où l'énergie est souvent rare (électrification incomplète, réseau de distribution de gaz et de fuel peu dense) et chère, le séchage reste l'un des modes de conservation des produits alimentaires les plus utilisés. Dans des pays où l'autosuffisance alimentaire n'est pas toujours garantie, la conservation des produits alimentaires constitue un enjeu important. Il a par ailleurs été constaté qu'il existe un marché intérieur mais aussi extérieur (fruits séchés) pour les produits tropicaux secs.
- Le thème choisi devait permettre une étude expérimentale ne nécessitant pas une métrologie complexe et coûteuse ce qui est le cas du séchage où les principales grandeurs à mesurer sont des masses et des températures à une fréquence faible compte tenu de la durée d'une opération de séchage.
- Le séchage des produits alimentaires tropicaux, caractérisés par une très haute teneur en eau initiale et une déformation importante au cours du séchage, avait été relativement peu étudié.

L'ensemble de ces raisons nous a amené à développer au LAEN ce thème de recherche d'intérêt local en initiant et en co-encadrant des thèses portant sur la caractérisation en vue de leur séchage des produits suivants : manioc, gombo, gingembre, piment (Ahouannou, 2001), banane, mangue, ananas (Talla, 2003), cacao (Kanmogne, 2003). L'objectif de ce travail était d'être capable d'apporter des réponses aux questions concrètes suivantes : de quel séchoir (type, dimensions, puissance) doit-on disposer pour sécher M kg d'un produit tropical (parmi ceux étudiés) ? Quelles sont les conditions optimales de son exploitation ? Quels seront la durée et le coût du séchage ? La réponse à toutes ces questions est la base d'un éventuel développement d'une activité commerciale de vente de produits séchés.

1.2. Choix d'un modèle

Compte tenu de leur forte teneur en eau qui rend leur surface « collante », les produits considérés (excepté le cacao) sont séchés en couche mince : une seule épaisseur de produit est disposée sur une ou plusieurs claies grillagées avec un écoulement d'air soit longitudinal soit transversal. Dans notre étude nous avons plutôt considéré un écoulement longitudinal (air « léchant ») mais les résultats obtenus sont également applicables pour un écoulement transversal. Le séchoir considéré est du type de celui représenté sur la figure 1.1.

Nous supposons que la vitesse de l'air est la même au niveau de tous les produits ce qui peut être obtenu en ajustant le nombre d'orifices entre la zone « produit » et les canaux latéraux de recirculation d'air. La teneur en eau moyenne \bar{W} d'un morceau ne dépend alors que de sa position par rapport à l'entrée d'air repérée par x et du temps t écoulé depuis le début du séchage : $\bar{W} = \bar{W}(x, t)$.

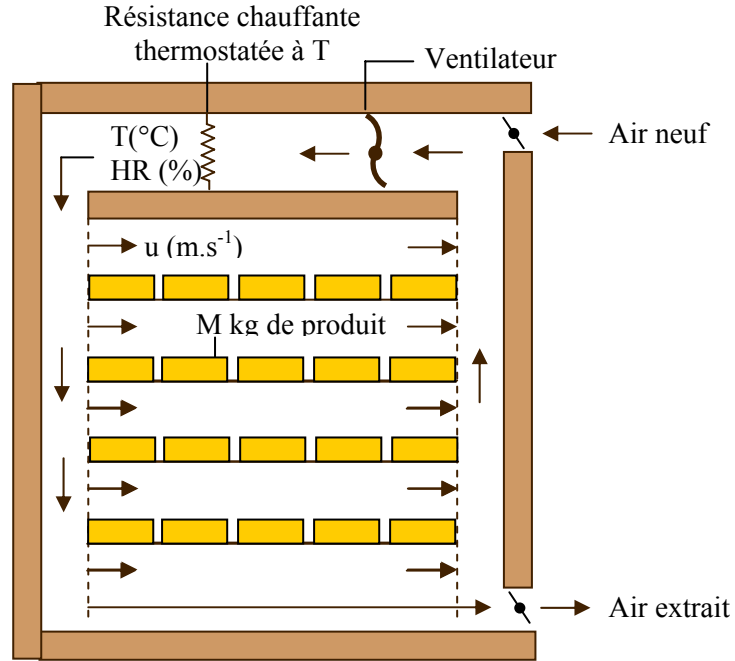


Figure 1.1 : Schéma du séchoir type étudié

La longueur des morceaux de produits étudiés étant faible (quelques cm au plus) par rapport à la longueur de la claie (>1m), on a retenu l'hypothèse de l'absence de gradient longitudinal de température et de teneur en eau sur un morceau de produit, le profil des teneurs en eau suivant le sens de l'écoulement du fluide est représenté sur la figure 1.2.

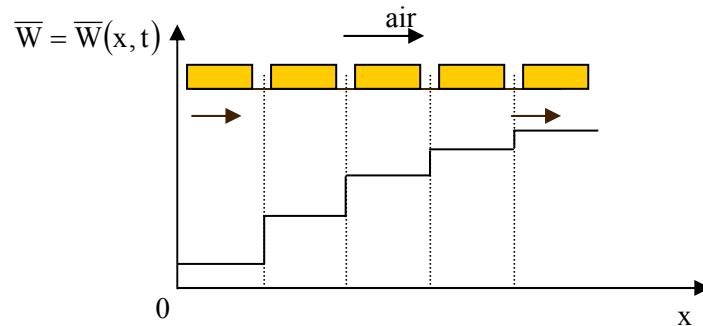


Figure 1.2 : Schématisation du profil de teneur en eau considéré

Pour déterminer la vitesse de séchage à conditions d'air constantes certains auteurs utilisent un modèle diffusif avec prise en compte du phénomène de retrait (Simal et al, 1998), (Lima et al, 2002), (Karim et Hawlader, 2005) en écrivant l'équation de la diffusion massique sous la forme :

$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = \frac{1}{D_w} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{u_r}{D_w} \frac{\partial W}{\partial z} \quad (1.1)$$

où u_r est la vitesse de rétrécissement et D_w la diffusivité massique supposée constante.

Cette vitesse est calculée en supposant que le produit conserve sa forme initiale (plaque ou cylindre) et que le phénomène de retrait est idéal : la variation de volume est égale au volume d'eau liquide évaporée (Desmorieux et Moyne, 1992).

La diffusivité massique D_w est déterminée expérimentalement. On considère pour cela la solution de

l'équation de la diffusion massique obtenue en négligeant la résistance au transfert de masse à l'interface produit / air de séchage. On obtient ainsi par exemple pour une plaque d'épaisseur $2e$ (Crank, 1975) :

$$W^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_w}{4e^2} t\right] \quad (1.2)$$

On montre que cette solution converge assez rapidement vers le premier terme de la série. On trace donc la courbe expérimentale $\ln[W^*(t)]$ en fonction de t dont on doit vérifier la linéarité et dont la pente permet d'estimer la diffusivité massique D_w (Toğrul et Pehlivan, 2003), (Karim et Hawlader, 2005).

Ce type de modélisation repose sur la connaissance de l'évolution du volume et de la forme du produit au cours du séchage. On néglige par ailleurs le plus souvent les effets de bord en assimilant le produit soit à une plaque infinie soit à un cylindre infini. Les produits faisant l'objet de cette étude présentent de très fortes teneurs en eau initiales (de l'ordre de $4\text{kg.kg}_{\text{ms}}^{-1}$ par exemple pour la banane) et subissent au cours de leur séchage une contraction et une déformation très importantes. L'évolution de leur forme serait par ailleurs très difficilement modélisable. L'utilisation d'un modèle diffusif prenant en compte les gradients internes dans le produit et calculant l'évolution de la teneur en eau moyenne par intégration d'équations locales sur le volume d'un morceau s'avère donc inapplicable dans ce cas. Ceci a conduit à chercher à caractériser la vitesse de séchage non pas en fonction d'un champ de teneur en eau mais en fonction de la teneur en eau moyenne d'un morceau et d'écrire :

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = f(\bar{W}, T_a, HR_a, u_a) \quad (1.3)$$

Où T_a , HR_a et u_a sont respectivement la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air de séchage.

Un certain nombre de modèles ont été proposés pour représenter l'évolution de la teneur en eau d'un produit à teneur en eau supposée uniforme soumis à des conditions d'air de séchage constantes, on peut citer parmi les plus couramment utilisés (Dandamrongrak et al, 2002), (Toğrul et Pehlivan, 2003) :

- Modèle exponentiel $W^*(t) = \exp(-k_1 t)$ (1.4)

- Modèle deux termes $W^*(t) = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t)$ (1.5)

- Modèle de Page $W^*(t) = \exp(-k_1 t^n)$ (1.6)

- Modèle de Henderson $W^*(t) = A_1 \exp(-k_1 t)$ (1.7)

- Modèle logarithmique $W^*(t) = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2$ (1.8)

Dans ces relations, W^* représente la teneur en eau réduite moyenne définie par :

$$W^* = \frac{\bar{W} - W_{\text{eq}}}{W_{\text{cr}} - W_{\text{eq}}} \quad (1.9)$$

où : W_{eq} : teneur en eau d'équilibre du produit avec de l'air à T , HR ,

W_{cr} : teneur en eau critique correspondant la fin de la phase isenthalpe de séchage.

Ces modèles sont en fait des modèles semi-empiriques. Les deux premiers utilisent la forme des deux premiers termes de la série infinie de la relation (1.2), les modèles suivants en sont des formes modifiées empiriquement.

L'inconvénient de ces modèles est que les coefficients A_i , k_i et n qui y figurent varient a priori avec les conditions de l'air de séchage. Pour les utiliser dans un programme dédié au calcul de la vitesse de séchage dans des conditions d'air très variables en particulier pour les morceaux de produits placés en sortie de séchoir, il faut connaître la valeur de ces paramètres sur une plage de conditions assez large. Le nombre de paramètres nécessaire pour décrire les valeurs de A_i , k_i et n peut alors devenir important.

Le choix d'un modèle a priori pour décrire l'intégralité d'une courbe de séchage peut également s'avérer un handicap dans le cas d'un produit présentant différentes phases de séchage au comportement très différent.

Ce sont les raisons pour lesquelles nous avons opté pour la méthode de la courbe caractéristique de séchage (CCS) qui caractérise les cinétiques de séchage par un modèle de comportement (Van Meel, 1958)

sans faire d'hypothèse préalable sur sa forme. Cette méthode a par ailleurs été utilisée par de nombreux auteurs pour différents produits (Desmorieux, 1992), (Belghit et al, 2000), (Timoumi et Zagrouba, 2005).

Le principe de cette méthode est de représenter sur un même graphe les courbes de séchage réduites représentant la vitesse réduite V^* en fonction de la teneur en eau réduite moyenne W^* . La vitesse de

séchage réduite V^* est définie par : $V^* = \frac{\left(\frac{dW^*}{dt}\right)_t}{\left(\frac{dW^*}{dt}\right)_0}$ où $\left(\frac{dW^*}{dt}\right)_0$ est la vitesse de séchage de la phase

initiale isenthalpe, qui reste constante pour $\bar{W} > W_{cr}$ avant de décroître.

Pour un certain nombre de produits, les courbes de séchage réduites obtenues sous différentes conditions d'air se superposent et peuvent être représentées par une courbe unique $V^* = f(W^*)$ que l'on appelle la CCS du produit.

Dans ce cas, la vitesse de séchage d'un produit de teneur en eau W soumis à un air de conditions T , HR et u se calcule de la façon suivante :

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = \left(\frac{d\bar{W}}{dt}\right)_0 f(W^*) \quad (1.10)$$

Pour rendre le modèle utilisable il faut donc identifier :

- la teneur en eau W_{eq} pour différentes conditions d'air ce qui revient à déterminer puis à modéliser les isothermes de sorption pour différentes températures,
- une forme mathématique de la fonction f après avoir vérifié que les courbes de séchage réduites correspondant à différentes conditions de séchage se superposent,
- une relation permettant d'estimer la vitesse $\left(\frac{dW^*}{dt}\right)_0$ en fonction des conditions de l'air T , HR et u pour une taille et une géométrie de produit données.
- une courbe des points caractéristiques W_{cr} en fonction des conditions de séchage (HR et T). Signalons que faute de données expérimentales, W_{cr} est souvent pris comme indépendant de T et HR .

1.3. Caractérisation de la sorption

1.3.1. Modèles théoriques

L'activité a_w de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau W et de sa température T . La courbe représentant pour une température T donnée la teneur en eau W d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HR est appelée l'isotherme de sorption.

De nombreux modèles ont été proposés pour représenter les isothermes de sorption par des fonctions mathématiques, on en trouvera un récapitulatif dans le tableau 1.1.

Certains paramètres de ces modèles ont une signification physique :

- Dans les modèles de BET et de GAB, W_{12} représente la teneur en eau du solide à la saturation de la monocouche,
- Dans le modèle de GAB, les paramètres C et K ont les expressions suivantes :

$$C = A \exp\left(\frac{H_w - H_m}{RT}\right) \quad (1.19) \quad \text{et} \quad K = B \exp\left(\frac{H_w - H_q}{RT}\right) \quad (1.20)$$

Où : H_w Chaleur de condensation de l'eau pure
 H_m Chaleur de sorption totale de la première couche
 H_q Chaleur de sorption totale des multicouches.

Parmi ces modèles, les plus couramment utilisés pour représenter les isothermes de sorption des produits alimentaires sont ceux de BET (Czepirski et al, 2002), de GAB (Akanbi et al, 2006) et d'Henderson et de Hasley (Pagano et Mascheroni, 2005).

Tableau 1.1 : Modèles pour les isothermes de sorption (Bizot et al, 1987).

Auteurs	Modèle	Domaine
Langmuir	$W = W_{12} \frac{C HR}{1 + C HR}$ (1.11)	HR < 35%
Brunauer Emmet Teller (BET)	$\frac{HR}{(1 - HR) W} = \frac{1}{C W_{12}} + \frac{C - 1}{C W_{12}} HR$ (1.12)	Courbe complète
Guggenheim Anderson Boer (GAB)	$W = \frac{W_{12} HR C K}{(1 - HR K)(1 + HR C K - HR K)}$ (1.13)	Courbe complète
Harkings	$HR = \exp\left(k - \frac{n}{W^2}\right)$ (1.14)	Courbe complète
Halsey	$HR = \exp\left[-\exp(A + BT) W^{-C}\right]$ (1.15)	Courbe complète
Henderson	$HR = 1 - \exp\left[-A (T + B) W^C\right]$ (1.16)	Courbe complète
Oswin	$HR = \left[1 + \left(\frac{A + BT}{W}\right)^C\right]^{-1}$ (1.17)	Courbe complète
Chung-Pfost	$HR = \exp\left[\left(\frac{A}{T + B}\right) \exp(-C W)\right]$ (1.18)	Courbe complète

1.3.2. Identification d'isothermes de sorption

Les isothermes de sorption des produits suivants ont été déterminées :

- en utilisant une étuve régulée en température et en humidité relative à l'ENSP (gingembre, manioc, piment, gombo, cacao),
- par la méthode des solutions salines saturées au TREFLE (banane, mangue, ananas).

Les solutions salines utilisées ainsi que leurs propriétés sont présentées dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Valeur de HR (%) en fonction de la nature du sel et de la température

LiBr	LiCl	KCH ₃ O	KF	MgCl ₂	KCO ₃
6,4	11,3	22,5	30,9	32,8	43,2
NaBr	CuCl ₂	CoCl ₂	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
57,6	68,5	64,9	75,3	84,3	97,3

Les résultats obtenus ont fait l'objet de plusieurs publications (Ahouannou et al, 2001), (Talla et al, 2005). Le modèle de GAB s'est avéré le mieux adapté et a permis une bonne représentation des points expérimentaux pour l'ensemble des mesures. Les coefficients W_m , C et K du modèle identifiés pour les différentes courbes sont présentés dans le tableau 1.4.

L'estimation de ces paramètres a été réalisée en appliquant la méthode de Newton décrite au §2.5 pour minimiser la somme : $\sum_i \left[\frac{W_{\text{exp}_i} - W_{\text{mod}_i}}{W_{\text{exp}_i}} \right]^2$. On trouvera à titre d'exemple sur la figure 1.3 les isothermes de sorption expérimentales et simulées par le modèle de GAB pour l'ananas et la banane à plusieurs températures.

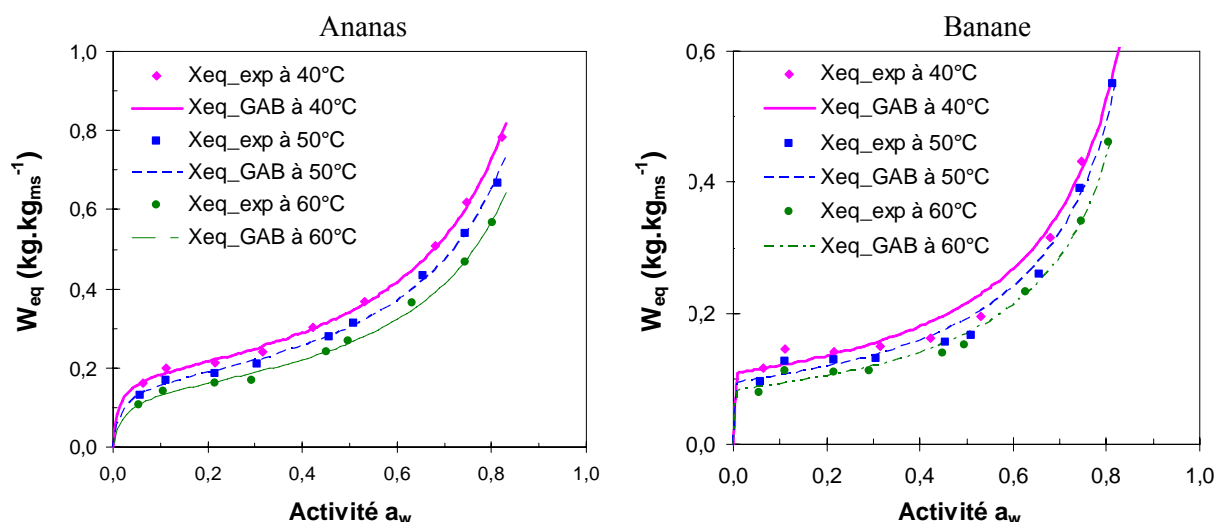


Figure 1.3 : Isothermes de désorption expérimentales et modèle de GAB pour l'ananas et la banane.

On remarque sur la figure 1.3 une très bonne concordance entre les points expérimentaux et la courbe modèle pour l'ananas, le résultat est un peu moins bon pour la banane. Ceci peut également être dû à la précision de la méthode de mesure de l'isotherme de désorption. La méthode des solutions salines saturées présente l'inconvénient d'une durée très longue pendant laquelle le produit peut subir des modifications internes (oxydation, fermentation) que nous avons limitées en travaillant sous un vide partiel.

Tableau 1.4 : Valeurs des paramètres du modèle de GAB pour la banane et l'ananas.

Produit	T (°C)	Paramètres du modèle de GAB		
		W_m (kg.kg _{ms} ⁻¹)	C	K
Banane $\bar{W}_0 = 3,77$ (kg.kg _{ms} ⁻¹)	25	0,127	9295,7	0,979
	40	0,108	6531,4	0,993
	50	0,095	3420,9	1,009
	60	0,083	1828,3	1,011
Ananas $\bar{W}_0 = 6,15$ (kg.kg _{ms} ⁻¹)	40	0,185	83,29	0,934
	50	0,164	57,28	0,937
	60	0,143	45,76	0,938

1.3.3. Caractérisation du retrait volumique

Au cours d'une opération de séchage, l'air et le produit échangent de la chaleur par convection. Pour quantifier ces échanges qui vont influencer sur la température de l'air et donc sur la vitesse de séchage, il faut

être capable d'estimer l'évolution de la surface de produit au cours du séchage. La mesure de la surface d'un objet de forme quelconque n'étant pas réalisable aisément, une étude expérimentale a été menée sur la banane pour déterminer l'évolution de la masse volumique de la banane en fonction de sa teneur en eau moyenne. Une hypothèse sur le retrait permettra ensuite d'estimer l'évolution de la surface.

L'étude expérimentale a consisté à mesurer simultanément la masse et le volume d'échantillons de banane placés dans une étuve thermostatée successivement aux valeurs suivantes : 40°C, 50°C puis 60°C. Les échantillons sont sortis de l'étuve à des instants différents, un morceau de l'échantillon est réservé à la détermination de la teneur en eau par étuvage, le reste est pesé puis passé au volumétre à mercure pour déterminer son volume. L'objectif était de tester la validité des hypothèses suivantes :

- la variation du volume correspondant au rétrécissement est égale au volume d'eau liquide évaporée,
- le produit est constitué d'une structure solide de masse volumique ρ_{ms} dont les pores sont occupés par de l'eau de masse volumique ρ_w .

Avec ces hypothèses, on peut calculer le volume V d'un produit de teneur en eau \bar{W} par :

$$V = V_0 [1 - \beta (\bar{W}_0 - \bar{W})] \quad (1.21)$$

Où : β_c Coefficient de contraction $\beta_c = \frac{\rho_{ms}}{1 + \frac{\rho_{ms}}{\rho_w} \bar{W}_0}$ (1.22)

V_0 Volume initial du produit (m³)
 \bar{W}_0 Teneur en eau initiale du produit

Il a été montré qu'en prenant $\rho_w = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\rho_{ms} = 1400 \text{ kg.m}^{-3}$ pour la banane, les valeurs calculées par la relation (1.21) présentent un écart inférieur à 3,5% par rapport aux valeurs obtenues dans les 3 séries de 15 mesures réalisées à des températures différentes (Talla et al, 2004).

Le calcul de l'évolution de la surface en a été déduit en retenant l'hypothèse que la contraction est isotrope ce qui permet d'écrire (Talla, 2003) :

$$s(\bar{W}) = S_0 [1 - \beta (\bar{W}_0 - \bar{W})]^{2/3} \quad (1.23)$$

1.4. Modélisation du séchage

1.4.1. Conditions expérimentales

La phase suivante du travail d'identification concerne les cinétiques de séchage pour lesquelles le modèle de la CCS a été retenu. Des travaux ont été réalisés au LAEN de Yaoundé sur le cacao par Abraham Kanmogne, sur le manioc, gombo, gingembre et piment par Clément Ahouannou, sur la banane et l'ananas par André Talla avec une métrologie ne permettant pas une acquisition de masse très fréquente. Les cinétiques de séchage de la banane ont été reprises au TREFLE lors des stages d'André Talla. L'utilisation d'une métrologie plus fine a permis une meilleure interprétation des résultats. Ce sont donc ces derniers travaux qui seront présentés dans ce paragraphe.

L'objectif de cette étude est double :

- vérifier que les courbes réduites de séchage obtenues pour différentes conditions d'air de séchage représentatives des conditions en divers points d'un séchoir présentent une faible dispersion,
- trouver une représentation mathématique satisfaisante de la CCS.

Sept essais ont été réalisés pour des conditions d'air dont on trouvera les caractéristiques dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Conditions d'air pour les différents essais

Essai	T (°C)	HR (%)	u (m.s ⁻¹)	\bar{W}_0 (kg.kg _{ms} ⁻¹)	\bar{W}_f (kg.kg _{ms} ⁻¹)	W_{eq} (kg.kg _{ms} ⁻¹)
1	60	16,3	2,0	3,29	0,103	0,09
2	50	26,3	2,0	3,79	0,141	0,12
3	40	44,0	2,0	3,28	0,162	0,15
4	50	26,3	0,5	3,65	0,131	0,12
5	50	26,3	1,0	3,50	0,125	0,12
6	50	16,0	1,0	3,64	0,160	0,14
7	50	38,0	1,0	2,96	0,152	0,14

Les essais ont été conduits dans la veine de séchage du TREFLE qui permet une régulation en température, humidité relative et vitesse de l'air. Les produits sont disposés sur une claie grillagée de dimensions 25 x 11 cm² dont la masse totale est mesurée par une balance de précision 1mg. Cette masse est enregistrée avec un pas de temps de 10 s pendant la 1^{ère} heure, de 2 mn pendant les 5 heures suivantes puis toutes les 10 mn jusqu'à la fin du séchage. Les bananes sont coupées en deux morceaux de forme cylindrique de 5 cm de hauteur et de diamètre moyen 3 cm puis chacun de ces morceaux est coupé longitudinalement pour obtenir quatre quarts de cylindres. La masse du produit étant faible (de l'ordre de 30 g) et la longueur de test relativement faible (20 cm), la température et l'humidité de l'air ont été considérées constantes le long du support.

La teneur en eau moyenne \bar{W}_f du produit en fin de séchage est mesurée par étuvage à 102 °C pendant 48 h. La connaissance de cette teneur en eau et de la masse m(t) du produit permet de calculer $\bar{W}(t)$.

La vitesse de séchage $-\frac{d\bar{W}}{dt}(t)$ est calculée par :

$$-\frac{d\bar{W}}{dt}(t_i) = \frac{1}{2} \left[\frac{\bar{W}(t_{i-1}) - \bar{W}(t_i)}{t_i - t_{i-1}} + \frac{\bar{W}(t_i) - \bar{W}(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i} \right] \quad (1.24)$$

Le faible pas de temps génère un bruit important sur les valeurs estimées que l'on a remplacées par une moyenne mobile centrée calculée sur 9 points. Ce nombre de points est le plus élevé possible ne produisant aucun biais sur la courbe des vitesses de séchage : une valeur plus élevée aurait conduit à une translation et à un écrasement de cette courbe.

Tableau 1.6 : Champ de teneur en eau initiale (kg.kg_{ms}⁻¹) dans une banane

	Extrémité (i=1)	Milieu (i=2)	à 2 cm de l'extrémité (i=3)
Périphérie (j=2)	3,16	3,92	3,78
Centre (j=3)	3,90	4,80	4,63
Moyenne dans une section droite (j=1)	3,27	3,90	3,92

Une étude préalable a été menée pour estimer l'hétérogénéité des teneurs en eau dans le produit frais. Il a ainsi été montré que la teneur en eau dans une banane varie aussi bien dans le sens longitudinal du milieu vers les extrémités que dans le sens radial du centre vers la périphérie ainsi que le montrent les résultats du tableau 1.4. On relève ainsi dans un même fruit des teneurs en eau variant de 3,16 à 4,80 kg.kg_{ms}⁻¹. Ces résultats valident le choix de l'échelle de modélisation : le morceau dont on considère la teneur en eau moyenne. Ils conduisent également à s'interroger sur la précision que peut présenter une simulation prenant en compte un modèle diffusif interne avec une condition initiale de teneur en eau uniforme et un modèle de contraction représentant imparfaitement la réalité.

1.4.2. Identification de CCS à température de séchage constante

Une première analyse des courbes de séchage $\bar{W}(t)$ obtenues expérimentalement laisse apparaître :

- la forte influence de la température de l'air de séchage,
- la faible influence de la teneur en eau de l'air,
- la faible influence de la vitesse de l'air sur la fin du séchage.

A titre d'exemple, les courbes de la figure 1.4 illustrent l'influence de la température et de la teneur en eau de l'air sur la courbe de séchage.

La figure 1.5 représente les courbes de la vitesse de séchage $V_s(t) = -\frac{d\bar{W}}{dt}(t)$ en fonction de la teneur en eau réduite moyenne W^* pour différentes températures d'air en coordonnées semi-logarithmiques. Les courbes de la figure 1.5.a) font apparaître clairement trois phases distinctes :

- une phase 1 pouvant correspondre à une phase isenthalpe ou de mise en température du produit,
- une phase 2 où la vitesse diminue lentement correspondant à l'évacuation de l'eau libre,
- une phase 3 où la vitesse diminue plus rapidement correspondant à l'évacuation de l'eau liée.

Les courbes de la figure 1.5.b) correspondant aux très faibles teneurs en eau permettent d'identifier une phase 4 de ralentissement marquée par la convexité de la courbe des vitesses. Cette phase débute toutefois pour des valeurs de W^* proches de 0,04 correspondant à des valeurs de \bar{W} que l'on n'atteint pas au cours du séchage de la banane.

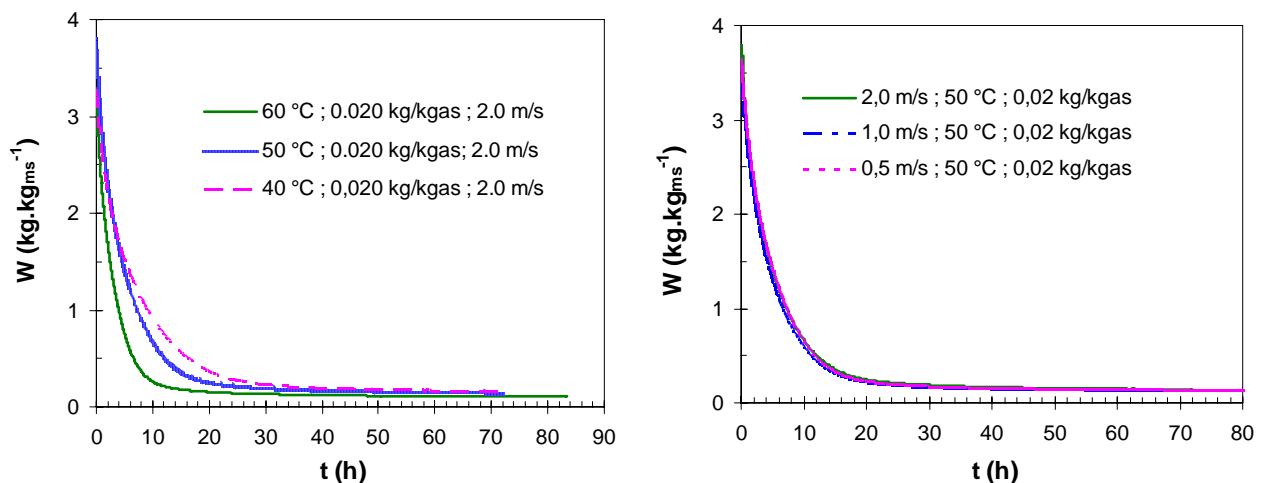


Figure 1.4 : Courbes expérimentales de séchage obtenues pour différentes températures et pour différentes vitesses d'air

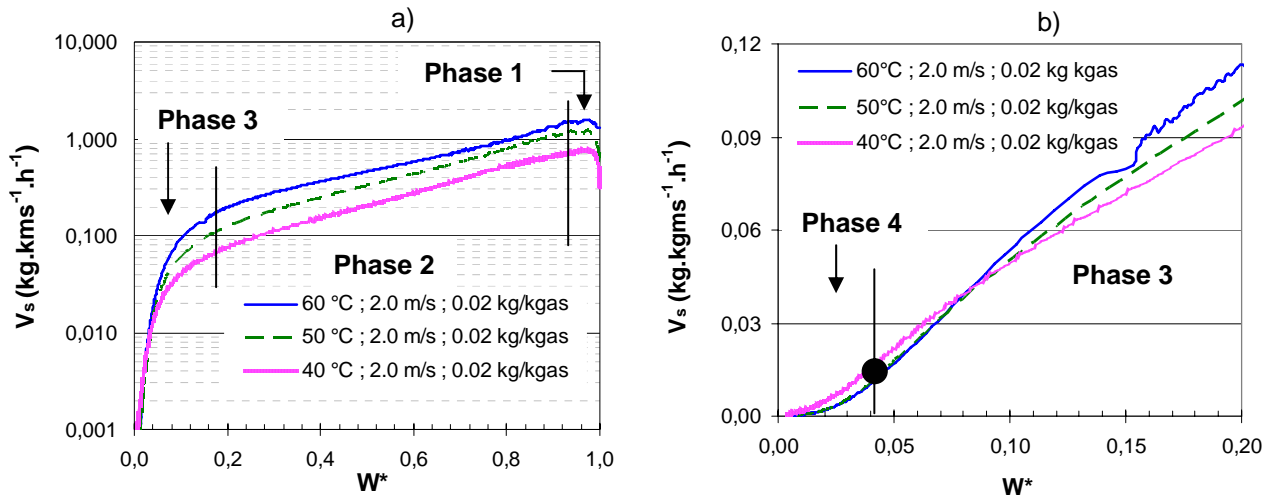


Figure 1.5 : Vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau réduite pour trois températures différentes

Pour déterminer la nature du phénomène conduisant à la phase 1, les températures T_c au centre du produit et T_s près de sa surface ont été mesurées avec des thermocouples de très petits diamètres. Ces températures ont été enregistrées lors d'un essai avec une température d'air de 50 °C et une température de bulbe humide de 25,3 °C. Les résultats sont présentés sur la figure 1.6. On peut observer une augmentation continue de la température au sein du produit sans phase à température constante confirmant l'absence d'une phase de séchage isenthalpe. On observe également un décalage entre la température au centre et près de la surface qui est dû aux phénomènes de diffusion internes. Cette phase 1 correspond donc à une phase de mise en température et la banane ne présente pas de phase de séchage à vitesse constante, il en résulte que :

- la teneur en eau critique W_{cr} est prise égale à la teneur en eau initiale W_0 ,
- la détermination de la vitesse notée précédemment $\left(-\frac{dW^*}{dt}\right)_0$ utilisée pour calculer la vitesse

réduite V^* n'est plus évidente. Elle ne peut pas être prise égale à la vitesse de séchage à $t = 0$ à cause du phénomène de mise en température qui abaisse sa valeur. Par conséquent, la vitesse de séchage en 1^{ère} phase $\left(-\frac{dW^*}{dt}\right)_0$ figurant dans la relation (1.10) a été remplacée par une vitesse de référence V_{ref} qui a été considérée comme un paramètre du modèle à déterminer.

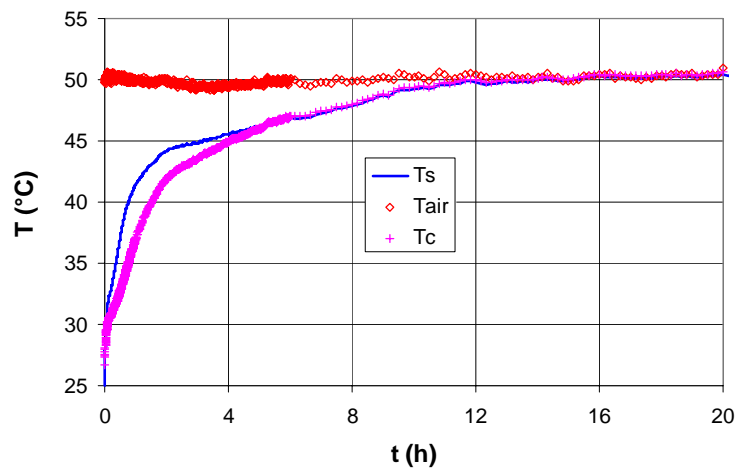


Figure 1.6 : Evolution des températures T_{air} de l'air, T_c au centre et T_s à la surface d'un morceau de banane au cours du séchage

Les observations précédentes ont conduit à la recherche d'une représentation mathématique de CCS de la forme suivante (sachant que l'on n'atteint pas la phase 4 au cours du séchage) :

$$\text{Si } W^* < W_{tp}^* : \quad f(W^*) = c W^* + d \quad (1.25)$$

$$\text{Si } W_{tp}^* < W^* : \quad f(W^*) = \frac{\exp(b W^*)}{\exp(b)} \quad (1.26)$$

La valeur de la teneur en eau réduite W_{tp}^* correspondant à la transition entre les phases 2 et 3 a été déterminée graphiquement et la valeur suivante a été retenue : $W_{tp}^* = 0,2$. La valeur de transition entre les phases 3 et 4 est proche de 0,04 et n'est jamais atteinte compte tenu de la teneur en eau finale recherchée $W_f = 0,02 \text{ kg.kg}_{ms}^{-1}$ (GRET, 1986).

L'intégration de la relation (1.11) en tenant compte des relations (1.19) et (1.20) conduit à :

$$\text{Pour } t < t_{cp} \quad \bar{W}(t) = \bar{W}_{eq} + (\bar{W}_0 - \bar{W}_{eq}) \left[\left(\bar{W}_{tp} + \frac{d}{c} \right) \exp\left(-\frac{c V_{ref}}{\bar{W}_0 - \bar{W}_{eq}} (t - t_{cp}) \right) - \frac{d}{c} \right] \quad (1.27)$$

$$\text{Pour } t > t_{cp} : \quad \bar{W}(t) = \bar{W}_{eq} + \frac{1}{b} (\bar{W}_0 - \bar{W}_{eq}) \ln \left[\exp(-b) + \frac{a b V_{ref}}{\bar{W}_0 - \bar{W}_{eq}} t \right] \quad (1.28)$$

Pour chacun des trois essais 1 à 3, les valeurs des paramètres V_{ref} , b , c , et d ont été identifiées en minimisant la somme S_{ec} des écarts quadratiques entre les courbes expérimentales et les courbes théoriques. Les couples (V_{ref}, b) ont été déterminés pour les valeurs de W^* supérieures à 0,2 et les couples (c, d) ont été déterminés pour les valeurs inférieures à 0,2. La somme S_{ec} a été calculée par la relation (1.23) dans laquelle les erreurs calculées sont des erreurs relatives pour permettre de déterminer des valeurs de paramètres qui représentent bien la fin du séchage :

$$S_{ec} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\bar{W}(t_i) - \bar{W}_{mod}(t_i)}{\bar{W}(t_i)} \right]^2 \quad (1.29)$$

Les valeurs ainsi obtenues sont reportées dans le tableau 1.7. Les valeurs estimées de V_{ref} ont permis de tracer les courbes de séchage des essais 1 à 3 en coordonnées réduites sur la figure 1.7. On note une très faible dispersion des courbes validant sur la banane l'approche de la courbe caractéristique de séchage.

Compte tenu de la faible dispersion des valeurs obtenues, les valeurs des paramètres b , c et a obtenues pour chaque essai ont été remplacées par des valeurs uniques et optimales b_{opt} , c_{opt} et d_{opt} présentées dans le tableau 1.7.

Tableau 1.7 : Valeurs estimées des paramètres de la CCS de la banane

T	$W^* \geq 0.20$				$W^* < 0.20$			
	b	V_{ref}	b_{op}	$V_{ref op}$	c	d	c_{op}	d_{op}
40	2,861	0,863	2,648	0,807	0,420	-0,002	0,6	0
50	2,798	1,344		1,281	0,431	-0,005		
60	2,541	1,631		1,716	0,478	-0,004		

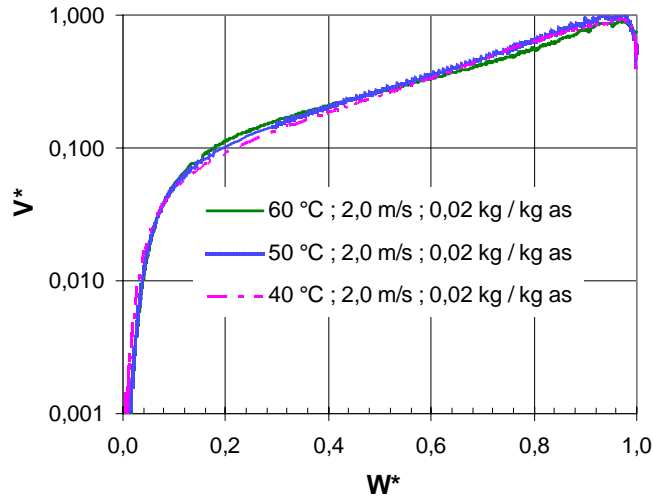


Figure 1.7 : Courbes de séchage en coordonnées réduites pour trois températures différentes

En utilisant ces valeurs optimales, la vitesse de séchage de référence V_{ref} a été ré-estimée pour l'ensemble des sept essais. Cette vitesse de référence dépend des conditions d'air, elle a été recherchée sous la forme simple suivante :

$$V_{ref} = A T^\alpha u^\beta w^\gamma \quad (1.30)$$

Les valeurs α , β et γ ont été estimées par minimisation de la somme des écarts quadratiques définie de la manière suivante :

$$S_{ec} = \sum_{i=1}^7 \left[\frac{V_{ref\ exp} - V_{ref\ mod}}{V_{ref\ exp}} \right]^2 \quad (1.31)$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1.8. L'erreur relative maximale entre les valeurs expérimentales et calculées est inférieur à 9 %.

La figure 1.8 représente les courbes expérimentales et les courbes simulées utilisant les valeurs a_{opt} , b_{opt} , c_{opt} et d_{opt} pour toutes les courbes avec une vitesse de référence V_{ref} calculée par la relation (1.30). Pour l'ensemble des essais, le modèle proposé décrit de manière très satisfaisante les courbes expérimentales avec une erreur maximale de $0,09 \text{ kg.kg}_{ms}^{-1}$.

Tableau 1.8 : Paramètres estimés du modèle de vitesse de référence et vitesses de référence expérimentales et simulées

Paramètres du modèle			$A = 0,0766$	$\alpha = 1,866$	$\beta = 0,0753$	$\gamma = -0,0091$
Essai	T (°C)	HR (%)	x (kg.kg _{gas} ⁻¹)	u (m.s ⁻¹)	$V_{ref\ exp}$ (kg.kg _{ms} ⁻¹ .h ⁻¹)	$V_{ref\ mod}$ (kg.kg _{ms} ⁻¹ .h ⁻¹)
1	60	16,3	0,02	2,0	1,72	1,749
2	50	26,3	0,02	2,0	1,28	1,24
3	40	44,0	0,02	2,0	0,807	0,816
4	50	26,3	0,02	0,5	1,12	1,12
5	50	26,3	0,02	1,0	1,15	1,17
6	50	16,0	0,01	1,0	1,18	1,18
7	50	38,0	0,03	1,0	0,92	1,01

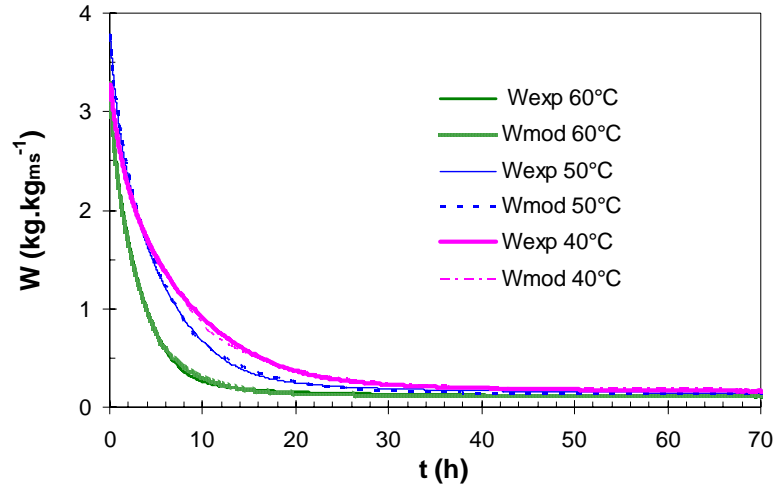


Figure 1.8 : Courbes expérimentales et modélisées pour trois températures d'air

1.4.3. Modélisation du séchage avec saut de température

Lors d'une opération de séchage, certains produits ne sont pas séchés avec des conditions d'air constantes :

- tous les produits exceptés ceux placés à l'entrée de l'air sont en contact avec de l'air dont les propriétés sont modifiées de manière continue par le séchage des produits situés en amont ;
- on peut choisir de modifier la température d'air en cours de séchage (faible au début pour éviter le croûtage, plus élevée pour accélérer le séchage à la fin).

Il faut donc maintenant, à partir de la connaissance acquise concernant le comportement d'un produit séché sous des conditions d'air constantes, pouvoir prédire le comportement d'un produit séchant sous des conditions variables. L'hypothèse la plus simple est de considérer que lors d'un saut de température d'air de T_1 à T_2 , le séchage d'un morceau de produit à la teneur en eau moyenne \bar{W} va se poursuivre comme si cette teneur en eau avait été atteinte par un séchage avec un air à température T_2 constante depuis le début du séchage. Cette hypothèse d'un produit « sans mémoire » ne peut pas être rigoureusement exacte car deux produits possédant la même teneur en eau moyenne après avoir été séchés à deux températures différentes ne présenteront pas le même profil de teneur en eau interne. Cependant cette hypothèse peut être acceptable pour des produits à haute teneur en eau, ce que nous avons vérifié expérimentalement.

Moyennant cette hypothèse, la vitesse de séchage de la banane avec un air de séchage subissant un saut de température de T_1 à T_2 à un instant t_s peut se calculer de la manière suivante :

Si $W^* < 0,2$:

$$t < t_s : \quad \frac{d\bar{W}}{dt} = V_{ref1} \frac{\exp(b W_1^*)}{\exp(b)} \quad \text{avec} \quad W_1^* = \frac{\bar{W} - W_{eq1}}{\bar{W}_0 - W_{eq1}} \quad \text{et} \quad V_{ref1} = A T_1^\alpha u_1^\beta x_1^\gamma \quad (1.32)$$

$$t > t_s \text{ et } W^* > 0,2 : \quad \frac{dW}{dt} = V_{ref2} \frac{\exp(b W_2^*)}{\exp(b)} \quad \text{avec} \quad W_2^* = \frac{\bar{W} - W_{eq2}}{\bar{W}_0 - W_{eq2}} \quad \text{et} \quad V_{ref2} = A T_2^\alpha u_2^\beta x_2^\gamma \quad (1.33)$$

Si $W^* < 0,2$:

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = V_{\text{ref}2} (c W_2^* + d) \quad \text{avec} \quad W_2^* = \frac{\bar{W} - W_{\text{eq}2}}{\bar{W}_0 - W_{\text{eq}2}} \quad \text{et} \quad V_{\text{ref}2} = A T_2^\alpha u_2^\beta x_2^\gamma \quad (1.34)$$

Si $W^* > 0,2$:

$t < t_s$ et $W^* > 0,2$: Vitesse de séchage calculée par la relation (1.25)

$t < t_s$ et $W^* < 0,2$:

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = V_{\text{ref}1} (c W_1^* + d) \quad \text{avec} \quad W_1^* = \frac{\bar{W} - W_{\text{eq}1}}{\bar{W}_0 - W_{\text{eq}1}} \quad \text{et} \quad V_{\text{ref}1} = A T_1^\alpha u_1^\beta x_1^\gamma \quad (1.35)$$

$t > t_c$: Vitesse de séchage calculée par la relation (1.27)

Dans ces formules V_{ref} est calculé à partir de la relation (1.30) et des valeurs du tableau 1.7, W_{eq} est calculé par la relation (1.13) et les valeurs du tableau 1.4. La teneur en eau d'un morceau de banane peut être aisément calculée à partir de ces relations en les intégrant avec une méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 par exemple. Le même schéma de calcul peut être appliqué successivement pour plusieurs échelons de température.

L'installation de séchage décrite précédemment a été utilisée pour réaliser une série de cinq essais avec une vitesse d'air constante $u = 1 \text{ m.s}^{-1}$ et avec une teneur en eau de l'air constante $w = 0,012 \text{ kg.kg}_{\text{ms}}^{-1}$. Deux essais ont été réalisés avec des températures constantes, respectivement 40 et 60 °C. Quatre essais ont été réalisés avec un saut de température de 40°C à 60°C après des temps de séchage de respectivement 3 h, 6 h, 12 h et 24 h. La figure 1.9 représente les vitesses expérimentales de séchage obtenues pour les différents essais. On constate dans tous les cas qu'après le saut de température de 40°C à 60 °C la vitesse de séchage redevient égale à la vitesse obtenue avec un séchage à température constante de 60 °C ce qui valide l'hypothèse retenue.

Le modèle décrit ci-dessus a ensuite été utilisé pour simuler l'évolution de la teneur en eau du produit pour les six conditions d'essai. Les courbes expérimentales et simulées avec saut de température sont représentées sur la figure 1.10. La concordance est très satisfaisante surtout si l'on considère la variabilité du produit dont le diamètre n'est pas rigoureusement constant et égal à 3 cm. Le modèle proposé semble donc bien adapté à la simulation du séchage de banane avec des conditions d'air variables et peut être utilisé pour simuler l'évolution de la teneur en eau de bananes dans un séchoir.

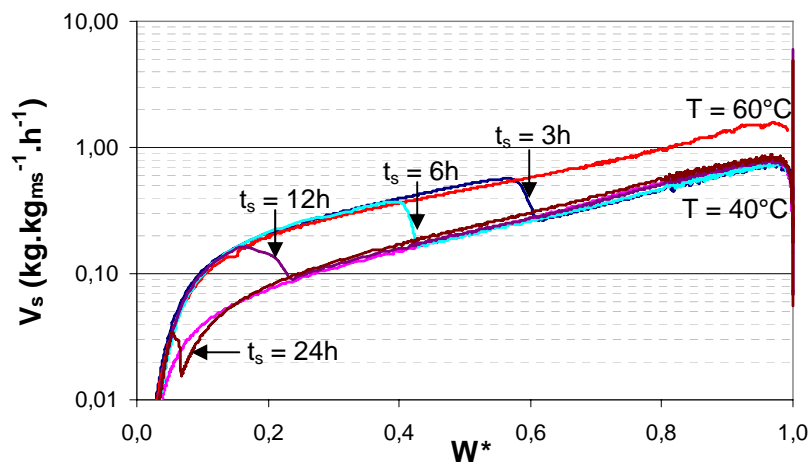


Figure 1.9 : Courbes expérimentales avec $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ pour $t < t_s$ et $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ pour $t > t_s$

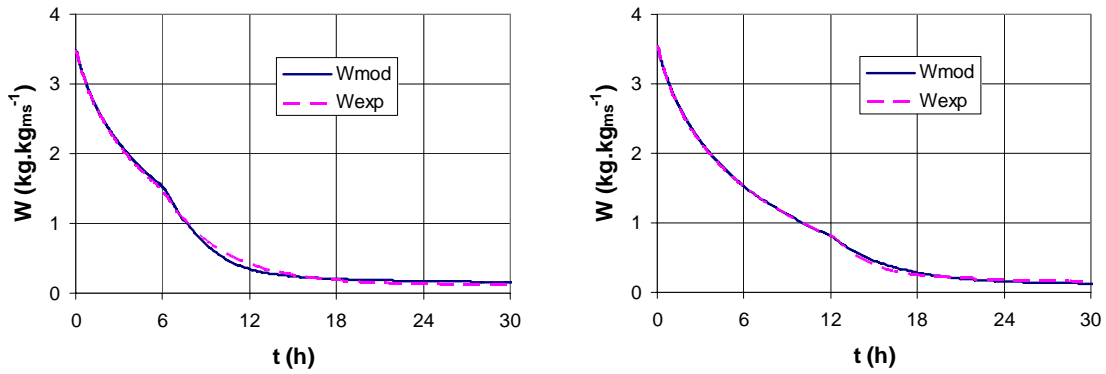


Figure 1.10 : Courbes expérimentales et modélisées pour un séchage avec saut de température de 40 °C à 60 °C après 6 h et 12 h.

1.4.4. Modélisation d'un séchoir

Compte tenu des hypothèses retenues et de la configuration de séchoir considérée, pour connaître l'évolution des conditions du produit et de l'air en chaque point du séchoir il faut être capable de calculer par des relations de récurrence (cf. figure 1.11) :

- la masse $m_j(t_i)$ du $j^{\text{ème}}$ morceau de produit à l'instant t_i ,
- la température $T_p(t_i)$ du $j^{\text{ème}}$ morceau de produit à l'instant t_i ,
- les conditions de l'air $T_{a_{j+1}}(t_i)$ et $w_{j+1}(t_i)$ à l'instant t_i après contact avec le $j^{\text{ème}}$ morceau, connaissant :
- la masse $m_j(t_{i-1})$ du $j^{\text{ème}}$ morceau de produit à l'instant t_{i-1} ,
- la température $T_p(t_{i-1})$ du $j^{\text{ème}}$ morceau de produit à l'instant t_{i-1} ,
- les conditions de l'air $T_{a_j}(t_i)$ et $w_j(t_i)$ à l'instant t_i avant contact avec le $j^{\text{ème}}$ morceau,

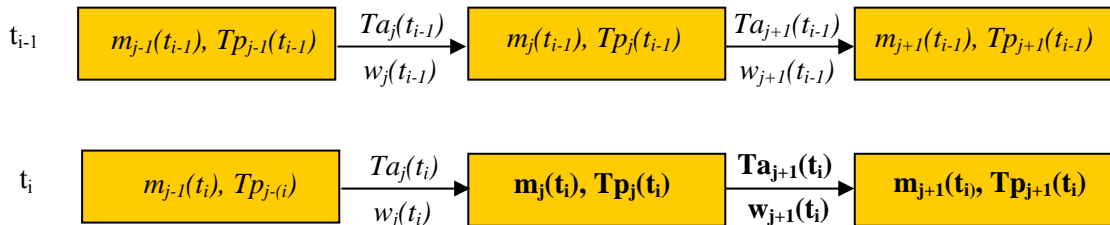


Figure 1.11 : Schéma de principe du calcul itératif : paramètres connus en italique et paramètres à déterminer en gras

Ce calcul s'effectue en plusieurs étapes. Un bilan massique sur le $j^{\text{ème}}$ morceau de produit entre les instants t_{i-1} et t_i permet d'écrire de calculer $m_j(t_i)$ par :

$$m_j(t_i) = m_j(t_{i-1}) - dm_j(t_i) \quad (1.36)$$

$$\text{avec } dm_j(t_i) = m_{js} \left[-\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} \right] (t_i - t_{i-1}) \quad (1.37)$$

où m_{js} est la masse sèche du $j^{\text{ème}}$ morceau invariante avec le temps

$$\text{et } -\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} = V_{\text{ref}} [u, T_{a_j}(t_i), HR_j(t_i)] f\{W(t_{i-1}), W_{\text{eq}}[T_{a_j}(t_i), HR_j(t_i)]\} \quad (1.38)$$

où u est la vitesse de l'air (constante) au niveau du produit, la fonction f par les relations (1.25) ou (1.26), et V_{ref} par la relation (1.30).

Le calcul de W_{eq} nécessite de connaître cette teneur en eau d'équilibre pour des valeurs continues de T alors que les isothermes de désorption n'ont été établies que pour les valeurs 25 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C et 60 °C. En fait, le tracé des valeurs des coefficients W_m , C et K en fonction de T montre une évolution quasi-linéaire de ces coefficients ($r^2 > 0,95$) qui a permis de retenir les expressions suivantes pour la banane :

$$W_m = 0,1585 - 0,00126T \quad (1.39)$$

$$C = 14931 - 220,85T \quad (1.40)$$

$$K = 0,955 - 0,000979T \quad (1.41)$$

Où T est la température du produit en °C.

Un bilan massique sur l'air permet de calculer $w_{j+1}(t_i)$ par :

$$\dot{m}_{as} [w_{j+1}(t_i) - w_j(t_i)] = m_{js} \left[-\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} \right] \quad (1.42)$$

Un bilan thermique sur le $j^{\text{ème}}$ morceau de produit permet de calculer $T_{p_j}(t_i)$:

$$h S_j(t_i) [T_{a_j}(t_i) - T_{p_j}(t_i)] = m_j(t_i) c_p [T_{p_j}(t_i) - T_{p_j}(t_{i-1})] + m_{js} \left[-\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} \right] H_w \quad (1.43)$$

Un bilan thermique sur l'air avant et après échange de chaleur et de masse avec le $j^{\text{ème}}$ morceau permet enfin de calculer $T_{a_{j+1}}(t_i)$:

$$h S_j(t_i) [T_{a_j}(t_i) - T_{p_j}(t_i)] = \dot{m}_{as}(t_i) c_a [T_{a_{j+1}}(t_i) - T_{a_j}(t_i)] \quad (1.44)$$

Dans ces équations, la chaleur massique de la banane a été calculée à l'aide de la relation suivante (Moras et Chapon, 1983) dans laquelle la capacité calorifique du produit c_p est exprimée en $J.kg^{-1}.°C^{-1}$:

$$c_p = 3600 \frac{\bar{W} + 0,2}{\bar{W} + 1} \quad (1.45)$$

$S_j(t_i)$ est la surface en contact avec l'air du $j^{\text{ème}}$ morceau calculée par la relation (1.23) qui peut également s'écrire sous la forme : $S_j(t_i) = S_0 \left[\frac{1 + 1,4 \bar{W}(t_i)}{1 + 1,4 \bar{W}_0} \right]^{2/3}$.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection h a été calculé par la relation suivante valable pour un écoulement perpendiculaire à un cylindre (Holman, 1990) :

$$Nu = B Re^n Pr^{1/3} \quad (1.46)$$

Dans cette relation, le diamètre caractéristique a été pris égal à la moitié du diamètre de la banane pour tenir compte de la forme de $1/4$ de cylindre des morceaux. Les valeurs des coefficients B et n dépendent de la valeur du nombre de Reynolds (Holman, 1990).

Ces différentes relations de récurrence ont été intégrées dans un programme qui permet de calculer l'évolution des conditions du produit et de l'air en fonction du temps et de la distance parcourue par l'air dans le séchoir. Ce programme permet également de simuler :

- un saut de température : $T(x=0) = T_{a01}$ si $t < t_{sT}$ et $T(x=0) = T_{a02}$ si $t > t_{sT}$,
- un changement du taux de renouvellement t_r de l'air de séchage : $t_r = t_{r1}$ si $t < t_{sr}$ et $t_r = t_{r2}$ si $t > t_{sr}$.

La consommation énergétique spécifique définie comme la consommation d'énergie par kg de produit frais est également calculée par le programme.

On trouvera sur les figures 1.12 et 1.13 un exemple des résultats de la simulation obtenue pour les

conditions suivantes :

- teneur en eau initiale du produit : $\bar{W} = 4 \text{ kg.kg}_{\text{ms}}^{-1}$,
- conditions d'air en entrée de séchoir : $T_{a0} = 40 \text{ °C}$ pendant 8 h puis $T_{a0} = 60 \text{ °C}$,
- conditions d'air extérieur : $T_{\text{atm}} = 25 \text{ °C}$ et $w_{\text{atm}} = 0,15 \text{ kg.kg}_{\text{as}}^{-1}$,
- taux de renouvellement égal à 20% pendant 12 h puis égal à 5 % ensuite,
- claie : densité de chargement de 5 kg.m^{-2} , longueur 1 m,
- vitesse d'air de 2 m.s^{-1} .

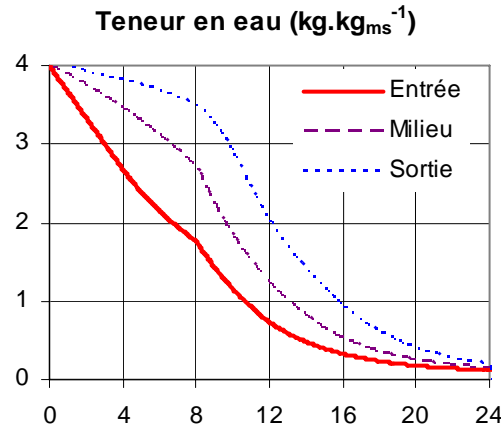


Figure 1.12 : Evolution simulée de la teneur en eau de la banane dans un séchoir

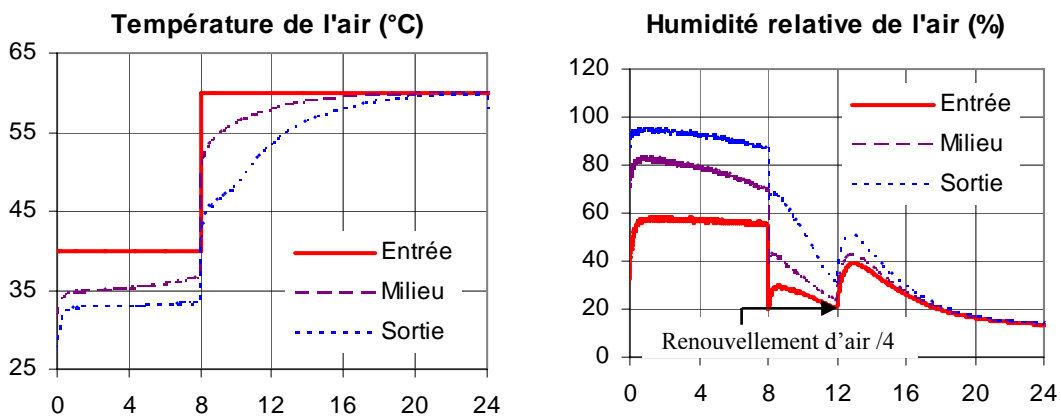


Figure 1.13 : Evolution simulée de la température et de l'humidité relative de l'air dans un séchoir

Dans le cas de figure traité on trouve une consommation énergétique de $1,26.10^7 \text{ J.kg}_{\text{produit}}^{-1}$ correspondant à $3,31.10^6 \text{ J}$ par kg d'eau évaporée. Il faut toutefois noter que l'énergie consommée par le ventilateur pour assurer la vitesse choisie au niveau des produits n'est pas intégrée dans ce calcul. Le séchage dans les mêmes conditions de température mais en adoptant un taux de renouvellement d'air constant et égal à 100 % conduit à une durée de séchage de 21,7 h et à une consommation énergétique de $3,08.10^7 \text{ J.kg}_{\text{produit}}^{-1}$ nettement plus élevée que celle obtenue avec recirculation partielle de l'air.

La durée du séchage calculée est de 23,7 h avec un coefficient de convection $h = 30 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. Elle est égale à 24,5 h avec $h = 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ et 26,5 h avec $h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. La consommation énergétique passe quant à elle de 1,34 à $1,25 \text{ J.kg}_{\text{produit}}^{-1}$ quand h varie de 10 à $30 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$, ce qui montre l'influence faible de ce paramètre qui apparaît toujours sous forme d'un produit $h S$, où S est la surface d'échange air/produit. Le fait que ces deux paramètres ne puissent pas être évalués de manière très précise n'est donc pas préjudiciable à la précision de la simulation.

Cet outil peut donc apporter des réponses aux questions évoquées en introduction. Il peut en particulier permettre de dimensionner un séchoir devant répondre à un cahier des charges donné : séchage de M kg de bananes en un temps t_f en intégrant des contraintes de température imposées par le produit. Il peut également être utilisé pour optimiser les conditions de fonctionnement d'un séchoir existant.

1.5. Etude expérimentale

Un séchoir électrique prototype a été construit au LAEN de Yaoundé dans le cadre de la thèse d'André Talla. On en trouvera un schéma descriptif sur la figure 1.12 extraite de (Talla, 2003). Il comporte deux compartiments placés en série contenant chacun 12 claies de surface $0,645 \text{ m}^2$. Une étude expérimentale a été menée avec pour objectifs :

- de valider la simulation présentée ci-dessus,
- d'étudier expérimentalement les possibilités d'économie d'énergie par une conduite de séchoir appropriée.

Les grandeurs mesurées ont été :

- la masse d'une claie par compartiment (claie 1 et claie 2 sur la figure 1.14),
- les températures et humidité relative de l'air en entrée, en sortie de 1^{er} compartiment, en sortie de 2^{ème} compartiment.

Ces mesures ont été réalisées trois à cinq fois par jour pendant la durée du séchage.

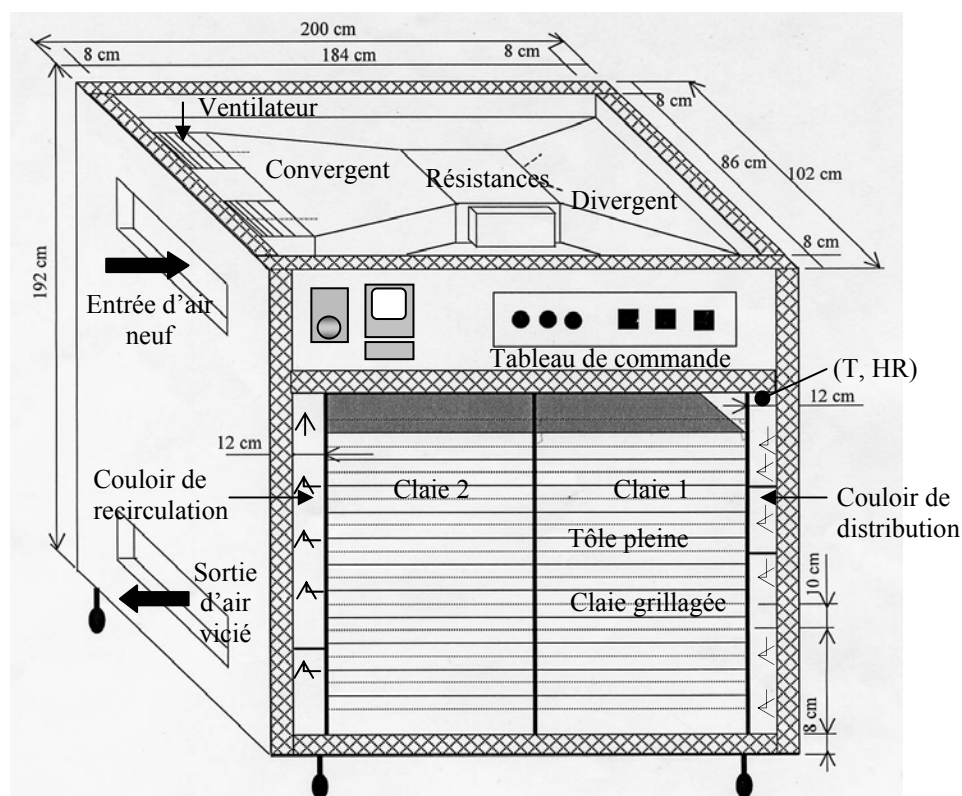


Figure 1.14 : Schéma du séchoir construit au LAEN, extrait de (Talla, 2003)

1.5.1. Validation du modèle

Deux essais ont été réalisés par André Talla dans le séchoir prototype dans les conditions suivantes :

- température d'entrée d'air constante et égale à 50 °C puis 60 °C,
- vitesse d'air de 2 m.s⁻¹ au niveau des produits,
- densité de chargement du produit de 5 kg.m⁻².

On trouvera sur la figure 1.15 pour l'essai réalisé à 50 °C les courbes expérimentales et théoriques de la teneur en eau d'une claie de chacun des compartiments placés en série. On constate une assez bonne concordance, les écarts pouvant être attribués à l'hétérogénéité des produits en terme de dimensions et de teneur en eau.

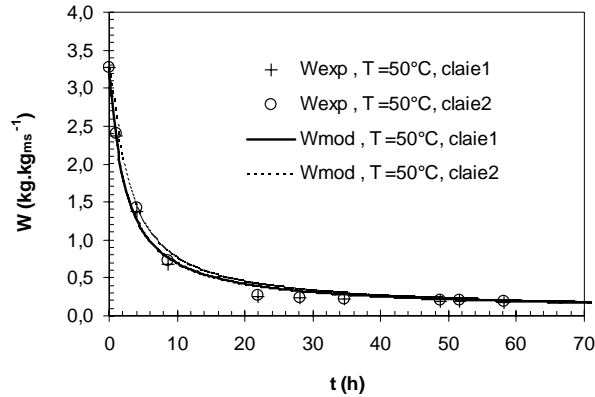


Figure 1.15 : Courbes expérimentales et simulées de la teneur en eau dans le séchoir prototype

Il est nécessaire de réaliser d'autres essais pour valider le modèle. Il faut toutefois noter la difficulté liée à la réalisation d'un essai qui nécessite l'achat, la préparation (épluchage et découpe) de 12 claies x 2 compartiments x 0,645 m² x 5 kg.m⁻² = 77 kg de bananes. Ceci représente un coût d'achat et de préparation important par rapport aux moyens locaux et un temps de préparation de plusieurs heures.

1.5.2. Etude du coût énergétique

Deux essais supplémentaires ont été réalisés pour mettre en évidence les gains énergétiques réalisables par une gestion adaptée de la température et du taux de renouvellement d'air. Les conditions expérimentales correspondant à chaque essai ainsi que la durée de séchage et la consommation énergétique de l'opération de séchage sont reportées dans le tableau 1.9.

Tableau 1.9 : Conditions expérimentales et résultats des essais pour l'étude du coût énergétique du séchage

n° essai	T (°C)	Taux de renouvellement	\bar{W}_f kg.kg _{ms} ⁻¹	Durée séchage (h)	Energie (kWh)
1	50 °C	100%	19,9	60	106
2	50 °C	100 % pendant 10,5h puis 50 %	19,7	60	64
3	60 °C	100 %	19,0	35	83
4	4 0°C pendant 21,5 h puis 50 °C	100 % pendant 21,5h puis 50 %	19,6	65	30

Ces résultats confirment les résultats de la simulation présentés ci-dessus et mettent en évidence les gains réalisables par une gestion optimale de la température et du taux de renouvellement de l'air de séchage. A durée de séchage équivalente, la consommation énergétique peut être divisée par un facteur de deux à trois. Cette étude présente un caractère purement indicatif compte tenu du faible nombre de cas de figure étudiés qu'il serait nécessaire de compléter par d'autres expérimentations.

1.6. Conclusion

En ayant choisi comme support privilégié les travaux réalisés sur la banane parce que les plus récents et ayant bénéficié des meilleures conditions d'essais, il a été proposé une méthodologie permettant d'atteindre l'objectif de simuler l'évolution dans un séchoir d'un produit à très forte teneur en eau. Cette méthodologie dont l'application a conduit à des résultats satisfaisants dans le cas de la banane peut être décomposée en plusieurs étapes successives :

1. Détermination expérimentale des isothermes de désorption pour plusieurs valeurs de températures correspondant à celles rencontrées dans un séchoir (typiquement entre 30 et 60 °C), cette détermination peut être réalisée par la méthode des solutions salines saturées.
2. Représentation mathématique de ces isothermes, le modèle de GAB ayant semblé bien adapté dans plusieurs cas,
3. Caractérisation du retrait par une étude expérimentale, à défaut choisir le modèle de retrait idéal qui s'est avéré vérifié pour la banane,
4. Réalisation de cinétiques de séchage pour plusieurs valeurs de températures correspondant à celles rencontrées dans un séchoir (typiquement entre 30 et 60 °C), puis pour une température donnée pour plusieurs vitesses d'air et plusieurs humidités relatives,
5. Recherche de deux fonctions V_{ref} et f permettant de représenter au mieux pour l'ensemble des essais la vitesse de séchage sous la forme :
$$\left(-\frac{dW^*}{dt}\right) = V_{ref}(T, HR, u) f(W^*).$$

Les données déterminées dans ces différentes études peuvent ensuite être intégrées dans un programme de simulation utilisant les relations présentées dans le §1.5.4 auxquelles il faut ajouter les relations permettant de prendre en compte le renouvellement d'une partie de l'air de séchage. On trouvera en annexe 7 un article présentant les résultats obtenus par application de cette méthode au séchage de la banane.

Ces travaux réalisés en collaboration avec le Laboratoire d'Energétique (LAEN) de l'ENSP de Yaoundé ont permis à celui-ci d'acquérir des équipements expérimentaux pour appliquer cette méthodologie. Ce sont :

- une veine de séchage à vitesse d'air variable et régulée en température et en humidité,
- un séchoir électrique d'une capacité d'environ 80 kg de produit frais,
- un séchoir mixte solaire bois construit par Abraham Kanmogne dans le cadre de sa thèse sur le séchage du cacao.

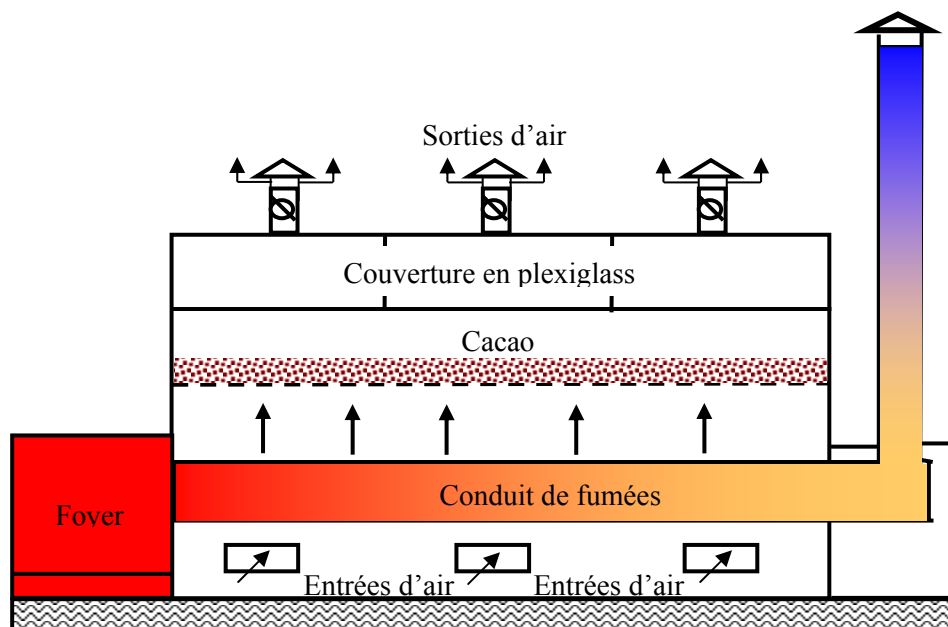


Figure 1.16 : Représentation schématique du séchoir mixte solaire/bois construit au LAEN

Pour cette dernière étude, une approche similaire à celle décrite a été suivie et les résultats ont été incorporés dans une modélisation des transferts de chaleur et de masse dans le séchoir dont on trouvera une représentation schématique sur la figure 1.16.

Ce séchoir est destiné au séchage du cacao dont la saison de récolte se situe en partie en saison pluvieuse ce qui explique le choix d'un séchoir bi-énergie. Le bois a été choisi en raison de sa disponibilité en zone de production (tropicale humide). On notera que la validation expérimentale d'une modélisation de ce séchoir est relativement difficile à atteindre compte tenu des nombreux paramètres à mesurer au cours du séchage parmi lesquels : masse de combustible utilisé, rendement de combustion, pouvoir calorifique du combustible, éclairage solaire, vitesse du vent, débit d'air dans le séchoir (très variable et fortement influencé par la vitesse du vent), débit des fumées, masse de produit.

En conclusion, on retiendra que ces travaux ont permis au LAEN d'acquérir les équipements et la compétence lui permettant de réaliser les études nécessaires pour le dimensionnement d'un séchoir, l'optimisation de ses conditions d'exploitation et le calcul de la consommation d'énergie spécifique pour un produit donné. Ces résultats qui ont été atteints pour la banane peuvent permettre de favoriser le développement d'une activité de séchage dépassant le stade actuel, individuel et très artisanal. La conception et la réalisation de séchoirs électriques domestiques (équipement équivalent à un réfrigérateur) est actuellement envisagée par le LAEN.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. Ahouannou C., Jannot Y., Lips B., Lallemand A., Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux : manioc, gingembre et gombo, Ahouannou C., Science des aliments, vol.20, pp. 413-432, 2000.
2. Andersson P., Thermal conductivity of some rubbers under pressure by the transient hot-wire method, J. Appl. Phys., 47(6), pp. 2424-2426, 1976.
3. Backstrom G., Determination of thermophysical properties using a shielded thermocouple, J. Phys. E., pp. 1049-1053, 1982.
4. Bardon J.-P., Mesure de température et de flux de chaleur par des méthodes par contact, Ecole d'hiver METTI'99, vol.1, pp.101-136, Odeillo, 1999.
5. Beck J.V., Arnold K.J., Parameter estimation in engineering and science, John Wiley and Sons Ed., New York, 1977.
6. Belghit A., Kouhila M., Boutaleb B.C., Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants, Energy Conversion & Management, vol.41, pp.1303-1321, 2000.
7. Bizot H., Riou N., Multon J.L., Guide pratique pour la détermination des isothermes de sorption et de l'activité de l'eau, Sciences des Aliments, n° hors série, 1987.
8. Bohac V., Gustavsson M.K., Kubicar L., Guqtafsson S.E., Parameter estimations for measurements of thermal transport properties with the hot disk thermal constants analyzer, Review of Scientific Instruments, Vol.71, n°6, pp.2452-2455, 2000.
9. Boudenne A., Ibos L., Gehin E., Candau Y., A simultaneous characterization of thermal conductivity and diffusivity of polymer materials by a periodic method, J. Phys. D: Appl. Phys., vol.37, pp. 132-139, 2004.
10. Bourouga B., Goizet V., Bardon J.-P., Les aspects théoriques régissant l'instrumentation d'un capteur thermique parietal à faible inertie (The theoretical aspects of the instrumentation of a weak inertia parietal thermal sensor), International Journal of Thermal Sciences, vol.39, pp.96-109, 2000.
11. Carslaw H.S., Jaeger J.C., « Conduction of heat in solids », Second Edition, Oxford University Press, 1959.
12. Crank J., The mathematics of diffusion, Clarendon Press, UK, 1975.
13. Cull J.P., Thermal conductivity probes for rapid measurements in rock, J. Phys. E: Sci. Instrum., 7, 771-774, 1974.
14. Czepirski L., Komorowska-Czepirska E., Szymonska J., Fitting of different models for water vapour sorption on potato starch granules Applied Surface Science, Vol.196, pp.150-153, 2002.
15. Dandamrongrak R., Young G., Mason R., Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models, Journal of Food Engineering, vol.55, pp.139-146, 2002.
16. Degiovanni A. « Diffusivité et méthode flash », Revue Générale de Thermique, n°185, pp. 420-441, 1977.
17. Degiovanni A., Laurent A., « Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode flash », Revue de Physique Appliquée, n° 21, pp. 229-237, 1986.
18. Degiovanni A., Batsale J.-C., Maillet D., Mesure de la diffusivité longitudinale de matériaux anisotropes, Revue Générale de Thermique, vol.35, pp.141-147, 1996.

19. Desmorieux H., Moyne C., Analysis of dryer performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept, *Drying* 92, Elsevier, Amsterdam, pp.834-843, 1992.
20. Desmorieux H., Le séchage en zone subsaharienne : une analyse technique face aux réalités géographiques et humaines, Thèse INPL, Nancy, 1992.
21. Dilhaire S., Grauby S., Claeys W., Btasale J.-C., Thermal parameters identification of micrometric layers of microelectronic devices by thermorefectance microscopy, *Microelectronics Journal*, vol.35, pp.811-816, 2004.
22. Dos Santos W.N., Mummery P., Wallwork A., Thermal diffusivity of polymers by the laser flash technique, *Polymer testing*, vol.24, pp.628-635, 2005.
23. Edwards A.L., A Compilation of Thermal Property Data for Computer Heat-Conduction Calculations, UCRL-50589, University of California Lawrence Radiation Laboratory, 1969.
24. Fanger P.O., Thermal comfort, Mac Graw Hill, New York, 1973.
25. Fanger P.O., Les exigences du confort thermique, Rencontre SFT, Lyon, 1983.
26. Finsterle S., Persoff P., Determining permeability of tight rock samples using inverse modeling, *Water Resources Research*, vol.33, N)8, pp.1803-1811, 1997.
27. Gobbé C., Iserna S., Ladevie B., « Hot strip method : application to thermal characterisation of orthotropic media », *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 23, n°10, pp. 951-958, 2004.
28. Gret, Geres, Le séchage solaire des produits alimentaires, Dossier n°8, ISBN 2868440142, Paris, 1986.
29. Gustafsson S.E., Karawacki E., Chohan M.A., Thermal transport studies of electrically conducting materials using the transient hot-strip technique, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol.19, pp. 727-735, 1986.
30. Gustafsson S.E., Transient hot strip techniques for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity, *The Rigaku Journal*, vol. 4, n°1-2, pp. 16-28, 1987.
31. Gustafsson S.E., Karawacki E., Khan M.N., Transient hot strip techniques for simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and fluids, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.12, pp. 1411-1421, 1979.
32. Gustafsson S.E., Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials, *Rev. Sci. Instrum.*, vol.62, n°3, pp.797-804, 1991.
33. Hammerschmidt U., A new pulse hot strip sensor for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids, *International Journal of Thermophysics*, vol.24, n°3, pp.675-682, 2003.
34. Hay B., Filtz J.R., Batsale J.C., « Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash », *Technique de l'ingénieur*, R2 995, 2002.
35. He Y., Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor. Part 1. Theoretical considerations. *Thermochimica Acta*, 436, pp. 122-129, 2005.
36. Hladik J., « Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux », Masson, 1990.
37. Hu Z., Sun D.-W., CFD evaluating the influence of airflow on the thermocouple-measured temperature data during air-blasting chilling, *International Journal of Refrigeration*, vol.25, p.546-551, 2002.
38. Jannot Y., Production d'eau, d'air frais et conservation des produits par des procédés solaires rustiques, Thèse de doctorat INPL, Nancy, 1991.
39. Jannot Y., Meukam P., Simplified estimation method for the determination of thermal effusivity and thermal conductivity with a low cost hot strip, *Measurement Science and Technology*, vol. 15, pp. 1932-1938, 2004.

40. Jannot Y., Batsale J.-C., Chauvi B., Study of a transient non-intrusive sensor for internal temperature estimation during freezing, *International Journal of Refrigeration*, vol.27, pp. 612-620, 2004.
41. Jannot Y., Acem Z., Kanmogne A., «Transient hot plate method with two temperature measurements for thermal characterization of metals», *Measurement Science and Technology*, vol.17, pp.69-74, 2006.
42. Jannot Y., Estimation des paramètres : Méthodes de base, site web : <http://www.thermique55.com/principal/estimation.pdf>, 2005.
43. Jones S.C., A technique for faster pulse-decay permeability measurements in tight rocks, *SPE Formation Evaluation*, Mars 1997.
44. Kanmogne A., Contribution à l'étude du séchage du cacao au Cameroun. Conception, réalisation et modélisation d'un séchoir adapté aux conditions locales, Thèse de doctorat, Université de Yaoundé 1, 2003.
45. Karim M.A., Hawlader M.N.A., Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.48, pp.4914-4925, 2005.
46. Krapez J.-C., Spagnolo L., Frieb M., Maier H.-P., Neuer G., Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography, *International Journal of Thermosciences*, vol.43, pp.967-977, 2004.
47. Kubicar L., Bohac V., Vretenar V., Transient methods for the measurement of thermophysical properties: The pulse transient method, *High Temperatures – High pressures*, vol.34, pp.505-514, 2002.
48. Kubicar L., Bohac V., A step-wise method for measuring thermophysical parameters of materials, *Measurement Science and Technology*, vol. 11, pp. 252-258, 2000.
49. Kurpisz K., Nowak A.J., *Inverse thermal problems*, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK and Boston, USA, 1995.
50. Ladevie B., Mise au point de dispositifs de caractérisation thermophysique de matériaux isolants solides ou pâteux , extension aux fluides cisailés, Thèse doctorat ENSAM, Bordeaux, 1998.
51. Ladevie B., Fudym O., Batsale J.C., A new simple device to estimate thermophysical properties of insulating materials, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, vol.17, n°4, pp.473-484, 2000.
52. Le Goff P., *Le Génie des procédés rustiques*. In: Storck A., Grevillot G., éd. *Nouvelles applications de la méthodologie des procédés*. Paris : Lavoisier, coll. Tech. et Doc., pp.302-306, 1987.
53. Liang X.-G., Zhang Y., Ge X., The measurement of thermal conductivities of solid fruits and vegetables, *Meas. Sci. Technol.*, 10, N82-N86, 1999
54. Log T., Metallinou M.M., Thermal conductivity measurement using a short transient hot-strip method, *Rev. Sci. Instrum.*, vol.63, n°8, pp.3966-3971, 1992.
55. Log T., Gustafsson, S.E., Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials, *Fire and Materials*, vol.19, pp.43-49, 1995.
56. Lourenco M.J., Rosa S.C.S., Nieto de Castro C.A., Albuquerque C., Erdmann B, Lang J., Roitzsch R., Simulation of the transient heating in an unsymmetrical coated hot-strip sensor with a self adaptative finite element method, *International Journal of Thermophysics*, vol.21, n°2, pp. 377-384, 2000.
57. Lua A.C., Su J., Isothermal and non-isothermal pyrolysis kinetics of Kapton® polyimide, *Polymer Degradation and Stability*, vol.91, pp.144-153, 2006.
58. Maillet D., Apport des méthodes analytiques à l'identification de paramètres et à la conduction inverse en thermique, Thèse d'état de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 1991.

59. Maillet D., André A., Batsale J.-C., Degiovanni A., Moyne C., « Thermal quadrupoles », John Wiley & Sons Ltd, 2000.
60. Malinaric S., Parameter estimation in dynamic plane source method, *Measurement Science and Technology*, vol.15, pp. 807-813, 2004.
61. Maroulis Z.B., Krokida M.K., Rahman M.S., A structural generic model to predict the effective thermal conductivity of fruits and vegetables during drying, *Journal of Food Engineering*, vol.52, pp. 47-52, 2002.
62. Meukam P., « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004.
63. Moras P., Chapon J.F., *Entreposage et conservation des fruits et légumes*, CTFIL, 1983.
64. Moshenin N.N., *Thermal properties of foods and agricultural materials*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1980.
65. Nagazaka Y., Nagashima A., Simultaneous measurement of the thermal conductivity and the thermal diffusivity of liquids by the transient hot-wire method, *Rev. Sci. Instrum.*, 52(2), pp.229-232, 1981.
66. Nguyen K. T., Prystay M., An inverse method for estimation of the initial temperature profile and its evolution in polymer processing, *International Journal of Heat and mass Transfer*, vol.42, pp.1969-1978, 1999.
67. Özisik M. N., « Heat conduction », John Wiley & Sons, Inc., 1993.
68. Pagano A.M., Mascheroni R.H., Sorption isotherms for amaranth grains, *Journal of Food Engineering*, Vol. 67, n° 4, pp. 441-450, 2005.
69. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L., « Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity », *Journal of Applied Physics*, vol. 32, n°9, pp. 1679-1684, 1961.
70. Perry I., Batsale J.-C., Maillet D., Degiovanni A., Measurement of thermal diffusivities through processing of infrared images, *Review of Scientific Instruments*, vol.66, n°1, pp.182-192, 1995.
71. Rharbaoui B., Contribution à l'étude de la mesure simultanée de la conductivité et de la diffusivité thermiques par la méthode du fil chaud, Thèse de doctorat, Université d'Angers, 1994.
72. Simal S., Rossello C., Berna A., Mulet A., Drying of shrinking cylinder-shapes bodies, *Journal of Food Engineering*, vol.37, pp.423-435, 1998.
73. Stehfest H., Numerical inversion of Laplace transform, *Comm. ACM*, 13(1), p. 47-49, 1970.
74. Song Y.W., Grob U., Hahne E., A new method for thermal diffusivity and thermal conductivity evaluation from transient hot strip measurement, *Fluid Phase Equilibria*, vol.88, pp.291-302, 1993.
75. Spiegel M.R., *Transformées de Laplace, cours et problèmes*, Série Schaum, Mac Graw Hill, 1990.
76. Akanbi C.T., Adeyemi R.S., Ojo A., Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices *Journal of Food Engineering*, Vol.73, n°2, pp.157-163, 2006.
77. Talla A., Jannot Y., Kapseu C., Nganhou J., Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage de fruits tropicaux, *Science des Aliments*, 5, 2001.
78. Talla A., Puiggali J.-R., Jomaa W., Jannot Y., Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits : application to banana, *Journal of Food Engineering*, 64,103-109,2004.
79. Talla A., Séchage de fruits tropicaux par l'air chaud et étude du coût énergétique dans un séchoir électrique prototype, Thèse de doctorat, Université de Yaoundé I, 2003.
80. Talla A., Jannot Y., Nkeng G., Puiggali J.-R., Desorption isotherms of tropical foodstuff. Application to banana, mango and pineapple, *Drying technology*, vol.23, n° 7, pp. 1477-1498, 2005.

81. Temeching F., Etude des possibilités de climatisation par évaporation d'eau à Ouagadougou, Mémoire de fin d'études EIER, Ouagadougou, 1990.
82. Timoumi S., Zagrouba F., Water sorption and dehydration kinetics of Tunisian rosemary leaves, *Desalination*, vol.185, n°1-3, pp.517-521, 2005.
83. Toğrul I.T., Pehlivan D., Modelling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*, vol.58, pp.23-32, 2002.
84. Trigeassou J.Cl., Recherche de modèles expérimentaux, *Technique et Documentation*, Lavoisier, 1988.
85. Liang X.-G., Zhang Y., Ge X., The measurement of thermal conductivities of solid fruits and vegetables, *Meas. Sci. Technol.*, 10, N82-N86, 1999.
86. Van Meel D.A., Adiabatic conversion batch drying with recirculation of a chemical, *Eng. Sci.*, vol.9, pp.36-44, 1958.
87. Zhang H., He L., Cheng S., Zhai Z., Gao D., A dual thermistor probe for absolute measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity by the heat pulse method, *Measurement Science and Technology*, vol.14, pp. 1396-1401, 2003.
88. Zhang X. et Degiovanni A., Mesure de l'effusivité thermique de matériaux solides et homogènes par une méthode de « sonde » plane, *Journal de Physique III*, n°6, pp.1243-1265, 1993.
89. Zhang X., Degiovanni A., Maillet D., Hot-wire measurement of thermal conductivity of solids : a new approach, *High Temperatures-High Pressures*, vol.25, pp.577-584, 1993.