



Unité de Formation et de Recherches en Sciences Exactes et Appliquées (UFR/SEA)

THÈSE UNIQUE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU

Mention : Physique

Spécialité : Thermique et Génie des procédés

Présentée par :

DISSA Alfa Oumar

**SECHAGE CONVECTIF DE LA MANGUE : ANALYSE DE
L'INFLUENCE DES PARAMETRES AERAULIQUES ET
INTRINSEQUES, CONCEPTION ET MODELISATION DU
FONCTIONNEMENT D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT.**

Directeurs de thèse :

M. Jean KOULIDIATI, *Université de Ouagadougou, Burkina Faso*

M. Joseph BATHIEBO, *Université de Ouagadougou, Burkina Faso*

Codirecteur :

Mme Hélène DESMORIEUX, *Université Claude Bernard Lyon1, France*

Soutenue publiquement le 27 septembre 2007 devant la commission d'examen

JURY

M. C. N. AWANOU, Professeur, <i>Université de d'Abomey-Calavi, Bénin</i>	Président
M. K. NAPO, Professeur, <i>Université de Lomé, Togo</i>	Rapporteur
M. R. SAUREL, Professeur, <i>Université de Bourgogne – Ensibana, France</i>	Rapporteur
M. K. TRAORE, Maître de Conférences, <i>Université de Ouagadougou, B. Faso</i>	Rapporteur
J. KOULIDIATI, Professeur, <i>Université de Ouagadougou</i>	Examineur
F. ZOUGMORE, Maître de Conférences, <i>Université de Ouagadougou</i>	Examineur
B.G. SEGDA, Maître de Conférences, <i>Université de Ouagadougou</i>	Examineur
J. BATHIEBO, Maître de Conférences, <i>Université de Ouagadougou</i>	Examineur
H. DESMORIEUX, Maître de Conférences, <i>Université Claude Bernard Lyon1</i>	Examineur

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée entre le Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (Université de Ouagadougou) dirigé par le M. le Professeur J. KOULIDIATI et le Laboratoire d'Automatisme et de Génie des Procédés (UCB Lyon1) dirigé par M. le Professeur H. Fessi. Je les remercie vivement d'avoir mis à ma disposition le matériel ayant servi à ce travail. Les conseils et le soutien de M. le Pr J. KOULIDIATI m'ont été très précieux et motivant tout au long de la direction de cette thèse; Qu'il soit rassuré de ma profonde gratitude.

Je suis très reconnaissant à M. le Professeur J. BATHIEBO, d'avoir dirigé dans les meilleures conditions avec beaucoup de sympathie et d'humanisme ce travail de recherche. Qu'il trouve ici l'assurance de ma haute considération.

J'adresse mes vifs remerciements à Mme H. DESMORIEUX pour m'avoir accueilli au LAGEP et surtout d'avoir codirigé en toute rigueur ce travail de thèse. Qu'elle trouve ici l'expression de ma haute considération.

Je remercie M. P. DEGRAEVE et ses collaborateurs du Laboratoire de Recherche en Génie de l'Industrie Agroalimentaire de Bourg en Bresse pour leur collaboration solidaire et fructueuse, sans laquelle une partie de ce travail n'aurait pas abouti.

Ma gratitude s'adresse à M. les Professeurs C.N. AWANOU, K. NAPO, R. SAUREL, K. TRAORE d'avoir accepté d'établir un rapport sur ce travail et à M. les professeurs F. ZOUGMORE, S. GERARD de participer au Jury.

Enfin je tiens à remercier particulièrement l'ensemble du personnel et mes collègues thésards du LPCE et du LAGEP. Je n'oublie surtout pas mes camarades du LAME.

A MES PARENTS

A mes frères et sœurs et ma fiancée Kadidia

TABLE DE MATIERE

NOMENCLATURE.....	11
INTRODUCTION GENERALE.....	17

CHAPITRE 1

BIBLIOGRAPHIE : LA MANGUE ET LES SECHOIRS EN AFRIQUE DE L'OUEST

1. Etat des lieux sur la filière mangue.....	19
1.1 Historique de la mangue.....	19
1.2 Description du fruit.....	19
1.3 La mangue en Afrique de l'Ouest.....	20
1.3.1 Les variétés et composition variétale des vergers.....	20
1.3.2 Production, transformation et commercialisation.....	21
2. Filière mangue du Burkina Faso.....	24
2.1 Les zones de production.....	24
2.2 La production, transformation et commercialisation.....	24
2.3 Réalisations récentes de transformation de mangue.....	27
2.4 Problèmes récurrents de la production et du séchage de la mangue.....	27
2.4.1 Problèmes liés à la production.....	27
2.4.2 Problèmes liés au séchage et à la commercialisation.....	28
3. Etat de l'art des séchoirs solaires.....	30
3.1 Introduction.....	30
3.2 Classification des séchoirs solaires.....	31
3.3 Technologies des séchoirs solaires indirects.....	33
3.3.1 Le capteur solaire à air.....	33
3.3.2 L'enceinte de séchage et les organes de circulation d'air.....	41
4. Séchoirs utilisés au Burkina Faso.....	43
4.1 Séchoirs solaires.....	43
4.1.1 Le séchoir « coquillage » ou « calebasse ».....	43

4.1.2 Le séchoir « banco ».....	44
4.1.3 Les limites de ces séchoirs.....	45
4.2 Les séchoirs à gaz.....	45
4.2.1 Le séchoir à gaz type « Attesta ».....	45
4.2.2 Le séchoir à gaz type « Cadre ».....	46
4.3 Le séchoir de type tunnel Cartier.....	47
Conclusion.....	49

CHAPITRE 2

CARACTERISATION DES MANGUES FACE AU SECHAGE CONVECTIF

1. Théorie.....	50
1.1 Caractérisation de la variété et de la maturité.....	50
1.1.1 La variété.....	50
1.1.2 La maturité.....	50
1.2 Notion d'équilibre air-produit.....	51
1.2.1 Modes de liaison de l'eau.....	51
1.2.2 Teneur en eau d'un produit.....	52
1.2.3 Activité de l'eau dans un produit	53
1.2.4 L'isotherme de sorption-désorption.....	55
1.3 La contraction volumique	62
1.3.1 Les phénomènes physiques accompagnant la contraction.....	62
1.3.2 Facteurs influant la contraction	62
1.3.3 Les conséquences de la contraction sur les caractéristiques du produit.....	64
1.3.4 Modélisation de la contraction.....	65
2 Matériels et méthodes.....	68
2.1. Les mangues.....	68
2.1.1 Découpe, dimensions et support des échantillons.....	68
2.1.2 Teneur en eau initiale.....	69
2.1.3 Variété, maturité et position sur le fruit.....	70
2.1.4 Mesure de texture par compression.....	72
2.1.5 Colorimétrie.....	73
2.2. Isotherme de desorption	75

2.3 Mesure de contraction	76
2.4 Tableau récapitulatif des conditions expérimentales.....	77
2.5 Traitement des données.....	80
2.5.1 Isotherme de sorption.....	80
2.5.2 La contraction.....	82
2.5.3 Ajustement des données.....	85
3. Résultats.....	86
3.1 Caractérisation physique des variétés mangues.....	86
3.2 Caractérisation de la maturité en fonction de la position.....	88
3.2.1 Le ratio sucre/acide.....	88
3.2.2 La colorimétrie.....	89
3.2.3 La texture par compression.....	91
3.3 L'isotherme de desorption	93
3.3.1 Influence de la température.....	93
3.3.2 Influence de la variété.....	95
3.3.3 Identification des caractéristiques de l'isotherme de sorption.....	100
3.4 La contraction.....	105
3.4.1 Influence de la température.....	105
3.4.2 Influence de la maturité en fonction de la position.....	108
3.4.3 Influence de la variété.....	109
3.4.4 Influence du type de support et du sens découpe.....	110
3.4.5 Influence de la taille de l'échantillon.....	111
Conclusion.....	112

CHAPITRE 3

SECHAGE CONVECTIF DES MANGUES : INFLUENCE DES CONDITIONS EXTERIEURES ET DES CARACTERISTIQUES DU PRODUIT

1. Théorie.....	114
1.1 La cinétique et les phases du séchage.....	114
1.1.1 Phase transitoire de mise en température.....	115
1.1.2 Phase à vitesse de séchage constante.....	115
1.1.3 Phase à vitesse de séchage décroissante.....	116

1.2 Les mécanismes de transfert.....	118
1.2.1 Transferts de chaleur.....	118
1.2.2 Les transferts de matière.....	121
1.2.3 Teneur en eau critique.....	126
1.2.4 Les modèles simples de séchage convectif.....	127
2. Matériels et méthodes.....	135
2.1 Teneur en eau initiale.....	135
2.2 Les cinétiques de séchage.....	135
2.2.1 Les séchoirs.....	135
2.2.2 Mesure de la température de surface et de cœur.....	138
2.2.3 Tableau récapitulatif des conditions opératoires.....	138
2.3 Exploitation des données.....	141
2.3.1 Détermination des vitesses de séchage.....	141
2.3.2 Correction des cinétiques de séchage par les données de contraction.....	141
2.3.3 Lissage des cinétiques de séchage.....	143
2.3.4 Identification de la diffusivité sans prise en compte de la contraction.....	143
2.3.5 Identification de l'Energie d'activation.....	144
2.3.6 Teneur en eau critique.....	145
2.3.7 La courbe caractéristique de séchage (CCS)	145
3. Evaluation de la diffusivité avec prise en compte de la contraction.....	146
3.1 Hypothèses simplificatrices.....	146
3.2. Approche numérique.....	146
3.2.1 Bilan de matière.....	147
3.2.2 Bilan énergétique.....	151
3.2.3 Conditions initiales et aux limites	151
3.3 Approche analytique.....	152
3.3.1 Evaluation de la teneur en eau entre la 1 ^{ère} et la 2 ^{ème} teneur en eau critique.....	153
3.3.2 Evaluation de la teneur en eau entre la 2 ^{ème} teneur en eau critique et la 3 ^{ème} ...	154
4. Résultats.....	155
4.1 Correction des courbes de séchage par la contraction.....	155
4.1.1 Intérêt	155
4.1.2 Modèle de correction	155
4.2 Influence des paramètres intrinsèques.....	157

4.2.1. Influence de la maturité.....	157
4.2.2. Influence de la surface spécifique en fonction de la maturité.....	158
4.2.3. Influence de la position en fonction de la maturité.....	160
4.2.4 Influence de la variété.....	161
4.2.5 Influence du sens de découpe et du support.....	163
4.3 Influence des conditions aérauliques.....	164
4.3.1 Température et de l'épaisseur.....	164
4.3.2 Hygrométrie de l'air.....	170
4.3.3Vitesse de l'air.....	171
4.4 Diffusivité et Energie d'activation.....	173
4.5 La courbe caractéristique de séchage (CCS)	174
4.6 Détermination de la diffusivité avec prise en compte de la contraction.....	177
4.6.1 Evaluation des teneurs en eau critiques.....	177
4.6.2 Evaluation des diffusivités.....	178
4.6.3 Evaluation numérique de la diffusivité.....	183
Conclusion.....	185

CHAPITRE 4

CONCEPTION ET MODELISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE

INDIRECT : APPLICATION AU SECHAGE DE LA MANGUE

1 Conception du séchoir solaire.....	186
1.1 Le capteur solaire, unité de production d'énergie.....	186
1.1.1 Contribution à la technologie des capteurs plans à air.....	186
1.1.2 Architecture du capteur solaire.....	187
1.2 L'unité de séchage.....	188
1.3 Fonctionnement du séchoir solaire.....	188
2. Matériels et méthodes de caractérisation expérimentale.....	191
2.1 Les mangues et la préparation des tranches.....	191
2.2 Mesure de températures et d'hygrométrie.....	192
2.3 Mesure de masse.....	192
2.4 Détermination de la masse de matière sèche et de la teneur en eau.....	192

3. Modélisation du fonctionnement du capteur solaire à air.....	193
3. 1 Les hypothèses de travail.....	193
3.2. Définition des variables utilisées dans le modèle.....	194
3.3 Bilan thermique du capteur.....	194
3.3.1. Analyse des transferts thermiques	195
3.3.2. Calcul de P_2	196
3.3.3. Calcul des pertes P_p	197
3.3.4. Calcul de la température de la vitre.....	203
3.3.5. Calcul des puissances utiles ϕ , P_u et q_u	204
3.3.6. La distribution de température le long de la direction de l'écoulement	205
3.3.7. Calcul de P_u et Q_u en utilisant la distribution de température.....	205
3.4 Rendement du capteur.....	206
3.5 Résolution numérique du fonctionnement du capteur.....	208
4. Modélisation du séchage en couche mince de la mangue	211
4.1 Hypothèses de base.....	211
4.2 Détermination des variables du modèle.....	211
4.3 Bilan des transferts thermiques.....	212
4.3.1 Schéma électrique équivalent.....	212
4.3.2. Les équations de tranfert.....	214
4.3.3. Equations de tranfert discrétisées.....	217
4.4 Simulation du séchage en couches minces.....	218
4.4.1 Methode de résolution.....	218
4.4.2 Système d'équations résolues.....	219
5 Résultats.....	220
5.1 Le capteur solaire.....	220
5.1.1 Simulation des puissances récupérée et utile.....	220
5.1.2 Simulation des températures moyennes des différents organes et de l'air	221
5.1.3 Simulation des performances thermiques journalières.....	223
5.1.4 Comparaison des résultats de simulation et des résultats de test à vide du Capteur.....	225
5.1.5 Performance à long terme du capteur et capacité du séchoir solaire.....	227
5.2 Couplage capteur-unité de séchage.....	230

5.2.1 Simulation du séchage solaire en couche mince de la mangue.....	230
5.3.2 Caractérisation expérimentale du séchoir.....	236
5.3.3 Comparaison des résultats théoriques expérimentaux.....	242
Conclusion.....	246

CHAPITRE 5

SECHAGE DE LA MANGUE EN COUCHES MINCES : COMPARAISON DU SECHAGE SOLAIRE INDIRECT AVEC LE SECHAGE SOLAIRE DIRECT ET LE SECHAGE CONVECTIF ELECTRIQUE

1. Matériels et méthodes.....	247
1.1 Présentation des équipements de séchage.....	247
1.1.1. Séchage solaire direct.....	247
1.1.2 Séchage convectif électrique.....	248
1.2 Préparation des mangues.....	249
2. Résultats.....	251
2.1 Caractérisation des séchoirs solaires.....	251
2.1.1 Données sur le rayonnement.....	251
2.1.2 Données sur les conditions extérieures en séchage solaire direct.....	252
2.2 Comparaison du séchage solaire direct et indirect de la variété Amélie.....	252
2.3 Comparaison du séchage solaire et du séchage convectif électrique.....	254
2.4 Influence de la variété sur les cinétiques de séchage solaire direct et convectif électrique en couche mince.....	256
2.4.1 Séchage solaire direct.....	256
2.4.2 Séchage convectif électrique.....	258
2.5. Influence de la température en séchage convectif électrique en couche mince....	261
Conclusion.....	263

CONCLUSION GENERALE.....	264
---------------------------------	------------

Perspectives.....	266
-------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	267
---	------------

<i>ANNEXE I: SOURCE D'ENERGIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE</i>	<i>280</i>
--	------------

<i>ANNEXE II: CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA MANGUE</i>	<i>292</i>
<i>ANNEXE III: PROGRAMMES DE LISSAGE.....</i>	<i>294</i>
<i>ANNEXE IV-1: DIMENSIONS DU CAPTEUR ET CARACTERISTIQUES DES ORGANES</i>	<i>296</i>
<i>ANNEXE IV-2 : COEFFICIENTS D'ECHANGE THERMIQUE.....</i>	<i>298</i>
<i>ANNEXE IV-3 : PROGRAMME DE SIMULATION COUPLAGE CAPTEUR-UNITE DE SECHAGE.....</i>	<i>300</i>
<i>ANNEXE IV-4 :.....</i>	<i>308</i>

NOMENCLATURE

NB : Pour des mesures de compatibilité entre les données obtenues à partir du logiciel Matlab et les autres données de ce Document, les nombres décimaux ont été symbolisés avec un point, c'est -à-dire en notation anglo-saxonne.

NOTATIONS ET SYMBOLES

Symbole	Unité	Définition
A et B	---	Coefficients caractéristiques de l'état du ciel
A	---	l'albédo
a	---	Coefficient d'absorption d'une surface réelle éclairée par le soleil
a	---	Indice du rouge
a' et b'	---	Coefficients de l'expression du rayonnement global
a ₁ , a ₂ et a ₃	---	Variables liées au type de climat dans la formule de Hottel
A _o	---	Albédo du sol
A _w	---	Activité de l'eau
b	---	Indice du jaune
C	mole.m ⁻³	Concentration molaire volumique
C	---	Facteur de correction dû à la variation de la distance Terre-Soleil
C	mole.m ⁻³	Concentration de l'eau
C _p	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	Chaleur massique ou spécifique
C _v , C _i	---	Fraction massique ou molaire de la vapeur d'eau.
D	---	Numéro du jour dans l'année
D	m ² .s ⁻¹	Coefficient de diffusion
d	m	Dimension caractéristique du produit
D ₀	m ² .s ⁻¹	Facteur pré exponentiel de Arrhenius
D _{eff}	m ² .s ⁻¹	Diffusivité effective de l'humidité dans la matière
D _{ST}	m	Distance Soleil-Terre
(dS) _T	m ²	Elément de surface autour d'un point Mo de la Terre
D _v	m ² .s ⁻¹	Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air
E	W.m ⁻²	Eclairement
E _a	J.mole ⁻¹	Energie d'activation pour les transferts de masse interne
H	J.m ⁻² .jr ⁻¹	Rayonnement journalier global sur un plan horizontal
H _d	J.m ⁻² .jr ⁻¹	Rayonnement diffus journalier arrivant sur un plan horizontal
H _{dm}	J.m ⁻² .jr ⁻¹	Rayonnement diffus journalier en moyenne mensuelle
H _i	J.m ⁻² .jr ⁻¹	Rayonnement journalier global sur un plan incliné
H _{im}	J.m ⁻² .jr ⁻¹	Rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur le plan incliné
H _m	J.m ⁻² .jr ⁻¹	Rayonnement global journalier moyen

H_o	$J.m^{-2}.jr^{-1}$	Energie incidente extraterrestre
H_o'	$J.m^{-2}.jr^{-1}$	Rayonnement journalier global par ciel clair sur un plan horizontal
H_{oh}	$J.m^{-2}.h^{-1}$	Energie incidente extraterrestre horaire
H_{om}	$J.m^{-2}.jr^{-1}$	Rayonnement extraterrestre journalier en moyenne mensuelle
H_r ou Φ	---	Humidité relative
H_{ab} ou ω	$kg_{eau}.kg_{as}^{-1}$	Humidité absolue
h	$W.m^{-2}.K^{-1}$	Coefficient d'échange par convection
h	J	Enthalpie de l'air humide
h	m	Hauteur du soleil en système de coordonnées horizontales
h_{as}	J	Enthalpie de l'air sec
h_v	J	Enthalpie de vapeur d'eau
i	rad	Angle d'inclinaison d'un plan recevant les rayons solaires
I	$J.m^{-2}.h^{-1}$	Rayonnement global horaire
I_D	$W.m^{-2}$	Puissance du rayonnement solaire direct
I_{Dh}	$W.m^{-2}$	Puissance du rayonnement solaire direct sur un plan horizontal
I_{Di}	$W.m^{-2}$	Puissance du rayonnement solaire direct sur un plan incliné
I_d	$W.m^{-2}$	Puissance du rayonnement solaire diffus
I_{dh}	$W.m^{-2}$	Puissance du rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal
I_{di}	$W.m^{-2}$	Puissance du rayonnement Solaire diffus sur un plan incliné
I_h	$J.m^{-2}.h^{-1}$	Rayonnement global horaire reçu sur un plan horizontal
I_{ho}	$W.m^{-2}$	Puissance moyenne du rayonnement extraterrestre
I_i	$J.m^{-2}.h^{-1}$	Rayonnement global horaire reçu sur un plan incliné
I_m	$J.m^{-2}.h^{-1}$	Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle en
I_o	$W.m^{-2}$	Constante Solaire (W/m^2)
K	$m.s^{-1}$	Coefficient de transfert de matière ou constante de séchage
K_T	---	Indice de clarté journalier
K_{Tm}	----	Indice de clarté journalier moyen mensuel
L	---	Luminance ou indice de clarté
L_v	$kJ.kg^{-1}$	Chaleur latente de vaporisation
M	---	Emittance du soleil
m	---	Numéro du mois dans l'année
m	kg	Masse
M	$kg.mole^{-1}$	Masse molaire
MR	---	Teneur en eau reduite
$\dot{m}$	$kg.s^{-1}$	Débit massique
m_v et m_{as}	kg	Masses d'eau et d'air sec contenues dans l'air humide
N	---	Nombre maximal d'heures d'ensoleillement par jour de
n	---	Numéro du jour dans le mois
n	---	Nombre d'heure d'ensoleillement par jour de
$\frac{n}{N}$	---	Fraction d'insolation
n_v	$kg.m^{-2}.s^{-1}$	Flux massique d'eau évaporée
P	Pa	Pression
P	Watt	Puissance
Q	Watts	Quantité de chaleur transférée par unité de temps
Q_s	kJ/kg	Chaleur totale de sorption

R	J.mol ⁻¹ .K ⁻¹	Constante des gaz parfaits (8.314 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
R	m	Rayon du grand cercle solaire
R	---	Ratio _{mangue mûre} / Ratio _{mangue verte}
R _b	---	Rapport du rayonnement direct journalier sur un plan incliné au rayonnement direct journalier sur un plan horizontal
R _{ext}	(selon le cas)	Résistance thermique ou massique aux transferts externes
R _{int}	(selon le cas)	Résistance thermique ou massique aux transferts internes
S	m ²	Surface d'échange thermique
s	m ² .m ⁻³	Surface spécifique
S _b	---	Taux de contraction volumique
T ou θ	°C/K	Température
t	s	Durée des transferts
T _c	°C/K	Température de voûte céleste
T _a	°C/K	Température de l'air
T _h	°C/K	Température de bulbe humide
T _s	°C/K	Température de bulbe sec
T _s	°C/K	Température superficielle du produit à sécher
V	m ³	Volume
V	m.s ⁻¹	Vitesse de
X	kg _{eau} .kg _{m.s} ⁻¹	Teneur en eau base sèche
x _(bh)	kg _{eau} .kg _{m.s} ⁻¹	Teneur en eau base humide
X _{eq}	kg _{eau} .kg _{m.s} ⁻¹	Teneur en eau d'équilibre
X _o	kg _{eau} .kg _{m.s} ⁻¹	Teneur en eau initiale
X _{v∞}	---	Fraction molaire de la vapeur d'eau au sein de l'écoulement
X _{vs}	---	Fraction molaire de la vapeur à la surface du produit
Y	(kg _e .kg _{as} ⁻¹)	Humidité absolue de l'air en surface et au sein de l'écoulement (∞)
z	km	Altitude

NOMBRES ADIMENSIONNELLES

Symbole	Unité	Définition
Bi, Bi*	---	Nombre de Biot et nombre de Biot modifié
Fo	---	Nombre de Fourier
Nu	---	Nombre de Nusselt thermique
Pr	---	Nombre de Prandtl
Re	---	Nombre de Reynolds
Sc	---	Nombre de Schmidt

LETTRES GRECQUES

Symbole	Unité	Définition
α	m ² .s ⁻¹	Diffusivité thermique

α	degré	Demi-diamètre angulaire du Soleil vu par la Terre
Δ	---	Variation
ΔE	---	Ecart de couleur
ΔH_{de}	J.kg ⁻¹	Enthalpie massique de désorption de l'eau
ΔH_s	J.kg ⁻¹	Enthalpie différentielle de sorption-désorption
δ	degré	Déclinaison du soleil pour la d-ème journée de l'année ()
Φ	---	Humidité relative
Φ_m	kg.m ⁻² .s ⁻¹	Flux massique de matière
ϕ	degré	Latitude du lieu
Γ	---	Ordonnée de la courbe caractéristique du séchage
γ	---	Coefficient de forme du produit
λ	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Conductivité thermique
μ	Pa.s, kg.m.s ⁻¹	Viscosité dynamique
ν	m ² .s ⁻¹	Viscosité cinématique
θ	°C/K	Température
θ_h, θ_i	degré	Angles d'incidence sur le plan horizontal et sur le plan incliné
ρ	kg.m ⁻³	Masse volumique
σ	W.m ⁻² .K ⁻⁴	Constante de Stefan - Boltzmann (5.67 10 ⁻⁸ W.m ⁻² .K ⁻⁴)
τ	---	Transmittivité totale dans tout le spectre du rayonnement
ω	kg _{eau} .kg _{gas} ⁻¹	Humidité absolue
ω	degré	Angle horaire
ω_s	degré	Angle horaire au levé du soleil
ω_{si}	degré	Angle horaire du lever du soleil sur un plan incliné
ψ	---	Taux de saturation
Ψ	---	Teneur en eau réduite en phase à vitesse décroissante

INDICE

Symbole	Définition
a	Air
as	Air sec
b.h	Base humide
b.s	Base sèche
cr	Critique
D	Direct
d	(Selon le cas) Désorption ou diffus
e	(Selon le cas) Eau, entrée, équilibre
eff	Effective
eq	Equilibre
ext	Extérieur
f	(Selon le cas) Fluide, air
h	(Selon le cas) Horizontal , horaire
i	Incliné
int	Intérieur

L		Liaison
M	(Selon le cas)	Massique, moyenne
h		hydride ou humide
ml		Moyenne logarithmique
m		Matière
o, 0		Initiale
s	(Selon le cas)	Saturation , surface, solide, sortie, sec
S		Soleil
T	(Selon le cas)	Totale, terre
ST		Terre-Soleil
v		Vapeur
∞		Ecoulement

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un inconvénient majeur pour la stabilisation de nombreux produits biologiques notamment les produits agro-alimentaires. Aussi, pour la conservation sans risques d'altération de ces produits, l'eau doit-elle être éliminée sans détruire ni changer le moins possible la qualité du produit. De nombreuses techniques dont le séchage sont alors utilisées pour séparer cette eau du matériau. Le séchage est une technique très ancienne consistant à extraire un liquide, généralement de l'eau, liée de façon plus ou moins forte à la matrice solide du matériau. Cette extraction se fait par évaporation de l'eau liquide par apport externe de chaleur. Elle permet ainsi de réduire la teneur en eau du produit à des valeurs résiduelles où le développement de tout microorganisme est inhibé.

De nombreuses études ont permis de développer la théorie du séchage et d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques qui gouvernent la migration interne de l'eau (cf. Whittaker, 1977; Krisner & Kröl, 1963). Cependant, une description mathématique complète de l'état d'un matériau au cours du séchage reste encore difficile à formuler et même irréaliste pour les produits agro-alimentaires, qui mettent le plus souvent en jeu différents phénomènes secondaires (croûtage, retrait, fissures...). Le séchage d'un produit se fait généralement par établissement d'un gradient de température et/ou de pression partielle de vapeur entre celui-ci et de l'air portée à une température supérieure, rendant possible les transferts de masse et de chaleur entre l'air sec et la matière humide. Suivant le mode dont le transfert de chaleur s'effectue entre l'air et produit, on distingue plusieurs types de séchage. Dans cette étude, seule le type de séchage convectif par énergie électrique et solaire est utilisé.

Le séchage convectif est le procédé de séchage le plus utilisé en séchage artisanal et en industrie où il est généralement présent en fin de chaîne de fabrication. Il permet de concentrer le produit sous forme de matière sèche conservable avant son conditionnement dans les emballages. Dans les séchoirs convectifs, le produit est placé dans un courant d'air chaud et sec dont la pression de vapeur d'eau est inférieure à celle régnant juste à son niveau. L'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est alors prise par convection à l'air et la vapeur produite est emportée par ce même air. Ce séchage peut être "isenthalpique" si

l'apport de chaleur sensible de l'air de séchage est exactement égal à l'énergie nécessaire à la vaporisation. L'ensemble des processus physiques intervenant pendant le mécanisme du séchage convectif des produits agroalimentaires se regroupe en transfert simultané de masse et de chaleur c'est-à-dire :

- (1) Le transfert d'humidité, par diffusion, de l'intérieur du produit vers l'interface air-produit et de l'interface vers le courant d'air par convection.
- (2) Le transfert de chaleur par convection de l'air vers l'interface air-produit et de l'interface vers l'intérieur du produit par conduction

Le but principal de notre étude est la caractérisation du séchage convectif de la mangue ainsi que la conception et la modélisation d'un séchoir solaire indirect à claie adapté au séchage en couche mince de ce fruit.

Le premier chapitre se rapporte à la bibliographie sur la mangue et les séchoirs. Un aperçu global est fait sur la production et la transformation de la mangue en Afrique de l'Ouest et au Burkina Faso. De même, un état des lieux sur la technologie des séchoirs solaires et des séchoirs utilisés actuellement au Burkina Faso est illustré.

Les chapitres 2 et 3 sont consacrés à la caractérisation du séchage convectif de la mangue. Le chapitre 2 traite des conditions d'équilibre entre l'air et le produit au cours du séchage. Ces conditions d'équilibre étant d'ordre hygrothermique régi par l'isotherme de sorption, et d'ordre mécanique régi par le retrait du produit. Le chapitre 3 est relatif à l'influence des paramètres aérauliques et intrinsèques au produit sur la cinétique de séchage de la mangue. La diffusivité d'eau et l'influence du retrait sur celle-ci sont aussi illustrées dans ce chapitre.

Au chapitre 4, un séchoir solaire indirect est conçu et ensuite modélisé. Une caractérisation expérimentale du séchoir prototype est effectuée et les courbes de séchage expérimentales sont comparées aux courbes simulées.

Le chapitre 5 présente une étude expérimentale comparée des cinétiques de séchages établies à l'aide du séchoir solaire indirect étudié au chapitre 4 et les cinétiques obtenues à l'aide d'un séchoir solaire direct et d'un séchoir électrique convectif. Une analyse comparée de l'influence de la variété du fruit sur chaque type de séchoir est ensuite illustrée.

CHAPITRE 1

BIBLIOGRAPHIE : LA MANGUE ET LES SECHOIRS EN AFRIQUE DE L'OUEST

1 Etats des lieux sur la filière mangue

1.1 Historique de la mangue

La mangue, *Mangifera indica* L., de la famille des Anacardiaceae est un fruit du manguier, arbre qui serait originaire du Sud-est asiatique ou de la région Indo-Birmane, où, selon Candolle, elle serait produite depuis près de 4000 ans (Sawadogo, 1993). Pendant longtemps, elle est restée connue seulement en Asie. Par la suite, elle fut introduite au X^e siècle en Afrique et au XVIII^e siècle au Brésil par les explorateurs portugais qui la nommèrent *manga*, une transformation de *man-gay*, son nom en tamoul, langue du sud-est de l'Inde. Elle se propagea alors entre les deux tropiques et se répandit graduellement à travers le monde, où, on dénombre actuellement plus de 1000 variétés de l'espèce (Sawadogo, 1993; Rey et al., 2004a). De nos jours, l'Inde, le Brésil, la Floride (USA), l'île de Réunion, la Côte d'Ivoire, la Thaïlande, Madagascar, l'Israël, le Burkina Faso, le Congo, le Sénégal, l'Egypte, le Mexique et le Pakistan représentent les plus grands producteurs de mangues au monde.

1.2 Description du fruit

La mangue est une drupe plus ou moins aplatie latéralement et ayant des formes diverses selon la variété : oblongue, réniforme, elliptique, ovoïde, cordiforme. Elle mesure habituellement 10cm et son poids varie entre 250g et 1,4kg.

Sa peau appelée épicarpe, verdâtre, devient à maturité, jaune, jaune verdâtre, orange ou rouge-violacée selon la variété. Elle présente des lenticelles plus ou moins apparentes.

Sa pulpe ou mésocarpe, de couleur jaune-orangée à maturité est parfois fibreuse mais plus souvent onctueuse, fondante, juteuse, sucrée et parfumée ou un peu ferme, selon les variétés. Elle adhère à un noyau imposant de forme aplatie. Ce noyau est enveloppé d'un endocarpe ligneux, ovale ou réniforme, aplatie à ses extrémités ; sa face externe étant creusée de sillons longitudinaux et garnie de fibres pénétrants plus ou moins dans le mésocarpe. A

maturité, le fruit dégage une odeur agréable, sa pulpe est sucrée et a un goût légèrement acide avec une saveur variable selon les variétés (Sawadogo, 1993). Certaines espèces, surtout les sauvages, présentent une chair peu abondante qui laisse souvent un arrière-goût de térébenthine.

C'est d'avril à fin juillet qu'on retrouve la mangue en abondante quantité en zone tropicale et elle continue à mûrir une fois cueillie pendant 3 à 5 jours à la température ambiante. La mangue constitue une excellente source de vitamine A et de vitamine C, elle est une bonne source de potassium et contient du cuivre. La mangue qui n'est pas tout à fait mûre serait laxative. Sa peau peut provoquer des réactions allergiques cutanées et irriter la peau et la bouche.

Le manguier est apparenté au pistachier et à l'anacardier (acajou) et pousse sous les climats tropicaux. Il peut atteindre 30 m mais mesure en moyenne 15 m. Chaque manguier produit près d'une centaine de fruits annuellement (Sawadogo, 1993).

1.3 La mangue en Afrique de l'Ouest

Le manguier, arbre parfaitement intégré dans le paysage et la vie quotidienne des habitants d'Afrique de l'Ouest est très apprécié pour ses fruits et son ombrage. D'introduction récente en Afrique, le manguier aurait été signalé pour la première fois en Afrique de l'Ouest au Sénégal, en 1824. C'est essentiellement à la fin du XIX^e siècle que les manguiers ont commencé à connaître une diffusion significative, surtout dans les zones côtières. Un manguier Amélie introduit au Mali vers 1890 serait à l'origine de nombreux plants greffés qui furent largement diffusés dans les pays limitrophes notamment au Burkina Faso. Cependant, les vergers de manguiers ne s'établiront véritablement dans l'ensemble d'Afrique de l'Ouest que dans la décennie 1970-1980 (Rey et al., 2004a).

1.3.1 Les variétés et la composition variétale des vergers

Les principales variétés de mangue cultivées dans la région ouest Africaine peuvent être regroupées en trois catégories distinctes (Rey et al., 2004b):

- Les variétés de mangues locales ou polyembryonnées : mangots (*mangot Nunkourouni ou tête de chat, Dadiani ou bouche longue, Mangotine ou Fumani, séwal ...*) et mangue du Cameroun.

- Les premières variétés monoembryonnées propagées par greffage : Amélie, Julie, Sabot, Djibelor, Cuisse Madame.
- Les variétés floridiennes monoembryonnées, d'introduction tardive, propagées par greffage et utilisées pour l'exportation (Kent, Keitt, Palmer, Zill, Valencia, Smith, Irwin, Haden) et pour les marchés régionaux (Brooks, Davis-Haden, Miami Late, Springfels, Beverly, Eldon, Ruby).

Les compositions variétales des vergers des principaux producteurs d'Afrique de l'Ouest autre que le Burkina Faso sont consignées dans le tableau 1.1.

Pays	Villes, Provinces, Régions	Variétés
Côte d'Ivoire	Nord	Amélie, Kent, Keitt
Guinée	Guinée Maritime Haute Guinée	Palmer, Zill, Brooks, Keitt, Miami Late, Irwin, Kent.
Mali	3 ^e Région (Sikasso, Kadiolo, Koutiala, Bougouni, Yanfolila) Régions de Bamako et Koulikoro	Amélie, Kent, Keitt, Zill, Brooks, Miami late, Irwin, Smith, Palmer, Valencia.
Sénégal	Niayes, Casamance	Amélie, Kent, Keitt
Togo	Région Nord (Kpalimé)	Zill, Irwin, Smith, Kent, Keitt, Palmer.

Tableau 1.1 : Composition variétale des principaux pays producteurs de mangue autre que le Burkina Faso en Afrique de l'Ouest (Rey al., 2004b).

1.3.2 Production, transformation et commercialisation

Dans la région Ouest Africaine, l'essentiel des vergers de manguiers exploités a moins de 10 hectares. La principale zone de production se situe dans un grand périmètre compris entre Bobo Dioulasso (Burkina Faso), Bamako-Yanfolila (Mali) et Tafié Dikodougou (Côte d'Ivoire). Les productions sont pour la plupart extensives et utilisent rarement des intrants. Ils appartiennent généralement à des planteurs dont l'activité principale est centrée sur l'agriculture de rente. Quelques plantations proches de 100 hectares appartenant à des

exportateurs et ayant un encadrement technique adapté se retrouvent au Sénégal et en Côte d'Ivoire (Vannière et al., 2004).

Initialement, chaque pays a créé une usine de production de pulpe ou de jus prêt à la consommation. Cependant, au fil des années, très peu de ces unités de production ont réussi à se maintenir de façon durable. De nos jours, les projets sont plutôt orientés vers des unités de taille modeste, produisant des jus et confitures pour la plupart gérées par des groupements de femmes. La production de tranches séchées, d'introduction récente, est une activité en plein essor depuis 2002. Il faut noter que les quantités de fruits transformés représentent généralement une proportion très infime des productions totales.

Le Mali fut le premier à exporter la mangue fraîche vers l'Europe à la fin des années 1960. Il fut suivi par le Burkina Faso, la Guinée, le Sénégal et surtout la Côte d'Ivoire dont les exportations, d'environ 2500 tonnes au début des années 1990, ont été multipliées par 4,5 en 2000 (fig. 1.1 & 1.2). Cette croissance rapide des exportations ivoiriennes a bénéficié de la présence d'une façade maritime et d'un effet de masse créé par les exportations de bananes et d'ananas. La variété Amélie a longtemps constitué l'essentiel des exportations du Mali, du Burkina Faso et de la Côte d'Ivoire. C'est avec l'introduction des variétés d'origine floridienne vers 1971 et la vulgarisation de la consommation de mangues en Europe que le choix variétal a été progressivement ajusté : Amélie, en début de campagne, puis Kent, Keitt et Palmer. Parallèlement à cette évolution variétale, les techniques de conditionnement se sont progressivement modernisées (Rey et al., 2004a) du stockage en carton à l'entreposage réfrigéré.

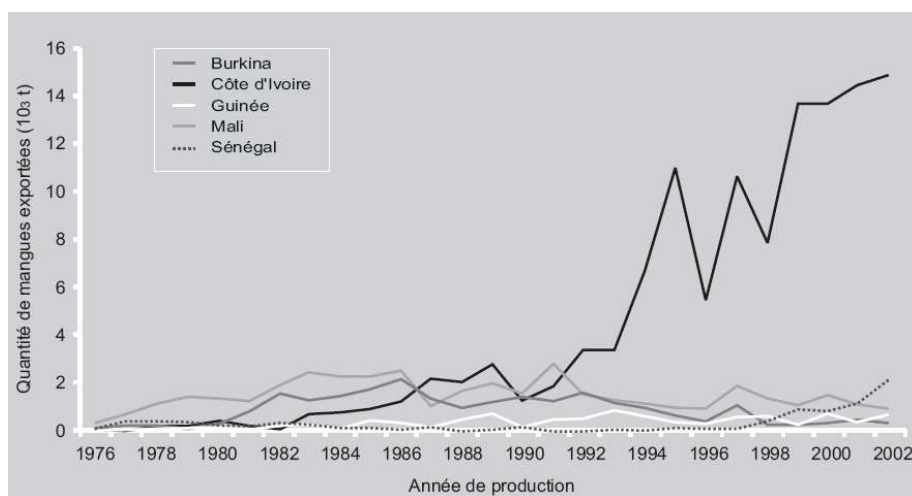


Fig. 1.1 (Rey et al., 2004a): Illustration de la suprématie des exportations de mangues en provenance de Côte d'Ivoire sur celles des autres pays producteurs d'Afrique de l'Ouest.

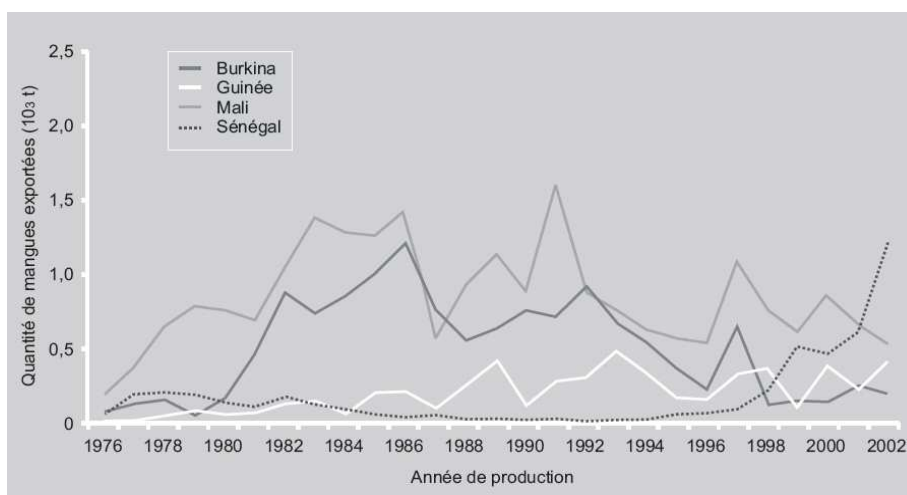


Fig.1.2 (Rey et al., 2004a): Évolution des exportations de mangues par les principaux pays producteurs d'Afrique de l'Ouest, hors Côte d'Ivoire, de 1976 à 2002.

2 Filière mangue du Burkina Faso

Au Burkina , la mangue représente près de 50% de la production fruitière et on rencontre plus d'une dizaine de variétés de mangue : Amélie ou Gouverneur, Mangot, Lippens, Brooks, Springfels, Valencia, Haden, Kent, Zill, Keitt, Ruby, Irwin, Smith...La composition des vergers greffés est influencée par l'évolution historique et la destination des fruits qui peuvent être autoconsommés, vendus sur le marché local, national ou sous-régional, exportés sur le marché international ou transformés dans des unités artisanales ou industrielles.

2.1 Les zones de production

Le Burkina Faso présente plusieurs régions aux conditions climatiques favorables au développement de la culture fruitière dont les plus importantes sont :

- Région des hauts bassins : Province Kénédougou (Orodara) et du Houet (Bobo)
- Région des cascades : Province de la Comoé (Banfora) et du Leraba (Sindou)
- Région du sud-ouest : Province du Poni (Gaoua) et du Noumbiel (Batié)
- Région du centre-Ouest : Province du Boulkiemdé et du Sanguier
- Région de l'est : Province du Gourma (Fada)

2.2 La production, la transformation et la commercialisation

Il n'existe quasiment pas de statistiques fiables sur la production de mangue au plan national. Les données disponibles à l'Office Nationale du Commerce extérieur (ONAC) et l'Institut National des Statistiques et du Développement (INSD) (Tableau 1.3) sont celles obtenues à partir des statistiques sur les quantités exportées fournies par la douane et les quantités supposées être consommées sur le plan national. Dans ces données, la mangue est souvent associée au mangoustan et à la goyave (tableau1.3), de même aucune information sur les quantités transformées (mangue séchée ; nectar, confiture, sirop ou vinaigre de mangue) et non transformée (mangue conditionnée) n'est fournie.

Jusqu'à cette dernière décennie, très peu d'importance était portée sur le volet transformation de la mangue sur le plan national (cf tableau 1.3). De nos jours, il existe plusieurs types de transformation dont la dominante à l'exportation est le séchage et la

mangue est le produit le plus transformé (90%) comparée aux légumes, tomate et oignons, qui sont transformés respectivement à 43% et 23% (MINEFI – DGTPE, 2006).

Au Burkina Faso, 30 unités locales artisanales ou semi industrielles commercialisent des tranches séchées (Séchoir type armoire –fabrication locale CEAS/ATESTA), des jus, des confitures, sirops, principalement à base de mangue. Cependant la plupart connaissent des difficultés de fonctionnement dues en partie à des équipements peu performants (MINEFI – DGTPE, 2006). Les principales structures de transformation et de commercialisation de la mangue séchée peuvent être regroupées en deux parties : d’une part on a en majorité les entreprises de type familial détenant des unités de transformation qui évoluent dans le secteur informel, rendant difficile le développement à l’international. D’autre part, 20% des transformateurs sont regroupés en association ou souvent en groupements de femmes (Groupement d’Intérêt Economique, GIE) (MINEFI – DGTPE, 2006). Les plus connus sont présentés sur le tableau 1.2.

Association	Quantité*	Année	Nombre de Sécheurs	Importateur & Label
GIE CDS ¹	83 tonnes	1995	13	Caritas Tairtrade (Suisse) (BIO ⁴) CEAS ² (Ouagadougou) (BIO) Claro Fair Trade SA (Suisse)(BIO) Terre Espoir (Suisse) (BIO) Zur Kalebasse (Suisse) (BIO)
GIE GPS ³	58 tonnes	2000	10	SOPRADEX/ANDINES (BIO)
GIE NAFA	40 tonnes	2002	6	GEBANA (Suisse) (BIO)

Tableau 1.2 (CODEPA⁵, 2004): Les principales associations de sécheurs du Burkina Faso.

Ces trois associations à elles seules ont produit en 2003, 181 tonnes de mangues séchées soit environ 3200 tonnes de mangue fraîche transformée, générant des ressources d’environ 724 millions de FCFA. Récemment, d’autres jeunes associations sous couvert d’autres labels participent à la transformation par séchage de la mangue. Parmi ces jeunes associations, on peut citer celles qui exportent la mangue sous le label MAX HAVELAAR et

¹CDS : Cercle Des Sécheurs ²CEAS : Centre Ecologique Albert Schweitzer

³GPS : Groupement des professionnels du séchage ⁴Label des produits biologique ⁵Comité de Coordination pour le Développement et la Promotion de l’Artisanat africain * Estimation de 2003

Le centre BASNERE (FNGN) parrainé par la coopération décentralisée Chambéry/Ouahigouya sous le label « *les fruits de la solidarité*® ». A Bobo Dioulasso, les femmes de l'AFAD ont aussi créé une unité de production de mangues séchées, soutenues par la COFIDES et le GESTM du Mans. A tout ceci, s'ajoutent d'autres sociétés exportatrices modestes telles que PROMEXPORT, BFL, BOLY EXPORT, UCOBAM, STANLE EXPORT, PANIER DE LA MENAGERE, FRUITECH, RANCH DU KOB, BURKINAVENTURE (MINEFI – DGTPE, 2006). Certaines de ces associations sont regroupées au sein de l'APFELB et l'APEX, deux associations professionnelles.

Produit & Source	Mangues, goyaves & Mangoustan			Mangues & Goyaves		
	ONAC (Statistiques douane)			INS-D-DEE-SSEC Eurotrace		
Année	Q(t) ¹	Valeur ³	Valeur en % ⁴	Q(t)	Valeur	Q(t) ² séchées
1992	669	31	6.4	-	-	602.1
1993	944	45	8.3	-	-	849.6
1994	2 229	257	15.5	-	-	2006.1
1995	1989	101	6.0	-	-	1790.1
1996	1905	256	16.6	-	-	1714.5
1997	2518	170	5.5	-	-	2266.2
1998	332	970	36.5	-	-	298.8
1999	6112	208	8.1	5922.3	49.9	5500.8
2000	5985	320	12.9	5859.03	174.18	5386.5
2001	5730	405	16.4	5773.06	189.99	5157
2002	4185	652	34.9	3526.29	584. 87	3766.5
2003	5325	850	45.5	5309.54	770.40	4792.5
2004	1766	725	38.8	1742.56	712.16	1589.4
2005	5468	835	44.7	5378.92	818.46	4921.2

¹ Q(t) : Quantité en tonne ² Quantité séchée = 90%*Q(t) ³ Valeur en million de FCFA

⁴ Pourcentage des exportations totales des fruits et légumes

Tableau 1.3 : Statistiques des exportations de la mangue Burkinabé de 1992 à 2005

(Source : ONAC (Statistiques douane) & INS-D-DEE-SSEC Eurotrace)

2.3 Réalisations récentes de transformation de mangues

En décembre 2003, le Gouvernement burkinabè a décidé de relancer la filière fruits, ce qui a entraîné la création de la société d'économie mixte SOBFEL (Société Burkinabé des Fruits Et Légumes au capital de 260.8 millions FCFA dont 84.63% sont détenus par des actionnaires privés et 15.33% par l'Etat). Cette société a démarré ses activités en décembre 2004 et la construction d'un terminal fruitier de 10 000 m² (composé d'une chaîne électromécanique moderne de conditionnement et de calibrage des produits (mangues, melons, papayes) de deux chambres froides d'une capacité de 90 m² chacune, d'une aire climatisée de 160 m² pour la récupération des produits et d'un hall de conditionnement ventilé de 500 m²) à Bobo Dioulasso. DAFANI SA, une importante unité industrielle de transformation (au capital de 500 millions de FCFA avec 44 actionnaires privés burkinabé) devrait démarrer ces activités en avril 2007 dans la région d'Orodara (MINEFI – DGTPE, 2006). Son objectif est de transformer la mangue, le tamarin et le bissap en jus et en pulpe, le volet séchage n'étant pas encore envisagé.

2.4 Problèmes récurrents concernant la production et le séchage de la mangue

2.4.1 Problèmes liés à la production

La production de mangue au Burkina Faso est confrontée à d'énormes difficultés dont les conséquences sont les importantes pertes enregistrées à chaque campagne :

- Les pertes dans les vergers : Elles représentent la chute des fruits immatures due à l'attaque de parasites (Rey et al., 2004a): mouche des mangues, champignons, fourmis, la maladie bactérienne des tâches noires due à *Xanthomonas Campestris* pv. *Mangiferae indicae*, l'anthracnose (une maladie fongique due à *Coletotrichum gloeosporioides*), les pourritures pédonculaires ou *stem-end rot* dues aux pathogènes comme *Dothiorella dominica*, *Phomopsis mangiferae*, *Lasiodiplodia theobromae*, etc. Ces pertes in situ peuvent atteindre 60 à 70% des quantités réelles produites par les vergers.
- Les pertes liées à la conservation et à l'écoulement du produit. Ces pertes sont dues essentiellement aux mauvaises conditions de stockage et à la mévente. La restriction et la mauvaise organisation du circuit interne de distribution font que, pendant les périodes de production, les mangues pourrissent dans les zones productrices pendant que l'importante demande des régions non productrices (le Sanematenga, le Soum, l'Oudalan, le Séno

etc.) reste insatisfaite. On assiste à des marchés saturés entraînant la mévente, l'altération et le pourrissement des mangues liés aux mauvaises conditions de stockage. Cela s'explique en partie par les contraintes tels que :

- L'accès difficile aux sites de production à cause des mauvais états des routes.
- L'insuffisance et la non-adaptation des moyens de transport.
- Le manque d'infrastructures adaptées à la conservation des fruits pour la plupart des entreprises traitant la mangue. En dehors du terminal fruitier de Bobo Dioulasso qui vient d'ouvrir ses portes, seules quelques rares entreprises tel que l'UCOBAM, PROMEXPORT, BFL ... disposent des entrepôts frigorifiques pour l'entreposage réfrigéré. Dans le reste des cas, une grande partie des mangues récoltées est stockée à même le sol ou sur des nattes, ou en carton, à la température ambiante. Cette dernière étant généralement élevée (>35°C) pendant la période de production, cela entraîne une élévation des risques d'altération et de pourrissement.

2.4.2 Les problèmes liés au séchage et à la commercialisation

Les contraintes liées au séchage de la mangue au Burkina Faso sont principalement :

- Le manque de dispositif de séchage approprié et adéquat aux quantités de fruits pouvant être séchés. Les séchoirs souvent utilisés pour des produits séchés destinés aussi bien aux marchés locaux, nationaux qu'à l'exportation manquent souvent d'un contrôle affiné des paramètres de séchage (système très mal dimensionné : durée et température non contrôlées en fonction de la taille des tranches et de la charge du séchoir). Les produits obtenus ne sont pas alors à très haute valeur ajoutée pour satisfaire aux exigences des marchés internationaux (séchage inachevé, qualité de séchage médiocre, brunissement du produit, ...).
- Le problème d'énergie : L'utilisation des séchoirs électriques pour l'activité de séchage s'est avérée non rentable à cause des coûts très élevés de l'énergie électrique et qui ne font que grimper d'année en année, mais aussi à cause des coûts élevés de mise en œuvre et de maintenance de ce type de séchoir. En plus, l'énergie électrique n'est pas toujours disponible dans les régions productrices. Les acteurs se sont plutôt penchés pour les séchoirs au gaz (séchoir type ATTESTA et type CADRE) et les séchoirs solaires (Séchoir COQUILLE ou CALEBASSE, séchoir BANCO). Bien que le gaz soit bon marché et l'énergie solaire gratuite, ces deux types de séchoirs présentent d'énormes lacunes qu'il faudrait corriger (inhomogénéité du séchage sur la claie et sur une même tranche, non

maitrise des températures, taille de mangues variables). D'une part, les séchoirs aux gaz sont caractérisés par de fortes températures (70 à 100°C) de séchage difficile à contrôler d'où la qualité médiocre des tranches séchées avec ce type de séchoir (tranches noircies ou brunes et à très faible qualité organoleptique). D'autre part, les séchoirs solaires sont caractérisés par de très basses températures de séchage et une discontinuité du séchage à cause de l'alternance jour-nuit. Cette situation entraîne un séchage incomplet en période humide, une ré-humidification nocturne et surtout l'impossibilité de sécher dès le début de la pluie.

3 Etat de l'art des séchoirs solaires

3.1 Introduction

Le séchage d'un produit peut se faire par *évaporation d'eau* (séchage par ébullition et séchage par entraînement ou séchage convectif), par *sublimation de la glace* (lyophilisation), par *perte mécanique d'eau* (pressage, centrifugation,...) ou par *perte chimique d'eau* (déshydratation osmotique). Les lyophilisateurs combinent l'action du froid et du vide en provoquant la sublimation de la glace, le cristal passant directement à l'état vapeur, sans transition par la phase liquide. La lyophilisation permet d'obtenir des produits secs d'excellentes qualités biologiques tout en préservant la quasi-totalité des vitamines. Ce type de séchage nécessite une haute technologie et est peu utilisé en Afrique de l'Ouest. Les séchoirs à « ébullition » sont utilisés pour avoir de grandes vitesses de séchage. Dans ces séchoirs, la chaleur transmise au produit sert à réchauffer celui-ci jusqu'à sa température d'ébullition. Cette température est d'autant plus faible que la pression dans l'enceinte de séchage est faible. D'où l'intérêt de ce type de séchage pour les produits thermosensibles. Les séchoirs à ébullition sont presque tous du type électrique ou utilisent des combustibles. Les transferts de chaleur dans l'unité de séchage se font par conduction interne ou par rayonnement. Seuls quelques rares séchoirs à ébullition utilisent l'énergie solaire par concentration du rayonnement. Le séchage par ébullition est très coûteux en énergie et n'est presque pas utilisé en Afrique de l'Ouest. Dans cette région, la quasi-totalité des séchoirs utilisés (séchoirs solaires, à combustible et une grande partie des séchoirs électriques) sont du type « entraînement ». Dans ce type de séchoir appelé séchoir convectif, le produit est placé dans un courant d'air chaud et sec dont la pression de vapeur est inférieure à celle de l'eau dans le produit. L'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est alors prise à l'air et la vapeur produite est emportée par l'air. Lorsque l'apport de chaleur sensible de l'air de séchage est exactement égal à l'énergie nécessaire à la vaporisation, le séchage est qualifié d'"isenthalpique". Dans ce cas, l'étude et le dimensionnement du séchoir peuvent se faire grâce au diagramme de Mollier (Daguenet, 1985; Fondu, 1994; Lozano, Rostein & Urbicain, 1980).

3.2 Classification des séchoirs solaires

Depuis le choc pétrolier des années 1980, la technique du séchage solaire a beaucoup intéressé les chercheurs pour répondre aux besoins énergétiques liés à la conservation des fruits et légumes. Le séchage solaire a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques et demeure encore de nos jours l'un des domaines privilégiés de la recherche notamment dans les pays en voie de développement où l'utilisation des méthodes technologiques simples existe toujours (Nganhon & Nganya, 2003). En zone rurale, de nombreux planteurs et agriculteurs continuent de pratiquer le séchage traditionnel au soleil en étalant les produits à même le sol, sur des nattes ou encore sur des haies de ciment, les exposant aux intempéries atmosphériques, aux insectes et à la poussière. Ce qui peut entraîner, non seulement la pollution des produits séchés mais aussi une diminution considérable de leur qualité. Face à ces difficultés, les séchoirs solaires se présentent comme une alternative à ces procédés rudimentaire de conservation. D'où une nécessité de développer leur conception et leur technologie en vue d'une utilisation thermique optimal du rayonnement solaire pour l'obtention de produits séchés de qualité.

On peut classer les systèmes de séchage solaires en se basant sur 3 critères principaux :

- Le mode d'exposition des produits au rayonnement solaire, on distingue (fig.1.3) :
 - *Le séchoir direct* dont les produits sont directement exposés au rayonnement solaire à travers la couverture transparente; les produits à sécher jouent alors le rôle d'absorbeur du capteur.
 - *Le séchoir indirect* dont les produits sont placés dans une unité de séchage séparée du capteur solaire à air; l'air est chauffé ou préchauffé dans le capteur en amont avant d'être envoyé dans l'unité de séchage.
 - *Le séchoir mixte* : l'air chaud venant de l'insolateur traverse le lit de produits en même temps qu'il absorbe le rayonnement solaire à travers une couverture transparente.
- Le mode d'écoulement d'air (fig.1.3) : on a alors :
 - Les séchoirs en convection naturelle (*séchoir passif*) dont l'écoulement d'air du capteur vers l'unité de séchage est dû généralement à un gradient de masse volumique résultant d'un gradient de température.
 - Les séchoirs en convection forcée (*convection forcée*) où l'écoulement d'air est lié à un gradient de pression totale généré par un système de ventilation incorporé au système.

- Le mode de chauffage de l'air : l'élévation de la température de l'air peut se faire à l'aide du capteur seulement (séchoirs solaires sans appoint d'énergie) ou du capteur avec un appoint d'énergie (gaz, électrique) associé à l'unité de séchage (séchoirs hybrides).

Quatre types de combinaisons de ces critères ont attiré l'attention des chercheurs :

- Les séchoirs indirects en convection forcée avec l'unité de séchage séparée du capteur placé en amont,
- Les séchoirs indirects en convection naturelle,
- Les séchoirs directs en convection naturelle
- Les séchoirs hybrides.

D'une manière générale, le rendement global des séchoirs en convection forcée est plus élevé que celui des séchoirs en convection naturelle. Cependant, les séchoirs en convection naturelle semblent les plus utilisés car peu chers, malgré leur manque de satisfaction (Daguenet, 1985). Pour augmenter les performances du séchoir, la meilleure approche consiste à ajouter cheminée, boucle de recyclage d'air, dispositif de stockage d'énergie ou dispositif de pompage (ventilateur, extracteur etc.) qui rendent le séchage possible sous des conditions climatiques plus variées. Les objectifs de notre étude s'inscrivent dans le cadre de la réalisation et de la modélisation du fonctionnement d'un séchoir à mangue de type solaire indirect en convection forcée.

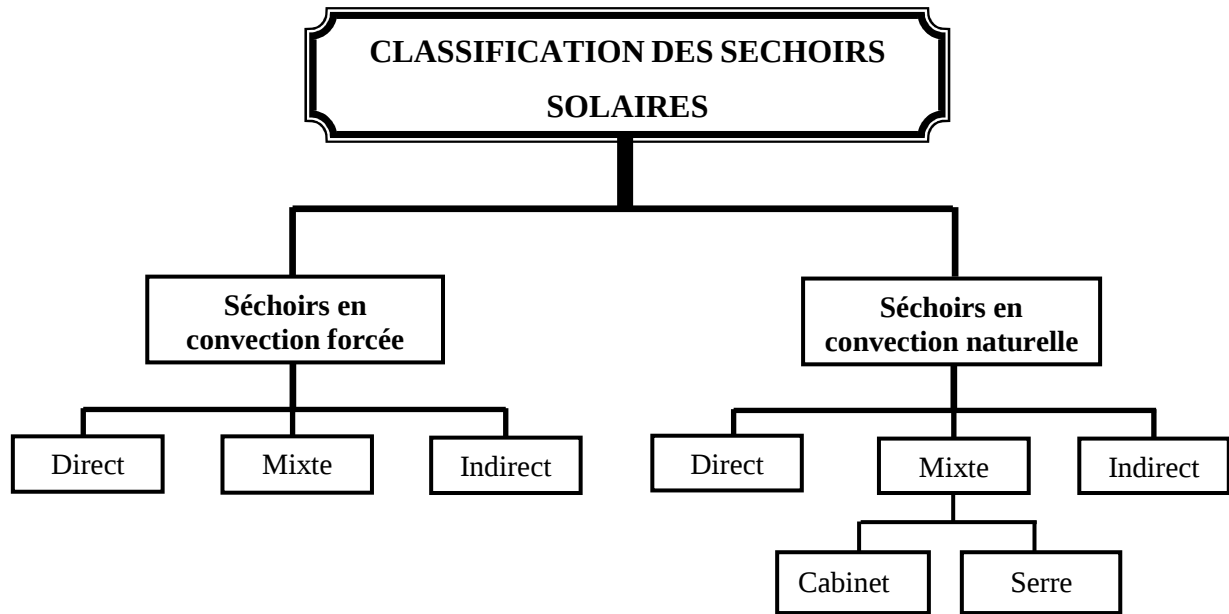


Fig. 1.3. Classification des séchoirs et des modes de Séchage

3.3 Technologie des séchoirs solaires indirects

Un séchoir solaire indirect est composé essentiellement :

- D'une unité de production d'énergie : le capteur solaire à air
- D'une unité de consommation d'énergie : l'unité de séchage

3.3.1. Le capteur solaire à air

Un capteur solaire ou insolateur est un dispositif servant à réaliser à partir du rayonnement solaire un gain d'énergie thermique utile au chauffage de l'air ou de l'eau. Il peut être du type capteur plan ou à concentration. Les capteurs à concentration utilisent un réflecteur de forme particulière permettant de focaliser les rayons solaires tombant sur la surface absorbante en vue d'accroître l'intensité du rayonnement reçu. Ils permettent ainsi d'atteindre des températures plus hautes que les capteurs plans. Cependant pour des applications se limitant uniquement au séchage solaire, les capteurs solaires plans offrent des élévations de températures satisfaisantes et ont un coût plus faible. Un capteur solaire plan est constitué essentiellement d'une surface absorbante peinte en noir, qui absorbe le rayonnement

solaire et le transmet thermiquement à un fluide caloporteur qui est généralement l'air ou l'eau. En séchage solaire, l'air utilisé comme fluide caloporteur circule généralement à travers un conduit dont l'un des cotés est l'absorbeur.

3.3.1.1 Les capteurs type plaque absorbante

3.3.1.1.1. Mode de fonctionnement

Dans ce type de capteur, la tôle est généralement utilisée comme absorbeur. Cette tôle sous l'effet des rayons solaires s'échauffe et va réémettre des rayons infrarouges de grandes longueurs d'onde :

- Côté supérieur, les rayons infrarouges seront piégés par le vitrage qui leur paraît opaque. La distance tôle – vitre doit alors être dimensionnée pour limiter au mieux les pertes par conduction convection dans la couche d'air emprisonné.
- Coté inférieur, les rayons infrarouges vont chauffer le fond du capteur ; l'air circulant entre la tôle et le fond du caisson va acquérir des calories par convection au contact de ces deux surfaces (Fournier & Maurissen, 1993).

Ces modèles de capteurs solaires peuvent être classés en capteurs "*sans couverture transparente*" et en capteurs "*à couverture transparente*".

3.3.1.1.2 Capteurs "*sans couverture transparente*"

Ce sont les formes de capteurs les plus simples. Comme le montre la figure 1.4, ils sont constitués simplement d'un conduit d'air dont la partie supérieure joue le rôle d'absorbeur tandis que la face arrière est isolée. Ils ont généralement un rendement de captation supérieur à celui des capteurs solaires à air "*à couverture transparente*" de l'ordre de 10% à cause des déperditions optiques lors de la transmission du rayonnement incident à travers la couverture transparente (Ekechukwu & Norton, 1999b). Par contre, les capteurs solaires à air "*sans couverture transparente*" présentent un rendement thermique inférieur à celui des capteurs solaires à air "*avec couverture transparente*" à cause des pertes par convection sur la surface absorbante. Néanmoins, la faible performance thermique des capteurs solaires à air "*sans couverture transparente*" est compensée par leur simplicité et leur moindre coût.

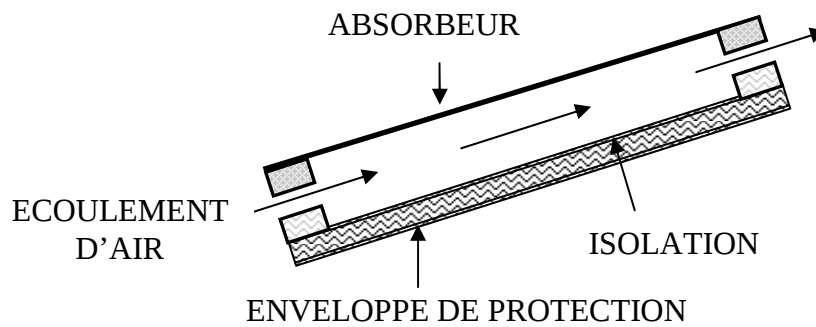


Fig.1.4. Capteur solaire à air "sans couverture transparente"

3.3.1.1.3. Capteur "à couverture transparente"

On peut minimiser les pertes en avant dans un capteur solaire en plaçant au dessus de la plaque absorbante une ou plusieurs couvertures transparentes généralement en matière plastique, en verre ou en plexiglas. Cette couverture transparente empêche les pertes de chaleur par convection sur la plaque absorbante, réduit les pertes dues aux rayonnements de grande longueur d'onde et protège la plaque absorbante contre le refroidissement en cas de pluie. Elle doit être nécessairement opaque à l'infrarouge de grande longueur d'onde. Les capteurs "à couvertures transparentes" sont recommandés lorsqu'on désire élever la température du fluide caloporteur de 10 à 35°C au dessus de l'ambiante (Ekechukwu & Norton, 1999b). Ils ont généralement un rendement thermique plus élevé que les capteurs "sans couverture transparente " bien que leurs coûts de revient et de maintenance soient plus élevés. Les capteurs solaires à air "à couverture transparente " les plus utilisés sont :

- *Les capteurs solaires à air passe-avant* : L'air à chauffer circule dans le conduit entre la couverture transparente et la plaque absorbante. Elle lèche ainsi la plaque chauffée par effet de serre (fig.1.5). Le terme passe-avant signifie donc que l'air passe au dessus de l'absorbeur.

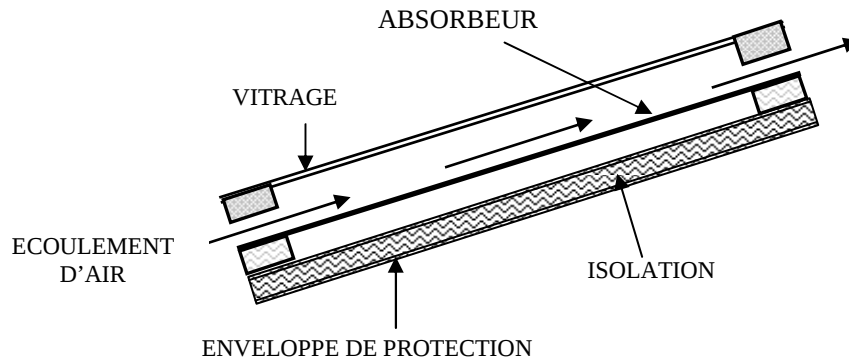


Fig. 1.5 Capteur solaire à air passe-avant

- *Capteurs solaires à air passe-arrière* : Une couche d'air statique sépare l'absorbeur de la couverture transparente et l'air caloporteur circule entre l'arrière de l'absorbeur et l'isolation inférieure comme le montre la figure 1.6. Les capteurs solaires à air passe-arrière ont généralement un rendement plus élevé que ceux à air passe-avant (Ekechukwu & Norton, 1999b).

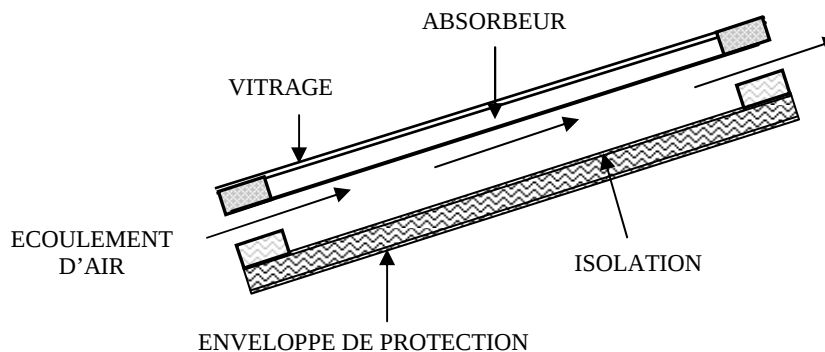


Fig.1.6 Capteur solaire à air passe-arrière

- *Les capteurs solaires à air multi-passes* : L'air circule sur les deux faces de l'absorbeur suspendu, augmentant la surface d'échange. L'inconvénient de ce type de capteur est que l'absorbeur se retrouve à une basse température et rayonne moins d'énergie. Les capteurs solaires à air multi-passes les plus courants sont ceux à passe-parallèle (fig.1.7.a), double-passes (fig.1.7.b), et à plaque absorbante perforée (fig.1.7.c).

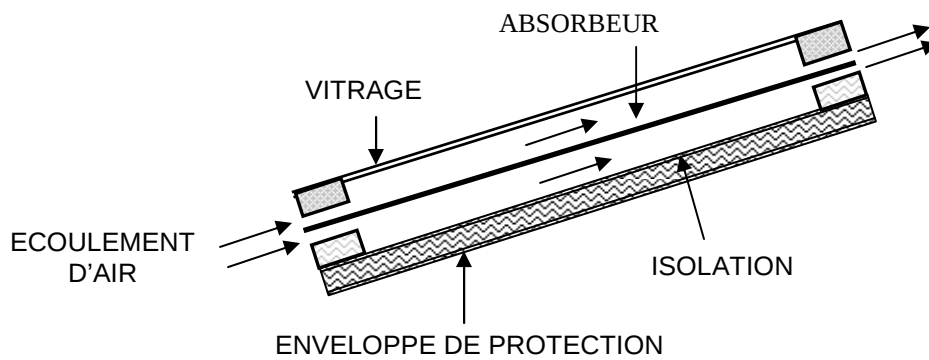


Fig. 1.7.a. Capteur Solaire à Air passe-parallèle

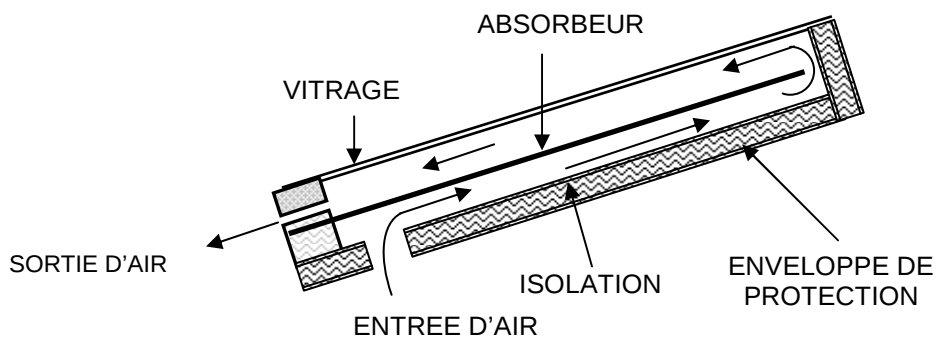


Fig.1.7.b. Capteur Solaire à Air double-passes

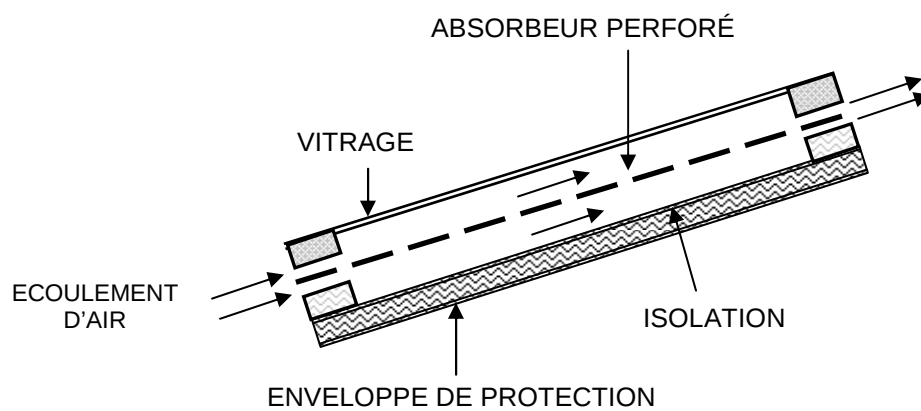


Fig.1.7.c. Capteur Solaire à Air à plaque perforée

3.3.1.2 Les capteurs solaires à air à absorbeur poreux

Ils sont aussi connus sous le nom de capteurs solaires à air à matrice poreuse. La différence d'un tel type de capteur avec le type plaque absorbante est que l'air traverse l'absorbeur (Fournier & Maurissen, 1993). Celui-ci est constitué d'une matrice poreuse (grille, copeaux, mousse etc.) très perméable à l'air, mais suffisamment épaisse pour être opaque au rayonnement incident qui le chauffe (fig. 2.5). Cette configuration de capteur a donné lieu à des travaux parmi lesquels on peut citer ceux de Clary et Morgan (1977); de Chiou, El-Wakil et Duffie (1965); de Hamid et Beckman (1969); de Lansing et Clarke (1979); de A. Hammou et al. (1982); de M. Dagenet (1985); etc.. Dans ce type de capteur, la chaleur piégée dans l'absorbeur est transmise à l'air qui le traverse. L'absorbeur est formé d'une matrice poreuse finement et régulièrement divisée et présente donc une surface spécifique beaucoup plus grande qu'une simple tôle.

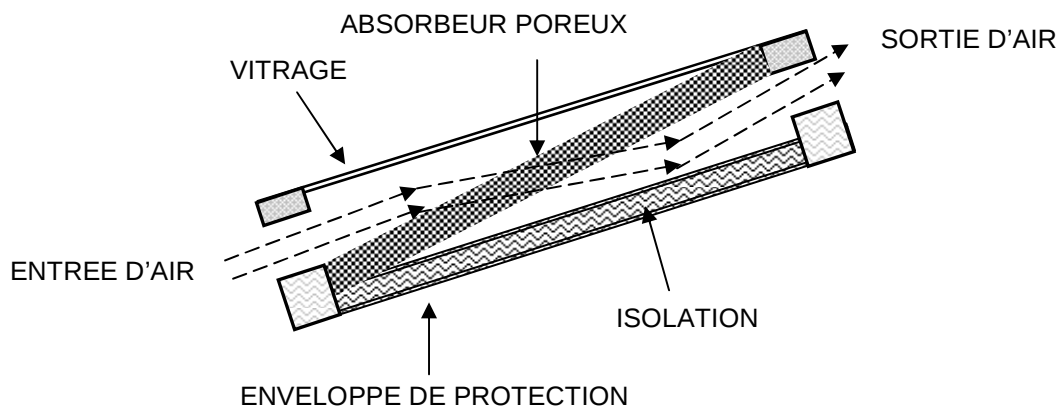


Fig.1.8. capteur solaire à air à absorbeur poreux

La différence entre le fonctionnement de ce type de capteur et celui du type tôle est que l'air traverse l'absorbeur qui lui est très perméable, mais l'absorbeur est suffisamment épais pour être opaque au rayon qui le chauffe. L'air froid circule entre la vitre et l'absorbeur tandis que l'air chaud circule entre l'absorbeur et le fond isolant (fig. 1.8).

3.3.1.3. Critère de choix des éléments d'un capteur solaire

Les paramètres principaux dont dépend la quantité d'énergie absorbée et transmise par un capteur solaire sont :

- L'insolation et l'orientation du capteur,
- L'absorptance du système,
- La transmittance de la couverture transparente.

3.3.1.3.1. L'insolation et l'orientation du capteur

Tout capteur solaire à air doit tenir compte de l'insolation du site car l'énergie absorbée augmente avec le degré d'insolation. Il est donc une nécessaire de relier la chaleur utile du capteur à la charge de séchage (Ekechukwu & Norton, 1999b). Pour augmenter le rendement de captation, la surface absorbante doit être perpendiculaire au rayonnement au midi solaire d'une journée type de la période de l'année pendant laquelle l'opération de séchage a lieu. Selon le site, le capteur doit être alors orienté vers le nord ou le sud, avec une inclinaison par rapport à l'horizontale. L'inclinaison idéale d'un capteur au midi solaire d'un jour donné pour un site défini peut être obtenue à partir de la relation (Ekechukwu & Norton, 1999b):

$$\beta = (\phi - \delta) \text{ et } \delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1.1)$$

Où δ est l'angle de déclinaison, le numéro du jour dans le mois et ϕ la latitude du site.

3.3.1.3.2. L'absorbeur

La fraction d'énergie du rayonnement solaire incident absorbée par le capteur plan dépend en grande partie de l'absorptance de la surface absorbante, donc de la nature de l'absorbeur. Le matériau d'absorption doit avoir à la fois :

- Une forte absorptance du rayonnement incident,
- Une faible émissivité,
- Une bonne conductivité thermique,
- Une faible masse volumique et
- Une stabilité thermique à la gamme de température d'opération.

En plus, il doit être durable et de faible coût.

Les feuilles métalliques noircies sont généralement utilisées comme absorbeur à cause de leur simplicité et de leur faible coût de revient. Les films plastiques noirs, le charbon, la cendre, les cailloux noircis, le bois noirci, etc, sont souvent utilisés comme absorbeurs. Le choix du matériau absorbant dépend surtout de son coût et de sa disponibilité.

3.3.1.3.3. La couverture transparente

La transmittance de la couverture transparente est l'un des facteurs important pour la quantité d'énergie absorbée par le capteur. Le matériau utilisé doit avoir les qualités suivantes :

- Forte transmittance dans le domaine du visible du spectre électromagnétique,
- Faible transmittance (opacité) à l'infrarouge de grandes longueurs d'onde afin de pouvoir piéger les rayons réfléchis par l'absorbeur,
- Faible absorptivité,
- Forte stabilité aux températures de fonctionnement,
- Résistance à la cassure,
- Durabilité sous les conditions climatiques du lieu.

En outre, le matériau doit être moins peu coûteux et disponible. Le verre est souvent utilisé comme couverture transparente à cause de sa forte transmittance au flux solaire visible, sa faible transmittance à l'infrarouge et sa stabilité aux hautes températures (Duffie & Beckman, 1974; Inova & Andonov, 2001; Kolb, Winter & Viskanta, 1999). Cependant, son coût élevé, sa faible résistance et sa masse volumique relativement élevée ont amené certains auteurs à envisager le film plastique (Jannot & Coulibaly, 1997; Njomo, 1998) comme couvertures transparentes d'alternative. Malheureusement, l'utilisation du film plastique est limitée à cause de sa faible résistance aux fortes températures et sa dégradation en présence des rayons ultraviolets.

Finalement, la désignation d'un type de capteur donné pour une opération de séchage spécifique se fait en se basant sur sa capacité à élever la température de l'air de séchage.

Ainsi :

- Les capteurs solaires "*sans couverture transparente*" sont appropriés pour des élévations de températures de l'ordre de 10°C (Ekechukwu & Norton, 1999b). Cependant, dans ce type de capteur, les pertes thermiques de l'absorbeur sont élevées, il est alors nécessaire d'avoir un bon coefficient d'échange thermique entre l'absorbeur et l'air. Pour cela, il est

recommandé d'utiliser une vitesse de l'air assez élevée de l'ordre de 5 m/s (Hodali, 1997). L'utilisation de vitesses de l'air trop élevées est être limitée car elle nécessite des ventilateurs puissants.

- Pour des élévations de températures comprises 10 et 35 °C, des capteurs "à couverture transparente " permettent de limiter les pertes thermiques de l'absorbeur (Ekechukwu & Norton, 1999b). Lorsque l'élévation souhaitée tend vers 35°C, les capteurs à une seule couverture semblent plus performants que les capteurs à 2 ou 3 couvertures.
- Pour des élévations de températures supérieures à 35°C, le choix du matériel approprié devient difficile car la couverture transparente devient de moins en moins opaque aux rayons infrarouges de grandes longueurs d'ondes en même temps que l'émissivité de l'absorbeur augmente. Les organes du capteur doivent alors être choisis en tenant compte de leurs propriétés thermiques (émissivité, transmittance, absorptance etc..) et mécaniques de manière à garantir une bonne efficacité du dispositif (Hodali, 1997).

3.3.2 Enceinte de séchage et organes de circulation d'air

La forme et les dimensions d'une unité de séchage en vue d'une opération de séchage dépendent essentiellement du mode de séchage, du type de produit à sécher et surtout de la quantité de produit à sécher selon la puissance thermique du capteur solaire. Plusieurs modèles d'unités de séchage ont été conçus et réalisés. Le plus approprié des séchoirs solaire indirect en couche mince est celui de la cage de forme parallélépipédique (Ekechukwu & Norton, 1999a; Nganhon & Nganya, 2003; Bena & Fuller, 2002; Simate, 2003). Il est composé d'une boîte parallélépipédique contenant des claies rectangulaires et dont la partie supérieure est généralement surmontée d'une toiture en V. Son ossature est recouverte d'une isolation sur les parois latérales, la toiture et l'arrière. La toiture en V est souvent munie d'une cheminée dont le rôle est d'augmenter le temps de séjour de l'air dans l'enceinte de séchage et d'assurer la circulation de l'air par différence de masse volumique. Cette cheminée, le plus souvent en métal galvanisé (El-Sebaï, Aboul-Enein, Ramandan & El-Gohary, 2002) ou en PVC (Miri, Mokrani, Siad & Belhamel, 2002) peut être recouverte de peinture noir mate. Enfin, des unités de séchage ont quelques fois un système de recyclage d'air associé à un lit de substances hygroscopiques (gel de silice, ou chlorure de calcium) dont le rôle est d'assécher l'air humidifié par la vapeur d'eau reçus des produits. Le tableau 1.1 présente un

résumé des rôles des principaux organes d'une unité de séchage en couche mince ainsi que le choix du type de matériau pour chacun d'eux.

Organes	Rôle	Matériau
Cage de Séchage	• Protéger les produits de l'ambiance • Maintenir les supports de produits • Assurer et conduire la circulation d'air	bois traité, tôle en fer contre-plaqué, béton paille tressée
Claie	• Supporter la charge de produit prévu • Assurer le contact entre l'air et le produit	grillage galvanisé, grillage en nylon, filets de pêche, nattes en plastique, nattes en fibres, latte
Ventilateur	• Renouveler l'air près des produits • Augmenter les transferts thermiques	Ventilateur électrique Ventilateur à éolienne Extracteur
Cheminée	• Augmenter le temps de séjour de l'air • Assurer l'écoulement de l'air	Tube PVC ou métal noirci ou autres matériaux
Substance hygroscopique	• Retenir l'humidité de l'air	Gel de silice Chlorure de calcium
Recyclage d'air	Elever la température d'entrée de l'air	Tube PVC

Tableau 1.4. Rôle et choix du type de matériau des principaux organes de l'unité de séchage

4 Les séchoirs utilisés au Burkina Faso

Jusqu'aux années 1990, le séchage traditionnel était le principal moyen de conservation. Il consistait à étaler les denrées au soleil à même le sol ou sur des nattes. Par la suite, trois approches de séchoirs ont été essayées pour obtenir des produits séchés marchés-régionaux ou pour exportations. Dans un premier temps, on a assisté à une prolifération de séchoirs solaires de petites tailles afin d'augmenter la capacité de production, puis il y a eu des séchoirs solaires de grandes tailles avec des technologies plus avancées et enfin des séchoirs améliorés utilisant soit le solaire, soit un combustible (gaz) ou les deux à la fois.

4.1 Les séchoirs solaires

4.1.1 Le séchoir « coquillage » ou « calebasse »

Conçu pour protéger les aliments contre les insectes et la poussière, il est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière. En fonction des trois modèles existants, ses dimensions sont : diamètre: 70, 90 et 110 cm; surface de séchage: 0.5, 1.4 ou 2.2 m². Ce séchoir dont la charge totale varie de 2 à 10 kg selon le modèle, comporte deux grandes claies circulaires et une petite claie. Sa capacité est environ 5 kg de produit frais par m² de claie. La construction de ce type de séchoir est réalisable par des artisans du village avec des matériaux disponibles localement : fers de 6 et 8 mm de diamètre, cornières, grillage galvanisé maille fine, tôle 10/10, claie avec tamis en nylon, peinture noire mate, antirouille. Sa durée de vie est environ 10 ans et son entretien, se limite au renouvellement du tamis des claies et de la peinture noire des tôles. Dans ce séchoir robuste, on observe une montée significative de la température de l'air qu'en fin de séchage du fait de la convection naturelle.

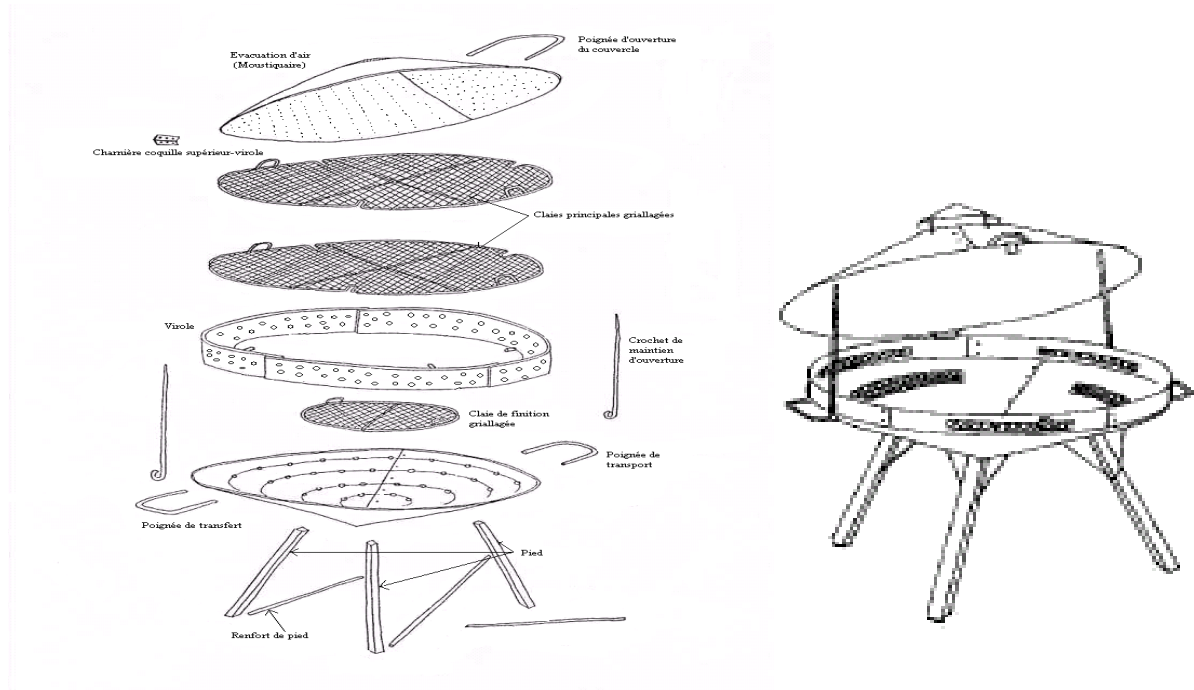


Fig. 1.9. Schéma d'un séchoir coquillage (Onadja & Rozis, 1996).

4.1.2 Le séchoir « banco »

C'est un séchoir solaire direct conçu et diffusé à partir de 1988 par le CEAS (Centre Ecologique Albert Schweitzer - ONG suisse) auprès des groupements qu'il appuie dans le cadre du séchage des fruits et légumes au Burkina Faso. Il est fabriqué à partir de matériaux locaux constitué avec un bâti en briques (banco) surmonté d'une couverture en film plastique transparent. Sa charge totale est de 120 kg de mangues fraîches séchées en 72 heures.

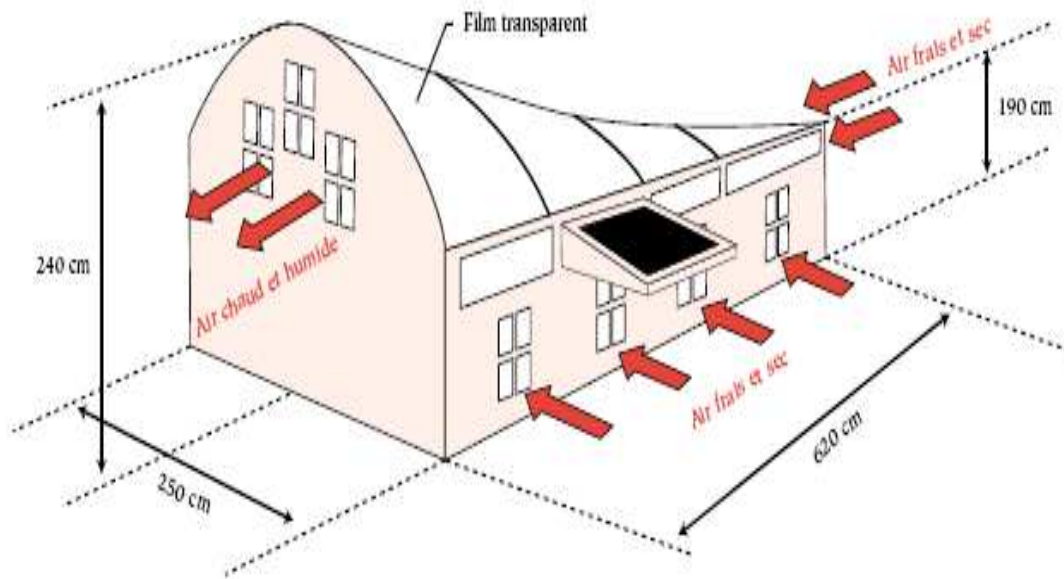


Fig. 1.10. Schéma du séchoir « banco » (Thuillier, Traoré, 1996)

4.1.3 Les limites de ces séchoirs solaires

Ces séchoirs solaires sans capteur solaire présentent d'énormes défaillances vis-à-vis des exigences liées à la stabilisation biochimique des produits agroalimentaires :

- Séchage incomplet en période humide
- Arrêt du séchage dès le début de la saison des pluies.
- Qualité de séchage médiocre.

4.2 Les séchoirs à gaz

4.2.1 Le séchoir à gaz type « Attesta »

Il est constitué d'un bâti en briques de dimensions 2.3 m x 1.1 m x 2.2 m et de deux unités de séchage concomitantes, ayant chacune une entrée d'air, un brûleur, une gaine de séchage et 10 claies de 0.7 m² chacune. L'air entre par le bas à l'avant du séchoir et a un débit variable de valeur maximale de 250 m³/h. La capacité de ce séchoir est de 6,5 kg de produits frais / m² de claie, soit 46 kg de produits frais par unité. Sa construction nécessite les matériaux suivants: acier, banco, claie de type moustiquaire. Sa durée de vie est variable. La moustiquaire des claies doit être changée chaque année.

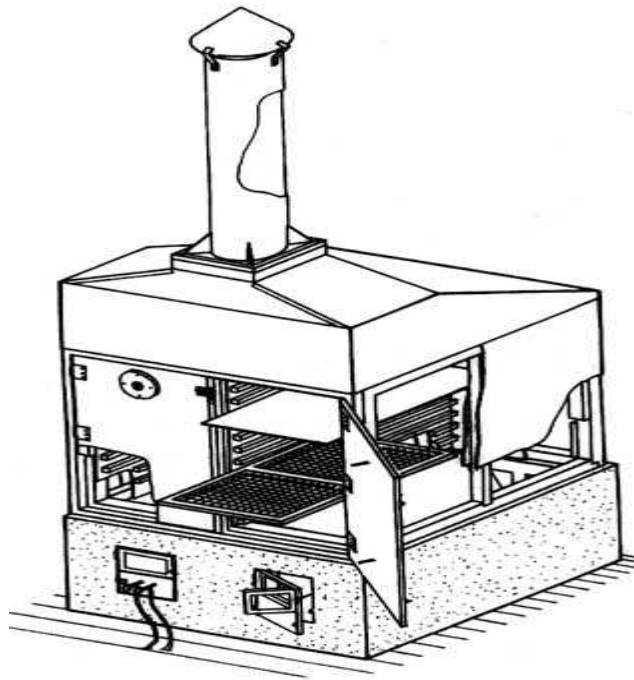


Fig. 1.11. Schéma du séchoir à gaz « Attesta »

4.2.2 Le séchoir à gaz type « Cadre »

Il fonctionne au gaz jour et nuit en convection naturelle avec réglage manuel de la température. Son niveau de technicité faible (absence de convection forcée, de système de sécurité et de régulation de gaz) fait qu'il peut être fabriqué localement. Ce séchoir permet de transformer près de 100 kg de mangues fraîches par cycle de séchage soit 15 à 18 kg de produit sec. Bien que ce séchoir soit adapté aux besoins des usagers, il a très tôt montré ses limites : hétérogénéité du séchage, faible performance énergétique, nécessité de prétraitement chimique pour limiter les risques bactériologiques, etc. Ces lacunes ont été corrigées en partie par un système de convection forcée.

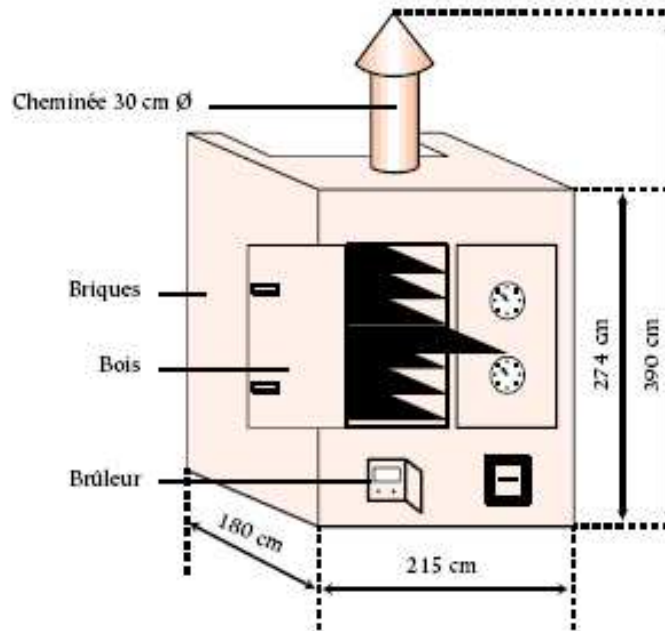


Fig. 1.12 (Thuillier, Traoré., 1996). Séchoir à gaz type « cadre »

4.3 Le séchoir électrique de type tunnel Cartier

C'est un séchoir qui a constitué une avancée technologique pour le séchage agro-industriel au Burkina Faso. Il est à convection forcée et est basé sur le principe du séchoir tunnel. Ce séchoir est constitué d'une unité de séchage à deux chambres, l'une pour accueillir les chariots de fruits, l'autre pour les organes techniques de chauffages et de ventilation. Il comporte :

- Un bâti en briques cuites de 4.6 m x 2.2 m x 2 m .
- Des barres métalliques en T de 5 x 2.4 cm; soutenues par les briques du toit.
- Une cloison intérieure en briques cuites permettant la circulation de l'air en boucle et séparant 2 couloirs:
- Un couloir dans lequel l'air est chauffé puis propulsé
- Un couloir pouvant recevoir les produits sur 2 chariots de 32 claies chacun.
- Le système de chauffe est un brûleur torche de puissance moyenne 40 kW incorporé dans un foyer avec pare-flamme
- Un système d'aération constitué d'un moteur électrique (220 V, triphasé), d'un ventilateur tripale (1500 tours/mn, 8 000 m³/h) relié au moteur par une courroie, une

trappe d'entrée d'air frais à ouverture modulable pour contrôler le taux de recyclage de l'air et d'humidité dans le séchoir, un conduit de sortie d'air humide par le toit.

- Un système de contrôle et de régulation

Le séchoir tunnel Cartier, conçu pour sécher la mangue, la papaye et la banane, possède 1 à 2 chariots de 32 claies chacun, de capacité 8 kg de produit frais / m² de claie soit 130 kg de produits frais par chariot.

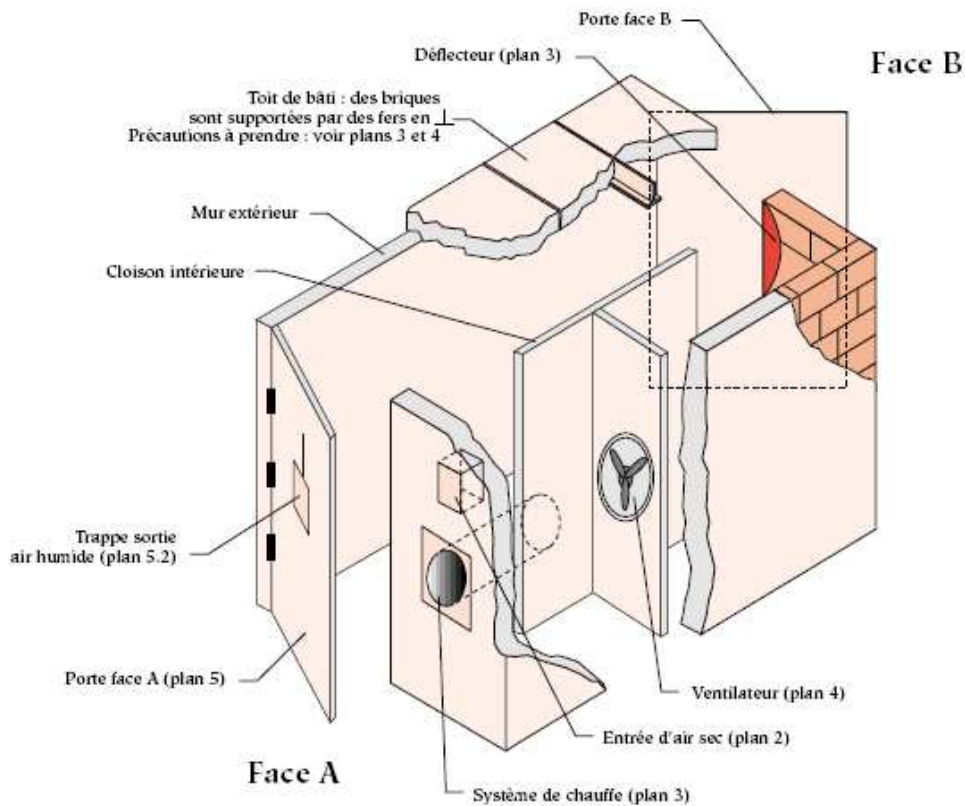


Fig. 1.13 (Thuillier, Traoré., 1996). Séchoir de type tunnel cartier

Conclusion

La mangue est une denrée très périssable produite au Burkina Faso pendant une période très brève de l'année d'Avril à Juillet. Elle exige des techniques appropriées pour sa conservation afin de limiter, le plus possible, les pertes et aussi pour envisager sa transformation et proposer des produits à forte valeur ajoutée. Au Burkina Faso, le séchage se positionne comme le principal procédé de transformation et de conservation de ce fruit. Cependant, les séchoirs solaires et à gaz (séchoir coquillage, Attesta et banco) développés jusque là ne sont pas toujours satisfaisants. Ces séchoirs présentent des défaillances pour de grandes productions car les paramètres de séchage (température, vitesse de l'air, ...) ne sont pas contrôlés. Aussi, les produits séchés destinés à l'exportation sont régulièrement confrontés aux normes de qualité des marchés extérieurs. Il apparaît alors une nécessité de proposer des améliorations de ces systèmes de séchage en utilisant les énergies disponibles. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail dont l'objectif est de proposer un séchoir solaire à absorbeur et de mieux connaître les influences des paramètres à la fois de la mangue et de l'air sur le séchage de ce produit.

CHAPITRE 2

CARACTERISATION DES MANGUES FACE AU SECHAGE CONVECTIF

1. Théorie

1.1 Caractérisation de la variété et de la maturité

1.1.1 La variété

Les fruits des principales variétés de mangues cultivées en Afrique de l'Ouest en général et au Burkina Faso en particulier diffèrent par la taille, la masse, la forme, la couleur de l'épicarpe et du mésocarpe et la composition chimique de la pulpe. Chacune de ces variétés peut être caractérisée par sa morphologie (forme, couleurs, dimensions), sa masse moyenne et ses teneurs en eau, sucre et acide.

1.1.2 La maturité

La maturité est un paramètre primaire très important pour caractériser le procédé de séchage de la mangue. En effet, la composition chimique de la pulpe varie avec l'état de maturité lui-même lié à la vitesse de production ou d'élimination de certains composants du fruit (sucre, acide, etc.). Cette variation peut avoir des conséquences sur la migration d'eau au sein de la matrice solide et influencer sur la diffusivité d'eau au cours du séchage. La maturité d'un fruit comme la mangue peut être caractérisée par le ratio sucre/acide, la couleur de la pulpe ou par la mesure de sa texture.

1.2 Notion d'équilibre air-produit

1.2.1 Modes de liaison de l'eau

On classe les corps contenant de l'eau suivant la nature des liaisons entre cette eau et ses autres constituants (Daguenet, 1985; Bathiebo, 2004). Dans un produit biologique tel qu'un fruit ou un légume peuvent se trouver quatre catégories d'eau que l'on classe généralement en deux types d'eau :

a) *L'eau liée* ou *eau non solvante* qui est fixée aux substances cellulaires polaires sèches.

C'est celle qui se diffuse pendant la désorption à travers les barrières biologiques (membrane cellulaire, espace capillaire intercellulaire) (Fondu, 1994). Cette liaison est très forte pour l'eau liée chimiquement par association moléculaire et encore plus forte pour l'eau insérée dans un réseau cristallin (figure 2.1). Dans ces deux cas, le corps est dit hydraté. L'extraction de cette eau d'hydratation est difficile et ne nous intéresse pas dans le cadre du séchage, car l'extraire revient à détruire le produit (Karathanos, Villalobos & Saravaco, 1990). Cette eau qui reste dans le produit même après séchage représente l'eau des couches mono-moléculaire et poly-moléculaire fortement liée au produit. Elle n'intervient pas dans le processus de dégradation en climat tempéré; mais en climat chaud et humide, elle y contribue à cause de l'élévation de l'activité de l'eau avec la température.

b) *L'eau solvante* ou *eau non liée* dont les molécules sont retenues sur la surface du corps par des forces d'attraction de surface ou d'origine moléculaire ou encore du type Van der Waals (Bathiebo, 2004). La première couche de molécule est fortement retenue (eau de catégorie 3 ou eau osmotique) et la force de rétention chimique diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de la surface vers l'extérieur du corps (eau de catégorie 4 ou eau d'imprégnation) (figure 2.1). Au dessus d'une couche d'eau fortement adsorbée, la tension de vapeur est inférieure à la tension de saturation et le corps est dit *hygroscopique*. Lorsque la tension de vapeur est égale à la tension de saturation, on dit que le corps est *non hygroscopique* et l'on parle d'*eau libre* (Daguenet, 1985 ; Bathiebo, 2004). Cette eau libre correspond au fil d'eau superficiel qui se forme à la surface du produit en début de séchage. Elle s'évapore comme de l'eau libre et peut être responsable de la dégradation du produit. C'est donc elle que l'on cherche à éliminer prioritairement par le séchage (Bathiebo, 2004). Selon la figure 2.1, l'eau libre d'imprégnation (eau de catégorie 4) peut être facilement évacuée car elle n'est pas absorbée. Par contre, l'extraction de l'eau

osmotique (eau solvante absorbée de catégorie 3) nécessite en plus de la chaleur latente de vaporisation un supplément d'énergie appelée enthalpie différentielle.

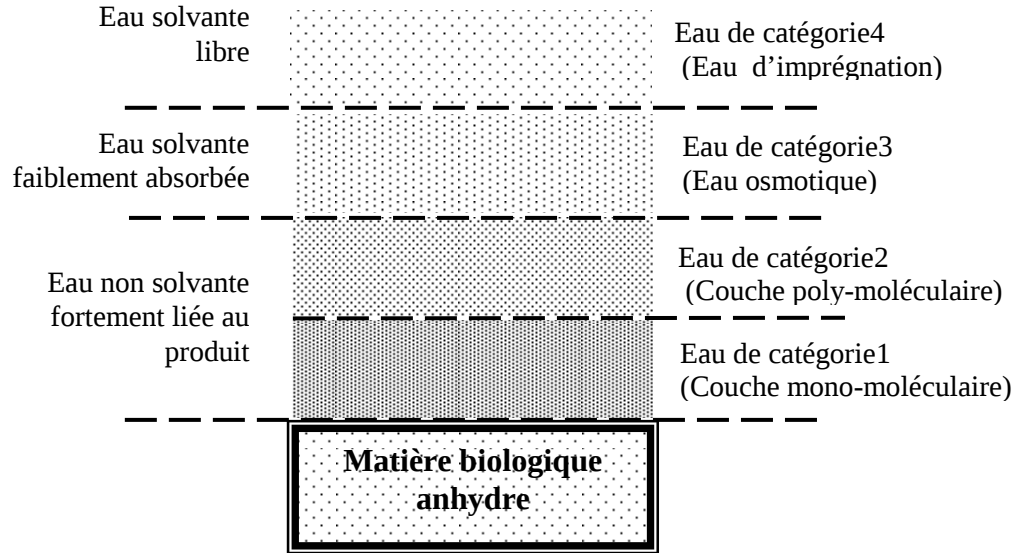


Fig.2.1 : Mécanismes de fixation d'eau dans un produit humide

1.2.2 Teneur en eau d'un produit

La teneur en eau d'un produit caractérise son état de siccité. Soit une masse m de matériau humide contenant une masse m_e d'eau et une masse m_s de matière sèche. La concentration en eau ou teneur en eau de ce produit peut être exprimée par :

- La teneur en eau sur base humide (ou humidité relative ou encore titre en eau (%)) en ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{m.h}}$):

$$x(\text{bh}) = \frac{m_e}{m} = \frac{m_e}{m_e + m_s} = \frac{m - m_s}{m} \quad (2.1.)$$

- La teneur en eau sur base sèche (ou humidité absolue ou taux d'humidité) en ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{m.s}}$) (Daugenet, 1985; Bathiebo, 2004) :

$$X = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2.2)$$

La nomenclature généralement adoptée par les spécialistes du séchage est la teneur en eau en base sèche.

1.2.3 Activité de l'eau dans un produit

1.2.3.1 Activité de l'eau

La teneur en eau d'un produit biologique est un facteur nécessaire mais pas suffisant pour caractériser sa stabilité biochimique pendant la période de conservation. En effet, cette stabilité dépend, en grande partie de l'interaction de l'eau avec les composants que sont les groupements polaires ou ionisés des biopolymères insolubles ou non solubilisés, essentiellement des osides (cellulose, amidon, glycogène) ; les résidus pouvant libérer des liaisons hydrogènes et des protéines (Joël & Sylvie, 2002 ; Roman & Michel, 2000).

Pour un corps pur diphasique ou les phases sont séparées par une interface plane, l'équilibre thermodynamique à une température donnée entre les phases liquide et vapeur correspond à une valeur fixe de pression de vapeur, appelée *pression de vapeur saturante*.

Pour l'eau contenue dans un produit biologique (la mangue par exemple), le déplacement de cet équilibre vers des valeurs plus faibles de la pression de vapeur est exprimé par l'activité de l'eau définie par :

$$A_w(T) = \frac{P_v^{\text{eau du produit}}}{P_v^{\text{eau pure à la même température}}} = \frac{P_{vp}}{P_{vs}(T)} \quad (2.3)$$

Où P_{vp} est la pression de vapeur d'eau dans le produit et P_{vs} la pression de vapeur de l'eau pure.

Pour une température donnée, l'activité est liée à l'écart de potentiel chimique de l'eau dans le produit par rapport à celui de l'eau pure. L'activité traduit ainsi le degré d'attachement de l'eau au support biologique et est représentative de la disponibilité de l'eau contenue dans le produit. Plus l'activité est faible, plus l'eau est liée, moins elle peut participer aux différents processus biochimiques de dégradation du produit et plus il sera difficile de l'évacuer du produit biologique. Lorsque le corps est en équilibre hygroscopique avec l'air, le gradient de pression partielle de l'eau entre le corps et l'air est nul : $P_{vp} = P_v$ et $A_w = HR$. L'activité de l'eau correspond à l'humidité relative de l'air en équilibre avec celui-ci. On en déduit qu'il existe une relation entre la teneur en eau du produit et l'humidité relative de l'atmosphère en

équilibre avec ce produit. C'est l'isotherme de sorption-désorption établie expérimentalement. Pour qu'il y ait séchage, il faut que l'humidité relative de l'air asséchant soit constamment inférieure à l'activité de l'eau du produit recherchée en fin de séchage; de façon à ce que $P_{vp} > P_{vs}$.

1.2.3.2 Activité de l'eau et conservation du produit

L'activité de l'eau, tout comme la température, le potentiel redox ou le pH font partie des nombreux facteurs dont dépend la conservation des produits alimentaires. On peut, par exemple, considérer que les réactions altérant la conservation du produit sont inhibées lorsque l'activité est inférieure à 0.6 (Desmorieux, 1992). A cette activité, les microorganismes n'arrivent plus à prélever l'eau nécessaire à leur développement et les enzymes deviennent inactives comme le montre la figure 2.2. D'après Van der Berg et Bruin (1981), la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans un produit dont l'activité est inférieure à 0.9 ; la croissance des moisissures est stoppée à moins de 0.8 et les bactéries halophiles ne prolifèrent pas en dessous de 0.75 (figure 2.2). Enfin, le point de conservation optimal des produits alimentaires, sans additifs, ni réfrigération se situe entre les activités 0.25 et 0.35 (Daguenet, 1985). Un des intérêts du séchage est donc d'abaisser l'activité de l'eau afin de prolonger la conservation du produit.

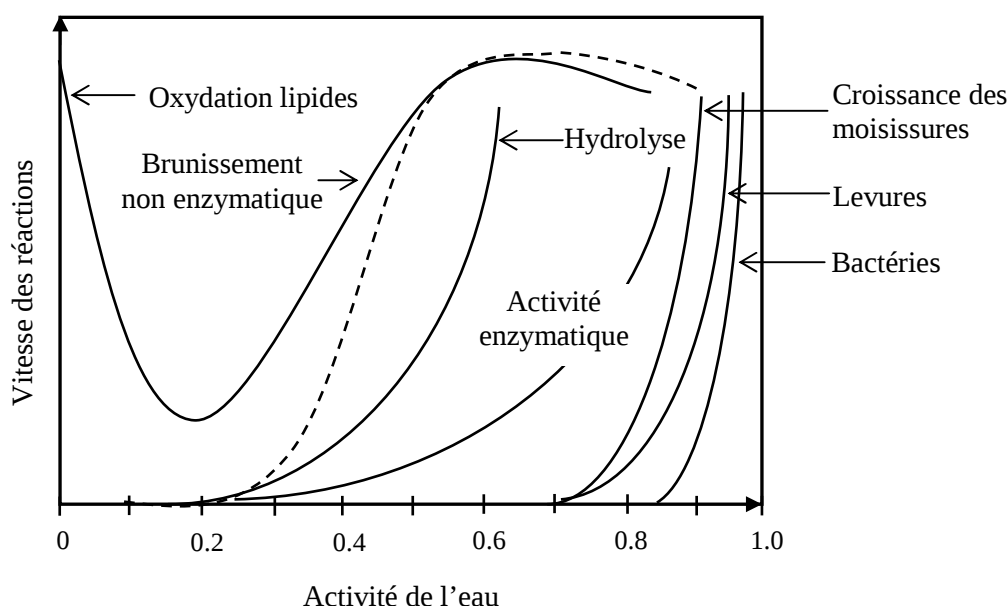


Fig. 2.2 Vitesse des réactions de dégradation des aliments en fonction de l'activité de eau (Van der Berg et Bruin, 1981).

1.2.4 L'isotherme de sorption-désorption

Lorsqu'un produit biologique tel que la mangue est maintenu suffisamment longtemps dans l'air à la température T_a , à la pression partielle P_v et à l'hygrométrie HR, il se produit des échanges d'eau entre ce produit et l'air et sa teneur en eau atteint une valeur d'équilibre X_{eq} . L'isotherme de sorption-désorption, déterminée expérimentalement, représente la relation entre cette teneur en eau d'équilibre X_{eq} et l'activité de l'eau A_w du produit donnée par :

$$X_{eq} = f(A_w) = f\left(\frac{P_v}{P_{vs}}\right) = f(HR) \quad (2.4)$$

1.2.4.1 Isotherme typique d'un aliment

Les courbes de sorption-désorption des aliments affectent classiquement une forme sigmoïde décomposée en trois (3) parties (figure 2.3) qui correspondent aux différents mécanismes de fixation de l'eau.

- *La partie A (eau fortement liée)* correspond aux faibles valeurs de A_w représentant la fixation par adsorption forte d'une première couche de molécule d'eau sur le substrat biologique (couche mono-moléculaire).
- *La partie B (eau faiblement liée)*, sensiblement linéaire, est la région de transition correspondant à la fixation de "plusieurs couches" de molécules d'eau superposées aux précédentes, la liaison étant de moins en moins forte (couche poly-moléculaire).
- *La partie C (eau solvante faiblement adsorbée et libre)*, quasi asymptotique, représente l'accumulation d'eau dans les microporosités puis dans les pores par condensation capillaire. Ce qui explique la pente souvent relevée de cette zone par rapport aux autres.

Dans le cas des produits agro-alimentaires, lorsque l'activité est proche de 1, l'isotherme est tangente à la droite d'équation à $A_w=1$ et présente un point d'inflexion dont l'ordonnée X_M est proche de la teneur en eau critique X_{cr} . La zone au-delà de ce point M ($X_M < X < X_{cr}$) correspond à l'état où les cavités entre les cellules sont vidées d'eau tandis que les parois sont encore saturées.

1.2.4.2 Les différentes formes d'isothermes des aliments

L'isotherme de sorption-désorption diffère généralement d'un produit alimentaire à un autre. La figure 2.4 illustre les profils des courbes d'adsorption généralement rencontrées dans le cas des produits alimentaires. L'examen de ces courbes d'adsorption montre que :

- Pour une humidité relative $HR=1$, il existe une teneur en eau critique X_{cr} , au dessus de laquelle l'activité A_w du produit est toujours égale à 1 avec $X > X_{cr}$, $A_w=1$ et $P_{vp} = P_{vs}$;
- Lorsque la teneur en eau du produit est inférieure à la teneur en eau critique, l'activité de l'eau est inférieure à 1 : $X < X_{cr}$; $A_w < 1$ et $P_{vp} < P_{vs}$. Dans ce cas, le produit est rentré dans le domaine d'hygroscopie et une partie de son eau est fixée par la matière (eau liée).

Cette teneur en eau critique X_{cr} , difficile à déterminer, peut varier avec la température. Pour une activité de l'eau; plus la température augmente; plus la teneur en eau d'équilibre du produit est faible.

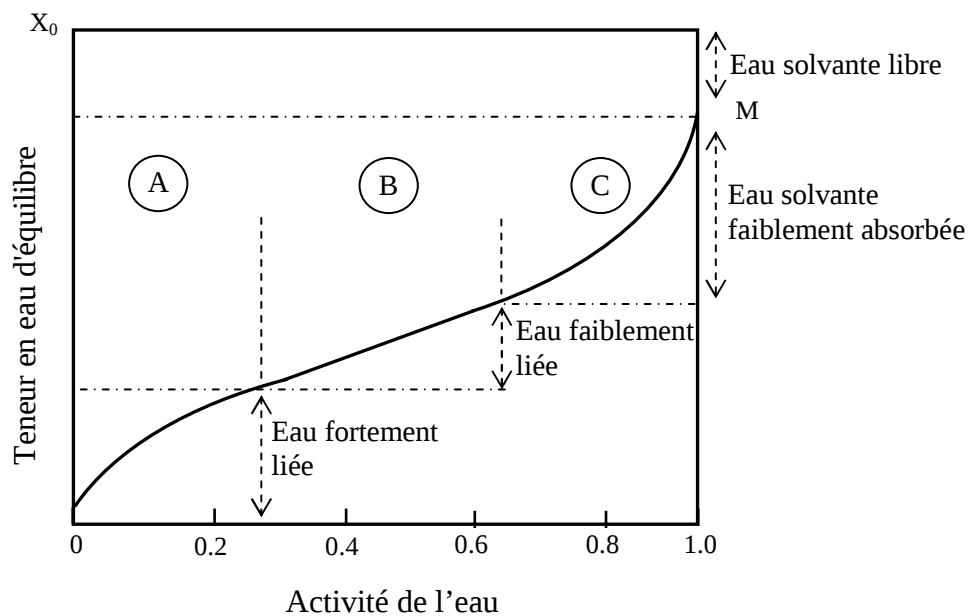


Fig. 2.4: Forme type d'isotherme de sorption-désorption d'un produit alimentaire

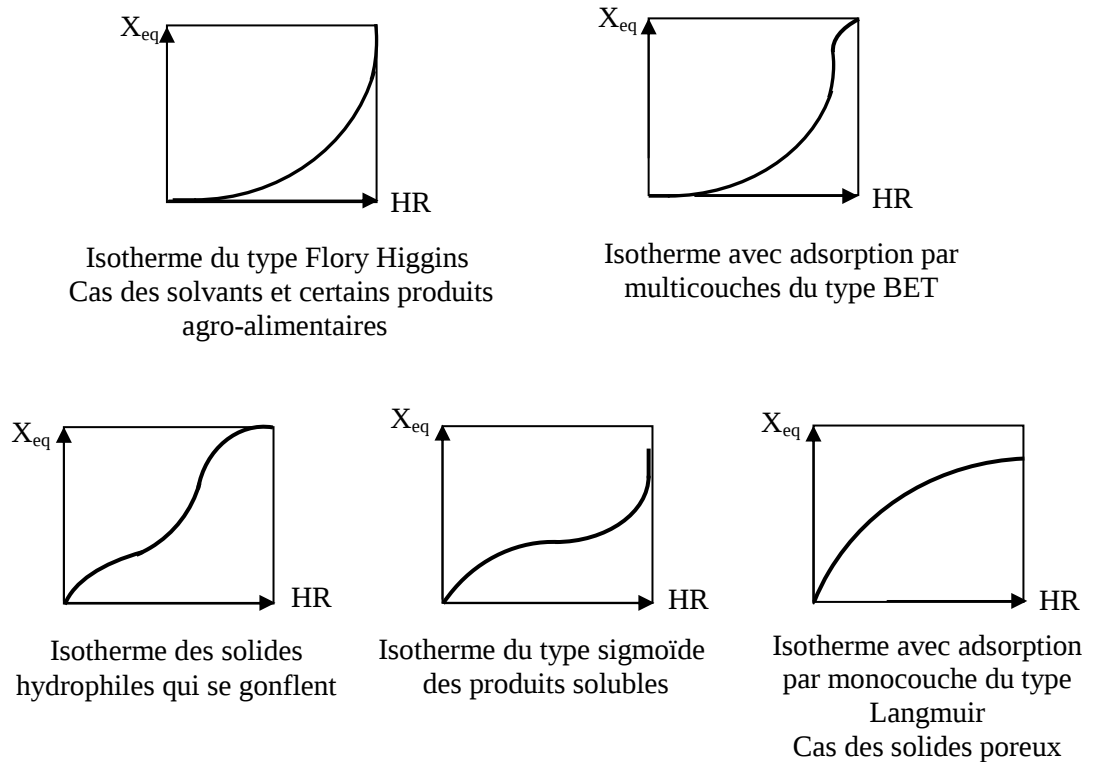


Fig.2.4 (Santanu, Shivhare & Mujumdar, 2006). Types d'isothermes d'adsorption des aliments

1.2.4.3 Hystérésis de sorption-désorption

Les courbes de désorption d'un produit sont en général différentes de celles d'adsorption (figure 2.5) : Il se produit un phénomène d'hystérésis. Beaucoup d'auteurs ont tenté d'expliquer l'hystérésis de sorption-désorption. Kessler (1981) l'a expliqué en considérant un pore rigide relié à son environnement par un petit capillaire :

- Pendant l'adsorption, le capillaire commence à se remplir lorsque l'humidité relative de l'atmosphère en contact augmente, tandis que le pore reste vide. Lorsque la pression partielle de vapeur de l'air devient supérieure à celle du liquide dans le capillaire, le pore se remplit automatiquement de liquide.
- Pour la désorption (séchage), le pore est initialement rempli de liquide à la saturation. Le liquide n'arrive à s'échapper du pore que lorsque la pression de l'air environnant devient inférieure à la pression de vapeur dans le capillaire.

Cette explication de Kessler ne semble pas entièrement valable pour les produits alimentaires. En effet, le retrait et le gonflement du produit, respectivement pendant la désorption et l'adsorption entraînent des pressions capillaires différentes de la normale. Cela pourrait entraîner des variations de teneur en eau dépendant de l'adsorption et de la désorption.

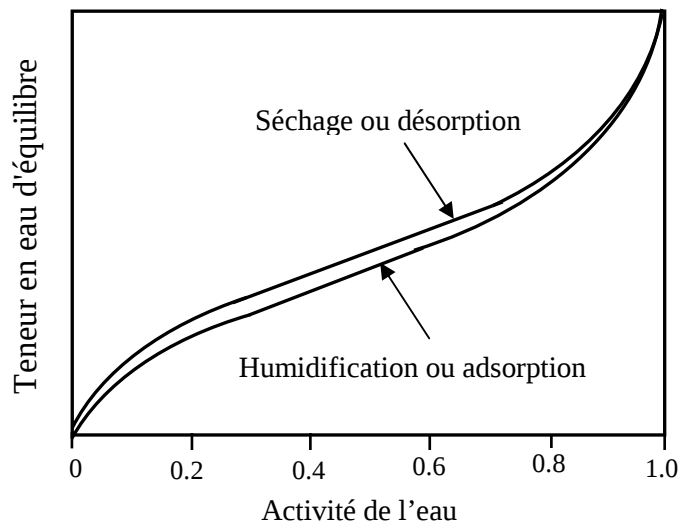


Fig.2.5 : Isothermes de sorption et de désorption d'un type de corps hygroscopique

1.2.4.4 Analyse thermodynamique de la sorption-désorption

Les mécanismes de sorption et de désorption mettent en jeu les énergies de vaporisation et de liaison de l'eau dans le produit.

Chaleur de vaporisation

C'est l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau libre du produit. Elle ne dépend que des conditions extérieures telles que la température et l'hygrométrie de l'air dans la couche limite à la surface du produit et peut être donnée par une relation semi-empirique du type (Daguenet, 1985) :

$$L_v = 597 - 0.56\theta \quad (2.5)$$

où L_v la chaleur latente de vaporisation est exprimée en kcal/kg et θ la température de l'air en degrés Celsius.

Chaleur de sorption ou Enthalpie différentielle

Lorsque l'eau est adsorbée dans un produit, en dessous de la limite entre l'"eau libre" et l'"eau osmotique"; les molécules d'eau sont liées à la matière avec une certaine énergie, appelée énergie de liaison. Cette énergie est plus importante lorsqu'il s'agit d'eau osmotique absorbée ou combinée chimiquement. Cette énergie de liaison appelée enthalpie différentielle

d'adsorption-désorption est l'énergie mise en jeu, en plus de la chaleur de vaporisation pour la désorption (ou l'adsorption) d'eau du produit. Elle est exprimée par la relation de Clapeyron sous la forme (Roman et Michel, 2000) :

$$\Delta H_s = \frac{R}{M_e} \left[\frac{\partial \ln A_w}{\partial (1/T)} \right] \quad (2.6)$$

Avec ΔH_s enthalpie massique de sorption-désorption de l'eau (J.kg^{-1}), M_e (kg.mol^{-1}) masse molaire de l'eau, R constante des gaz parfaits ($R=8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et T température (K). En supposant que les chaleurs de vaporisation et de sorption de l'eau pure sont indépendantes de la température et en fixant la teneur en eau à une valeur donnée; La chaleur de sorption peut être alors déterminée à partir de la forme intégrée de l'équation de Clausius-Clapeyron (Ayrancy, Ayrancy & Dogantan, 1990; Simbarashe et al. 2007) :

$$\ln \frac{A_{w1}}{A_{w2}} = -\frac{\Delta H_s}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (2.7)$$

Où ΔH_s est la chaleur de sorption, A_{w1} et A_{w2} sont les activités de l'eau aux températures T_1 et T_2 .

Pour une teneur en eau donnée, à partir de la courbe expérimentale $\ln(A_w) = f(1/T)$ déduite de l'isotherme de sorption, ΔH_s est déterminée à partir de la pente $-\frac{\Delta H_s}{R}$. ΔH_s peut aussi être déduite à partir de la relation (Wladyslaw & El Wira, 2004):

$$\Delta H_s = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{A_{w1}}{A_{w2}} \right) \quad (2.8)$$

La chaleur de sorption ΔH_s permet de prévoir la valeur de l'activité de l'eau à d'autres températures pour une même teneur en eau du produit (Robert M. Myhara et al., 1998; Wladyslaw & El Wira, 2004; Santanu, Shivhare & Mujumdar, 2006; Chiachung Chen, 2006).

Chaleur de séchage ou chaleur totale de sorption

C'est l'énergie nécessaire à l'extraction et à la vaporisation de l'eau du produit. Elle représente la somme de la chaleur latente de vaporisation et de l'enthalpie différentielle. donnée par la relation :

$$Q_s = L_v + \Delta H_s \quad (2.9)$$

1.2.4.5 Modélisation des isothermes de desorption

La modélisation des isothermes de sorption expérimentales a attiré de nombreux auteurs ces dernières années. Dans ces dernières années, près de 400 modèles d'isothermes ont été présentés dans plus de 1000 publications (Santanu, Shivhare & Mujumdar, 2006). Les plus utilisés pour les produits alimentaires sont présentés sur le tableau 2.1. Parmi ces modèles d'isothermes, on distingue :

- a) *Les modèles basés sur les lois fondamentales de désorption* : Les modèles de GAB et de BET font partie de ces types de modèles. Le modèle de GAB, le plus convenable, est issu des théories de BET et de Langmuir établies par Van Der Berg pour faire intervenir des paramètres ayant des significations physiques. Aussi, le premier terme de l'équation de GAB caractérise la sorption d'eau en monocouche et le deuxième terme celle en couche multiple. Aux faibles activités, ce modèle ajuste efficacement l'isotherme, mais pour de fortes activités ($A_w > 0.93$), il sous-estime la teneur en eau.
- b) *Les modèles semi-empiriques* : Ce sont des modèles empiriques faisant intervenir généralement la température. L'avantage de ces modèles est que les paramètres du modèle sont utilisables à plusieurs températures. Cependant, ces paramètres n'arrivent pas toujours à prédire efficacement la teneur en eau d'équilibre aux températures autre que celle à laquelle ils ont été identifiés. Les modèles modifiés d'Henderson, de Halsey et de Oswin sont les plus utilisés des modèles semi-empiriques.
- c) *Les modèles empiriques* : Ce sont des modèles dont l'utilisation est limitée aux seules conditions opératoires. L'avantage de ces modèles est que pour une température donnée, ils permettent quelque fois de prédire avec beaucoup de précision l'isotherme de sorption. Cependant, leurs paramètres, sans signification physique, ne sont valables qu'à la température à laquelle ils ont été déterminés.

Modèles	Expression	Activité	Référence
Brunauer-Emmett-Teller (BET)	$\frac{X_{eq}}{X_m} = \frac{C_B \cdot A_w}{(1 - A_w) \cdot (1 + (C_B - 1) \cdot A_w)}$	0.05-0.45	<i>Brunauer Emmet & Teller (1938)</i> (2.10)
Guggenheim – Anderson de Boer (GAB)	$\frac{X_{eq}}{X_m} = \frac{C_G K_G A_w}{(1 - K_G A_w)(1 - K_G A_w + C_G K_G A_w)}$	0-0.93	<i>Van den Berg, C. (1984)</i> (2.11)
Oswin modifié	$A_w = \left[\left(\frac{X_{eq}}{a_o + b_o T} \right)^{-1/c_o} + 1 \right]^{-1}$	0-1	<i>Oswin, C.R. (1946)</i> (2.12)
Henderson modifié	$A_w = 1 - \exp(-A(T + B)X_{eq}^C)$	0-1	<i>Henderson, S.M. (1952)</i> (2.13)
Halsey modifié	$A_w = \exp\left(-\frac{\exp(A_H + B_H T)}{X_{eq}^{C_H}}\right)$	0.1-0.8	<i>Halsey, G. (1948)</i> (2.14)
Peleg	$X_{eq} = a_p A_w^{b_p} + c_p A_w^{d_p}$	0-1	<i>Peleg, M. (1993)</i> (2.15)
Caurie	$X_{eq} = a \exp(-b A_w)$	0-1	<i>Caurie, M. (1970)</i> (2.16)

Où C_G et K_G sont les paramètres du modèle de GAB; C_B de BET; a_o , b_o et c_o de Oswin modifié; A , B et C d'Henderson modifié; A_H , B_H et C_H de Halsey modifié; a_p , b_p , c_p et d_p de Peleg; a , b de Caurie et X_m la teneur en eau en monocouche.

Tableau 2.1. Modèles d'isotherme de désorption des produits alimentaires.

1.3 La contraction volumique

Les produits alimentaires solides et semi-solides sont des matériaux fortement hétérogènes. Ils sont composés d'une matrice solide tridimensionnelle (essentiellement des biopolymères), d'une phase liquide formée par le soluté (eau) et éventuellement d'une phase gazeuse. L'extraction d'eau par séchage par apport de chaleur génère des contraintes mécaniques qui conduisent à un rétrécissement du matériau. Ce phénomène est désigné sous le vocable de retrait ou de contraction et dépend de la teneur en eau du produit et éventuellement des conditions de séchage.

1.3.1 Les phénomènes physiques accompagnant la contraction

La plupart des produits biologiques se contractent et forment une croûte. Cette croûte établie une barrière qui s'oppose au transfert d'humidité de l'intérieur du produit vers sa surface. Le croûtage des produits alimentaires a été observé par plusieurs auteurs. *Schrader et Litchfield* (1992) ont vérifié expérimentalement la formation de la croûte pendant le séchage des gels au moyen d'analyses d'image par résonance magnétique. Wang et Brennan (1995) ont mis en évidence par microscopie lumineuse l'effet de la croûte sur le séchage de la pomme de terre.

1.3.2 Facteurs influant la contraction

1.3.2.1 Le volume d'eau évaporée

Le retrait des produits alimentaires croît avec le volume total d'eau évacué. Quand le volume d'eau évaporée est égal au retrait du produit (*Krokida et Maroulis* (1997); *Lozano, Rotstein, et Urbicain, 1983 pour la carotte*), la contraction est alors dite parfaite. Cependant, dans de nombreux cas, le volume d'eau évaporée pendant le séchage est plus important que le volume réduit. Dans ce cas, on observe alors une création de porosité occasionnant des poches d'air dans le produit séché. La contraction est alors qualifiée d'imparfaite. Ce phénomène a été observé pendant le séchage du calamar (*Rahman, Perera, Chen, Driscoll, et Potluri, 1996*), de la patate douce (*Lozano et al., 1983; Wang et Brennan, 1995*), de la pomme (*Lozano, Rotstein, et Urbicain, 1980; Moreira, Figueiredo, et Sereno, 2000*) et de la spiruline

(Hernandez, 2006). Ce comportement peut être dû à la diminution de la mobilité de la matrice solide du produit pour les faibles teneurs en eau.

1.3.2.2 La mobilité de la matrice solide

La mobilité de la matrice solide d'un produit biologique pouvant entraîner le retrait au cours du séchage est un processus dynamique lié à son état physique. Les fortes mobilités traduisent un état viscoélastique du produit alors que les faibles mobilités correspondent à un état vitreux. Aux fortes teneurs en eau, le produit se trouve à un état élastique, son volume diminue alors presque linéairement avec la teneur en eau. Aux faibles teneurs en eau, le produit acquiert un état vitreux, sa matrice solide devient rigide, ce qui entraîne une diminution de la contraction. On observe alors à la fin du séchage une déviation entre le profil linéaire de contraction et la courbe de contraction du produit. C'est le cas de l'ail et de la patate douce (Lozano *et al.*, 1983 à 0.1 X/X_0); de la pomme de terre (Ratti, 1994 à 0.3 X/X_0 ; Wang & Brennan, 1995 à 0.1 X/X_0 , pomme). Levi et Karel ont observé que la vitesse de mobilité de la matrice solide du produit dépendait de la différence ($T-T_g$), où T est la température de l'échantillon séchant et T_g sa température de transition vitreuse. Del Valle, Cuadros, et Aguilera (1998); Willis, Okos, et Campanella (1999) ont aussi lié la mobilité de la matrice solide à la contraction volumique de certains produits alimentaires à ($T-T_g$).

1.3.2.3 La vitesse de séchage

Le retrait d'un produit biologique pendant le séchage serait fortement lié à la vitesse de séchage. Lorsque la vitesse de séchage est élevée, les gradients d'humidité à travers le produit sont élevés. La faible teneur en eau à la surface externe entraîne alors la transition viscoélastique et la formation de la croûte. Cette croûte empêche le retrait du produit vers son cœur qui est toujours à l'état élastique. Si la vitesse de séchage est faible, la vitesse de diffusion d'eau de l'intérieur du produit vers la surface externe est presque égale à la vitesse d'évaporation en surface. Les gradients d'humidité observés dans le produit sont alors faibles et celui-ci se contracte uniformément jusqu'à la fin du séchage. Ce comportement a été constaté par Litchfield et Okos (1992) pour le séchage des pâtes et par Wang et Brennan (1995) pour le séchage de la pomme de terre. Ces auteurs ont remarqué que le phénomène de croûtage n'intervient que lorsque les conditions de séchage permettent une transition de phase dans la zone externe du produit.

1.3.2.4 Les conditions extérieures T_{air} , V_{air} et HR_{air} ,

Si l'élévation de la température provoque dans certains cas une diminution du retrait du produit (*Del Valle Cuadros & Aguilera, 1998; Mcminn et Magee, 1997a; Wang et Brennan, 1995*) ou une augmentation de celui-ci (*Willis et al, 1999* pour les pâtes à 40 et 100°C), dans d'autres par contre, aucune influence n'apparaît (*Ratti, 1994* avec la pomme de terre, la pomme et la carotte). La diminution du retrait avec la vitesse de l'air observé par *Ratti (1994)* pour la pomme de terre a été confirmée par *Khraisheh, Cooper & Magee (1997)*. Alors que *Ratti (1994)* n'a observé aucune influence significative de l'humidité de l'air sur la contraction de la pomme de terre, la pomme et la carotte, *Lang et Sokhansanj (1993)* ont trouvé que le retrait des grains de blé et de canola augmentait légèrement avec l'humidité relative de l'air. Finalement, l'influence des conditions extérieures sur la contraction des produits agro-alimentaires pendant le séchage serait liée à l'influence que pourraient avoir les paramètres extérieurs sur la formation de la croûte.

1.3.3 Les conséquences de la contraction sur les caractéristiques du produit

La contraction d'un produit contribue à diminuer son coefficient de diffusion au cours du séchage. Certains pores se ferment, ce qui baisse l'efficacité du transport d'eau de l'intérieur du produit vers sa surface externe. On observe alors la baisse de la qualité du produit : croûtage, modification de l'aspect, fissuration etc. La masse volumique apparente et la porosité sont alors affectées. Aussi la connaissance de l'évolution de ces deux grandeurs physiques peut aider à caractériser le comportement de retrait du matériau. Pour un produit rétractable, la densité du constituant de la matrice solide tend à être supérieure à celle de l'eau au cours du séchage. Pour un matériau dont la contraction est parfaite, la porosité a tendance à diminuer au cours du séchage. Par contre, pour un produit à structure rigide, l'eau est progressivement remplacée par de l'air, la masse volumique apparente diminue avec le séchage et la porosité augmente. Le phénomène du croûtage aurait aussi des effets sur la transition entre les phases en favorisant l'établissement de la phase de séchage à vitesse décroissante.

1.3.4 Modélisation de la contraction

Le séchage des produits alimentaires est un processus très complexe qui fait intervenir les transferts simultanés de masse et de chaleur accompagnés de variations sur les propriétés physico-chimiques et structurales du produit. Celui-ci subit alors d'énormes modifications géométriques qu'il faudrait prendre en compte dans la modélisation du séchage. Afin de faciliter cette modélisation, certains auteurs tentent de négliger la contraction du produit. Mais, pour les produits alimentaires, plusieurs travaux ont montré que les meilleurs résultats de modélisation du séchage étaient obtenus par la prise en compte de la contraction. De nombreux auteurs ont présenté des modèles d'explication du mécanisme de contraction : Lozano, Rostein & Urbicain (1980) proposent que les pores naturellement ouverts vers l'extérieur se referment aux faibles teneurs en eau. Suzuki, Kubota, Hasegawa & Hosaka (1976) considèrent le matériau comme une succession de cellules dans lesquelles est enfermé le liquide qui diffuse vers la périphérie sèche. Dans la littérature, deux types de démarches sont généralement utilisés pour modéliser la contraction des produits agroalimentaires. La première dite fondamentale est basée sur une interprétation physique du mécanisme de la contraction. Elle permet de prévoir les modifications géométriques du produit à partir des lois de conservation de volume et de matière. Ces types de modèle ont été utilisés par Kilpatrick, Lowe, & Van Ardsel (1955) pour les légumes; Talla, Puiggali, Jomaa & Jannot (2004) pour la banane, Mayor & Sereno (2004); Ratti (2004) pour la pomme de terre; Suzuki, Kubota, Hasegawa & Hosaka (1976) pour la patate; Lozano, Rostein & Urbicain (1980) pour la pomme; Lozano *et al.*, (1983) pour la carotte. La deuxième dite empirique consiste à ajuster les données expérimentales à l'aide de modèles empiriques exprimant la contraction en fonction de la teneur en eau du produit. C'est le cas des modèles utilisés par Javier, Gabas & Paulo (2004) pour la mangue; Al-Muhtaseb, MC Minn & Magee (2004) pour la patate; Hatamipour & Mowla (2002) pour la carotte; Ratti (2004) pour la pomme de terre.

Si V désigne le volume de l'échantillon à un instant donné du séchage, V_0 le volume initial de l'échantillon, la contraction des produits alimentaires est déterminée par le coefficient de contraction volumique S_b (*bulk shrinkage*):

$$S_b = \frac{V}{V_0} \quad (2.17)$$

1.3.4.1 Les modèles simples de contraction pour les fruits et légumes

- *Modèles linéaires fondamentaux* : Modèle Linéaire de Kilpatrick pour les légumes (Kilpatrick, Lowe & Van Ardsel, 1955) qui suppose le retrait du produit parfait et isotrope:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{X + 0.8}{X_0 + 0.8} \quad \text{et} \quad \frac{S}{S_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.18)$$

- *Modèles fondamentaux considérant explicitement les variations de la porosité lors du séchage* : Modèle tenant compte de la porosité initiale proposé par Pérez et Calvelo (1984) :

$$S_b = \frac{1}{1 - \varepsilon} \left[1 + \frac{\rho_0(X/X_0)}{\rho_w(1 + X_0)} - \varepsilon_0 \right] \quad (2.19)$$

1.2.3.2 Anisotropie de la contraction

Si au cours du séchage, un morceau de fruit parallélépipédique ne se contracte pas de la même façon suivant ses trois (3) dimensions (Longueur, largeur et épaisseur), la contraction est dite anisotrope. Ce comportement du produit se caractérise par l'indice d'isotropie défini par :

$$I = \frac{(L - L_0)/L_0}{(e - e_0)/e_0} \quad \text{Suivant la longueur (Isotropie Longueur-épaisseur)} \quad (2.20)$$

$$I' = \frac{(l - l_0)/l_0}{(e - e_0)/e_0} \quad \text{Suivant la largeur (Isotropie largeur-épaisseur)} \quad (2.21)$$

Où L désigne la longueur, l la largeur, e l'épaisseur et L_0 , l_0 et e_0 leurs valeurs initiales.

1.3.4.2 Intérêt de la prise en compte de la contraction dans la modélisation du séchage

Pendant le séchage convectif des produits alimentaires, la quasi-totalité de l'eau libre est évacuée dans la première phase. Pour certains produits poreux tels que le ciment et l'aubier, cette phase de séchage à vitesse constante est facilement observable lorsque le séchage a lieu dans des conditions douces. Certains produits alimentaires présentent l'existence d'une phase de séchage à vitesse constante (Kannan & Bandyopadhyay(1995) pour le poisson marin; Jason (1958) pour le muscle ; Saravacos & Charm (1962) pour la pomme de terre, la carotte, l'oignon, la pomme, l'ail, le poire, la pêche et le raisin; Jung, Choi, Shon, & Choi (1986) pour les pommes. Les autres produits alimentaires ne montrent pas une phase de séchage à vitesse constante (Serenio & Medeiros (1990) pour la carotte; Bimbenet, Daudin, & Wolf (1985) pour le maïs, la pomme de terre, la pomme ; Magee & Wilkinson (1992) et Zhao & Poulsen (1988) pour les tranches de pomme de terre. Ces résultats contradictoires restés sans justification pendant un certain temps pourraient être expliqués en partie par l'influence de la contraction sur les caractéristiques du séchage. En effet, pour les milieux poreux à structure consolidée tel que l'argile, le ciment ou le bois; au fur et à mesure que le produit sèche, l'eau dans les pores est progressivement remplacée par de l'air. Dans ce cas, la surface spécifique d'échange air- produit reste constante. Cependant, pour les produits poreux à structure fortement déformable, le séchage est accompagné de fortes variations de volume. Ces variations affectent la surface spécifique d'échange qui ne garde plus sa valeur initiale. Dans ce cas, il est important d'utiliser dans le traitement et la modélisation des données de séchage la surface réelle d'échange qui s'obtient à partir des résultats de contraction surfacique. Cette prise en compte du retrait du produit permet ainsi de corriger les courbes de vitesse de séchage pour apparaître la phase de séchage à vitesse constante.

2 Matériels et méthodes

2.1. Les mangues

Les variétés de mangue utilisées dans cette étude sont : Amélie, Kent, Keitt, Lippens, Brooks, Zill, Julie et Irwin.

- Les échantillons des variétés Amélie, Brooks, Kent, Keitt et Lippens utilisées pour les isothermes de sorption et la contraction ont été extraits des cueillettes de mangue de la région des Hauts bassins (*Burkina Faso*) et ont été acquis au marché local de *Bobo Dioulasso* et au marché local de fruit «*Cinkaryaré*» de *Ouagadougou*. Les échantillons utilisés ont été achetés à trois reprises en août 2005, en août 2006 et en avril 2007.
- Les échantillons de la variété Kent utilisés pour l'étude des caractéristiques physico-chimiques et texturales de la mangue ont été acquis en novembre 2006 et en mai/juin 2007. Ils proviennent du Brésil et d'Espagne et ont été achetés dans les supermarchés de France : *Carrefour (Lyon-La Part Dieu)*, *Champion (Lyon-Villeurbanne)*, *Auchan (Lyon-Dardilly)*.

2.1.1 Découpe, dimensions et support des échantillons

Pour les différentes manipulations, des fruits de bonne qualité choisis, ont été lavés à l'aide d'eau additionnée de quelques gouttes d'eau de javel, rincés à l'eau potable et pelés. Ensuite, les deux joues sont séparées au couteau puis découpées en fonction des dimensions voulues. Afin d'analyser l'influence du sens de découpe sur les paramètres de séchage étudié, deux différents types de découpe ont été considérés : la coupe longitudinale dans le sens parallèle aux fibres et la coupe transversale dans le sens perpendiculaire aux fibres. Les échantillons utilisés dans notre étude étaient en forme de frite ou de parallépipède. Initialement, la découpe des échantillons a été effectuée en mesurant de façon approximative les dimensions à l'aide d'un double décimètre précis au demi-millimètre près. Une fois les échantillons découpés et déposés sur le support, leurs dimensions précises ont été mesurées au pied à coulisse marque *MITUTOYO (JAPON)* de précision 0,0005 m. Ces dimensions initiales pour chaque type d'expériences sont précisées sur le tableau 2.2. Pour l'ensemble des expériences de séchage effectué dans notre étude, trois types de support ont été utilisés : papier cuisson, plaque métallique et toile PVC. Ces supports n'ayant pas la même capacité thermique, leur influence sur les cinétiques de séchage et la contraction du produit a aussi été étudié.

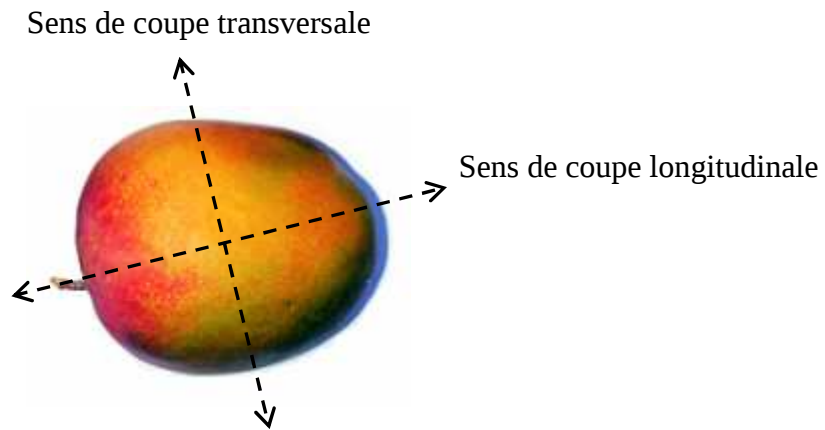


Fig. 2.6 Mode et sens de découpe du fruit; variété Kent

2.1.2 Teneur en eau initiale

L'évaluation de la teneur en eau initiale a été d'une importance capitale dans l'exploitation des données des différentes expériences réalisées dans notre travail. En effet, l'évolution des différents paramètres étudiés a été exprimée en fonction de la teneur en eau de l'échantillon rapporté à sa valeur initiale. Au cours de chaque expérience, afin de mesurer la teneur en eau initiale des mangues, trois (3) échantillons variant de 1 à 3 cm³ ont été prélevés sur le fruit dans une zone proche des échantillons utilisés pour les mesures de contraction ou d'isotherme de sorption. Des balances analytiques de marque *SARTORIUS LP620S (FRANCE)*, *PRECISA (SUISSE)* et *METTLER PM6000 (France)* de précision 0,001g ont été nécessaires pour mesurer la masse initiale et de matière sèche des échantillons. La masse de matière sèche de chacune des échantillons a été obtenue par méthode gravimétrique selon le protocole de la norme EN 12145 (séchage à 70°C pendant environ 24 heures à l'étuve *WTF BLINDER d'une puissance de 1,2kW [type E53 N°83445]*). La teneur en eau initiale est alors calculée de la manière suivante :

$$X_0 = \frac{m_0 - m_s}{m_s} = \frac{m_e}{m_s} \quad (2.22)$$

Où X_0 est la teneur en eau initiale, m_0 la masse initiale de l'échantillon, m_s la masse de matière sèche, m_e la masse totale d'eau du produit.

2.1.3 Variété, maturité et position sur le fruit

2.1.3.1 Variétés

Les variétés de mangue utilisées pour étudier le comportement de la mangue face au séchage sont : Amélie, Brooks, Kent, Keitt, Lippens, Julie, Zill et Irwin. Chaque variété a été différenciée morphologiquement par sa forme, sa grande largeur, sa hauteur, la masse de son fruit, la couleur de son épicarpe et de son mésocarpe. Les dimensions, la masse et la couleur de chaque fruit ont été évaluées à partir d'une moyenne sur 20 échantillons mesurés respectivement à l'aide d'un pied à coulisse de marque Mitutoyo (Japan), d'une balance *SARTORIUS (FANCE)* de précision 0.001g et d'un Chromamètre Minolta CR-300 précision 0,0005 m. Les variétés ont ensuite été caractérisées par la teneur en eau initiale, l'acidité, l'extrait sec soluble en degré Brix et le rapport sucre/acide.

2.1.3.2 Maturité

La maturité des échantillons de mangue fraîche a été caractérisée par des analyses de physico-chimie : teneur en sucre en degré Brix et acidité par titrage acido-basique.

2.1.3.2.1 Mesure de la teneur en sucre

La teneur en extrait sec solubles des échantillons de mangue a été estimée par réfractométrie selon la norme EN 12143. Cette teneur en sucre a ainsi été mesurée à l'aide d'un réfractomètre à main Master- α de la marque *ATAGO P-1* (Japon) de la gamme 0-33° *Brix*, initialement calibré à l'aide d'une solution de saccharose à 20°Brix. Afin de vérifier la répétabilité des mesures, trois échantillons ont été prélevés à chaque fois sur les deux joues de la mangue dans la même zone que les échantillons ayant servi aux mesures de cinétique de séchage ou de contraction. Pour les mesures, chaque échantillon est placé dans un mouchoir en papier, puis pressé afin d'imbiber le mouchoir pour pouvoir récupérer quelques gouttes de jus de mangue et le déposer sur le réfractomètre. Cette opération s'effectue de façon à ne pas avoir de matière solide de fruit sur la surface réfringente du réfractomètre pendant la mesure. La teneur en sucre est obtenue en gramme de sucres totaux/100g de pulpe ou degré Brix.

2.1.3.2.2 Mesure de l'acidité

Le nombre de moles d'acides totaux a été mesuré par titrage acido-basique à l'aide d'une solution de soude en présence d'un indicateur coloré. Les solutions de soude étaient préparées à partir de pastilles de NaOH et leurs molarités étaient de 0.01, 0.04735, 0.1, ou 0.2

mol/l selon les expériences. L'indicateur coloré utilisé est une solution de phénolphthaléine à 0.05%. Pour la mesure, un échantillon de taille relativement importante est prélevé sur chaque joue près de l'endroit où sont extraits les échantillons nécessaires aux mesures de cinétiques et de contraction. Cet échantillon prélevé est broyé à l'aide d'un mixeur (*Marque MOULINEX de puissance 140W FRANCE*) pour obtenir de la pulpe de mangue. Pour avoir des résultats répétables, trois titrages acido-basiques successifs ont été conduits sur la pulpe. Pour le dosage, une petite quantité de pulpe introduite dans un bécher préalablement taré est pesée sur une balance *SARTORIUS (FRANCE)* précise au milligramme près. Cette pulpe est ensuite diluée, puis dosée par la soude en présence de phénolphthaléine jusqu'au virage de la solution de la couleur jaune de la mangue à la couleur rose. Du volume de soude utilisé, le nombre de moles d'acide totaux contenues dans la masse de pulpe de mangue est déduit à partir de l'équation de conservation de la quantité de matière. L'acidité du fruit est alors défini par le rapport du nombre de millimoles d'ion hydronium H_3O^+ sur la masse de pulpe fraîche exprimée en gramme par la relation :

$$\text{Acidité} = \frac{n_{H_3O^+ \text{ totaux}} \text{ (mmol)}}{m_{\text{pulpe}} \text{ (g)}} \quad (2.23)$$

Un petit dispositif de laboratoire composé essentiellement de burette, pipette, épilucheur, couteaux, etc, a été nécessaire pour la réussite des opérations d'évaluation de la teneur en sucre et de l'acidité.

2.1.3.2.3 Maturité

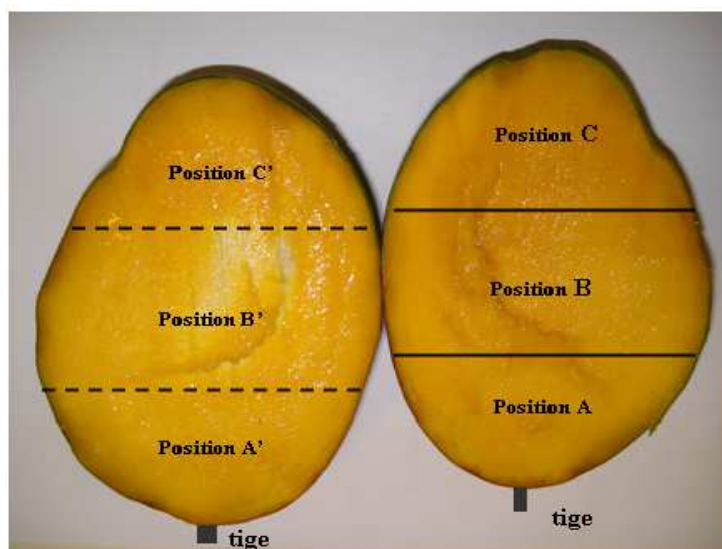
L'indice de maturité de la mangue est défini et évalué par le ratio de l'extrait sec soluble des sucres totaux en degré Brix sur l'acidité en mmol/g :

$$I_{\text{maturité}} = \frac{\text{Teneur en sucre (°Brix)}}{\text{Acidité} \left(\frac{\text{mmol}}{\text{g}} \right)} \quad (2.24)$$

2.1.3.3 Position

Pour une variété donnée, la structure hétérogène de la mangue fait que l'indice de maturité et la texture pourrait dépendre de la position considérée sur le fruit. Le comportement de la mangue face au séchage varierait donc en fonction de la zone de prélèvement des

échantillons. Afin d'élucider l'influence de la position sur la texture, la maturité, la contraction du produit et les cinétiques de séchage; des échantillons ont été prélevés et testés dans six positions différentes notées A, B, C de la plus grosse joue de la mangue et A', B', C' de la joue arrière (fig. 2.7); avec A position près de la tige, B au milieu du fruit et C au bout pointu du fruit.



Joue arrière : A', B' et C'

Joue avant : A, B et C

Fig. 2.7 : Positions A, B, C, A', B' et C' de prélèvement des morceaux sur les deux joues d'une mangue.

2.1.4 Mesure de texture par compression

Les mesures de texture ont été conduites par des tests rhéologiques par compression à l'aide d'un texturomètre Textural Analyser de marque TA-XT2i (fig.2.8) au Laboratoire de Recherche en Génie de l'Industrie Agroalimentaire de Bourg en Bresse (Technopole Alimentaire UIT A Université Claude Bernard de Lyon). Pour la mesure, des échantillons de fruit sont entièrement pelés, puis tranchés à l'aide d'un couteau fin et tranchant. Les morceaux obtenus sont découpés en prenant soin de n'exercer aucune force sur les morceaux pendant les manipulations. Des essais préliminaires d'analyse de texture ont montré qu'à cause de la structure hétérogène et fibreuse de la pulpe, la mesure de la texture par compression

expliquerait mieux la texture de la mangue comparée à celle par pénétrométrie à l'aide de douilles de 2 à 4 mm de diamètres. En effet, en pénétrométrie, la force de pénétration maximale mesurée n'était pas la même lorsque la douille de pénétration rencontrait ou non une fibre dans son parcours. Les mesures de texture par compression ont été effectuées à l'aide d'une douille cylindrique de 40 mm de diamètre à la vitesse de pénétration de 5mm/s sur une distance de pénétration de 7 mm. Le module de force de 25 N a été utilisé et le calibrage de l'appareil est effectué avec une masse de 5 kg. Pour les essais, deux mangues Kent mûres et deux autres vertes ont été utilisées. Pour chaque fruit, des cubes de mangue de 1 cm³ (mesurés à l'aide d'un pied à coulisse de marque *MITUTOYO, JAPON*) prélevés des positions A, B, C de la plus grosse joue et A', B', C' de la joue arrière ont été testés. Chaque mesure a été répétée trois fois et la moyenne des valeurs obtenues a été retenue.

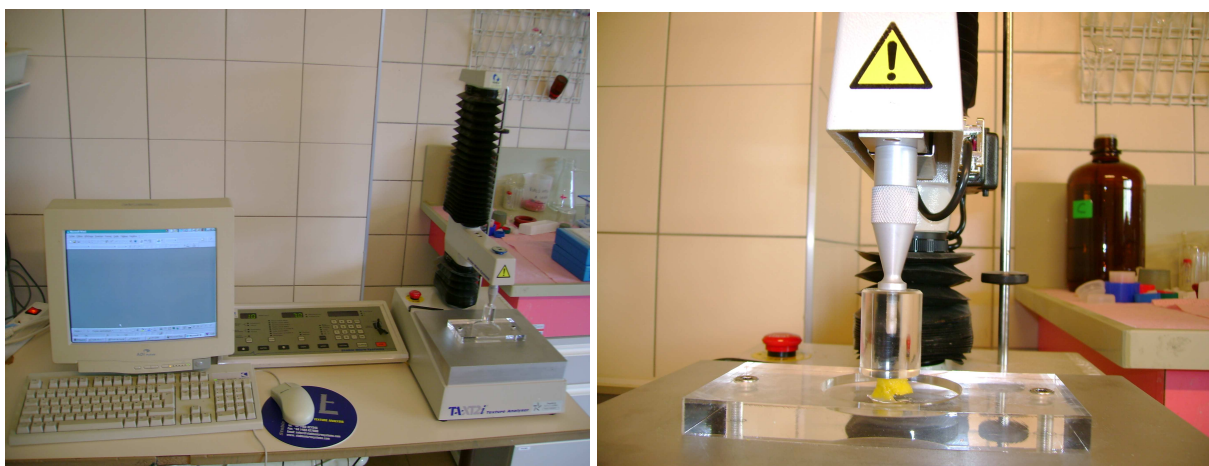


Fig.2.8: Texturomètre Textural Analyser de marque *TA-XT2i* et système d'acquisition

2.1.5 Colorimétrie

La pulpe des différentes variétés de mangue généralement jaune ou claire à l'état non mûre devient jaune-claire, orange, jaune-orange ou rouge-orange à la maturation. En fonction des variétés, la chair de la mangue subit donc un grand changement de couleur au cours de la maturation qui pourrait être utilisé pour caractériser l'état de maturité du fruit. Pour caractériser la couleur de la mangue et sa variation avec la maturation et la position, un chromamètre CR-300 (Fig.2.8) de marque Minolta utilisant le système CIE 1976 (L, a, b), ou CIELAB de mesure de colorimétrie a été utilisé. Chacune des couleurs mesurées à l'aide de ce chromamètre est déterminée par :

- La clarté ou luminance L allant de L=0 (*le noir*) à L=100 (*le blanc*) et
- Les coordonnées de chromaticité : l'indice de rouge a qui va de +a= +60 (*le rouge*) à -a=-60 (*le vert*) et l'indice de jaune b qui va de +b=+60(*le jaune*) à -b=-60(*le bleu*).

Ce chromamètre a été calibré au début de chaque manipulation à l'aide d'une couleur blanche standard ($L_0=98.45$, $a_0=0.18$, $b_0=1.57$ pour le fruit vert et $L_0=97.43$, $a_0=-0.29$, $b_0=2.04$ pour le fruit mûre) servant de référence. Afin d'éliminer les effets d'éventuels brunissements enzymatiques sur la couleur, les tranches sont droites et fraîchement extraites des positions A, B et C. En moyenne dix mesures de chaque paramètre ont été effectuée pour chacune des positions et à chaque état de maturité. La couleur du fruit a été alors caractérisée dans chaque cas par son écart du blanc standard noté :

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (2.25)$$

L'avantage de la caractérisation de l'état de maturité de la mangue par la mesure des coordonnées de chromaticité réside dans le fait que l'ensemble des couleurs représentant les différents états de maturité du fruit peut être représenté sous la forme d'un espace colorimétrique à 3 dimensions, où chaque couleur représentant un état de maturité donné est définie par les 3 paramètres indépendants L, a et b.



Fig.2.8 Chromamètre Minolta CR-300

2.2. Isotherme de désorption

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes d'établissement des isothermes de sorption dont les plus utilisées sont :

- La méthode par humidités relatives de l'air imposées, à l'aide de solutions salines saturées (*Méthode des bocaux*);
- La méthode par mesure de la température de rosée de l'air en équilibre au dessus du produit (*Méthode de l'activimètre*);
- La méthode par mesure différentielle de la variation de masse lors d'une variation par palier de l'hygrométrie de l'air (*Méthode de la Dynamic vapor sorption*).

Dans cette étude, les isothermes ont été établies à 20 et 40°C en utilisant un activimètre *FA-st* (Food Analysis Science and Technology de marque *GBX* et de précision ± 0.003 sur l'activité) dont la température de l'enceinte est régulée par une circulation d'eau sous le contenant de l'échantillon (fig.2.9). Les variétés de mangue utilisées ont été : Amélie, Brooks, Lippens, Kent et Ananas. Pour préparer les échantillons, les deux joues des fruits choisis pour chaque variété ont été enlevées et divisées en tranches minces d'épaisseur moyenne d'environ cinq (5) mm. Ces tranches sont ensuite désorbées à température douce (45-65°C) dans une étuve de marque *WTF BINDER*. Afin d'obtenir des teneurs en eau assez faibles dans le domaine hygroscopique du produit, le séchage des échantillons est prolongé pendant une durée pouvant atteindre 5 à 7 jours. Pour la mesure de l'activité, une portion de mangue est régulièrement extraite de l'étuve au cours du séchage, puis divisée en petits morceaux et placée dans une coupelle. Cette coupelle est maintenue dans l'enceinte de l'activimètre pendant une durée variant de 3 à 15 minutes jusqu'à ce que l'équilibre entre le produit et l'air soit atteint. L'activimètre mesure les températures sèche et de rosée de l'air au dessus du produit et en déduit son humidité relative. A l'équilibre, cette humidité relative de l'air est par définition égale à l'activité de l'eau dans le produit (Roman, & Michel, 2000). Pour un échantillon donné, l'opération de mesure de l'activité est répétée jusqu'à ce que l'appareil affiche trois fois successivement la même valeur de l'activité. Chacun des échantillons ayant servi à la mesure de l'activité est automatiquement pesé sur une balance *SARTORIUS* (précision 0.001g) puis étuvé à 70° C pendant 24 heures pour mesurer sa masse de matière sèche. La connaissance de la quantité de matière sèche permet ainsi d'évaluer la teneur en eau de chaque échantillon. Cette teneur en eau représente la teneur en eau d'équilibre X_{eq} correspondant à l'humidité relative de l'air mesuré précédemment. La courbe évolutive des teneurs d'équilibre obtenues en fonction de l'humidité relative de l'air représente l'isotherme

de désorption de la mangue à la température de mesure de l'activimètre. Les différentes isothermes de désorption établies peuvent alors être simulées suivant des modèles de la littérature.



Fig.2.9 Activimètre *FA-st* (Food Analysis Science and Technology) de marque *GBX*

2.3 Mesure de contraction

La mangue tout comme la quasi-totalité des produits agroalimentaire, des gels et des polymères subit de fortes déformations qui sont à l'origine de phénomènes de dégradation de la qualité du produit : croûtage, fissuration, brunissement enzymatique etc.. La prise en compte de ces déformations dans l'étude du mécanisme de séchage nécessite l'établissement des courbes de contraction et l'identification du coefficient de contraction propre au produit. Pour établir la courbe de contraction de la mangue, nous avons utilisé des morceaux en forme de frite ou parallélépipède. Un double décimètre (précis au demi-millimètre près) a été utilisé pour mesurer la longueur, la largeur et l'épaisseur des échantillons pendant la découpe et un pied à coulisse (marque *MITUTOYO*, Japon, précision 0,0005 m) a servi à mesurer les valeurs précises des dimensions initiales de chaque échantillon avant le début du séchage. Ces valeurs pour les différentes conditions opératoires sont présentées dans le tableau 2.2. Les échantillons sont ensuite séchés dans une étuve de marque *WTF BINDER* (Allemagne) réglée au préalable à la température de séchage. Régulièrement, ils sont retirés de l'étuve pesés et mesurés à l'aide du pied à coulisse. Ces mesures étaient effectuées toutes les 10 minutes

pendant 100 minutes puis tous les quarts d'heures jusqu'à 300 minutes et enfin toutes les demi-heures jusqu'à la fin du séchage. A la fin du processus, le volume moyen de l'échantillon à chaque instant du séchage est évalué par le produit longueur×largeur×épaisseur en supposant que la contraction est uniforme. Le taux de contraction pour les différentes mesures est obtenu en reportant les différents volumes au volume initial. En rapportant aussi les teneurs en eau de l'échantillon à la teneur en eau initiale, la courbe de contraction est donnée par :

$$\frac{V}{V_0} = f\left(\frac{X}{X_0}\right) \quad (2.26)$$

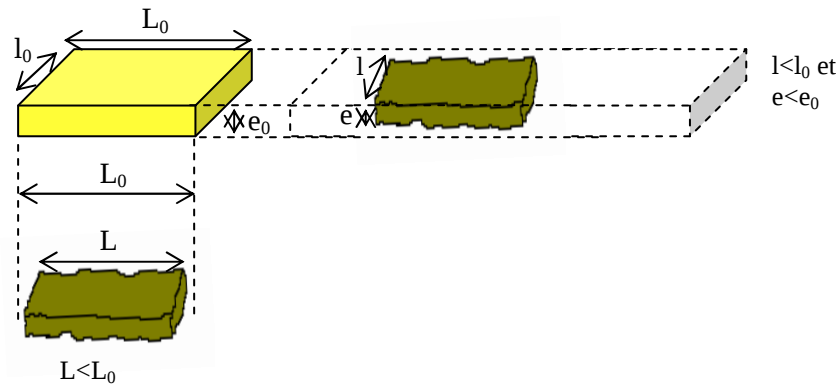


Fig.2.10 Illustration schématique du retrait d'un morceau de mangué parallélépipédique séchant

2.4 Tableau récapitulatif des conditions expérimentales

<i>Influence recherchée</i>	<i>Paramètre étudié</i>	<i>Variété</i>	<i>Etat de Maturité</i>	<i>Sucre/Acide (Brix.g/n_{acide})</i>	<i>T_{air} (°C)</i>	<i>Coupe</i>	<i>Position</i>	<i>Type de support</i>	<i>X₀ (bs)</i>	<i>L₀ (mm)</i>	<i>l₀ (mm)</i>	<i>e₀ (mm)</i>
<i>Variété</i>	Contraction	Amélie	mûre	212.68	60	long	B	Papier cuisson	6.25	39.5	12	12.07
		Lippens		215.75					5.86	40	10	10.51
		Kent		329.48					5.74	40	9.5	10.5
		Keitt		252.64					6.22	35.8	13	10.6
<i>Température</i>	Contraction	Kent	mûre	-	50	long	B	Papier cuisson	13.06	20.3	13.8	10
				-	60				14.21	56.6	44	2.26
				-	70				13.23	60	32	13
<i>Position & Maturité</i>	Contraction	Kent	verte	200.43	60	long	A	Papier cuisson	6.93	19.04	19.26	11.7
				126.22			B		8.87	20.78	20.90	8.88
				147.75			C		7.04	21.72	22.88	11.97
			mûre	625.94			A		5.70	20	19.6	14.5
				226,06			B		6.20	19.5	20	12.3
				196,93			C		6.25	19.7	19.2	12.1
<i>Coupe</i>	Contraction	Amélie	mûre	212.68	60	long	B	Toile PVC	6.25	38.75	11.5	11.82
		Lippens		215.75					5.86	40	10	10.51
		Kent	mûre	329.48			B		5.61	40.75	11.25	10

Suite du tableau récapitulatif des conditions expérimentales

Influence recherchée	Paramètre étudié	Variété	Etat de Maturité	Sucre/Acide (Brix.g/n _{acide})	T _{air} (°C)	Coupe	Position	Type de support	X ₀ (bs)	L ₀ (mm)	l ₀ (mm)	e ₀ (mm)
Support	Contraction	Kent	mûre	398.22	60	trans	B	Métal	5.78	40	9.5	10.5
				299.11		long			6.11	39.5	10	9.5
				286.36		trans		Toile PVC	5.58	40.5	11	10
				372.61		long			5.64	41	11.5	10
Taille	Contraction	Kent	mûre	120.54	60	long	B	Toile PVC	6.85	65.9	49.3	7.26
				86.09					7.23	65.4	49.3	7.27
				299.11					6.11	39.5	10	9.5
				372.61					5.64	41	11.5	10
Variété & Température	Isotherme de sorption	Amélie	mûre	-	20/40	long	B	Métal	8.23	30<L ₀ <80	20<l ₀ <50	4<e ₀ <7
		Brooks			20/40				7.52	30<L ₀ <80	20<l ₀ <50	4<e ₀ <7
		Kent			40				3.49	30<L ₀ <80	20<l ₀ <50	4<e ₀ <7
		Lippens			20/40				7.79	30<L ₀ <80	20<l ₀ <50	4<e ₀ <7
		Ananas			20				5.89	30<L ₀ <80	20<l ₀ <50	4<e ₀ <7

Tableau 2.2 : Récapitulatif des différentes conditions opératoires

2.5 Traitement des données

2.5.1 Isotherme de sorption

2.5.1.1 Evaluation de la teneur en eau en monocouche X_m

La teneur en eau en monocouche représente la teneur en eau maximale correspondant au domaine de l'eau fortement liée. C'est la teneur en eau supposée du produit après fixation par adsorption forte de la première couche de molécule d'eau sur le substrat biologique (couche mono-moléculaire). Le concept de la teneur en eau en monocouche a une très grande importance dans le processus de conservation d'un produit séché car il est lié aux mécanismes de dégradation physique et chimique des produits alimentaires. En effet, X_m représente la teneur en eau optimale qu'il faudrait afin de minimiser les réactions de dégradations pendant la conservation du produit séché (Moreira , Vazquez , & Chenlo, 2002). Dans le cas des produits alimentaires, la teneur en eau en monocouche est généralement déterminée à partir des modèles d'isothermes de GAB et de BET. Cependant, ces deux modèles basés sur les mécanismes d'adsorption d'eau par la matrice solide du produit ne donnent pas toujours des valeurs identiques de X_m . Le modèle de BET n'est pas souvent très convenable pour la détermination de X_m , car il suppose l'uniformité de la surface adsorbante et de l'absence d'interactions entre molécules adsorbées. Ces hypothèses semblent incorrectes dans notre cas à cause de la complexité des interactions entre surfaces adsorbantes de l'aliment. Dans notre étude, la teneur en eau en monocouche à 20 et à 40°C des différentes variétés a été évaluée par ajustement des données expérimentales suivant le modèle de GAB en utilisant l'algorithme d'optimisation Levenberg-Marquardt sous MATLAB version 7.1. Ce modèle a été choisi car il est convenable pour une large bande d'activité (0-0.93) et ces termes tiennent compte des deux étapes d'adsorption de l'eau liée; le premier caractérisant la sorption d'eau en monocouche et le deuxième celle en couche multiple.

2.5.1.2 Evaluation de la chaleur de sorption

La chaleur de sorption est l'énergie qu'il faut en plus de la chaleur latente de vaporisation pour extraire l'eau du produit. Dans notre étude, elle a été calculée en fonction de la teneur en eau en se basant sur les résultats des travaux de Chiachung Chen (2006). En effet, celui-ci a montré que la chaleur de sorption d'un produit alimentaire pouvait être exprimée comme une fonction de la température et de la teneur en eau d'équilibre en se basant sur un modèle d'isotherme convenable faisant intervenir la température. Pour déterminer l'évolution de la

chaleur de sorption de différentes variétés en fonction de la température et de la teneur en eau, nous avons alors utilisé le modèle d'isotherme de Henderson modifié et l'équation de Clausius-Clapeyron qui s'écrit classiquement sous la forme :

$$\frac{\partial P_v}{P_v \partial T_a} = \frac{\partial(\ln P_v)}{\partial T_a} = \frac{Q_s}{RT_a^2} \quad (2.26)$$

Où : P_v désigne la pression de vapeur en kPa, T_a la température de l'air en °K, Q_s la chaleur total de sorption en kJ/kg et $R=0.4676$ kJ/(kgK) la constante des gaz parfaits.

En remplaçant P_v par son expression $P_{vs} \times A_w$, on déduit la chaleur totale de sorption sous la forme :

$$Q_s = RT_a^2 \left(\frac{\partial(\ln A_w)}{\partial T_a} + \frac{\partial(\ln P_{vs})}{\partial T_a} \right) \quad (2.27)$$

Le premier terme de cette expression représente l'enthalpie différentielle et le deuxième terme représente la chaleur latente de vaporisation. Q_s peut alors se mettre sous la forme :

$$Q_s = RT_a^2 \frac{\partial \ln A_w}{\partial T_a} + L_v \quad (2.28)$$

En utilisant l'expression de A_w du modèle d'isotherme de Henderson modifié qui fait intervenir la température d'équilibre, on obtient :

$$Q_s = RT_a^2 \frac{aX^b \exp[-a(T+c)X^b]}{1 - \exp[-a(T+c)X^b]} + L_v \quad (2.29)$$

Où T désigne la température en °C

Par ailleurs en utilisant la formule de Bertrand :

$$P_{vs} = 10^{17.443 - \left(\frac{2795}{T_a}\right) - 3.868 \log_{10} T_a} \quad (2.30)$$

où P_{vs} est exprimée en atmosphère, la chaleur latente de vaporisation est donnée par :

$$L_v = RT_a^2 \left(\frac{\partial(\ln P_{vs})}{\partial T_a} \right) = RT_a^2 \left(\frac{2795 \ln 10}{T_a^2} - \frac{3.868}{T_a} \right) \quad (2.31)$$

Soit :

$$L_v = R(6435.7 - 3.868T_a) \quad (2.32)$$

En remplaçant T par $T_a - 273.15$, la chaleur de sorption totale se présente alors sous la forme :

$$Q_s = RT_a^2 \frac{aX^b \exp[-a(T_a + c - 273.15)X^b]}{1 - \exp[-a(T_a + c - 273.15)X^b]} + R(6435.7 - 3.868T_a) \quad (2.33)$$

Et ΔH_s est donnée par :

$$\Delta H_s = RT_a^2 \frac{aX^b \exp[-a(T_a + c - 273.15)X^b]}{1 - \exp[-a(T_a + c - 273.15)X^b]} \quad (2.34)$$

2.5.2 La contraction

Les données expérimentales de retrait de la mangue pour plusieurs conditions opératoires nous ont fait remarquer que le profil de retrait volumique est linéaire dans la majeure partie de la plage de teneur en eau ($0.2 \leq \frac{X}{X_0} \leq 1$). Des analyses supplémentaires de

ces résultats expérimentaux nous ont fait comprendre que le départ d'eau des échantillons de mangue au cours du séchage est presque parfaitement compensé par la réduction de leurs volumes : la mangue qui sèche est donc un milieu poreux saturé. Ces investigations expérimentales préliminaires nous ont conduit à faire l'hypothèse d'un modèle de séchage à deux phases : phases solide et liquide, et d'un modèle de retrait total basé sur l'additivité des phases solides et liquides. Dans le but de vérifier le rôle joué par la porosité dans les propriétés de retrait du produit et consolider ainsi nos hypothèses de départ, nous avons modélisé les données expérimentales de contraction de deux manières : d'une part, en négligeant la porosité du matériau et d'autre part, en tenant compte de celle-ci.

2.5.2.1 Modélisation des données expérimentales sans prise en compte de la porosité

Ce modèle résulte de l'hypothèse de l'additivité des volumes d'eau et de solide en supposant que les volumes d'air dans les pores sont négligeables et les tissus cellulaires sont incompressibles. Cette hypothèse a déjà été utilisée par de nombreux auteurs : Kilpatrick, Lowe, & Van Ardsel (1955), Desmorieux(1992), Iglesias Garcia, Roques, & Bueno (1993) et Leonardo & Dermeval (2004).

A un instant donné du séchage, si V désigne le volume total du produit, V_s et V_e respectivement les volumes de matière sèche et d'eau au sein du produit,

$$V = V_s + V_e \quad (2.35)$$

V est exprimé en fonction de la teneur en eau X du produit sous la forme:

$$V = V_s \left(1 + \frac{\rho_{0s}}{\rho_{0e}} X\right) \quad (2.36)$$

où ρ_{0s} est la masse volumique intrinsèque de la phase solide et ρ_{0e} celle de l'eau,

Si V_0 est le volume total initial de l'échantillon, le taux de contraction S_b est alors exprimé par :

$$S_b = \frac{V}{V_0} = \frac{1 + uX}{1 + uX_0} \quad (2.37)$$

Où : $u = \frac{\rho_{0s}}{\rho_{0e}}$ est le coefficient de retrait linéaire (2.38)

L'évolution en fonction de X de la masse volumique totale ρ , et des masses volumiques d'eau ρ_e et de matière sèche ρ_s (par unité de volume total de l'échantillon) au cours du séchage s'exprime par :

$$\rho(X) = \rho_{0s} \frac{1 + X}{1 + uX} \quad (2.39)$$

$$\rho_s(X) = \rho_{0s} \frac{1}{1 + uX} \quad (2.40)$$

$$\rho_e(X) = \rho_{0s} \frac{X}{1 + uX} \quad (2.41)$$

En fonction de $\frac{X}{X_0}$:

$$S_b = 1 + \frac{uX_0}{1 + uX_0} \left(\frac{X}{X_0} - 1\right) \quad (2.42)$$

Cette relation suppose que la contraction varie linéairement avec la teneur en eau sous la forme :

$$S_b = b + a\left(\frac{X}{X_0}\right) \quad (2.43)$$

$$\text{Où : } a = \frac{uX_0}{1+uX_0}, b = \frac{1}{1+uX_0}$$

A partir de la relation (2.12) et dans le cas d'une contraction linéaire représentée par la droite S_b en fonction de $\frac{X}{X_0}$, la pente a' et l'ordonnée à l'origine b' permettent de déterminer la valeur du coefficient de contraction linéaire de la masse volumique vraie de la matière sèche par :

$$u = \frac{1}{X_0} \frac{a}{b}$$
$$\rho_{0s} = u \times \rho_{0e} \quad (2.44)$$

Cette relation donne une estimation du coefficient de retrait linéaire et de la masse volumique de matière sèche difficile à mesurer physiquement. Pour illustrer la viabilité de cette méthode, les valeurs évaluées de ces deux gradeurs sont comparées à celle déterminées à l'aide du pycnomètre. La masse volumique intrinsèque de l'eau utilisée dans ces calculs est de $\rho_{0e}=1000 \text{ kg/m}^3$.

2.5.2.2 Modélisation des données avec prise en compte de la porosité

Ce modèle considère que la porosité se crée ou se développe au sein du matériau. Cette hypothèse a été utilisée par Perez & Calvelo (1984) pour la viande de bœuf en supposant que la porosité initiale était nulle. Mayor & Sereno (2004) l'ont aussi utilisé pour la patate et la pomme en considérant une porosité initiale non nulle. Si V_a est le volume d'air enfermé dans la matière solide et ε la porosité du milieu :

$$V = V_s + V_e + V_a = V_s + V_e + \varepsilon V \quad (2.45)$$

En supposant que la porosité initiale de la mangue est nulle, on en déduit que :

$$S_b = \frac{1}{1-\varepsilon} \left[1 + \frac{uX_0}{uX_0+1} \left(\frac{X}{X_0} - 1 \right) \right] \quad (2.46)$$

La porosité ε est calculée sur la base des données expérimentales à partir de l'expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{\frac{\Delta m(t)}{\rho_{eau}} - \Delta V(t)}{V(t)} \quad (2.47)$$

Où $\Delta m(t)$ est la variation de masse de l'échantillon due à la perte d'eau, $\Delta V(t)$ la variation du volume apparent de l'échantillon et $V(t)$ son volume à un instant t .

2.5.3 Ajustement des données

Les différents ajustements de données expérimentales ont été réalisés à partir de l'algorithme d'optimisation Levenberg-Marquardt sous MATLAB version 7.1. Les paramètres d'ajustement qui ont été utilisés sont (Ertekin & Yaldiz, 2004):

- Le coefficient de détermination $R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (\Phi_{\text{exp},i} - \Phi_{\text{m},i})^2}{\sum_1^n (\bar{\Phi}_{\text{exp}} - \Phi_{\text{exp},i})^2}$ (2.48)

- L'erreur relative $E(\%) = (100/n) \sum_1^n \frac{|\Phi_{\text{exp},i} - \Phi_{\text{m},i}|}{\Phi_{\text{exp},i}}$ (2.49)

- L'erreur quadratique moyenne $\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Phi_{\text{m},i} - \Phi_{\text{exp},i})^2}$ (2.50)

Où Φ désigne la valeur de la grandeur physique mesurée représentant : $\frac{X}{X_0}$ la teneur en eau réduite A_w l'activité de l'eau, X_{eq} la teneur en eau d'équilibre, S_b le taux de contraction, n désigne le nombre de points expérimentaux, z le nombre de paramètres du modèle, $\Phi_{\text{exp},i}$ la valeur expérimentale, $\Phi_{\text{m},i}$ la valeur donnée par le modèle et $\bar{\Phi}_{\text{exp}}$ la moyenne sur les valeurs expérimentales.

Les performances des différents modèles ont été jugées sur le critère des plus fortes valeurs de R^2 et des plus faibles valeurs de E , et de χ^2 .

3. Résultats

3.1 Caractérisation physique des variétés de mangues

Le tableau 2.3 présente les caractéristiques physiques des principales variétés de mangues disponibles localement au Burkina Faso et au nord du Cameroun par la morphologie (forme, couleur et masse), les propriétés physico-chimiques à maturité (acidité, degré Brix, ratio sucre/acide) et la teneur en eau moyenne de la pulpe fraîche à la maturation. Ces résultats montrent qu'en fonction des variétés, la mangue se caractérise par une diversité de taille et de couleurs. Cependant, on peut estimer de façon générale que ce fruit a une forme oblongue. La coloration de son épicarpe est verte avec une influence relative des colorations rouge et jaune. Celle de son mésocarpe est jaune avec une présence quelque fois de la coloration orange. Sa largeur et sa hauteur moyenne se situent respectivement à près de 8 et 10 cm. Enfin, sa masse moyenne est de l'ordre de 300g. On constate aussi que la teneur en eau initiale de la mangue mûre varie fortement en fonction des variétés (75 à 87 % (bh)). Ses plus fortes valeurs sont observées chez l'Amélie et la Brooks (86.34 et 87.24 bh) et les plus faibles chez la Zill et la Kent (75 et 79.87 bh). Il apparaît donc qu'une valeur commune de la teneur en eau initiale ne peut être fixée pour l'ensemble des variétés de mangue. Aussi, la variété apparaît comme un paramètre essentiel pour la précision sur la teneur en eau initiale de la mangue. L'observation des teneurs en sucre et en acide des différentes variétés présentées au bas du tableau 2.3 laisse voir que ces deux propriétés physico-chimiques de la pulpe du fruit varient également en fonction des variétés. Exception faite de la Brooks et de quelques erreurs de manipulation, les variétés ayant les plus forts taux de sucre semblent être celles qui présentent les taux d'acidité les plus élevés. Cela pourrait se justifier par les réactions simultanées de production de sucre et d'élimination d'acides au cours de la maturation. L'évolution de la teneur en sucre du fruit en maturation serait à son acidité. Les variétés dont les pulpes sont à la fois les plus acidulées et les plus sucrées dans notre étude sont les variétés Kent et Amélie.

<i>Variétés</i>	<i>Amélie</i>	<i>Zill</i>	<i>Irwin</i>	<i>Julie</i>	<i>Kent</i>	<i>Brooks</i>
<i>Formes du fruit</i>	Arrondi-Ovoïde	Oblongue/Oblique	Oblongue	Oblongue- Elliptique	Ovoïde	Oblongue/Ovoïde
<i>Couleur de l'épicarpe</i>	Vert/Jaune-vert	Vert	Vert/Vert-jaune/Vert-rouge	Vert/Vert-jaune	Vert/Vert-rouge	vert
<i>Couleurs du mésocarpe</i>	Jaune/Jaune-orange	Jaune	Jaune/Jaune-claire	Jaune/Jaune-orange	Jaune-claire	Jaune-claire
<i>Grande largeur</i>	8.6 ± 0.66	8.3 ± 0.58	7.31 ± 0.64	8.14 ± 0.57	8.68 ± 0.22	variable
<i>Hauteur</i>	9.70 ± 0.88	10.71 ± 0.84	11.07 ± 0.50	10.46 ± 1.05	10.60 ± 0.36	variable
<i>Masse du fruit</i>	370.76 ± 67.53	313.99 ± 18.7	264.38 ± 22.55	352 ± 80.44	680.20 ± 30.7	variable
<i>X(bh)(Kg_{eau}/kg_{ms})</i>	86.34	75.0	84.0	86.0	79.87	87.24
<i>Sucre¹ (°Brix)</i>	14.0 ± 1.7	12.1 ± 2.0	12.1 ± 1.3	13.5 ± 1.9	19.0 ± 2.4	11.4 ± 2.1
<i>Acidité (mmol/100g pulpe)</i>	8.9 ± 3.1	5.1 ± 0.2	4.7 ± 0.4	7.0 ± 1.0	11.2 ± 2.3	6.6 ± 0.9
<i>Ratio²(°Brix.g/mmol_{acide})</i>	157.30	237.25	257.45	192.86	169.64	172.73

¹ Sucre : Extrait sec soluble

² Ratio (Indice de maturité) : [Sucre]/[Acide]

Tableau 2.3: Caractéristiques physiques de différentes variétés de mangues

3.2 Caractérisation de la maturité en fonction de la position

3.2.1 Le ratio sucre/acide

Le tableau 2.4 et la figure 2.11 présentent les résultats de mesures de maturité de la variété Kent par physico-chimie pour les 3 positions A, B et C et pour deux états de maturité différents du fruit. Ces données montrent que pour chaque position de la mangue, lorsque la maturité augmente, le taux de sucre croît, l'acidité diminue et le rapport sucre/acide croît. Ces mêmes mesures effectuées sur des mangues Amélie, Lippens et Ananas ont donné précisément des résultats similaires pour le rapport sucre/acide. Le degré de maturité de la mangue peut donc être évalué par " un indice de maturité " représenté par le ratio sucre/acide, ce dernier augmentant avec l'état de maturité. Ces résultats permettent aussi de constater que l'état de maturité de la mangue varie selon la position. Cette maturité augmente de la position A vers la position C (tableau 2.4). Les écarts des indices de maturité entre les trois positions semblent plus accentués pour la mangue mûre que pour la mangue verte (fig.2.11). La comparaison du rapport de ratios sucre/acide symbolisé par R présenté sur le tableau 2.4, permet de conclure que l'analyse de la différence de maturité par physico-chimie entre une mangue verte et une mangue mûre est plus remarquable en position A, qu'en position B et C. Dans le cas présent, la valeur moyenne de ce rapport est de 3.1 ; 1.8 et 1.3 respectivement pour les positions A, B et C.

Zone	Mangue Verte			Mangue Mûre			R ^(*)
	Acidité (mmol/g)	Teneur en sucre (°Brix)	Sucre/Acide (Ratio)	Acidité (mmol/g)	Teneur en sucre (°Brix)	Sucre/Acide (Ratio)	
A	0.0803	16.1	200.43	0.0304	19	625.94	3.1
B	0.1188	15	126.22	0.0814	18.4	226.06	1.8
C	0.1144	16.9	147.75	0.0889	17.5	196.93	1.3

(*) R: Ratio _(mangue mûre) / Ratio _(mangue verte)

Tableau 2.4 : Etude de la maturité des fruits en fonction de la position sur la mangue.

<i>Etat de maturité</i>	<i>Position</i>	<i>Indice de Maturité</i>	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>ΔE</i>
-------------------------	-----------------	---------------------------	----------	----------	----------	-----------

3.2.2 La Colorimétrie

Les résultats des mesures de colorimétrie par le système de mesure CIELAB (L, a, b) sur des pulpes fraîches de mangue Kent à l'état mûr et non-mûr sont précisés sur le tableau 2.5 et la figure 2.11. Les écarts moyens observés sur les trois grandeurs de mesure L, a et b pour les deux états de maturité sont respectivement, en valeurs absolues de 4.1 ; 0.8 et 0.4. Il est facile de constater que le paramètre L présente les plus grandes variations pour chacun des trois zones A, B et C du fruit. Des mesures sur la joue verso de la mangue ont montré des résultats similaires. En comparant les indices d'écart de couleur (par rapport à la couleur blanche standard), on constate que ΔE de la mangue mûre est à chaque fois plus élevé que celui de la mangue verte pour l'ensemble des trois positions du fruit. En plus, on remarque aisément sur la figure 2.11 que ΔE varie avec la position pour un état de maturité donné. Il est toujours plus élevé en position A et C qu'en position B, ses valeurs en A et C étant voisines. Ces données montrent qu'il existe une différence de couleur notable entre la chair de la mangue Kent mûre et celle de la mangue Kent verte. Cette différence de couleur serait liée aux activités enzymatiques qui surviennent au cours de la maturation. Les résultats précédents permettent d'établir que l'état de maturité de la mangue peut être caractérisé par la couleur de sa chair. Plus précisément, la maturité peut être déterminée par la mesure de la valeur de l'indice d'écart de couleur ΔE qui augmente avec celle-ci. Ainsi, les deux états de maturité dans notre étude sont facilement différenciables par la valeur moyenne de ΔE sur les trois positions. Ces valeurs sont de 60.94 pour la mangue verte et 63.54 pour la mangue mûre.

blanc standard	-	-	98.45	0.18	1.575	0
<i>Mangue verte</i>	<i>a</i>	200.43	68.4	-0.42	55.93	61.62
	<i>b</i>	126.22	72.02	-0.62	56.06	59.70
	<i>c</i>	147.75	67.89	0.98	55.61	61.58
	<i>Moyenne</i>	158.13	69.44	-0.49	56.17	60.94
blanc standard	-	-	97.43	-0.29	2.04	0
<i>Mangue mûre</i>	<i>a</i>	625.94	69.03	0.89	58.35	63.95
	<i>b</i>	226.06	63.93	-0.18	52.19	61.27
	<i>c</i>	196.93	62.98	0.12	56.83	65.66
	<i>Moyenne</i>	349.64	65.31	0.28	55.79	63.54

Tableau 2.5 : Etude de la couleur des fruits en fonction de la maturité et de la position.

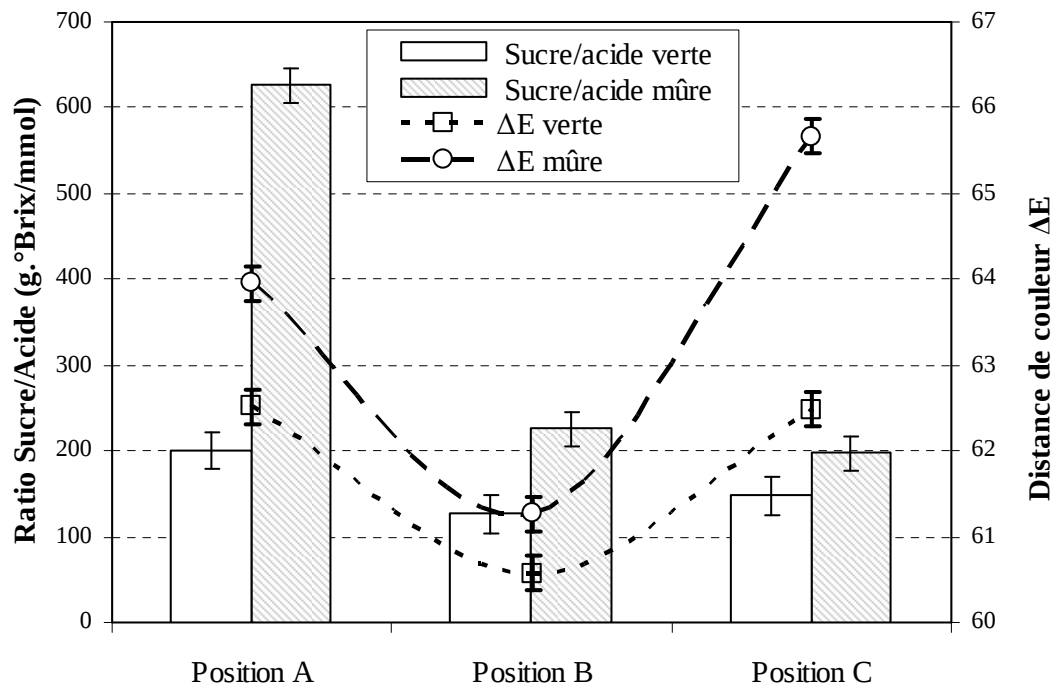


Fig. 2.11 Ratio Sucre/Acide et écart de couleur en fonction de la position et de la maturité

3.2.3 La texture par compression

Les résultats de l'analyse par rhéologie de la texture de tranches de mangues mûre et verte réalisés à l'aide du texturomètre *Textural Analyser* de marque *TA-XT2i* sont présentés sur la figure 2.12. Les différents tests ont été effectués par compression des échantillons de $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ extraits aux trois zones du fruit pour deux états de maturité et suivant deux directions : la direction transversale (perpendiculaire aux fibres) notée "1" et la direction longitudinale (tangentielle aux fibres) notée "2". Pour chaque essai, la force maximale de pénétration (en Newton) et la distance maximale de pénétration (en mm) correspondante ont été relevées. Les résultats obtenus montrent que pour chaque zone de compression (A, B, C) et pour chaque mode de compression (1, 2), les valeurs de la force maximale de pénétration obtenues pour la mangue verte sont en moyenne deux à trois fois plus importantes que celles obtenues pour la mangue mûre. Cette différence semble surtout marquée pour la zone A, pour chacun des deux modes de compression. Ces résultats montrent donc que la structure interne de la mangue verte est plus consolidée que celle de la mangue mûre. Ces observations permettent d'établir que l'état de maturité de la mangue peut être connu à travers sa rhéologie autrement dit sa capacité à s'opposer aux contraintes de déformation. La maturité est alors caractérisée par la mesure de la force maximale de pénétration qui diminue avec celle-ci. De l'ensemble de ces données, on en déduit que la texture de la mangue verte est plus rigide que celle de la mangue mûre. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'au cours de la maturation, l'eau piégée par la structure cellulaire est progressivement libérée et occupe les pores qui se gorgent ainsi de celle-ci. Aussi, les pressions capillaires exercées dans les pores par cette eau libérée sur la structure cellulaire fragilisent les liaisons intercellulaires et donc le tissu cellulaire. Cette fragilisation a pour conséquence la facilité de compression de la matière composant le fruit. Par ailleurs, les résultats obtenus en compression 2 (parallèlement aux fibres) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus en compression 1 (perpendiculairement aux fibres). Les fibres opposeraient donc une résistance à la compression. Cette différence n'est cependant pas assez remarquable chez la mangue mûre. En plus, on constate une différence notable aussi bien en compression 1 qu'en compression 2 entre les forces maximales de pénétration aux trois zones de la mangue verte. La force maximale de pénétration diminue dans l'ordre A, B et C. Cette diminution serait liée à la différence de teneur en fibre entre les trois zones du fruit. En effet, la zone A est généralement plus fibreuse que les zones B et C.

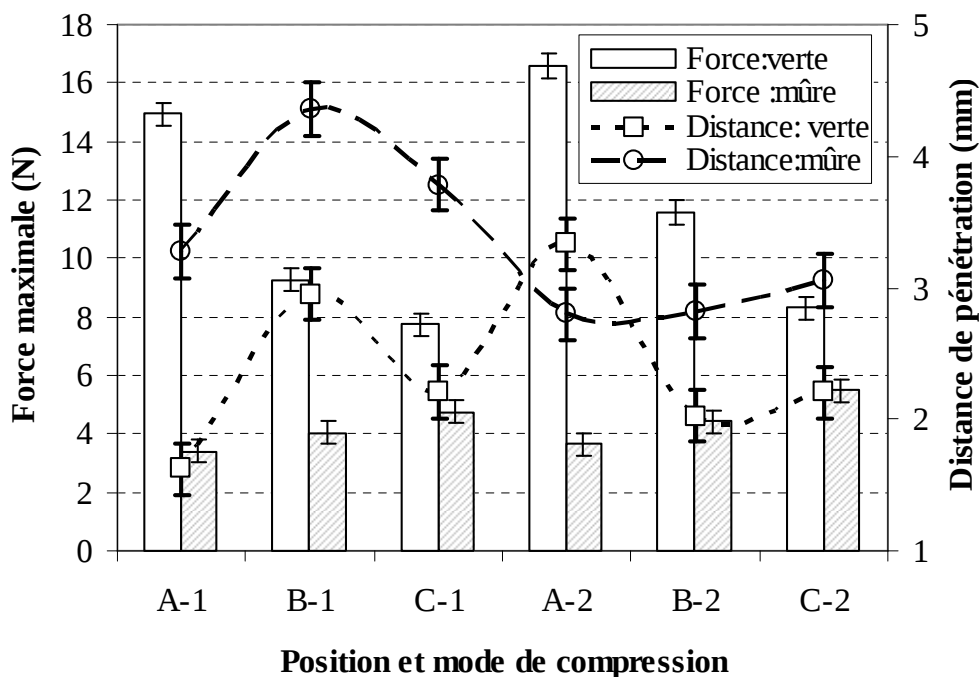


Fig.2.12 Etude de la texture de tranches de mangue verte et mûre (1x1x1 cm³) par compression. (1) Compression perpendiculaire aux fibres, (2) compression tangentielle aux fibres.

En conclusion, la détermination du Ratio sucre /acide, de l'écart de couleur du blanc standard et de la force maximale de pénétration de la pulpe fraîche permet de caractériser totalement la maturité de la mangue. Cette maturité, contrairement à ce que l'on a tendance à croire, n'a pas d'influence explicite sur la teneur en eau initiale, mais en revanche elle présente une forte influence sur la teneur en sucre et en acide du fruit.

3.3 L'isotherme de désorption

3.3.1 Influence de la température

L'évolution de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'activité de l'eau dans un morceau de mangue à 20 et à 40°C est présentée sur la fig.2.13. La variété de mangue utilisée a été l'« Amélie ». Les courbes de désorption à 40°C (et à 20°C) présentent des teneurs en eau d'équilibre quasiment constantes pour les activités inférieures ou égales à 0.6 (respectivement 0.75). Pour l'isotherme à 40°C les valeurs de X_{eq} sont plus faibles que celle à 20°C pour les faibles teneurs en eau avec une inversion relative des teneurs en eau d'équilibre en fonction de la température (fig.2.13). Cette tendance entre ces isothermes a été observée par Falade & Aworh (2004) pour la variété sauvage africaine *Irvingia Gabonensis* traitée par osmose. L'isotherme à 20°C présente la même allure que celle établie par Isabell, Sybille, Werner, & Reinhold (2005) pour une variété allemande jusqu'à la teneur en eau de 0.9. Entre 0.9 et 1, la variété allemande a des teneurs en eau plus élevées. A partir des résultats, nous pouvons dire que la fixation de manière forte, de la couche monomoléculaire d'eau correspondant à l'eau liée sur le substrat solide a lieu jusqu'à l'activité 0.6 à 40°C et 0.75 à 20°C, alors que celle des couches multiples correspondant à l'eau libre n'a lieu sensiblement qu'entre les activités 0.6 et 0.8 pour 40° C et entre 0.75 et 0.85 pour 20° C. L'accumulation d'eau dans les microporosités puis dans les pores par condensation capillaire ne commence qu'à partir de l'activité 0.8 à 40°C et l'activité 0.85 à 20°C. L'adsorption de la monocouche d'eau correspondant à l'eau liée peut être considérée, en première approximation, comme le domaine de stabilité microbiologique du produit. D'après les travaux de Van den Berg & Bruin (1981), pour $A_w < 0.6$, les microorganismes n'arrivent plus à prélever l'eau nécessaire à leur développement et les enzymes deviennent inactifs. D'après la fig.2.13, la teneur en eau d'équilibre correspondant à la limite du développement des microorganismes serait alors de 15.31 % (b.s) à 40° C pour la variété de mangue « Amélie ». Ces résultats confirment les travaux de Isabell, Sybille, Werner, & Reinhold (2005) qui ont trouvé que le point de conservation de la mangue non traitée par sulfuration, sans additif, ni réfrigération se situe autour de l'activité 0.6. Ces résultats rejoignent ceux de Falade et Aworh (2004) qui ont montré que la teneur en eau correspondant à la première couche d'eau de la mangue était de l'ordre de 16 % (bs).

Les statistiques de l'ajustement des données expérimentales à l'aide des modèles de GAB, d'Henderson modifié et de Peleg pour chaque température sont présentées dans le tableau 2.6 et l'allure de l'isotherme simulée par le modèle de Peleg est donnée par la

fig.2.13. Comme le montre le tableau 2.6, les modèles de Peleg et GAB, avec des coefficients de détermination supérieurs ou égales à 0.99, représentent le mieux l'isotherme de sorption à 20 et à 40° C de la mangue « Amélie». Les isothermes exprimées par le modèle de Peleg aux deux températures sont alors:

$$\text{à } 20^{\circ}\text{C} : X_{eq} = 0.4623A_w^{0.3447} + 8.9844A_w^{23.2726} \pm (0.143639X_{eq}) \quad (3.1.a)$$

$$\text{à } 40^{\circ}\text{C} : X_{eq} = 0.0522A_w^{-0.2758} + 5.9856A_w^{8.1524} \pm (0.087039X_{eq}) \quad (3.1.b)$$

Températures	20°C			40°C		
Modèles	R ²	RMSE	Paramètres	R ²	RMSE	Paramètres
GAB	0.989	0.0101	X_m=0.143 C=8526 K=0.9977	0.9709	6.4571 10 ⁻⁴	X_m=0.1046 C=5057 K=1.084
Henderson modifié	0.7462	0.2314	a=0.01998 b=0.3688 c=80	0.9982	6.4598 10 ⁻⁴	a=0.0193 b=0.3316 c =44.36
Peleg	0.9970	0.0028	a=0.4623 b=0.3447 c=8.9844 d=23.2726	0.9992	4.1629 10 ⁻⁴	a =0.0522 b =-0.2758 c =5.9856 d =8.1524

Tableau 2.6: Statistiques des résultats de régression de l'isotherme de la variété Amélie à 20 et à 40°C.

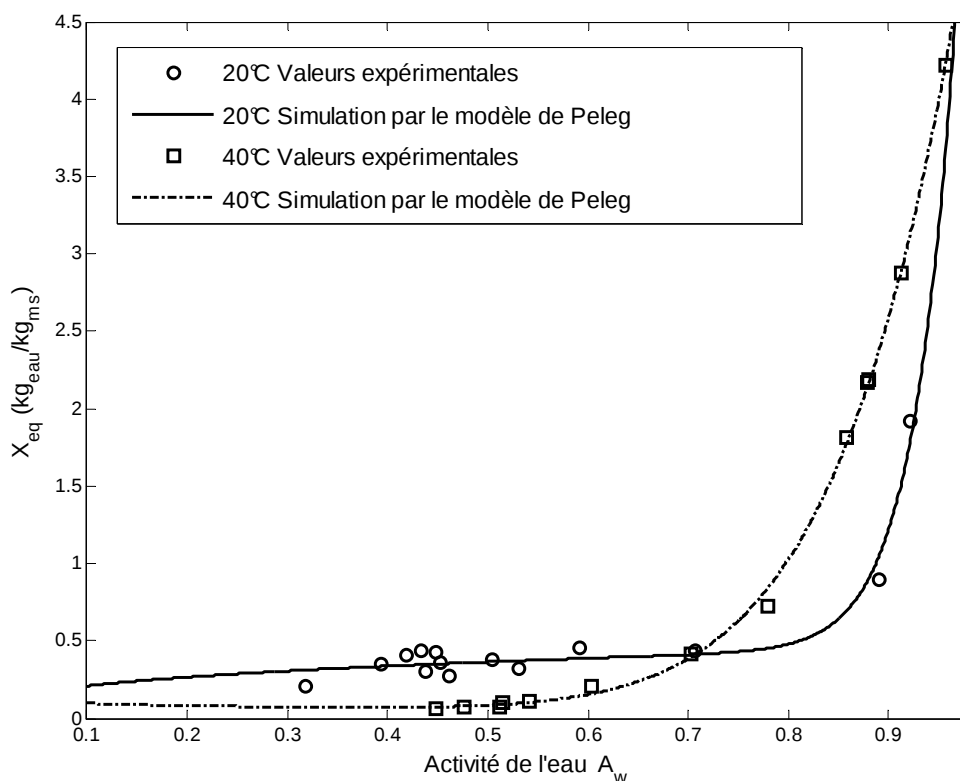


Fig.2.13 Ajustement des valeurs expérimentales de l'isotherme à 20°C et à 40°C de la variété Amélie à l'aide du modèle de Peleg.

3.3.2 Influence de la variété

Les figures 2.14 et les tableaux 2.7 présentent les données sur l'influence de la variété sur l'isotherme de sorption de la mangue à 20° C et à 40° C. Les variétés utilisées ont été: Amélie, Brooks, Lippens et Kent à 40° C et Amélie, Brooks, Lippens et Ananas à 20° C.

En comparant les courbes de désorption de ces différentes variétés à 40° C, on constate que pour $0.2 < A_w < 0.6$, l'isotherme de la variété Amélie se situe en dessous de celles des trois autres variétés; la plus haute d'elles étant celle de la variété Lippens. Dans ce domaine hygroscopique précis des isothermes, à activité égale, les teneurs en eau de la variété Amélie sont les plus basses, ensuite viennent celles de la Brooks et de la Kent, et enfin celles de la Lippens.

Température:40°C

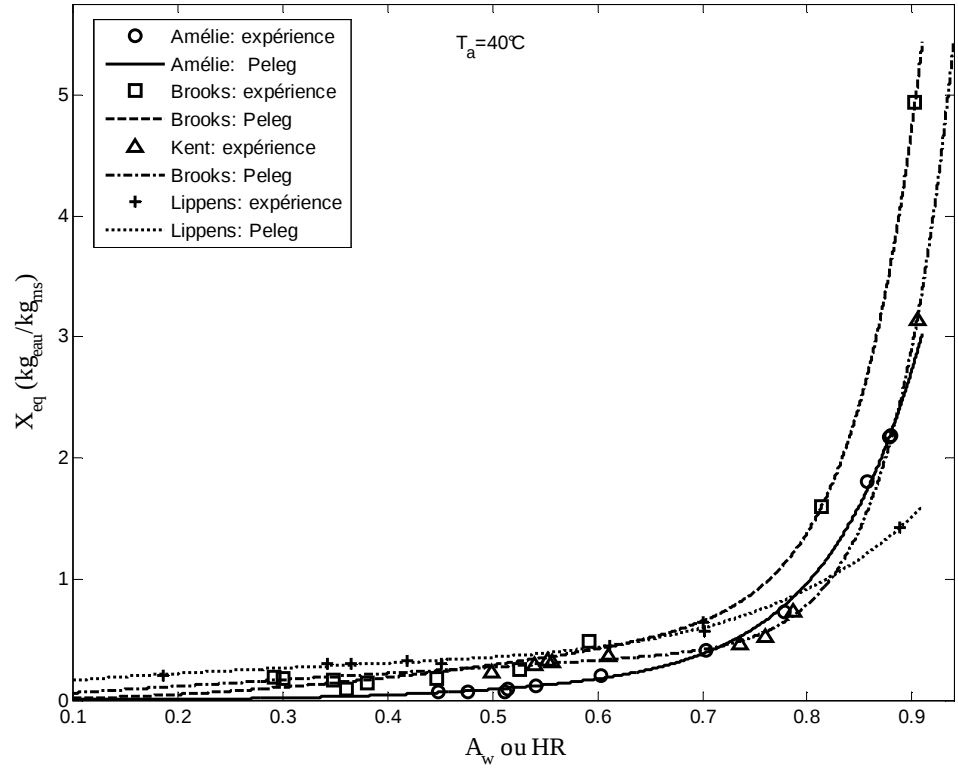
Modèle	GAB			Henderson modifié			Peleg		
Variété	R ²	RMSE	Paramètre	R ²	RMSE	Paramètre	R ²	RMSE	Paramètre
Amelie	0.9709	6.4571 10 ⁻⁴	$X_m=0.1046$ C=5057 K=1.084	0.9982	6.4598 10 ⁻⁴	a=0.01998 b=0.3688 c=80	0.9988	4.1629 10 ⁻⁴	a _p =0.745 b _p =3.138 c _p = 7.038 d _p =11.09
Brooks	0.9901	0.0102	$X_m=0.1737$ C=5597 K=1.069	0.9903	0.01	a=0.0194 b=0.3247 c =31.81	0.9985	0.0016	a _p =18.53 b _p =15.02 c _p = 1.138 d _p =1.98
Lippens	0.9948	3.2415 10 ⁻⁴	$X_m=0.1852$ C=744.7 K=0.9786	0.9495	0.0031	a=0.01908 b=0.8762 c= 48.38	0.9961	2.4072 10 ⁻⁴	a _p =2.131 b _p = 6.45 c _p =0.4474 d _p =0.441
Kent	0.9976	9.075110 ⁻⁴	$X_m=0.1125$ C= 5462 K=1.065	0.9679	0.0122	a=0.021 b=0.326 c =37.65	0.9991	3.4687 10 ⁻⁴	a _p =0.5288 b _p =0.9548 c _p =13.58 d _p =16.33

Tableau 2.7.a : Statistiques de l’ajustement des isothermes de sorption à 20°C de quatre variétés de mangue à l’aide des modèles convenables.

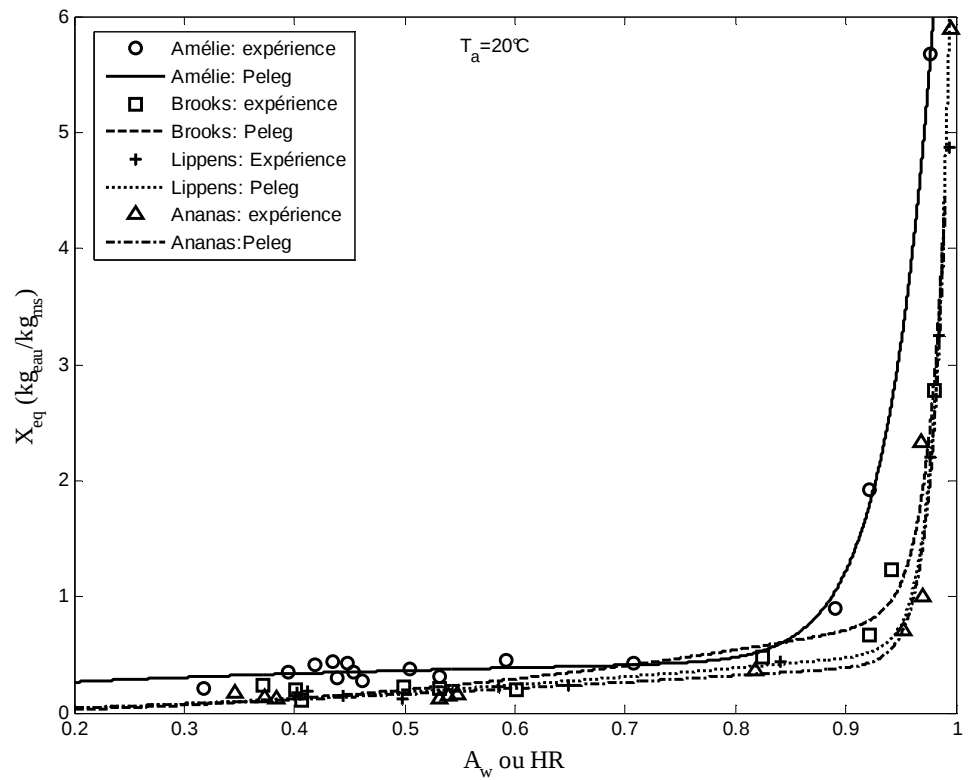
Température: 20°C

Modèle	GAB			Henderson modifié			Peleg		
Variété	R ²	RMSE	Paramètre	R ²	RMSE	Paramètre	R ²	RMSE	Paramètre
Amelie	0.989	0.0101	$X_m=0.143$ C=8526 K=0.9977	0.9769	0.2296	a= 0.07636 b= 0.8162 c=0.06823	0.9970	0.0028	a _p =8.985 b _p =23.28 c _p =0.4625 d _p =0.3454
Brooks	0.9987	0.08743	$X_m=0.0883$ C=5439 K=0.9879	0.9049	0.08787	a=0.07466 b=0.9434 c=0.7515	0.9972	0.135	a _p =6.392 b _p =57.41 c _p =0.8735 d _p =2.149
Lippens	0.9986	0.1072	$X_m=0.07884$ C=5535 K=0.9899	0.9726	0.04708	a=0.08363 b=1.008 c=10.47	0.9973	0.1602	a _p =8.133 b _p =68.18 c _p =0.5564 d _p =1.646
Ananas	0.9846	0.04583	$X_m=0.07385$ C=5603 K=0.9514	0.9054	0.09173	a= 0.2001 b=0.9465 c=0.6273	0.978	0.3107	a _p =7.578 b _p =65.64 c _p =0.445 d _p =1.469

Tableau 2.7.b: Statistiques de l'ajustement des isothermes de sorption à 20°C de quatre variétés de mangue à l'aide des modèles convenables.



(a)



(b)

Fig.2.14. Influence de la variété sur l'isotherme de désorption de la mangue : valeurs expérimentales et ajustement par le modèle de Peleg. (a) influence à 20; (b) influence à 40°C

A partir de ces résultats, on déduit que dans le domaine des activités comprises entre 0.2 et 0.6, la variété Amélie est celle qui retient le moins l'eau (c'est à dire la moins hygroscopique) et la variété Lippens celle qui retient le plus (donc la plus hygroscopique). Comparée aux trois autres variétés, l'Amélie serait donc la plus appropriée pour des opérations de séchage car l'eau y est facilement disponible aux faibles activités. Pour $0.6 < A_w < 0.9$ les variétés Amélie, Kent et Brooks ont presque le même comportement hygroscopique et la variété Lippens semble la moins hygroscopique.

A 40°C, la variété Amélie est la plus hygroscopique sur l'ensemble du domaine d'activités étudié. Les trois autres variétés (Brooks, Lippens et Ananas) ont des courbes de désorption très voisines particulièrement pour $0.3 < A_w < 0.6$ et $0.97 < A_w < 1$. Pour $0.6 < A_w < 0.97$, la Brooks est la plus hygroscopique de ces trois variétés, suivie de la Lippens.

En comparant les isothermes de désorption à 20 et à 40°C, on constate que les écarts de teneurs en eau observés, à activités égales entre les isothermes de différentes variétés semblent plus faibles à 20° C qu'à 40° C. On conclut donc que l'influence de la variété sur l'isotherme de désorption de la mangue n'est pas la même à 20°C qu'à 40°C. Cette influence semble plus prononcée à 40°C qu'à 20°C. L'isotherme de désorption de la mangue serait donc plus influencée par la variété aux fortes températures qu'aux basses températures.

Trois (3) modèles de base d'isothermes de sorption choisis parmi les plus utilisés de la littérature pour les produits alimentaires ont été testés aux données expérimentales. La valeur du coefficient de détermination R^2 a été le premier paramètre d'ajustement utilisé pour identifier les performances de chaque modèle à décrire l'isotherme de sorption des quatre variétés de mangue. Ensuite, vient l'erreur effective (RMSE). Les statistiques des ajustements (tableau 2.7) montrent que les modèles de Guggenheim – Anderson de Boer (GAB), de Peleg et de Henderson modifié donnent globalement de bons résultats d'ajustement pour l'ensemble des cinq variétés aux deux températures. Les essais d'ajustement à plusieurs niveaux des isothermes montrent que le modèle de GAB donne surtout de bons résultats d'ajustement pour les faibles activités A_w comprises entre 0.18 et 0.7 avec des coefficients de détermination généralement supérieurs à 0.99. Ce modèle peut être utilisé pour décrire l'isotherme de sorption de la mangue car, en plus du fait qu'il donne de bon résultats d'ajustement, il représente le modèle semi-empirique le plus polyvalent et le plus courant pour ajuster les isothermes de sorption des fruits. Il a été recommandé par un groupe de chercheurs ouest Européens, par la directive du projet européen COST 90 (Al-Muhtaseb, McMinn, & Magee, 2004) et a été utilisé avec succès pour la variété de mangue sauvage africaine (*Irvingia gabonensis*) par Falade et Aworh (2004) et pour une variété de mangue Camerounaise par

Talla, Jannot, Elambo Nkeng & Puiggali (2005). L'intérêt de ce modèle réside dans la détermination de la teneur en eau en monocouche d'eau et dans le fait qu'il prend en compte à la fois les termes de sorption d'eau en monocouche et en multicouches. Le modèle de Henderson modifié avec $R^2 > 0.9$ pour l'ensemble des variétés et aux deux températures, a une utilisation très pratique car elle a l'avantage de faire intervenir la température. Ce modèle a été utilisé pour l'isotherme de sorption de la mangue par Robert & Shyam (2001), par Mohamad & Nirankar (1995) pour une variété indienne à $18 \pm 4^\circ$ et par Isabell, Sybille, Werner, & Reinhold (2005) pour une variété allemande. Il permet de prévoir l'isotherme à différentes températures voisines en utilisant les mêmes valeurs des paramètres du modèle. En plus, d'après Chiachung Chen (2006), ce modèle est convenable pour la description de l'isotherme de sorption lors de la détermination de la chaleur de sorption isostérique par l'équation de Clausius Clapeyron. Le modèle de Peleg est celui qui donne les meilleurs résultats d'ajustement parmi les trois modèles testés aux données expérimentales de l'isotherme de désorption des différentes variétés avec $R^2 > 0.99$. Cependant, c'est un modèle empirique dont les paramètres n'ont aucune signification physique. Parmi les divers modèles utilisés pour décrire l'isotherme de sorption des fruits, les modèles de Henderson modifié, de GAB et de Peleg peuvent être retenus comme ceux qui décrivent le mieux l'isotherme à 20 et à 40°C des différentes variétés de mangue avec des ordres d'erreur acceptables. Le modèle de Henderson permet ainsi de prévoir l'isotherme de la mangue à plusieurs températures et de déterminer la chaleur de sorption grâce à l'équation de Clausius-Clapeyron. Le modèle de GAB quand à lui permet de déterminer la teneur en eau en monocouche et le modèle de Peleg d'identifier avec une grande précision la teneur en eau d'équilibre du produit correspondant à l'humidité relative de l'ambient dans lequel il se trouve.

3.3.3 Identification des caractéristiques de l'isotherme de sorption

3.3.3.1 La teneur en eau en monocouche d'eau

Le tableau 2.8 présente les teneurs en eau en monocouche d'eau X_m à 20 et à 40°C des variétés Amélie, Brooks, et Lippens déterminées à partir du modèle de GAB. A 40°C, ces valeurs sont supérieures à 10% bs qui est la valeur maximale de référence rapportée dans la littérature pour les produits alimentaires (Van den Berg, 1985; Labuza, Kaanane, & Chen, 1985). Cependant, ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles rapportées par Falade et Aworh (2004) pour la papaye et la mangue *Irvingia gabonensis* (2.91–16.04% bs à 20-40°C). Elles sont aussi du même ordre que celles données par Talla, Jannot, Elambo

Nkeng & Puiggali (2005) 6.5-26.6% (bs) pour la banane, la mangue et la papaye. Ayranci, Ayranci, et Dogantan (1990) et Tsami, Marinos-Kouris et Maroulis (1990) ont aussi rapporté des valeurs voisines de X_m dans la gamme 9.7–17.3% bs pour les fruits séchés. En tenant compte des marges de tolérance, l'ensemble des valeurs de X_m obtenues dans notre étude est situé dans la gamme 3.35-24.72% (bs) qui concorde bien avec le domaine des teneurs en eau de conservation des fruits séchés sans risque de dégradation d'origine physico-chimique. Il est facile de remarquer sur le tableau 2.8 que la valeur de X_m varie selon les variétés dans l'ordre : $X_m(\text{Amélie}) < X_m(\text{Brooks}) < X_m(\text{Lippens})$ à 40°C et $X_m(\text{Lippens}) < X_m(\text{Brooks}) < X_m(\text{Amélie})$ à 20°C. Cette différence entre les valeurs de X_m des quatre variétés pourrait se justifier par une différence de teneur en sucre de ces quatre variétés conformément aux résultats de Mazza (1982) qui a montré que l'augmentation de la teneur en sucre de la patate diminuait la valeur de X_m . Compte tenu du fait que la teneur en sucre des fruits augmente avec la maturité, cette différence pourrait aussi s'expliquer en partie par la différence de la teneur en sucre due à la différence de maturité entre les quatre variétés pendant les expériences. La valeur de X_m à 40°C (10.46%) de la variété Amélie est inférieure à celle à 20°C (14.3%). Pour cette variété, la valeur de X_m diminue donc lorsque la température d'équilibre augmente. Ce résultat est en accord avec ceux de Iglesias & Chirife (1975) et Ayranci, Ayranci, et Dogantan (1990). Cette décroissance de X_m avec la température serait due à la réduction des sites d'adsorption d'eau active liée aux changements physico-chimiques induits par la température (Iglesias & Chirife, 1976; Sopade, Ajisegiri, & Abass, 1996). En plus, l'élévation de température constitue un gain d'énergie cinétique (énergie d'activation) aux molécules d'eau absorbées qui arrivent à se détacher plus facilement du substrat solide. Cependant pour les variétés Lippens et Brooks, X_m croît avec la température. Cette tendance pourrait se justifier par une forte différence de teneur en sucre (en °Brix) liée à la différence de maturité entre le lot d'échantillons ayant servi à l'établissement de l'isotherme à 20° et celui ayant servi à 40°C. Dans ce cas, pour ces variétés, l'influence de la teneur en extrait sec soluble (qui n'a pas été mesuré pendant l'établissement de l'isotherme aux deux températures) aurait été prépondérante par rapport à celle de la température.

Températures	40°C			20°C		
Variété	X _m (bs)	Bornes de tolérance	R ²	X _m (bs)	Bornes de tolérance	R ²
Amélie	0.1046	0.0336 – 0.1756	0.9709	0.143	0.1093 – 0.1767	0.989
Brooks	0.1737	0.1003 - 0.2472	0.9901	0.0883	0.07947-0.09713	0.9987
Lippens	0.1852	0.1585- 0.2119	0.9948	0.07884	0.07177-0.08592	0.9986

Tableau 2.8 : Teneurs en eau en monocouche à 20°C et à 40°C de plusieurs variétés.

3.2.3.2 La chaleur de sorption isostérique

Pour chacune des quatre variétés, la variation de l'enthalpie différentielle(ou chaleur de sorption isostérique) et de la chaleur totale de sorption en fonction de la teneur en eau est représentée sur les figures 2.15. On peut remarquer que l'enthalpie différentielle est très élevée pour les faibles teneurs en eau à cause de la forte liaison qui existe entre l'absorbant (l'eau) et l'absorbant (le substrat biologique) pour les zones de monocouche et de multicouches d'eau. Cependant, pour les fortes teneurs eau, l'enthalpie différentielle est faible et peut être négligée devant la chaleur latente de vaporisation. Cela est dû à la présence d'eau libre à la surface du produit et dans les macroporosités aux fortes teneurs en eau. L'évacuation de cette eau libre ne nécessitant que la chaleur latente de vaporisation, la chaleur totale de sorption se résume donc dans ce cas à celle-ci. On constate que pour les fortes teneurs en eau, l'enthalpie différentielle de la variété Lippens est la plus faible, ensuite viennent celles de l'Amélie et de la Kent et enfin celle de la Brooks. Mais, aux faibles teneurs en eau les variétés Amélie et Kent présentent les plus faibles enthalpies différentielles. Cela confirme le caractère moins hygroscopique de ces deux variétés par rapport aux autres pour les faibles teneurs en eau. L'enthalpie différentielle n'étant sollicitée dans le bilan énergétique du mécanisme de désorption qu'aux faibles teneurs en eau, les variétés Amélie et Kent qui présentent les plus faibles valeurs de cette énergie sont celles qui seraient les plus aptes au séchage. Les expressions des chaleurs de sorption Q_s totales établies pour les quatre variétés à 40°C sont:

$$\text{Amélie : } Q_s = 885.9036 \frac{X^{0.3316} \exp(-1.6298X^{0.3316})}{1 - \exp(-1.6298X^{0.3316})} + L_v \quad (3.22)$$

$$\text{Brooks : } Q_s = 890.0305 \frac{X^{0.3247} \exp(-1.3948X^{0.3247})}{1 - \exp(-1.3948X^{0.3247})} + L_v \quad (3.23)$$

$$\text{Kent : } Q_s = 961.1046 \frac{X^{0.326} \exp(-1.6275X^{0.326})}{1 - \exp(-1.6275X^{0.326})} + L_v \quad (3.24)$$

$$\text{Lippens : } Q_s = 874.8986 \frac{X^{0.8762} \exp(-1.6863X^{0.8762})}{1 - \exp(-1.6863X^{0.8762})} + L_v \quad (3.25)$$

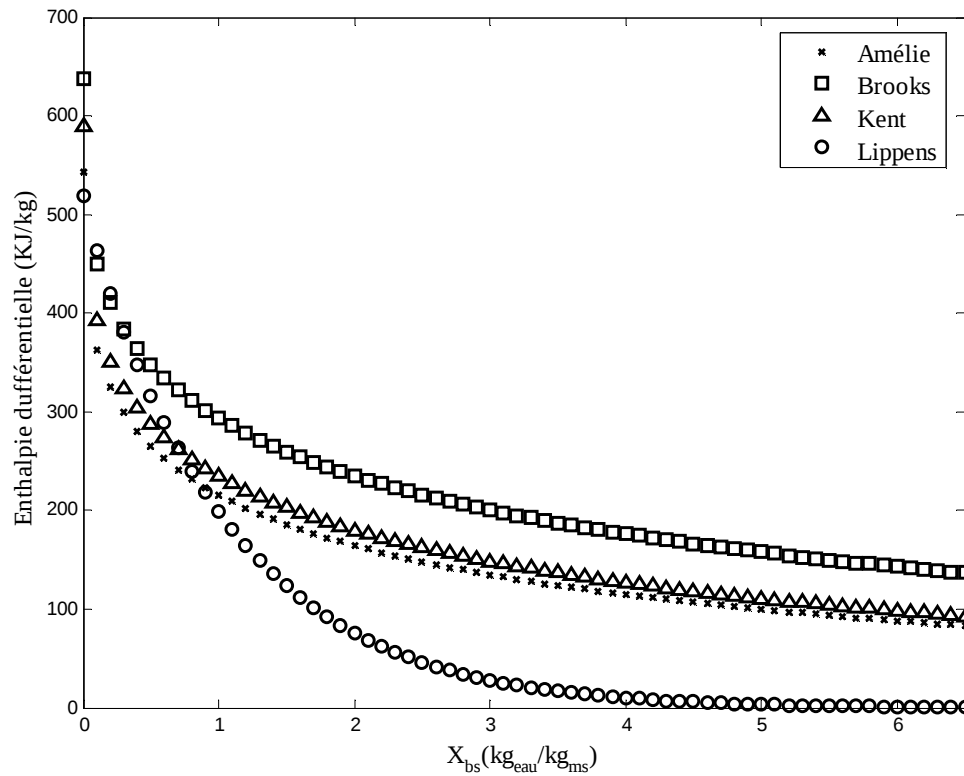


Fig.2.15.a Evolution de l'enthalpie différentielle en fonction de la teneur en eau (bs) à 40°C pour 4 variétés de mangue.

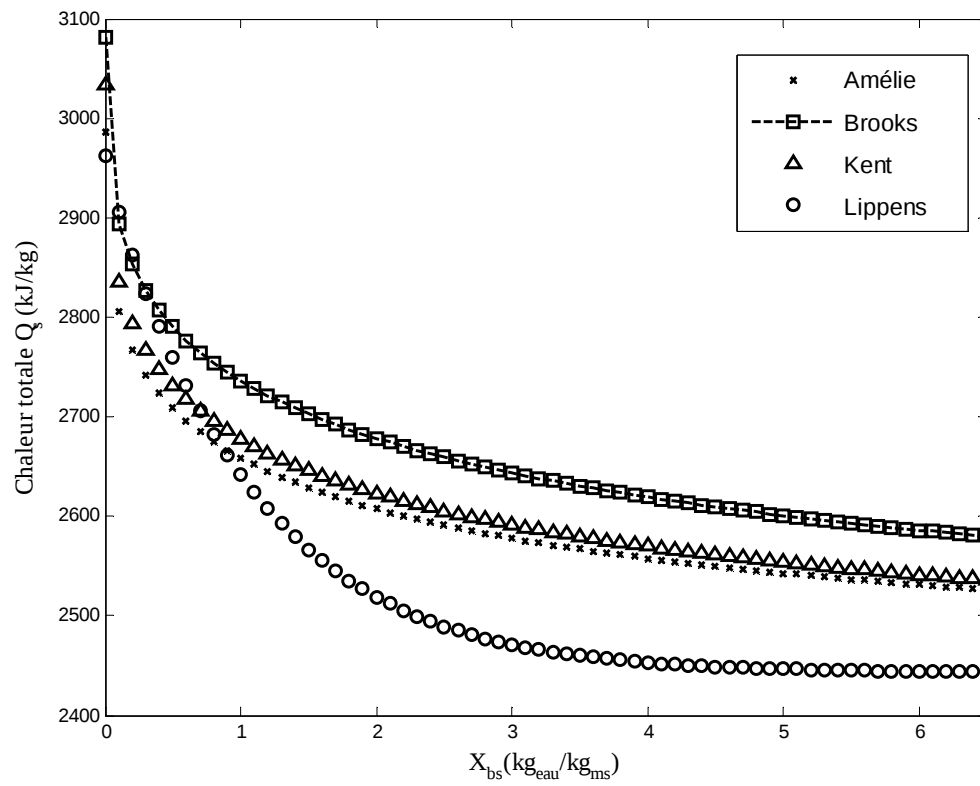


Fig.2.10.b Evolution de la chaleur totale de séchage en fonction de la teneur en eau (bs) à 40°C pour 4 variétés de mangue.

3.4 La contraction

3.4.1 Influence de la température

La figure 2.11 donne l'évolution du taux de contraction S_b des morceaux de mangues mûres en fonction de la teneur en eau réduite $\frac{X}{X_o}$ à 50, 60 et à 70° C. La variété utilisée a été l'Amélie et les conditions opératoires des mesures sont précisées sur le tableau 2.2. Les courbes de contraction obtenues aux différentes températures sont très voisines et ont une allure quasi linéaire. Le retrait de la mangue est donc peu influencé par la température. Comme la plupart des fruits et légumes, la mangue se contracte alors suivant un modèle linéaire presque parfait caractérisé par un coefficient de retrait linéaire. Cette contraction linéaire de la mangue mûre traduit le fait que le départ de l'eau est presque compensé par la diminution de volume du produit pendant le séchage. En conséquence, la mangue mûre sèche est un produit compact de faible porosité et de masse volumique élevée. Il a été possible d'ajuster les mesures expérimentales de contraction à l'aide de modèles linéaire et quadratique (tableau 2.9). On peut remarquer qu'il n'existe pas de différence significative entre les valeurs des paramètres d'ajustements (E (%), R^2 et Var) pour ces deux modèles qui ajustent tous deux aussi bien les données expérimentales. Cependant, à la différence du modèle quadratique, le modèle linéaire d'additivité des volumes est un modèle fondamental, simple, basé sur une interprétation physique du mécanisme de la contraction à travers les bilans de conservation des masses d'eau et de matière sèche. Ce modèle linéaire serait alors celui qui représente le mieux le mécanisme de retrait de la mangue à 50, 60 et 70°C. Les équations de contraction obtenues sont alors :

$$\begin{aligned} \text{à } 50^\circ\text{C} : S_b &= 0.0632 \frac{X}{X_o} + 0.1829 \pm 0.0332 S_b \\ \text{à } 60^\circ\text{C} : S_b &= 0.9157 \frac{X}{X_o} + 0.0593 \pm 0.0493 S_b \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\text{à } 70^\circ\text{C} : S_b = 0.9547 \frac{X}{X_o} + 0.0491 \pm 0.0754 S_b \quad (3.4)$$

A partir des équations (23) et (24), de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la droite $S_b = f\left(\frac{X}{X_o}\right)$, on évalue la masse volumique intrinsèque de la matière anhydre à 1468.7

kg/m^3 . Cette masse volumique mesurée, à l'aide d'un pycnomètre à hélium, sur des morceaux de mangue de dimensions initiales $4 \times 1 \times 1$ et $2 \times 2 \times 1$ est en moyenne de 1485.5 kg/m^3 avec un écart type de 0.8% de la valeur déterminée par le modèle linéaire. Ces résultats confirment l'adaptation du profil linéaire à la courbe de contraction de la mangue. Ils sont en accord avec l'ordre de grandeur donné par les travaux de Lozano, Rostein & Urbicain (1993) qui estiment que la masse volumique pour les fruits et légumes varient entre 1300 et 1550 kg/m^3 .

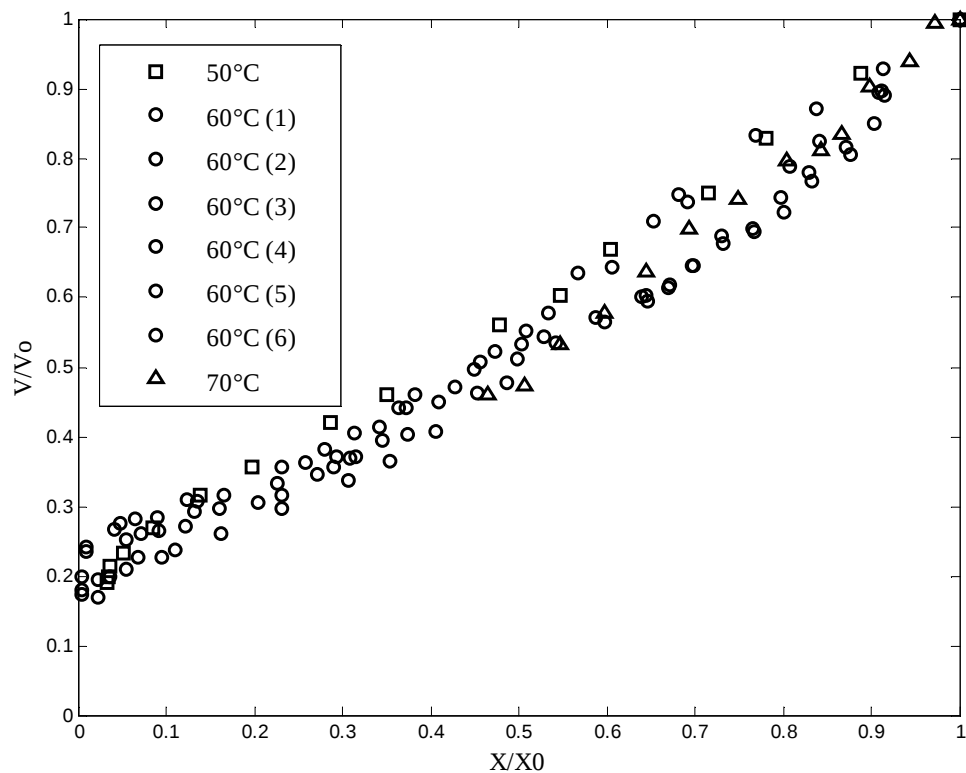


Fig.2.11 Influence de la température sur la contraction de la mangue « Amélie » mûre.

(1) coupe transversale, support papier cuisson essai1; (2) coupe longitudinale, support papier cuisson essai 1; (3) coupe longitudinale, support toile PVC; (4) coupe transversale, support toile PVC; (5) coupe transversale, support papier cuisson essai 2; (6) coupe longitudinale, support papier cuisson essai 2.

Le modèle linéaire d'additivité des volumes appliqué au retrait de la mangue « Amélie » enveloppant toutes conditions opératoires s'exprime alors par :

$$S_b = \frac{1}{1+1.4687 X_o} + \frac{1.4687 X_o}{1+1.4687 X_o} \left(\frac{X}{X_o} \right) \quad (3.5)$$

En supposant que le retrait du produit est isotropique, la contraction surfacique s'exprime par :

$$S_s = \frac{S}{S_o} = \frac{V}{V_o} \times \frac{e_o}{e} = \frac{S_b}{S_e} = S_b S_b^{-1/3} = S_b^{2/3} = \left(\frac{1+1.4687 X}{1+1.4687 X_o} \right)^{2/3} \quad (3.6)$$

Modèle	Linéaire			quadratique		
Température	R ²	E(%)	Paramètres	R ²	E(%)	Paramètres
50°C	0.9972	3.3249	a'=0.0623 b'= 0.1829	0.9974	3.3498	x'=0.0003 y'=0.0588 z'=0.1879
60°C (6)	0.9956	4.9437	a'=0.9157 b'=0.0593	0.9983	5.2866	x'=0.0754 y'=0.7211 z'=0.2106
70°C	0.9957	7.5394	a'= 0.9547 b'=0.0491	0.9957	7.5580	x'= 0.0489 y'= 0.9569 z'=-0.0025

Tableau 2.9.a : Statistiques de l'ajustement de la contraction à 50, 60 et 70 °C

Méthode de détermination de $\rho_s(\text{kg/m}^3)$	Évalué à partir des données de contraction à 70° C			Mesuré à l'aide du pycnomètre à hélium		
	Masse(g)	Volume (cm ³)	ρ_s	Masse(g)	Volume (cm ³)	ρ_s
	1.973	1.494	1468.7	3.011	2.028419	1484.4
				3.1873	2.144005	1486.6

Tableau 2.9.b Evaluation de la masse volumique de matière sèche par les mesures de contraction et par le pycnomètre.

3.4.2 Influence de la maturité en fonction de la position

La figure 2.12 présente l'évolution du taux de contraction S_b (en fonction de la teneur en eau (b_s) reportée à sa valeur initiale) des morceaux de mangues Kent mûre et verte prélevés sur les trois zones du fruit. Les conditions opératoires de ces mesures sont présentées sur le tableau 2.2. Ces échantillons ont été séchés à 60°C sous une humidité relative voisine de 10% et la valeur finale moyenne du taux de contraction pour l'ensemble des trois zones et pour les deux états de maturité a été $S_b = 0.102$.

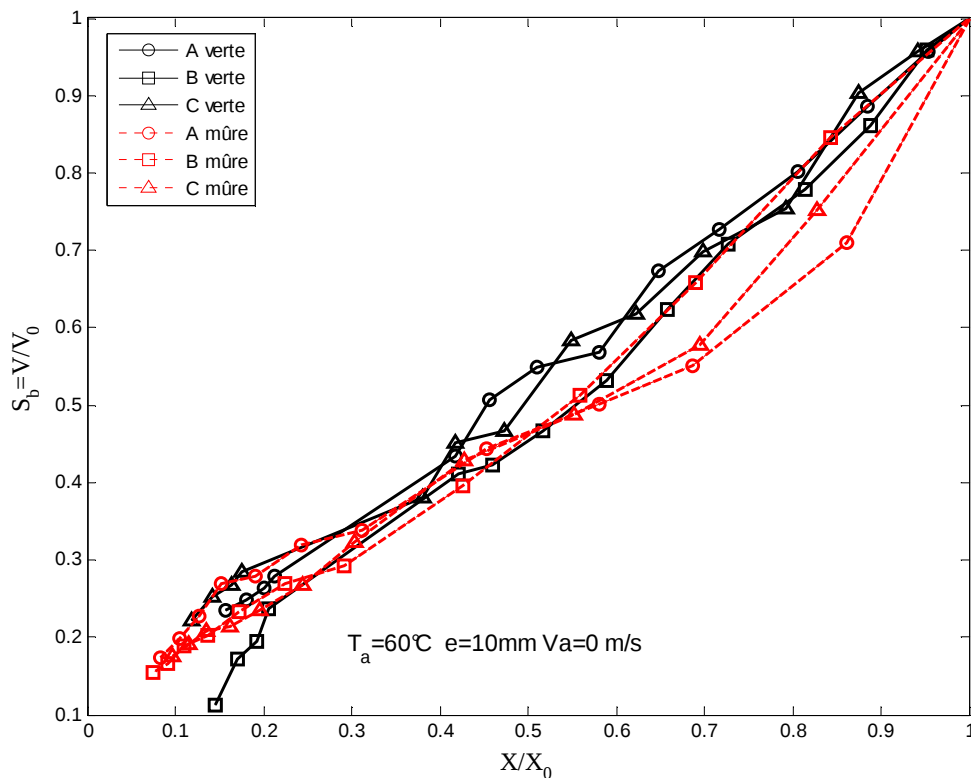


Fig.2.12 Evolution de la contraction des mangues pendant le séchage à l'étuve.

Il est facile de remarquer que pour $X < 0.4X_0$ les taux de contraction des mangues mûres sont plus faibles que ceux des mangues vertes. Pour cette zone de la courbe de contraction, le retrait des morceaux de mangue mûre est donc plus important que celui des mangues vertes. Pour $X > 0.4X_0$, cette tendance semble inversée sauf pour les toutes dernières étapes du séchage où aucune tendance ne se dessine. Cette différence entre la contraction de la mangue verte et de la mangue mûre pourrait s'expliquer dans la suite de notre étude par une différence entre leurs vitesses de séchage. Il ressort donc de ces analyses que le degré de contraction de la mangue est fonction de la vitesse de séchage. Plus la mangue sèche vite, plus

elle se contracte. En début de séchage, la mangue mûre se contracte plus que la verte parce qu'elle sècherait plus vite que celle-ci. Enfin, pour une mangue de maturité donnée, les échantillons provenant des trois zones A, B, C semble se rétrécir de la même manière.

3.4.3 Influence de la variété

Les figures 2.13 présentent le comportement du retrait des variétés de mangue Amélie, Kent et Keitt au cours du séchage à 60°C. Les autres conditions opératoires de ces mesures de contraction sont précisées dans le tableau 2.2. La figure 2.13 (a) traduit la contraction de la tranche de produit par l'évolution du taux de contraction S_b en fonction de la teneur en eau rapportée à sa valeur initiale X/X_0 . Elle montre qu'à 60°C chacune de ces trois variétés a un profil de contraction quasi-linéaire ($R^2=0.9919$, $E=5.799\%$) avec des courbes de contraction qui se rapprochent fortement. Cela signifie qu'à 60°C le type de variété n'a pas assez d'influence sur le retrait de la tranche de mangue. La figure 2.13 (b) donne la variation de porosité du produit à travers le volume d'eau évaporée en fonction de la perte de volume de l'échantillon. On constate que la courbe évolutive du volume d'eau évaporée en fonction du volume de retrait de l'échantillon est également quasi-linéaire pour les trois variétés. En plus, cette courbe se rapproche énormément de la première bissectrice surtout pour les variétés Amélie et Keitt. On peut donc affirmer que pour ces trois variétés de mangue, le volume d'eau évaporée à chaque instant du séchage est quasiment égal au volume de retrait du produit. La contraction est donc presque parfaite. La transition de l'état élastique à l'état vitreux de la tranche de mangue mûre n'a donc lieu qu'à la fin du séchage. Il n'y a donc pas de création de porosité pendant le séchage de la mangue mûre et le produit séché a une structure très compacte avec une très faible porosité. Cependant, la très faible création de porosité constatée semble plus prononcée pour la variété Kent au cours du séchage et pour la variété Keitt à la fin du séchage.

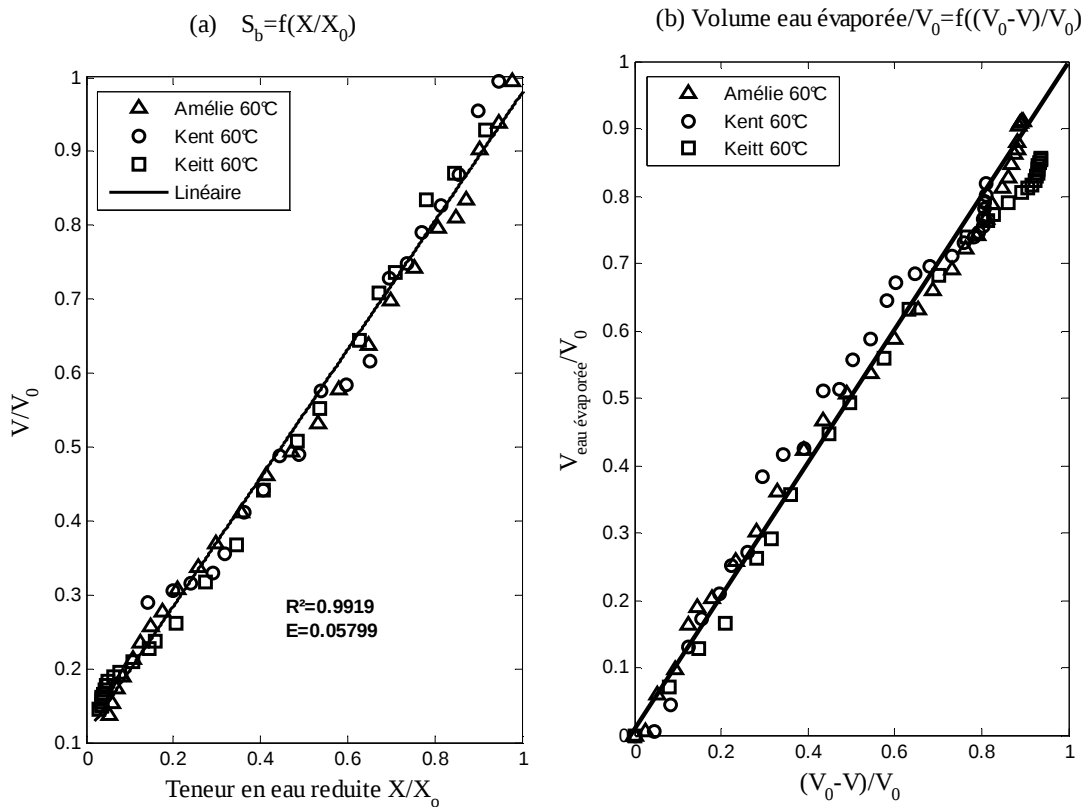


Fig.2.13 Influence de la variété sur le retrait d'une tranche de mangue séchée à 60°C

3.4.4 Influence du type de support et du sens découpe

La figure 2.14 présente l'influence du support et de la découpe sur la contraction de morceaux de mangue en coupe transversale et longitudinale. La variété utilisée a été la Kent et deux types de support (plaque métallique et toile PVC) ont servi au séchage à 60°C. On constate que pour les deux modes de découpe et pour chaque support, le profil de contraction est toujours linéaire. Pour chaque type de support, les courbes de contraction en coupe longitudinale et transversale sont presque les mêmes. On en déduit que le sens de coupe d'un échantillon de mangue n'a pas d'influence sur son retrait au cours du séchage. Pour un même sens de coupe, en comparant les courbes de contraction avec les deux types de support, on remarque une différence non significative entre les échantillons séchés avec toile PVC et ceux avec plaque métallique. Le retrait du produit lorsqu'il est séché avec support métallique semble un plus important que quand il est séché avec support PVC. Ce résultat pourrait mieux s'expliquer dans la suite de notre travail par le fait que les échantillons séchés avec support métallique sèchent plus vite, et donc se rétrécissent plus. Cette tendance se justifie par le fait

qu'en séchage-métal, le mode de séchage conductif intervenant en plus du séchage convectif contribue à accroître les vitesses de séchage. A partir de ces résultats, on déduit que le type de support peut avoir une légère influence sur la contraction de la mangue. Cependant, cette influence non significative pourrait être négligée.

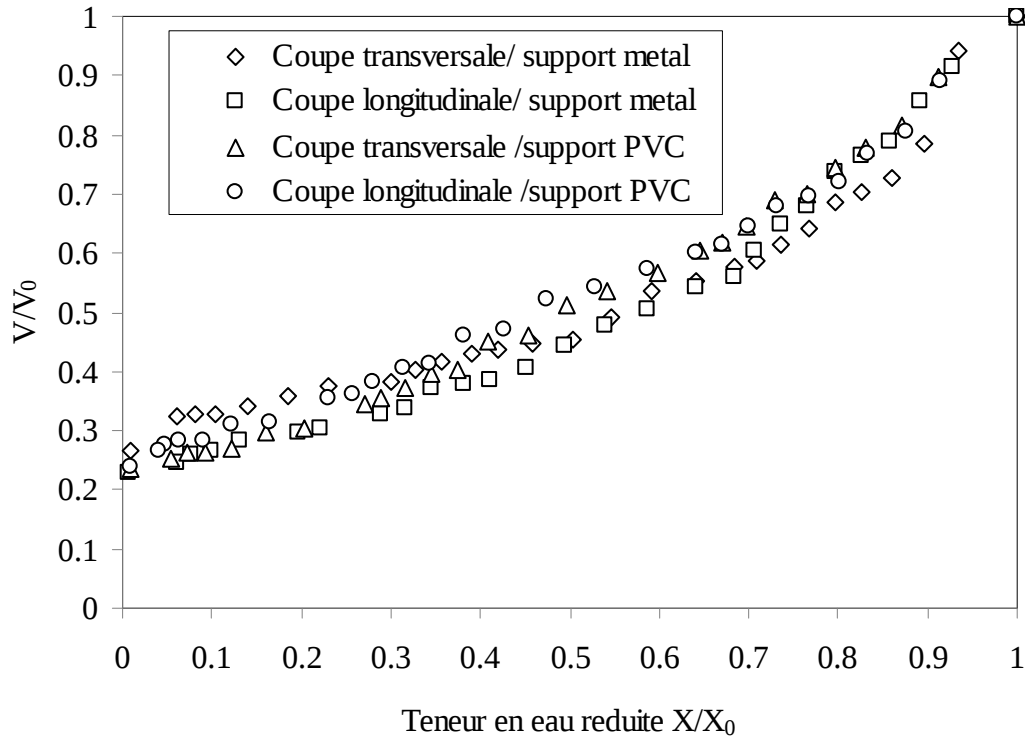


Fig.2.14 Influence du type de support et de la découpe sur le retrait d'un morceau de mangue séchée à 60°C

3.4.5 Influence de la taille de l'échantillon

L'influence de la taille sur le retrait d'un morceau de mangue au cours du séchage est illustrée par la figure 2.15. La variété utilisée a été la Kent et le séchage a lieu à 60°C. Les autres conditions opératoires sont précisées sur le tableau 2.2. Sur la figure 2.1, on constate que pour $X < 0.6X_0$, les courbes de contraction des échantillons de dimensions 7x5x1 et 4x1x1 sont confondues. Pour cette gamme de teneur en eau, la taille n'a donc pas d'influence sur le retrait de l'échantillon. Cependant pour $X > 0.6X_0$, un écart important entre les profils de ces courbes de contraction est facilement observable. Pour ce domaine de teneur en eau, le taux de contraction volumique de l'échantillon de grande taille est le plus faible. Cet

échantillon de grande taille se rétrécit donc plus que l'échantillon de petite taille 4x1x1. Des expériences répétées avec des échantillons de tailles différentes significatives ont donné les mêmes résultats. On conclut que la taille de l'échantillon n'a d'influence sur le retrait du produit qu'aux faibles teneurs lorsque celui-ci entre dans son domaine hygroscopique. Dans ce cas, les échantillons de grande taille se contracte plus que celles de petite taille.

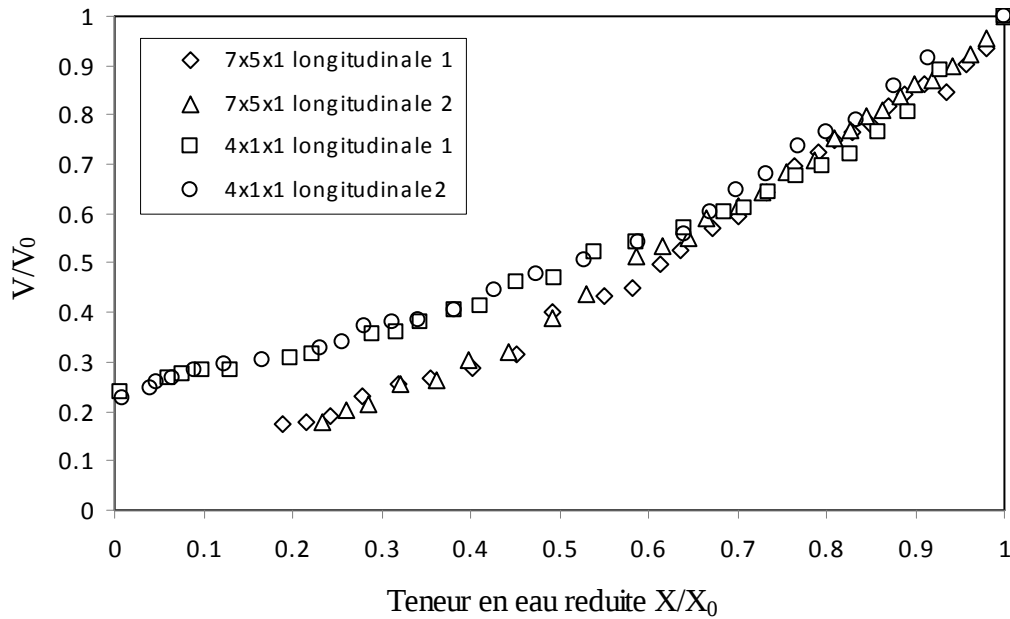


Fig.2.15 Influence de la taille sur le retrait d'un morceau de mangue séchée à 60°C

Conclusion

Dans ce chapitre, les conditions d'équilibre air-produit et le retrait du produit pendant le séchage convectif de la mangue ont été caractérisées. Le fruit a été initialement caractérisé par sa morphologie et l'influence de la maturité sur ses caractéristiques physico-chimiques et texturales a été analysée. Les isothermes de désorption de plusieurs variétés ont ensuite été établies à 20° C et à 40° C et les caractéristiques de l'isotherme de désorption ont été déduites. La contraction volumique de la mangue à 50, 60 et 70° C a été étudiée expérimentalement et simulée par le modèle linéaire d'additivité des volumes. Enfin, l'influence de la position, de la

température, de la maturité, de la variété, de la découpe et de la taille sur le retrait du produit a été analysée. A partir de cette étude, nous pouvons déduire que :

- Le ratio sucre/acide et les paramètres L^* , a^* , b^* de couleurs permettent de caractériser l'état de maturité de la mangue. Lorsque la maturité augmente, le ratio sucre/acide augmente, et la déviation de couleur par rapport au blanc standard ΔE augmente.
- Le type de variété a une influence sur l'isotherme de sorption de la mangue à 20 et à 40°C et cette influence est surtout prononcée à 40°C.
- Les modèles d'isothermes de Peleg, GAB et Henderson sont ceux qui ajustent le mieux l'isotherme de sorption des différentes variétés de mangue. Le modèle de GAB a permis d'évaluer la teneur en eau en monocouche des différentes variétés. Cette teneur en eau variant dans la gamme 7.88-18.52% (bs) à 20 et 40°C.
- De toutes les variétés utilisées, l'Amélie et la Kent avec les plus faibles valeurs de chaleur de sorption, semblent les moins hygroscopiques aux faibles teneurs en eau. Ces deux variétés semblent donc les plus aptes pour des opérations de séchage.
- Les contractions volumiques à 50, 60° C et à 70° C de la mangue mûre suivent des modèles linéaires et le linéaire d'additivité des volumes pour le fruit mûr a permis d'évaluer le coefficient de retrait linéaire et la masse volumique intrinsèque de la matière anhydre qui sont respectivement de 1.468 et 1468.7 kg/m³.
- Le retrait de la mangue pendant le séchage n'est pas influencé par la température, la variété, la découpe et le type de support. Seule la taille de l'échantillon pourrait l'influencer.

Ce travail nous a permis de fournir les ordres de grandeur des caractéristiques d'équilibre air-produit et de contraction de la mangue face au séchage. Ces résultats obtenus présentent un intérêt capital dans la caractérisation du séchage convectif présentée au chapitre 3 et dans l'étude effectuée au chapitre 4 sur le séchage solaire de tranches de mangue disposées en couches minces. Cette étude pourrait être complétée par l'analyse de l'influence de la maturité sur l'isotherme de sorption et des paramètres aérauliques sur la contraction et le croûtage.

CHAPITRE 3

SECHAGE CONVECTIF DES MANGUES : INFLUENCE DES CONDITIONS EXTERIEURES ET DES CARACTERISTIQUES DU PRODUIT

1. Théorie

1.1 La cinétique et les phases du séchage

La caractérisation du séchage d'un produit alimentaire, tel que la mangue, passe par l'établissement de ses cinétiques de séchage. Ces cinétiques sont à la fois fonction des paramètres de l'air de séchage (température, vitesse, pression et humidité) et des dimensions du produit (épaisseur, diamètre, longueur, largeur, surface, volume). La courbe de séchage convectif d'un produit est obtenue en mesurant la variation de sa masse en fonction du temps. La connaissance de la masse de matière anhydre à la fin du processus permet de déterminer les valeurs de teneurs en eau correspondant aux différentes prises de masse. En portant la teneur en eau en base sèche X ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$) en fonction du temps, on obtient une courbe de séchage du type de la figure 3.1.a. Théoriquement, la courbe de séchage ainsi définie présente plusieurs phases de séchage mise en évidence par la courbe « vitesse de séchage – $\frac{dX}{dt}$ en fonction du temps » (figure 3.1.b) ou la courbe « vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau » (Krisher, 1963) (figure 3.1.c). Cependant, toutes ces phases ne sont pas forcément observables lors d'une opération de séchage. Lorsqu'elles sont identifiables, on distingue essentiellement trois phases avec l'existence d'une quatrième phase chez certains produits tel que le hêtre [Moyne, in Desmorieux(1992)]. Ces trois (3) phases sont :

- La phase transitoire de mise en température ou phase 0 (AB),
- La phase à vitesse de séchage constante ou première phase (BC),
- La phase à vitesse de séchage décroissante ou deuxième phase (CD).

Le point C est appelé point critique du séchage.

Pendant le séchage convectif, deux modes de transfert de masse ont lieu simultanément :

- Le transport externe de vapeur d'eau qui a lieu dans la couche limite à la périphérie du produit. Ce type de transfert ne dépend que de la forme du produit et des conditions aérothermiques externes.
- Le transport interne qui a lieu au sein du produit et qui dépend de la structure interne du produit et des propriétés propres du matériau.

Au cours du séchage, le processus de transport le plus lent impose sa cinétique de séchage. Aussi, on constate que le transfert externe gouverne le séchage durant la phase de séchage à vitesse constante alors que pendant la période à vitesse décroissante, c'est le transfert interne qui devient progressivement limitant.

1.1.1 Phase transitoire de mise en Température

Elle est généralement courte et souvent non observable lorsque sa durée est très faible devant la durée totale du séchage. Cette phase de mise en température caractérisée par de faibles nombres de Biot massique et thermique est souvent négligée dans la modélisation du séchage convectif de la plupart des produits biologiques notamment la mangue.

1.1.2 Phase à vitesse de séchage constante

Cette phase se déroule du point initial ($X=X_0$) jusqu'au point critique ($X=X_{cr}$). Elle correspond à l'évaporation en régime permanent d'eau libre à la surface du produit. Cette surface est alors saturée en eau et est à une température proche de la température de bulbe humide de l'air. La chaleur apportée par convection en surface sert à évaporer cette eau libre. Dans la couche limite de gaz entourant le produit, la pression de vapeur d'eau est quasi égale à la pression de vapeur d'eau saturante aux conditions de températures et de pressions de la couche limite. Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide. Le flux d'eau établie par capillarité entre l'intérieur du produit et sa surface externe est suffisante pour maintenir une vitesse d'évaporation constante. Les transferts sont gouvernés principalement par la capillarité du liquide à l'intérieur du produit et l'évaporation de ce liquide en surface. La nature du solide n'a aucun effet sur cette période. Par contre la forme du solide peut influencer sur sa vitesse de séchage (en $\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{s}^{-1}$). La phase de séchage à vitesse constante n'est pas toujours identifiable, même pour les produits à forte teneur en eau (fruits, produits végétaux en général). Cela est lié au fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'eau vers la surface du produit et que le transfert est limité dès le début par la diffusion interne. A la fin de la phase à vitesse de

séchage constante, les forces capillaires diminuent, le flux massique d'eau transférée en surface devient inférieur au flux massique d'eau évaporée. La pellicule d'eau entourant le produit n'est plus saturée, alors la vitesse de séchage décroît, limitée de plus en plus par les transferts internes.

1.1.3 Phase à vitesse de séchage décroissante

Lorsque le flux d'eau transporté par capillarité de l'intérieur du produit vers sa périphérie n'arrive plus à compenser les pertes par évaporation à la surface externe, la deuxième phase s'installe et le transport interne de l'eau devient progressivement le facteur limitant aux transferts. Plusieurs phénomènes sont à l'origine de cette diminution progressive de la vitesse de transport:

- Pour les produits poreux, il se crée un front de vaporisation se déplaçant vers l'extérieur de la matière à sécher. Le chemin parcouru par la vapeur d'eau devient de plus en plus long et sa pression à la surface du produit diminue. La différence de pression de vapeur d'eau entre la surface du produit et le milieu ambiant appelée " potentiel d'échange" décroît et par conséquent la vitesse décroît.
- Pour les produits non poreux, la diminution de la vitesse peut s'expliquer soit par la diffusion d'eau et la diminution de cette diffusivité au cours du séchage ou soit par le croûtage éventuel du produit et l'abaissement de son activité de l'eau.

L'étude théorique de cette phase limitée par les transferts internes est devenue difficile à cause de la méconnaissance de la structure interne des produits et de la coexistence de nombreux mécanismes de transport d'eau liquide et de vapeur. Dans le cas de produits agro-alimentaires tels que les fruits et légumes, ces transferts internes sont contrôlés principalement par la diffusion de matière. Pour ces types de produit, la théorie de diffusion permet d'expliquer le mouvement de l'eau en deuxième phase. Cette théorie sera donc utilisée dans la suite de ce travail pour caractériser les transferts internes au cours du séchage de la mangue.

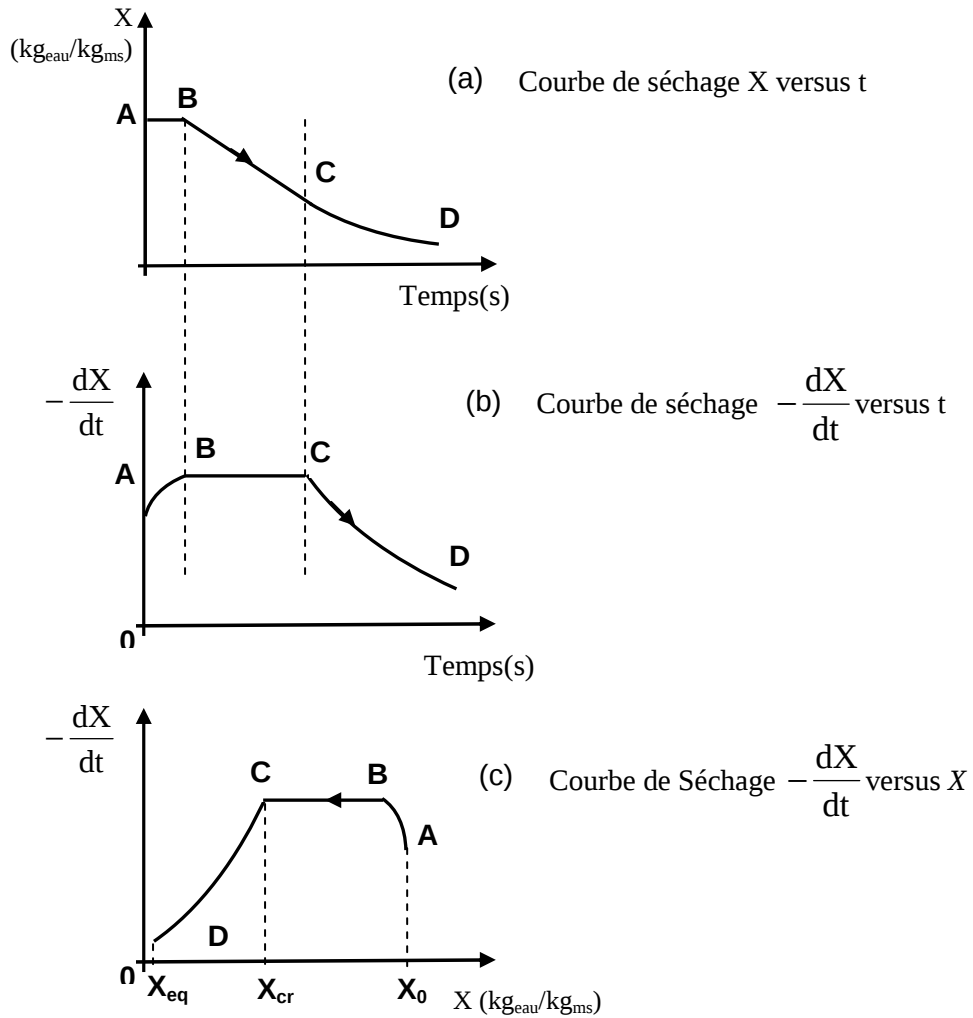


Fig. 3.1. (a) Teneur en eau en fonction du temps
 (b) Vitesse de séchage en fonction du temps
 (c) Vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau (*Krischer, 1963*)

1.2 Les mécanismes de transfert

1.2.1 Transfert de chaleur

Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur: convection, conduction et rayonnement. Ces modes de transfert peuvent être utilisés seuls ou en combinés. Pour le séchage convectif de produit biologique, le mode de transfert convectif est prédominant avec un mode conductif minoritaire au sein du produit.

1.2.1.1 Transfert externe convectif à la surface du produit

Lors du séchage convectif, on fait circuler de l'air chaud et sec sur un lit de produits à sécher. Un transfert de chaleur par convection s'effectue alors de l'air vers le produit sous l'effet de la différence de température existant entre les deux. Ce type de transfert est régi par la loi de Newton (Andre & Roland, 1991):

$$Q = hS(T_a - T_s) \quad (3.1)$$

Où Q (Watts) est la quantité de chaleur transférée par unité de temps, $S(m^2)$ la surface d'échange, $T_a-T_s(K)$ l'écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température en degré Kelvin du produit, $h(W.m^{-2}.K^{-1})$ le coefficient d'échange par convection.

Le coefficient d'échange h peut être estimé par des relations entre nombres adimensionnels tenant compte des conditions de l'air de séchage ainsi que de celles du produit. Pour des tranches de mangue exposées sur une claie perforée de grande surface de contact, traversée perpendiculairement par l'air, le coefficient d'échange par convection h peut être calculé à partir du nombre de Nusselt thermique $Nu = \frac{hd}{\lambda_a}$, grâce à la loi de Pasternak et Gauvin (Desmorieux,1992):

$$Nu = 0.692 Re^{0.514} Pr^{1/3} \text{ pour } 500 < Re < 5000 \quad (3.2)$$

Où Re est le nombre de Reynolds définie par $Re = \frac{V_a d}{\nu_a}$; Pr le nombre de Prandtl défini

par $Pr = \frac{\mu_a c_p}{\lambda_a}$ ($Pr=0.7$ pour l'air), ν_a la viscosité cinématique de l'air (m^2/s), μ_a la viscosité dynamique de l'air ($kg/m.s$), λ_a la conductivité thermique de l'air, en $W/m^2.K$, V_a la vitesse de l'air (m/s), d la dimension caractéristique définie par : $d = \frac{4S}{P}$ (avec S : surface de la claie, P : périmètre).

Cette relation est très pratique car son utilisation est adaptée pour plusieurs formes quelconques et, en plus, elle tient compte de la surface projetée de l'objet.

1.2.1.2 Transfert interne conductif au sein du produit

En séchage convectif, les transferts de chaleur par conduction, négligeable en tout début de séchage, sont souvent pris en compte dans le bilan énergétique pour la suite de l'opération de séchage. Dans ce cas, le flux conductif à une dimension au sein du produit séchant s'écrit sous la forme :

$$Q_c = -\lambda_s S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.3)$$

En régime quasi-permanent (nombre de Fourier, $Fo > 100$), l'importance relative de ce mode de transfert dans le produit par rapport à l'échange convectif à sa surface est représentée par le nombre de Biot définie par :

$$Bi = \frac{hd}{\lambda_s} = \frac{R_{int}}{R_{ext}} = \frac{T_s' - T_s}{T_s - T_a} \quad (3.4)$$

où λ est la conductivité thermique du produit ($W.m^{-1}.K^{-1}$), T_s' la température de la surface interne du produit, $R_{int} = \frac{d}{\lambda_s S}$ la résistance thermique aux transferts internes,

$R_{ext} = \frac{1}{hS}$ la résistance thermique aux transferts externes, d la dimension caractéristique : le rayon pour les formes sphérique et cylindrique et l'épaisseur pour un parallélépipédique(m), $Fo = \frac{\alpha t}{d^2}$ le nombre de Fourier représentatif du régime de pénétration du flux thermique par le produit, α la diffusivité thermique($m^2.s^{-1}$), t la durée des transferts (s).

Le nombre de Biot détermine lequel des transferts par convection ou par conduction contrôle le processus de séchage (*Roman & Michel 2000*) :

- En tout début de séchage (phase transitoire de mise en température du produit), pour des nombres de Biot inférieurs à 0.1 (c'est-à-dire lorsque la différence de températures externes est inférieure à 10% de la différence de températures internes), le transfert convectif à la surface du produit est prépondérant par rapport au transfert conductif au sein du produit ($R_{ext} \gg R_{int}$). Le transfert convectif externe est alors « limitant » et la quasi-totalité de

l'énergie apportée par l'air contribue à élever la température du produit. La surface du produit est alors à flux imposé.

- Lorsque le processus de séchage se prolonge, pour des nombres de Biot supérieurs à 50, le transfert convectif externe devient négligeable devant le transfert conductif interne ($R_{int} \gg R_{ext}$). L'intérieur du produit devient « perméable » au flux thermique conductif; Le transfert conductif interne est alors limitant car la température à la surface du produit est imposée égale à la température d'équilibre thermodynamique avec la température de l'air. Dans ce cas, l'avancement du séchage dépend uniquement des caractéristiques du produit, de son épaisseur au carré et de sa diffusivité.

En général, les deux modes de transferts coexistent en début de séchage pour des nombres de Biot modérés compris entre 0.1 et 50. Les bilans énergétiques unidimensionnels relatifs à un échantillon séchant s'écrivent alors sous la forme :

- *Produit* : flux de stockage = flux convectif en surface-flux conductif au sein du produit-flux évaporatoire-perte.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = hS(T_a - T_s) + \lambda_s S \frac{\partial T}{\partial x} - \dot{m}_e L_v - \Phi_p \quad (3.5)$$

- *Interface air-produit*: Flux convectif à l'interface air-produit = flux conductif au sein du produit + flux évaporatoire +perte :

$$hS(T_a - T_s) = -\lambda_s S \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=e} + \dot{m}_e L_v + \Phi_p \quad (3.6)$$

Où $\dot{m}_e$ est la vitesse d'évaporation de l'eau, en kg.s^{-1} et Φ_p le flux thermique lié aux pertes.

Chen (2004) a défini un nombre de Biot modifié tenant compte du fait que l'évaporation de l'eau influe sur la valeur du nombre de Biot critique 0.1 représentant la transition entre l'état de transfert convectif limitant et l'état de cohabitation des deux types de transfert. L'expression du nombre de Biot modifié de Chen compatible toutes à conditions de transitions est donnée par :

$$Bi^* = Bi - \frac{L_v \dot{m}_e}{T_a - T_s} \frac{d}{\lambda_s} \quad (3.7)$$

1.2.2 Les transferts de matière

La plupart des corps à sécher peuvent être considérés comme étant constitués d'une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci par des capillaires. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores. Pour que le séchage puisse s'effectuer, il faut transporter l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface, puis de la surface vers l'air séchant en passant de l'état liquide à l'état vapeur, et il faut donc consommer ainsi sa chaleur latente de vaporisation. Les transferts de masse à l'intérieur du produit dépendent essentiellement de sa structure et de ses propriétés tandis que les transferts externes dépendent au contraire de l'aérodynamique du séchoir (température, humidité relative, vitesse de l'air en contact avec le produit). Par analogie aux transferts de chaleur, on définit aussi les résistances aux transferts de masse externes et internes. Ces résistances aux transferts sont localisées dans les couches-limites thermique et massique au voisinage de la surface du produit pour les transferts externes et à l'intérieur du produit dans le cas des transferts internes.

1.2.2.1 Transferts externes

Lorsque la surface du produit est humide, on peut considérer que l'évaporation est celle d'une nappe d'eau. Il en est ainsi lorsque le transport de l'eau du sein du produit vers sa surface est rapide (Phase de séchage à vitesse constante). L'eau contenue dans les pores est acheminée par différents mécanismes (capillarité, glissement, évapo – condensation) à la surface du produit où elle se transforme en vapeur et est entraînée par l'air chaud et sec. La chaleur cédée par convection sert essentiellement à évaporer cette eau. Simultanément, une différence de pression de vapeur apparaît entre la surface du produit et l'air séchant, autorisant le transfert de la vapeur d'eau. La vitesse d'évaporation d'eau en surface est alors exprimée par:

$$\dot{m} = \frac{k_m M_v}{RT_a} (P_{vsp} - P_v) = \frac{k_m M_v}{RT_a} (A_w P_{vs}(T) - \phi P_{vs}(T_a)) \quad (3.8)$$

Où M_v est la masse molaire de la vapeur d'eau, P_{vsp} et P_v les pressions de vapeur aux températures T à la surface du solide et T_a de l'air; P_{vs} la pression de vapeur saturante, ϕ l'hygrométrie de l'air et k_m le coefficient de transfert de matière à la surface du produit.

Si l'on admet que les couches limites thermique et massique ont la même forme et la même épaisseur, k peut être évalué à partir du coefficient d'échange thermique par convection h en utilisant l'analogie des transferts couplés de chaleur et de masse de Colburn par la relation :

$$\frac{h}{k_m \rho C_p} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (3.9)$$

Où Sc est le nombre de Schmidt

K_m peut être aussi évalué à partir du nombre de Sherwood par :

$$k_m = \frac{ShD}{d} \quad (3.10)$$

Où D est la diffusivité de la vapeur dans l'air situé dans la couche limite au dessus du produit, d la dimension caractéristique du produit et Sh le nombre de Sherwood calculé à partir des nombres de Reynold et de Schmid par une relation du type :

$$Sh = C Re^{c1} Sc^{c2} \quad (3.11)$$

Par ailleurs, cette analogie chaleur-masse appliquée en phase à allure constante permet d'établir que :

$$\dot{m} = \dot{m}_e = \frac{k_m M_v}{RT_a} (P_{vsp} - P_v) = \frac{hS}{L_v} (T_a - T_s) \quad (3.12)$$

Dans le cas de produits divisés, la surface d'échange est donnée par :

$$S = s \frac{M}{\rho_a} \quad (3.13)$$

Avec : $M(kg)$ la masse du produit séchant, $s(m^2.m^{-3})$ surface spécifique, $\rho_a (kg.m^{-3})$ masse volumique apparente.

On peut alors écrire que :

$$\frac{dx(bh)}{dt} = \frac{hs}{\rho_a L_v} (T_a - T_s) \quad (3.14)$$

Pour un séchoir fonctionnant en continu, on peut calculer la durée de séchage pendant la phase à vitesse constante, en faisant un bilan sur un élément de longueur dl . Le long d'un élément de surface frontale S , dont le volume élémentaire est Sdl et la masse $Sdl\rho_a$, la vitesse de séchage est (Andre & Roland, 1991) :

$$M \frac{dx(bh)}{dt} = \frac{\dot{m}_a c p_a dT}{L_v} \frac{1}{Sdl\rho_a} = \frac{hs}{\rho_a L_v} (T_a - T_s) \quad (3.15)$$

Avec : $\dot{m}_a$ (kg.s⁻¹) le débit massique d'air de séchage, C_{p_a} (J.kg⁻¹.K⁻¹) la capacité thermique massique de l'air.

Connaissant la teneur en eau critique et la température critique, la durée de cette phase peut être alors calculée à partir de la relation :

$$t = \frac{\rho_a (x_{(bh)0} - x_{(bh)cr})}{hs(T_a - T_s)_{ml}} \quad (3.16)$$

Avec : $(T_a - T_s)_{ml} = \frac{(T_{a1} - T_{so}) - (T_{a2} - T_{scr})}{\ln \frac{T_{a1} - T_{so}}{T_{a2} - T_{scr}}}$ la moyenne logarithmique des écarts de

températures entre l'air et le solide, respectivement à l'entrée du séchoir (indice1) et à la fin (indice 2) de la zone où s'effectue le séchage de l'eau libre.

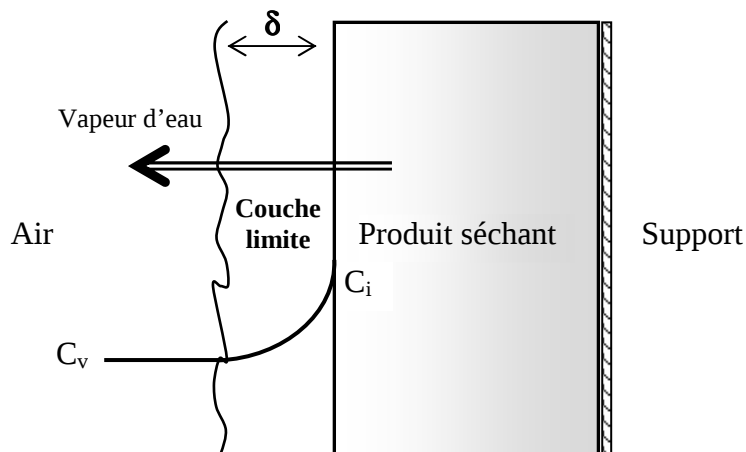


Fig.3.2 Le profil de concentration dans la couche limite.

1.2.2.2 Transferts internes

A l'intérieur du produit, les transferts de masse ont lieu essentiellement par capillarité, par filtration, par évapo-condensation et par diffusion (figure 3.3). Les mécanismes de transport de la vapeur variant avec la teneur en eau. Pour de fortes teneurs en eau, l'eau sous forme liquide est transportée de l'intérieur des pores à la surface par filtration, par gravité et par capillarité tant que la phase liquide est continue. La pression capillaire (différence entre les pressions de gaz et de liquide) étant fonction de la structure des pores, de la tension superficielle, de la température et de la teneur en eau. Lorsque la teneur en eau diminue, le transport de l'eau en phase gazeuse devient de plus en plus important. L'eau vapeur est transportée par filtration et par diffusion au sein du produit. Hors du domaine hygroscopique, le déplacement de la vapeur est assuré par thermo-diffusion des zones chaudes vers les zones froides grâce au gradient de température au sein du produit. Lorsque la teneur en eau diminue, dans le domaine hygroscopique, la vapeur se déplace par diffusion sous l'action du gradient de teneur en eau.

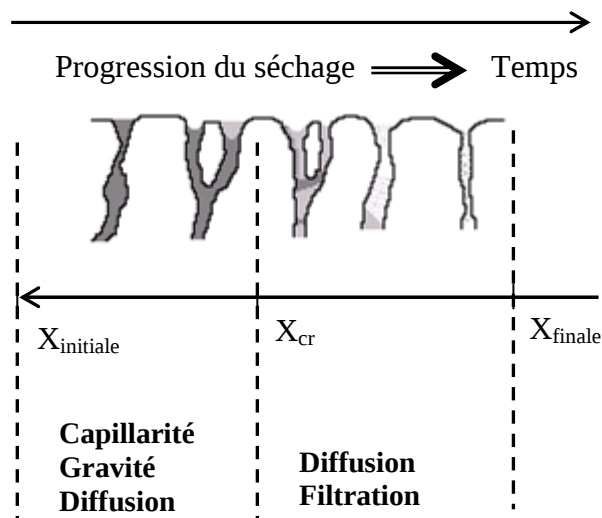


Fig.3.3 Schématisation des principaux mécanismes de transferts de l'eau à l'intérieur du produit en fonction de la teneur en eau à basse température.

1.2.2.3 Les mécanismes de transport interne de l'eau

Le transport interne d'eau peut se faire suivant plusieurs mécanismes dont les principaux sont (Bruin et Luyben, 1980):

La capillarité

Elle exprime l'écoulement du liquide à travers les pores et les cavités du produit humide. Cet écoulement est généré par les forces de tension superficielle ou d'adhésion entre le liquide et la surface de la matière solide. Son flux massique s'écrit :

$$\vec{\Phi}_l = K \vec{\nabla} \psi \quad (3.17)$$

K est la perméabilité du produit à l'eau et ψ le potentiel de succion capillaire

La diffusion

C'est le principal moyen de transport d'eau dans la matrice solide de produit agro-alimentaire. Elle est définie par le mouvement des molécules d'eau sous l'effet d'un gradient de concentration en eau au sein du produit séchant. Ces mouvements tendent à uniformiser la distribution d'humidité au sein du produit. En séchage, on rencontre plusieurs modes de diffusion de l'eau dont les plus connus sont présentés sur le tableau 3.1.

L'évapo-condensation

Il a été mis en évidence par Henry (1939) C'est un mécanisme qui apparait lorsque les pores renferment des domaines discontinus et isolés de liquide. Ce modèle de transfert admet que la matière se déplace à l'état vapeur à travers des suites de condensations du côté froid des bulles de liquides dans les pores et d'évaporation du côté chaud de celles-ci.

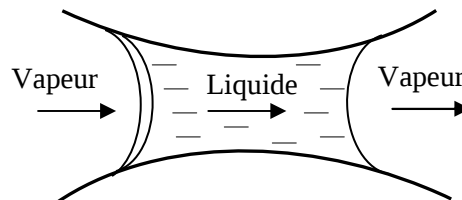


Fig. 3.4 Evapo - condensation à la constriction d'un pore

Type de diffusion, n°	Etat	Relation	Nomenclature
Diffusion interne (3.18)	Liquide	$\vec{\Phi}_l = -\rho_s D_l \vec{\nabla} X$	D_L : coefficient de diffusion du liquide dans le produit
Diffusion en surface (3.19)	Vapeur	$\vec{\Phi}_l = -D_s \vec{\nabla} C_s$	D_s : coefficient de diffusion C_s : concentration massique en liquide en surface
Diffusion de Knudsen (3.20)	Vapeur	$\vec{\Phi}_v = -\frac{\varepsilon_{int}}{\tau} \varpi D_{kv} \vec{\nabla} P_v$ $D_{kv} = \frac{2}{3} d_{pore} \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{RT}{M_e}}$	ε_{int} : porosité du milieu τ : tortuosité du milieu ϖ : constante de Knudsen
Diffusion de Stephan (3.21)	Vapeur	$\vec{\Phi}_v = -\frac{\varepsilon_{int}}{\tau} D_{vs} \frac{P}{P-P_v} \frac{M}{RT} \vec{\nabla} P_v$	D_{vs} coefficient de diffusion à l'état vapeur
Diffusion mutuelle (3.22)	Vapeur	$\vec{\Phi}_v = -\frac{\varepsilon_{int}}{\tau} D_v \vec{\nabla} P_v$	

Tableau 3.1 : Les modes de transport interne par diffusion

D'un point de vu pratique, ces transports internes d'humidité sont d'autant plus difficiles que (Roman & Michel, 2000) :

- le réseau macromoléculaire est dense (rigide) ;
- la teneur en lipides est importante ;
- les masses molaires des molécules dissoutes sont grandes ;
- la teneur en eau est faible ;
- la température est faible.

1.2.3 Teneur en eau critique

La teneur en eau à partir de laquelle la vitesse de séchage se met à décroître est appelée teneur en eau critique X_{cr} . Elle dépend des conditions de séchage et n'est pas toujours identifiable. Ce paramètre délimite les deux modes de transferts limitants que sont les transports externe et interne. Sa détermination permet de connaître la teneur en eau moyenne à partir de

laquelle il faut changer les équations de transfert de masse et de chaleur lors de la simulation des cinétiques de séchage.

1.2.4 Les modèles simples de séchage convectif

La modélisation des transferts internes à partir de l'ensemble des mécanismes accompagnant les transports en milieux poreux insaturés s'est avérée très complexe. Des modèles globaux ou macroscopiques ont alors été proposés afin de prédire sans difficultés les cinétiques de séchage. Parmi ces modèles, on distingue les modèles fondamentaux basés soit sur un seul mécanisme (modèle diffusionnel, modèle de capillarité), soit sur deux ou plusieurs mécanismes (modèle de Luikov, modèle de Philip & De Vries, modèle à front mobile d'évaporation etc.) et les modèles empiriques. Les modèles fondamentaux reposent sur la compréhension et la simulation des mécanismes tandis que les modèles empiriques sont obtenus à partir des résultats expérimentaux. Dans le cas des produits agro-alimentaires, les modèles les plus utilisés sont le modèle diffusionnel et le modèle empirique basé sur le concept de la courbe caractéristique de séchage.

1.2.4.1 Le Modèle diffusionnel ou modèle de Fick

Il s'applique à des produits à structure continue. Ce modèle suppose que l'évaporation a lieu en surface du produit et qu'il n'y a pas de formation de zone sèche. La théorie de diffusion considère que la vitesse de transfert de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface est essentiellement due aux gradients de concentration interne d'eau et aux coefficients de transfert de masse. Elle est régie par les lois de diffusion de Fick qui permettent de corréler le flux de matière au sein du produit et le gradient de concentration de soluté sous la forme (1^{ère} loi de Fick):

$$\vec{\Phi}_m = -\rho_s D \vec{\nabla} X \quad (3.23)$$

Avec $\vec{\Phi}_m$ le flux massique de matière, en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, $\vec{\nabla} X$ le gradient d'humidité à l'intérieur du produit dans l'espace tridimensionnel, $D(\text{m}^2.\text{s}^{-1})$ le Coefficient de diffusion d'eau au sein de la matière séchant et $\rho_s (\text{kg.m}^{-3})$ la masse volumique du produit sec.

En régime permanent, le taux d'humidité du produit varie. Cette variation dans le temps et l'espace est établie à l'aide de l'équation de conservation ou de diffusion qui s'écrit (2^{ème} loi de Fick):

$$\frac{dX}{dt} = -\text{div}(-D \vec{\text{grad}} X) \quad (3.24)$$

Evaluation de la diffusivité d'eau

Le coefficient de diffusion d'eau ne peut être directement calculé que dans de rares cas. Il existe plusieurs méthodes de son identification dans la littérature, qui ont été regroupées par Lomauro (1985) en trois (3) parties:

- La détermination empirique de la diffusivité à partir des propriétés physico-chimiques et biologiques du produit [Donka & Kondju, 2001; Chen, 2004; King(1968) in Hodali, 1997; Bluestein(1971) in Hodali, 1997, Roman et al. ,1983].
- Le calcul de la diffusivité par résolution numérique de l'équation de Fick [Whitaker & Young (1972) in Hodali, 1997; Misra & Young (1980) in Hodali, 1997; Steff et singh (1980) in Hodali, 1997; Zang et al. (1984) in Hodali, 1997],
- L'identification de la diffusivité à partir de la solution analytique de l'équation de Fick (Doymaz, 2005; Nieto, Castro & Alzamora, 2001).

La diffusivité d'un produit biologique peut dépendre des paramètres tel que la nature du produit, sa température, sa teneur en eau et les conditions extérieures. Cependant, les influences de la température et de l'humidité semblent les plus remarquables. S. Jaya et H. Das (2003) proposent par exemple pour la pulpe de mangue la relation :

$$D = \exp(ad_o) - \frac{b}{T} \quad (3.25)$$

Avec : $d_o(m)$ l'épaisseur initiale, $T(^{\circ}C)$ la température du produit, a et b les paramètres du modèle.

Dans la plupart des publications, l'influence de la température sur la diffusivité est obtenue à partir d'expériences de séchage à différentes températures. La diffusivité est alors identifiée par une relation de type « Arrhenius » sous la forme :

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (3.26)$$

Où D_0 est le Facteur pré exponentiel de Arrhenius, en $m^2.s^{-1}$, E_a l'énergie d'activation pour les transferts de masse interne, R la constante des gaz parfaits, T la température, en K.

L'évolution de la diffusivité avec l'humidité est rarement étudiée expérimentalement. Cette variation est quelque fois obtenue par une fonction en escalier en linéarisant la solution

analytique de l'équation de Fick. A travers une approche numérique, il est possible d'établir des relations empiriques prenant en compte à la fois la variation de la diffusivité en fonction de la teneur en humidité et de la température. Parmi les modèles de diffusivité utilisant cette double dépendance, nous avons choisi celui faisant apparaître une dépendance exponentielle de la teneur en eau dans le facteur pré-exponentiel sous la forme :

$$D = D_1 \exp(D_2 X) \exp\left(\frac{-E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (3.27)$$

Dans tous les cas, la diffusivité identifiée est considérée comme effective car elle ne fait appel à aucune loi physique pour expliquer le mouvement de l'eau au sein du produit.

La quantité d'eau évaporée calculée à partir du modèle de Fick

Pour les produits peu déformables, elle peut être déduite de la loi de Fick intégrée sur l'épaisseur de la couche limite supposée stagnante (modèle du film) et est alors donnée par la relation (3.28) qui prend en compte simultanément les mouvements diffusifs et convectifs de la vapeur d'eau.

$$\dot{m} = K_m C M_v \ln \frac{1 - C_a}{1 - C_s} \quad (3.28)$$

Où $\dot{m}$ est le débit massique d'eau évaporée ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), C la concentration molaire volumique, en mole.m^{-3} , K le coefficient de transfert de matière (m.s^{-1}), M_v la masse molaire de la vapeur d'eau (kg.mole^{-1}), C_a la fraction molaire de la vapeur d'eau de l'air séchant, C_s la fraction molaire de la vapeur à la surface du produit, Avec $C_s = \frac{P_v}{P}$.

En exprimant la fraction molaire de la vapeur en fonction de l'humidité et en admettant que l'humidité absolue au sein de l'air est faible ($\omega_a \ll 1$) ; l'équation (3.28) peut être linéarisée et devient :

$$\dot{m} \approx K_m C M_a (\omega_s - \omega_a) \quad (3.29)$$

Où ω est l'humidité absolue de l'air en surface (s) et au sein de l'écoulement (a) ($\text{kg.kg}_{\text{as}}^{-1}$), M_a la masse molaire de l'air sec (kg.mole^{-1}).

1.2.4.2 Les modèles empiriques

La complexité des mécanismes simultanés de transport interne au cours du séchage des produits et les énormes difficultés liées à leur modélisation a amené de nombreux auteurs à simplifier l'étude du séchage en optant pour l'ajustement des courbes de séchage expérimentales à l'aide des modèles empiriques convenables. Ces lois empiriques de désorption d'eau sont propres à chaque produit dans des conditions expérimentales bien précises. L'avantage de ces modèles réside dans leur utilisation très pratique dans l'industrie. Cependant, signalons que ces lois ignorent l'ensemble des processus internes et externes accompagnant le séchage. Elles sont restreintes aux seules conditions expérimentales et nécessitent beaucoup plus d'expériences afin de rassembler toutes les conditions opératoires envisageables. Parmi ces modèles empiriques, le modèle de la CCS semble le plus convivial dans son utilisation. En effet, il permet de rassembler les courbes de plusieurs conditions opératoires en une seule courbe propre au produit et à ses dimensions.

1.2.4.2.1 Le concept de la courbe caractéristique de séchage (CCS)

Les difficultés pour rassembler toutes les conditions opératoires afin de caractériser le séchage d'un produit par les modèles empiriques classiques ont amené les auteurs à adopter l'idée de la courbe caractéristique de séchage. Ce modèle semi-empirique est basé sur l'exploitation des résultats expérimentaux, afin de déduire une loi applicable au maximum de conditions opératoires. Ce concept, proposé par Van Meel en 1957 et repris par Krischer(1963) et Schlunder (1983), consiste à normaliser de façon convenable la teneur en eau et la vitesse dans l'objectif de représenter pour un produit donné de dimension déterminée, les résultats de plusieurs expériences à l'aide d'une courbe unique appelée "*Courbe caractéristique de séchage*". Cette courbe permet ainsi de regrouper les résultats obtenus pour différentes conditions aérauliques (vitesse de l'air, humidité, température) dans les cas où la phase à vitesse de séchage constante existe, avec une valeur constante de la teneur en eau critique du produit. Elle est obtenue en portant :

- En abscisse, la teneur en eau réduite (ou teneur en eau normalisée) : $\Psi = \frac{X - X_e}{X_{cr} - X_e}$
- En ordonnée, la vitesse de séchage réduite Γ égale au rapport entre la vitesse de séchage $-\frac{dX}{dt}$ à un instant donné t et la vitesse de séchage à vitesse constante (notée par l'indice 1):

$$\Gamma = \frac{-\frac{dX}{dt}}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1} \quad (3.30)$$

La vitesse de séchage réduite est alors une fonction g de la teneur en eau réduite:

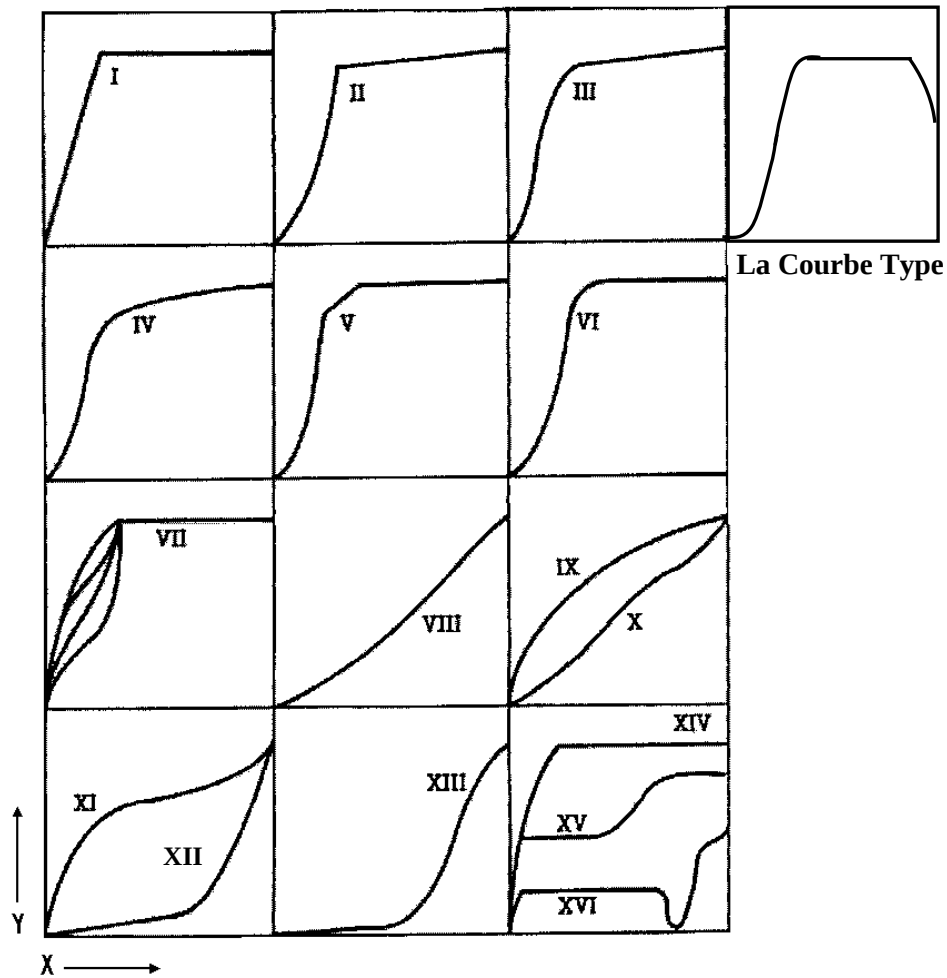
$$\Gamma = g(\Psi) \text{ ou encore } g(\Psi) = \frac{-\frac{dX}{dt}}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1} \quad (3.31)$$

En négligeant la phase transitoire de mise en température, on en déduit que :

- pour $\Psi > 1$, $g(\Psi)=1$,
 - pour $0 < \Psi < 1$; $0 \leq g(\Psi) \leq 1$,
 - pour $\Psi = 0$; $g(\Psi)=0$,
- $g'(\Psi)=0$
- (3.32)

Un récapitulatif de courbes caractéristiques de séchage pour différents produits a été réalisé par Van Brakel (1950). Ces courbes (fig.3.5) sont généralement classées en quatre (4) catégories (André & Roland, 1991):

- Les produits hygroscopiques (Courbes I à VIII),
- Les produits colloïdaux (courbes IX à XII),
- Les céréales (Courbes XIII),
- Les matériaux saturés de solutions salines ayant des problèmes de croûtage (courbes XIV à XVI)



En abscisse $X = \psi$ et en ordonnée $Y = \Gamma = g(\psi)$.

Fig.3.5: Courbes caractéristiques de séchage pour certains produits
(D'après Van Brakel, 1950).

I	argile et cuir
II	tuile
III	lits de billes imprégnées de liquides organiques
IV	polystyrène
V	filet de poisson
VI	tamis moléculaires
VII	particules de silicate de sodium
VIII	bois
IX	papier et laine
X	pomme de terre et tapioca
XI	pain de seigle et levure
XII	beurre, margarine
XIII	grains de blé
XIV	castine saturée avec de l'eau
XV et XVI	castine saturée avec des solutions de NaCl

Avantages de la CCS

Le concept de la CCS présente trois avantages principaux :

- Elle permet de prévoir la cinétique de séchage pour des conditions opératoires appartenant au domaine pour lequel elle a été déterminée. En effet, si la fonction caractéristique Γ est identifiée, la vitesse de séchage en deuxième phase est facilement déduite par l'équation :

$$\Gamma = \Gamma(\Psi) = \frac{V_s}{V_{s1}} \quad (3.33)$$

- La connaissance de la fonction caractéristique permet de calculer la durée totale du séchage en ajoutant la phase de mise en température.
- Enfin, la CCS d'un produit de dimension donnée permet de le caractériser vis-à-vis du séchage.

La méthode de la courbe caractéristique de séchage est une démarche semi empirique qui exploite les résultats expérimentaux obtenus par des essais au laboratoire, pour caractériser le séchage du produit dans le but d'analyser le dimensionnement du séchoir. Elle simplifie les mécanismes du séchage sans les interpréter par des équations phénoménologiques même si elle fait l'hypothèse du coefficient de diffusion constant. Par contre, la mise en œuvre de cette méthode nécessite l'identification de la teneur en eau critique, la connaissance de la teneur en eau d'équilibre et de la vitesse pendant la phase de séchage à vitesse constante.

1.2.4.2.2 Les autres modèles empiriques de séchage

Les principaux modèles empiriques simples utilisés pour les produits alimentaires sont (tableau 1.2): Lewis, Henderson and Pabis, Page, Page modifié, Logarithmique, Deux-termes, Deux-termes exponentiels, Verma et al., et Wang & Singh. La plupart de ces modèles repose sur le mécanisme de diffusion qui est le facteur prédominant dans le séchage des produits agro-alimentaires. L'inconvénient majeur pour la quasi-totalité de ces modèles réside dans le fait que leurs paramètres doivent être identifiés pour chaque condition opératoire possible.

<i>Modèle</i>	<i>Expression</i>	<i>Référence</i>
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Lewis (1921) (3.33)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-bt)$	Henderson & Pabis(1961)(3.34)
Page	$MR = \exp(-kt^y)$	(Doymaz, 2005a) (3.35)
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^y)$	Overhults et al. (1973) (3.36)
Logarithmique	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz et al. (2001) (3.37)
Modèle à deux termes	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Henderson(1974) (3.38)
Exponentiel à deux termes	$MR = a \exp(-k_0 t) + (1-a) \exp(-k_1 t)$	Midilli and Kucuk (2003) (3.39)
Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Verma et al. (1985) (3.40)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh (1978) (3.41)

Tableau 3.2 Modèles empiriques simples d'ajustement des cinétiques de séchage

2. Matériel et méthode

2.1 Teneur en eau initiale

La détermination de la teneur en eau initiale a été un facteur important dans cette section de notre travail pour pouvoir exploiter les données expérimentales de cinétique de séchage. En effet, pour rechercher l'influence des différents paramètres étudiés sur le séchage des morceaux de mangue, l'évolution des vitesses de séchage a été exprimée en fonction de la teneur en eau de l'échantillon rapporté à la teneur en eau initiale. Pour chacune des expériences réalisées, afin de mesurer la teneur en eau initiale des mangues, trois (3) échantillons variant de 1 à 3 cm³ ont été prélevés sur le fruit dans une zone proche des échantillons utilisés pour les mesures de cinétiques de séchage. Des balances analytiques de marque *SARTORIUS LP620S (FRANCE)*, *PRECISA (SUISSE)* et *METTLER PM6000 (France)* précises au milligramme près ont été nécessaires pour mesurer la masse initiale et de matière sèche des échantillons. Cette matière sèche a été obtenue par méthode gravimétrique selon le protocole de la norme EN 12145 (séchage à 70°C pendant environ 24 heures à l'étuve *WTF BLINDER d'une puissance de 1,2kW [type E53 N°83445]*). La teneur en eau initiale est alors calculée à chaque fois de la manière suivante :

$$X_0 = \frac{m_0 - m_s}{m_s} = \frac{m_e}{m_s} \quad (3.34)$$

Où X_0 est la teneur en eau initiale, m_0 la masse initiale de l'échantillon, m_s la masse de matière sèche, m_e la masse totale d'eau du produit.

2.2 Les cinétiques de séchage

2.2.1 Les séchoirs

2.2.1. 1 Séchoir en convection forcée

Le séchoir en convection forcé ayant servi à l'établissement des cinétiques de séchage aux différentes conditions opératoires est l'enceinte climatique de marque *Votsch Industrietechnik* du LAGEP (UMR-CNRS-Université de Lyon1 France) (figure 2.1). Il est conditionné en température par des résistances électriques et en humidité par un système d'humidification par adsorption auquel est lié un bac d'eau déminéralisée. La vitesse d'écoulement de l'air est variable en pourcentage du maximum de la vitesse de rotation d'un ventilateur placé dans

l'étuve. Cette vitesse est mesurée en début de manipulation à l'aide d'un anémomètre digital de marque Miniair2 Schiltknecht (Suisse). Un écran LCD retro éclairé sert d'interface pour fixer les conditions opératoires et visualiser l'évolution des conditions hygrothermiques à l'intérieur de la chambre de séchage. Ce séchoir comporte 5 claies pour les opérations de séchage en couche mince et un petit panier pour la caractérisation des cinétiques de séchage d'un morceau de produit de faible dimension. Pour préparer les échantillons, les deux joues du fruit choisi sont enlevées à l'aide d'un couteau tranchant. Selon les dimensions voulues, le morceau de mangue en forme de frite ou de parallélépipède est extrait de la joue concernée à l'aide du couteau et d'un double décimètre précis au demi-millimètre près. Pour les cinétiques de séchage, on fixe d'abord à partir de l'écran de contrôle les conditions opératoires : température, vitesse et hygrométrie de consigne. Pour cette étude, les différentes conditions de séchage qui ont été utilisées sont présentées sur le tableau 3.3. Une fois que ces conditions opératoires de consigne sont atteintes dans l'enceinte de séchage, le morceau de mangue est placé dans le panier. Ce dernier est supporté par une cellule de charge auquel est reliée une balance de précision (marque *Master Pro SARTORIUS précision 0.00001g*) permettant d'effectuer directement les prises de masse sans retirer l'échantillon de l'enceinte de séchage. Ces mesures étaient effectuées par intervalle de temps de 5 minutes pendant 100 minutes, ensuite toutes les 10 minutes jusqu'à 200 minutes, puis toutes 20 minutes jusqu'à 300 minutes et enfin toutes les demi-heures jusqu'à la fin du séchage. Avant chaque mesure, le ventilateur est arrêté pendant près de 1min30s afin de minimiser les effets de l'écoulement d'air sur la qualité des pesées. Une fois l'équilibre atteint, l'échantillon est retiré de l'enceinte et étuvé à 70° C pendant 24 heures pour mesurer sa masse de matière sèche. La connaissance de la quantité de matière sèche permet ainsi de déduire la teneur en eau correspondant à chaque prise de masse par :

$$X(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (3.35)$$

Les vitesses de séchage sont alors évaluées par le taux de variation discrète de la teneur en eau en fonction du temps.

2.2.1. 2 Séchoir en convection naturelle

Les opérations de séchage en convection naturelle ont été réalisées à l'aide d'une étuve de marque *WTF BINDER* (Allemagne) comportant 4 claies. Des morceaux de fruit en forme de frite ou parallélépipédique ont été utilisés pour l'établissement des cinétiques de séchage. Un double décimètre (précis au demi-millimètre près) et un pied à coulisse (marque *MITUTOYO, Japon*, précision 0,0005 m) ont servi à la découpe de l'échantillon avant le début du séchage. Les

conditions opératoires et les dimensions de l'échantillon utilisées dans notre travail sont présentées sur le tableau 3.3. Pour le séchage, les échantillons sont placés dans l'étuve réglée au préalable à la température de séchage. Régulièrement, ils sont retirés de l'étuve et pesés à l'aide d'une balance digitale de précision 0,001g (*Master Pro SARTORIUS, France*). Ces mesures étaient effectuées tous les quarts d'heures pendant 300 minutes puis toutes les demi-heures jusqu'à la fin du séchage. Parallèlement aux mesures de cinétique de séchage, un morceau de mangue de 1 à 3 cm³, extrait dans la même zone de la mangue que ceux ayant servi aux cinétiques de séchage, est utilisé pour déterminer la teneur en eau initiale. La connaissance de la teneur en eau initiale permet ainsi d'évaluer les masses de matières sèches des échantillons utilisés pour les cinétiques de séchage à partir de l'expression :

$$m_s = \frac{m_0}{X_0 + 1} \quad (3.36)$$

On en déduit alors l'évolution de la teneur en eau de chaque échantillon en fonction du temps en utilisant la relation :

$$X(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (3.37)$$

Les vitesses de séchage sont alors évaluées par le taux de variation discrète de la teneur en eau en fonction du temps.

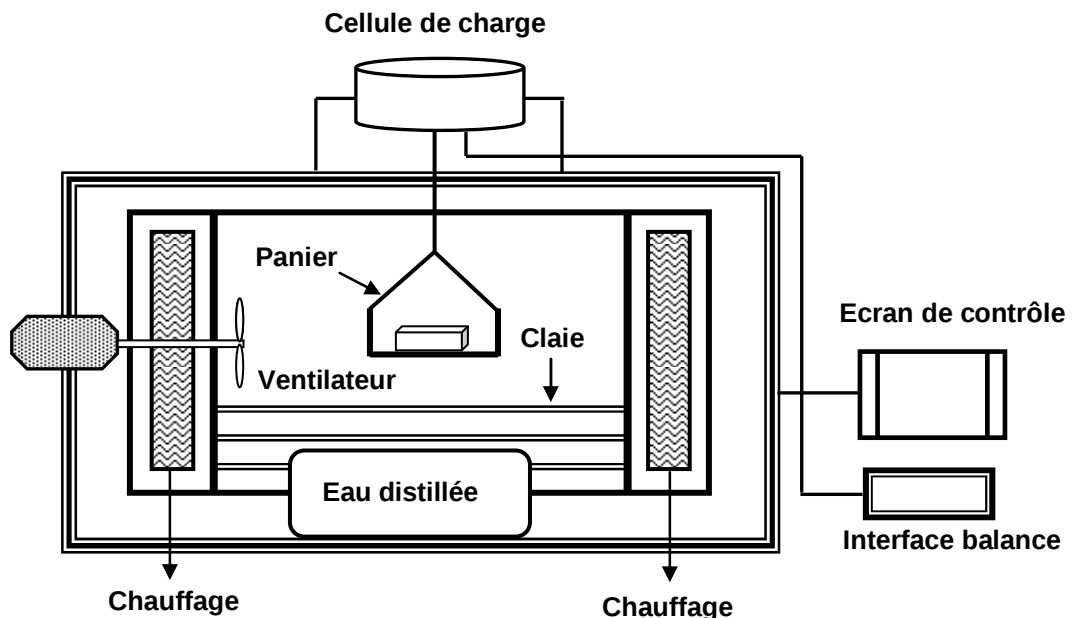


Fig.3.6: Illustration schématique de l'enceinte climatique

2.2.2 Mesure de la température de surface et de cœur

Les mesures de température de surface et de cœur des échantillons au cours du séchage ont été effectuées à l'aide d'un thermomètre de marque *TFN* 530 (Allemagne) de gamme de température -200 à +1200°C, utilisant deux canaux de thermocouple de type K. Les thermocouples maintenus à la surface ou enfoncés au cœur de l'échantillon en deux endroits différents permettent de relever les températures de surface ou de cœur. L'évolution de chacune de ces températures en fonction du temps est obtenue en prenant la moyenne des mesures de températures.

2.2.3 Tableau récapitulatif des conditions opératoires

(a) Influence des caractéristiques intrinsèques du produit

Influence recherchée	Variété	Etat de Maturité	Sucre/Acide (Brix.g/n _{acide})	Position & Coupe	Dimensions				X ₀ (bs)	T _{air} (°C)	HR _{air} (%)	V _{air} (m/s)	Type de support
					e (mm)	l (mm)	L (mm)	S _{spécifique} (m²/m³)					
Maturité & Surface spécifique (S _{totale} /V)	Kent	Verte	160.281	B/long	10	20	40	3.5	4.93	60°C	10-25	0	Papier cuisson
					10	10	80	4.25					
		Mûre	234.182	B/long	10	20	40	3.5	5.56				
					10	10	80	4.25					
Maturité & Position	Kent	verte	200.43	A/long	19.04	19.26	11.7	0.33	6.93	60	10-25	0	Papier cuisson
			126.22	B/long	20.78	20.90	8.88	0.37	8.87				
			147.75	C/long	21.72	22.88	11.97	0.30	7.04				
		mûre	625.94	A/long	20	19.6	14.5	0.29	5.70				
			226.06	B/long	19.5	20	12.3	0.31	6.20				
			196.93	C/long	19.7	19.2	12.1	0.32	6.25				
Sens découpe & Support	Kent	mûre	398.22	B/trans	38	11	9	0.46	5.78	60	10-25	0	Toile PVC
			299.11	B/long	39	9	9	0.50	6.11				
			286.36	B/trans	40	10	10	0.45	5.58				
			372.61	B/long	40	11	11	0.41	5.64				

(b) Influence de paramètres extérieurs

Influence recherchée	Variété	Etat de Maturité	Position & Coupe	Dimensions				X_0 (bs)	T_{air} (°C)	HR_{air} (%)	V_{air} (m/s)	Type de support
				e (mm)	l (mm)	L (mm)	$S_{spécifique}$ (m ² /m ³)					
Température de l'air	Amelie	Mûre	B/long	5	10	42	0.65	8.22	50	15	0.8	Papier cuisson
					10	40	0.65	8.59	60			
					6	38	0.79	8.26	70			
Epaisseur de l'échantillon	Amélie	Mûre	B/long	2.5	6	35	1.19	6.52	70	15	0.8	Papier cuisson
				5	5	38	0.85	8.26				
				10	27	60	0.31	8.23				
Hygrométrie de l'air	Kent	Mûre	B/long	5	30.5	52	0.5	10.61	60	20	1.6	Papier cuisson
								6.11		40		
								6.26		60		
Vitesse de l'air	Kent	Mûre	B/long	5	30.5	52	0.5	7.01	60	20	0.48	Papier cuisson
								11.45		20	0.8	
								10.61		20	1.6	

Tableau 3.3 Récapitulatif des conditions opératoires

2.3 Exploitation des données

2.3.1 Calcul des vitesses de séchage

Dans cette étude, les vitesses de séchage ont été représentées par la différentielle de la teneur en eau (bs) versus le temps. Ces vitesses de séchage ont été calculées en considérant un modèle simple de teneur en eau discrétisée en fonction de la durée de séchage. En effet, si Δt désigne le pas de temps entre deux mesures successives ayant lieu aux instants n et $n+1$ et $X(n)$, $X(n+1)$ les teneurs en eau de l'échantillon estimées à ces instants, la vitesse de séchage à l'instant n est évaluée par la relation :

$$V_s = -\frac{dX}{dt} \cong -\frac{X(n+1) - X(n)}{\Delta t} \quad (3.38)$$

Cette méthode donne une bonne approximation de la vitesse de séchage bien qu'on n'ait pas de valeur pour le dernier point de la série de mesure. Pour l'ensemble de nos mesures, l'exclusion de ce dernier point ne présente pas d'inconvénients majeurs pour les caractéristiques de séchage et n'affecte pas de façon significative la courbe de vitesse de séchage. En effet, les deux derniers points de chacune de nos séries de mesures ont été sensiblement les mêmes et égaux à la teneur en eau d'équilibre.

2.3.2 Correction des cinétiques de séchage par les données de contraction

Pendant la phase de séchage à vitesse constante, il existe un équilibre dynamique entre les flux massiques et thermiques à travers la chaleur latente de vaporisation. Cet équilibre qui permet de qualifier le séchage pendant cette phase d'«isenthalpique» se traduit à l'état stationnaire par l'équation :

$$\frac{dm_e}{dt} = \frac{h(T_a - T_h)}{L_v} \quad (3.39)$$

Cette équation montre que durant la phase à vitesse constante, les transferts externes à la surface du produit sont limitants et le flux massique constant est déterminé seulement par les conditions externes (vitesse, température et humidité relative de l'air). La nature du produit n'étant pas un facteur influant. La perte de masse du produit, notée Q_v ($kg\ s^{-1}$) est alors obtenue en multipliant la densité de flux massique par l'aire d'échange notée S_e ,

$$Q_v = S_e \cdot \frac{h(T_s - T_h)}{L_v} = S_e \cdot \frac{dm_e}{dt} \quad (3.40)$$

Cette équation laisse voir que deux conditions sont nécessaires pour avoir une vitesse de séchage constante :

- Une surface d'échange S_e constante et
- Un flux massique $\frac{dm_e}{dt}$ constant (Donc une surface d'échange saturée en eau)

La vitesse de séchage en masse d'eau évacuée par unité de temps et de surface d'échange est alors exprimée sous la forme:

$$V'_m = -\left(\frac{m_s}{S_{e,0}}\right) \frac{dX}{dt} \quad (3.41)$$

Où V'_m est exprimé en kg d'eau par m² de surface externe du produit par seconde (kg.s⁻¹.m⁻²), $S_{e,0}$ la surface externe initiale du produit séché exposé à l'air de séchage en m² et m_s la masse de matière sèche du produit.

Dans le cas des produits poreux à structure consolidée, la surface d'échange S_e reste constante pendant le séchage, aussi $\frac{m_s}{S_e}$ reste constante et $-\frac{dX}{dt}$ suffit pour montrer l'existence de la phase à séchage à vitesse. Cependant pour les produits alimentaires, la surface d'échange diminue pendant le séchage. Le rapport $\frac{m_s}{S_e}$ n'est pas constant et $-\frac{dX}{dt}$ seule ne suffit pas pour exhiber la présence d'une phase de séchage à vitesse constante. Il est donc nécessaire de prendre en compte la totalité de la densité de flux de matière $-\frac{m_s}{S_e} \frac{dX}{dt}$ afin de corriger la vitesse

de séchage et mettre en relief l'existence de cette première phase à vitesse de séchage constante. Les différentes valeurs de S_e sont obtenues à partir des mesures de contraction donnant la variation des dimensions de l'échantillon au cours du séchage ou par une corrélation liant la contraction surfacique à la teneur en eau du produit. L'importance de l'exhibition de la phase de séchage à vitesse constante réside dans la détermination de la teneur en eau critique du produit.

2.3.3 Lissage des cinétiques de séchage

Les courbes de vitesse de séchage obtenues ont été lissées à l'aide d'un programme macro adapté à Microsoft Excel. Pour lisser une série de valeur, on la copie d'abord dans le fichier Excel contenant la macro de lissage. Ensuite, on active la macro et on lance le programme de lissage (raccourci Alt F8). Un message avertissant que les valeurs copiées seront remplacées par celles lissées, est affiché. On répond par « oui » à ce message en tapant « O » suivi de « entrée ». Un second message nous permet ainsi de communiquer à la macro la coordonnée de la cellule située juste à droite de la première cellule à traiter. Puis un troisième message nous autorise à faire le choix du nombre de lissage. Enfin un quatrième message nous permet d'entrer le nombre de valeurs à lisser correspondant au nombre des valeurs copiées au départ dans le fichier Excel. Une fois ce nombre enregistré par la touche « entrée », les valeurs à lissées sont automatiquement remplacées par les valeurs lissées. Dans notre étude, nous avons choisi de faire trois lissages car c'est pour ce nombre de lissage que nous avons les courbes les plus exploitables. L'algorithme de la macro utilisée est présenté en annexe II-2.

2.3.4 Identification de la diffusivité sans prise en compte de la contraction

La diffusivité effective de la mangue est évaluée en utilisant la forme simplifiée de la deuxième loi de Fick. En supposant que la diffusion est unidirectionnelle selon la direction x l'équation de diffusion de Fick se ramène à :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_v \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (3.42)$$

En considérant que :

- la distribution de la teneur en eau initiale est uniforme
- la température est constante lors du séchage ;
- la tranche est homogène et de forme parallélépipédique
- il y a équilibre immédiat de la surface de la tranche avec l'air de séchage
- la diffusivité est constante et
- la contraction de la tranche lors du séchage est négligeable

La solution analytique de cette équation est (Crank,1975) :

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{e^2} D_{v,eff} t) \quad (3.43)$$

Où X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre, X_0 la teneur en eau initiale, $D_{v,eff}$ la diffusivité effective de la vapeur d'eau et γ le facteur de forme de l'échantillon.

Pour une tranche parallélépipédique $\gamma = \frac{8}{\pi^2}$.

De nombreux auteurs ont montré que si le temps de séchage est suffisamment long, c'est-à-dire si $MR < 0.6$.

cette série est pratiquement égale à son premier terme (Crank, 1975) soit :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4e^2} D_{v,eff} t\right) \quad (3.44)$$

D'où:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2}{4e^2} D_{veff} t\right) \quad (3.45)$$

La diffusivité effective est calculée en utilisant la méthode des pentes. En représentant $\ln(MR)$ à partir des données expérimentales en fonction du temps, la droite obtenue a pour pente la constante de séchage K qui conduit à la valeur de $D_{v,eff}$:

$$D_{v,eff} = \frac{Ke^2}{\pi^2} \quad (3.46)$$

La durée de séchage pendant la phase à vitesse décroissante est calculée par dérivation et intégration de l'équation 3.43, entre l'instant où le produit atteint sa teneur en eau critique et un instant t donné du séchage, on obtient :

$$t = \frac{\bar{d}}{4\pi^2 D_{eff}} \ln(MR) \quad (3.47)$$

Où $\bar{d}$ est l'épaisseur moyenne de tranches sur la claie.

2.3.5 Identification de l'Energie d'activation

$D_{v,eff}$ dépend généralement de la température et l'énergie d'activation intervient dans l'expression de la diffusivité en fonction de la température par la relation de type Arrhenius (Doymaz, 2005) :

$$D_{v,eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (3.48)$$

Où R est la constante des gaz parfaits ($R=8.3145.10^3 J/kmol.K.$), D_0 le facteur d'Arrhenius ($m^2.s^{-1}$), T température ($^{\circ}C$) et E_a l'énergie d'activation pour les transferts de masse interne, en ($J.mole^{-1}$).

L'identification de E_a est obtenue en représentant $\ln(D_{veff})$ en fonction de $1/(T+273)$. La pente de la droite obtenue vaut alors $-E_a/R$

2.3.6 Teneur en eau critique

Nous avons corrigé les courbes de séchage à l'aide des données de contraction afin de mettre en exergue la phase de séchage à vitesse constante. La teneur en eau critique à déterminer, désigne le point de transition entre cette phase et la phase de séchage à vitesse décroissante. Cette teneur a alors été identifiée à partir de la méthode des pentes. Cette méthode consiste à tracer la tangente à l'origine à la courbe de vitesse de séchage du produit. Le point critique est donné par l'intersection entre cette tangente et la droite représentant la courbe de séchage en phase à vitesse constante. La teneur en eau critique présente surtout un grand intérêt pour pouvoir normer la teneur en eau dans le concept de la courbe caractéristique de séchage.

2.3.7 La courbe caractéristique de séchage (CCS)

La CCS a été établie pour des morceaux de fruit de 5 et 10 mm à partir des données expérimentales de séchage pour l'ensemble des variétés de mangue utilisées dans cette étude. Seule l'influence de l'épaisseur de l'échantillon sur la CCS a été considérée. Celle des autres caractéristiques du produit tel que la maturité, la coupe, la surface spécifique n'étant pas aussi importante, a été négligée. Les différentes conditions opératoires utilisées sont présentées sur le tableau 3.7. La vitesse de séchage et la teneur en eau des morceaux de mangue ont été normées suivant ce modèle en utilisant les relations suivantes :

$$\Psi = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \approx \frac{X}{X_{cr}} \quad (3.49)$$

$$\Gamma = \frac{V_s}{V_{s1}} = \frac{-\frac{dX}{dt}}{(-\frac{dX}{dt})_1} \quad (3.50)$$

3. Evaluation de la diffusivité avec prise en compte de la contraction

3.1 Hypothèses simplificatrices

L'évaluation de la diffusivité d'eau dans une tranche de mangue soumise au séchage avec prise en compte de la contraction est réalisée en supposant que :

- L'échantillon est une frite de forme parallélépipédique et les transferts sont unidirectionnels suivant l'épaisseur
- Les transferts thermiques et la contraction sont isotropiques
- L'évaporation a lieu en surface et l'humidité diffuse du cœur du produit vers celle-ci
- Le retrait du produit est idéal
- L'humidité, la vitesse et la température de l'air restent constantes.

3.2. Approche numérique

La diffusivité est déterminée par la résolution numérique des équations de transferts de masse et de chaleur. Afin de prendre rigoureusement en compte les effets de la contraction, ces équations sont rapportées simultanément aux phases solide et liquide du produit.

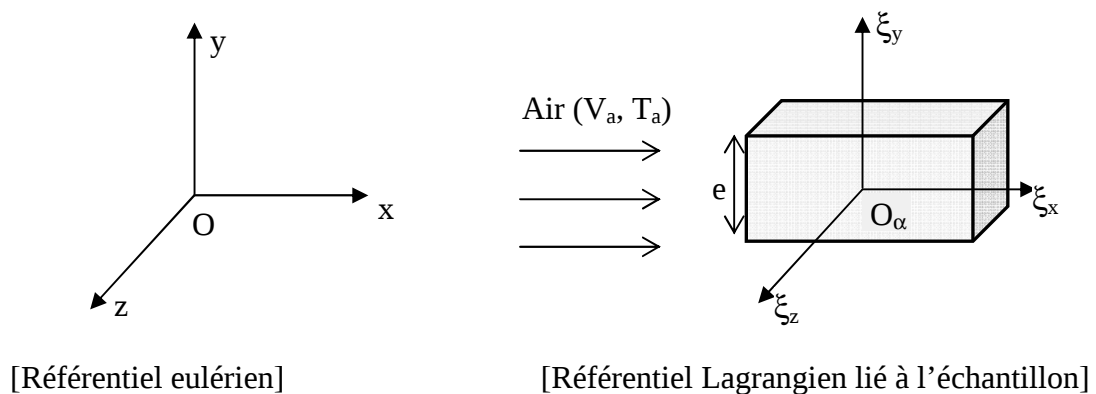


Fig.3.7 Référentiels d'étude du séchage d'une frite de mangue

3.2.1 Bilan de matière

Le milieu physique constituant le produit séchant est formé d'une phase liquide (l'eau) et d'une phase solide (la matière sèche). Si ρ_e et ρ_s désignent les masses volumiques par unité de volume de contrôle de l'eau et de la matière sèche, $\vec{v}_e$ et $\vec{v}_s$ les vitesses absolues, l'équation de conservation pour chacune de ces phases dans un référentiel eulérien s'écrit :

- L'eau:

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \text{div}(\rho_e \vec{v}_e) = 0 \quad (3.51)$$

- La Matière sèche :

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3.52)$$

Où les termes $\rho_e \vec{v}_e$ et $\rho_s \vec{v}_s$ représentent la somme des transports de matière par diffusion (transport fickien) et par convection. En effet :

$$\rho_e \vec{v}_e = \vec{\Phi}_e + \rho_e \vec{v} \quad (3.53)$$

$$\rho_s \vec{v}_s = \vec{\Phi}_s + \rho_s \vec{v} \quad (3.54)$$

$$\rho \vec{v} = \rho_e \vec{v}_e + \rho_s \vec{v}_s \quad (3.55)$$

ρ et $\vec{v}$ désignant respectivement la masse volumique apparente et la vitesse du système,

On en déduit que:

$$\rho_e \vec{v}_e = \vec{\Phi}_e + \frac{\rho_e}{\rho} (\rho_e \vec{v}_e + \rho_s \vec{v}_s) \quad (3.56)$$

$\vec{\Phi}_e$ étant donné par la loi de Fick : $\vec{\Phi}_e = -D \text{grad}(\rho_e)$.

Si on utilise la teneur en base humide $x_{(bh)} = \frac{\rho_e}{\rho}$ car $\frac{\rho_e}{\rho} = \frac{m_e}{m_e + m_s}$ il vient que :

$$\rho_e \vec{v}_e = -\rho D \text{grad}(x_{(bh)}) + x_{(bh)} (\rho_e \vec{v}_e + \rho_s \vec{v}_s) \quad (3.57)$$

En introduisant la teneur en base sèche $X = \frac{\rho_e}{\rho_s}$ car $\frac{\rho_e}{\rho_s} = \frac{m_e}{m_s}$ on a :

$$x_{(bh)} = \frac{X}{X+1} \text{ et } dx_{(bh)} = \frac{dX}{(X+1)^2}$$

D'où :

$$\vec{\text{grad}}(\mathbf{x}_{(bh)}) = \frac{\vec{\text{grad}}(X)}{(1+X)^2} \quad (3.58)$$

L'équation 3.42 devient:

$$(1+X)\rho_e \vec{v}_e = -\frac{\rho D}{1+X} \vec{\text{grad}}(X) + X(\rho_e \vec{v}_e + \rho_s \vec{v}_s) \quad (3.59)$$

En utilisant la relation : $\rho_e = X\rho_s$, on a

$$(1+X)\rho_e \vec{v}_e = -\frac{\rho D}{1+X} \vec{\text{grad}}(X) + X\rho_e \vec{v}_e + \rho_e \vec{v}_s \quad (3.60)$$

d'où:

$$\rho_e \vec{v}_e = -\frac{\rho D}{1+X} \vec{\text{grad}}(X) + \rho_e \vec{v}_s \quad (3.61)$$

L'équation 3.42 devient donc :

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \text{div}(\rho_e \vec{v}_s) = \text{div}\left(\frac{\rho D}{1+X} \vec{\text{grad}}(X)\right) \quad (3.62)$$

En tenant compte que $\rho_e = X\rho_s$ et $\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \vec{v}_s) = 0$

On obtient :

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \text{div}(\rho_e \vec{v}_s) = X \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} + \rho_s \vec{v}_s \vec{\text{grad}}(X) + X \text{div}(\rho_s \vec{v}_s) \quad (3.63)$$

et

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \text{div}(\rho_e \vec{v}_s) = \rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} + \vec{v}_s \vec{\text{grad}}(X) \right) = \text{div}\left(\frac{\rho}{1+X} D \vec{\text{grad}}(X)\right) \quad (3.64)$$

Soit U est une quantité massique quelconque au sein d'un écoulement à la vitesse $\vec{v}$. U est une fonction du temps t et des coordonnées spatiales x, y et z et il vient que :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \quad (3.65)$$

Soit :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + \vec{v} \vec{\text{grad}} U \quad (3.66)$$

Dans le référentiel Lagrangien lié au produit, la quantité U est indépendant du temps ($\vec{v} = \vec{0}$) et

on a : $\frac{dU}{dt} = \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{\xi}$, où ξ représente la coordonnée spatiale lagrangienne du système.

En se rappelant que $\rho_e = \rho_s X$, l'équation de conservation s'écrit alors :

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_{\xi} = \text{div} \left(\frac{\rho}{1+X} D \text{grad}(\vec{X}) \right) \quad (3.67)$$

En système de coordonnées cartésiennes et pour un produit disposé en couche mince avec des transferts unidirectionnels, l'équation 3.42 devient :

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_{\xi} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho}{1+X} D \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (3.68)$$

Afin de dériver par rapport à la coordonnée lagrangienne ξ , la quantité $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho}{1+X} D \frac{\partial X}{\partial x} \right)$ doit

subir un changement de variable selon :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial t'} \frac{\partial t'}{\partial t} \quad (3.69)$$

$$\frac{dU}{dx} = \frac{\partial U}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial t'} \frac{\partial t'}{\partial x} \quad (3.70)$$

t et x sont deux variables indépendants et $t=t'$ d'où :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (3.71)$$

$$\frac{dU}{dx} = \frac{\partial U}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (3.72)$$

Pour avoir le rapport $\frac{\partial \xi}{\partial x}$, on exprime la masse élémentaire de matière sèche dans les deux systèmes de référentiel par : $dm_s = \rho_s (dV)_x = \rho_{0s} (dV')_{\xi}$, où ρ_{0s} désigne la masse volumique de matière sèche, dV et dV' les volumes élémentaires dans les deux repères.

En considérant une surface unitaire, on en déduit que : $dm_s = \rho_s dx = \rho_{0s} d\xi$ d'où $\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\rho_s}{\rho_{0s}}$.

Dans le repère lagrangien l'équation de conservation s'écrit alors :

$$\rho_s \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\rho_s}{\rho_{0s}} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\rho D}{1+X} \frac{\rho_s}{\rho_{0s}} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) \quad (3.73)$$

soit :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{0s}} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\rho D}{1+X} \frac{\rho_s}{\rho_{0s}} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) \quad (3.74)$$

Le passage du système eulérien au lagrangien nécessite donc la connaissance de ρ et du rapport de contraction $\frac{\rho_s}{\rho_{0s}}$. Pour un retrait parfait, $m = m_s + m_e = m_s(1+X)$ et

$$\rho = \frac{m_s(1+X)}{V(X)} = \frac{m_s}{V_s} \frac{1+X}{(1+\frac{V_e}{V_s})} = \rho_{0s} \frac{1+X}{1+\beta(X)} \quad (3.75)$$

avec :

$$\beta(X) = \frac{V_e}{V_s} = \frac{\rho_{0s}}{\rho_{0e}} \frac{m_e}{m_s} = uX \quad (3.76)$$

Où ρ_{0e} désigne la masse volumique de l'eau pure; $\beta(X)$ l'expansion volumique de l'échantillon à la teneur X et u le coefficient de retrait linéaire du produit.

D'où :

$$\rho(X) = \rho_{0s} \frac{1+X}{1+uX} \quad (3.77)$$

De la même manière :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V(X)} = \frac{m_s}{V_s} \frac{1}{(1+\frac{V_e}{V_s})} = \rho_{0s} \frac{1}{1+uX} \quad (3.78)$$

En remplaçant ρ et ρ_s par leur valeur dans la relation 3.65, l'équation de conservation de matière s'écrit dans le référentiel (O, ξ) lié au produit séchant sous la forme :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{D}{(1+uX)^2} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) \quad (3.79)$$

3.2.2 Bilan énergétique

En supposant les transferts unidimensionnels et la température homogène sur toute l'épaisseur de l'échantillon de mangue, le bilan énergétique global s'écrit :

$$\left(m_{\text{sup}}C_{p\text{sup}} + \rho VC_p\right)\frac{dT}{dt} = hS(T_a - T) - \dot{m}L_v(T) - Q_p \quad (3.80)$$

Où $m_{\text{sup}}C_{p\text{sup}}$ et ρVC_p sont les capacités thermiques du support et de l'échantillon, h le coefficient d'échange thermique et Q_p les pertes thermiques.

En négligeant les déperditions thermiques et la chaleur emmagasinée par le support, l'équation 3.80 devient :

$$\rho VC_p \frac{dT}{dt} = hS(T_a - T) - \dot{m}L_v(T) \quad (3.81)$$

$$\text{Avec : } \rho = \frac{(1+X)}{1+uX} \rho_{0s}, V = V_s(1+uX) \text{ et } C_p = \frac{1}{1+X}(C_{ps} + XC_{pe})$$

3.2.3 Conditions initiales et aux limites

- *Conditions initiales*

A l'instant initial, l'humidité et la température sont uniformes

$$\Rightarrow t=0 \text{ et } 0 < x < e_{\text{finale}} : X=X_0 \text{ et } T=T_0$$

- *Conditions aux limites*

$$\Rightarrow \text{En } \xi=0, \text{ le cœur du produit est imperméable aux transferts : } \left(\frac{\partial X}{\partial \xi}\right)_{\xi=0} = 0$$

$$\Rightarrow \text{En } \xi=e, \text{ l'eau est éliminée par évaporation : } \left(\frac{\partial X}{\partial \xi}\right)_{\xi=e} = -\frac{(1+uX)^2}{\rho_{0s}D} \dot{m}$$

$\dot{m}$ est la vitesse de séchage exprimée à l'aide de la différence de pression de vapeur d'eau existant entre le produit séchant et l'air par :

$$\dot{m} = \frac{K_m M_v}{RT_a} (P_{v\text{produit}} - P_{v\text{air}}) = \frac{K_m M_v}{RT_a} (A_w(X, T) P_{v\text{sat}}(T) - \phi P_{v\text{sat}}(T_a)) \quad (3.82)$$

Où K_m est le coefficient de transfert de masse; M_v la masse molaire de la vapeur d'eau, P_v , P_{vs} les pressions partielle et de saturation de la vapeur d'eau dans l'air, A_w l'activité de l'eau; T , T_a les températures du produit et de l'air en °K,

3.3 Approche analytique

En considérant le transfert d'humidité unidirectionnel, la diffusivité constante, la tranche de mangue homogène et de forme parallélépipédique; l'équation de diffusion de Fick s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (3.89)$$

En supposant la distribution de la teneur en humidité initiale uniforme, la résistance aux transferts externes négligeable, la contraction de la tranche pendant le séchage négligeable et la température constante lors du séchage; la solution analytique de cette équation est (Crank, 1975) :

$$\frac{X}{X_0} \approx \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{e^2}\right) \quad (3.90)$$

Où X_e est la teneur en eau d'équilibre, X_0 la teneur en eau initiale, X la teneur en eau moyenne en base sèche, e l'épaisseur de l'échantillon et D sa diffusivité.

En séchage convectif, cette solution n'est valable que lorsque le mécanisme de désorption d'eau du produit est contrôlé par la diffusion interne d'humidité qui a lieu pendant la phase de séchage à vitesse décroissante. Aussi, l'identification de la diffusivité effective à partir de l'équation (3.90) doit se faire en fixant la teneur en eau initiale égale à la première teneur en eau critique X_{cr1} et le temps doit être pris égal à zéro à partir de $X = X_{cr1}$. Par ailleurs, Tanaka a montré que le changement de dimension de l'échantillon pouvait être prise en compte en considérant une diffusivité moyenne dans la loi d'évolution de l'humidité moyenne. L'équation (3.90) s'écrit alors sous la forme :

$$\frac{X}{X_{cr1}} \approx \frac{X - X_{eq}}{X_{cr1} - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{D_m t}{e(t)^2}\right) \quad (3.91)$$

Où D_m est la diffusivité moyenne

Dans le modèle analytique utilisé, on introduit une deuxième et une troisième teneur en eau critique. Pour déterminer la diffusivité, l'équation 3.91 est simplifiée en la linéarisant de deux manières par intervalle : au début de la phase de diffusion entre la première teneur en eau critique et la deuxième, et à sa fin entre la deuxième teneur en eau critique et la troisième.

3.3.1 Evaluation de la teneur en eau entre la première et la deuxième teneur en eau critique

En considérant la période de courte durée correspondant aux fortes vitesses de diffusion entre la première et la deuxième teneur en eau critique, l'équation (3.90) est simplifiée sous la forme (Crank,1975):

$$\frac{X}{X_{cr1}} = 1 - 2 \sqrt{\frac{D(t - t_{cr1})}{\pi e(t)^2}} \quad (3.92)$$

Cette équation peut être alors présentée sous la forme linéaire :

$$\frac{X}{X_{cr1}} = 1 - k_0 \sqrt{\frac{t - t_{cr1}}{e(t)^2}} \quad (3.93)$$

$$\text{Avec : } k_0 = \sqrt{\frac{4D}{\pi}}$$

t_{cr1} et t représentent des temps comptés à partir du début du séchage. Ils correspondent respectivement aux instants où l'échantillon a une teneur en eau $X=X_{cr1}$ et $X=X(t)$ (avec $X_{cr2} < X(t) < X_{cr1}$). La diffusivité effective est alors calculée par la méthode des pentes en représentant les teneurs en eau réduites expérimentales du domaine considéré en fonction de la racine carrée du temps. Dans ce calcul, on utilise les données expérimentales de contraction donnant l'évolution de l'épaisseur en fonction du temps.

3.3.2 Evaluation de la teneur en eau entre la deuxième teneur en eau critique et la troisième

Pour de longues périodes de diffusion prenant en compte les étapes de faibles diffusivités, correspondant aux teneurs en eau inférieures à la deuxième teneur en eau critique, l'équation (4) devient :

$$\frac{X}{X_{cr1}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4e(t)^2} D(t - t_{cr1})\right) \quad (3.94)$$

Cette dernière équation est alors linéarisée sous la forme :

$$\ln\left(\frac{X}{X_{cr1}}\right) = \ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2}{4} D \frac{(t - t_{cr1})}{e(t)^2} \quad (3.95)$$

Dans ce cas, la diffusivité effective est calculée en représentant les données expérimentales du logarithme de la teneur en eau réduite en fonction du rapport du temps et du carré de l'épaisseur mesurée.

4. Résultats

4.1 Correction des courbes de séchage par la contraction

4.1.1 Intérêt

La prise en compte de la contraction dans l'établissement des courbes de séchage expérimentales permet de faire apparaître dans la plupart des cas la phase de séchage à vitesse constante. L'importance de la détermination de cette phase réside dans l'évaluation de la teneur en eau critique qui, rappelons le, caractérise la transition entre la première phase et la deuxième phase de séchage. Cette teneur en eau critique délimite deux modes de transferts limitants qui sont le transport externe (en 1^{ère} phase) caractérisé par l'évaporation d'eau sur la couche limite externe du produit et le transport interne (en 2^{ème} phase) caractérisé par la diffusion d'eau à travers la matrice solide. Sa connaissance permet de savoir la teneur en eau moyenne à partir de laquelle, il convient de changer les équations de transfert de masse et de chaleur lors de la simulation du séchage.

4.1.2 Modèle de correction

Le débit massique d'évaporation d'eau pendant le séchage d'un morceau de mangue soumis au séchage peut être exprimé sous la forme :

$$\frac{dm_e}{dt} = m_s \frac{dX}{dt} = \frac{h(T_s - T_h)}{L_v} \quad (3.96)$$

La vitesse de séchage par unité de temps et de surface de cet échantillon est alors donnée par :

$$V_s = -\frac{1}{S} \frac{dm_e}{dt} = -\frac{m_s}{S} \frac{dX}{dt} \quad (3.97)$$

Dans le cas d'une surface d'échange variable, la surface d'échange $S(X)$ à l'instant t du séchage correspondant à la teneur en eau $X(t)$ est donnée par :

$$\frac{S(X)}{S_0} = S_s(X) \quad (3.98)$$

où $S_s(X)$ est le taux de contraction surfacique

Pour un morceau de mangue mûre la contraction est linéaire. Si en plus, nous supposons que cette contraction est isotrope, $S(X)$ est alors donnée sous la forme :

$$S(X) = S_0 \times S_s = S_0 \times S_b^{2/3} = S_0 \times \left(\frac{1 + 1.4687X}{1 + 1.4687X_0} \right)^{2/3} \quad (3.99)$$

La vitesse de séchage en unité de temps et de surface est alors corrigée sous la forme :

$$V'_s = - \frac{m_s}{S_0} \left(\frac{1 + 1.4687X}{1 + 1.4687X_0} \right)^{-2/3} \frac{dX}{dt} \quad (3.100)$$

Dans cette expression m_s , X_0 et S_0 sont constantes mais X est variable. Le terme $-\frac{dX}{dt}$ seul ne suffit pas alors pour exprimer la variation de la vitesse de séchage mais il faut prendre en compte

le facteur $\left(\frac{1 + 1.4687X}{1 + 1.4687X_0} \right)^{-2/3}$ qui dépend aussi du temps. Les vitesses de séchage corrigées

sont alors traduites par la courbe correspondant à l'expression :

$$V_s = - \frac{S_0}{S} \frac{dX}{dt} = - \left(\frac{1 + 1.4687X}{1 + 1.4687X_0} \right)^{-2/3} \frac{dX}{dt} \quad (3.101)$$

Un exemple type de correction de courbe de séchage est présenté sur la figure 3.8. La vitesse de séchage en première phase déterminée est $V_s = 2.78 \text{ g}/(\text{kg.s})$ et la teneur en eau critique vaut $X_{cr} = 0.27X_0$ soit $X_{cr} = 2.27 \text{ kg}/\text{kg}_{ms}$.

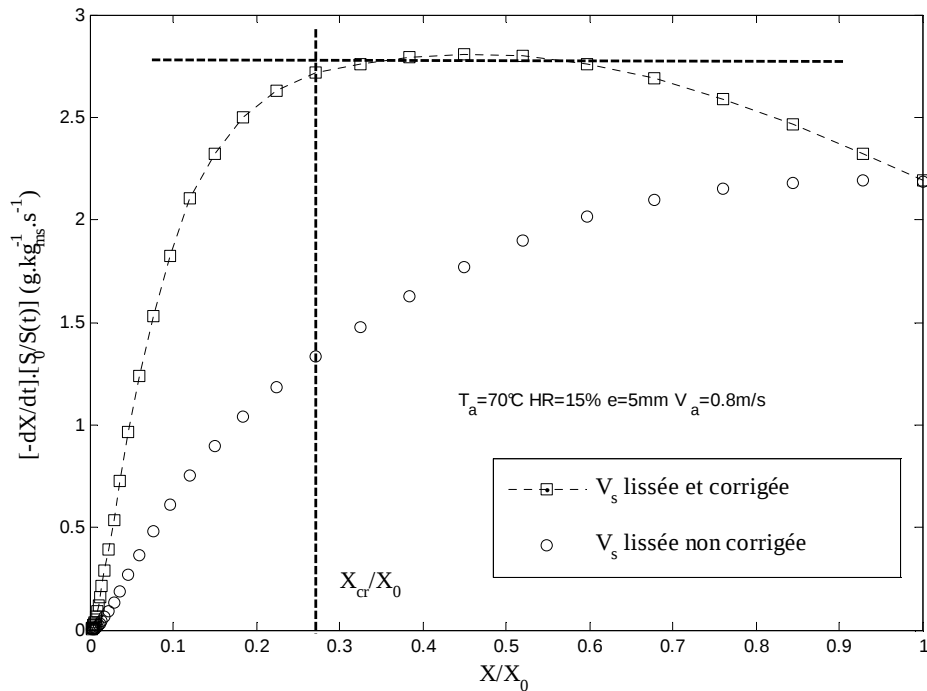


Fig.3.8 Exemple de correction de courbe de séchage d'une tranche de mangue à 70°C

4.2 Influence des paramètres intrinsèques

4.2.1. Influence de la maturité

La figure 3.9 présente l'évolution de la vitesse de séchage et de la température de surface de morceaux de mangue mûre et verte de dimension $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$ dans l'enceinte climatique *Votsch Industrietechnik* régulée en hygrométrie et en température. La différence d'état de maturité entre les échantillons de mangue mûre et vert a été identifiée par la mesure du ratio sucre/acide. Ce ratio était de $126.22 \text{ g}_{\text{pulpe}} \cdot ^\circ\text{Brix}/\text{mmol}_{\text{acide}}$ pour la mangue verte et 226.06 pour la mangue mûre. La température et l'hygrométrie de l'air dans l'enceinte était fixées respectivement à $T_a = 60^\circ\text{C}$ et $\text{HR} = 10 \%$. Les autres conditions opératoires utilisées dans cette étude ont été précisées dans le tableau 3.3. On constate que pour la majeure partie du séchage ($X \geq 0.2X_0$), la courbe de vitesse de séchage de la mangue mûre est au dessus de celle de la mangue verte. Cependant, cette tendance est inversée vers la fin du séchage ($X \leq 0.2X_0$), où le morceau de mangue verte présente les plus fortes vitesses de séchage. Plusieurs essais de séchage à l'aide de deux états de maturité ont confirmé cette tendance au cours du séchage. On déduit de ces résultats que la mangue mûre sèche plus vite que la verte en début de séchage pour $X \geq 0.2X_0$ et pour les dernières étapes du séchage pour $X \leq 0.2X_0$, la mangue verte sèche mieux que le mûr. Cette différence de comportement face au séchage de morceaux de mangue à 2 états de maturité différents s'explique par le fait qu'en début de séchage, la mangue mûre présente plus d'eau disponible que la mangue verte. Cependant, une grande partie de cette eau étant osmotique dans cette mangue, les fortes vitesses de séchage observées en début de séchage sont fortement atténuées lorsqu'on atteint le domaine hygroscopique du produit car l'eau à éliminer devient de plus en plus osmotique et liée à la matrice solide. Par contre, pour la mangue verte, au fur à mesure que le séchage progresse, l'eau piégée par la structure cellulaire est progressivement libérée sous forme d'eau non osmotique. Dans ce cas, l'atténuation de la vitesse de séchage observée en fin de ce séchage est moins remarquable que celle observée chez la mangue mûre. En comparant les profils de températures de surface des 2 types d'échantillons, on remarque qu'elles dépassent la température de bulbe humide de l'air de séchage (20.6°C) dès les premiers instants du séchage.

Ces courbes permettent de constater qu'en début de séchage pour $X \leq 0.4X_0$, les plus fortes vitesses de séchage de la mangue mûre se caractérisent par les plus faibles températures de

surface. De même, pour $X \geq 0.4X_0$, la mangue verte qui sèche plus vite que la mangue mûre acquiert une température de surface inférieure à celle de la mûre. On conclut que pendant le séchage de la mangue, la température de surface évolue en fonction des conditions de séchage. Ainsi, si la vitesse de séchage est élevée, le taux d'évaporation en surface l'est également. Plus d'énergie sera alors sollicitée en surface pour cette évaporation et la température de surface sera plus basse. Aussi, le produit mettra plus de temps pour être en équilibre thermique avec le milieu ambiant.

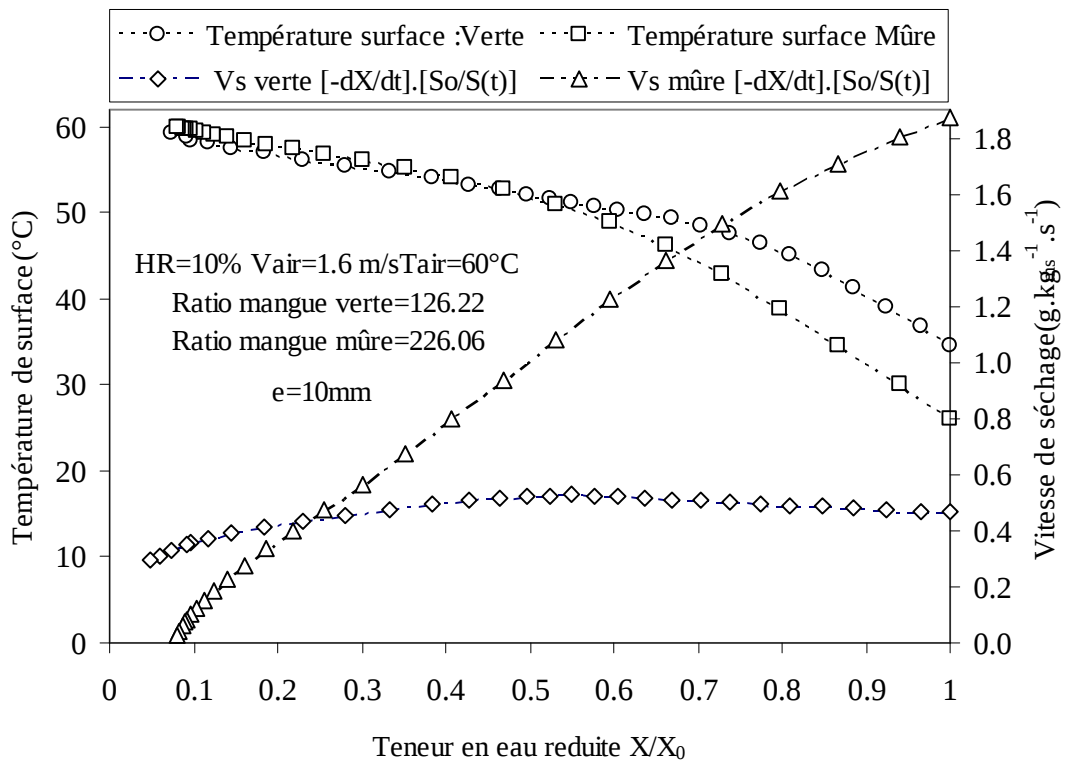


Fig.3.9: Influence de la maturité sur la cinétique de séchage de la mangue : évolution de la vitesse de séchage des mangues en enceinte ventilée et réglée à 60°C.

4.2.2. Influence de la surface spécifique en fonction de la maturité

L'influence simultanée de la surface spécifique (surface totale d'échange par unité de volume) et de la maturité sur le séchage de la mangue est illustrée sur la figure 3.10 à travers les courbes de vitesses de séchage d'échantillon de dimensions 8x1x1 et 4x2x1 et de surfaces spécifiques respectivement 17/4 et 14/4. La variété de mangue utilisée était l'Amélie et le ratio

sucre acide était de $160.28 \text{ g}_{\text{pulpe}} \cdot ^\circ\text{Brix} / \text{mmol}_{\text{acide}}$ pour la mangue verte et 234.18 pour la mangue mûre. Les conditions opératoires de mesures se rapportant à cette étude ont été précisées dans le tableau 3.3. L'analyse des courbes de séchage de la figure 3.10 permet de remarquer qu'une faible variation de la surface d'échange permet d'observer de fortes variations de la vitesse de séchage. Cette tendance est la même aussi bien pour la mangue verte que pour la mangue mûre. En effet, lorsque la surface spécifique passe de $14/4$ pour l'échantillon $4 \times 2 \times 1$ (en forme de parallélépipède) à $17/4$ pour celui $8 \times 1 \times 1$ (en forme de frite) le maximum de la vitesse de séchage passe de 0.23 à 0.32 g/kg pour la mangue verte et de 0.30 à 0.38 g/kg pour la mangue mûre. On en déduit que pour des conditions opératoires fixées, la forme de l'échantillon a une très grande influence sur la cinétique de séchage de la mangue.

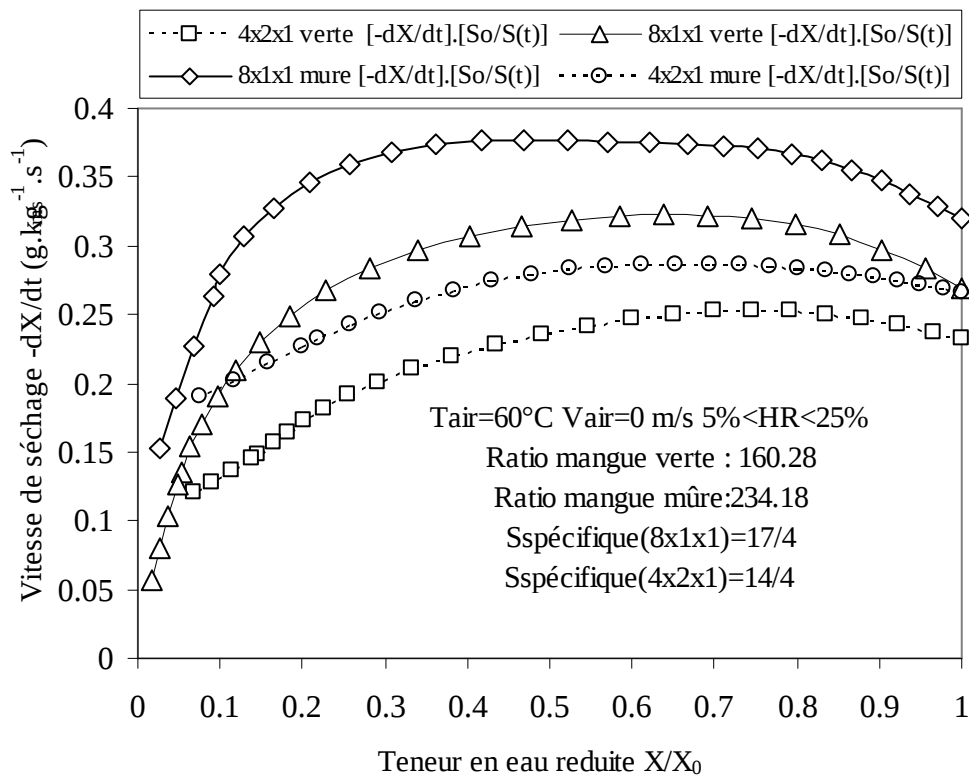


Fig.3.10 Influence de la surface spécifique sur la cinétique de séchage de la mangue : évolution, en fonction de la maturité, des vitesses de séchage à 60°C à l'étuve.

Les échantillons en forme de frite avec des surfaces spécifiques beaucoup plus élevées sont ceux qui possèdent les plus grandes vitesses de séchage. La durée de séchage des morceaux de mangue peut alors être fortement réduite en les découpant en forme de frite. D'autre part, ces résultats nous permettent de mieux comprendre que la diminution de la surface du produit au cours du séchage lié à son retrait aurait une grande influence sur l'évolution de sa courbe de séchage. D'où une nécessité de prendre en compte la contraction des échantillons dans l'étude du séchage de la mangue.

4.2.3. Influence de la position en fonction de la maturité

Les expériences ont été conduites sur des tranches de mangues mûre et verte prélevées sur les trois positions du fruit identifiées par A, B et C. La variété utilisée était la Kent et toutes les conditions opératoires de ces essais sont précisées dans le tableau 3.3. Les résultats des cinétiques données par l'évolution des vitesses de séchage et des vitesses de séchage réduites par leurs valeurs initiales sont présentés sur les figures 3.11. Ces figures confirment pour l'ensemble des trois positions du fruit que les vitesses de séchage des mangues mûres sont plus élevées que celles des mangues vertes en début de séchage pour $X \geq 0.2X_0$. Pour une mangue à un état de maturité donnée, les morceaux de mangue pris en position B ont des vitesses de séchage toujours supérieures à celles des mangues prises en positions A, ou C. On conclut que la vitesse de séchage d'un morceau de mangue dépend de sa zone de prélèvement sur le fruit. Par ailleurs, il est facilement remarquable que cette différence de comportement face au séchage des trois zones du fruit n'est aucunement liée à la différence de maturité entre celle-ci. En effet, dans notre étude, pour la mangue verte comme pour la mangue mûre, les positions A et C avaient des ratios sucre/acide plus élevés que ceux de la position B (Verte A:200.43, B:126.22, C:147.75 Mûre A:625.94, B:226.06, C:196.93). Si la différence de vitesse de séchage entre zones était liée à la maturité, la zone A avec les plus grands ratios aurait alors les plus hautes vitesses de séchage (cf. les résultats du paragraphe 4.2.1). Cette différence de vitesse de séchage serait due à une différence de composition chimique et de texture entre les trois zones.

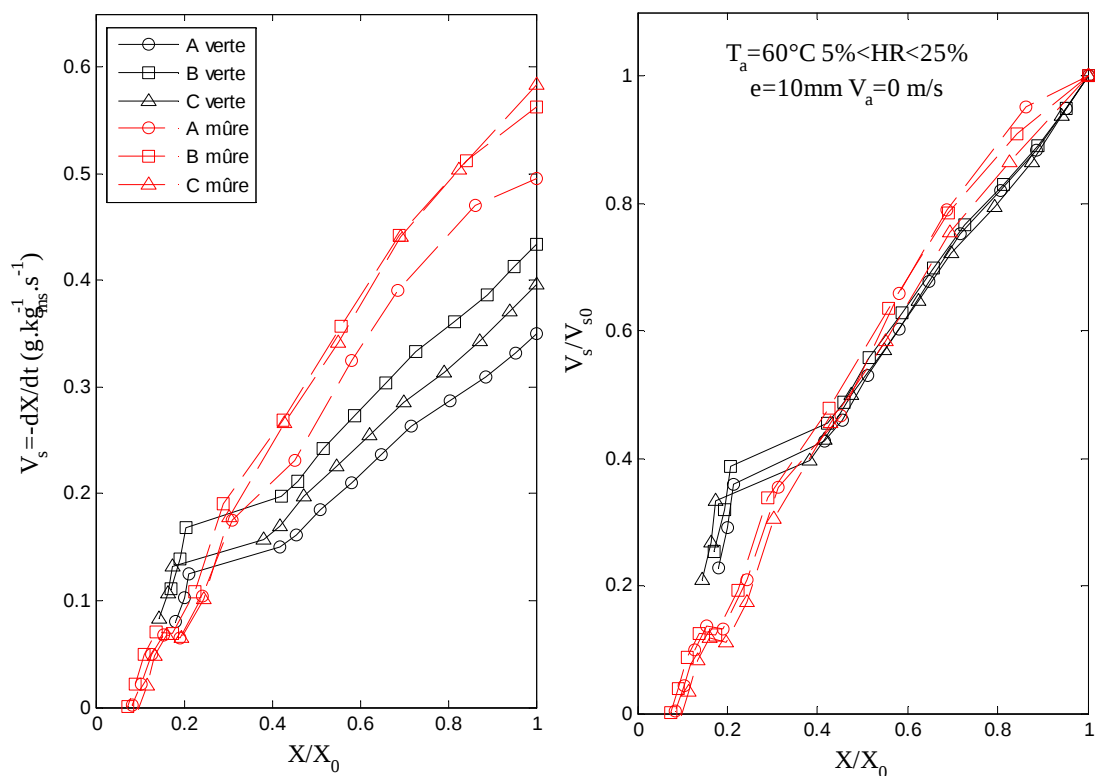


Fig.3.11: Vitesses de séchage à l'étuve des morceaux mangues vertes et mûres en fonction de la teneur en eau (bs) reportée à sa valeur initiale : Influence de la position sur la joue de la mangue de l'échantillon en fonction de la maturité du fruit.

4.2.4 Influence de la variété

L'influence du type de variété sur la vitesse de séchage est présentée sur la figure 3.12. Trois variétés de mangue à savoir : Amélie, Kent et Keitt ont été utilisées en convection forcée puis en convection libre. Les conditions opératoires de ces mesures ont été précisées dans le tableau 3.3. Les résultats de la figure 3.12 montrent que la vitesse de séchage dépend fortement du type de variété. Cependant, cette dépendance ne semble pas avoir la même tendance en convection forcée qu'en convection libre. En effet, si en convection forcée (avec $V_a=0.8\text{m/s}$, $T_a=60^\circ\text{C}$, $\text{HR}=15\%$, $e=5\text{mm}$) la variété Amélie sèche plus vite que les variétés Kent et Keitt avec une vitesse en début de séchage qui vaut presque le double de celle de la Kent et le triple de celle de la Keitt, en convection libre cette tendance est totalement inversée avec la variété Keitt qui sèche plus vite que les deux autres. Cette différence de comportement des variétés de mangue vis-à-vis du mode de séchage convectif pourrait s'expliquer par le type de texture de chacune des variétés. En effet, en fonction de la dimension et de la structure des pores, de la

porosité et surtout de la teneur en fibres, le croûtage de certaines variétés pendant le séchage peut intervenir plus tôt en début de séchage lorsqu'on augmente la vitesse de l'air. Ce croûtage affaiblit le taux d'évaporation en surface et a des conséquences sur la vitesse du séchage tout au long du processus. Alors que pour d'autres variétés telle que l'Amélie, une augmentation raisonnable de la vitesse de l'air stimule énormément le séchage. Pour ces variétés, la vitesse de séchage augmente logiquement avec la vitesse d'écoulement de l'air séchant lorsque celle-ci n'est pas trop élevée.

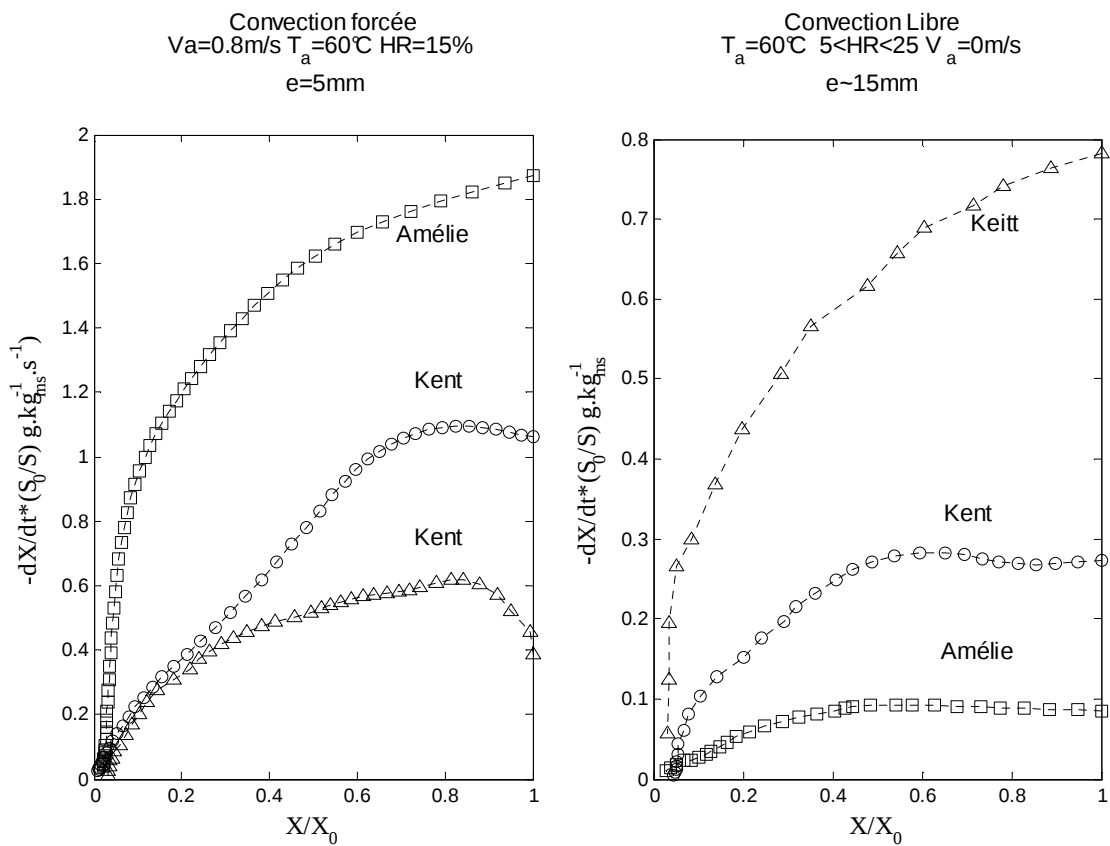


Fig.3.12 Influence de la variété sur la vitesse de séchage en convection forcée et libre

4.2.5 Influence du sens de découpe et du support

L'influence du sens de découpe et du type de support sur le séchage de la mangue a été menée sur des échantillons de mangue Kent de 10mm d'épaisseur à 60°C. Une plaque métallique et une toile PVC ont été utilisées comme support et les échantillons ont été découpés transversalement et longitudinalement. Les conditions opératoires complémentaires de cette étude ont été initialement précisées dans le tableau 3.3. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.13. Ces résultats laissent voir que si les courbes de vitesses de séchage des échantillons en coupe longitudinale et transversale sont confondues pour le support PVC, elles sont en revanche, très différentes pour le support métal. Cette différence atteint jusqu'à $0.12 \text{ g.kg}_{\text{ms}}^{-1}.\text{s}^{-1}$ en début de séchage. Des essais réalisés avec un support « papier cuisson » ont donné les mêmes résultats. On en déduit que le sens de découpe n'a d'influence sur la cinétique de séchage d'une tranche de mangue que lorsque le support est un conducteur thermique. Cela se justifie par le fait qu'en séchage-support métal, en plus du flux thermique convectif, l'échantillon reçoit un flux par conduction du côté du support. La perméabilité de l'échantillon à ce flux conductif dépendrait de la texture interne du produit mais aussi du sens de coupe de celui-ci. En coupe longitudinale, la matrice solide semble plus « ouverte » au flux conductif qu'en coupe transversale et reçoit donc plus d'énergie, d'où les différences observées entre les cinétiques coupe-transversale et longitudinale en séchage-support métal. En comparant, pour un même sens de coupe, les vitesses de séchage pour les deux types de support, on constate que l'échantillon sèche plus vite avec le support-métal lorsqu'il est en coupe longitudinale et plus vite en support-PVC quand il est en coupe transversale. Cependant les différences observées entre les vitesses de séchage à l'aide des deux supports semblent plus importantes en coupe longitudinale qu'en coupe transversale. La coupe longitudinale avec support métallique semble donc la condition opératoire qui donnent les meilleurs vitesses de séchage. Cependant l'utilisation des supports métal est limitée dans le séchage de la mangue (et des fruits à forte teneur en eau en générale) à cause de:

- l'oxydation du métal à partir de l'eau provenant du produit; cette oxydation pouvant contribuer à dégrader la qualité du produit et,
- la distribution non uniforme de teneur en eau finale du produit.

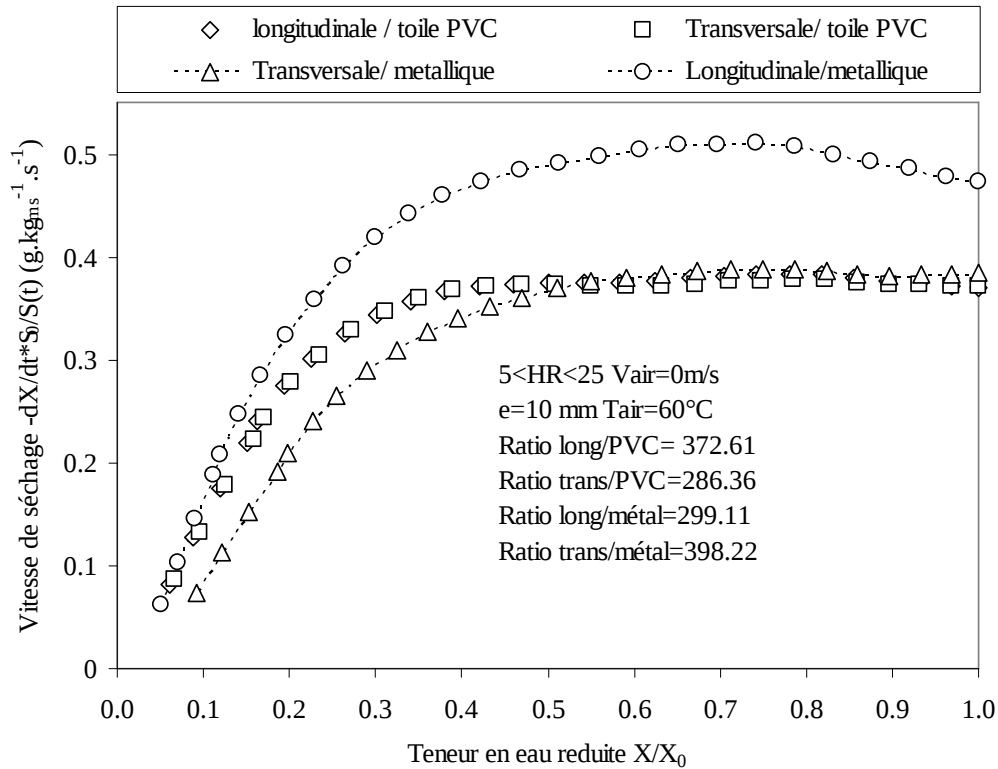


Fig. 3.13 Influence du type de support et du sens de découpe sur la cinétique de séchage de la mangue à 60°C.

4.3 Influence des conditions aérauliques

4.3.1 La température et de l'épaisseur

La température de l'air de séchage et l'épaisseur de la tranche sont les deux paramètres les plus importants pour caractériser le séchage de la mangue. Les figures 3.14 et 3.15 présentent l'évolution de la teneur en eau réduite d'une tranche de mangue « Amélie » en fonction du temps pour trois températures (50, 60 et 70° C) et pour trois épaisseurs différentes (2.5, 5 et 10 mm). Ces résultats expérimentaux ont été ajustés à l'aide des modèles de Page et de Henderson & Pabis et les statistiques d'ajustement sont données par le tableau 3.4. Les deux modèles ajustent bien les données expérimentales avec des valeurs de paramètres d'ajustement qui se rapprochent très fortement. Cependant, pour le modèle de Page, les valeurs du paramètre d'ajustement R^2 de 0.9940 à 0.9996 et de χ^2 de $4.3428 \cdot 10^{-5}$ à $4.7429 \cdot 10^{-4}$ sont les plus élevées. Comme le montrent les figures 3.14 et 3.15, le modèle de Page représente bien le comportement du séchage de la tranche de mangue.

Dimensions			Température	Henderson & Pabis				Page			
L(mm)	l(mm)	e(mm)	T _{air} (°C)	a	b	R ²	χ ²	k	y	R ²	χ ²
42	10	5	50	1.0150	2.8761.10 ⁻⁴	0.9971	1.4957.10 ⁻⁴	1.7562.10 ⁻⁴	1.0612	0.9968	1.6445.10 ⁻⁴
38	5	5	60	1.0605	5.1666.10 ⁻⁴	0.9923	6.1110.10 ⁻⁴	2.9391.10 ⁻⁴	1.0648	0.9940	4.7429.10 ⁻⁴
40	10	5	70	1.0824	4.2015.10 ⁻⁴	0.9896	0.0010	6.2462.10 ⁻⁵	1.2313	0.9983	1.7277.10 ⁻⁴
35	6	2.5	70	1.0232	0.0012	0.9967	2.8154.10 ⁻⁴	7.0988.10 ⁻⁴	1.0736	0.9985	1.3217.10 ⁻⁴
60	27	10	70	1.0335	1.3123.10 ⁻⁴	0.9986	1.4277.10 ⁻⁴	6.0183.10 ⁻⁵	1.0817	0.9996	4.3428.10 ⁻⁵

Tableau 3.4 (Dissa, Desmorieux, Bathiebo & Koulidiati; article in press, Ref. No. JFOODENG-D-06-00959): Statistiques des ajustements des cinétiques à l'aide des modèles de Page et d'Henderson & Pabis avec V_{air}=0.8m/s, HR_{air}=15%

4.3.1.1 Température de l'air

L'influence de la température sur les courbes de teneur en eau réduite et de vitesse de séchage d'un morceau de mangue « Amélie » d'épaisseur 5 mm à 50, 60 et 70°C est illustrée par les fig.3.14 a&b. On constate que pour l'ensemble de ces courbes, la plus grande partie du séchage a lieu pendant la phase de séchage à vitesse décroissante. Ceci s'explique par le fait que le transfert interne d'eau dans le produit est fortement régi par le mécanisme de diffusion. Au fur et à mesure que le produit sèche, la vitesse de diffusion de l'eau vers sa surface où a lieu l'évaporation diminue à cause de nombreux facteurs tel que le rétrécissement, le croûtage ou la diminution de la force capillaire. D'où la décroissance progressive de la vitesse de séchage observée. Au cours du séchage, l'énergie apportée au produit pour l'extraction et la vaporisation d'eau est d'autant plus importante que la température de l'air séchant est élevée. L'élévation de la température de séchage augmente l'apport d'énergie au produit et réduit considérablement sa durée de séchage. Il se passe alors moins de temps pour franchir l'équilibre hygrothermique entre celui-ci et l'air séchant. Ainsi, pour une tranche d'épaisseur 5 mm, cette durée est de 250 min à 50° C, 166 min à 60° C et 83 min à 70° C. Cette diminution du temps de séchage avec la température a été notée par de nombreux auteurs notamment Doymaz (2005) et Gogus & Maskan (1999) pour le gombo, Doymaz (2004) pour la carotte, Ertekin & Yaldiz (2004) pour les aubergines et Stamatios & Vassilios (2004) pour la figue. Néanmoins, cette élévation doit se faire en tenant compte des conditions de rétention de certains nutriments telle que la vitamine C et des composants volatiles pouvant être perdus lors du séchage à haute température et du phénomène de croûtage qui devient plus important. Les courbes de vitesse de séchage corrigées à l'aide des données de contraction du chapitre II sont illustrées par la figure 3.14b. La teneur en eau critique a été identifiée dans chaque cas et l'influence de la température sur sa valeur est présentée sur le tableau 3.5. Il est facile de remarquer que cette teneur en eau critique diminue lorsque la température augmente. Cette tendance peut s'expliquer par l'augmentation du nombre de Fourier avec la température. En effet, lorsque cette dernière augmente, le flux thermique arrive à pénétrer plus facilement le produit. La limitation des transferts due à la basse température interne du produit est alors réduite. Aussi, la vitesse de transports interne augmente et limite plus longtemps les transports externes par évaporation d'eau. La première phase de séchage se prolonge alors et la valeur de la teneur en eau critique diminue.

4.3.1.2 *Épaisseur de la tranche*

L'influence de l'épaisseur de la tranche sur les courbes de teneur en eau réduite et de vitesse de séchage de la mangue « Amélie » à 70°C pour trois épaisseurs de tranches 2.5, 5 et 10 mm est présentée par les figures 3.15. On peut facilement remarquer que le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre croît avec l'épaisseur de la tranche. A 70° C, ce temps est de 666 min, 250 min et 83 min pour respectivement des tranches de 10, 5 et 2.5 mm. Cela signifie que lorsqu'on double l'épaisseur, il faut plus qu'une durée double pour atteindre l'équilibre. Pour une même quantité d'énergie fournie au produit, si l'épaisseur croît, la longueur de diffusion d'eau à travers la paroi de l'échantillon augmente. La vitesse et la durée de diffusion de celle-ci vers la surface externe diminue. Les forces capillaires baissent assez vite et le produit met plus de temps pour atteindre l'équilibre. Dans le cas du séchage solaire, cette durée doit tenir compte de la durée de l'ensoleillement mais aussi des qualités organoleptiques requises. Le tableau 3.5 présentent l'influence de l'épaisseur de la tranche sur la teneur en eau critique. Lorsque l'épaisseur de la tranche passe de 2.5 mm à 10 mm, la teneur en eau critique réduite est presque doublée. Cependant, contrairement à l'influence de la température, aucune tendance ne se dessine quand à l'influence de l'épaisseur sur la teneur en eau critique. Cette influence pourrait ne pas exister car la teneur en eau critique caractérise la transition de phase qui dépend plus des conditions aérauliques et des propriétés intrinsèques du produit que de ses dimensions.

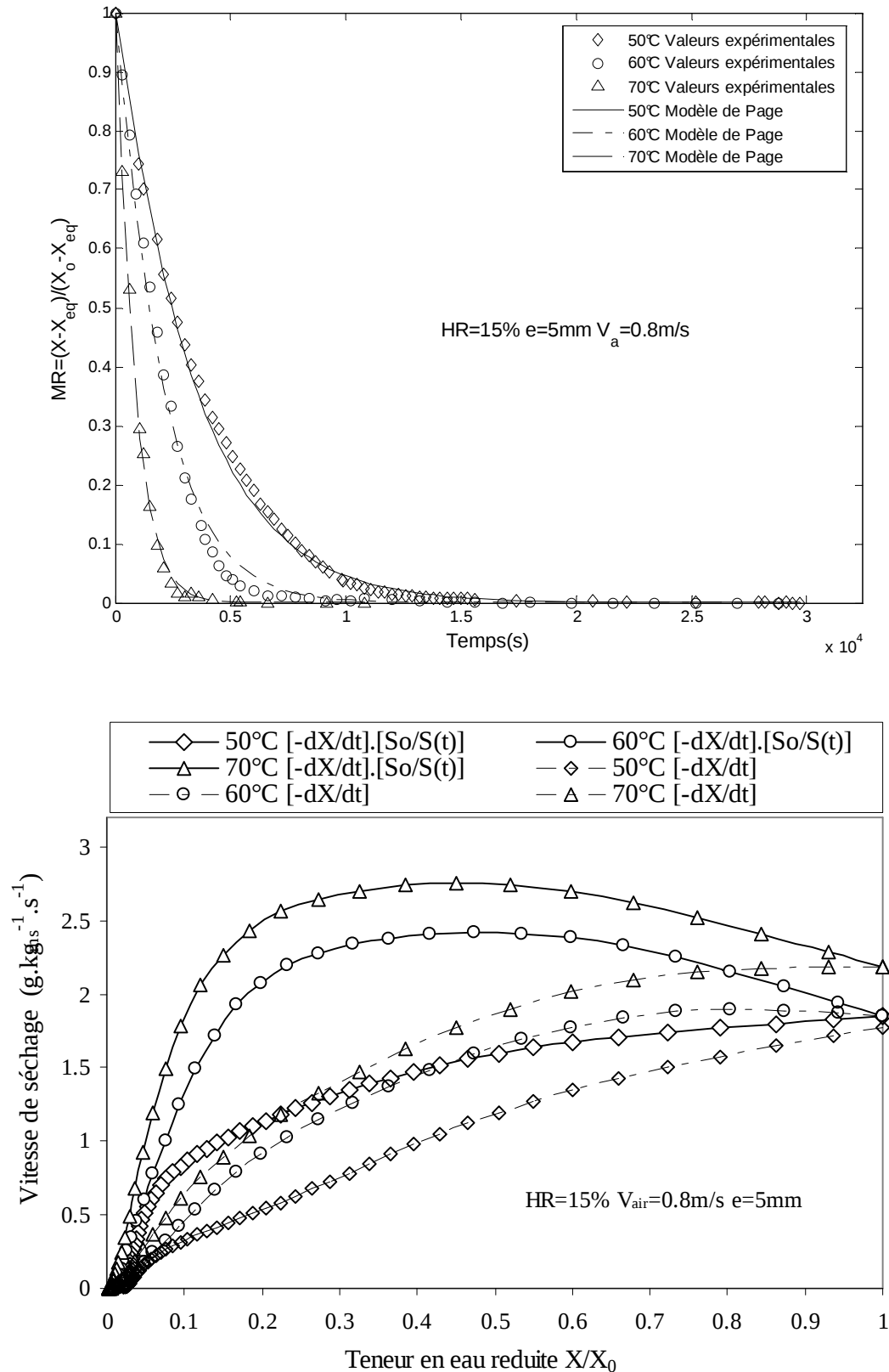


Fig.3.14 Influence de la Température sur le séchage d'un morceau de mangue Amélie d'épaisseur de 5mm :

(a). Influence sur la teneur en eau et simulation par le modèle de Page.

(b). Influence sur la vitesse de séchage

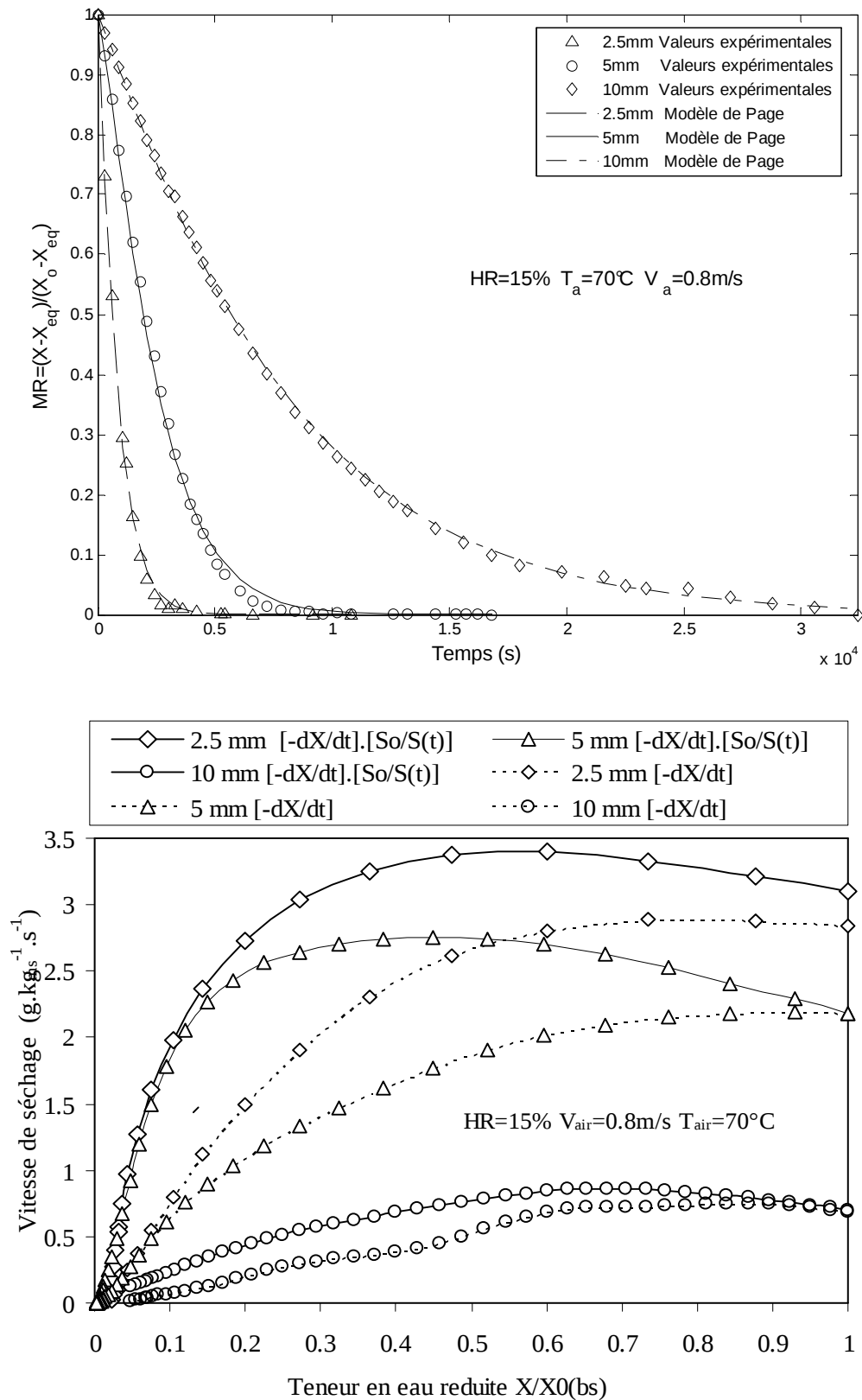


Fig.3.15 Influence de l'épaisseur sur le séchage d'un morceau de mangue Amélie à 60°C :

(a).Influence sur la teneur en eau et simulation par le modèle de Page

(b).Influence sur la vitesse de séchage

T_{air} (°C)	Epaisseur (mm)	X_0 ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$)	X_{cr}/X_0	X_{cr} ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$)	V_{s1} ($\text{g}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
50	5	8.22	0.72	5.91	1.8
60	5	8.59	0.32	2.74	2.45
70	5	8.43	0.27	2.27	2.78
70	2.5	6.52	0.36	2.35	3.35
70	10	8.23	0.6	4.94	0.73

Tableau 3.5 Influence de la température et de l'épaisseur de la tranche sur la teneur en eau critique et la vitesse de séchage en phase de séchage à vitesse constante (HR=15%, $V_a=0.8\text{m/s}$).

4.3.2 Hygrométrie de l'air

L'influence de l'hygrométrie sur la vitesse de séchage à 60°C de la mangue est présentée sur la figure 3.16. La vitesse de l'air et l'épaisseur de la tranche ont été fixées respectivement à $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et 5mm et la variété de mangue utilisée a été la Kent. L'analyse de courbes de séchage présentée montre que la vitesse de séchage décroît fortement avec l'hygrométrie. Cette tendance est surtout renforcée en début de séchage. Par ailleurs, la phase de séchage à vitesse constante semble plus longue pour les faibles hygrométries. Ces résultats peuvent être justifiés par le fait que pour les faibles hygrométries de l'air, le gradient hygrométrique entre l'air ambiant et l'intérieur du produit est très élevé ; ce qui favorise la diffusion et la capillarité d'eau depuis l'intérieur des pores vers la surface du produit. La saturation de cette surface en eau peut alors se prolonger au cours du séchage car l'eau à l'intérieur du produit arrive à migrer facilement vers celle-ci.

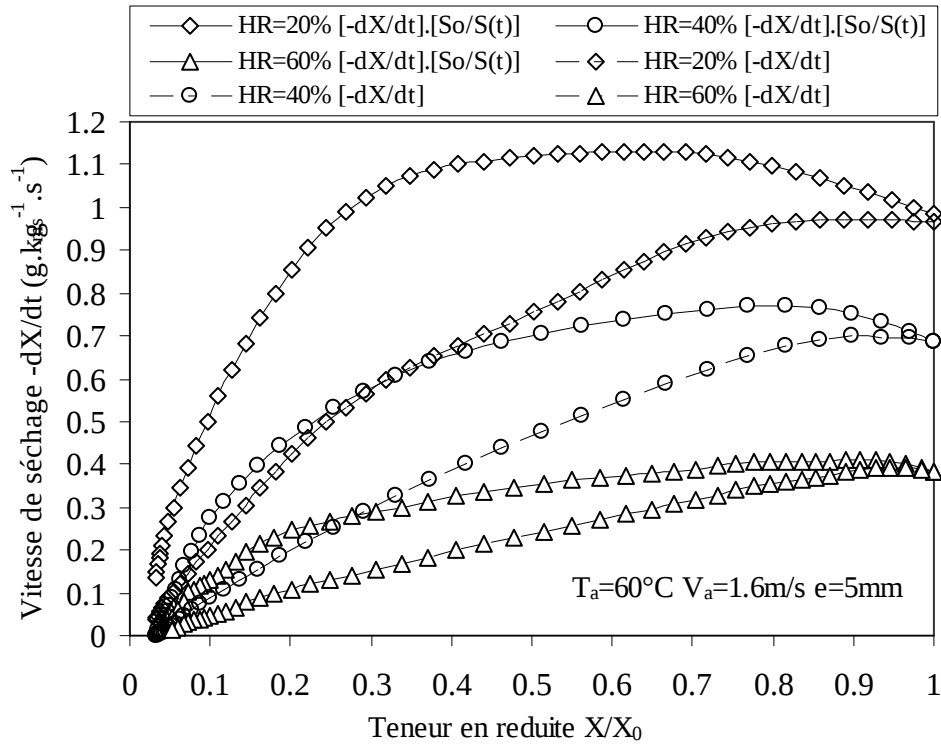
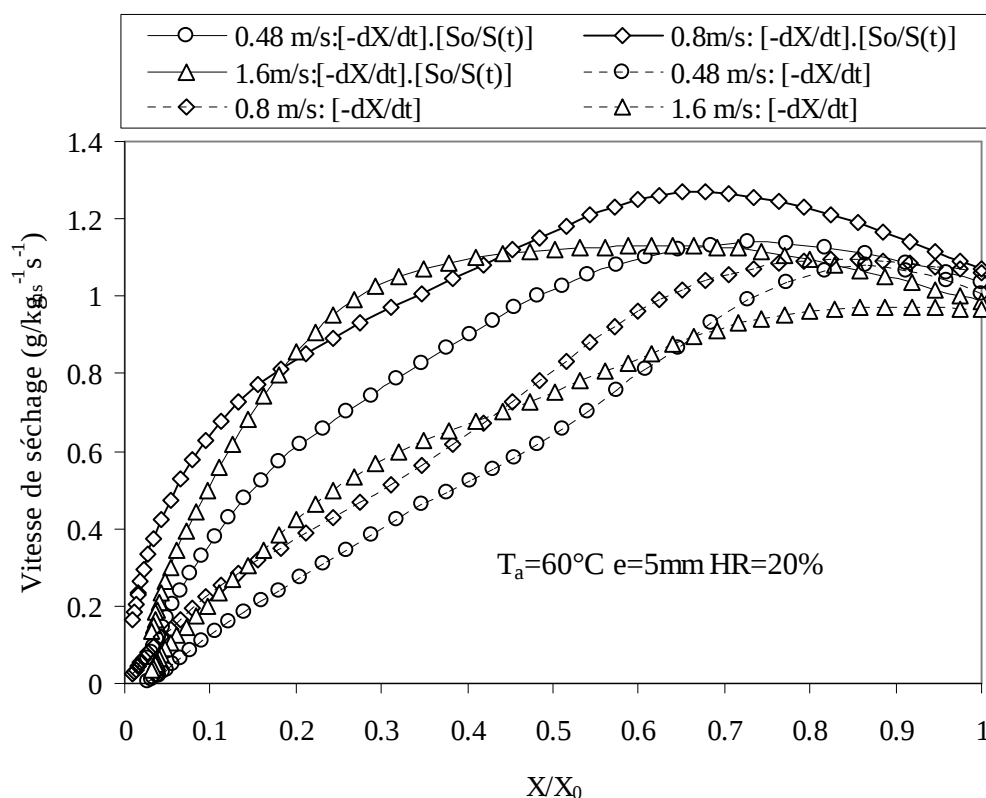


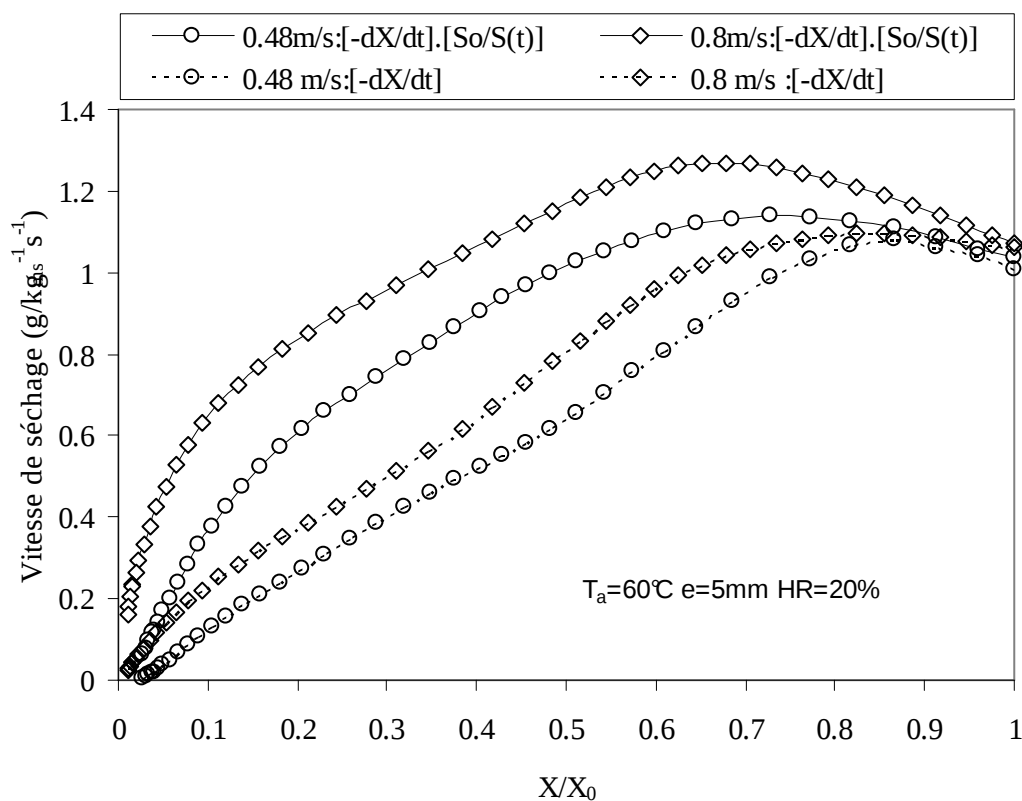
Fig. 3.16 Influence de l'hygrométrie de l'air sur la vitesse de séchage à 60°C de la mangue Kent

4.3.3 Vitesse de l'air

La figure 3.14 présente l'influence de la vitesse de l'air sur la courbe de vitesse de séchage de la mangue. La variété de mangue utilisée a été la variété Kent et l'épaisseur de la tranche et l'hygrométrie de l'air ont été fixées respectivement à 5mm et 20%. Les vitesses de l'air utilisées ont été de 0, 0.48, 0.8 et 1.6m.s^{-1} et les conditions opératoires complémentaires ont été précisées au tableau 3.3. Il est facile de remarquer que pour de faibles valeurs de la vitesse de l'air (figure 3.17.b), la courbe de vitesse de séchage croît avec la vitesse d'écoulement de l'air. Cependant, lorsque la vitesse de l'air dépasse 1m.s^{-1} , cette courbe décroît lorsque celle-ci augmente (figure 3.17.a). Ces résultats s'expliquent, d'une part, par le fait que lorsque la vitesse de l'air augmente, les forts gradients d'humidité observés à travers l'échantillon induisent une très faible teneur en eau sur la surface externe ; ce qui entraîne la formation d'une croûte rigide externe qui atténue les transferts d'eau vers la surface. En plus, si la vitesse de l'air est trop élevée, l'écoulement d'air limite les transports internes d'eau. D'autre part, pour de faibles valeurs de la vitesse, l'augmentation de celle-ci favorise le maintien d'une pression de vapeur saturante sur la couche limite à la surface du produit, ce qui stimule le séchage.



(a) Influence aux fortes vitesses



(b) influences aux faibles vitesses

Fig. 3.17 Influence de la vitesse de l'air sur la vitesse de séchage à 60°C de la mangue Kent

4.4 Diffusivité et Energie d'activation

La diffusivité effective de la tranche de mangue est identifiée à partir des résultats expérimentaux de séchage à 50, 60 et 70° C. L'influence de la température et de l'épaisseur sur sa valeur est présentée sur le tableau 3.6 et la fig.3.18. La courte durée de séchage aux hautes températures correspond à des valeurs croissantes identifiées de $7.4951 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ à 50° C à $1.0676 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ 60° C et $1.2973 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ à 70° C (tableau 3.6). Ces valeurs de la diffusivité effective sont du même ordre de grandeur que celles données par Ruiz-López & García-Alvarado (2007) pour une variété de mangue mexicaine, entre 10^{-10} et $2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. La fig. 3.18 montre que $\ln(D_{v,\text{eff}})$ décroît presque linéairement avec l'inverse de la température. Cela confirme que le mécanisme du séchage des tranches est bien régi par la diffusion avec une forte influence de la température. La pente de cette droite (fig.3.18) est estimée à $-3.0497 \cdot 10^3 \text{ kmol.K}$. La valeur de l'Energie d'activation déduite est de l'ordre de 25.355 kJ/mole. Cette valeur de l'énergie d'activation se rapproche de celles trouvées par Ruiz-López & García-Alvarado (2007) de 27 kJ/mole. La relation donnant la diffusivité de la mangue s'écrit alors sous la forme (Dissa, Desmorieux, Bathiebo & Koulidiati; article in press, Ref. No. JFOODENG-D-06-00959) :

$$D(\text{m}^2/\text{s}) = 9.625 \cdot 10^{-6} \exp\left(\frac{-25355}{R(T + 273.15)}\right) \quad (3.102)$$

Où T est en °C et $R=8.314 \text{ J/mole}$.

T _{air} (°C)	Epaisseur (mm)	X ₀ (kg _{eau} .kg _{ms} ⁻¹)	D _{eff} (m ² .s ⁻¹)
50	5	8.22	$7.4951 \cdot 10^{-10}$
60	5	8.59	$1.0676 \cdot 10^{-9}$
70	5	8.43	$1.2973 \cdot 10^{-9}$
70	2.5	6.52	7.658910^{-10}
70	10	8.23	$1.3979 \cdot 10^{-9}$

Tableau 3.6 (Dissa, Desmorieux, Bathiebo & Koulidiati; article in press, Ref. No. JFOODENG-D-06-00959): Influence de la température et de l'épaisseur sur la diffusivité effective (HR=15% et V_{air}=0.8m/s).

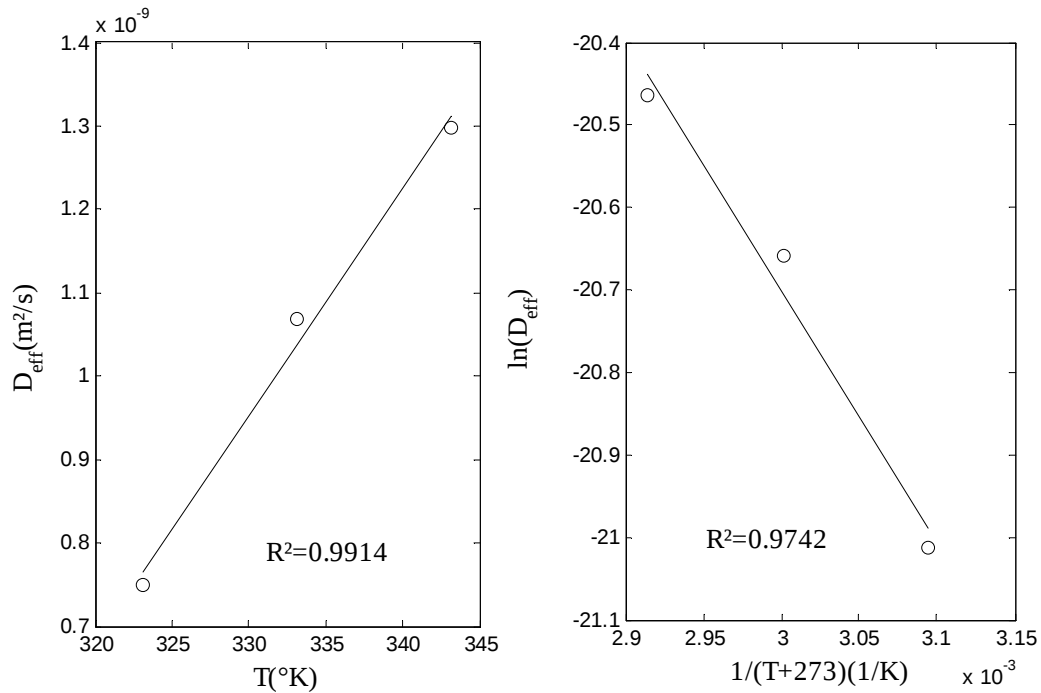


Fig.3.18 Influence de la température sur la diffusivité effective de la variété Amélie :
Séchage de tranches de mangues à 50, 60 et 70°C, $e=5mm$, $HR=15\%$ et $V_a=0.8m/s$

4.5 La courbe caractéristique de séchage (CCS)

La CCS a été établie pour des conditions opératoires de séchage d'échantillons de mangue d'épaisseur 5mm. Ces conditions opératoires sont résumées dans le tableau 3.3. Trois variétés de mangue : Amélie, Kent et Keitt ont été utilisées pour des températures comprises entre 50 et 70°C. Pour chacune des expériences, la CCS a été construite à partir d'un programme de calcul adapté au logiciel MATLAB version 7.0.1 (Annexe III). Ce programme permet d'ajuster les valeurs de la vitesse de séchage réduite et de la teneur en eau réduite à l'aide d'une fonction polynomiale. L'ensemble des courbes obtenues pour les différentes conditions opératoires sont présentées sur la figure 3.19.a et le nuage de points de la CCS est décrit sur la figure 3.19.b. Il est facile de constater que la phase de séchage à vitesse constante est très brève pour la quasi-totalité de ces courbes. La plupart des points de séchage se trouve dans la phase à vitesse de séchage décroissante. La mangue mûre est donc un produit à forte teneur en eau initiale dont une grande partie de l'eau n'est pas libre pour pouvoir être évacuée en première phase. La fonction caractéristique a été obtenue par ajustement du nuage de points à l'aide de

fonctions polynômes sous MATLAB version 7.0.1. Parmi les polynômes de bas degré, la fonction quadratique a été celui qui a donné les résultats d'ajustement les plus satisfaisants avec $R^2=0.94$. La fonction caractéristique pour les conditions $50^\circ\text{C} < T_a < 70^\circ\text{C}$, $15\% < \text{HR} < 60\%$, $0.48 < V_a < 1.6\text{m/s}$ est alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} g(\Psi) = -\frac{\frac{dX}{dt}}{\left(\frac{dX}{dt}\right)_1} = -0.99\Psi^2 + 1.75\Psi + 0.1547, \text{ pour } \psi \leq 1 \\ g(\Psi) = 1, \text{ pour } \psi \geq 1 \end{array} \right. \quad (3.103)$$

Variété	Numéro	T _{air} (°C)	HR (%)	V _{air} (m.s ⁻¹)	V _{s1} (g _{eau} .kg _{ms} ⁻¹ .s ⁻¹)
Amélie	CCS10	50	15	0.8	2.0829
	CCS1	60	15	0.8	2.6255
	CCS2	70	15	0.8	3.0792
Kent	CCS3	60	20	1.6	1.5008
	CCS4	60	40	1.6	1.0034
	CCS9	60	50	1.6	0.8287
	CCS5	60	60	1.6	0.4733
	CCS6	60	20	0.8	1.556
	CCS7	60	20	0.48	1.4969
Keitt	CCS8	60	15	0.8	0.7625

Tableau 3.7 Conditions opératoires utilisées pour l'établissement de CCS

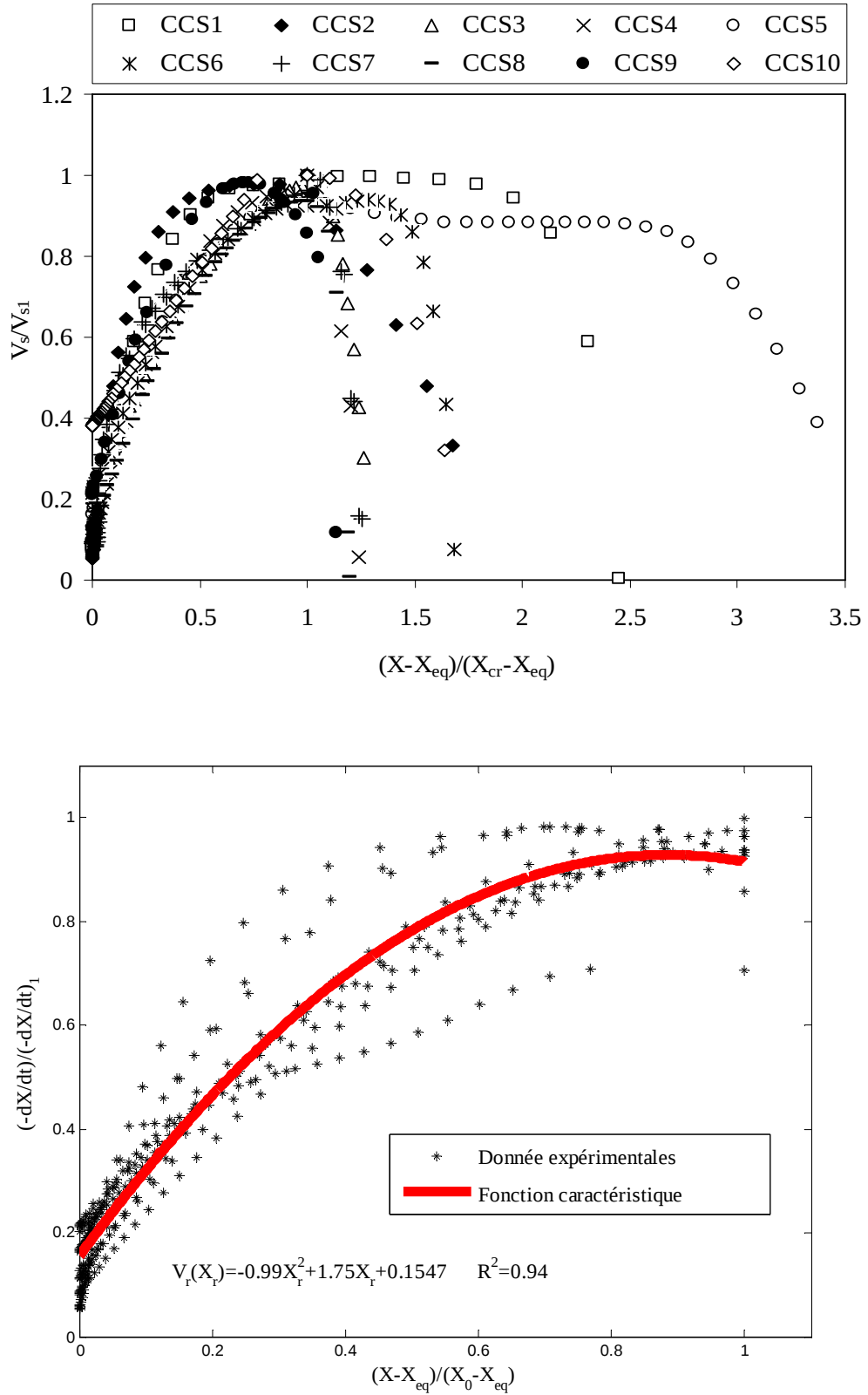


Fig.3.19 Courbe caractéristique d'un morceau de mangue mûre d'épaisseur 5mm.

(a) Courbes pour différentes conditions expérimentales

(b) Nuage de points de la seconde phase et fonction caractéristique

4.6 Détermination de la diffusivité avec prise en compte de la contraction

4.6.1 Evaluation des teneurs en eau critique

Dans cette étude, sept (7) conditions opératoires donnant l'influence de la température, de la vitesse de l'air et de l'hygrométrie ont été utilisées pour identifier la diffusivité. Les courbes de séchage corrigées montrant les trois phases de séchage ont été utilisées. A partir de ces courbes, la première teneur en eau critique X_{cr1} et la phase de séchage à vitesse constante ont été obtenues à partir de la méthode des pentes. Un exemple type de détermination de ces deux paramètres est présenté sur la figure 3.20. Les valeurs de X_{cr1} évaluées pour les différentes conditions opératoires n'étaient pas les mêmes. Afin d'avoir un X_{cr1} global pour l'ensemble de nos courbes de séchage, nous avons pris sa plus petite valeur (fig.3.20). Ce choix a été fait pour être certain d'être dans la phase de séchage à vitesse constante au-delà de X_{cr1} pour l'ensemble de ces courbes. Comme la valeur de la teneur en eau initiale varie en fonction des variétés, les teneurs en eau critiques identifiées ont été exprimées en fonction de X_0 . Ainsi, la valeur de cette première teneur en eau critique trouvée a été $X_{cr1} = 0.14X_0$. La deuxième teneur en eau critique X_{cr2} introduite n'a aucune signification physique mais représente la teneur en eau de référence à partir de laquelle il convient de changer la forme simplifiée de la solution analytique de l'équation de Fick de l'évolution linéaire de X/X_{cr1} à celle de $\ln(X/X_{cr1})$. X_{cr2} a été identifiée pour des temps courts de séchage pour lesquels X/X_{cr1} évolue presque linéairement avec $[(t - t_{cr1})/e(t)^2]^{1/2}$. Cette évolution pour l'ensemble des courbes de séchage est illustrée par la figure 3.21. La valeur de X_{cr2} obtenue a été $X_{cr2} = 0.35X_{cr1}$ soit $X_{cr2} = 0.049X_0$. La troisième teneur en eau critique X_{cr3} marque la fin de la période de séchage à vitesse constante et traduit la teneur en eau limite du domaine d'évaluation de la diffusivité. Elle représente la transition entre l'état de diffusion d'eau liquide et celui de diffusion de vapeur au sein du produit. X_{cr3} est aussi la teneur en eau limite des temps longs pour lesquels $\ln(X/X_{cr1})$ évolue quasi-linéairement avec la durée du séchage. Elle a été obtenue en représentant $\ln(X/X_{cr1})$ en fonction de $(t - t_{cr1})/e(t)^2$. Pour l'ensemble de nos courbes de séchage, le profil linéaire de $\ln(X/X_{cr1})$ dans le domaine $X_{cr1} - X_{cr3}$ est facilement observable sur la figure 3.22. La valeur de $\ln(X_{cr3}/X_{cr1})$ déterminée géométriquement est de -1.7 soit $X_{cr3} = 0.183X_{cr1}$ et $X_{cr3} = 0.026X_0$. L'ensemble des trois teneurs en eau critiques

considérées dans notre étude et correspondant aux limites des domaines d'approximation de la solution de Cranck (1975) sont alors précisées sur les figures 3.20, 3.21, 3.22 et 3.23.

4.6.2 Evaluation des diffusivités

Les diffusivités aux deux domaines de diffusion des courbes de séchage ont été évaluées en supposant le retrait du produit unidirectionnel suivant l'épaisseur. Les résultats de contraction obtenue au chapitre précédent montrent, pour différentes conditions opératoires, un profil linéaire de l'épaisseur de l'échantillon en fonction de la teneur en eau réduite. La loi de retrait linéique suivant l'épaisseur, établie à l'aide des données de contraction enveloppant les conditions opératoires utilisées dans cette étude est alors :

$$\frac{e}{e_0} = 0.4968 + 0.4798 \left(\frac{X}{X_0} \right); R^2 = 0.974 \quad (1.04)$$

Afin de voir l'impact relatif de la contraction sur la valeur de la diffusivité, cette dernière a été déterminée dans chaque cas de deux manières : avec prise en compte du retrait et sans prise en compte du retrait.

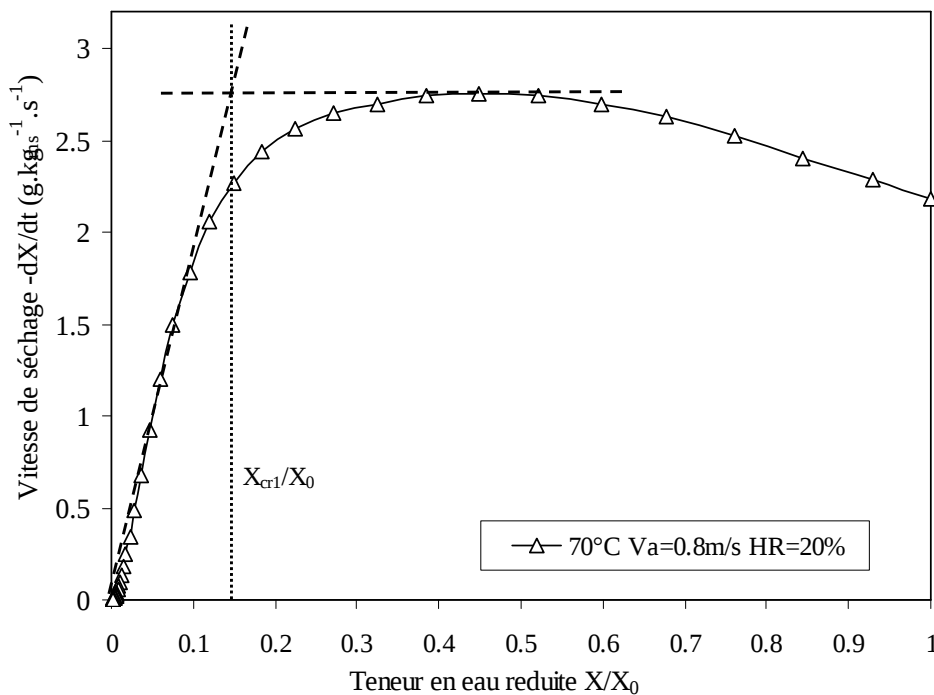


Fig.3.20 Exemple type d'évaluation de la première teneur en eau critique

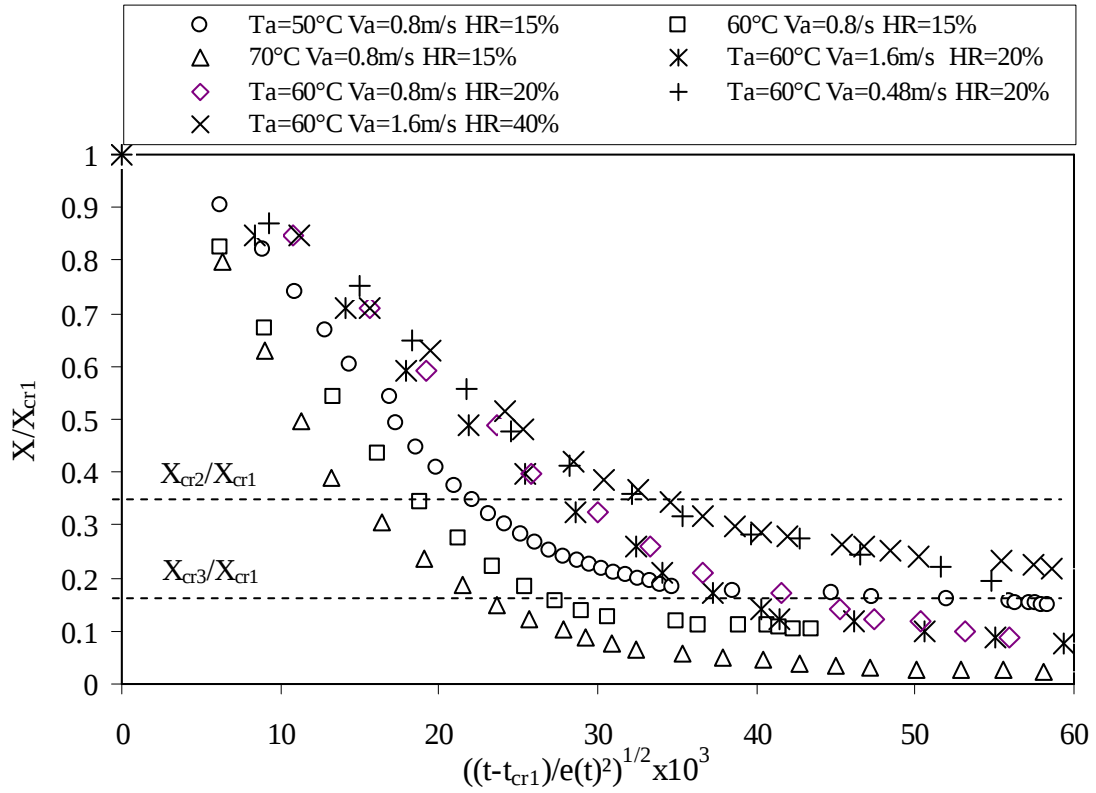


Fig.3.21 Teneur en eau réduite en fonction de la racine carrée du ratio temps-carré de l'épaisseur

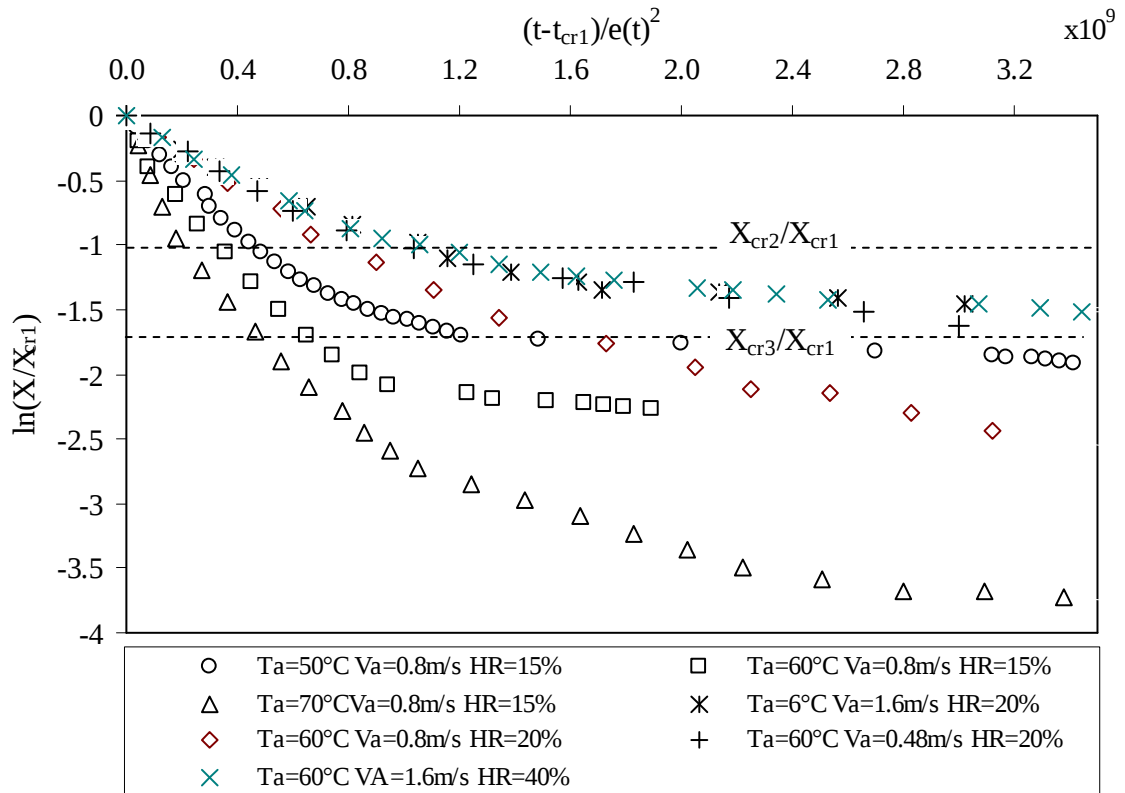


Fig.3.22 Logarithme de la teneur en eau en fonction du ratio temps-carré de l'épaisseur

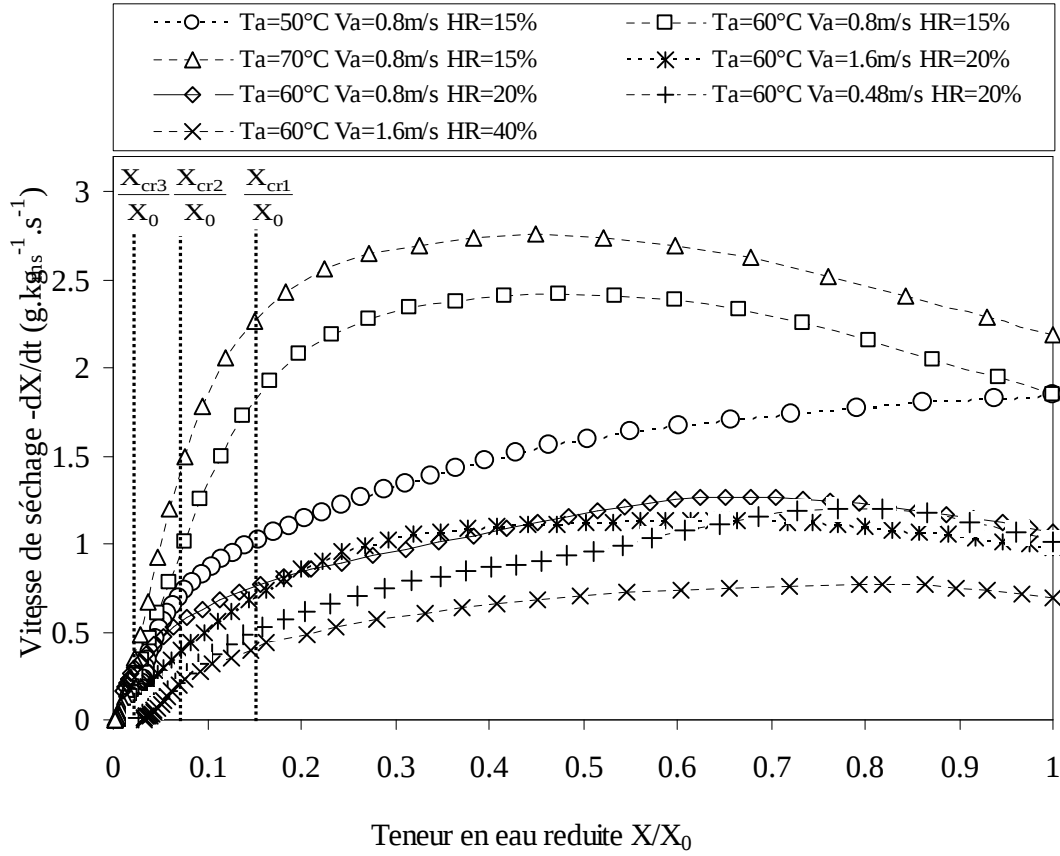


Fig.3.23 Vitesses de séchage par unité de surface en fonction de la teneur en eau réduite: Illustration des teneurs en eau critiques.

4.6.2.1 Diffusivité identifiée entre X_{cr1} et X_{cr2}

La diffusivité sur cette gamme de teneur en eau a été calculée à partir de la pente de droite évolutive de X/X_{cr1} en fonction de la racine carrée du ratio temps-carré de $e(t)$ (fig.3.21). L'ajustement des données suivant la fonction linéaire a été effectué avec un coefficient de détermination de $R^2 \approx 0.9941$. Cette diffusivité a été évaluée en considérant ou non le retrait suivant l'épaisseur. Selon les résultats présentés dans le tableau 3.8, les différences observées entre les valeurs de la diffusivité pour les données non corrigées et corrigées par la contraction sont très importantes. L'écart type entre ces valeurs varie de $5.23 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ à $2.64 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ et est de surcroît toujours supérieur à la valeur de la diffusivité proche de la réalité c'est-à-dire celle obtenue des courbes corrigées. La différence relative en % donnée par

$$dr = \frac{D_{\text{eff},e_0} - D_{e(t)}}{D_{\text{eff},e_0}} \times 100 \text{ est très élevée et proche de 72\%. Ces résultats traduisent que la}$$

non prise en compte de la contraction dans les données de séchage de la mangue surévalue la valeur de la diffusivité. Dans cette étude, cette surévaluation va jusqu'à près de 72% de la valeur obtenue des données non corrigées et près de 260% de la valeur réelle (obtenues des données corrigées). L'analyse des diffusivités obtenues pour chaque type d'influence, permet de voir que la diffusivité est fortement influencée par la température mais faiblement influencée par la vitesse et l'hygrométrie de l'air. On en déduit que dans la phase de séchage à vitesse décroissante, la cinétique de séchage de la mangue ne dépend que des conditions internes. Cela confirme qu'au-delà de la première teneur en eau critique, le séchage de la mangue est contrôlé par le mécanisme de diffusion. Les conditions extérieures n'influençant pas le séchage pendant cette période, la surface du produit est alors en équilibre avec l'extérieur et sa teneur en eau est égale à la teneur en eau d'équilibre donnée par l'isotherme de sorption du produit dans ces mêmes conditions.

$T_a(^{\circ}\text{C})$	HR_a	$V_a(\text{m/s})$	$D_1(\text{m}^2/\text{s}), e(t)$	$D_{eff1}(\text{m}^2/\text{s}), e_0$	Ecart type	Différence relative(%)
50°C	15%	0.8	$6.19 \cdot 10^{-10}$	$2.19 \cdot 10^{-9}$	$1.11 \cdot 10^{-9}$	71.74
60°C	15%	0.8	$9.38 \cdot 10^{-10}$	$3.30 \cdot 10^{-9}$	$1.67 \cdot 10^{-9}$	71.58
70°C	15%	0.8	$1.47 \cdot 10^{-9}$	$5.21 \cdot 10^{-9}$	$2.64 \cdot 10^{-9}$	71.79
60°C	20%	1.6	$2.90 \cdot 10^{-10}$	$1.03 \cdot 10^{-9}$	$5.23 \cdot 10^{-10}$	71.84
60°C	40%	1.6	$3.06 \cdot 10^{-10}$	$1.10 \cdot 10^{-9}$	$5.61 \cdot 10^{-10}$	72.18
60°C	20%	0.8	$3.58 \cdot 10^{-10}$	$1.26 \cdot 10^{-9}$	$6.38 \cdot 10^{-10}$	71.59
60°C	20%	0.48	$3.15 \cdot 10^{-10}$	$1.12 \cdot 10^{-9}$	$5.69 \cdot 10^{-10}$	71.88

Tableau 3.8 Diffusivités évaluées dans le domaine $X_{cr2} < X < X_{cr1}$

4.6.2.2 Diffusivité identifiée entre X_{cr2} et X_{cr3}

La diffusivité d'eau de cette zone a été calculée à partir de la pente de la droite $\ln(X/X_{cr1})$ en fonction du ratio temps- $e(t)^2$. L'ajustement linéaire des données a été fait avec un coefficient de détermination $R^2=0.9935$. Les diffusivités identifiées sont présentées sur le tableau 3.9. Ces diffusivités varient de $5.79 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ à $4.05 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces valeurs sont proches de celles données par Ruiz-López & García-Alvarado (2007) pour une variété de mangue mexicaine qui variaient entre 10^{-10} et $2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Comme dans le cas de la première zone de

diffusion, une différence assez significative existe entre les diffusivités obtenues à partir des données corrigées et celles des données non corrigées. L'écart type entre ces diffusivités varie de $2.23 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ et $2.15 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ et représente 74 à 75% des valeurs déterminées à partir des données non corrigées. Egalement, pour ce domaine de teneur en eau la négligence du retrait du produit dans l'étude du séchage surévalue énormément la diffusivité. Au delà de la troisième teneur en eau critique la pente des courbes de séchage est relevée comme si la diffusivité commençait à accroître. Ce comportement traduit le passage de la phase de diffusion d'eau liquide à la phase de diffusion de vapeur. L'augmentation des vitesses de séchage s'explique par le fait que l'eau à l'état gazeux se déplace plus vite qu'à l'état liquide dans le matériau. Cette tendance a été observée par Hassini, Azouz, Peczalski & Belghith (2007) pour la pomme de terre et par Giovanelli et al. (2002).

Pour l'ensemble des courbes de séchage, la diffusivité déterminée dans la première zone de diffusion est plus grande que celle déterminée dans la deuxième zone. Cela est dû au fait que la vitesse de diffusion d'eau liquide dans le matériau est plus importante aux fortes teneurs en eau qu'aux faibles.

$T_a(^{\circ}\text{C})$	HR_a	$V_a(\text{m/s})$	$D_2(\text{m}^2/\text{s}), e(t)$	$D_{\text{eff}2}(\text{m}^2/\text{s}), e_0$	Ecart type	Différence relative
50°C	15%	0.8	$3.45 \cdot 10^{-10}$	$1.37 \cdot 10^{-9}$	$7.25 \cdot 10^{-10}$	74.82
60°C	15%	0.8	$7.72 \cdot 10^{-10}$	$3.15 \cdot 10^{-9}$	$1.68 \cdot 10^{-9}$	75.49
70°C	15%	0.8	$1.01 \cdot 10^{-9}$	$4.05 \cdot 10^{-9}$	$2.15 \cdot 10^{-9}$	75.06
60°C	20%	1.6	$5.79 \cdot 10^{-11}$	$2.23 \cdot 10^{-10}$	$1.17 \cdot 10^{-10}$	74.04
60°C	40%	1.6	$6.7244 \cdot 10^{-11}$	$2.61 \cdot 10^{-10}$	$1.37 \cdot 10^{-10}$	74.24
60°C	20%	0.8	$2.12 \cdot 10^{-10}$	$8.60 \cdot 10^{-10}$	$4.58 \cdot 10^{-10}$	75.35
60°C	20%	0.48	$1.08 \cdot 10^{-10}$	$4.24 \cdot 10^{-10}$	$2.23 \cdot 10^{-10}$	74.53

Tableau 3.9 Diffusivités évaluées dans le domaine $X_{\text{cr}3} < X < X_{\text{cr}2}$

4.6.2.3 Influence de la maturité sur les diffusivités identifiées

Les diffusivités ont été calculées pour deux états de maturités différentes ($R : 160.28$ et 234.18) et pour deux échantillons de tailles différentes ($4 \times 2 \times 1$ et $8 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$). Selon le tableau 3.10, la diffusivité des mangues vertes varie de $7.30 \cdot 10^{-10}$ à $2.94 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la première zone

et de $5.72 \cdot 10^{-10}$ à $2.65 \cdot 10^{-9}$ m²/s pour la deuxième. Celles des mangues mûres varient de $8.78 \cdot 10^{-10}$ à $4.12 \cdot 10^{-9}$ m²/s et de $3.65 \cdot 10^{-10}$ à $1.90 \cdot 10^{-9}$ m²/s respectivement pour les deux zones. Ces résultats permettent de constater que la maturité a une influence sur la diffusivité. Cependant cette influence n'est pas aussi importante que celle de la température. En observant de près les diffusivités du tableau 3.10, on remarque que l'influence de la maturité dépend du domaine de diffusion. En effet, pour $X_{cr2} < X < X_{cr1}$ les diffusivités des mangues mûres sont plus élevées que pour celles des mangues vertes mais, pour $X_{cr3} < X < X_{cr2}$, ce sont les mangues vertes qui possèdent les plus grandes diffusivités. Ces résultats confirment les tendances observées précédemment sur l'influence de la maturité sur les cinétiques de séchage. Ces tendances montrent que comparée à la mangue verte, la mangue mûre sèche plus vite en début de séchage et moins vite en fin de séchage. L'inversion des inégalités sur les diffusivités entre les deux domaines de diffusion traduit donc cette inversion des inégalités sur les vitesses de séchage en période de séchage à vitesse décroissante.

Taille en cm	Maturité	Ratio sucre/Acide	$D_1(\text{m}^2/\text{s}), e(t)$	$D_{eff1}(\text{m}^2/\text{s}), e_0$	$D_2(\text{m}^2/\text{s}), e(t)$	$D_{eff2}(\text{m}^2/\text{s}), e_0$
4x2x1	Verte	160.28	$7.30 \cdot 10^{-10}$	$1.96 \cdot 10^{-9}$	$6.27 \cdot 10^{-10}$	$2.65 \cdot 10^{-9}$
8x1x1	verte	160.28	$1.08 \cdot 10^{-9}$	$2.94 \cdot 10^{-9}$	$5.72 \cdot 10^{-10}$	$2.34 \cdot 10^{-9}$
4x2x1	Mûre	234.18	$8.78 \cdot 10^{-10}$	$2.33 \cdot 10^{-9}$	$3.65 \cdot 10^{-10}$	$1.40 \cdot 10^{-9}$
8x1x1	Mûre	234.18	$1.55 \cdot 10^{-9}$	$4.12 \cdot 10^{-9}$	$4.73 \cdot 10^{-10}$	$1.90 \cdot 10^{-9}$

Tableau 3.10 Influence de la maturité sur la valeur de la diffusivité

4.6.3 Evaluation numérique de la diffusivité

La fonction $D(X,T)$ a été déterminée par identification paramétrique à l'aide des diffusivités des tableaux 3.8 et 3.9 en utilisant un programme de régression multiple sous MATLAB 7.0.1 et par intégration de l'équation 3.79 de Fick avec prise en compte de la contraction. Les courbes de diffusivité à plusieurs températures présentées sur la figure 3.24 montrent des valeurs de la diffusivité qui varient beaucoup avec la température et faiblement avec la teneur en eau. On en déduit que la relation 3.102 exprimant la diffusivité en fonction uniquement de la température peut donner une bonne approximation de la diffusivité de la

mangue. L'énergie d'activation identifiée à 22.292 kJ/mole est en deçà de 25.355 kJ/mole de celle obtenue initialement avec la dépendance unique de la température sans prise en compte de la contraction. Les valeurs de la diffusivité pour $X \leq X_{cr1}$ [avec $X_{cr1} = 0.14X_0$ et $X_0 = 6.0(\text{bs})$] varient entre $6 \cdot 10^{-10}$ et $2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles données par Ruiz-López & García-Alvarado (2007) pour la variété de mangue mexicaine qui variait entre 10^{-10} et $2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Cependant, pour une même température, ces valeurs sont relativement plus basses que celles obtenues par la méthode analytique. L'ajustement de ces données numériques obtenues à l'aide d'un modèle de diffusivité faisant intervenir simultanément la température et la teneur en eau a donné la relation empirique suivante :

$$D(\text{m}^2/\text{s}) = 2.7795 \cdot 10^{-6} \exp(0.1204X) \cdot \exp\left(\frac{-22292}{R(T + 273.15)}\right) \quad (3.105)$$

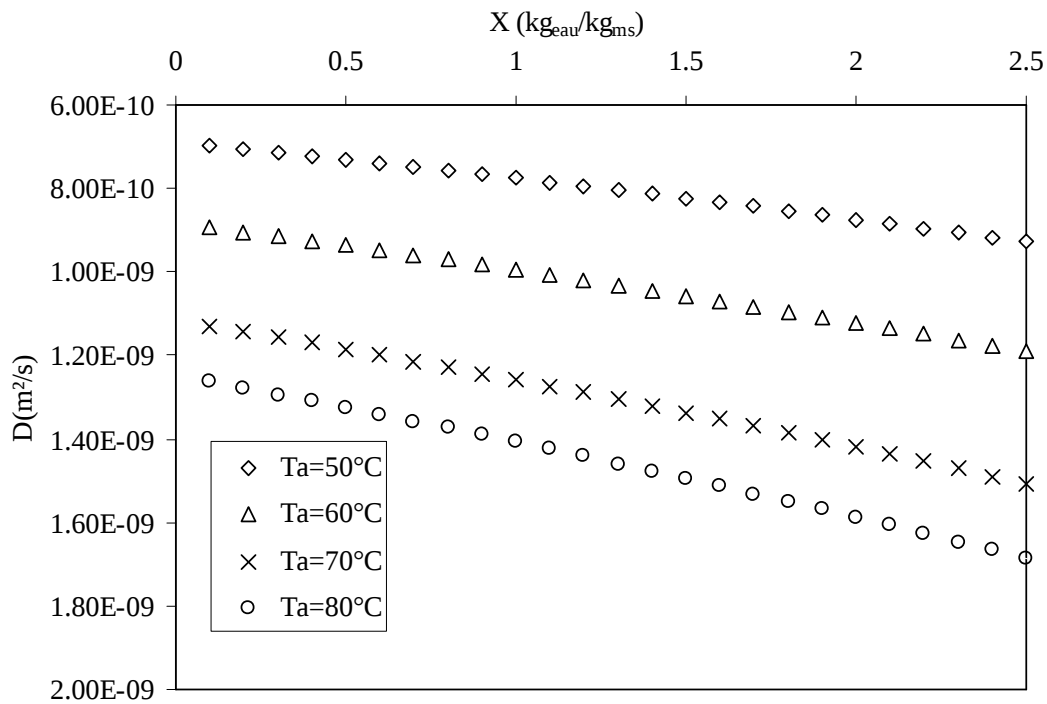


Fig.3.24 Valeurs de la diffusivité obtenue numériquement à cinq températures.

Conclusion

Dans cette étude, le séchage convectif de plusieurs variétés de mangue a été caractérisé. Les cinétiques de séchage de morceaux de mangues de 50° C à 70° C, pour plusieurs conditions opératoires ont été établies expérimentalement et simulées par des modèles empiriques. L'influence des paramètres aérauliques et des caractéristiques intrinsèques du produit, sur les cinétiques de séchage a été analysée. Il ressort de cette étude que:

- La correction des courbes de séchage de la mangue par le taux de contraction surfacique permet dans certains cas de faire apparaître la phase de séchage à vitesse constante.
- L'état de maturité a une influence sur les cinétiques de séchage de la mangue. La mangue mûre sèche plus vite que la mangue verte en début de séchage, et moins vite que celle-ci aux dernières étapes du séchage.
- Les influences de la surface spécifique, de la température, de l'épaisseur et de l'hygrométrie de l'air sur les cinétiques de séchage de la mangue est marquée ;
- Le type de variété a une influence sur les cinétiques; cependant cette influence n'est pas la même suivant que le séchage a lieu soit en convection naturelle, soit en convection forcée.
- L'influence de la vitesse de l'air sur les cinétiques diffère selon que les vitesses sont ou fortes.
- La diffusivité effective varie beaucoup avec la température, une dépendance de type Arrhenius a alors été établie et l'énergie d'activation (E_a) de la mangue a été évaluée à 25.355 kJ/mole.
- La contraction a une très grande influence sur la valeur de la diffusivité. Un modèle empirique de la diffusivité donnant la dépendance simultanée de la température et de la teneur en eau a alors été établi à partir de la résolution de l'équation de Fick avec prise en compte de la contraction.

Cette étude nous a permis de caractériser le comportement de plusieurs variétés de mangue face au séchage convectif. Les résultats obtenus nous ont apporté les ordres de grandeur des vitesses de séchage de la mangue sous diverses conditions opératoires et les lois de diffusivité pour ce fruit. Ces résultats sont d'une importance capitale dans la modélisation du séchage solaire en couche mince présentée au chapitre IV et pourraient être complétés par une loi de dépendance de la diffusivité plus large tenant compte de la teneur en eau initiale et de la maturité du produit.

CHAPITRE 4

CONCEPTION ET MODELISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT

APPLICATION AU SECHAGE DE LA MANGUE

1 Conception du séchoir solaire

Pour répondre au besoin d'un cycle de séchage continu sur les périodes jour-nuit, un séchoir solaire indirect en convection forcée a été conçu. Classique, sa configuration est essentiellement formée d'une unité de production d'énergie : le capteur solaire à air, et d'une unité de séchage.

1.1 Le capteur solaire, unité de production d'énergie

1.1.1 Contribution à la technologie des capteurs plans à air

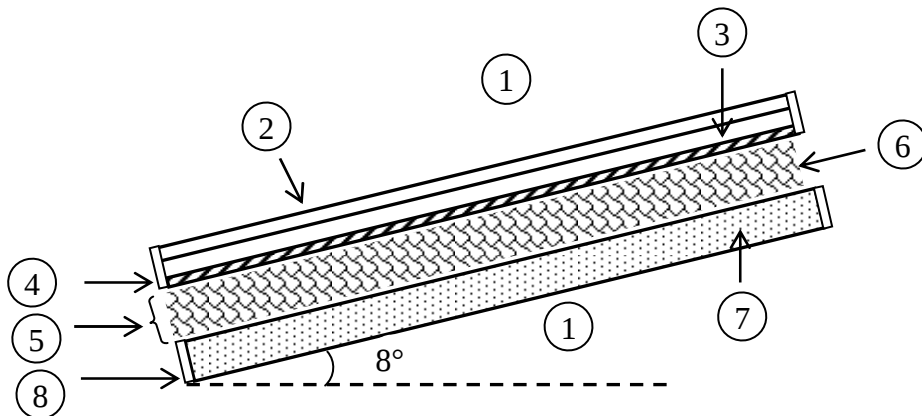
Parmi les capteurs solaires à air, ceux qui utilisent le principe de l'absorbeur poreux présentent, en général, les meilleures performances (Hammou, Brunet, Le Palec & Daguenet, 1988). Cependant, ces capteurs ont des absorbeurs généralement de faibles porosités qui entraînent un faible coefficient d'échange par convection entre l'air et la matrice solide et une faible conduction thermique au sein de la matrice solide. La puissance utile pouvant être transportée par l'air dans le conduit utile est ainsi diminuée. La recherche de l'amélioration des performances thermiques de ce type de capteur nous a conduit à proposer un absorbeur avec une matrice solide constituée de deux matériaux différents (absorbeur composite). En effet, les résultats des travaux de modélisation de Hammou, Brunet, Le Palec & Daguenet (1988) sur les absorbeurs composites ont montré que les absorbeurs poreux de fortes performances sont constitués de deux types de milieux : un milieu de forte porosité placé du côté de l'entrée d'air pour favoriser une haute température et un milieu de faible porosité utilisé pour maintenir une température élevée au système. En se référant à ces travaux, le capteur solaire conçu est basé sur le principe de l'absorbeur composite avec une combinaison des capteurs du type tôle et du type absorbeur poreux. L'avantage de ce couplage réside dans le fait que la surface d'échange

spécifique est élevée (car l'air traverse une partie de l'absorbeur) et permet en même temps de maintenir la température élevée dans l'absorbeur grâce à sa partie supérieure formée par la tôle.

1.1.2 Architecture du capteur solaire

L'unité de production d'énergie est le capteur plan à air soumis au rayonnement solaire constitué (fig.1) :

- D'une vitre en verre clair (1) d'épaisseur 5 mm, transparente dans le visible (0.4 à $0.8\mu\text{m}$) et opaque dans l'infrarouge (1 à $1000\mu\text{m}$),
- D'un absorbeur composite formé par : une tôle noircie (4) d'épaisseur 0.27 mm, placée au dessus d'une matrice poreuse (6) très perméable à l'air d'épaisseur 5 cm. Cette matrice poreuse est formée d'une maille de tampons métalliques en aluminium de porosité 0.9627 et disposés en quinconce.
- D'une lame d'air statique (3) entre la vitre et l'absorbeur, d'épaisseur 3.5 cm .
- D'un conduit d'air rectangulaire (5) de section $85\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ contenant la matrice poreuse absorbante,
- D'un fond isolant (7) formé par une couche de 5 cm de copeaux de bois et 5 cm de laine de verre,
- D'une enveloppe de protection adiabatique, en bois.



Légende : (1) Milieu ambiant avant et arrière, (2) Vitre, (3) Conduit d'air confiné, (4) Tôle absorbante, (5) Conduit d'air utile, (6) Absorbeur poreux, (7) Isolation arrière

Fig. 4.1: Schéma du capteur plan

1.2 L'unité de séchage

Comme présentée sur les figures 4.2 et 4.3, l'unité de séchage est une enceinte en bois de forme parallélépipédique. Sa partie supérieure est surmontée d'une toiture en cône portant à son sommet une cheminée en tube PVC (c) de 12 cm de diamètre et 25 cm de long. Cette cheminée supporte à sa base un extracteur d'air (d) de puissance (12 W) et de débit $1.08 \text{ m}^3/\text{mn}$. La partie inférieure de la cage est munie d'une ouverture (e) de forme rectangulaire de dimension $85 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ pour l'admission de l'air chaud provenant du capteur jusqu'à la chambre de séchage. Les deux grandes faces latérales (y) ont chacune une surface de 1.152 m^2 et les deux petites faces (x) une surface de 0.72 m^2 chacune. L'une des petites faces est munie d'une porte battante de $89 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ pour disposer et retirer les produits. La face inférieure (k) est isolée par 5 cm de laine de verre et 7 cm de copeaux de bois superposés. L'ensemble repose sur un support métallique situé à une hauteur de 80 cm du sol (fig.4.2). Les produits sont disposés à l'intérieur de la cage sur quatre claies rectangulaires de $81 \text{ cm} \times 44 \text{ cm}$ et composé chacune d'un cadre en bois sur lequel est fixé un grillage en nylon pour faciliter le passage d'air. Les claies sont séparées les unes des autres de 20 cm. La plus haute d'entre elles est située à 40 cm de la base de la toiture et la plus basse à 20 cm du fond isolant. Chacune de ces claies a une capacité d'environ 1kg. Il est également prévu un circuit de recyclage d'air (m).

1.3 Fonctionnement du séchoir solaire

- **Dans le capteur (a):** La tôle (4) s'échauffe sous l'effet du rayonnement solaire et émet des rayons infrarouges de grandes longueurs d'onde (figs.4.1 & 4.3) :
 - *Dans la partie supérieure du capteur :* Après réflexion sur cette tôle absorbante, les rayons infrarouges sont piégés par le vitrage (2) qui leur est opaque (fig.4.4),
 - *Dans la partie inférieure :* Renvoyés en direction de l'absorbeur, ces rayons chauffent l'absorbeur poreux (6) et le fond du caisson. L'air traversant la matrice poreuse reçoit alors une portion de cette énergie par échange convectif avec la matrice poreuse et la face interne de la tôle et aussi avec le fond isolant.
- **Dans l'unité de séchage (b) :** L'air chauffé à travers le capteur solaire (a) circule dans la cage de séchage (b) grâce à l'extracteur d'air (d) (figs.4.2 & 4.3). Un transfert de chaleur s'effectue alors de l'air vers le produit, sous l'effet de la différence de température, tandis qu'un transfert d'eau s'effectue du produit vers l'air sous l'effet d'une différence de pression de vapeur d'eau.

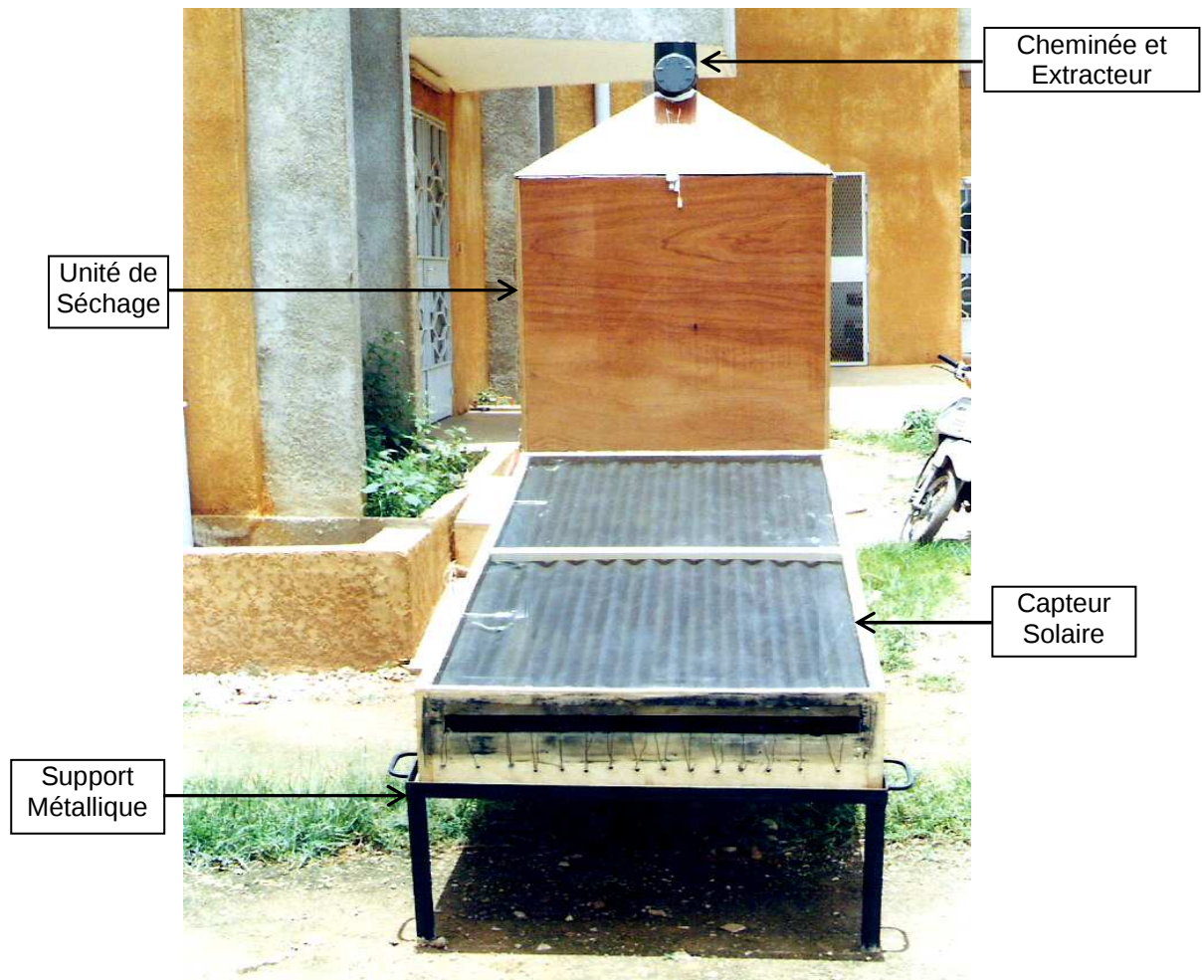


Fig.4.2. Prototype du séchoir solaire indirect en convection forcée construit au LPCE
(Université de Ouagadougou, Burkina Faso)

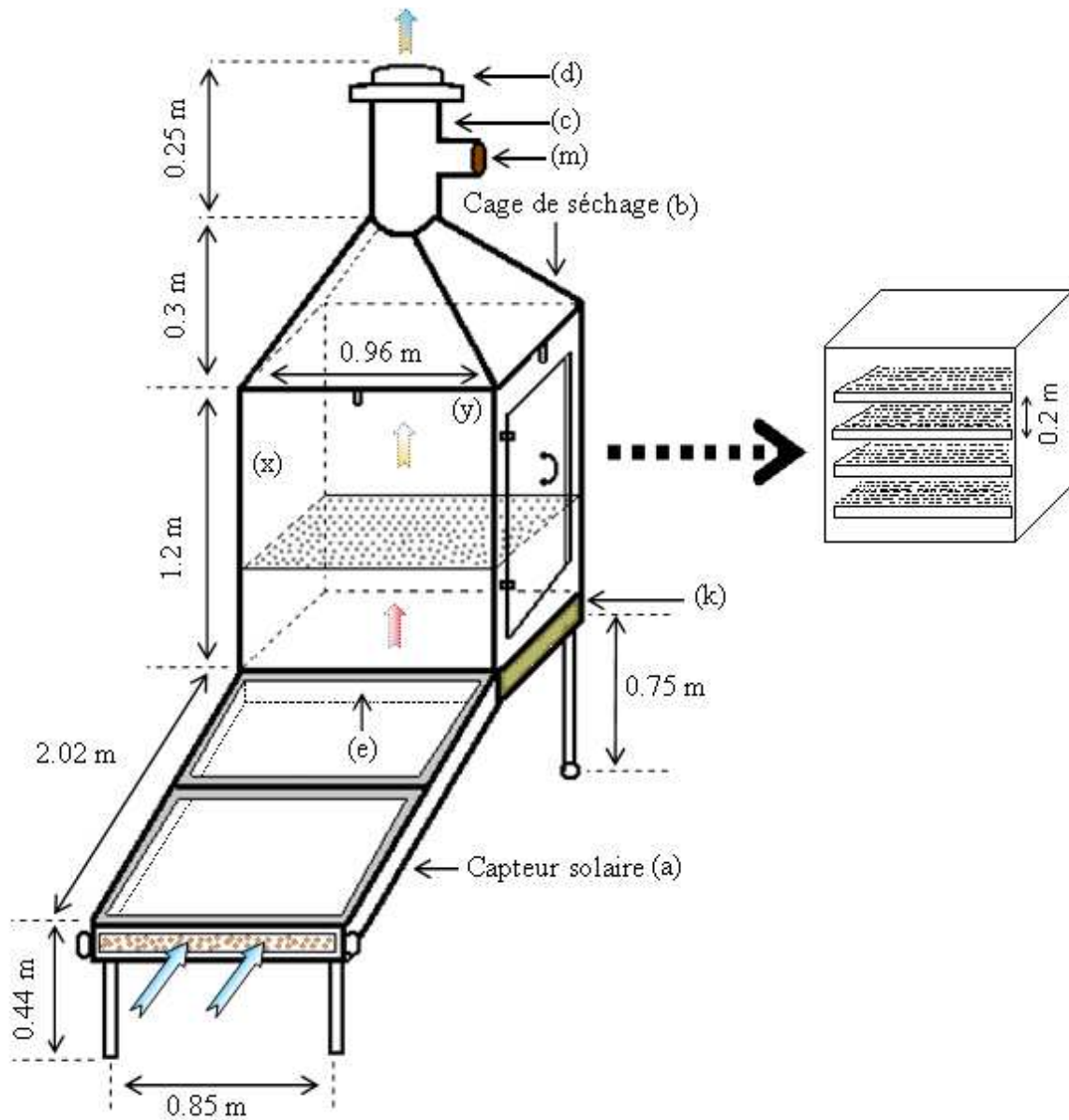


Fig. 4.3 Schéma de principe du séchoir solaire indirect conçu au LPCE (Université de Ouagadougou, Burkina Faso)

2. Matériels et méthodes de caractérisation expérimentale

2.1 Les mangues et la préparation des tranches

Les mangues utilisées pour les opérations de séchage solaire indirect ont été acquises au marché local de fruits *CINKARYAARE* de Ouagadougou (Burkina Faso). Ces mangues étaient des trois principales variétés du fruit (Amélie, Brooks et Kent) disponibles au Burkina Faso. Une fois les mangues apportées au laboratoire, les fruits de bonne qualité ont été choisis, lavés à l'aide d'eau additionnée de quelques gouttes d'eau de javel, rincés à l'eau potable et pelés. Les deux joues sont séparées au couteau puis découpées en tranche d'épaisseur environ 8mm. Les tranches obtenues sont alors uniformément disposées sur quatre claies numérotées de 1 à 4. Les différentes opérations de préparation des tranches sont illustrées par la figure 4.4.

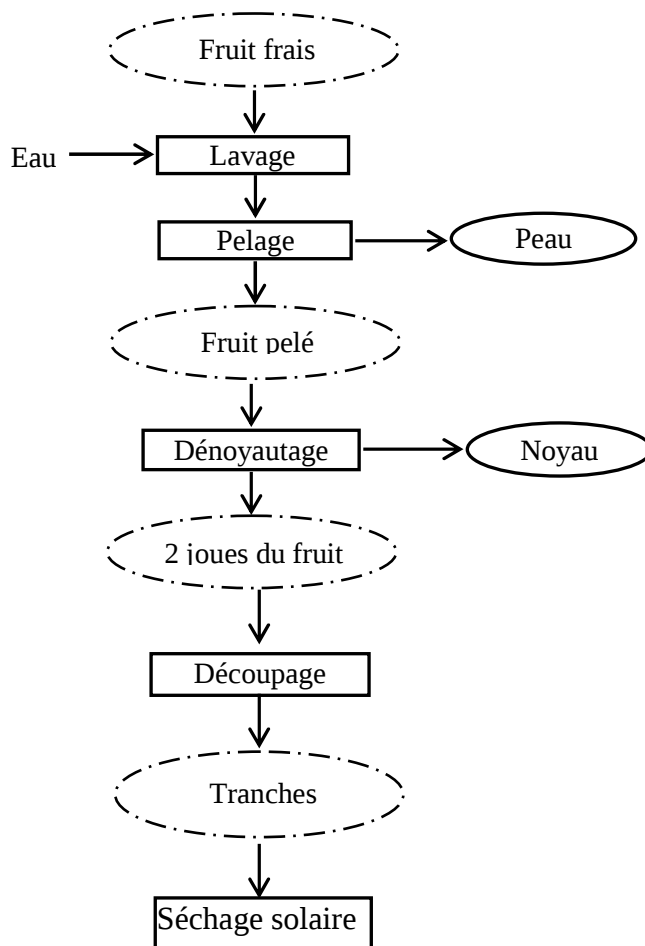


Fig. 4.4: Etapes de préparation des tranches de mangue pour le séchage solaire

2.2 Mesure de température et d'hygrométrie

Les expériences sur le séchage solaire indirect ont été réalisées sur le site du LPCE de l'Université de Ouagadougou au Burkina Faso, situé à la latitude 12° 21' Nord. Les températures ont été relevées à l'aide d'un boîtier de thermocouples de type K lié à la carte d'acquisition d'un ordinateur sur lequel est installé le logiciel d'acquisition de température TESTPOINT Version 3.4. L'humidité relative de l'ambiance et à l'intérieur de la cage de séchage a été évaluée à l'aide d'un thermohygromètre digital à sonde de marque Bioblock (Humidité de 0 à 99%HR, précision +/-3% de 20 à 80%HR +/-4% au-delà ; Température -40 à +70°C, précision +/-0,5°C)

2.3 Mesure de masse

Les pesées ont été effectuées à l'aide d'une balance de marque OHAUS liée à un indicateur de modèle CD11. Cette balance a une capacité maximale réglable de 5 à 20000 kg. Pour nos opérations de séchage, sa capacité maximale a été fixée à 10 kg avec une incertitude absolue de 0.1g. Les quatre claies de la cage numérotées de 1 à 4 ont été pesées avant le début de chaque opération de séchage. Pour le séchage, des tranches de mangue de 8mm d'épaisseur moyenne sont réparties uniformément sur les claies avant d'être disposées dans l'unité de séchage. Chacune des claies portait environ 1kg de pulpe fraîche occupant près de 70% de leur surface totale. Ces claies chargées sont régulièrement retirées et pesées à des intervalles de temps allant de 60 minutes au début du séchage à 120 minutes à la fin du processus. L'influence de la variété et de la position des claies sur les cinétiques de séchage solaire indirect a ainsi été illustrée.

2.4 Détermination de la masse de matière sèche et de la teneur en eau

Pour déterminer la masse de matière sèche du produit à la fin du séchage, un échantillon est extrait sur chaque claie, pesé et placé dans une étuve de marque MEMMERT à 70°C pendant 24h. La valeur de la masse sèche de cet échantillon est ensuite calculée et celle de la quantité de produit séché sur chacune des claies est déduite par extrapolation. La teneur en eau du produit aux différentes étapes du séchage est alors exprimée pour chaque claie en base sèche $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ grâce à la relation 3.35 (Chapitre 3).

3. Modélisation du fonctionnement du capteur solaire à air

3. 1 Les hypothèses de travail

Le système physique à modéliser est un capteur solaire plan à air soumis au rayonnement solaire. Afin de simplifier cette démarche, les hypothèses suivantes ont été formulées :

1. L'écoulement est unidirectionnel et le régime est supposé permanent
2. Les conditions sont homogènes sur une section du capteur perpendiculaire à l'écoulement
3. Les effets de bords sont négligeables
4. Les propriétés physiques des matériaux (bois, tôle-aluminium noircie, verre claire, tampon-aluminium) utilisés sont constantes dans les plages de températures considérées ($30 < T < 110^{\circ}\text{C}$)
5. La conduction dans la vitre est négligeable, sa puissance absorbée est négligeable
6. Cette vitre de température T_1 est assimilée à un corps gris
7. Le ciel est assimilé à un corps noir pour une radiation de longueur d'onde prise à la température de la voûte céleste
8. L'ombrage de la tôle sur une partie du vitrage est négligeable
9. La température ambiante est la même à l'avant et à l'arrière
10. On suppose que la matrice solide de l'absorbeur poreux et l'air caloporteur sont à la même température T_f
11. Les pertes de charge et les effets de viscosité dans le milieu poreux sont négligeables
12. Les effets de la poussière et des saletés sur la vitre sont négligeables
13. La portion de la surface de captation couverte par les bordures du capteur est négligée
14. La vitesse et l'humidité absolue de l'air restent constantes le long du capteur
15. Les propriétés thermophysiques de l'air sont constantes ou dépendent linéairement de la température
16. Le milieu poreux formé par l'air et l'absorbeur poreux est homogène, isotrope et de porosité constante 0.9627

3.2. Définition des variables utilisées dans le modèle

Les variables fondamentales du modèle sont :

1. T_1 : La température de la vitre, en K
2. T_2 : La température de la tôle absorbante, en K
3. T_f : La température de l'air et de l'absorbeur poreux, en K
4. T_3 : La température de la face interne de l'isolation arrière, en K

Ces variables sont fonction des variables fixes qui sont :

1. L'abscisse x dans le sens de l'écoulement d'air le long du capteur et
2. Le temps t

3.3 Bilan thermique du capteur

On peut exprimer le bilan thermique du capteur par l'équation suivante rapportée à l'unité de surface:

$$P_2 = P_u + P_p + P_s \quad (4.1)$$

Où : P_2 est la puissance absorbée par la tôle absorbante en W/m^2 , P_u la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur en W/m^2 , P_p la puissance perdue par le capteur en W/m^2 , P_s la puissance stockée par le capteur en W/m^2 .

La puissance utile Q_u reçue par l'air est alors (Daguenet, 1985, Ekechukwu & Norton, 1999):

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{fs} - T_{fe}) = SP_u \quad (4.2)$$

Où T_{fe} est la température de l'air à l'entrée dans le capteur, T_{fs} la température à la sortie et S la surface de captation.

Il faut donc déterminer la puissance P_u liée aux températures T_{fe} et T_{fs} par :

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{SP_u}{\dot{m}C_p} \quad (4.3)$$

Dans ce cas, la démarche suivie par Hottel, Whillier et Bliss (Daguenet, 1985) suppose que le régime est permanent et que les éléments du capteur se trouvent chacun à une température moyenne constante. Cette approche néglige les effets transitoires, mais constitue un outil commode, surtout pour des calculs de conception.

3.3.1. Analyse des transferts thermiques

On adopte le principe de Hottel, Whillier et Bliss en supposant que le régime est permanent et que les organes de l'insolateur se trouvent chacun à une température moyenne. De l'expression 4.2, il vient :

$$P_u = \frac{\dot{m}C_p}{S} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4.4)$$

Dans cette expression T_{fe} est supposée connue et il faut déterminer T_{fs} pour pouvoir connaître P_u . Pour cela, on résout l'équation de la chaleur relative à l'air et rapportée à l'ensemble du milieu poreux situé dans le conduit utile.

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C_p)_f \vec{v} \text{grad} T_f = \text{div}(\vec{q}) + S_s \quad (4.5)$$

Où : $\vec{q}$ est le flux de conduction dans le conduit utile, S_s l'amplitude volumique de la source de chaleur d'origine solaire récupérée par le conduit utile.

Si ϕ est l'amplitude volumique de la puissance utile reçue par le fluide caloporteur, en régime permanent, l'équation 4.5 devient :

$$(\rho C_p)_f \vec{v} \text{grad} T_f = \phi \quad (4.6)$$

Comme l'écoulement est supposé unidimensionnel dans la direction x le long du capteur, l'équation 4.6 revient à alors à :

$$(\rho C_p)_f v \frac{\partial T_f}{\partial t} = \phi \quad (4.7)$$

Pour pouvoir résoudre cette équation, il faut au préalable déterminer ϕ donnée par :

$$\phi = \frac{1}{e_{23}} (P_2 - P_p) \text{ et} \quad q_u = S_2 \phi = l P_u \quad (4.8)$$

Où : S_2 la est section droite du conduit utile, e_{23} l'épaisseur du conduit utile, l la largeur du conduit utile et q_u la puissance utile récupérée par unité de longueur du capteur.

La détermination de ϕ passe alors par le calcul de P_2 et P_p . D'autre part, q_u peut être calculée en supposant l'existence d'un coefficient global d'échange thermique h_2 entre la tôle absorbante, à la température T_2 , et le milieu poreux à la température moyenne T_{fm} par :

$$q_u = h_2 l (T_2 - T_{fm}) \quad (4.9)$$

où T_{fm} est la température moyenne de l'air et de l'absorbeur poreux

3.3.2. Calcul de P_2

Soit une puissance incidente I_0 , supposée inclinée d'un angle θ tombant sur 1m^2 de capteur. La partie poreuse de l'absorbeur n'étant pas exposée au rayonnement, le coefficient d'extinction β est très élevé et la contribution due à la pénétration du rayonnement donnée par

$$\frac{dQ_{rb1}}{dx} = -\tau_v \beta I_0 e^{-\beta x} \quad (4.10)$$

tend vers zéro;

Où I_0 est le flux incident, τ_v le coefficient de transmission de la vitre et x l'épaisseur de pénétration du rayonnement au sein de la matrice solide de l'absorbeur.

Toute la fraction du rayonnement susceptible d'être récupérée par l'absorbeur est donc absorbée à la surface de la tôle. La puissance incidente I_0 présente alors une composante directe I_{Di} et une composante diffuse I_{di} c'est-à-dire :

$$I_0 = I_{Di} + I_{di} \quad (4.11)$$

La puissance transmise à travers le vitrage est :

$$I_i = I_{Di} \tau_D + I_{di} \tau_d \quad (4.12)$$

Où : τ_D désigne la transmittivité totale directionnelle relativement au rayonnement direct et τ_d la transmittivité totale hémisphérique en liaison avec le rayonnement diffus.

L'absorbeur capte la fraction α de cette puissance transmise et réfléchit vers le vitrage la fraction $1-\alpha$. Si ρ_d est la réflectivité hémisphérique du vitrage, celui-ci réfléchit vers l'absorbeur la fraction $(1-\alpha)\rho_d$. Ce dernier absorbe à nouveau la fraction $\alpha(1-\alpha)\rho_d$ et réfléchit vers le vitrage la fraction $(1-\alpha)^2\rho_d$. La fraction $(1-\alpha)^2\rho_d^2$ est, à nouveau, réfléchie vers l'absorbeur et ainsi de suite. Au bout de n réflexions sur le vitrage, la fraction réfléchie vers l'absorbeur est $(1-\alpha)^n\rho_d^n$ de sorte qu'après une infinité de réflexions, la puissance absorbée par l'absorbeur soit :

$$P_2 = [\alpha + \alpha(1-\alpha)\rho_d + \dots + \alpha(1-\alpha)^n\rho_d^n] I_i = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha(1-\alpha)^n \rho_d^n I_i \quad (4.13)$$

soit :

$$P_2 = \frac{\alpha I_i}{1 - (1-\alpha)\rho_d} = \frac{\alpha(I_{Di}\tau_D + I_{di}\tau_d)}{1 - (1-\alpha)\rho_d} \quad (4.14)$$

Le rendement optique du capteur défini par : $\eta_0 = \frac{P_2}{I_0}$ et encore appelé

"Transmissibilité- absorptivité effective" du capteur est alors donné par :

$$\eta_0 = (\tau\alpha) = \frac{\alpha(I_{Di}\tau_D + I_{di}\tau_d)}{[1 - (1 - \alpha)\rho_d][I_{Di} + I_{di}]} \quad (4.15)$$

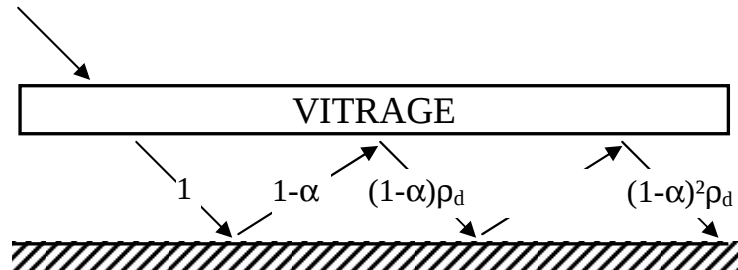


Fig.4.5: Absorption du rayonnement solaire par la surface de la tôle.

Le calcul des coefficients τ_D, τ_d, ρ_D et ρ_d donne les résultats présentés dans le tableau 4.1.

τ_D	τ_d	ρ_D	ρ_d
0.9169	0.7617	0.0434	0.1461

Tableau 4.1 Valeurs des coefficients de transmissivité et de réflexivité

L'expression analytique de la puissance P_2 absorbée par unité de surface absorbante est alors donnée par :

$$P_2 = 0.8854I_{Di} + 0.7355I_{di} \quad (4.16)$$

3.3.3. Calcul des pertes P_p

Pour calculer les pertes thermiques de l'absorbeur, il est commode d'utiliser les analogies qui existent entre les transferts de chaleur et d'électricité.

La figure 4.6 schématise les transferts thermiques qui interviennent dans le capteur décrit sur la figure 4.1 et la figure 4.3 présente le schéma électrique relatif à une section en supposant que :

- Les températures T_3 et T_f sont confondues et
- Les pertes entre la face externe de l'isolant et l'air extérieur sont négligeables.

Ces hypothèses supplémentaires permettent d'exprimer les pertes globales de l'absorbeur P_p à l'aide d'un coefficient de pertes U_L dont l'inverse n'est rien d'autre que la résistance aux transferts thermiques entre les potentiels T_2 et T_a :

$$P_p = U_L (T_2 - T_a) \quad (4.17.a)$$

ou encore :

$$P_p = P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} \quad (4.17.b)$$

Où P_{p1} , P_{p2} et P_{p3} sont respectivement les pertes à l'avant, à l'arrière et latérales du capteur.

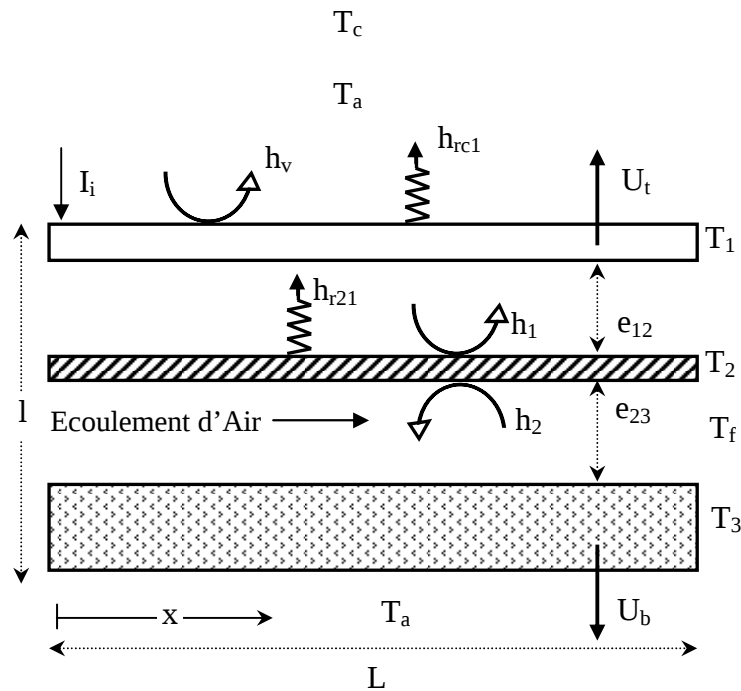


Fig. 4.6: Représentation schématique simplifiée des transferts thermiques dans le capteur.

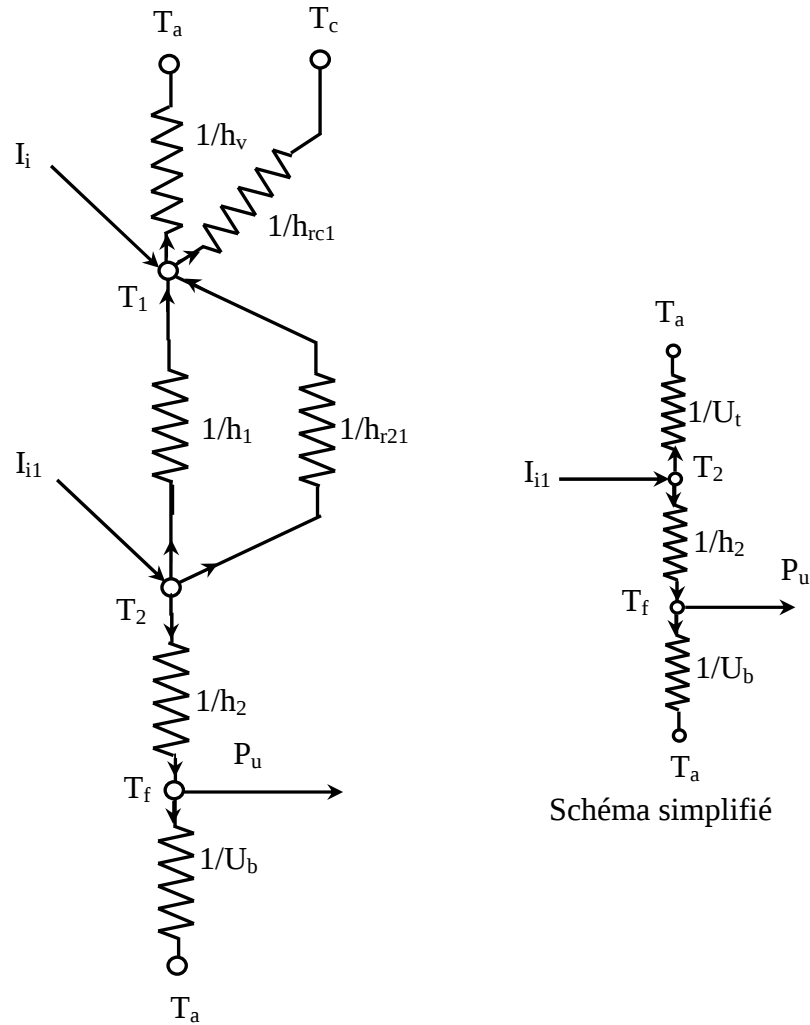


Fig. 4.7 : Schéma électrique relatif à une section de capteur

Légende des figures 4.6 et 4.7

 Convection
  Conduction
  Rayonnement

1: Vitre, 2: Tôle absorbante, 3: Isolation arrière, a: Milieu ambiant, c: Ciel

f: Milieu poreux (Air + Absorbant poreux), r: Rayonnement, h_v : Coefficient d'échange par convection entre la vitre et le vent (W/m^2K), h_1 : Coefficient d'échange par convection entre la vitre et la tôle absorbante (W/m^2K), h_2 : Coefficient global d'échange thermique entre le milieu poreux et la tôle (W/m^2K), U_t : Coefficient global de perte à l'avant (W/m^2K), U_b : Coefficient global de perte à l'arrière (W/m^2K), e_1 : Epaisseur de la couche d'air confinée (m), e_1 : Epaisseur de l'absorbant poreux et du conduit utile (m), L : Longueur du capteur (m), l : largeur du capteur (m).

3.3.3.1 Pertes à l'avant

Pour l'essentiel, ces pertes résultent des échanges par convection et par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre d'une part et entre la vitre et le milieu ambiant d'autre part.

$$P_{p1} = U_t (T_2 - T_a) \quad (4.18.a)$$

U_t est le coefficient global de pertes à l'avant donné par :

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{H_{21}} + \frac{1}{H_{1a}}} \quad (4.18.b)$$

Où : H_{21} : Coefficient global d'échange thermique entre l'absorbeur et la vitre

H_{1a} : Coefficient global d'échange thermique entre la vitre et le milieu ambiant

- *Calcul de H_{21}*

Le flux échangé entre l'absorbeur et la vitre est : $P_{21} = H_{21} (T_2 - T_1)$ (4.19)

Or :

$$P_{21} = h_1 (T_2 - T_1) + \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = [h_1 + \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}] [T_2 - T_1] \quad (4.20)$$

Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur est :

$$h_{r21} = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.21)$$

d'où :

$$P_{21} = (h_1 + h_{r21})(T_2 - T_1) \quad (4.22)$$

$$\text{On a alors: } H_{21} = H_1 + h_{r21} \quad (4.23)$$

Avec : ε_1 Emissivité de la vitre

ε_2 Emissivité de l'absorbeur

- *Calcul de H_{1a}*

Le flux échangé entre la vitre et le milieu ambiant est :

$$P_{1a} = h_v(T_1 - T_a) + \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_c^4) = [h_v + \varepsilon_1 \sigma (T_1^2 + T_c^2) \left(\frac{T_1^2 - T_c^2}{T_1 - T_a} \right)] [T_1 - T_a] \quad (4.24)$$

Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste est :

$$h_{r1c} = \varepsilon_1 \sigma (T_1^2 + T_c^2) (T_1 + T_c) \quad (4.25)$$

$$\text{d'où : } P_{1a} = (h_v + h_{r1c} \frac{T_1 - T_c}{T_1 - T_a}) (T_1 - T_a) \quad (4.26)$$

$$\text{On a alors : } H_{1a} = h_v + h_{r1c} \frac{T_1 - T_c}{T_1 - T_a} = h_v + h'_{r1c} \quad (4.27)$$

$$\text{Avec : } h'_{r1c} = h_{r1c} \frac{T_1 - T_c}{T_1 - T_a}$$

Le coefficient global de perte à l'avant est alors :

$$U_t = \left[\frac{1}{h_1 + h_{r21}} + \frac{1}{h_v + h'_{r1c}} \right]^{-1} \quad (4.28)$$

Cette expression de U_t prend en compte la température de la vitre qui, a priori, est inconnue en plus de la température de la tôle absorbante. En vue de faciliter les calculs de simulation, nous utiliserons la formule empirique de Klein (Daguenet, 1985) qui exprime le coefficient global des pertes U_t en fonction de la température de l'absorbeur, indépendamment de celle de la vitre.

$$U_t = \left[\frac{N}{\left(\frac{c}{T_2} \right) \left(\frac{T_2 - T_a}{N + f} \right)^{0.31}} + \frac{1}{h_v} \right]^{-1} + \frac{\sigma (T_2 + T_a) (T_2^2 + T_a^2)}{[\varepsilon_2 + 0.0425N(1 - \varepsilon_2)]^{-1} + \left[\frac{(2N + f - 1)}{\varepsilon_1} \right] - N} \quad (4.29)$$

Où : N Nombre de vitre (N=1 dans notre cas)

f Facteur correctif tenant compte de l'effet du vent :

$$f = (1 - 0.04h_v + 5.10^{-4}h_v)(1 + 0.091N)$$

- c Facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison du capteur sur les coefficients de convection dans les conduits non utiles (Daguenet, 1985):
 $c=365.9(1-0.00883\chi+0.00012\chi^2)$; avec χ en degrés.

La formule 4.29 est valable (avec une erreur de $\pm 0.2 \text{ W/m}^2\text{°C}$) dans les conditions suivantes :

$$47^\circ\text{C} < T_2 < 147^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad -13^\circ\text{C} < T_a < 37^\circ\text{C}$$

$$0.1 < \varepsilon_1 < 0.95 ; \quad 1 < N < 3 ; \quad 0 < \chi < 90^\circ \quad \text{et} \quad v < 10 \text{ m/s}$$

Ces conditions sont réunies dans notre cas ; ce qui nous autorise à l'utiliser.

3.3.3.2 Les pertes à l'arrière

Ces pertes sont essentiellement liées au flux conductif au sein de l'isolation arrière et latérale. Le flux échangé entre l'absorbeur et la face arrière du capteur est :

$$P_{2a} = \frac{T_2 - T_a}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{U_b}} \quad (4.30)$$

Où h_2 : Coefficient global d'échange entre l'absorbeur et le fluide caloporteur

U_b : Coefficient global des pertes à l'arrière

Les échanges entre l'absorbeur et le fluide caloporteur sont très grands devant les déperditions thermiques à travers l'isolation arrière d'où :

$$h_2 \gg U_b \text{ et } 1/h_2 \ll 1/U_b$$

On en déduit que:

$$P_{p_2} = P_{2a} = \frac{T_2 - T_a}{\frac{1}{U_b}}$$

soit :

$$P_{p_2} = U_b(T_2 - T_a) \quad (4.31)$$

Rappelons que l'isolation arrière est formée par :

- Une couche de laine de verre d'épaisseur $e=5 \text{ cm}$ et de conductivité thermique $\lambda=0.04 \text{ W/(m.K)}$ et
- Une couche de copeaux de bois d'épaisseur $e'=5 \text{ cm}$ et de conductivité thermique $\lambda'=0.059 \text{ W/m.K}$.

En tenant compte des échanges convectifs entre la partie inférieure du capteur et l'air extérieur, la résistance équivalente aux transferts thermiques à travers la face arrière est donnée par :

$$\frac{1}{U_b S} = \frac{e}{\lambda S} + \frac{e'}{\lambda' S} + \frac{1}{h_v S} \text{ soit } \frac{1}{U_b} = \frac{e}{\lambda} + \frac{e'}{\lambda'} + \frac{1}{h_v} \quad (4.32)$$

3.3.3.3. Les pertes latérales

L'isolation latérales est formée par une couche $e'' = 3$ cm de bois. Les pertes latérales sont alors données par :

$$P_{p3} = \frac{T_2 - T_a}{e'' / \lambda''} \quad (4.33)$$

Où λ'' la conductivité thermique du bois

On déduit le coefficient des pertes latérales par :

$$U_s = \frac{\lambda''}{e''} \quad (4.34)$$

Finalement :

$$U_L = U_t + U_b + U_s \text{ et } P_p = U_L (T_2 - T_a) \quad (4.35)$$

3.3.4. Calcul de la température de la vitre

Si la puissance absorbée par la vitre est négligée, le flux thermique des pertes de l'absorbeur vers la vitre est égal au flux des pertes de l'absorbeur vers le milieu ambiant avant.

$$U_t (T_2 - T_a) = (h_1 + h_{r21}) (T_2 - T_1) \text{ d'où :}$$

$$T_1 = T_2 - \frac{U_t (T_2 - T_a)}{h_1 + h_{r21}} \quad (4.36)$$

3.3.5. Calcul des puissances utiles ϕ , P_u et q_u

La puissance utile volumique est immédiatement obtenue par :

$$\phi = \frac{1}{e_{23}}(P_2 - P_p) = \frac{1}{e_{23}}[P_2 - U_L(T_2 - T_a)] \quad (4.37)$$

d'où :

$$P_u = e_{23}\phi = P_2 - U_L(T_2 - T_a) \quad (4.38)$$

Si l désigne la largeur du capteur, la puissance utile captée par unité de longueur du capteur est alors :

$$q_u = lP_u = l[P_2 - U_L(T_2 - T_a)] \quad (4.39)$$

La puissance P_u peut être calculée autrement, en considérant la puissance transmise au fluide caloporteur par l'absorbeur à travers la résistance globale $1/h_2$.

$$P_u = \frac{T_2 - T_{fm}}{\frac{1}{h_2}} = h_2(T_2 - T_{fm}) \quad (4.40)$$

En éliminant T_2 entre les expressions (4.38) et (4.39), on a :

$$P_u = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{U_L}}[P_2 - U_L(T_{fm} - T_a)]$$

soit :

$$P_u = F'[P_2 - U_L(T_{fm} - T_a)] \quad (4.41)$$

avec :

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{U_L}} = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_0}} \quad (4.42)$$

$$\text{où : } \frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_2} + \frac{1}{U_L}$$

U_0 est le coefficient d'échange thermique entre le fluide et l'air extérieur.

F' l'efficacité du capteur correspondant au rapport de la puissance utile à la puissance récupérée par le capteur.

On a alors :

$$Q_u = Lq_u = SP_u = SF'[P_2 - U_L(T_{fm} - T_a)] \quad (4.43.a)$$

Ou encore :

$$Q_u = SF'[(\tau\alpha)I_i - U_L(T_{fm} - T_a)] \quad (4.43.b)$$

3.3.6. La distribution de température le long de la direction de l'écoulement

Il faut résoudre l'équation 4.7: $(\rho C_p)_f v \frac{\partial T_f}{\partial x} = \phi$

Si $\dot{m} = \rho S v$ est le débit massique du fluide caloporteur, en multipliant cette relation par la section de la conduite utile, on obtient l'équation :

$$\dot{m} C_p \frac{\partial T_f}{\partial x} = q_u = l F' [P_2 - U_L (T_f - T_a)] \quad (4.44)$$

En supposant que F' et U_L sont indépendant de x , la solution définitive de cette équation s'écrit sous la forme :

$$\frac{T_f(x) - T_a - \frac{P_2}{U_L}}{T_{fe} - T_a - \frac{P_2}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L l F' x}{\dot{m} C_p}\right) \quad (4.45)$$

La température T_s du fluide caloporteur à la sortie du capteur de longueur L est alors donnée par :

$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{P_2}{U_L}}{T_{fe} - T_a - \frac{P_2}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L F' l L}{\dot{m} C_p}\right) = \exp\left(-\frac{U_L F'}{G C_p}\right) \quad (4.46)$$

$G = \frac{\dot{m}}{S}$ est le débit massique par m^2 de capteur

3.3.7. Calcul de P_u et Q_u en utilisant la distribution de température

La puissance P_u reçue par le fluide caloporteur par m^2 de capteur est :

$$P_u = \frac{\dot{m} C_p}{S} (T_{fs} - T_{fe}) = G C_p (T_{fs} - T_{fe})$$

L'élévation de sa température pendant la traversée du capteur est donnée par :

$$T_{fs} - T_{fe} = T_a + \frac{P_2}{U_L} + (T_{fe} - T_a - \frac{P_2}{U_L}) \exp(-\frac{U_L F'}{GC_p}) - T_{fe}$$

Soit :

$$T_{fs} - T_{fe} = \frac{1}{U_L} [P_2 - U_L (T_{fe} - T_a)] [1 - \exp(-\frac{U_L F'}{GC_p})]$$

La puissance utile est alors :

$$P_u = \frac{GC_p}{U_L} [1 - \exp(-\frac{U_L F'}{GC_p})] [P_2 - U_L (T_{fe} - T_a)]$$

Soit :

$$P_u = F_R [P_2 - U_L (T_{fe} - T_a)] \quad (4.47)$$

Où : $F_R = \frac{GC_p}{U_L} [1 - \exp(-\frac{U_L F'}{GC_p})]$ est le coefficient de correction thermique

$$\text{En réintroduisant la surface totale } S \text{ du capteur on a : } F_R = \frac{\dot{m}C_p}{SU_L} [1 - \exp(-\frac{U_L F'}{\frac{\dot{m}}{S} C_p})] \quad (4.48.a)$$

Soit :

$$F_R = \frac{1 - \exp(-F' \beta)}{\beta} \quad (4.48.b)$$

$$\text{Avec : } \beta = \frac{SU_L}{\dot{m}C_p}$$

La puissance utile totale Q_u transférée au fluide caloporteur est alors :

$$Q_u = SP_u = SF_R [P_2 - U_L (T_{fe} - T_a)] \quad (4.49)$$

3.4 Rendement du capteur

Le rendement du capteur se définit comme le rapport de sa puissance utile, à tout instant de son fonctionnement, par la puissance incidente tombant sur sa surface absorbante pendant le même instant.

$$\eta = \frac{Q_u}{SI_i} \quad (4.50)$$

- En utilisant l'équation 4.43.b, il vient que :

$$\eta = \frac{SF'[(\tau\alpha)I_i - U_L(T_{fm} - T_a)]}{SI_i} \text{ c'est-à-dire :}$$

$$\eta = F'[(\tau\alpha) - U_L \frac{T_{fm} - T_a}{I_i}] \quad (4.51)$$

Le terme $\eta_1 = F'(\tau\alpha)$ représente le rendement maximum du capteur correspondant au facteur de conversion énergétique. L'équation (4.51) montre que théoriquement le rendement décroît linéairement avec le terme $\frac{T_{fm} - T_a}{I_i}$ si les coefficients F' , $(\tau\alpha)$ et U_L restent constants.

- En utilisant l'expression (4.49) ; le rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{SF_R[(\tau\alpha)I_i - U_L(T_{fe} - T_a)]}{SI_i} \text{ soit :}$$

$$\eta = F_R[(\tau\alpha) - U_L \frac{T_{fe} - T_a}{I_i}] \quad (4.52)$$

Les équations (4.51) et (4.52) montrent explicitement que le rendement du capteur croît avec le rendement optique $(\tau\alpha)$ et la puissance incidente I_i , et décroît avec le coefficient global des pertes U_L . Ceci confirme bien que les performances thermiques du capteur sont améliorées en minimisant à la fois les pertes optiques (par utilisation d'une couverture transparente appropriée) et les déperditions thermiques à travers les faces avant, arrière et latérales.

- En exprimant le rapport des équations (4.51) et (4.52) on a :

$$\frac{F'[P_2 - U_L(T_{fm} - T_a)]}{F_R[P_2 - U_L(T_{fe} - T_a)]} = 1 \quad (4.53)$$

En introduisant la température T_{fe} au terme du numérateur de l'équation (4.53) on a :

$$\frac{F'}{F_R} \left[1 - \frac{U_L(T_{fm} - T_{fe})}{P_u / F_R} \right] = 1 \text{ soit :}$$

$$\frac{U_L(T_{fm} - T_{fe})}{P_u / F_R} = 1 - \frac{F_R}{F'} \quad (4.54)$$

On peut alors en déduire la température moyenne du fluide par :

$$T_{fm} = T_{fe} + \frac{P_u}{F_R U_L} \left(1 - \frac{F_R}{F'} \right) \quad (4.55)$$

3.5 Résolution numérique du Fonctionnement du Capteur

Les températures moyennes des différents organes du capteur varient en fonction de l'heure de la journée. Aussi, au cours de la traversée du capteur, les températures de l'air évoluent en fonction de l'élongation x et du temps t . Il convient donc de découper le capteur en j tranches fictives, dans le sens de l'écoulement. Les températures dans chaque tranche étant considérées uniformes. Une démarche itérative est nécessaire pour déterminer la puissance utile car les coefficients de transfert de chaleur dépendent des températures des différents organes du capteur, elles mêmes inconnues. La simulation du fonctionnement détermine théoriquement pendant une période donnée:

- La température moyenne de la vitre
- La température moyenne de la tôle
- La température de l'air à la sortie du capteur
- La distribution de température de l'air dans le sens de l'écoulement
- La puissance utile du capteur
- Les caractéristiques F' , F_R et U_L du capteur.

L'algorithme de calcul considérant que le capteur est suffisamment long et large pour pouvoir négliger "les effets d'entrée" de l'air dans le capteur est donnée par :

1. La fixation des données de base :

- Les dimensions des organes du capteur (longueur, largeur, épaisseur, diamètre hydraulique, surface de captation, angle d'inclinaison)
- Les caractéristiques des organes (conductivité thermique, masse volumique, chaleur spécifique, réflexivité, émissivité, transmissivité, absorptivité)
- Les caractéristiques du fluide caloporteur : vitesse moyenne, débit massique, masse volumique, conductivité thermique, nombre de Reynolds moyen, chaleur spécifique, viscosité cinématique)
- Les données météorologiques (T_a , I_{Di} , I_{di} , I_i).

2. L'entrée de valeurs arbitraires : On donne des valeurs arbitraires :

- A la température moyenne T_{fm} du fluide dans le capteur
- A la température moyenne T_2 de l'absorbeur

3. Le calcul du coefficient global moyen de transfert h_2 entre la tôle absorbante et le milieu poreux. On utilise les résultats de l'annexe IV-2
4. Le Calcul des pertes thermiques $S.P_{p1}$ à travers la face avant du capteur à l'aide de la relation 4.17.a et de la corrélation 4.29 de Klein
5. Le calcul des pertes thermiques $S.P_{p2}$ de la face arrière du capteur. On utilise les Expressions 4.31 et 4.32
6. Le calcul des pertes latérales à l'aide des formules 4.33 et 4.34
7. Le Calcul du coefficient global des pertes. On utilise alors l'expression :

$$U_L = \frac{SP_{p1} + SP_{p2} + S_L P_{p3}}{S(T_2 - T_a)}$$

8. Le calcul de l'efficacité F' à l'aide de la relation 4.42
9. Le calcul du facteur de forme F_R . On utilise la relation 4.48.a
10. Le calcul des puissances utiles P_u et Q_u à l'aide des relations 4.16, 4.38 et 4.39
11. Le calcul à nouveau de la température moyenne du fluide T_{fm} à l'aide de la relation 4.55 de Klein
12. Le calcul à nouveau de la température moyenne de la tôle absorbante T_2 à l'aide de la relation $T_2 = T_{fm} + \frac{P_u}{h_{2m}}$
13. La comparaison entre les valeurs calculées de T_2 et de T_{fm} et les valeurs initiales. Si l'écart est trop important, on réitère à partir de la séquence 3. Sinon on poursuit la compilation

14. Le calcul et la représentation de la distribution de température le long de l'écoulement d'air et le calcul de la valeur de cette température à la sortie du capteur
15. Le calcul du rendement du capteur à l'aide des relations 4.50 ou 4.51 ou encore 4.52
16. Le Calcul de coefficients d'échange h_{r1c} et h_1 respectivement à l'aide des relations 4.25 et l'annexe IV-2
17. Le Calcul de la température de la vitre à l'aide de la relation 4.36
18. L'Affichage de : U_L , F' , F_R , P_u , Q_u , T_{fm} , T_2 , T_1 , T_{fs} et η .

4. Modélisation du séchage en couche mince de la mangue

4.1 Hypothèses de base

Pour modéliser le fonctionnement du séchoir, on admet les hypothèses simplificatrices suivantes :

1. Le séchoir est découpé dans le sens de l'écoulement d'air en tranches fictives d'épaisseurs Δx à l'intérieur desquelles les températures et les humidités sont invariables
2. Les grandeurs physiques varient " pas par pas " d'une claie à l'autre et dans chacune d'elle, les échanges se font avec l'air pris dans les conditions de sortie de la claie précédente
3. L'air humide est considéré comme un mélange de vapeur d'eau et d'air sec et se comporte ainsi que ses composantes comme des gaz parfaits
4. Les transferts sont unidirectionnels
5. Les pertes de charges de l'air à l'entrée de la cage sont négligées. Le débit d'air est alors supposé constant
6. Les pertes thermiques à l'arrière dans le cas du séchage solaire sont négligées
7. Le séchage solaire est isenthalpique et son évolution peut être décrite par un diagramme Psychrométrique.

4.2 Détermination des variables du modèle

En se basant sur les hypothèses émises ci-dessus, le modèle a comme variables dépendant :

1. T : La température des tranches de mangue, en K ou °C
2. T_a : La température de l'air séchant, en K ou °C
3. C_v : La fraction massique de la vapeur d'eau dans l'air, en $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air}}$
4. C_i : La fraction massique de la vapeur d'eau dans le produit, en $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{produit}}$
5. T_{pi} : La température de la paroi interne de la cage de séchage, en K ou °C
6. T_{pe} : La température de la paroi externe de la cage de séchage, en K ou °C.

Ces variables évoluent en fonction des variables fixes qui sont :

1. Le temps t , en seconde
2. L'abscisse x dans le sens de l'écoulement d'air à travers le lit de séchage.

4.3 Bilan des transferts thermiques

On établit le bilan des transferts à partir du schéma électrique équivalent du système, en écrivant les équations de conservation des flux massiques et thermiques aux différents nœuds du système.

4.3.1 Schéma électrique équivalent

En analysant les transferts thermiques au sein d'une tranche du séchoir (figure 4.8), on peut représenter sur la figure 4.9 le réseau électrique équivalent en utilisant les analogies suivantes :

Densité de flux	$\longleftrightarrow$	Intensité du courant électrique
Température	$\longleftrightarrow$	Potentiel électrique
Coefficient de transfert thermique	$\longleftrightarrow$	Conductance
Capacité thermique	$\longleftrightarrow$	Capacité thermique

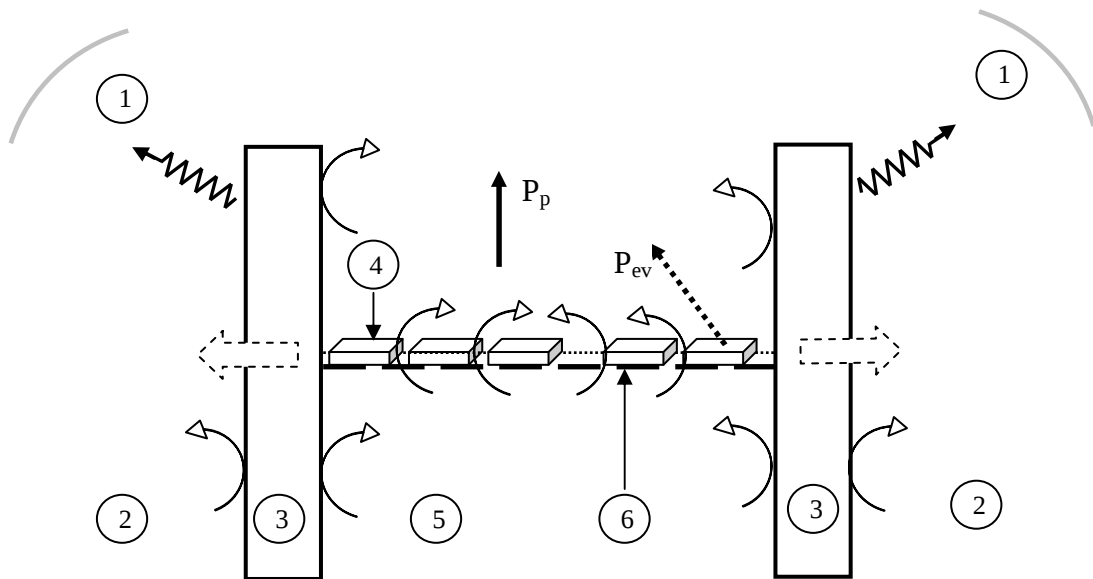


Fig. 4.8 : Echanges thermiques dans une tranche de séchoir

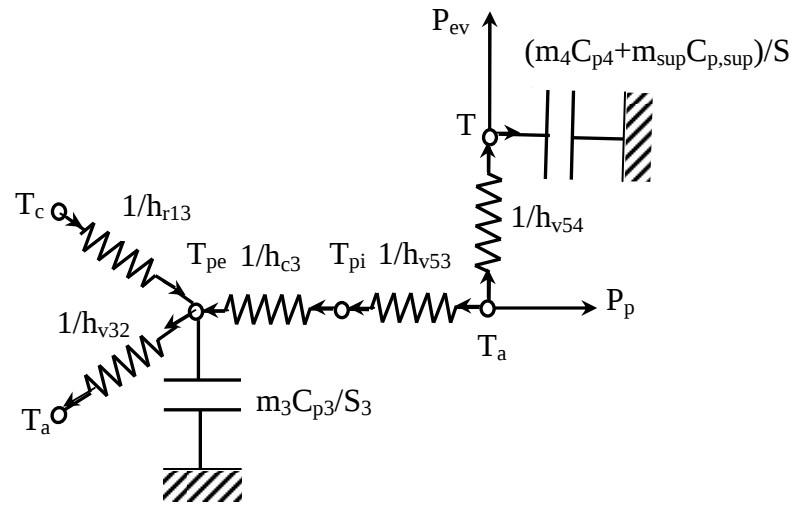


Fig. 4.9 : Schéma électrique relatif à une tranche de séchoir

Légende des figures 4.8 et 4.9

- | | |
|--------------------|---|
| ① Voûte céleste | → Puissance cédée par l'air |
| ② Milieu ambiant |→ Puissance perdue par évaporation |
| ③ Paroi | ↪ Echange par convection |
| ④ Produit | ⋯⋯⋯↪ Echange par conduction |
| ⑤ Milieu asséchant | ⋈→ Echange par rayonnement |
| ⑥ Claie | |

T_c : Température de la voûte céleste

T_{amb} : Température de l'air ambiant

T_{pe} : Température de la paroi externe

T_{pi} : Température de la paroi interne

T_a : Température de l'air

T : Température du produit

h_{v54} : Coefficient de transfert de chaleur entre l'air et les produits

h_{v53} : Coefficient de transfert de chaleur entre l'air et la paroi interne

h_{c3} : Coefficient de transfert de chaleur par conduction dans les parois du séchoir

h_{v32} : Coefficient de transfert de chaleur entre la paroi externe du séchoir et l'air extérieur, dû à l'influence du vent.

h_{r13} : Coefficient d'échange par rayonnement entre la paroi externe et la voûte céleste et le sol.

m_3 :moitié de la masse des parois dans la tranche j

C_{p3} :capacité calorifique massique des parois

S_3 :Surface des parois du séchoir dans la tranche

m_4 :masse des produits

C_{p4} :Capacité calorifique massique des produits

m_{sup} : masse du support des produits

$C_{p,sup}$: Capacité calorifique du support

S_4 : Surface d'échange fruits-air pour une claie

P_p :Puissance perdue par l'air dans la tranche j

P_{ev} :Puissance évaporatoire

C_v :Fraction massique de la vapeur d'eau dans l'air

C_i :Fraction massique de la vapeur d'eau dans le produit

L_v :Chaleur latente de vaporisation de l'eau

$\dot{m}_a$: Débit d'air

Sur le réseau de la figure 4.8, chaque milieu est symbolisé par sa température et on représente les résistances, les capacités thermiques, le flux de chaleur dû à l'évaporation perdu par le produit et le flux de chaleur perdue par l'air au cours de son écoulement.

4.3.2. Les équations de tranfert

- *Bilan énergétique sur le produit*

Energie reçue par convection = Energie stockée + Energie de vaporisation

$$\tau Sh_{v54}(T_a - T) = (m_4 C_{p4} + m_{sup} C_{p,sup}) \frac{dT}{dt} + P_{ev} \quad (4.56)$$

Où $\tau S = S_4 = \tau S_0 \left(\frac{1+uX}{1+uX_0} \right)^{2/3}$ représente la surface réelle d'échange entre les tranches et

l'air, S_0 la surface d'une claie, τ le taux de contact claie-produit, u le coefficient de retrait linéaire des tranches ($u=1.486$) et $m_4 C_{p4} = m_s (C_{ps} + X C_{pe})$, C_{ps} et C_{pe} étant les chaleurs spécifiques de la matière sèche et de l'eau.

- *Bilan thermique sur les parois du séchoir*

⇒ Paroi interne

Energie reçue par convection = Energie stockée+ Energie transmise par conduction vers la paroi externe

$$S_3 h_{v3} (T_a - T_{pi}) = S_3 h_{c3} (T_{pi} - T_{pe}) + m_3 C_{p3} \frac{dT_{pi}}{dt} \quad (4.57)$$

⇒ Paroi externe

Energie reçue par conduction = Energie perdue par convection à l'air ambiante + Energie rayonnée vers le ciel + Energie Stockée

$$S_3 h_{c3} (T_{pi} - T_{pe}) = h_{v32} S_3 (T_{pe} - T_{amb}) + h_{r31} S_3 (T_{pe} - T_c) + m_3 C_{p3} \frac{dT_{pe}}{dt} \quad (4.58)$$

- *Bilan Energétique sur l'air*

Energie thermique cédée par l'air = Energie reçue par convection au produit + Energie reçue par convection à la paroi interne

$$P_p = \tau S h_{v54} (T_a - T) + S_3 h_{v53} (T_a - T_{pi}) \quad (4.59)$$

$$P_p = \dot{m}_a C_{pa} \Delta x \frac{dT_a}{dx} \quad (4.60)$$

- *Bilan Energie et Masse sur l'air et le produit*

On utilise le modèle des résistances aux transferts d'humidité. On considère alors un volume V délimité par une portion de produit, sa surface S, et l'air asséchant circulant à son contact. Si C_v , C_s et C_i , désignent les fractions massiques de la vapeur d'eau dans l'air, à l'interface air-produit et dans le produit. Selon ce modèle, le mécanisme du séchage peut être décrit à l'aide de deux types de transferts d'humidité associés en série :

⇒ Un transfert d'humidité interne , caractérisé par la résistance $1/h_i$ et les potentiels massiques C_i et C_s . Où h_i est déterminé à partir de la diffusivité d'eau déterminée

expérimentalement au chapitre 3 et exprimé sous la forme : $h_i = \frac{D_{eff}}{\delta}$

δ étant la longueur moyenne de diffusion d'eau supposée égale à la moitié de l'épaisseur de la tranche.

⇒ Un transfert convectif externe entre la surface du produit et l'air, exprimé à l'aide de la résistance $1/h_e$. h_e est calculé à partir du nombre de Sherwood donné par:

$$h_e = \frac{Sh \times D_v}{d} \quad (4.61)$$

Où D_v est la diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air et d la dimension caractéristique du produit séché (épaisseur de la tranche).

Le coefficient global de transfert de matière entre l'air et les tranches de mangue doit prendre en compte ces deux étapes de transport que sont la diffusion de la vapeur d'eau dans les pores des tranches et le transfert convectif de cette vapeur d'eau dans le film gazeux à la surface du produit :

$$K_m = \frac{h_e \times h_i}{h_e + h_i} \quad (4.62)$$

Le bilan énergie-masse s'écrit alors à travers la relation donnant la puissance évaporatoire:

$$P_{ev} = \dot{m}_e L_v = m_s \frac{dX}{dt} L_v \quad (4.63.a)$$

Cette puissance évaporatoire peut être exprimée soit en fonction de la différence de pressions partielles de vapeurs entre la surface du produit et l'air séchant (4.63.b), soit en fonction de la différence des fractions massiques de vapeur d'eau (4.63.c).

$$P_{ev} = \frac{h_e h_i}{h_e + h_i} \frac{M_v}{RT_a} (A_w(X, T) P_{v\text{sat}}(T) - HR(\omega, T_a) P_{v\text{sat}}(T_a)) \times L_v \quad (4.63.b)$$

$$P_{ev} = S \tau \frac{h_e h_i}{h_e + h_i} (C_i - C_v) \times L_v \quad (4.63.c)$$

Où $C_i = \frac{X}{X+1}$, $C_v = \frac{\omega}{\omega+1}$ avec X la teneur en eau base sèche à la surface des tranches et ω l'humidité absolue de l'air séchant.

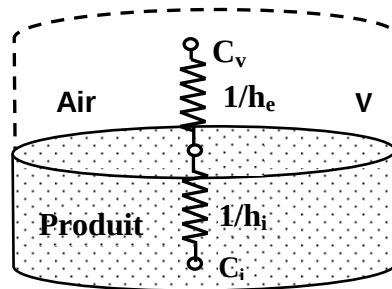


Fig. 4.10 : Representation des transferts d'humidité par le modèle de Combes

4.3.3. Equations de tranfert discrétisées

Entre les instants t_n et t_{n+1} , les bilans dans les différents milieux d'une tranche fictive j considérée, s'obtiennent en écrivant les équilibres des flux en chaque nœud du réseau de la figure 4.9.

- *Le produit*

$$Sh_{v54}\tau(\theta(j-1, n+1) - T(j, n+1)) = P_{ev}(j, n+1) + \frac{m_4 C_{p4} + m_{sup} C_{p, sup}}{\Delta t} (T(j, n+1) - T(j, n)) \quad (4.64)$$

- *Les parois du séchoir*

- Paroi interne

$$S_3 h_{v53} (\theta(j-1, n+1) - T_{pi}(j, n+1)) = S_3 h_{c3} (T_{pi}(j, n+1) - T_{pe}(j, n+1)) + \frac{m_3 C_{p3}}{\Delta t} (T_{pi}(j, n+1) - T_{pi}(j, n)) \quad (4.65)$$

- Paroi externe

$$S_3 h_{c3} (T_{pi}(j, n+1) - T_{pe}(j, n+1)) = h_{v32} S_3 (T_{pe}(j, n+1) - T_a) + h_{r31} S_3 (T_{pe}(j, n+1) - T_c) + \frac{m_3 C_{p3}}{\Delta t} (T_{pe}(j, n+1) - T_{pe}(j, n)) \quad (4.66)$$

- *L'air*

$$P_p(j, n+1) = Sh_{v54}\tau(\theta(j-1, n+1) - T(j, n+1)) + S_3 h_{v53} (\theta(j-1, n+1) - T_{pi}(j, n+1)) \quad \text{et}$$

$$P_p(j, n+1) = \dot{m}_a C_{pa} (\theta(j-1, n+1) - \theta(j, n+1)) \quad (4.67.a\&b)$$

- *L'air et le produit*

$$P_{ev}(j, n+1) = L_v(T) m_s (X(j, n+1) - X(j, n)) = L_v(T) \frac{h_e h_i}{h_e + h_i} (C_i(j, n+1) - C_v(j-1, n+1)) S \tau \quad (4.68)$$

4.4 Simulation du séchage en couches minces

L'air est supposé être en équilibre avec la surface du produit. Le produit étant disposé en couche mince, son profil d'humidité est supposé uniforme. Sa teneur en eau moyenne au cours du séchage est alors égale à sa teneur en eau en surface, elle-même égale à la teneur en eau d'équilibre donnée par l'isotherme de désorption dans les conditions de l'air séchant.

4.4.1 Méthode de resolution

Les équations ci-dessus décrivent complètement les échanges thermiques dans une tranche j du séchoir placé dans l'air ambiant.

Les températures T_{amb} et T_c sont fixées tandis que les températures $T(j,n)$, $T_{pi}(j,n)$ et $T_{pe}(j,n)$ sont connues car elles ont été calculées au temps n . Il en est de même pour $C_v(j-1,n+1)$ et $\theta(j-1,n+1)$ qui sont calculées dans la tranche $j-1$.

Le système d'équations simultanées est résolu par itérations à partir de la méthode explicite à l'aide d'un programme de simulation adapté au logiciel MATLAB version 7.0.1.

Pour chaque tranche j , les solutions donnent :

- La température et la teneur en eau du produit. Cette dernière est déterminée à partir de C_i grâce à l'isotherme de sorption.
- La vitesse de séchage $-\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X(j,n) - X(j,n+1)}{\Delta t}$
- La température de sortie de l'air et son humidité.

Les valeurs de ces différents paramètres pour la tranche j servent de condition d'entrée pour la tranche $j+1$. L'initialisation du calcul nécessite donc la connaissance :

- De la température et de la teneur en eau du produit au début du séchage
- Des valeurs initiales de T_{pe} et T_{pi} .

4.4.2 Système d'équations résolues

La résolution des équations présentées ci-dessus donne le système suivant :

$$\bullet P_{ev}(j, n+1) = H_2(C_i(j, n+1) - C_v(j-1, n+1)) \quad (4.69)$$

$$\bullet T(j, n+1) = \frac{C_2}{H_1 + C_2} T(j, n) + \frac{H_1}{H_1 + C_2} \theta(j-1, n+1) - \frac{1}{H_1 + C_2} P_{ev}(j, n+1) \quad (4.70)$$

$$\bullet T_{pi}(j, n+1) = \frac{H_6}{H_8} \theta(j-1, n+1) + \frac{C_3}{H_8} T_{pi}(j, n) + \frac{H_3 C_3}{H_7 H_8} T_{pe}(j, n) + \frac{H_3 H_4}{H_7 H_8} T_a + \frac{H_3 H_5}{H_7 H_8} T_c \quad (4.71)$$

$$\bullet T_{pe}(j, n+1) = \frac{C_3}{H_7} T_{pe}(j, n) + \frac{H_3}{H_7} T_{pi}(j, n+1) + \frac{H_4}{H_7} T_a + \frac{H_5}{H_7} T_c \quad (4.72)$$

$$\bullet P_p(j, n+1) = (H_1 + H_6) \theta(j-1, n+1) - H_1 T_e(j, n+1) - H_6 T_{pi}(j, n+1) \quad (4.73)$$

$$\bullet \theta(j, n+1) = \theta(j-1, n+1) - \frac{P_p(j, n+1)}{C_1} \quad (4.74)$$

$$\text{Avec : } C_1 = \dot{m}_a C_{pas}; C_2 = \frac{m_4 C_{p4} + m_{sup} C_{p, sup}}{\Delta t}; C_3 = \frac{m_3 C_{p3}}{\Delta t}; H_1 = h_{v54} S \tau;$$

$$H_2 = \frac{h_e h_i}{h_e + h_i} S \tau L_v(T); H_3 = h_{c3} S_3; H_4 = h_{v32} S_3; H_5 = h_{r31} S_3; H_6 = h_{v53} S_3;$$

$$H_7 = C_3 + H_3 + H_4 + H_5; H_8 = C_3 + H_3 + H_6 + \frac{H_3^2}{H_7}.$$

La simulation du séchage peut être simplifiée en négligeant les pertes thermiques du séchoir à travers ses parois. Le système d'équation devient alors :

$$\Rightarrow P_{ev}(j, n+1) = H_2(C_i(j, n+1) - C_v(j-1, n+1)) \quad (4.75)$$

$$\Rightarrow T(j, n+1) = \frac{C_2}{H_1 + C_2} T(j, n) + \frac{H_1}{H_1 + C_2} \theta(j-1, n+1) - \frac{1}{H_1 + C_2} P_{ev}(j, n+1) \quad (4.76)$$

$$\Rightarrow \theta(j, n+1) = (1 - \frac{H_1}{C_1}) \theta(j-1, n+1) + \frac{H_1}{C_1} T(j, n+1) \quad (4.77)$$

$$\Rightarrow P_p(j, n+1) = C_1(\theta(j-1, n+1) - \theta(j, n+1)) \quad (4.78)$$

5 Résultats

5.1 Le capteur solaire

L'ensoleillement et l'état du ciel n'étant pas les mêmes pour des jours successifs du mois et même de la semaine, nous avons fait l'analyse des performances thermiques du capteur en adoptant le concept du jour moyen. Tous les jours du mois sont alors supposés identiques et l'impact des aléas climatiques est négligé dans la démarche. Ce concept de jour moyen présente aussi bien des avantages que des inconvénients. En effet, il est adapté dans notre cas, car il permet de prédire les performances thermiques du séchoir solaire pour son dimensionnement. Il est surtout pratique pour les sites où la variation des conditions climatiques journalières n'est pas importante et qui sont caractérisés par des indices de clarté élevés (PRATOTO, 1996). Pour les trois mois de grande production de mangues, cette condition est totalement satisfaite pour le mois d'avril et moyennement pour les mois de mai et de juin. L'inconvénient majeur de ce concept se révèle en présence d'une situation de puissance utile excédentaire ou déficitaire par rapport à celui du jour moyen. Cependant, il reste une démarche appréciable surtout pour des études de conception.

5.1.1 Simulation du rayonnement et des puissances récupérée et utile par m² de captation

Pour un jour type du mois de mai (15 mai) où la température de l'air à l'entrée du capteur varie entre 30 et 35°C, la figure 4.11 présente les courbes évolutives du rayonnement global, direct et diffus reçus par m² de captation sur le site de la manipulation (12° 21' Nord). La durée de l'insolation observée était de 10 heures de 7h à 17h30. Au midi solaire vrai (MSV), ces puissances atteignent respectivement des maxima de 863, 523 et 340 W/m². On en déduit que nos simulations donnent une valeur du rayonnement global au MSV du mois de mai proche de 842 W/m² celle présentée par Yves Jannot & Yezouma Coulibaly (1997) pour un plan horizontal de la ville de Ouagadougou. La puissance récupérée par le capteur et la puissance utile cédée à l'air caloporteur sont illustrées sur la même figure. Ces puissances présentent des maxima respectifs de près 694, 303 W/m² au MSV. A cette période de la journée, plus de la moitié de l'énergie rayonnante par m² de captation, provenant du soleil est récupérée par le capteur. Celui-ci cède alors un peu plus du tiers de cette énergie incidente à l'air caloporteur. Ces données montrent que bien que le capteur soit en mesure de récupérer de l'énergie entre 6h et 18h au mois de mai; l'air caloporteur, quand à lui, ne reçoit une puissance utile de celui-ci que pendant

une durée de 9heures comprise entre 7h30min et 16h30min. La production d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire au mois de mai doit alors se faire dans cet intervalle de temps pendant une durée de 9 heures au maximum. En conséquence, le temps de séchage solaire indirect des tranches de mangues pendant cette période doit être dimensionné en tenant compte de cette durée.

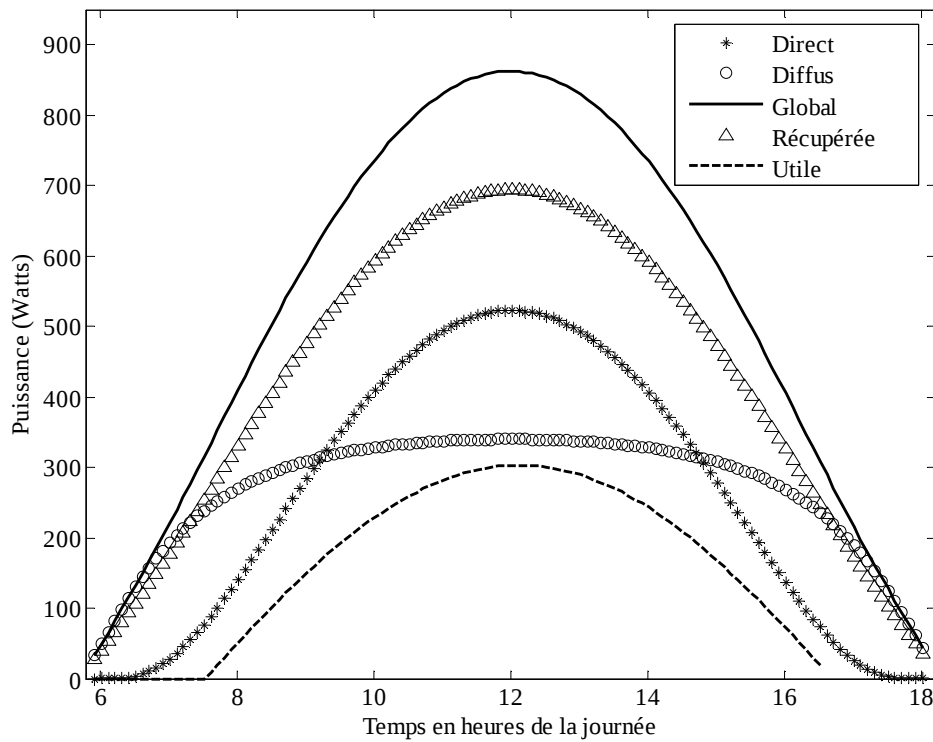


Fig.4.11 : Evolution journalière du rayonnement direct, diffus et global et des puissances récupérée et utile du capteur par m².

5.1.2 Simulation des températures moyennes des organes et de l'air caloporteur

La distribution de température dans l'écoulement d'air le long du conduit et les températures moyennes des organes du capteur sont les paramètres les plus importants à prendre en compte dans la conception et la modélisation d'un dispositif solaire de production thermique. Pour le capteur solaire étudié, selon la figure 4.12.a, pour un jour type du mois de mai avec une température ambiante variant entre 30 et 35°C, la température de l'absorbeur atteint 107°C au MSV et celle de la vitre approche 81°C à cette même période (avec $I_0=863\text{W/m}^2$). Les élévations de températures d'air au dessus de l'ambiante observées le long de la journée (fig. 4.12.b) vont

de quelques degrés en début et en fin de journée à près de 30°C au midi solaire vrai. Ces élévations de températures sont plus grandes que celles du séchoir simulé par Abdelhamid et al. (1997) qui donnait une élévation de près de 26°C pour des conditions opératoires voisines ($I_0=900\text{W/m}^2$, $\dot{m}_a = 0.023\text{kg/s}$ et $T_{\text{amb}}=25^\circ\text{C}$). Pour préserver certains nutriments thermolactyls, les tranches de mangue nécessitent d'être séchées à des températures douces ne dépassant pas environ 70°C. Aussi, les élévations de température théoriques qu'offre notre capteur solaire à air sont suffisantes pour assurer ces opérations de séchage. Le type de capteur à absorbeur mixte utilisé est donc bien approprié au séchage de la mangue car il permet d'atteindre les températures de séchage requises. Seules les variations climatiques liées à l'état du ciel (non prises en compte dans notre étude) pourraient influencer les performances prédites de ce capteur. Dans ce cas, en fonction de l'indice de clarté du ciel, les élévations de températures simulées ici peuvent être revues à la baisse.

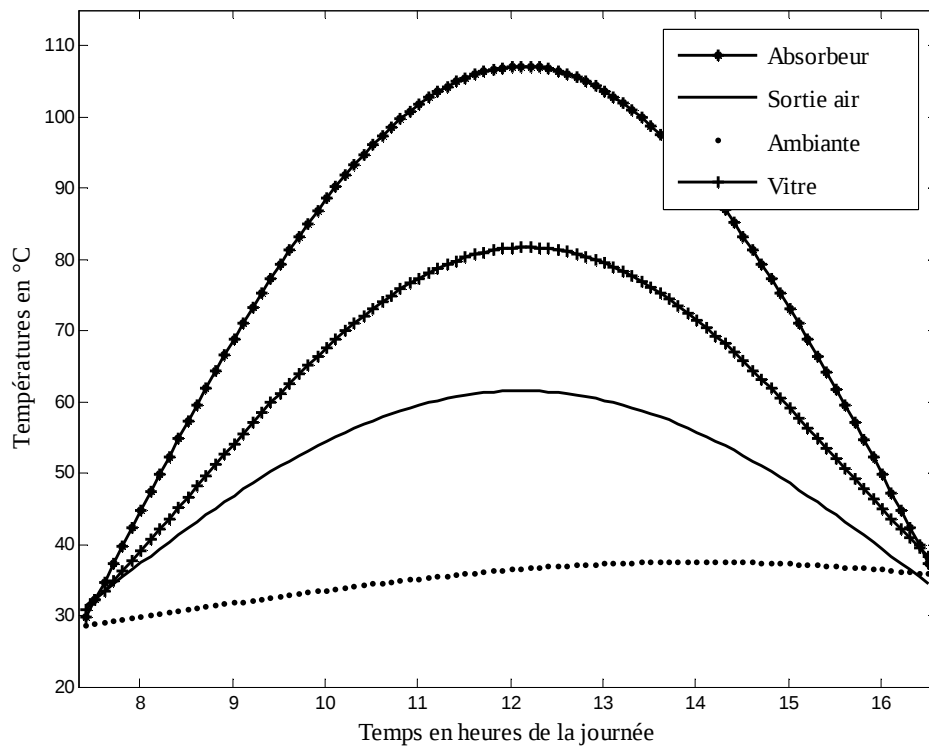


Fig.4.12.a : Evolution journalière des températures de la vitre, de l'absorbeur et de l'air à la sortie du capteur

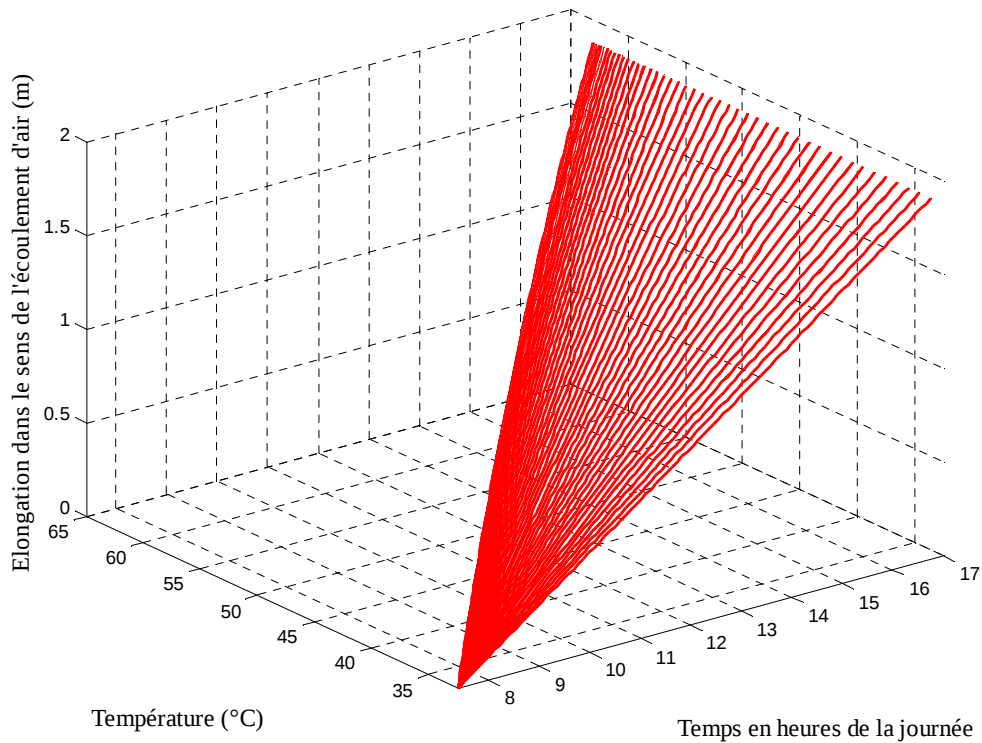
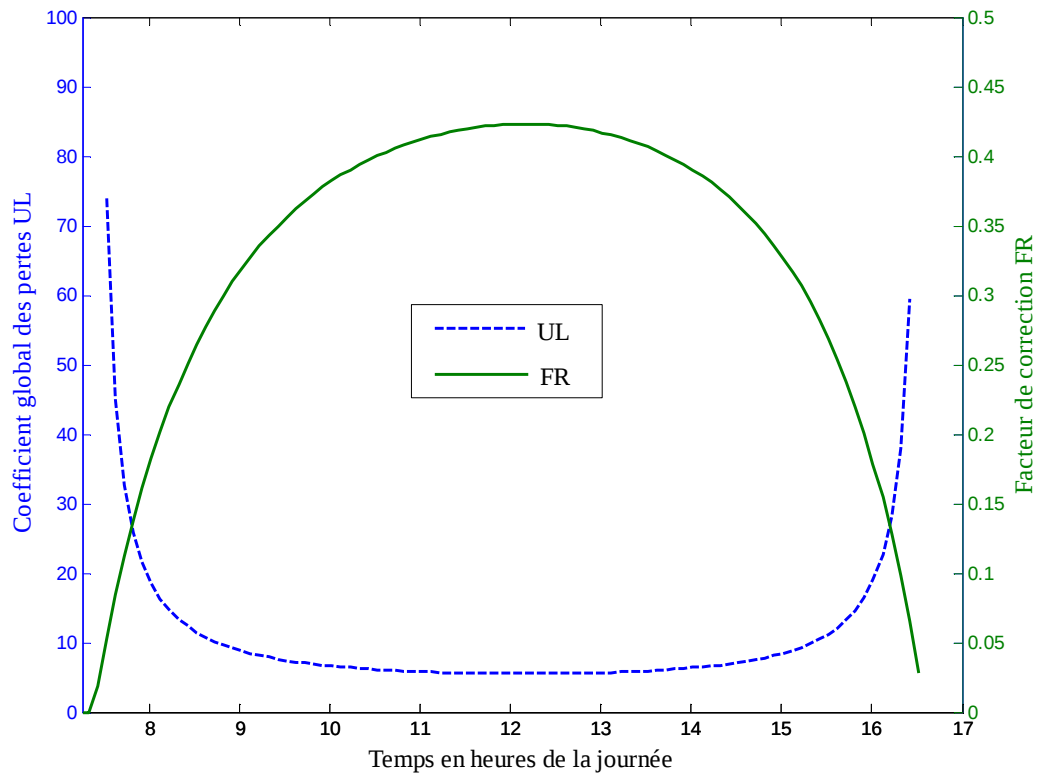


Fig.4.12.b : Distribution journalière de températures suivant le sens de l'écoulement d'air pour le jour moyen du mois de mai.

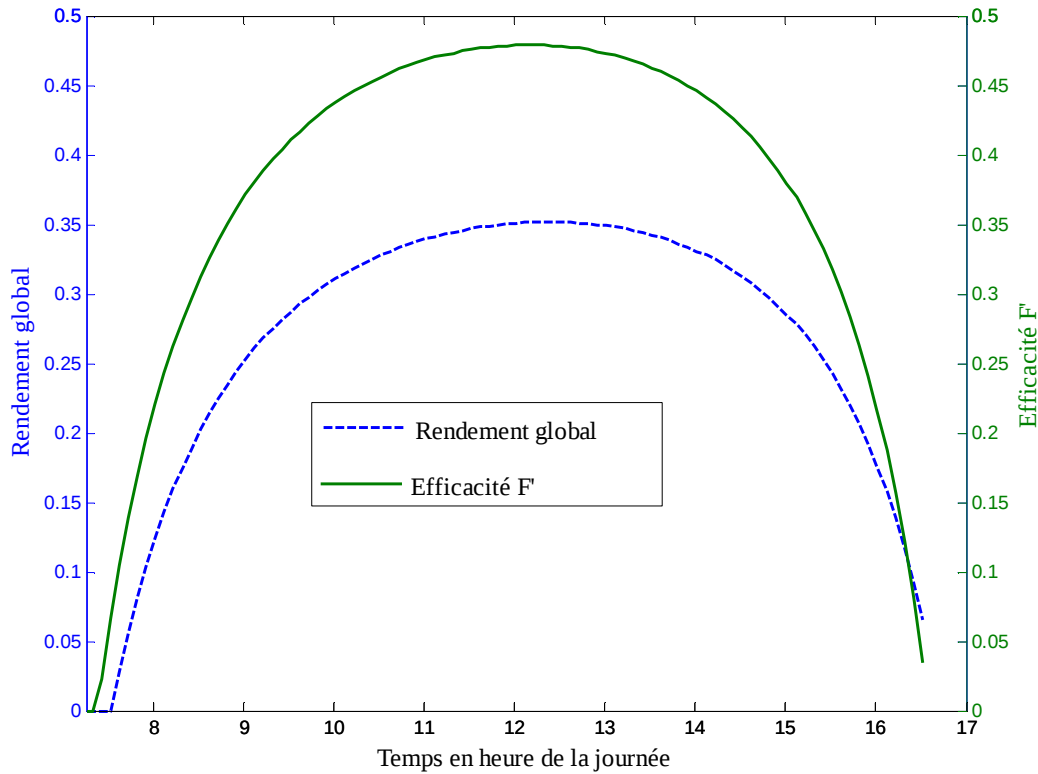
5.1.3 Simulation des performances thermiques journalières

Les performances thermiques théoriques du capteur pour le jour moyen du mois de mai sont données par les figures 4.13.a&b. On constate que ces performances passent à leur optimum à une heure de la journée correspondant au MSV. A cette heure, le rendement global du capteur approche 35% et l'efficacité F' du capteur atteint les 48%. Ces résultats traduisent qu'au midi solaire vrai, seul 48% de la puissance récupérée par le capteur est transmise à l'air. En plus, cette puissance utile représente 35% de la puissance rayonnante qui tombe sur la surface du capteur. Selon la figure 4.13.a, les pertes globales sont très élevées en début et en fin de journée et presque constantes en mi-journée de 10h à 14h. En tenant compte de ces pertes, la puissance récupérée par le capteur est réduite et la fraction d'énergie utile ou facteur de correction F_R cédée à l'air n'est que de 43% au MSV. Avec un rendement thermique de près 35% à un midi solaire

vrai de rayonnement global de près de 850 W/m^2 ($30 < T_{\text{air}} < 35^\circ\text{C}$, $\dot{m}_a = 0.023 \text{ kg/s}$), notre capteur offre des performances théoriques plus satisfaisantes que celui de Madhlopa, Jones & Kalenga (2002) qui donnait des rendements de 21.3% et 17% sous un ensoleillement de 1168 W/m^2 (avec $T_{\text{air}} = 31^\circ\text{C}$, $v_a = 1.5 \text{ m/s}$) respectivement avec un absorbeur « maille de filet métallique » et un absorbeur « plaque en bois ». Les performances théoriques de notre capteur solaire sont aussi meilleures que celui de Ayensu (1997) [séchoir en convection forcée : $\eta = 21.0\%$], celui de Goyal & Tiwari (1997) [séchoir cabinet à absorbeur inversé avec réflecteur de rayon solaire : $13.0\% < \eta < 19\%$] et celui de Abdelhamid et al. (1997) [pour un même débit avec $I_0 = 900 \text{ W/m}^2$ et $S = 4 \text{ m}^2$, $\eta = 18\%$]. Ces meilleurs résultats confirment l'efficacité du type d'absorbeur composite formé d'un absorbeur « plaque métallique » et d'un absorbeur poreux « tampons métallique » par rapport aux autres types utilisés avant. Les performances thermiques de ce type de capteur peuvent donc générer des puissances utiles susceptibles d'assurer une opération de séchage de mangue à condition que les dimensions des tranches soient choisies en tenant compte de la durée de l'ensoleillement. En pratique, ces performances pourraient beaucoup dépendre des variations climatiques qu'il faudrait prendre en compte.



(a) coefficient global des pertes & facteur de correction



(b) rendement global & efficacité du capteur

Fig.4.13.a&b: Evolution journalière des performances thermiques du capteur au jour caractéristique du mois de mai. (a) coefficient global des pertes & facteur de correction, (b) rendement global & efficacité du capteur.

5.1.4 Comparaison des résultats de simulation et des résultats de test à vide du capteur.

Les mesures de températures ont été effectuées à l'aide de thermocouples de type K (précision...) liés à une carte d'acquisition d'un ordinateur auquel est installé le logiciel de mesure de température TESTPOINT. Ces mesures ont été effectuées en 2005 courant les mois d'Août et de septembre et en 2006 au cours des mois d'avril, de mai et de juin. Seul les résultats des essais du 12 mai 2006 ont été présentés. Il faut remarquer que certains de ces résultats se sont avérés inexploitable à cause des brusques variations climatiques liées à l'état du ciel ou à des cas de pluie. Pour la journée du 12 mai 2006, le ciel était très dégagé le matin et relativement couvert au nord ouest dans la soirée. Dans ces conditions, selon la figure 4.14, les températures mesurées des différents organes du capteur sont proches des valeurs simulées. Les courbes expérimentales et simulées concordent surtout pour les premières heures de la journée ($R^2 \approx 0.95$). Au-delà du midi solaire vrai, l'écart entre ces courbes devient de plus en plus

important et les valeurs expérimentales sont les plus élevées. Ces écarts significatifs observés entre les températures simulées et expérimentales dans l'après midi se justifient par l'utilisation des températures moyennes des organes dans le modèle. En effet, en simulant le fonctionnement du capteur avec les températures des organes, on néglige leur chaleur spécifique. Les énergies stockées contribuant à l'élévation de leurs températures le long de la journée n'ont pas alors été prises en compte. D'où les basses températures observées par rapport à l'expérimentation. Cependant, ces résultats justifient surtout l'hypothèse d'une température d'équilibre entre l'air et la section poreuse de l'absorbeur. Enfin, en comparant nos résultats à ceux de la littérature, on constate que la température maximale de l'air obtenue avec notre capteur ($\approx 62^\circ\text{C}$) est supérieure à celle de Abdelhamid et al. (1997) qui était de 54°C sous des conditions voisines (900W/m^2 , $T_{\text{air}}=25^\circ\text{C}$, 0.023kg/s) et celle de Madhlopa, Jones & Kalenga (2002) qui donnait une température maximale 40.1°C à 12.6h lorsque $T_{\text{amb}}=31.7$.

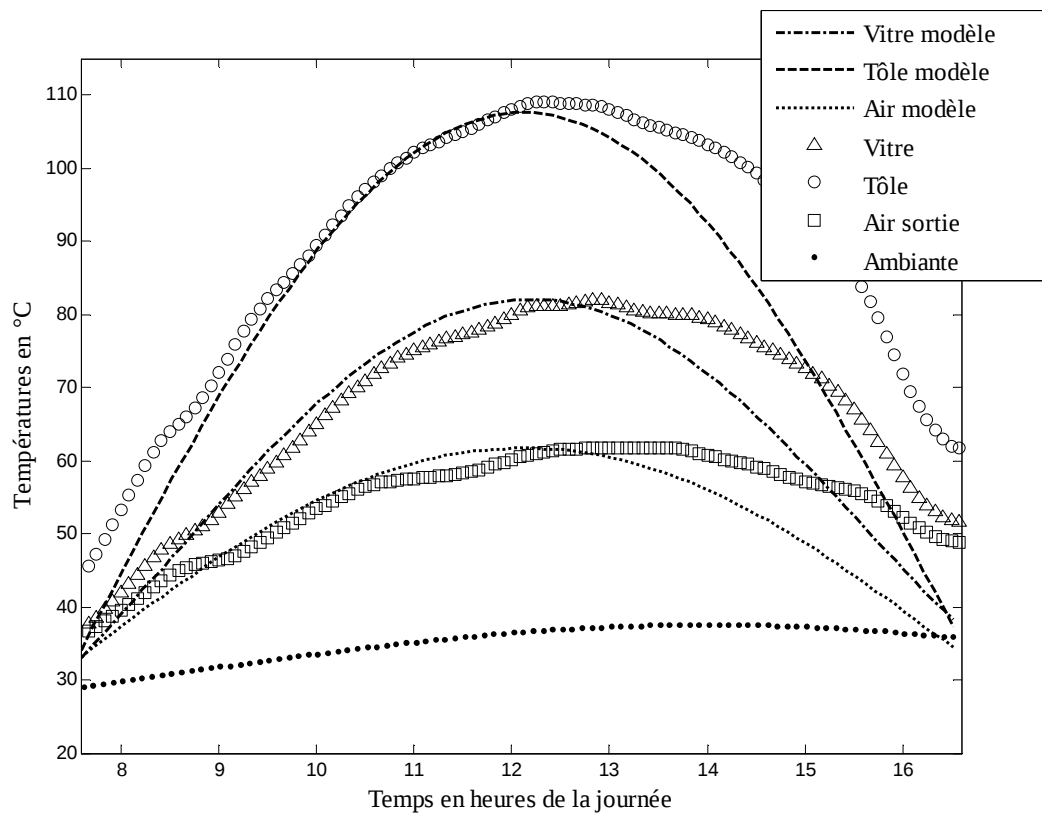


Fig.4.14. Comparaison des températures expérimentales et simulées du capteur.

5.1.5 Performance à long terme du capteur et capacité du séchoir solaire

Le rendement global du capteur pour le jour moyen des différents mois de l'année (cf tableau 4.2.a) est présenté sur la figure 4.15. Les plus hautes valeurs du rendement sur l'ensemble de la journée type dépassant 35% au MSV sont observées aux mois d'Avril, de mai et de juin. Pour ces trois mois correspondant à la période de grande production de mangue, l'utilisation du capteur pour des opérations de séchage solaire de ce fruit est donc justifiée. Le tableau 4.2.b présente en kilowattheures l'énergie utile du capteur par m² de captation et par jour moyen de ces trois mois de l'année. Sur la base de trois jours de séchage, si nous considérons la quantité de mangue pouvant être séchée par m² de captation, la puissance utile journalière exprimée à l'aide du bilan énergie-masse s'écrit :

$$P_u = \frac{\dot{m}_e (L_v + \Delta H_s)}{3}, \quad (4.79)$$

soit :

$$\int_{t_i}^{t_f} P_u dt = \frac{m_e L_v + \Delta H_s}{3} \quad (4.80)$$

Où m_e (kg) désigne la masse d'eau à évacuer et P_u (kJ/m²) la puissance utile, L_v (kJ/kg) la chaleur latente de vaporisation, ΔH_s (kJ/kg) l'enthalpie différentielle de désorption, t_i et t_f temps correspondant au début et à la fin du séchage.

Pour des teneurs en eau pas trop faibles ($X_{bh} \geq 0.2$), l'enthalpie différentielle est négligeable devant la chaleur latente de vaporisation (cf. figure 2.15.a chap.2). Dans ce cas, la masse de mangue à sécher par m² de captation est exprimée sous la forme:

$$m_0 = \frac{3 \int_{t_i}^{t_f} P_u dt}{\Delta x_{bh} L_v}, \quad (4.81)$$

soit :

$$m_0 = \frac{3E}{\Delta x_{bh} L_v} \quad (4.82)$$

Où E désigne l'énergie utile journalière par m² de captation et Δx_{bh} la fraction d'eau du produit à évacuer par séchage solaire.

En considérant la teneur en eau initiale moyenne de la mangue $x_{bh} = 0.85$ et la chaleur latente aux températures moyennes de séchage solaire $L_v = 625 \text{ kJ/kg}$, la quantité théorique de mangue pouvant être déshydratée de 85% (bh) à la teneur en eau en monocouche moyenne 15% (bh) par m^2 de captation en trois jours moyen des mois d'avril de mai et de juin est illustrée par le tableau 4.2. Le prototype du séchoir construit au laboratoire, avec $S_{\text{captation}} \approx 2 \text{ m}^2$ serait alors capable de sécher, en trois jours, environ 6 kg de mangue pendant la même période.

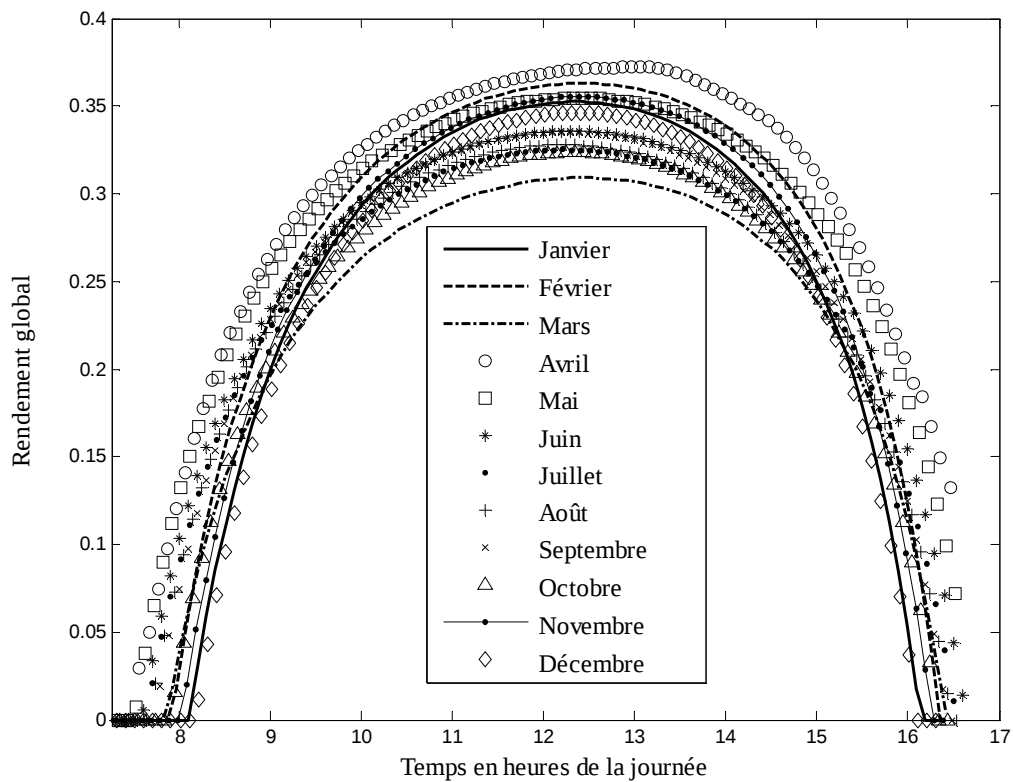


Fig.4.15 Rendement global du capteur par jour caractéristique des différents mois de l'année

Mois	Date	No. du jour dans l'année	Mois	Date	No. du jour dans l'année
Janvier	17	17	Juillet	17	198
Février	16	47	Août	16	228
Mars	16	75	Septembre	15	258
Avril	15	105	Octobre	15	288
Mai	15	135	Novembre	14	318
Juin	11	162	Décembre	10	344

Tableau 4.2.a Jours moyen du mois

Moi	Avril	Mai	Juin
Energie(KWh/jour/m ²)	1.86	1.78	1.70
m ₀ (kg)/m ² captation	3.05	2.92	2.79

Tableau 4.2.b Energie utile par m² de captation et par jour caractéristique des mois d'avril, mai et juin.

5.2 Couplage capteur-unité de séchage

5.2.1 Simulation du séchage solaire en couche mince de la mangue

La simulation du séchage solaire a été effectuée en utilisant les données moyennes sur les caractéristiques de séchage des trois principales variétés de mangue présentes au Burkina Faso (Amélie, Kent et Brooks). Ces caractéristiques de séchage sont : l'isotherme de sorption, la contraction volumique, les vitesses de séchage solaire déduites du modèle de Page. Le programme de simulation a été établi à partir d'une méthode explicite sous MATLAB version 7.0.1 et est présenté dans l'annexe IV-3. Les paramètres de simulation utilisés sont précisés dans l'annexe IV-2. Les difficultés liées à la transition jour-nuit ont été levées en simulant le séchage solaire sur les trois jours séparément. Les teneurs en eau du produit aux deux derniers jours de séchage ont été initialisées à partir des fractions de teneur en eau susceptibles d'être désorbés totalement le premier et le deuxième jour. Ces fractions ont été exprimées à partir du modèle de desorption de Page, en fonction de la durée de l'ensoleillement du jour précédent et de l'énergie stockée par le système en fin de journée sous la forme :

$$X_{0,i}^{\text{ème jour}} = (X_{0,(i-1)}^{\text{ème}} - X_{\text{eq}}) \exp[-k(t_e)^y] + X_{\text{eq}} - \frac{(1-\varepsilon)(C_{\text{Pabs}})(T_{f,\text{finale}} - T_{\text{amb}}) + C_{\text{Ptôle}}(T_{2,\text{finale}} - T_{\text{amb}})}{m_s(L_v + \Delta H_s)} \quad (4.83)$$

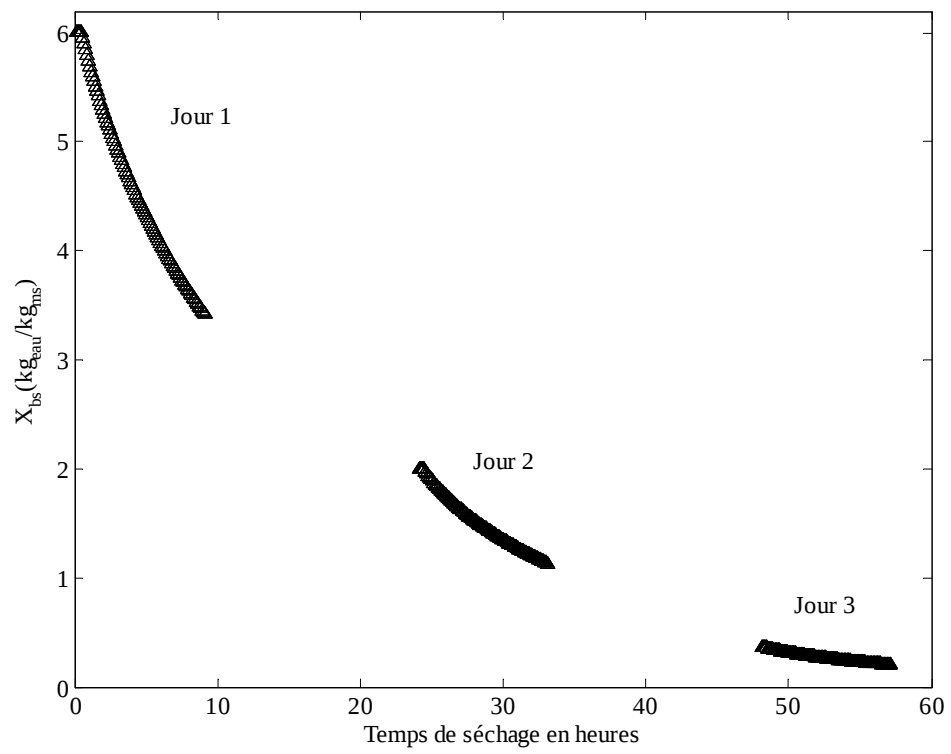
Où k et y sont les constantes du modèle de page du séchage solaire des trois variétés présentées sur le tableau 4.3, X_{eq} la teneur en eau d'équilibre à température et hygrométrie moyennes de séchage solaire donnée par l'isotherme de desorption, t_e la durée d'ensoleillement du $(i-1)^{\text{ème}}$ jour en heure, $T_{2,\text{finale}}$, $T_{f,\text{finale}}$ les températures moyennes de la tôle et dans le conduit utile en fin de journée et C_{Pabs} , $C_{\text{Ptôle}}$ les chaleurs massiques de l'absorbeur poreux et de la tôle.

Les résultats de simulation du séchage solaire des figures 4.16.a, b & c ont été obtenus dans les conditions du séchoir prototype de la figure 4.2 en adoptant le concept du jour moyen. La masse initiale de fruit a été fixée à 4 kg, soit 1kg de pulpe fraîche par claie et la teneur en eau initiale a été prise égale à 6 $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$. Selon ces résultats, la teneur en eau résiduelle à la fin de la première, de la deuxième et de la troisième journée dépend du mois où le séchage a lieu. En moyenne sur les trois mois, cette teneur en eau ne vaut plus que respectivement près de 3.4, 1.2 et 0.25 $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$. Autrement dit, près de 40% d'eau est évacuée le premier jour, 37% le deuxième jour et 16% le troisième jour. La majeure partie du séchage a donc lieu les premier et deuxième jours du séchage où plus de 3/4 d'eau du produit est évacué. Le séchage permet ainsi d'atteindre dans ces conditions des teneurs en eau proche de 0.2 $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ [$\approx 17\%$ (bh)] à la fin

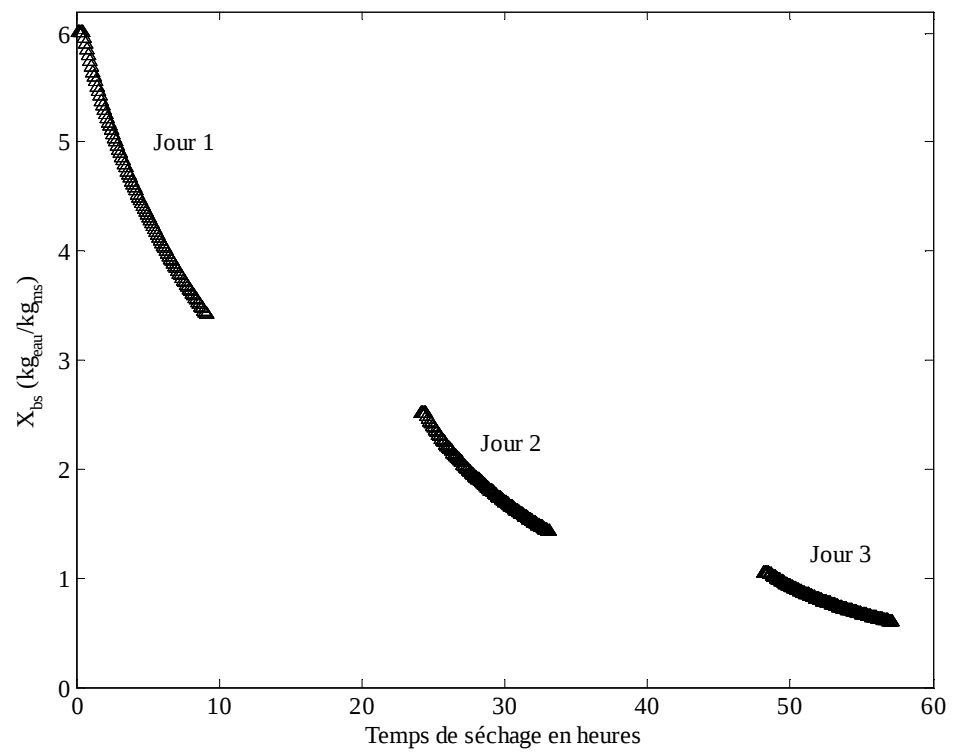
de la troisième journée au mois d'avril et $0.25 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ [$\approx 20\%$ (bh)] aux mois de mai et de juin. En comparant ces résultats à la gamme de teneur en eau de conservation de la mangue par séchage solaire de la littérature $12 \leq x_{\text{bh}} \leq 20\%$ [donnée par Siaka & Serge (2004)], on déduit que la quantité théorique de mangue fraîche utilisée peut être conservée après trois jours de séchage solaire au mois d'avril. Pour les mois de mai et de juin, une quatrième journée de séchage semble nécessaire pour assurer une bonne conservation des tranches séchées. Cependant, dans la pratique, ces 4 kg de fruit frais pourraient être séchées en trois jours pour l'ensemble des 3 mois car les performances réelles du séchoir en fin de journée sont meilleures que celle prédites par le modèle de capteur utilisé. D'autre part, la figure 4.16 montre des courbes de séchage totalement confondues pour les quatre claies. La position de la claie n'a donc pas d'influence significative sur la cinétique de séchage des tranches pour une hauteur de cage de l'ordre du mètre. Aux mois d'avril, de mai et de juin, les valeurs des températures du produit et de l'air illustrées par les figures 4.16.b&c approchent respectivement 63, 61 et 60°C au MSV de chacun des jours moyens de séchage. Ces profils de températures montrent des températures de l'air et du produit totalement confondues. Les simulations effectuées ne permettent pas de discerner une différence significative entre les températures de l'air et du produit car le programme de calcul prend en compte, pour l'ensemble de la période de séchage, l'équilibre thermique qui existe entre ces deux en début de journée. D'où la coïncidence totale observée entre ces courbes de températures. Cependant, expérimentalement cet équilibre n'est établi qu'en début de journée uniquement. Enfin l'hypothèse du jour moyen permet de constater des profils de température identiques sur les trois jours de séchage, ces profils ne dépendant sensiblement que du mois de séchage.

Variété	k	y	R ²
Amélie	0.1204	0.7735	0.9914
Brooks	0.0963	0.893	0.9977
Kent	0.0919	0.7924	0.9839

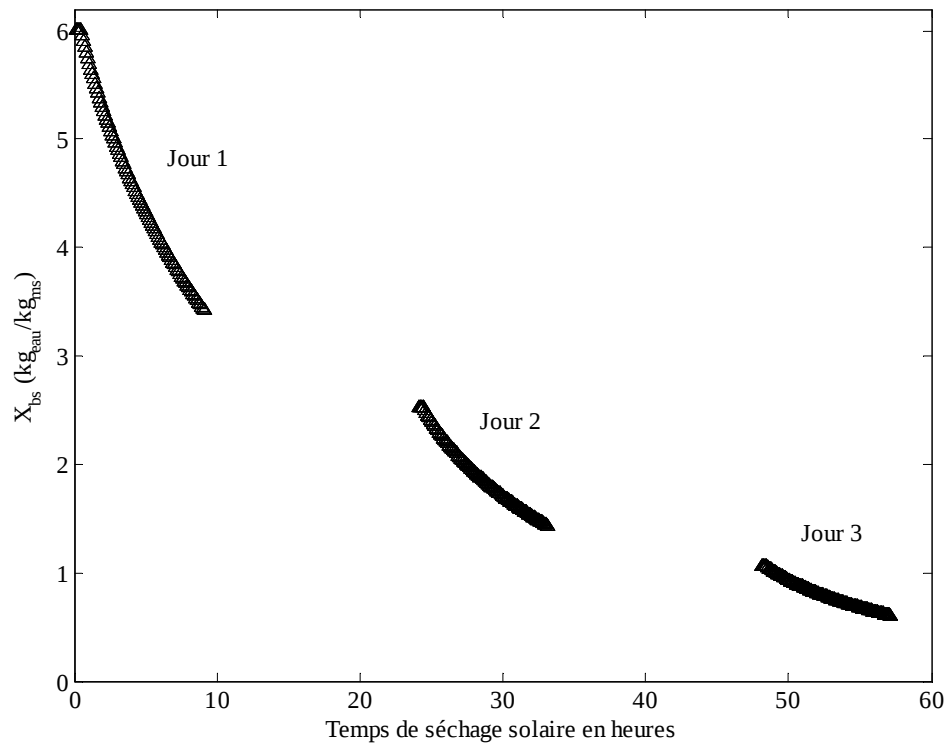
Tableau 4.3 : Paramètres du modèle de désorption de Page par séchage solaire des trois variétés de mangue.



(a) mois d'avril

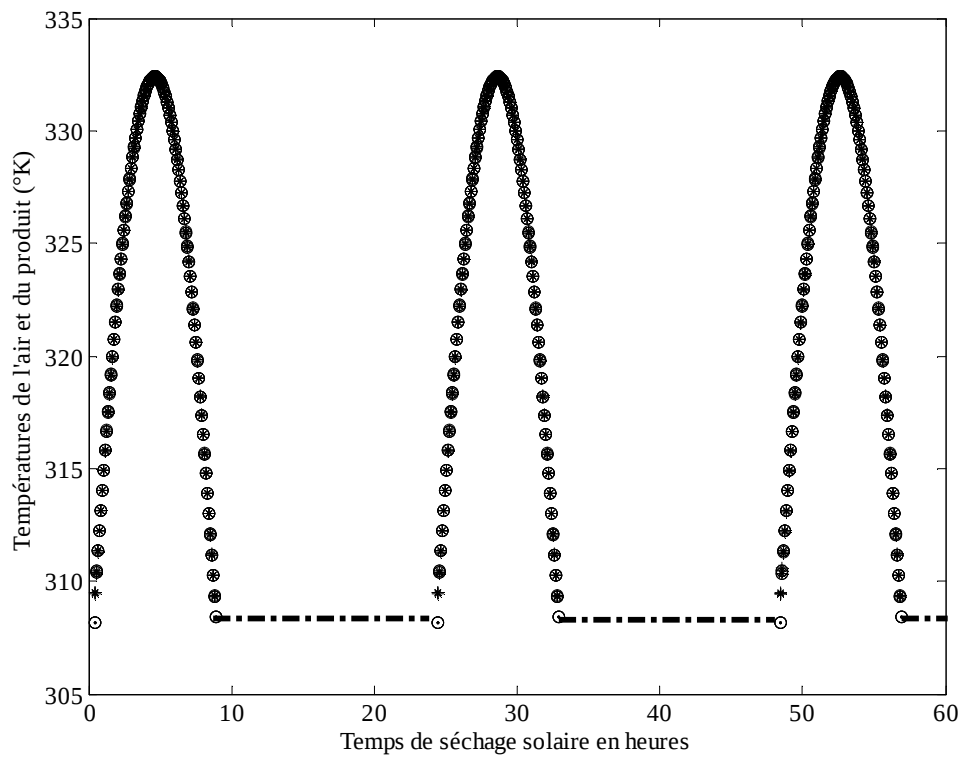


(b) mois de mai

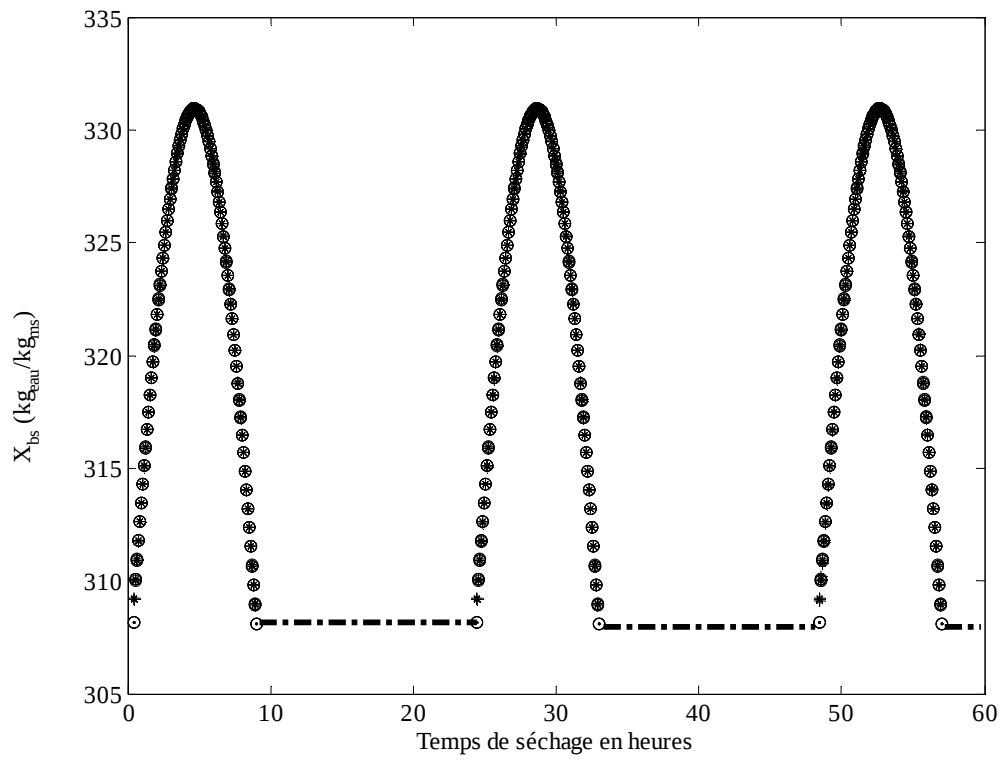


(c) mois de juin

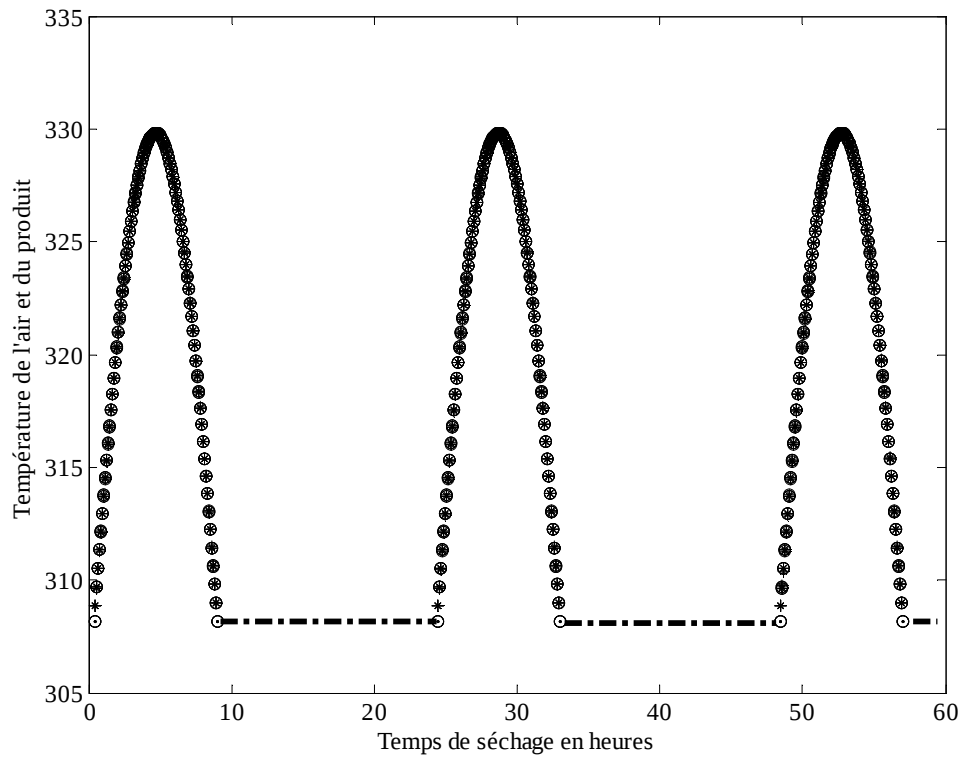
Fig. 4.16. Simulation du profil de teneur en eau des tranches d'épaisseur moyenne 8mm séchées par séchage solaire indirect en 3 jours moyens: (a)avril, (b) mai, (c) juin.



(a) mois d'avril



(b) mois de mai



(c) mois de juin

Fig.4.16 Simulation de l'évolution de la température de l'air séchant et du produit pendant le séchage solaire indirect de tranches de mangue d'épaisseur 8mm en trois jours moyens. (a) avril, (b) mai, (c) juin.

5.2.2 Caractérisation expérimentale du séchoir

5.2.2.1 Les transferts thermiques

Les expériences de séchage solaire indirect ont été réalisées à plusieurs reprises. Les résultats typiques sont ceux des mois de mai et de juin (21, 22 et 23 mai; 27, 28 et 29 mai, 02, 03 et 04 juin; 11, 12 et 13 juin 2006). Nous présentons ici les résultats des essais des journées du 27, 28 et 29 mai qui sont les plus indicatifs. L'évolution de l'humidité relative ambiante et celle à la sortie du séchoir sont présentées sur la figure 4.17. Les profils de températures du milieu ambiant, dans le séchoir et du produit sont précisés sur la figure 4.18. Ces données montrent que pendant la période de séchage, l'humidité relative de l'air ambiant oscillait entre 25 et 65% et celle dans le séchoir entre 15 et 50%. La température ambiante varie entre 30 et 35 °C et celle du séchoir atteint au midi solaire 46°C, 50°C et 64°C respectivement le premier, deuxième et troisième jour de séchage. Il est facile de remarquer que la température du produit est très inférieure à celle régnant dans le séchoir le premier jour du séchage et suffisamment proche de celle-ci pour les deux derniers jours de séchage. En exprimant le taux d'évaporation d'eau en surface à partir de la différence de température entre l'air et les tranches de mangue sous la forme :

$$\dot{m} = \frac{h_m S}{L_v} (T_a - T) = \frac{T_a - T}{\frac{L_v}{h_m S}}, \quad (4.84)$$

on introduit ainsi une résistance aux transferts externes R_{ext} (due au gradient de température) s'écrivant alors sous la forme :

$$R_{ext} = \frac{\Delta T}{\dot{m}} = \frac{L_v}{h_m S} \quad (4.85)$$

La relation (4.85) montre que les transferts externes sont d'autant plus lents que la différence de température entre l'air et le produit est élevée. Les plus hautes valeurs de ΔT observées sur la figure 4.18.b au premier jour de séchage montrent que pour cette journée le mécanisme de transport d'eau est limité par les transferts externes par évaporation d'eau à la surface des tranches. Une grande partie du séchage au premier jour se fait donc à vitesse constante et la température des tranches disposées en couches minces est proche de la température de bulbe humide de l'air. La chaleur apportée à ces tranches par convection sert essentiellement à évaporer l'eau libre. Théoriquement, pendant cette période le séchage est isenthalpique avec $\dot{m}$ et ΔT constantes. Cependant, nos résultats expérimentaux montrent des valeurs de $\dot{m}$, ΔT et

R_{ext} évoluant au premier jour de séchage. La valeur maximale 11.93 de ΔT est largement supérieure à 4.1 celle obtenue par Siaka & Serge (2004) par séchage solaire direct. Cette différence traduit l'efficacité du séchage solaire indirect par rapport au direct. La connaissance de R_{ext} étant essentielle pour l'identification du coefficient de transfert de masse h_m , nous avons alors établie une corrélation linéaire entre R_{ext} et la teneur en eau sous la forme (4.18.c) :

$$R_{\text{ext}} = -18.716X + 299.88, \quad R^2=0.9611 \quad (4.86)$$

Pour les deux derniers jours de séchage, les tranches entrent dans leur domaine hygroscopique et le transport d'eau par capillarité de l'intérieur vers la surface n'arrive plus à saturer cette dernière en eau. Le séchage se fait alors à vitesse décroissante et est de plus en plus limité par la diffusion lente d'eau à l'intérieur des tranches. La majeure partie de la chaleur apportée en surface sert alors à élever leur température et la valeur de ΔT diminue progressivement.

5.2.2.2 Influence de la position des claies

Le séchoir solaire prototype de la figure 4.2 possède quatre claies séparées l'une de l'autre de 20cm. L'écoulement d'air ($\dot{m}_a = 1.08 \text{ m}^3/\text{mn}$) va du bas vers le haut et les caractéristiques d'entrée de l'air (température, fraction massique d'eau, pression de vapeur ...) ne sont pas forcément les mêmes d'une claie à une autre. Aussi, il est intéressant d'analyser l'influence des positions de claies sur le profil de teneur en eau en fonction du temps. Pour les courbes de séchage solaire des 27, 28 et 29 mai 2006 présentées sur les figures 4.19.a&b, les quatre claies numérotées 1, 2, 3 et 4 portaient chacune 631g de pulpe fraîche. Selon ces résultats, il n'existe pas de différences significatives entre les courbes de masse et de teneur en eau en fonction du temps. La position de la claie n'influe donc pas la cinétique de séchage des tranches de mangue. Cette tendance est surtout renforcée au troisième jour de séchage où les courbes de teneur en eau sont totalement confondues. Ces résultats dont les tendances ont été confirmées par trois séries d'expériences de vérification concordent avec ceux de la simulation qui montrait qu'à masses égales, la position de la claie n'influe pas sur les cinétiques de séchage.

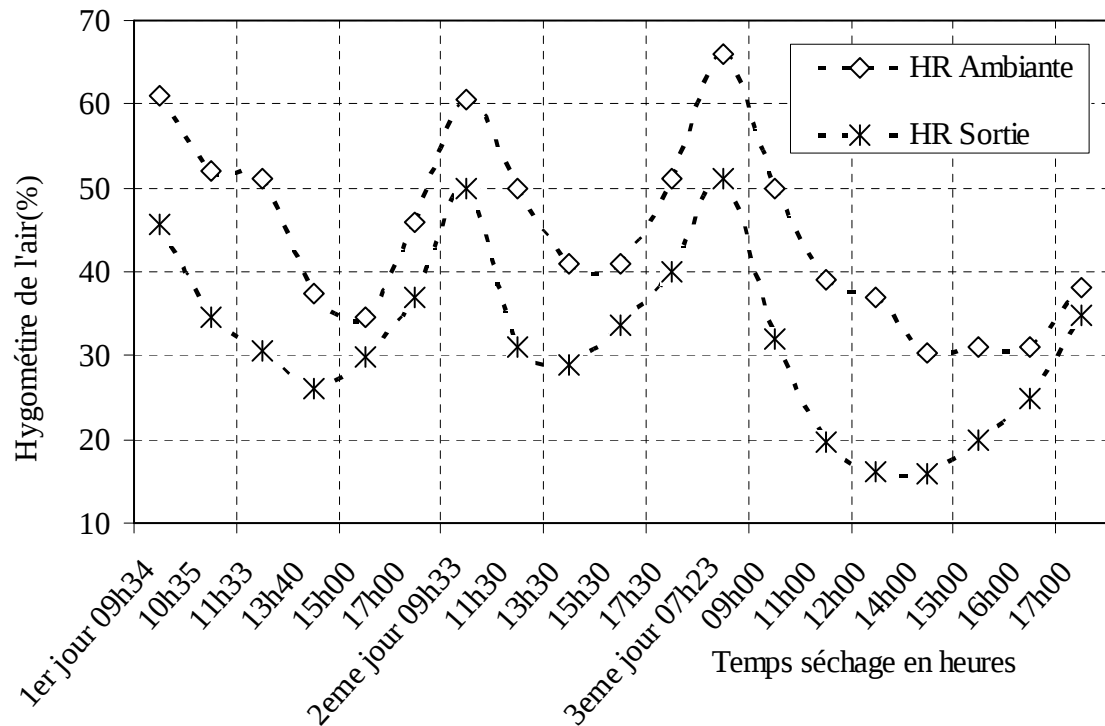


Fig. 4.17 Evolution de l'humidité relative de l'air à l'entrée du capteur et à la sortie de la cage de séchage pendant le séchage solaire indirect [Site de Ouagadougou 12°21'N 1°31'W; 21, 22 et 23 mai 2006].

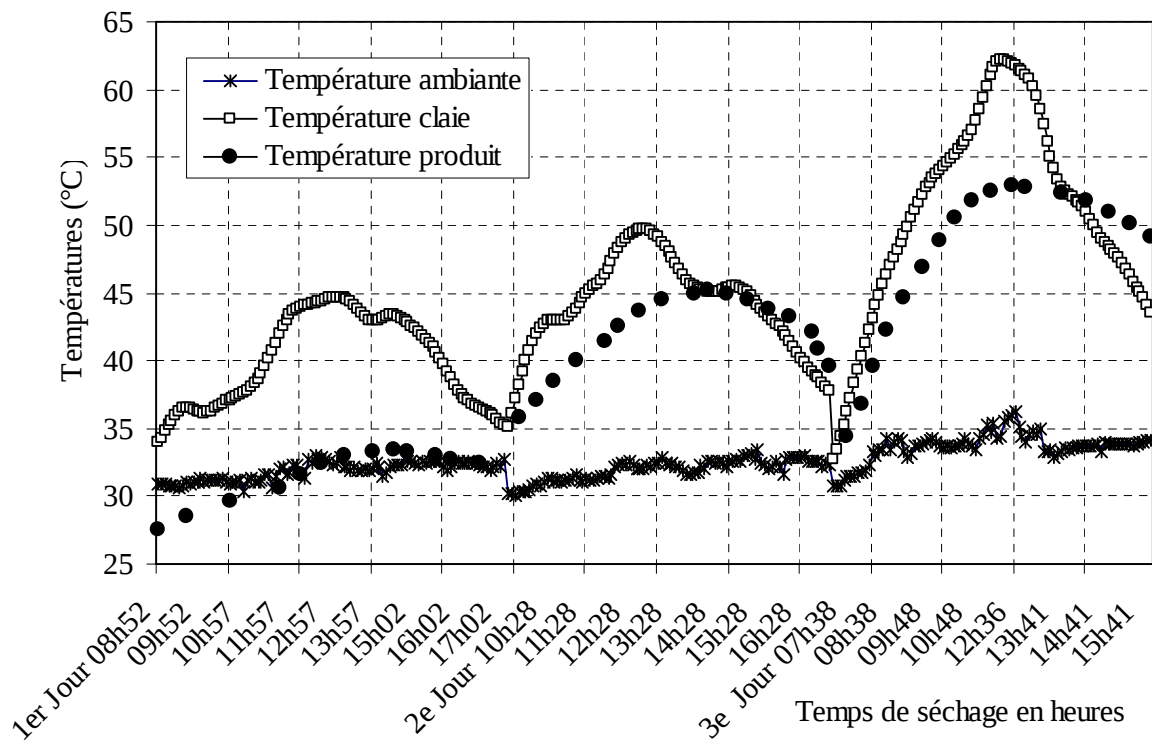


Fig. 4.18.a Evolution des températures ambiante, dans la cage et du produit au cours du séchage solaire indirect [Site de Ouagadougou 12°21'N 1°31'W; 21, 22 et 23 mai 2006].

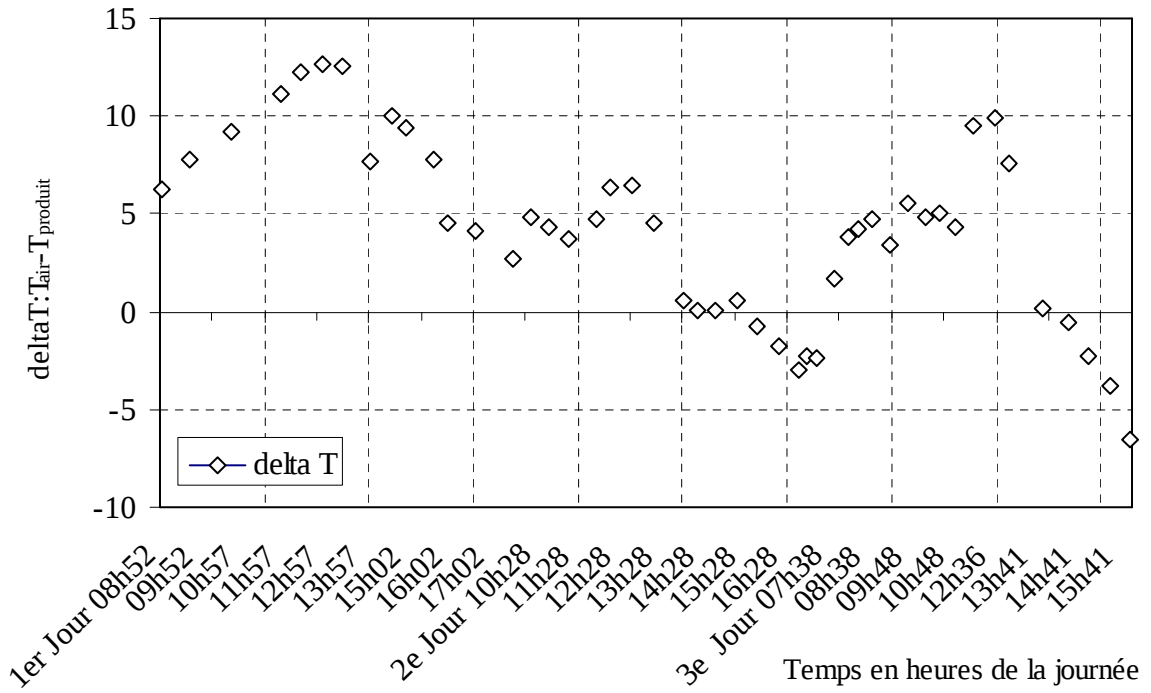


Fig. 4.18.b Séchage solaire indirect de la mangue : évolution de la différence de température entre l'air et le produit en fonction de l'heure de séchage.

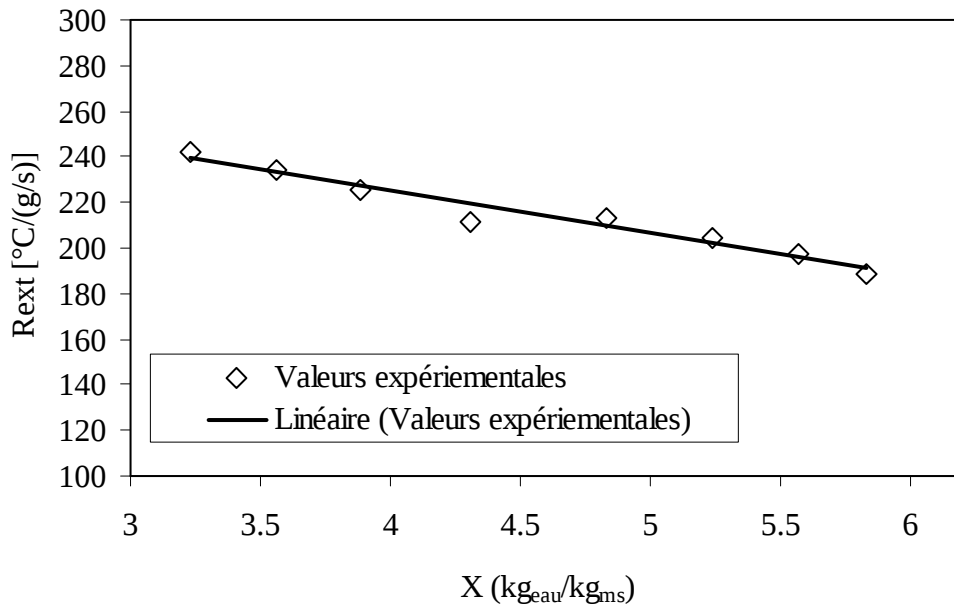
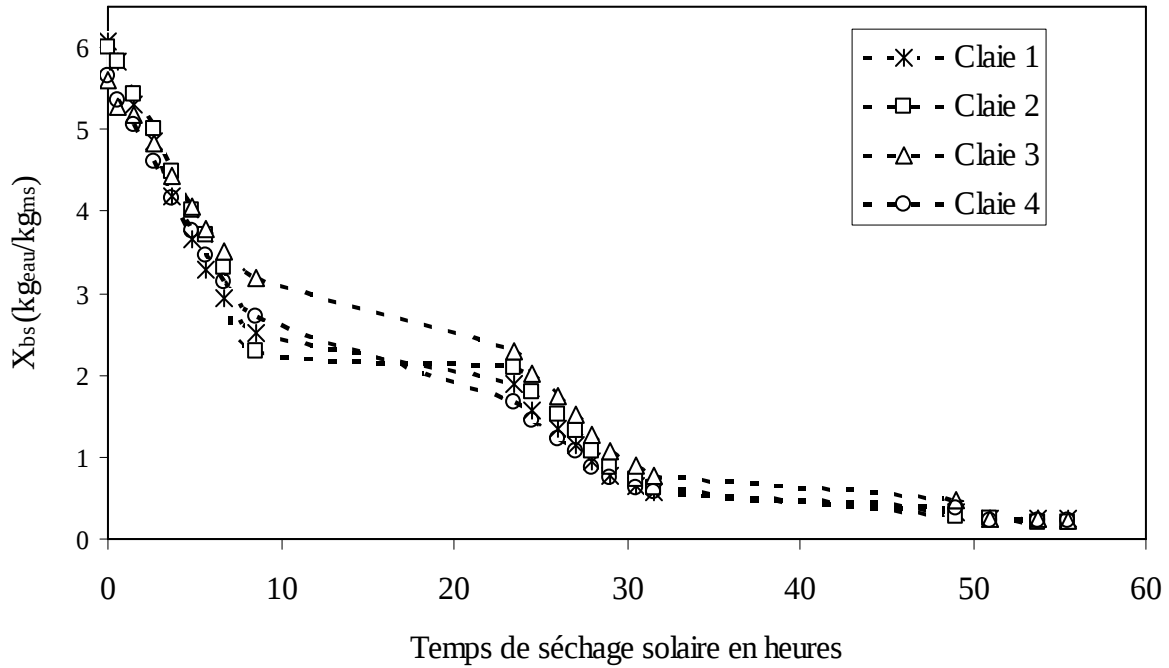
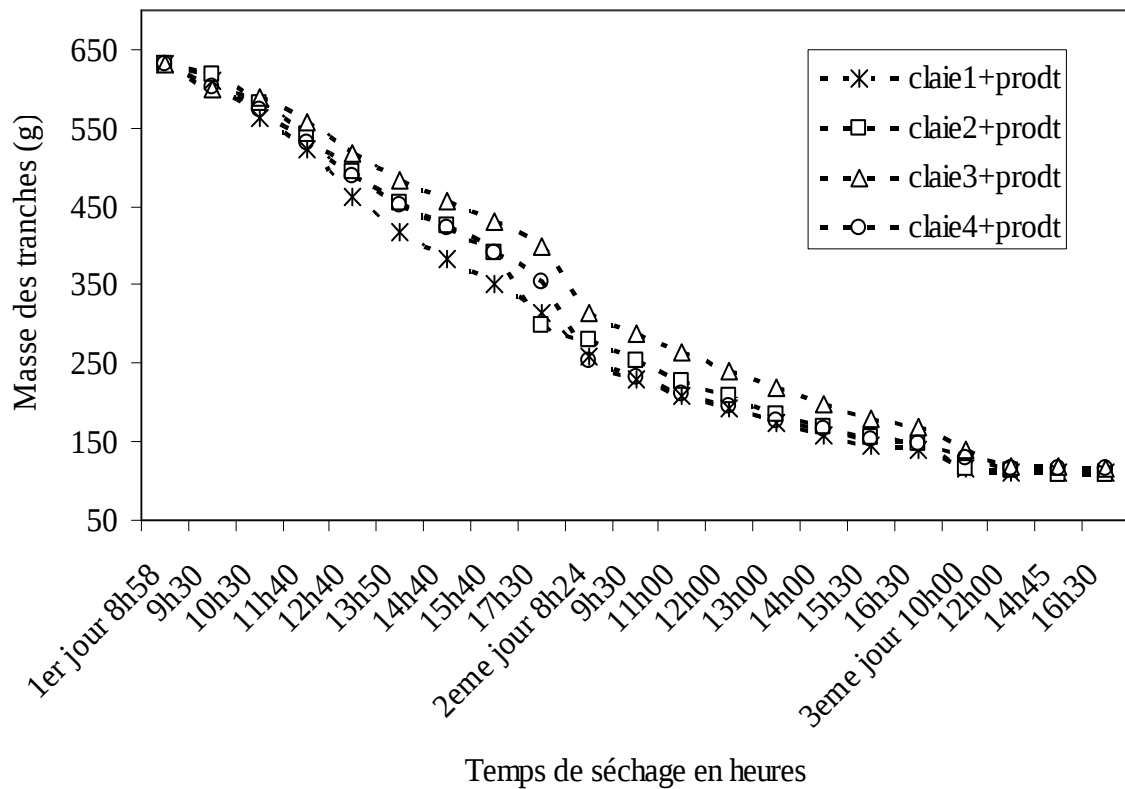


Fig. 4.18.c Séchage solaire indirect de la mangue : évolution de la résistance aux transferts externe en fonction de la teneur en eau au premier jour de séchage solaire.



(a) X (kg_{eau}/kg_{ms}) en fonction du temps de séchage



(b) m (g) versus heures réelles de séchage

Fig.4.19.a&b Influence de la position de la claie sur la courbe de teneur en eau et la masse des tranches de mangue Amélie: (a) X (kg_{eau}/kg_{ms}) vs temps (b) m (g) vs heures réelles de séchage.

5.2.2.3 Influence de la variété

L'influence de la variété sur les courbes de séchage et les vitesses de séchage de la mangue en séchage solaire indirect est présentée par les figures 4.20.a et b. Trois variétés de mangues ont été utilisées : Amélie, Brooks et Kent. Respectivement 3166g, 2524g et 2927g de pulpes fraîches ont été utilisées pour ces trois variétés. Compte tenue de la différence de teneur en eau initiale entre variétés, les courbes de séchage ont été exprimées par les teneurs en eau rapporté à la teneur en eau initiale. Ces courbes de séchage présentées sur la figure 4.20.a présentent le même profil pour les trois variétés et coïncident parfaitement le premier jour de séchage et surtout en fin de troisième jour de séchage. L'ensemble des vitesses de séchage de ces trois variétés présentent des maxima de $0.13 \text{ g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$, $0.07 \text{ g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$, $0.06 \text{ g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ respectivement le premier, le deuxième et le troisième jour de séchage. Des trois variétés, l'Amélie est celle qui sèche le mieux en début de séchage, la Brooks en fin de premier et deuxième jours et la Kent à la fin du séchage. Cependant, ces différences de vitesses de séchage observées entre variétés ne sont pas significatives. En plus, les trois variétés présentent des teneurs en eau résiduelles très proche à la fin du séchage. On conclut qu'il n'apparaît aucune influence de la variété sur le séchage solaire indirect. On en déduit que pour les trois variétés de mangues les plus utilisées pour le séchage au Burkina Faso, le type de variété des tranches de mangue n'aurait pas assez d'influence sur le processus de séchage solaire indirect.

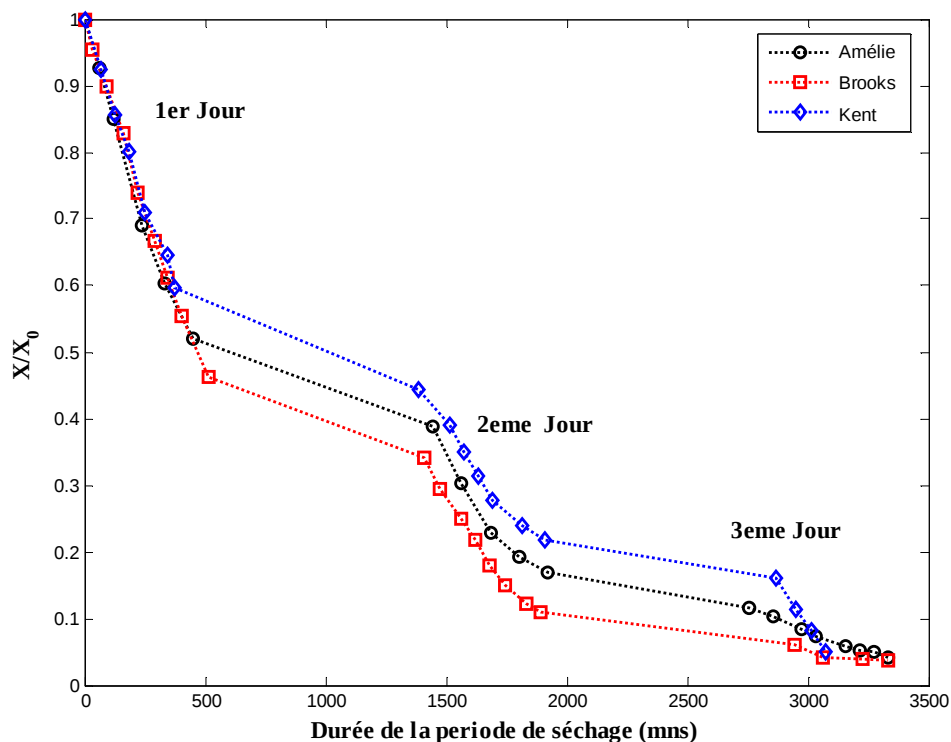


Fig. 4.20.a: Influence de la variété sur les profils de teneur en eau de tranche de mangue d'épaisseur 8mm séchées en couche mince par séchage solaire indirect.

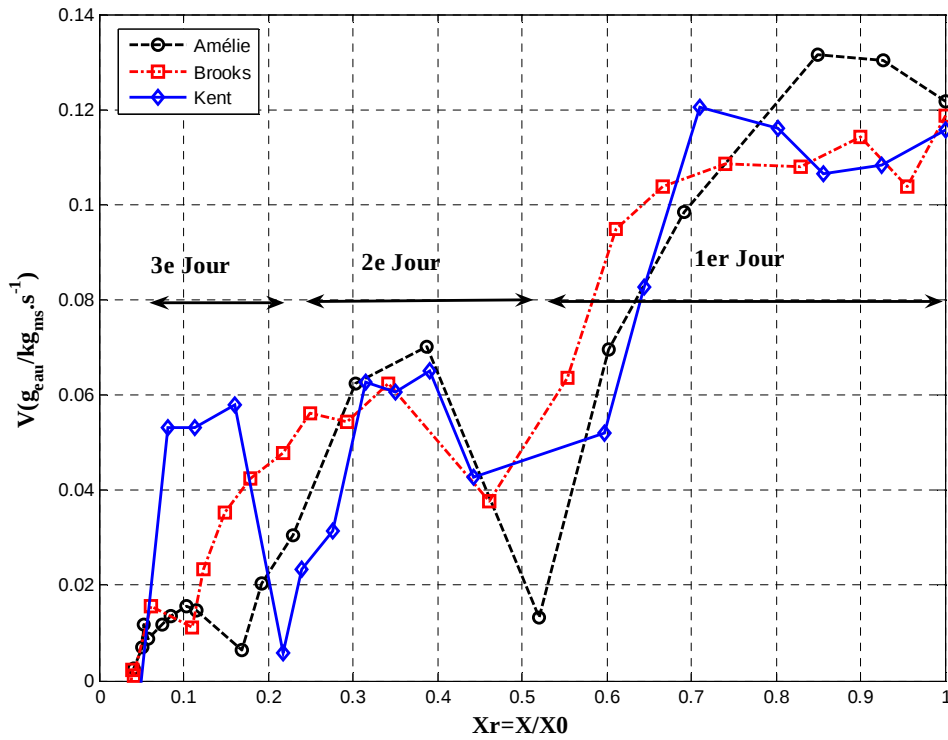


Fig. 4.20.b: Influence de la variété sur les cinétiques de séchage solaire indirect en couche mince de tranche de mangue d'épaisseur 8mm.

5.2.3 Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

Les figures 4.21.a, b, c&d présentent l'évolution des courbes de séchage expérimentales et simulées des variétés Amélie, Brooks et Kent en mi-mai, fin mai, début juin et mi-juin. On constate que pour chacune des journées de séchage, les profils des courbes théoriques et expérimentales sont très proches en début de matinée ($R^2 = 0.991$) et très écartés en fin de soirée ($R^2 = 0.88$). Ces différences observées en fin de journée entre les courbes de séchage simulées et expérimentales s'expliquent en partie par la prise en compte des températures moyennes des organes pendant le modèle du fonctionnement du capteur solaire. Cette hypothèse néglige l'énergie stockée au cours de la journée dans la partie poreuse de l'absorbeur et qui est restituée à l'air caloporteur en fin de journée lorsque la puissance du rayonnement commence à baisser. La température de l'air à l'entrée de la cage de séchage en fin de journée est donc sous-estimée et les cinétiques de séchage simulées sont alors en deçà des valeurs réelles. Ainsi, pour le séchage de la variété Amélie au mois de mai, la simulation permet d'approcher des teneurs en

eau de 3.4, 1.3 et 0.3 $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ respectivement en fin de premier, deuxième et troisième jours de séchage, alors que les teneurs en eau expérimentales observées à la fin des trois jours de séchage sont respectivement de 3.1, 1, 0.25. Ces résultats montrent clairement qu'en fonction de l'heure de la journée, le modèle utilisé peut surestimer la teneur en eau réelle des tranches. Sur l'ensemble des expériences et des simulations de séchage solaire réalisées, le séchoir solaire prototype de la figure 4.2 permet d'atteindre en trois jours de séchage la teneur en eau moyenne de 0.21 ± 0.09 (bs) [17% bh]. Cette teneur en eau finale de conservation est dans l'ordre de grandeur donné par la littérature ($12 \leq x_{\text{bh}} \leq 20\%$, Siaka & Serge (2004)). Elle est supérieure à $13 \pm 2\%$ celle trouvée par Madhlopa, Jones & Kalenga (2002) et inférieure à 27.6% donnée par Siaka & Serge (2004) par séchage solaire direct. Les valeurs simulées de la teneur en eau des figures 4.21.a, b, c&d permettent en moyenne de prédire de façon satisfaisante les cinétiques de séchage en couche mince de tranche de mangue. Cependant, le modèle global de couplage du capteur et de l'unité de séchage pourrait être amélioré en tenant compte de la transition jour-nuit de façon plus précise par évaluation de la quantité journalière d'énergie stockée par le capteur. Cette évaluation permettra de mieux comprendre les mécanismes de la poursuite nocturne du séchage.

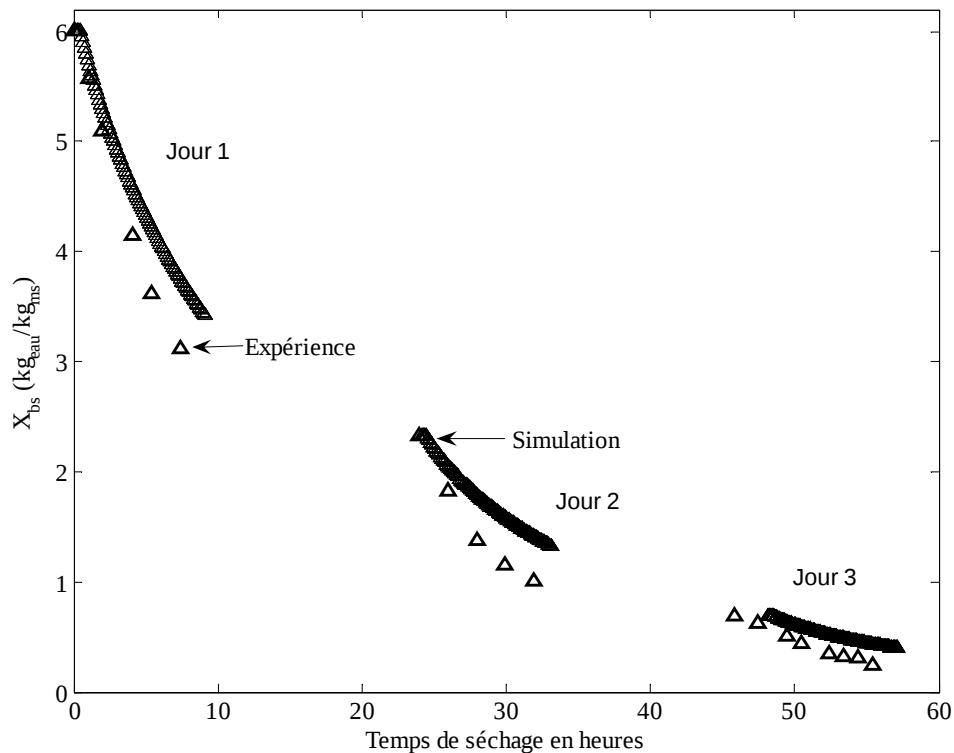


Fig.4.21.a Comparaison des profils de teneurs en eau expérimentales et simulés par séchage solaire de la variété Amélie en mi- mai (21, 22 et 23 mai 2006).

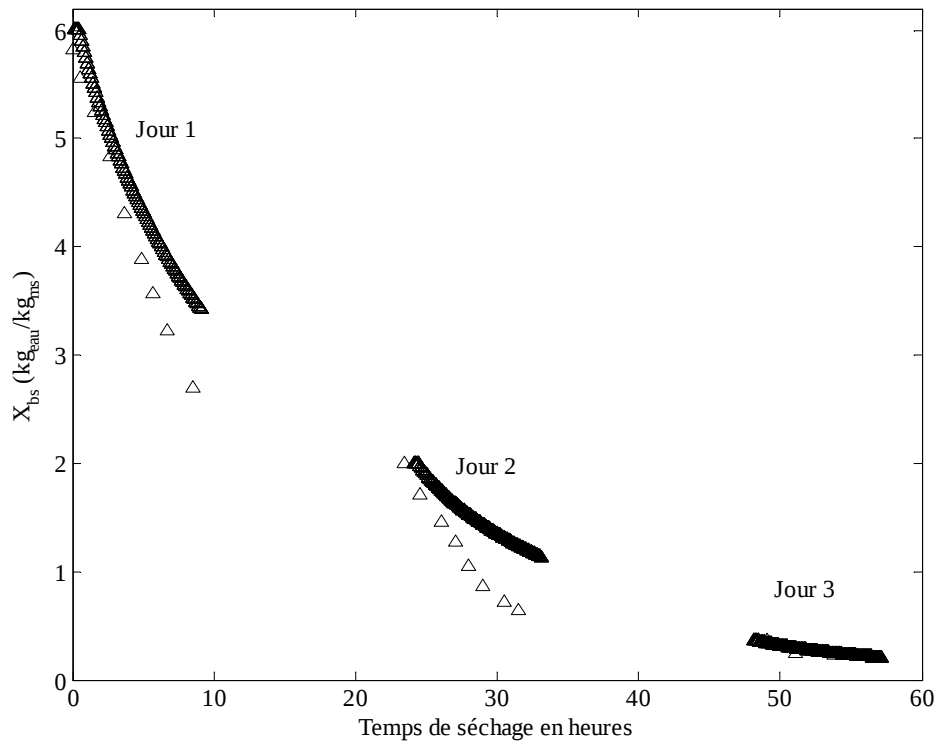


Fig.4.21.b Comparaison des profils de teneurs en eau expérimentales et simulés par séchage solaire de la variété Brooks en fin mai (27, 28 et 29 mai 2006).

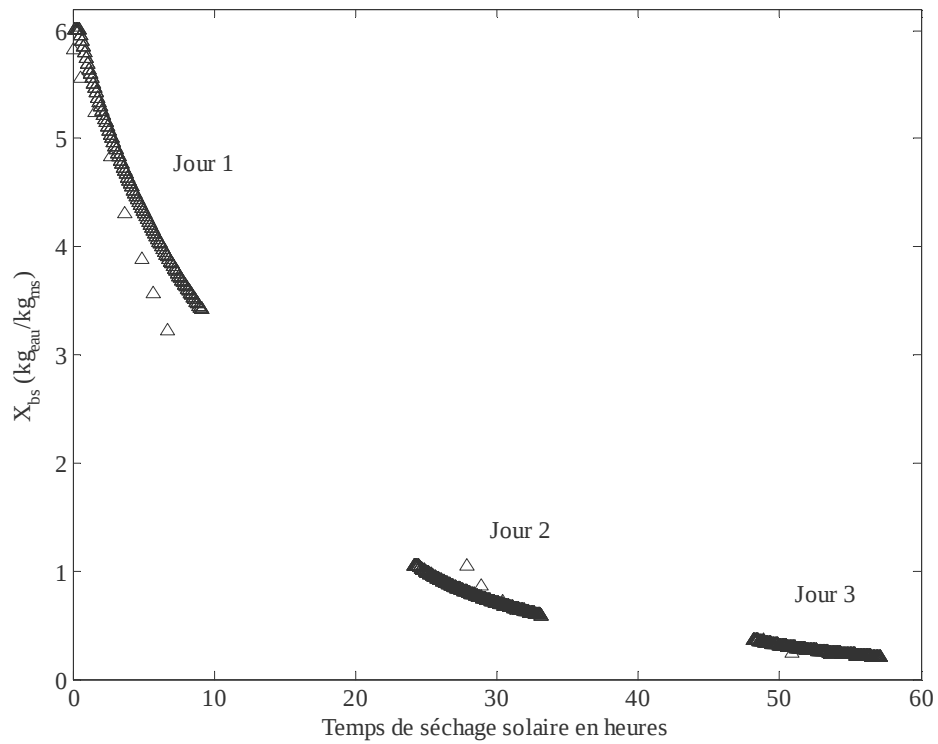


Fig.4.21.c Comparaison des profils de teneurs en eau expérimentales et simulées par séchage solaire de la variété Amélie en début juin (02, 03 et 04 juin 2006).

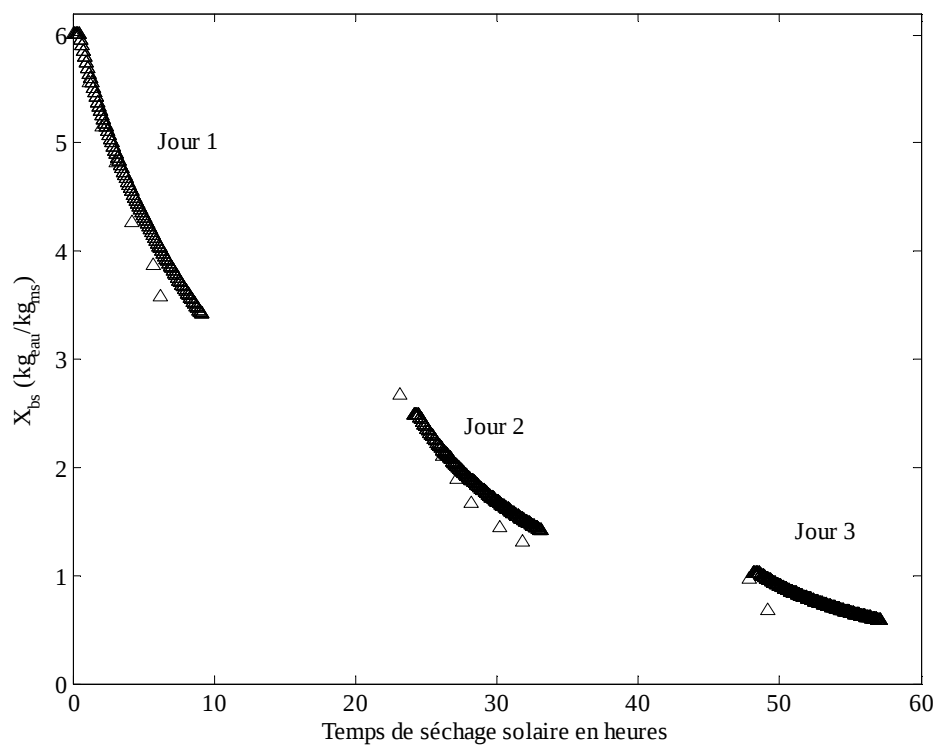


Fig.4.21.d Comparaison des profils de teneurs en eau expérimentales et simulées par séchage solaire de la variété Kent en mi-juin (11, 12 et 13 juin 2006).

Conclusion

Dans cette étude un prototype de séchoir solaire indirect a été expérimenté et simulé. Le mode de fonctionnement du capteur a permis de montrer qu'il permet d'élever la température de l'air plus de 30°C et d'atteindre des températures maximales dans les claies supérieures à 60°C au midi solaire vrai d'un jour moyen des mois d'avril, de mai et de juin. Théoriquement, ce séchoir peut ainsi assurer le séchage de 3kg de tranches de fruit/m² de captation de 85% (bh) à 15% (bh) sur une base de trois jours moyens d'ensoleillement du mois. Les résultats de simulation présentés ont montré qu'une grande partie du séchage solaire à lieu les deux premiers jours de séchage avec près de 75% d'eau évacuée. L'étude expérimentale du séchoir a montré qu'il permet d'atteindre des températures maximales de l'unité de séchage de 46, 50 et 63°C respectivement au premier, deuxième et troisième jour de séchage. La différence de température maximale entre l'air et les tranches a été observée au premier jour et était de 11.93°C. Il ressort de ces résultats expérimentaux que le séchage solaire indirect se fait à vitesse constante le premier jour et à vitesse décroissante les deux derniers jours. Afin de déterminer au premier jour le coefficient de transfert externe h_m , une corrélation a alors été établie entre la résistance aux transferts externes et la teneur en eau (bs). Malgré l'hypothèse de « température moyenne » des organes du capteur émise dans les démarches de calcul, le modèle global de couplage du capteur et de l'unité de séchage a montré des profils temporels de teneurs en eau très proches des valeurs expérimentales. Les teneurs en eau finales de conservation obtenues étaient alors de l'ordre de grandeur de celles de la littérature ($12 \leq x_{bh} \leq 20\%$). Cependant, malgré la bonne concordance entre les courbes de séchage simulées et expérimentales, ce modèle nécessite des améliorations, notamment par prise en compte de:

- l'énergie stockée dans les organes du capteur
- L'influence des paramètres thermiques et hygrométriques sur la poursuite du séchage nocturne.

CHAPITRE 5

SECHAGE DE LA MANGUE EN COUCHES MINCES : COMPARAISON DU SECHAGE SOLAIRE INDIRECT AVEC LE SECHAGE SOLAIRE DIRECT ET LE SECHAGE CONVECTIF ELECTRIQUE

Dans ce chapitre, une étude expérimentale du séchage en couche mince de tranches de mangue par trois procédés généralement utilisés en Afrique subsaharienne est présentée. Trois types de séchoirs dont le séchoir solaire indirect étudié au chapitre 4, un séchoir solaire direct et un séchoir électrique sont utilisés. Les cinétiques de séchage en couches minces établies à l'aide des trois séchoirs sont présentées et comparées. On étudie ainsi l'influence du type de procédé sur les courbes de séchage, puis l'influence de la variété sur les vitesses de séchages par chaque type de procédés et enfin, l'influence de la température sur le séchage convectif électrique. Ce travail participe à une meilleure compréhension des différences face au séchage entre variétés de mangues et entre procédés de séchage.

1 Matériels et méthodes

1.1 Présentation des équipements de séchage

Les dispositifs de séchage utilisés pour les trois procédés sont : le séchoir solaire indirect étudié au chapitre 4, un séchoir solaire direct et un séchoir convectif électrique.

1.1.1 *Séchage solaire direct*

Le séchage solaire direct a été expérimenté au mois de mai 2006 au site de l'IRAD (Institut de Recherche Agricole pour le Développement) de Garoua (Nord Cameroun) situé à la latitude 9°20'N Nord. Les claies de séchage de dimensions 0,190 m x 0,98 m sont constituées d'un cadre en bois blanc dont le bas est recouvert d'une toile en matière synthétique. Trois variétés de mangue ont été utilisées : Amélie, Zill et Irwin. Environ 100 g de tranches de mangue rondelles coupées parallèlement au noyau sont disposées sur chacune des claies. Cette claie est ensuite recouverte par une autre de même nature. Ces dispositions empêchent tout

contact du produit avec le milieu extérieur (mouches, abeilles, reptiles...). Les claies sont ensuite déposées sur un support d'environ 1.0 mètre de haut puis exposées directement au soleil (fig. 4.1.1). Par cycle de séchage, un retournement des tranches de 3 à 4 fois est effectué. Ces essais de séchage solaire direct ont été effectués trois fois simultanément pour chaque variété.

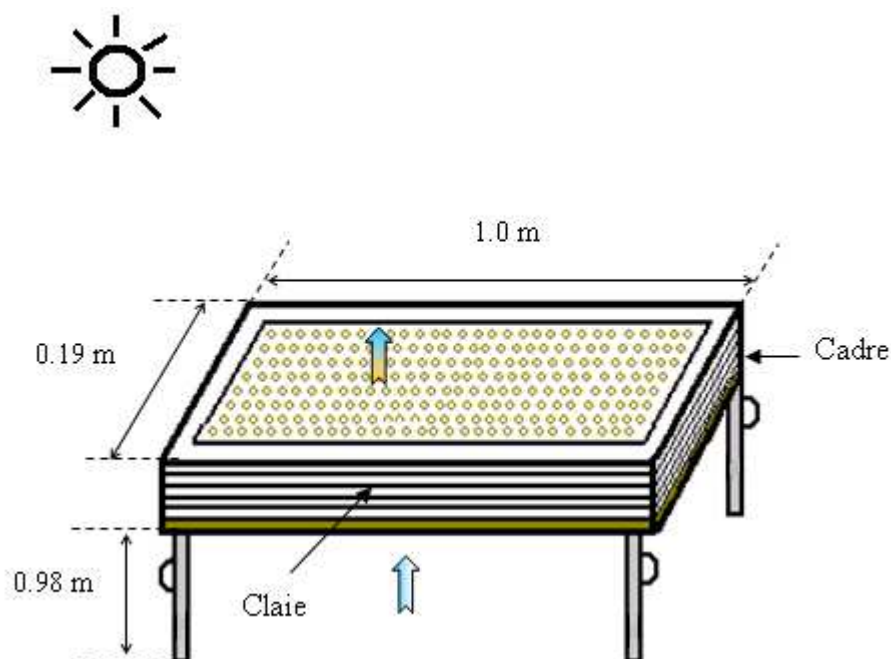
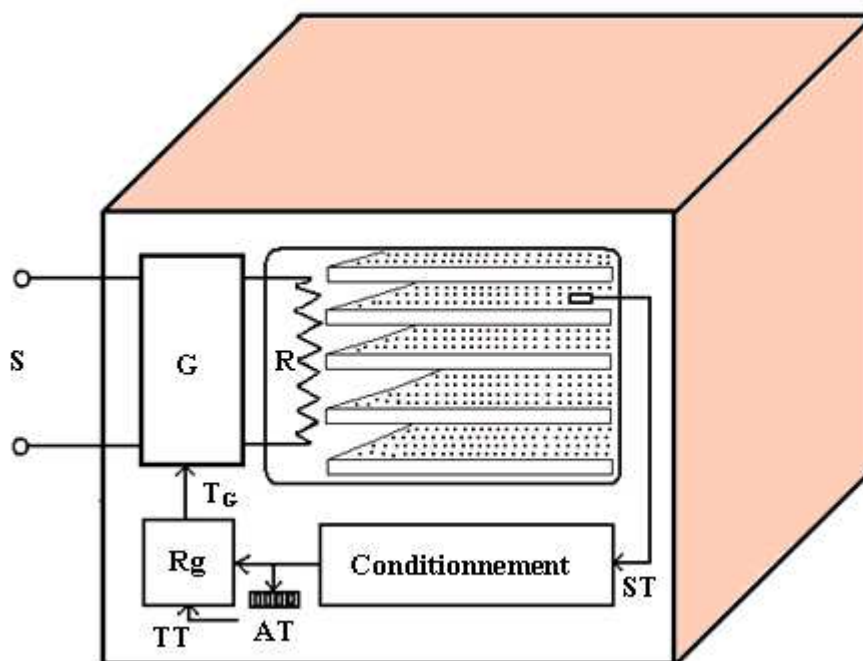


Fig.4.1.1. Schéma de principe du séchoir solaire direct, IRAD (Garoua)

1.1.2 Séchage convectif électrique

Le four électrique Turbo mixte à air pulsé chaud de marque Bonnet, Type TMN 106 E du centre de l'IRAD de Garoua a servi de séchoir pour les variétés Julie, Amélie, Irwin et Zill. Cet appareil de 124W peut contenir jusqu'à 5 claies de $0,16\text{ m}^2$ de surface et une capacité de 5 kg de pulpe fraîche. Les tranches de mangues sont disposées sur des claies recouvertes de toiles en plastique. Les quatre claies chargées sont introduites lorsque le four atteint la température de consigne, de 40, 50 ou 60°C selon les expériences. Le séchage est assuré par l'air chaud qui traverse perpendiculairement les claies. La chaleur est transférée au produit par convection tandis que l'élimination de l'eau se fait par entraînement à l'air sec qui se charge en humidité. Le retournement des tranches au-dessus des claies est effectué une ou deux fois pendant le séchage. Les expériences ont été répétées en trois essais pour chaque variété à chaque température.



R : Résistance de chauffage, **S** : Secteur; **G** : Gradateur; **Rg** : Régulateur; **AT** : Affichage de température; **ST** : Sonde de température; **T_G** : Tension de commande du gradateur; **TT** : Tension de consigne de Température.

Fig.4.1.3. Schéma de principe du séchoir électrique, IRAD (Garoua)

1.2 Préparation des mangues

Les mangues utilisées dans cette étude proviennent des marchés locaux de fruits de Ouagadougou (Burkina Faso) pour le séchage solaire indirect; et de Garoua (nord du Cameroun) pour le séchage solaire direct et le séchage convectif électrique. Les variétés correspondantes sont du type monoembryonnées (Amélie, Julie) et du type floridienne (Kent, Zill, Irwin, Brooks). En fonction des périodes de maturation, ces variétés peuvent être classées en variétés précoces ou sémi-précoces, si la récolte a lieu entre avril et mi-juin (Zill, Amélie, Julie et Irwin) et en variétés tardives ou de saison, pour une récolte de juin à début Août (Brooks, Kent) (Didier, 1998). Ces principales variétés de mangue disponibles au Burkina Faso et dans la région de Garoua au Cameroun diffèrent physiquement par leur forme, leur teneur en eau et l'apparence de leur chair. Chacune de ces variétés a été caractérisée par la morphologie (couleurs et dimensions) et la masse moyenne de son fruit au chapitre 2. Pour les opérations de séchage, les fruits sélectionnés sont lavés à l'aide d'eau additionnée de quelques gouttes d'eau de javel, rincés abondamment à l'eau potable puis pesées. A l'aide d'un couteau en acier

inoxydable, les fruits sont pelés, dénoyautés puis découpés en tranches sous formes de rondelles. L'ensemble des opérations de préparation est représenté par la figure 4.1.4.

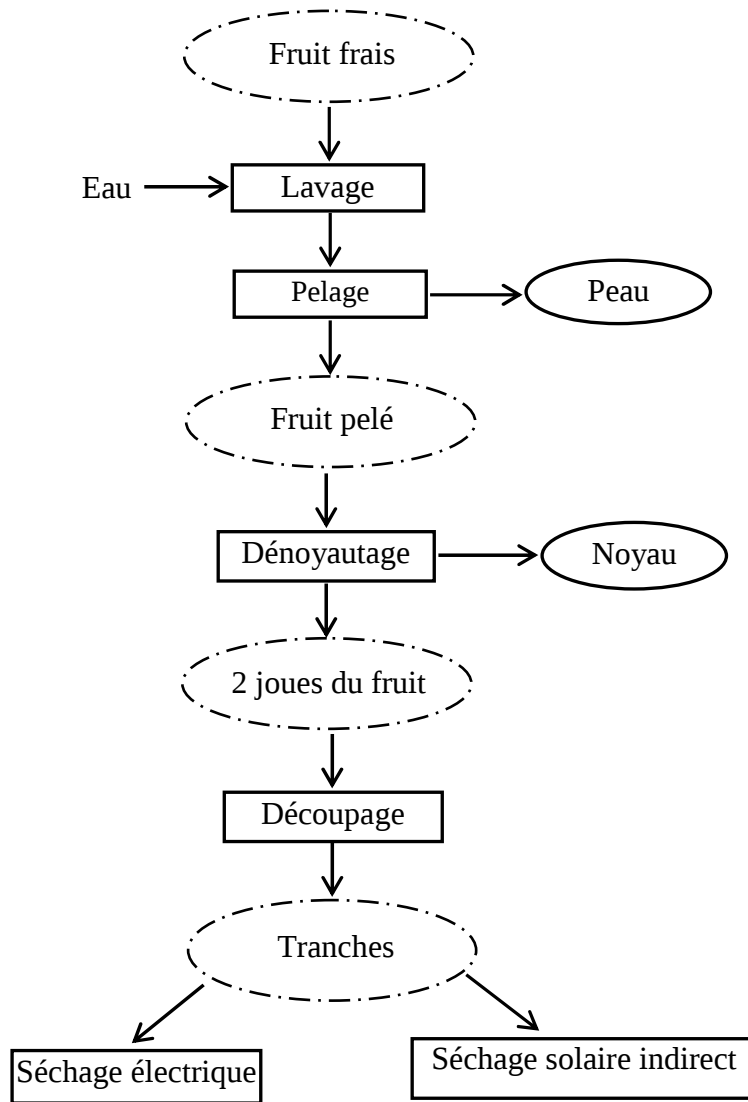


Fig. 4.1.4: Protocole de production de tranches d'épaisseur moyenne 8mm pour le séchage

2. Résultats

2.1 Caractérisation des séchoirs solaires

2.1.1 Données sur le rayonnement

Les résultats de simulation du rayonnement solaire du 15 mai, jour moyen du mois de mai pour les villes de Garoua (9°20') et de Ouagadougou (12°21'N) sont présentés sur la figure 4.2.6. Ces résultats montrent que les puissances du rayonnement direct, diffus et global de ces deux localités sont suffisamment proches et passe respectivement par les maxima de 523, 340 et de 863 W/m² au midi solaire vraie pour cette période de l'année. Cette tendance se justifie par des valeurs proches de la latitude de ces deux villes ayant servi de sites d'opérations de séchage solaire direct et indirect. Ces données sur le rayonnement nous autorisent donc à comparer les résultats de séchage solaire réalisées dans ces deux localités.

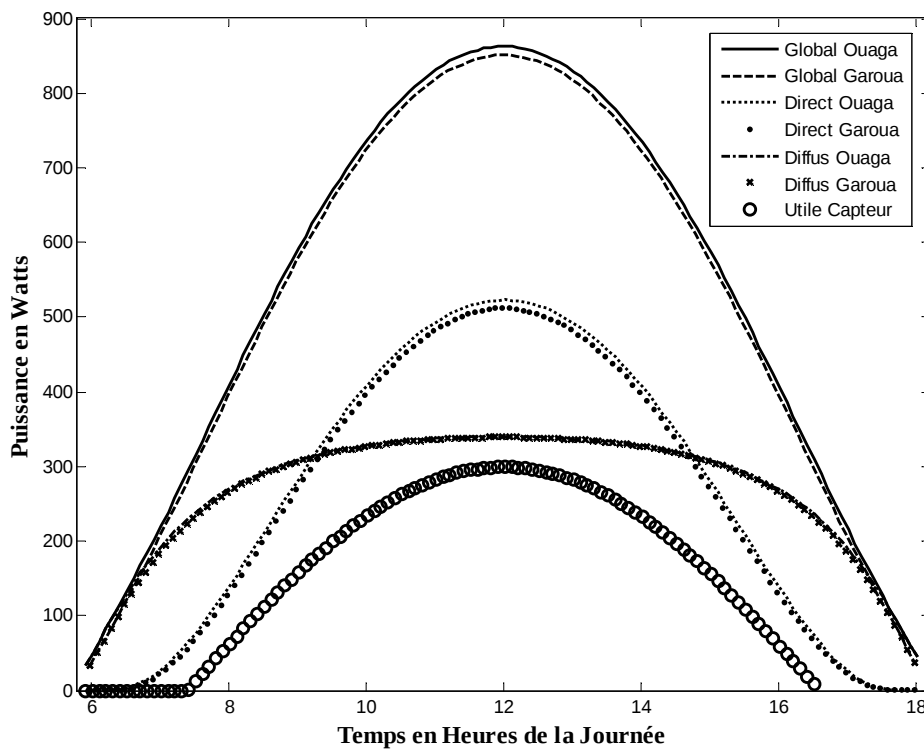


Fig.4.2.1. Calcul de la puissance du rayonnement direct, diffus et global pour le jour moyen du moi de mai à Ouagadougou et à Garoua; détermination de la puissance utile du capteur solaire par m².

2.1.2 Données sur les conditions extérieures en séchage solaire direct

Les opérations de séchage solaire direct ont eu lieu les 16, 17, 18 et 19 mai 2006 en trois essais simultanés. L'hygrométrie moyenne et la température moyenne ambiante de cette période de séchage étaient respectivement de 55% et de 25°C.

2.2 Comparaison du séchage solaire direct et indirect de la variété Amélie

L'évolution de la teneur en eau normée, en fonction de la durée de séchage pour la variété Amélie par séchage solaire direct et indirect est présentée sur la figure 4.2.4.a. Les courbes de vitesses de séchage solaire direct et indirect de cette variété en fonction de la teneur en eau normée sont présentes sur la figure 4.2.4.b. Ces courbes montrent un ralentissement du séchage la nuit, mais pas un arrêt total. En séchage solaire direct, à la fin de la première, deuxième, troisième et quatrième journée, la teneur en eau résiduelle ne vaut plus que respectivement 40%, 15%, 10% et 8% de la teneur en eau initiale en base sèche. Les proportions d'eau évacuées par jour sont alors de 50% le premier jour, 25% le deuxième jour, 5% le troisième jour et 2 % le quatrième jour. En séchage solaire indirect, les teneurs en eau résiduelle à la fin de la première, de la deuxième et de la troisième journée, valent respectivement 50%, 10% et 5% de la teneur en eau initiale en base sèche (figure 4.2.4.a). De même, les fractions de la quantité totale d'eau évacuée par jour sont près de 50% pour le premier jour, 40% pour le deuxième jour et 5% pour le troisième jour. On en déduit qu'en séchage solaire direct comme indirect, la majeure partie du séchage a lieu le premier et le deuxième jour. L'eau évacuée pendant ces deux premiers jours représente l'eau non liée du produit facile à éliminer. Cela justifie les fortes vitesses de séchage alors observées. Ces vitesses atteignent pour le solaire direct et indirect respectivement 0.13 et 0.15 g.kg⁻¹.s⁻¹ pour le premier jour et 0.08 et 0.07 g.kg⁻¹.s⁻¹ pour le deuxième jour. Pendant, cette période d'évacuation de l'eau non liée, le solaire direct semble plus performant que le solaire indirect. Cette performance décroît au fur et à mesure que la période d'évacuation de l'eau non liée tend vers sa fin. L'efficacité du solaire indirect par rapport au solaire direct n'est observable qu'à la fin du deuxième jour de séchage. A partir du troisième jour de séchage, le solaire indirect offre des vitesses de séchage supérieures à 0.01 g.kg⁻¹.s⁻¹ qui permettent d'achever le séchage. L'utilisation du solaire direct nécessite la poursuite du séchage jusqu'au quatrième jour et la

teneur en eau à la fin du séchage est plus élevée à cause des basses températures d'opération de ce mode de séchage. Sur l'ensemble des étapes du séchage, on peut tirer que le séchage solaire indirect offre plus de satisfaction à la fois en durée de séchage et en teneur en eau résiduelle. En effet, en trois jours de séchage, il permet d'avoir une teneur en eau normée de 5% alors qu'en quatre jours de séchage, le solaire direct ne permet pas d'obtenir des teneurs en eau normée en dessous de 9%. Ces résultats s'expliquent par le fait que le séchage solaire indirect a lieu à une température plus élevée. L'humidité relative de l'air séchant est alors plus faible et sa teneur en eau d'équilibre du produit sera aussi plus faible qu'en séchage solaire direct..

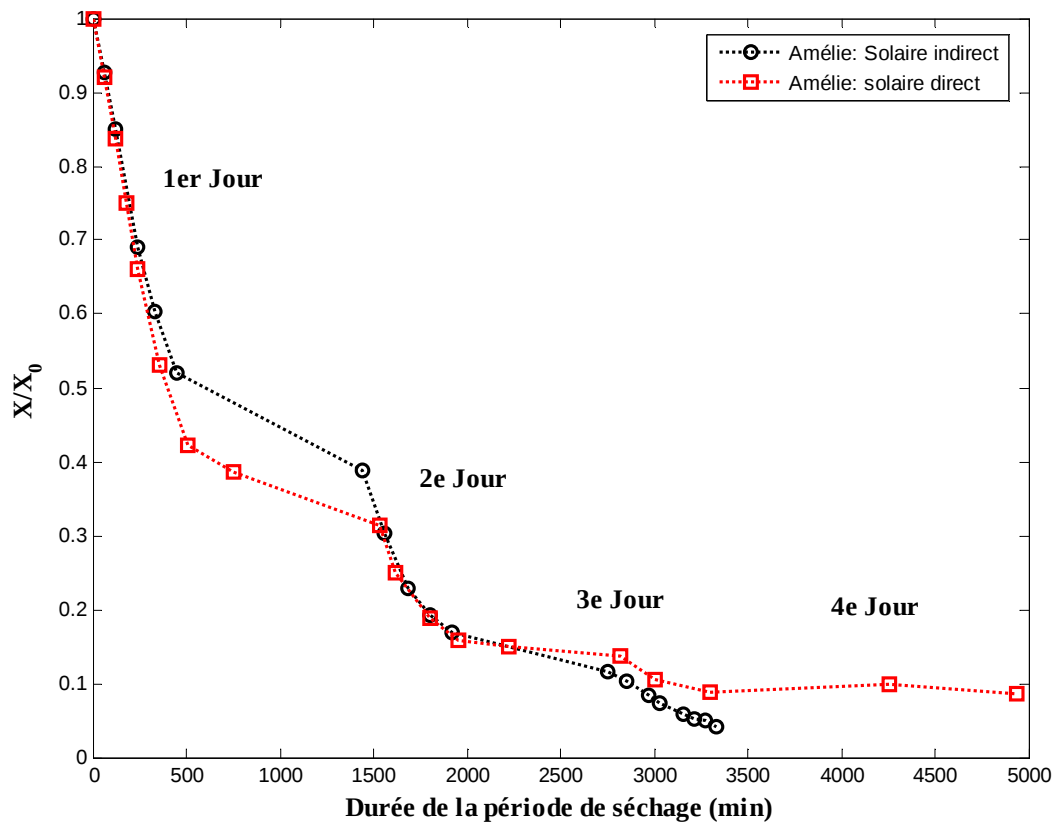


Fig.4.2.4 a Comparaison des profils de teneur en eau réduite par séchage solaire direct et indirect de tranches de la variété Amélie d'épaisseur moyenne 8 mm.

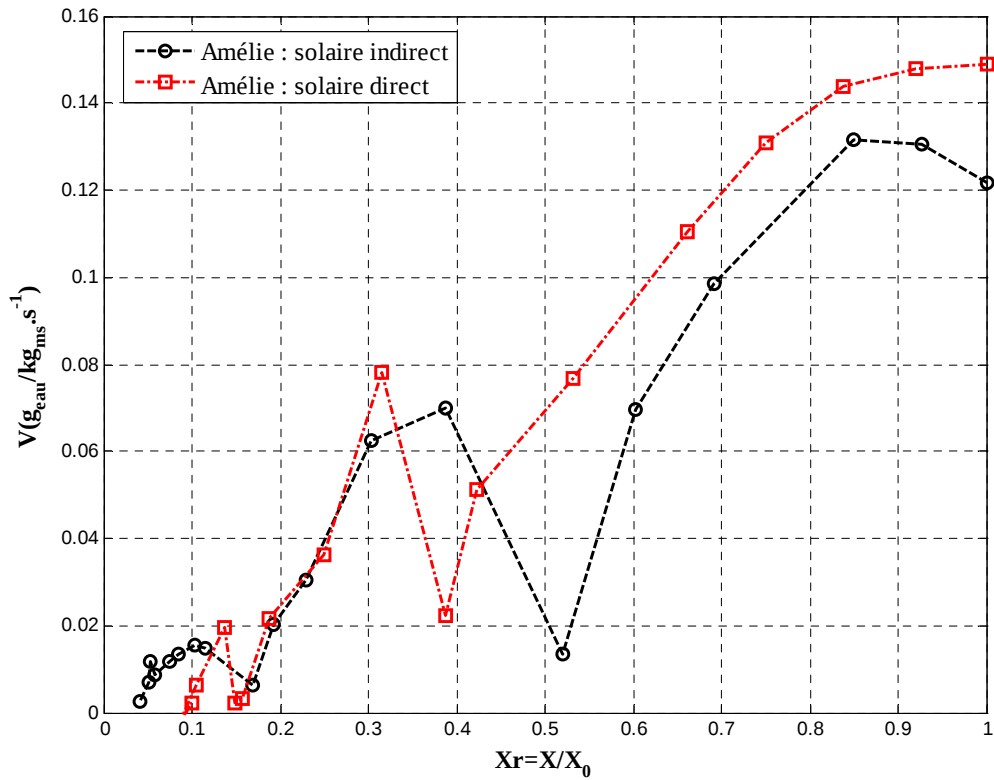


Fig.4.2.4 b Comparaison des cinétiques de séchage solaire direct et indirect de tranches de la variété Amélie d'épaisseur moyenne 8 mm.

2.3 Comparaison du séchage solaire et du séchage convectif électrique

Les figures 4.2.5.a présentent l'évolution de la teneur en eau normée en fonction du temps et la figure 4.2.5.b les vitesses de séchages en fonction de la teneur en eau normée par séchage solaire direct, indirect et par séchage convectif électrique à 40 et 50°C. Ces résultats montrent qu'au premier jour, les courbes de séchage solaire direct et indirect évoluent entre les courbes de séchage convectif électrique à 40°C et à 50°C avec des vitesses de séchage comprises entre 0.1 $g.kg^{-1}.s^{-1}$ et 0.16 $g.kg^{-1}.s^{-1}$. Pour la majeure partie du séchage, les vitesses de séchage solaire direct et indirect sont inférieures aux vitesses de séchage convectif électrique à 40 et 50°C. D'où les courtes durées de séchage observées en convection électrique. A titre d'exemple, le séchage solaire indirect permet d'obtenir en 2.5 jours de séchage une teneur en eau résiduelle de 10% X_0 tandis que le séchage convectif électrique à 50°C permet d'obtenir cette fraction de la teneur en eau initiale en un jour.

Ce comportement des tranches de mangue face au séchage solaire traduit le ralentissement du séchage provoqué par l'absence d'ensoleillement au coucher du soleil et le déficit énergétique représentant le refroidissement du produit au cours de la nuit. Ces deux facteurs augmentent la durée du séchage solaire malgré le fait que dans le cas du séchage solaire indirect la température dans le séchoir soit en moyenne supérieure à 40°C aux deux derniers jours de séchage. Ces résultats nous permettent de conclure qu'en début de séchage solaire, correspondant à la période d'évacuation de l'eau libre, les tranches de la variété de mangue Amélie sèche comme en séchage convectif électrique et sèche moins vite pour les autres étapes du séchage.

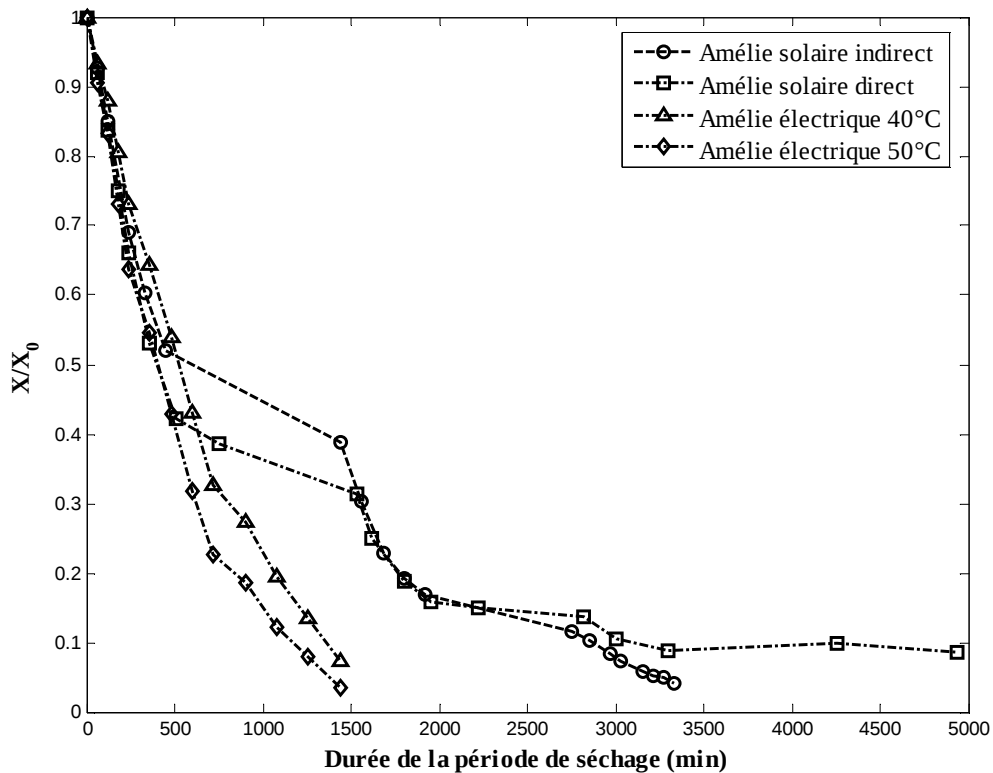


Fig.4.2.5.a Comparaison des profils de teneur en eau réduite par séchage solaire direct, indirect et par séchage convectif électrique à 40 et 50°C de tranches de la variété Amélie d'épaisseur moyenne 8 mm.

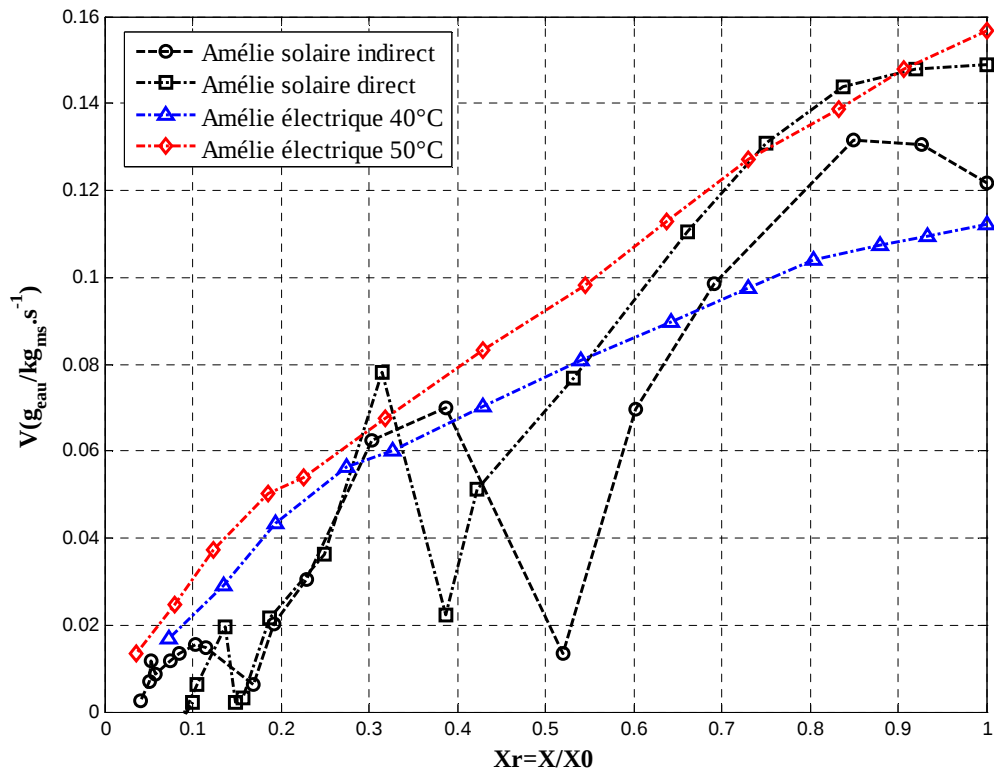


Fig.4.2.10.b Comparaison des cinétiques de séchage solaire direct et indirect et de séchage convectif électrique à 40 et 50°C de tranches de la variété Amélie d'épaisseur moyenne 8 mm.

2.4 Influence de la variété sur les cinétiques de séchage solaire direct et convectif électrique en couche mince

2.4.1 Séchage solaire direct

Le séchage solaire direct en couche mince a été mené sur trois claies indépendantes et pour trois variétés : Amélie, Zill et Irwin. Les courbes de séchage données par l'évolution de la teneur en eau normée et de la vitesse de séchage pour les trois variétés sont présentées sur la figure 4.2.6.a et 4.2.6.b. Ces données montrent que s'il n'existe pas de différence significative entre les vitesses de séchage solaire des variétés Amélie et Zill, en revanche ces deux variétés séchent beaucoup plus vite que la variété Irwin. En effet, les maxima des vitesses de séchage de l'Amélie et de la Zill approchent respectivement 0.15, 0.08 et 0.02 $\text{g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ le premier, le deuxième et le troisième jour de séchage alors que celle de l'Irwin n'avoisine que 0.12, 0.05 et 0.01 $\text{g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ pour les mêmes jours. Au bout de quatre jours de séchage, la teneur en eau

résiduelle des variétés Amélie et Zill approche $0.1 X_0$ alors que celle de l'Irwin est près de $0.18 X_0$. Ces résultats nous permettent de déduire que le type de variété peut avoir une influence sur le séchage solaire direct en couche mince de la mangue.

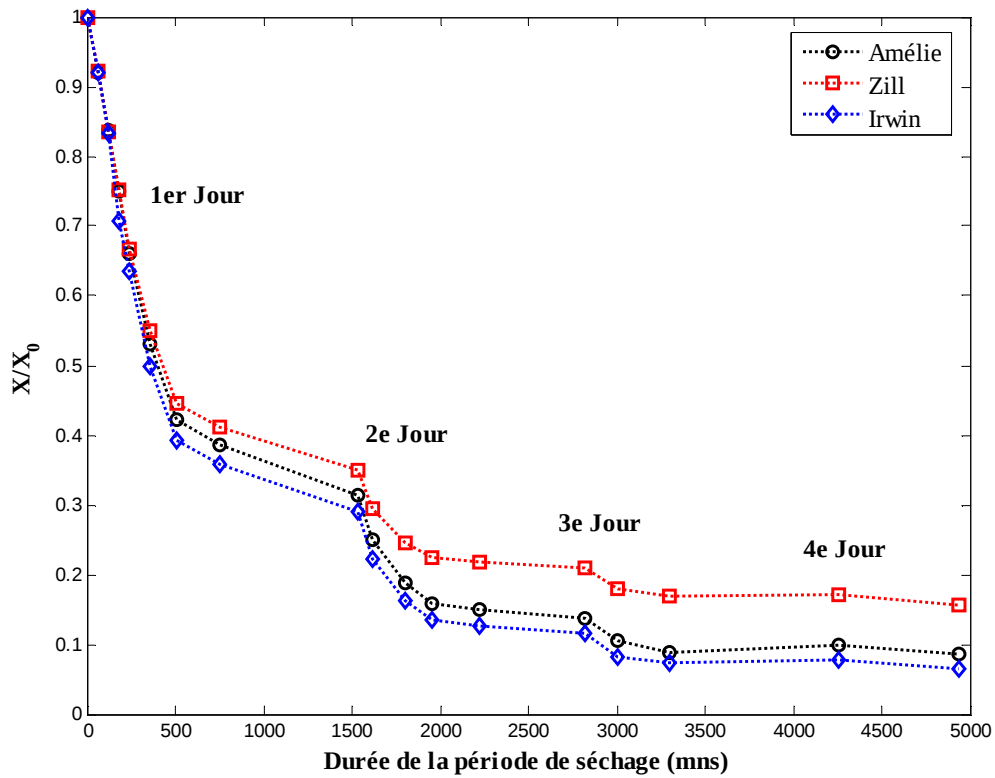


Fig.4.2.6.a : Influence de la variété sur les évolutions de teneur en eau de tranche de mangue d'épaisseur 8mm séchées en couche mince par séchage solaire direct.

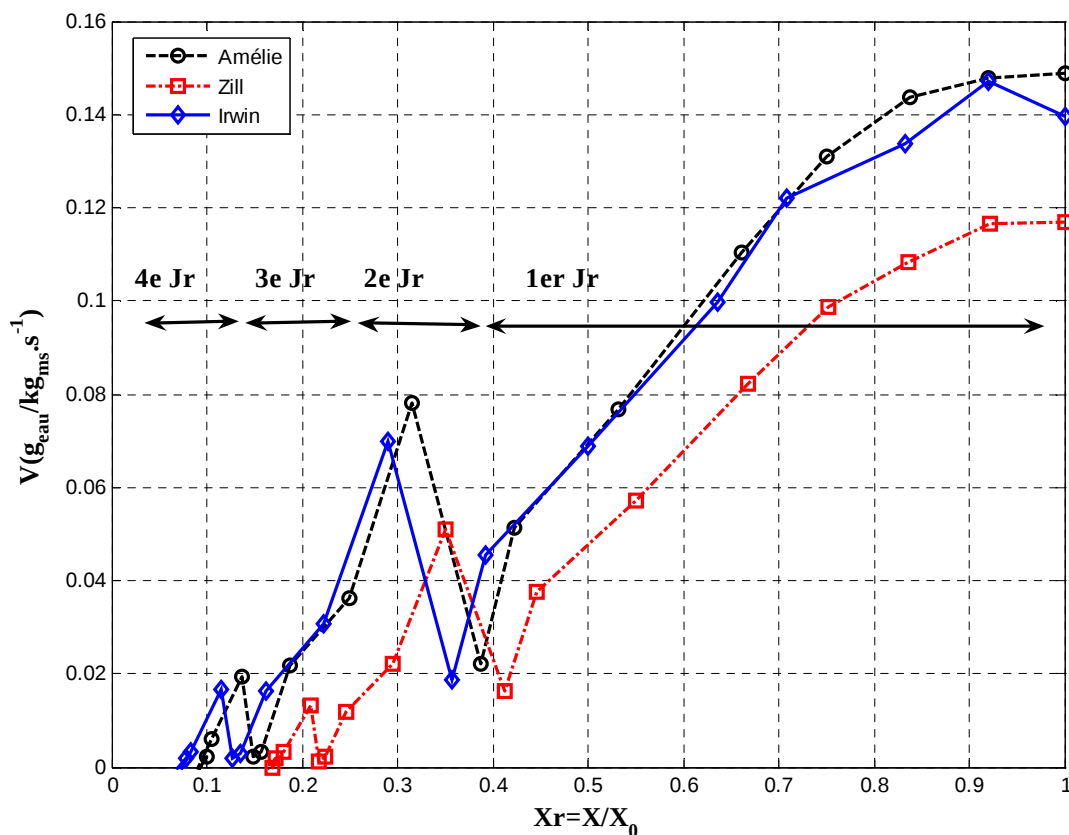


Fig.4.2.6.b : Influence de la variété sur les cinétiques de séchage solaire direct en couche mince de tranche de mangue d'épaisseur 8mm.

2.4.2 Séchage convectif électrique

L'influence de la variété sur les vitesses de séchage en couche mince à 40, 50, 60 °C pour quatre variétés de mangues est présentée sur les figures 4.2.13.a, b et c. Les variétés utilisées sont : Julie, Amélie, Irwin et Zill. A 40°C, du début à la fin du séchage, les vitesses de séchage des ces quatre variétés évoluent entre 0.11 g.kg⁻¹.s⁻¹ et 0.003 g.kg⁻¹.s⁻¹. Sur l'ensemble des étapes du séchage, la variété Julie présente les plus fortes vitesses de séchage suivie des variétés Amélie et Irwin. Tout comme en séchage solaire direct, ou les températures approchent 40°C, ces deux variétés présentent des vitesses de séchage voisines et sèchent mieux que la variété Zill. A cette température, les différences observées entre les vitesses de séchage des variétés sont aussi importantes aux fortes qu'aux faibles teneurs eau. A 50°C et 60°C, l'ensemble des vitesses de séchage des quatre variétés varient entre 0.002 g.kg⁻¹.s⁻¹ et 0.175 g.kg⁻¹.s⁻¹ à 50°C et

$0 \text{ g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ et $0.27 \text{ g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ à 60°C . Pour ces deux températures, les vitesses de séchage les plus élevées sont observées chez la variété Zill suivie successivement de l'Amélie et la Julie et enfin l'Irwin. Il est facile de remarquer que les différences observées entre vitesses de séchage des différentes variétés sont plus importantes aux fortes teneurs en eau qu'aux faibles. A partir de l'ensemble de ces résultats, on en déduit qu'en séchage convectif électrique en couche mince, la variété peut avoir une influence sur les courbes de séchage. Cependant cette influence peut ne pas être la même aux fortes qu'aux faibles températures. En plus, les différences observées entre les cinétiques de séchage des variétés aux fortes teneurs en eau sont plus importantes au début qu'à la fin du séchage pour les températures élevées.

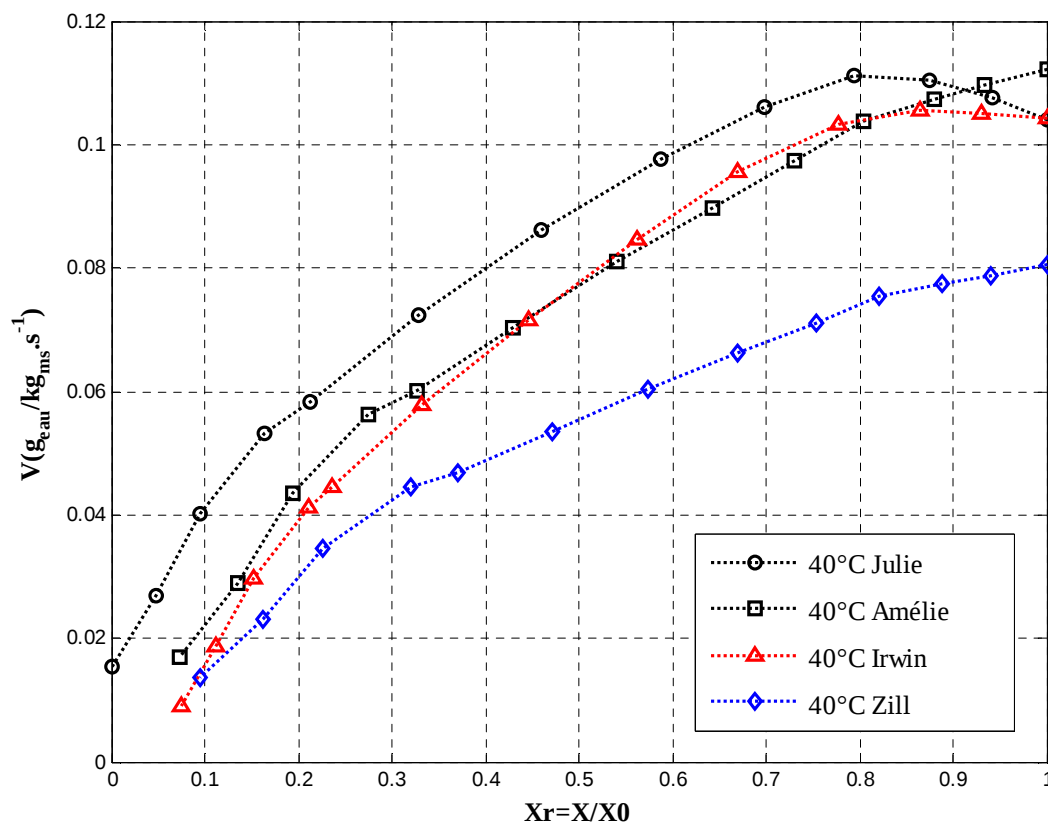


Fig. 4.2.8.a Influence de la variété sur les cinétiques de séchage convectif électrique à 40°C en couche mince de tranche de mangue d'épaisseur moyenne 8mm.

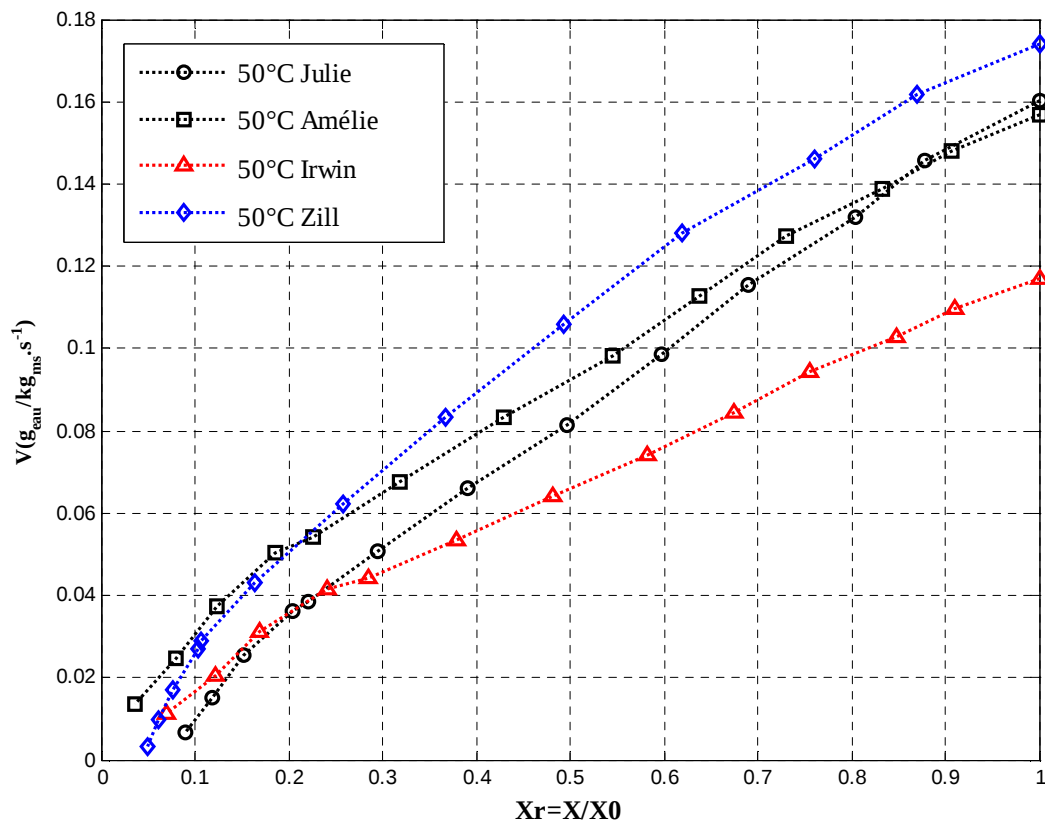


Fig. 4.2.8.b Influence de la variété sur les cinétiques de séchage convectif électrique à 50°C en couche mince de tranche de mangue d'épaisseur moyenne 8mm.

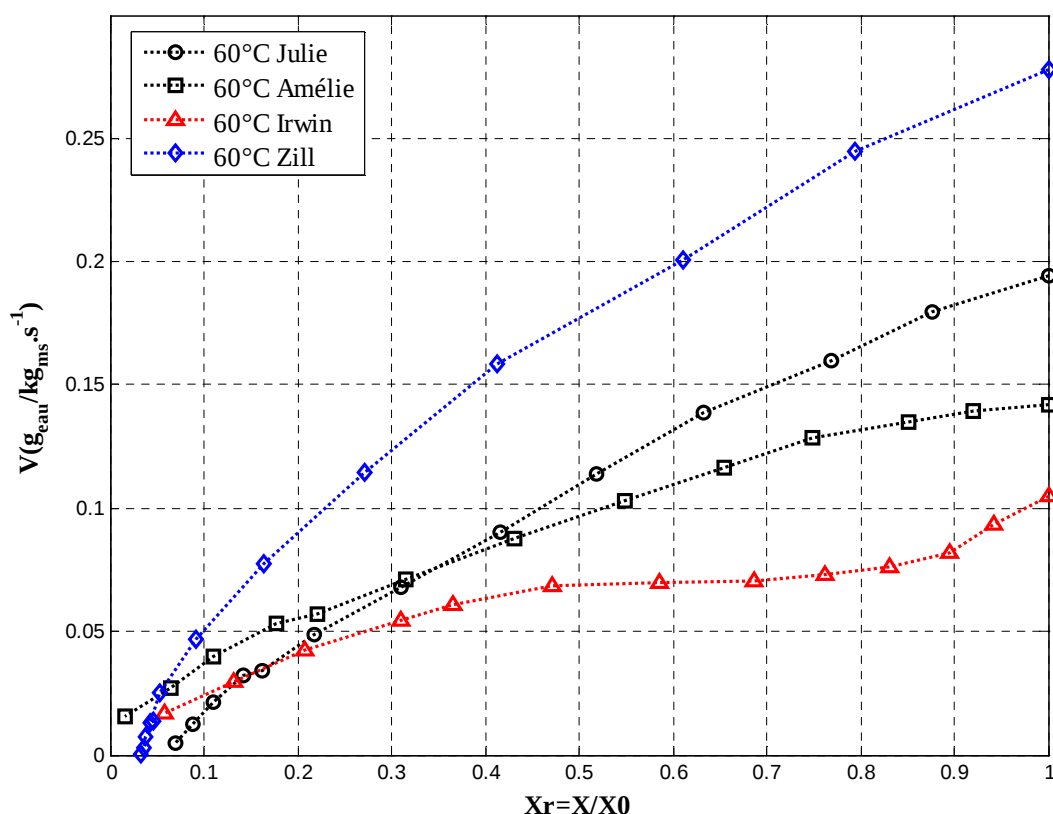


Fig. 4.2.8.c Influence de la variété sur les cinétiques de séchage convectif électrique à 60°C en couche mince de tranche de mangue d'épaisseur moyenne 8mm.

2.5. Influence de la température en séchage convectif électrique en couche mince

L'influence de la température sur la courbe de séchage convectif électrique en couche mince de tranche de mangue « Zill » d'épaisseur moyenne 8 mm à 40, 50 et 60°C est illustrée par la fig. 4.2.9.a. Chacune de ces courbes de séchage dérive de teneurs en eau obtenues à partir d'une moyenne sur trois essais. Les vitesses de séchage obtenues varient de 0.015 à 0.08 $\text{g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ à 40°C, de 0 à 0.17 $\text{g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ à 50°C et de 0 à 0.28 $\text{g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ à 60°C. Pour l'ensemble des teneurs en eau normée, les vitesses de séchage croissent lorsque la température croît de 40 à 60°C. On en tire que les cinétiques de séchage en couche mince des tranches de mangue sont fortement influencées par la température de séchage. Cependant, cette influence est beaucoup plus prononcée en début de séchage qu'en fin de séchage. Le dimensionnement de la durée du

séchage convectif électrique doit se faire en tenant beaucoup compte des températures d'opération envisagées et surtout des conditions de conservation des nutriments du produit.

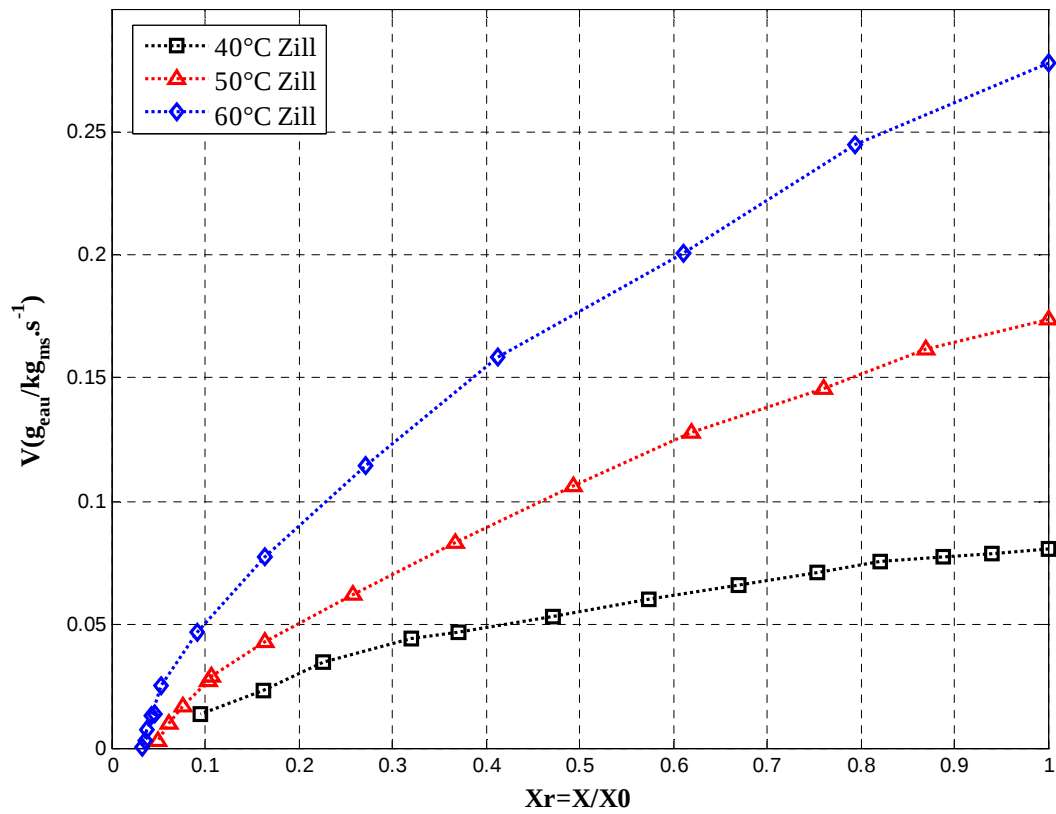


Fig. 4.2.9 Influence de la température sur les cinétiques de séchage convectif électrique de tranche de mangue d'épaisseur moyenne 8mm.

Conclusion

Dans ce travail, trois procédés de séchage de la mangue utilisés en Afrique subsaharienne sont étudiés expérimentalement. Une comparaison entre séchages solaire direct, indirect et convectif électrique de la variété Amélie est présentée et l'influence de la variété sur chacune des procédés est étudiée. Il ressort de cette étude que l'efficacité du séchage solaire indirect par rapport au solaire direct se révèle dans la phase d'évacuation de l'eau non liée du produit à partir de la fin du deuxième jour de séchage. Les tranches de mangue présentent un comportement en début de séchage solaire direct et indirect semblable au séchage convectif aux températures comprises entre 40 et 50°C. Il est montré que si le type de variété peut ne pas avoir d'influence sur le séchage solaire indirect, en revanche en séchage solaire direct et en séchage convectif électrique, elle peut en avoir. En séchage convectif électrique, cette influence n'est pas la même aux basses températures qu'aux fortes. De même elle est plus prononcée en début de séchage qu'en fin de séchage. Il est également montré que les vitesses de séchage sont plus influencées par la température en début de séchage qu'en fin de séchage. Ce travail nous a permis de contribuer à une meilleure compréhension de trois procédés de séchage en couche mince de la mangue en fonction des variétés. Il pourrait être complété par une comparaison entre ces procédés de séchage et le séchage convectif au gaz et par une étude sur l'influence de la maturité sur les différents procédés de séchage.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a été essentiellement consacrée au séchage convectif de la mangue.

Les conditions d'équilibre air-produit et le retrait du produit pendant le séchage convectif du fruit ont été en premier lieu caractérisées. L'isotherme de désorption de plusieurs variétés a été établie à 20°C et à 40° C et ses caractéristiques ont été déduites. Le retrait volumique des morceaux de fruit à 50, 60 et 70° C a été illustré expérimentalement et simulé par le modèle linéaire d'additivité des volumes. L'influence de la position, de la température, de la maturité, de la variété, de la découpe et de la taille sur le retrait volumique de la mangue a ainsi été analysée. Cette première partie de notre travail nous a permis de déduire que les modèles d'isothermes de Peleg, de GAB et de Henderson sont ceux qui ajustent le mieux l'isotherme de sorption des différentes variétés de mangue. Il a été trouvé que le type de variété a une influence sur cette isotherme à 20 et à 40°C avec une influence plus marquée à 40°C. La teneur en eau optimale de conservation ou teneur en eau en monocouche varie selon les variétés dans la gamme 7.88-18.52% (bs) à 20 et 40°C. Le retrait volumique des morceaux de fruit pendant le séchage n'est pas influencé par la température, la variété, la découpe et le type de support. Ce retrait suit un modèle linéaire et le modèle d'additivité des volumes du fruit mûr a permis d'évaluer le coefficient de retrait linéaire qui est de 1.468.

L'influence des paramètres aérauliques et des caractéristiques intrinsèques du produit sur les cinétiques de séchage a ensuite été analysée. De cette étude, nous avons déduit que la correction des courbes de séchage de la mangue par le taux de contraction surfacique permet dans certaines conditions opératoires de faire apparaître la phase de séchage à vitesse constante. L'état de maturité a une influence sur les cinétiques de séchage de la mangue. La mangue mûre sèche plus vite que la mangue verte en début de séchage, et moins vite que cette dernière en fin séchage. L'influence de la surface spécifique, de la température, de l'épaisseur et de l'hygrométrie de l'air sur les cinétiques de séchage de la mangue est marquée. Le type de variété a une influence sur les cinétiques, même si cette influence n'est pas la même en convection naturelle qu'en convection forcée. Les faibles et les fortes vitesses n'influencent pas les cinétiques de la même manière. La diffusivité effective varie beaucoup avec la

température, une dépendance de type Arrhenius a alors été établie et l'énergie d'activation (E_a) de la mangue a été évaluée à 25.355 kJ/mole. La contraction a une très grande influence sur la valeur de la diffusivité. Un modèle empirique de la diffusivité donnant la dépendance simultanée de la température et de la teneur en eau et tenant compte de la contraction a alors été établi.

L'un des objectifs de notre étude était de simuler et de caractériser expérimentalement le prototype d'un séchoir solaire indirect à mangue. Le modèle de fonctionnement du capteur solaire de ce prototype a permis de montrer qu'il permet d'élever la température de l'air à plus de 30°C et d'atteindre des températures maximales dans les claies supérieures à 60°C au midi solaire vrai d'un jour moyen des mois d'avril, de mai et de juin. Ce séchoir peut a priori sécher 3kg de tranches de fruit/m² de captation de 85% (bh) à 15% (bh) en 3 jours de séchage. Les résultats de simulation présentés ont montré qu'une grande partie du séchage solaire à lieu les deux premiers jours de séchage avec près de 75% d'eau évacuée. L'étude expérimentale du séchoir a montré qu'il permet d'atteindre des températures maximales de l'unité de séchage de 46, 50 et 63°C respectivement au premier, deuxième et troisième jour de séchage. La différence de température maximale entre l'air et les tranches a été évaluée à 11.93°C. Il a aussi été établi que le séchage solaire indirect se fait à vitesse constante le premier jour et à vitesse décroissante les deux derniers jours. Afin de déterminer au premier jour le coefficient de transfert externe h_m , une corrélation a alors été établie entre la résistance aux transferts externes et la teneur en eau (bs). Malgré l'hypothèse de « température moyenne » des organes du capteur, émise dans les démarches de calcul, la validation expérimentalement du modèle global de couplage du capteur et de l'unité de séchage a été satisfaisante car les profils temporels de teneurs en eau théorique obtenus étaient très proches des valeurs expérimentales. Aussi, les teneurs en eau finales de conservation obtenues étaient dans l'ordre de grandeur donné par la littérature.

La dernière partie de notre travail a consisté à comparer le séchage solaire indirect de la mangue à son séchage solaire direct et convectif électrique. Il est ressorti de cette étude expérimentale que l'efficacité du séchage solaire indirect par rapport au solaire direct se révèle dans la phase d'évacuation de l'eau non liée au produit à partir de la fin du deuxième jour de séchage. Les tranches de mangue présentent un comportement en début de séchage solaire direct et indirect semblable au séchage convectif électrique entre 40 et 50°C. Il est montré que si le type de variété peut ne pas avoir d'influence sur le séchage solaire indirect, en revanche en séchage solaire direct et en séchage convectif électrique, elle peut y en avoir.

Perspectives

Ce travail nous a permis d'apporter notre contribution à la compréhension du séchage convectif de la mangue. Cependant, il doit être poursuivi et amélioré à travers les pistes de recherche suivantes :

- L'analyse de l'influence de la maturité du fruit sur l'isotherme de désorption de la mangue et éventuellement celle de l'influence des paramètres aérauliques (hygrométrie de l'air, température de séchage, vitesse de l'air) sur son retrait et son croûtage.
- L'établissement d'une loi de dépendance plus large de la diffusivité d'eau prenant en compte la teneur en eau initiale ainsi qu'un indice de maturité.
- L'établissement des profils de teneurs en eau par résolution numérique de l'équation Fick à deux dimensions avec prise en compte de la contraction.
- L'amélioration du modèle global de couplage capteur solaire-unité de séchage par prise en compte plus spécifiquement l'énergie stockée par les organes du capteur et la poursuite nocturne du séchage.
- L'étude comparée des vitesses de séchages et des profils de teneurs en eau des cinétiques de séchage par séchages solaires direct et indirect, convectif électrique et au gaz.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Abdelhamid, B., Mustafa, B., Abdellah, B., Bouchra, C., B., Sauveur B. (1997).** Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée. *Rév. Gén. Therm.* 36, 837-850.
- **Al-Muthaseb, A. H., Mc Minn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2004).** Shrinkage, Density and Porosity Variation during the Convective Drying of Patatoes Starch Gel. *14th IDS*, Vol.C, pp.1604-1611, São Paulo, Brazil, 22-25 August.
- **Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2004).** Water sorption isotherms of starch powders. Part 1: mathematical description of experimental data. *Journal of Food Engineering*, 61,297–307.
- **André, C., Roland, C. (1991).** Séchage, Théorie et Calculs, *Traité de Génie des Procédés J2 480*, France, Mars 1991.
- **André Talla, Jean-Rodolphe Puiggali, Wahbi Jomaa & Yves Jannot (2004).** Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana, *Journal of Food Engineering* 64, 103–109.
- **André Talla, Yves Jannot, George Elambo Nkeng, & Jean-Rodolphe Puiggali (2005)** Experimental Determination and Modeling of Sorption Isotherms of Tropical Fruits: Banana, Mango, and Pineapple, *Drying Technology*, 23: 1477–1498,
- **AYENSU A. (1997).** Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow, *J. Solar Energy*; 59(4–6):121–6.
- **Ayrancy, E., Ayrancy, G. and Dogantan, Z. (1990).** Moisture Sorption Isotherms of Dried Apricot, Fig and Raisin at 20°C and 36°C, *Journal of food Science*, 55(6), 1591-1593.
- **Bathiebo, D. J. (2004).** Etude des Transferts de Masse et de Chaleur en Convection Naturelle dans un Milieu Poreux Humide de Type Granulaire Inséré entre deux Plaques Planes Verticales Recevant un Flux de Chaleur de Densité Constante :Application au Séchage, *Thèse de Doctorat d'état ès Sciences Physiques*, Université de Ouagadougou, Ouagadougou, Burkina Faso.
- **Bena, B., & Fuller, R.J. (2002).** Naturel Convection Solar Dryer With Biomass Back-up Heater, *Solar Energy*, 72, 75-83.

- **Bimbenet, J. J., Daudin, J. D., & Wolf, E. (1985).** Air drying kinetics of biological particles. *In Proceedings of the 4th International Drying Symposium*, Kyoto, Japan.
- **Bliss R. W. (1961).** Atmosphere Radiation Near The Surface of The Ground, *Solar Energy*, 5, 103.
- **Bruin, S., Luyben K.Ch.A.M.; (1980).** Advances in drying, Vol. 1, Chap.6, pp.155-216, édité par MUJUMDAR, A.S Hemisphere Publishing Corporation.
- **Brunauer, S.; Emmet, P.H.; Teller, E. (1938).** Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60, 309–319.
- **Brunt D. (1932).** Notes and Radiaton in atmosphere, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 58, 389-420.
- **Caurie, M. (1970).** A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods. *Journal of food Technology*, 5, 159-174.
- **Chen Xiao Dong (2004).** Air Drying of Food and Biological Materials: Modified Biot and Lewis Number Analysis, *In Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Vol.C, pp.1636-1643, São Paulo, Brazil, 22-25 August.
- **Chiachung CHEN (2006).** Obtaining the isosteric sorption heat directly by sorption isotherm equations, *Journal of Food Engineering*, 74 178–185.
- **Chiou, J.P., El Wakil, M.M., & Duffie J.A. (1965).** A slit and expanded aluminum foil matrix solar collector, *Sol. Energy* (9) pp 73-82.
- **Clary B.L., & Morgan R.G. (1977).** Evaluation of matrix solar collectors for heating air Conference on solar crop drying (Raleigh, NC, USA,) pp. 44-53.
- **Collares-Pereira & Rabl A. (1979).** The average distribution of solar radiation- Correlation between Diffuse and Hemispherical and between daily and hourly insolation values, *Solar Energy*, 22, 155-164.
- **Comité de Coordination pour le Developpement et la Promotion de L'Artisanat Africain (2004).** Rencontre sur la valorisation du Beure de Karité et de la mangue au Burkina Faso dans une démarche de commerce équitable, Ouagadougou le 4 Novembre 2004, Burkina Faso.
- **Crank, J. (1975).** The mathematics of diffusion. *Published in the United States by Oxford University Press*, New York, second edition.
- **Daguenet Michel (1985).** Séchoirs Solaires: Théorie et Pratique, UNESCO, France.
- **Del Valle, J. M., Cuadros, T. R. M., & Aguilera, J. M. (1998).** Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Research International*, 31(3), 191–204.

- **Desmorieux, H. (1992).** Le Séchage en Zone Subsaharienne: Une analyse Technique à Partir des Réalités Géographiques et Humaines, *Thèse présentée à l'INPL*, Lorraine, France.
- **Donka I., Kondju A. (2001).** Analytical and Experimental Study of Combined Fruit and Vegetable dryer, *Energy Conversion and Management*, 42, 975-983.
- **Doymaz, I. (2004).** Drying kinetics of white mulberry. *Journal of food Engineering*, 61,341-346.
- **Doymaz, I. (2005).** Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69, 275–279.
- **Duffie, J.A., & Beckman, W.A. (1974).** Solar Energy Thermal Processes, John Wiley and Sons Inc., Chapitres 1-7.
- **Ekechukwu, O.V., Norton, B. (1999).** Review of Solar-Energy Drying Systems I :An Overview of Drying Principles and Theory, *Energy Conversion&Management*,40,593-613.
- **Ekechukwu, O.V., & Norton, B. (1999a).** Review of Solar-Energy Drying Systems II :An Overview of Solar Drying Technology, *Energy Conversion&Management*,40,615-655.
- **Ekechukwu, O.V., & Norton, B. (1999b).** Review of Solar-Energy Drying Systems III:Low Temperature Air Heating Solar Collectors for Crop Drying applications, *Energy Conversion&Management*,40,657-667.
- **El-Sebaï, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I., & El-Gohary, H.G. (2002).** Experimental Investigation of an Indirect Type Naturel Convection Solar Dryer, *Energy Conversion and Management*, 43,2251-2266.
- **Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004).** Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of food Engineering*, 63, 349-359.
- **Falade, K. O., & Aworh, O. C. (2004).** Adsorption isotherms of osmo-oven dried african star apple(*chrysophyllum albidum*) and african mango (*Irvingia gabonensis*). *European Food Research and Technology*, 218(3), 278-283.
- **Fondu, D. (1994).** Intégration d'une Unité d'Adsorption dans une Installation Solaire de Séchage, *Travail de Fin d'Etude en Vue de l'Obtention du Grande d'Ingénieur Civil Mécanique et Electricien*, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique.
- **Fournier, M., & Maurissen, Y. (1993).** Simulation du Fonctionnement des Capteur Solaires à Air de Type Tôle et de Type Absorbeur Poreux, *J. Phys. III*, France,3,2249-2260.
- **Fritz S. (1951).** Solar Radiation Energy and its Modification by the earth and its atmosphere, *Compendium of meteorology*, American Meteorological society.

- **Gogus, F., & Maskan, M. (1999).** Water adsorption and drying characteristics of Okra (*Hibiscus Esculentus L.*). *Drying Technology*, 20, 83-894.
- **Goyal, R.K, Tiwari, G.N. (1997).** Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept. *J. Solar Energy*;60(1), pp41–8.
- **GEANKOPLIS, C.J (1978).** Transport processes and unit operations, pp.365-548, Allyn and Bacon incorporation, Boston.
- **Hall, C. W. (1980)** Drying and Storage of Agricultural Products, *Avi, Westport*.
- **Halsey, G. (1948).** Physical adsorption on non-uniform surfaces. *Journal of Chemical Physics* 16, 931–937.
- **Hamid, Y.H., & Beckman W.A. (1969).** Transpiration cooling on radiatively heated porous bed, *ASME Publ.*, n°69.WA/SD-6,2.
- **Hammou, A., Brunet, S., Le Palec G. & Daguene, M. 1988.** Etude Théorique d'un Absorbant Poreux, *Revue Générale de Thermique* (324) 661-666.
- **Hassini, L., Azouz, S., Pecalski, R., Belghith, A.(2007).** Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction of shrinkage, *JFE*, 79, 47-56.
- **Hatamipour, M.S., & Mowla, D. (2002).** Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed *Journal of Food Engineering* 55, 247–252.
- **Henderson, S.M. (1974).** Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 17, 1167–1168.
- **Henderson, S.M. (1952).** A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, 33, 29–32.
- **Henderson, S.M., & Pabis, S. (1961).** Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient, *Journal of Agriculture Research Engineering*, 6, 169–174.
- **Henry, P.S.H. (1939).** Diffusion in adsorbing media, *Proc. R. Soc.*, Vol. 171A, pp.215-241, London,1939.
- **Hernandez, F.S. (2006).** Contribution à l'étude du séchage de la spiruline et de son impact sur la qualité biochimique du produit sec, Thèse doctorat, Université Claude Bernard de Lyon 1, France.
- **Hodali, R. A. (1997).** Numérical Simulation of an Agricultural Foodstuffs Drying Unit Using Solar Energy and Adsorption Process, Thèse de Doctorat, Université Libre de Buxelle.
- **Hottel H.C., Scarafin A.F. (1967).** Radiative transfer, MC Graw Hill, New York.

- **Hussain A. (1985).** Solar Radiation in Dhaka-Seventh Miami International Conference on alternative energy Sources,9-12 December.
- **Iglesias, H.A., & Chirife J. (1975).** Prediction of effect of temperature on water sorption of food materials. *Journal of Food Technology*, 11, 109–116.
- **Iglesias, H.A., & Chirife, J. (1976).** A model for describing the water sorption behavior of foods. *Journal of Food Science*, 41, 984–992.
- **Iglesias, O., Garcia, A., Roques, M., & Bueno, J. L. (1993).** Drying of water gels : Determination of the characteristic curve agar-agar. *Drying technology*, 3, 11, 571- 587.
- **Inova, D., & Andonov, K. (2001).** Analytical and Experimental Study of Combined Fruit and Vegetable dryer, *Energy Conversion and Management*,42,975-983.
- **Isabell, P., Sybille, N., Werner, M., & Reinhold, C. (2005).** Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Journal of food Engineering*, 6, 412-419.
- **Jannot, Y., & Coulibaly, Y. (1997).** Radiative Heat Transfer in a Solar Air Heater Covered With a Plastic Film, *Solar Energy*, 60,35-40.
- **Jason, A. C. (1958).** A study of evaporation and diffusion processes in the drying of fish muscle. In *Fundamental aspects of the dehydration of food products* (pp.103–135). London: *Society of Chemical Industry and New York: The Macmillan Co.*
- **Javier Telis-Romeo, GABAS, A. L., & PAULO, J.A.S., (2004).** Osmo-Convective Drying of Mango Cubes in Fluidized Bed and Tray Dryer, *In Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Vol.C, pp.1868-1875, São Paulo, Brazil, 22-25 August.
- **Jaya, S., & Das, H. (2003).** A Vacuum Drying Model of Mango Pulp, *Drying Technology*, Vol. 21, No.7, pp.1215-1234.
- **Joël, H., Joël S., Sylvie B. (2002).** Water Activity and Hydration of Dairy powders, Review, *INRA, EDP Sciences, Lait*, 82, 441-452.
- **Johson, F.S., Meteorol J. (1954).** The Solar constant, 11, 431.
- **Jung, S. K., Choi, Y. H., Shon, T. H., & Choi, J. U. (1986).** The drying characteristics of apples at various drying conditions. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 18(1), 61–65.
- **Kannan, D., & Bandyopadhyay, S. (1995).** Drying characteristics of a tropical marine fish slab. *Journal of Food Science and Technology*, 32(1), 13–16.

- **Karathanos, V.T., Villalabos, G. & Saravacos, G.D. (1990).** Comparison of Two Methods of Estimation of The effective Moisture diffusivity from Drying Data, *Journal of Food Engineering*, 55(1), 218-223.
- **Kessler, H. G. (1981).** Engineering and Dairy Technology, Verlag, A. Kessler, *Freising*, Germany, Chap.8, 9 and 10.
- **Khraisheh, M. A. M., Cooper, T. J. R., & Magee, T. R. A. (1997).** Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions. *Drying Technology*, 15(3/4), 1003–1022.
- **Kilpatrick, P. W., Lowe, E., & Van Ardsel, W. B. (1955).** Tunnel dehydrators for fruit and vegetables. In E. M. Mrak, & G. F. Stewart (Eds.), *Advances in food research* (vol. 6, pp. 313–372). New York: Academic Press.
- **Kolb, A., Winter, E. R. F. & Viskanta R. (1999).** Experimental Studies on a Solar Air Collector with Metal Matrix Absorber, *Solar Energy*, 65,91-98.
- **Krisher, O. & Kröl, K. (1963).** Technique de Séchage, *CETIAT*, ORSAY, 599 p, Traduction de Die Wissenschaftlichen Grundlagen du Trocknungstechnik, Springer Verlag, Berlin.
- **Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (1997).** Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, 15(10), 2441 -2458.
- **Kuntz, I.D., (1971).** Hydration of Macromolecules,3-Hydration of Polypeptides, *J.Amer.Chem.Soc.*,93,514-519.
- **Labuza, T.P., Kaanane, A., Chen, J.Y. (1985),** *Journal of Food Sciences*, 50:385.
- **Lang, W., & Sokhansanj, S. (1993).** Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. *Journal of Food Process Engineering*, 16, 305–314.
- **Lansing, F.L., & Clarke, V. (1979).** A high performance porous flat plate solar collector, *Energy* (4) 685.
- **Leonardo Da, S.A. & Dermeval, J. M. S., (2004).** Dependence Analysis of Shrinkage and shape evolution of a gel System With the Forced Convection Drying Periods, *In Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Vol.A, pp.152-160, São Paulo, Brazil, 22-25 August.
- **Lewis, W. K. (1921).** The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial Engineering*, 13, 427–443.

- **Litchfield, J. B., & Okos, M. R. (1992).** Moisture diffusivity in pasta during drying. *Journal of Food Engineering*, 17, 117–142.
- **Lomauro, C. J., Bakshi A. S. & Labuza, T.P. (1985).** Moisture Transfer Properties of Dry and Semi moist Foods, *Journal of Food Science*, Vol.50.
- **Lozano, J. E., Rotstein, E., & Urbicain, M. J. (1980).** Total Porosity and Open-Pore Porosity in the Drying of Fruits, *Journal of Food Science*, Vol.45.
- **Lozano, J. E., Rotstein, E., & Urbicain, M. J. (1983).** Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents, *Journal of Food Science*, 48, 1497–1502, 1553.
- **Madhlopa, A., Jones, S.A., & Kalenga; S. J. D. (2002).** A solar air heater with composite–absorber systems for food dehydration. *Renewable Energy*, 27,27–37.
- **Magee, T. R. A., & Wilkinson, C. P. D. (1992).** Influence of process variables on the drying of potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 27, 541–549.
- **Mayor, L., & Sereno, A.M. (2004).** Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review, *Journal of Food Engineering*, 61, 373–386 385.
- **Mazza, G. (1982).** *Journal of Food Technology*, 17:47–50
- **Mcminn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (1997).** Physical characteristics of dehydrated potatoes—Part I. *Journal of Food Engineering*, 33, 37–48.
- **Medeiros M. F. D., Rocha S.C.S., Alsina O. L. S., Jeronimo C. E. M.,Medeiros U. K. L. and DA Mata A. L. M. L. (2002).** Drying of Pulps of Tropical Fruits in Spouted Bed: Effect of Composition on Dryer Performance, *Drying Technology*,20(4&5),pp.855-881.
- **Midilli, A., & Kucuk, H. (2003).** Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, 44(7), 1111–1122.
- **MINEFI – DGTPE « Mission Economique Ambassade de France au Burkina Faso» (2006).** Les Fruits et Légumes au Burkina, *Prestation réalisée sous système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001, Version 2 par Pierre BERGER*, Ouagadougou, Burkina Faso.
- **Miri, R., Mokrani, O., Siad, F. & Belhamel, M. (2002).** Etude Expérimentale d'un séchoir solaire, *Rev. Energ.Ren. :Zones Arides*,41-48.
- **Mohamad, A. M., & Nirankar, N. (1995).** Sorption Isotherms of fortified Mango Bars, *Journal of Food Engineering*, 25, 141-151.

- **Moreira, R., Vazquez, G., & Chenlo, F. (2002).** *Electron J Environ Agric Food Chem* 1(1):1.
- **Moreira, R., Figueiredo, A., & Sereno, A. (2000).** Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, 18(1&2), 279–294.
- **Muneer H.C., Hawas M.M. et Sahili K. (1984).** Correlation between hourly diffuse and global radiation for New Delhi, *Energy Conversion and Management*, 24, 265-267.
- **Myhara, R.M., Sablani, S.S., Al-Alawi, S.M., Taylor, M.S. (1998).** Water sorption isotherm of dates: Modeling using GAB equation and artificial neural network approaches. *Lebensmittel Wissenschaft und- Technologie*, 31, 699–706,.
- **Nadeau, J.P., Puiggali, J.R., (1995),** Le séchage : des processus physiques aux procédés industriels, *TEC & DOC - Lavoisier (350 pages)*.
- **Nganhou, J., & Nganya, T.(2003).** Simulation Numérique du Comportement Dynamique d'un Système de Séchage Solaire de Fèves de Cacao au Cameroun, *Procédés Biologique et Alimentaire (PBA)*, site :<http://spip.em.refer.org/tet/pba1/article40.html>
- **Nieto, A., Cactro, M.A., Alzamora, S.M. (2001).** Kinetics of Moisture Transfer During Air Drying of Blanched and /or Osmotically dehydrated Mango, *Journal of Food Engineering*, 50, 175-185.
- **Njomo D. (1998).** Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre, *Rév. Gén. de thermique* 37, 973-980.
- **Onadja, T., & Rozis, J.F. (1996).** Pratiques du séchage en zone sahélienne : créer de nouvelles activités rémunératrices pour les femmes; *Liaison Energie-Francophobie n°33/4^e* semestre 1996
- **ONG, K. S. (1995).** Thermal performance of solar air heaters:Mathematical model and solution procedure, *Solar energy* Vol.55, No.2, pp.93-109.
- **Oswin, C.R. (1946).** The kinetics of package life. III. Isotherm. *Journal of Society Chemical Industry*, 65, 419–421.
- **Overhults, D. D., White, G. M., Hamilton, M. E., & Ross, I. J. (1973).** Drying soybeans with heated air, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 16, 195–200.
- **Pages J.K. (1964).** The estimation of monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation on Vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S, *Proceedings of the UN Conference on New sources of Energy*, 4, 378.

- **Pavón-Melendez, G., Hernández, J.A., Salgado, M.A., & García, M. A. (2002)** Dimensionless Analysis of the Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Drying, 51, 347-353.
- **Peleg, M. (1993).** Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 16, 21–37.
- **Perez, M. G. R., & Calvelo, A. (1984).** Modeling the thermal conductivity of cooked meat, *Journal of Food Science*, 49, 152–156.
- **Pratoto, A. (1996).** Etablissement d'abaques de dimensionnement de séchoirs à chauffage partiellement solaire pour le caoutchouc naturel, Thèse de l'université de Franche-Comté, France.
- **Rahman, M. S., & Potluri, P. L. (1990).** Shrinkage and density of squid flesh during air drying, *Journal of Food Engineering*, 12, 133–143.
- **Rahman, M. S., Perera, C. O., Chen, X. D., Driscoll, R. H., & Potluri, P. L. (1996).** Density, shrinkage and porosity of Calamari Mantle Meat during air drying in a cabinet dryer as a function of water content, *Journal of Food Engineering*, 30, 135–145.
- **Ratti, C. (1994).** Shrinkage during drying of foodstuffs, *Journal of Food Engineering*, 23(1), 91–105.
- **Rey, J-Y., Diallo T., M., Vannière, H., Didier, C., Kéita S., Sangaré, M. (2004)a.** La mangue en Afrique de l'Ouest francophone, *Fruit*, vol.59(2), p.121-129.
- **Rey, J-Y., Diallo T., M., Vannière, H., Didier, C., Kéita S., Sangaré, M. (2004)b.** La mangue en Afrique de l'Ouest francophone : variétés et composition variétale des vergers, *Fruit*, vol.59(3), p.191-208.
- **Robert, M. M., & Shyam S. (2001).** Unification of fruit water sorption isotherms using Artificial neural networks. *Drying Technology*, 19(8), 1543-1554.
- **Roman P., & Michel L., (2000).** Transferts dans les Aliments Solides, Modèles Physiques et Mathématiques, *Technique de l'Ingénieur*, Traité Agroalimentaire, F2000, 12.
- **Ruiz-López, I.I., & García-Alvarado, M. A. (2007).** Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *Journal of Food Engineering* 79, 208–216.
- **Roman, G. N., Urbicain, M.J., & Rotestein, E. (1983).** Kinetics of the Approach to sorptional Equilibrium by foodstuff. *AIChE Journal*. Vol.29 No.5 pp. 800-805.
- **Sanchez-Moreno, C., Cano, M.P., De Ancos, B., Plaza, L., Olmedilla, B., Granado, F., & Martín, A. (2006).** Mediterranean vegetable soup consumption increases plasma

vitamin C and decreases F₂-isoprostanes, prostaglandin E₂ and monocyte chemotactic protein-1 in healthy humans. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, Vol. 17, N° 3, pp : 183-189.

- **Santanu Basu, Shivhare, U. S., & Mujumdar, A. S. (2006).** Models for Sorption Isotherms for Foods: A Review, *Drying Technology*, 24: 917–930.
- **Saravacos, G. D., & Charm, S. E. (1962).** A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. *Food Technology*, 15, 78–80.
- **Sawadogo/Lingani, H. (1993).** Valorisation Technologique de la variété Amélie de mangue du Burkina Faso : Maîtrise des paramètres physico-chimiques pour une meilleure stabilisation des produits de transformation, Thèse de doctorat spécialité sciences biologiques appliquées, Université de Ouagadougou, Burkina Faso.
- **Schrader, G. W., & Litchfield, J. B. (1992).** Moisture profiles in a model food gel during drying: measurement using magnetic resonance imaging and evaluation of the Fickian model. *Drying Technology*, 10(2), 295–332.
- **Sereno, A. M., & Medeiros, G. L. (1990).** A simplified model for the prediction of drying rates for foods. *Journal of Food Engineering*, 12, 1–11.
- **Siaka, T., & Serge, K.N. (2004).** Comparative study of naturel solar drying of cassava, banana and mango. *Renewable Energy*, 29, 975-990.
- **Simate, I. N. (2003).** Optimisation of Mixed-Mode and Indirecte-Mode Naturel Convection Solar Dryers, *Renewable Energy*, 28, 435-453.
- **Simbarashe, S., Frank, D., Bruno, D., Abel, M., Yendouban, A., Johan, L., & DEBEVERE M. (2007).** Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn, *Journal of Food Engineering* 79, 168–175.
- **Sopade, P.A., Ajisegiri, E.S., Abass, A.B. (1996).** Food Control 7(3): 153–156.
- **Stamatios, J.B., & Vassilios, G.B. (2004).** Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*. 64, 449-45.
- **Suzuki, K., Kubota, K., Hasegawa, T., Hosaka, H. (1976).** Shrinkage in the Hydration of Vegetables Root, *Journal of Food Science*, Vol.41, pp.1189-1193.
- **Swinbank W.C. (1963).** Long-Wave Radiation From Clear Skies, Q. J. R. Meteorol. SOC., 89, 339.

- **Thuillier, F., & Traoré, A. (1996).** Séchage de produits tropicaux pour l'exportation : l'expérience au Burkina Faso de la mangue séchée ; Liaison Energie-Francophoie n°33/4^e semestre 1996
- **Tsami, E., Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z.B. (1990).** Journal of food Sciences 55:1594.
- **Van den Berg C. (1985).** Development of BET-like models for sorption on foods, theory and relevance. In: Simatos D, Multon JL (eds) Properties of water in foods: in relation to quality and stability. Nijhoff, Dordrecht, pp 119–131
- **Van den Berg, C., & Bruin S. (1981).** Water activity and its estimation in food systems:Theoretical aspects. In L. B. Rockland & G.F. Stewart, Water activity:Influences on food quality (pp.1-43). New York:Academic Press.
- **Van den Berg, C. (1984).** Desorption of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In Engineering and Foods; Mckenna, B.M., Ed.; Elsevier: London, U.K., 311–321.
- **Vannière, H., Didier, C., Rey, J-Y., Diallo T., M., Kéita S., Sangaré, M. (2004).** La mangue en Afrique de l'Ouest francophone : les systèmes de production et les itinéraires techniques, Fruit, vol.59(6), p.383-398.
- **Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., & Wratten, F. T. (1985).** Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28, 296–301.
- **Wahyuningsih, T., Kehinde, A. T., Mohammad, N. E., & Dietrich, K. (2002).** Comparison of pretreatment methods on water and solid diffusion kinetics of osmotically dehydrated mangos. *Journal of Food Engineering*, 53(2), 133-142.
- **Wang, C. Y., & Singh, R. P., (1978).** Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. ASAE Meeting Paper No. 78-6505, St. Joseph, MI: ASAE
- **Wang, N., & Brennan, J. G. (1995).** Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24(1), 61–76.
- **Whittaker, S., (1977).** Simultaneous Heat, Mass and Moisture Transfer in Porous Media: A Theory of Drying, In J.P. Hartnett & T.F. Irvine,Jr. (Eds), *Advances in Heat Transfer*, Vol.13,pp.119-203,New York:Academic.
- **Willis, B., Okos, M., & Campanella, O. (1999).** Effects of glass transition on stress development during drying of a shrinking food system. In *Proceedings of the sixth conference of food engineering (CoFE099)* (pp. 496–451). Dallas, TX.

- **Wladyslaw, K., & Elwira, T. (2004).** Description of Sorption Isotherms as a Function of Water Activity, Composition and Temperature Using MCP, *In Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Vol.A, pp.2201-208, São Paulo, Brazil, 22-25 August.
- **Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. B. (2001).** Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457–465.
- **Yves J. & Yezouma C. (1997).** Radiative Heat Transfer in a Solar Air Heater Covered With a Plastic Film, *Solar Energy*, 60,35-40.
- **Zhao, Y., & Poulsen, K. P. (1988).** Diffusion in potato drying. *Journal of Food Engineering*, 7, 249–262.

Annexe I : Source d'énergie du rayonnement solaire

Un corps exposé au soleil s'échauffe car celui-ci émet un rayonnement électromagnétique dit « Thermique » qui se propage à travers le vide et l'atmosphère avant d'être en partie absorbée par le corps qui peut lui aussi à son tour émettre son rayonnement propre. L'ensemble des planètes du système solaire, reçoit comme la terre, sous forme de rayonnement thermique, de l'énergie venant du soleil. La nature de cette énergie rayonnée dans l'espace est déterminée par la structure et les caractéristiques de cet astre (Johson,1954).

Dans cette section, nous nous focaliserons d'abord sur les propriétés de cet énergie dans la zone hors atmosphère terrestre, puis son atténuation dû à la région atmosphérique et enfin les propriétés du rayonnement thermique résultant accessible à la surface terrestre.

1.1 Définition du Soleil

Le soleil est une masse gazeuse d'hydrogène, d'hélium, de carbone et de quelques autres éléments en faible quantités. Situé en moyenne à 1,5.10⁸ km de la terre, il a un diamètre de 1,39.10⁶ km et vu de la terre effectue une rotation complète chaque quatre semaine autour de ses axes (Duffie et Beckman, 1974) .

Le soleil est le siège de réactions de fusion d'hydrogène en hélium qui libèrent une grande quantité d'énergie dispersée dans l'espace par rayonnement .La température du rayonnement est estimée à 5762 K et celle de la région centrale de 8.10⁶ à 40.10⁶ K. La masse volumique du soleil vaut 80 à 100 fois celle de l'eau et sa perte de masse est de l'ordre de 4 à 5.10⁶ tonnes/secondes, soit une durée de vie de l'ordre de 10¹⁰ ans (Daguenet, 1985).

1.2 Le rayonnement solaire extraterrestre

1.2.1 La constante solaire

En considérant que le soleil rayonne dans l'espace comme un corps noir à la Température T=5762K, la puissance émise par l'aire solaire en direction en direction d'un élément de surface terrestre (dS)_T est :

$$\Phi = \frac{MR^2}{D_{ST}^2} (dS)_T = M \cos^2 \alpha (dS)_T = M \alpha^2 (dS)_T \quad (1.1)$$

où M : Emittance du soleil

R : Rayon du grand cercle solaire

D_{ST} : Distance Soleil-Terre

$(dS)_T$: Elément de surface autour d'un point Mo de la Terre

α : Demi-diamètre angulaire du Soleil vu par la Terre, $\alpha \approx \frac{R}{D_{ST}} \approx 16'$

On appelle *Constante Solaire*, l'éclairement solaire de la Terre donnée par (Daguenet, 1985):

$$I_o = \frac{\Phi}{(dS)_T} = M\alpha^2 = \sigma T^4 \alpha^2 \quad (1.2)$$

où σ est la Constante de Stefan

avec $T=5762^\circ\text{C}$, $R=6.96 \cdot 10^6 \text{ km}$, $D_{ST}=149 \cdot 10^6 \text{ km}$, $(dS)_T=1 \text{ m}^2$ et $\sigma=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$

La *Constante Solaire* est donc, par définition, la Puissance reçue du soleil par unité de surface normale aux rayons solaires sur une surface terrestre sans atmosphère ou, dans l'espace, au milieu de la distance terre-soleil (Johson,1954).

L'évaluation de la constante solaire a fait l'objet de nombreuses études parmi lesquelles, on peut citer la valeur de la constante solaire de 1322 W/m^2 obtenue par Abbot et révisée à 1395 W/m^2 par Johnson (1954) ; la valeur de 1353 W/m^2 proposée par Thekaekara et Drummond (1971) et confirmée par Duffie et W.A. Beckmann (1974) et M. Daguenet (1985) .

1.2.2 Distribution Spectrale de la radiation extraterrestre

L'onde polychromatique du rayonnement solaire transporte une énergie thermique dont 98% est rayonnée dans la bande de longueur d'onde comprise entre $0.25 \mu\text{m}$ et $4 \mu\text{m}$ et répartie selon le tableau 1.1 (avec la constante solaire $I_o=1353 \text{ W/m}^2$).

Gamme de longueur d'onde (μm)	Fraction d'Energie	Portion de la Constante Solaire(W/m^2)
0 à 0.38 (Ultraviolet)	0.0700 (7%)	95
0.38 à 0.78 (Visible)	0.4729 (47.29%)	640
0.78 à ∞ (Infrarouge)	0.4571 (45.71%)	618

Tableau 1.1. Distribution spectrale du rayonnement solaire extraterrestre (Daguenet,1985).

1.2.3 Energies Incidentes Journalière (H_o) et Horaire (H_{oh})

Compte tenue de la variation de la distance Terre-Soleil au cour de l'année, le rayonnement solaire arrivant sur la surface de la Terre, considérée sans atmosphère, varie d'intensité de l'ordre de 3.4%.

L'éclairement E pendant une période de l'année est alors donné par (Daguenet, 1985) :

$$E = I_o C \approx I_o \left(1 - \frac{\sin \delta}{11.7}\right) \approx I_o \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 d}{365}\right)\right) \approx I_o [1 + 0.034 \cos(30(m-1) + n)] \quad (1.3)$$

où C : Le Facteur de correction dû à la variation de la distance Terre-Soleil

δ : La déclinaison du soleil pour la d-ème journée de l'année

n : Le numéro du jour dans le mois

m : Le numéro du mois dans l'année

d : Le numéro du jour dans l'année.

Les angles étant tous exprimés en degrés.

Sur une surface horizontale hors atmosphère terrestre, il arrive la puissance :

$$P_{Ho} = E \sin h = E (\sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \cos \omega_s) \quad (1.4)$$

où ϕ : La latitude du lieu

ω_s : L'angle horaire au levé du soleil

h : La hauteur du soleil en système de coordonnées horizontales.

En intégrant cette puissance entre $-\omega_s$ et ω_s , on obtient l'énergie incidente extraterrestre journalière (Johson,1954):

$$H_o = \frac{24}{2\pi} 2E[\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s] \quad (1.5)$$

soit :

$$H_o = \frac{24}{\pi} E[\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s] \quad (1.6)$$

ou encore :

$$H_o = \frac{24}{\pi} 3600 I_o \left[\left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360d}{365}\right)\right) \left[\frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s \right] \right] \quad (1.7)$$

I_o étant la constante solaire par seconde.

On en déduit immédiatement l'énergie incidente extraterrestre horaire par :

$$H_{oh} = \frac{3600}{\pi} I_o \left[\left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360d}{365}\right) \right) \left[\frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s \right] \right] \quad (1.8)$$

La déclinaison δ peut être calculée à partir de la formule approximative de Cooper(1969) :

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + d)/365] \approx 23.45 \sin \frac{360}{365} (d - 81) \approx 23.45 \cos(30m + n - 202) \quad (1.9)$$

1.3 Le rayonnement solaire Terrestre

Le rayonnement solaire incident, avant d'arriver au niveau du sol, subit de nombreuses altérations et atténuations aléatoires à la traversée de la couche atmosphérique dû :

- (1) Aux variations de la distance Terre-Soleil,
- (2) Aux réflexions sur les couches atmosphériques,
- (3) Aux variations de la diffusion atmosphérique par les molécules d'air, la vapeur d'eau, la poussière et d'autres aérosols.
- (4) Aux variations de l'adsorption atmosphérique par les molécules de dioxygène(O₂), Ozone(O₃), de vapeur d'eau(H₂O) et de dioxyde de carbone(CO₂).

Dans ce paragraphe, nous présentons un résumé des résultats de travaux réalisés sur le rayonnement solaire direct, diffus et global tombant sur un plan situé à la surface de la terre. Ces résultats nous intéresseront particulièrement dans la suite de notre travail, car ils représentent les données de base sur le flux solaire incident tombant sur un capteur solaire plan acquis pour une opération de séchage.

1.3.1 Définitions

- (1) Le Rayonnement Direct est le rayonnement solaire reçu du soleil sans changement de direction, il est dit anisotrope.
- (2) Le Rayonnement Diffus est la partie du rayonnement solaire reçue au sol après changement de direction par réflexion et diffusion à travers l'atmosphère ; il est dit isotrope.
- (3) Le Rayonnement Global est la somme du Rayonnement Direct et du Rayonnement Diffus.

(4) L'Albédo est le rapport entre le flux réfléchi et le flux solaire incident. Il est noté A et :

$$A=1-a \quad (1.10)$$

où a est le coefficient d'absorption de la surface réelle éclairée par le soleil (Johson,1954).

1.3.2 Expressions approchées du Rayonnement Direct

Plusieurs formules approchées de la puissance du Rayonnement Solaires Direct ont été développées par les auteurs. Parmi ces expressions, nous avons celles revues et résumées par M.Daguenet (1985) et données par :

$$(1) \quad I_{Dh} = (I_o C).A \exp\left(\frac{-B}{\sinh 1000} \frac{P}{1000}\right) \quad (1.11)$$

où I_o est la constante solaire ($I_o=1353 \text{ W/m}^2$)

C le facteur de correction dû à la variation de la distance Terre-Soleil

I_{Dh} la puissance direct sur un plan horizontal, en W/m^2

P La pression atmosphérique au niveau du sol exprimée en millibars.

A et B les coefficients caractéristiques de l'état du ciel et dépendant des conditions atmosphériques du moment.

Le tableau 1.2 rassemble quelques valeurs des coefficients A et B.

Constantes	Ciel Pur	Conditions normales	Zones Industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Tableau 1.2. Valeurs des coefficients caractéristiques de l'état du ciel (Daguenet, 1985).

Sur une paroi dont la normale fait un angle i avec les rayons solaires cette puissance s'écrit :

$$I_{Di} = (I_o C).A \exp\left(\frac{-B}{\sinh 1000} \frac{P}{1000}\right) \cos i \quad (1.12)$$

En plus, nous avons les formules approchées valables pour tout le spectre du rayonnement.

$$(2) \quad I_D = I_{ho} \tau = 1230 \exp\left(-\frac{1}{4.4 \sin(h+2)}\right) \quad (1.13)$$

I_D s'exprimant en W/m^2 et valable dans les conditions normales.

$$(3) \quad I_D = I_{ho} \tau = 1210 \exp\left(-\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right) \quad (1.14)$$

I_D s'exprimant en W/m^2 et valable en ciel clair et désigne la puissance atteignant un plan normal de surface unité placé au niveau du sol.

$$(4) \quad I_D = I_{ho} \tau = 1260 \exp\left(-\frac{1}{2.3 \sin(h+3)}\right) \quad (1.15)$$

I_D s'exprimant en W/m^2 et valable en zone industrielle.

τ désigne la transmittivité totale dans tout le spectre du rayonnement à travers l'atmosphère

I_{ho} La puissance moyenne du rayonnement extraterrestre

h la hauteur du soleil exprimé en degrés

Hottel a aussi proposé la formule suivante, valable en ciel, pour la transparence de l'atmosphère au rayonnement direct à une altitude z exprimé en km et qui permet d'évaluer I_D sous la forme

$$I_D = I_{ho} \tau = I_{Do} [a_1 (0.4237 - 0.00821(6 - z)^2) + a_2 (0.5055 + 0.00595(6.5 - z)^2) \times \exp\left(-\frac{a_3}{\sinh(0.2711 + 0.01858(2.5 - z)^2)}\right)] \quad (1.16)$$

I_D est valable pour $z < 2.5$ km, a_1 , a_2 et a_3 sont des variables liées au type de climat.

Le tableau 1.3 donne les valeurs de ces variables pour quelques conditions climatiques.

Climat	a_1	a_2	a_3
Tropical	0.95	0.98	1.02
Tempéré (été)	0.97	0.99	1.01
Nordique (été)	0.99	0.99	1.01
Tempéré (hivers)	1.03	1.03	1.00

Tableau.1.3. Valeurs de a_1 , a_2 et a_3 pour quelques types de climat (Hottel & Scarafin, 1967).

1.3.3 Expressions approchées du Rayonnement Diffus

L'estimation du rayonnement diffus est difficile et de nombreuses méthodes ont été proposées.

(1) Muneer et al. (1984) ont développé des corrélations permettant d'évaluer le rayonnement diffus horaire à partir du rayonnement extraterrestre horaire et du rayonnement global reçu sur un plan horizontal (Muneer, Hawas & Sahili, 1984):

$$\begin{aligned} I_d/I_h &= 0.95 ; & K_T < 0.175; \\ I_d/I_h &= 0.9698 + 0.4353 K_T - 3.4499 K_T^2 + 2.1888 K_T^3; & 0.175 < K_T < 0.775; \\ I_d/I_h &= 0.26; & K_T > 0.775; \end{aligned} \quad (1.17)$$

Où $K_T = I_h/I_{ho}$

I_h le rayonnement global horaire reçu sur un plan horizontal

I_d le rayonnement diffus horaire

Dans ces formules de Muneer et al. le rayonnement global est supposé être connu.

(2) On peut aussi citer la formule [3] :

$$I_{di} = I_o C \sinh\left(0.271 - 0.2939 A \exp\left(\frac{-B}{\sinh \frac{P}{1000}}\right)\right) \frac{1 + \cos i}{2} + (I_{Dh} + I_{dh}) \rho \frac{1 - \cos i}{2} \quad (1.18)$$

où I_{di} est le rayonnement diffus frappant une surface inclinée

I_{dh} le rayonnement diffus sur une surface horizontale

i l'angle d'inclinaison

Les coefficients A et B sont ceux du tableau 1.2 et reposent sur l'expression suivante de Liu et Jordan sur la transparence de l'atmosphère au rayonnement diffus;

$$\tau = 0.271 - 0.2939 \tau_{\text{direct}} \quad (1.19)$$

(3) Une autre méthode d'approximation du rayonnement diffus, valable surtout en ciel clair, consiste à considérer que la plus grande partie du rayonnement diffus prend source dans une région du ciel voisine du soleil. Dans ce cas, on traite le rayonnement diffus comme un rayonnement direct faisant un angle d'incidence de 60° avec le plan capteur (Daguenet, 1985).

(4) On peut aussi supposé que le rayonnement diffus est uniformément distribué dans le ciel ; en ce moment, l'azimut γ de la surface ne joue pas.

(a) En supposant que le sol et les surfaces environnantes se comportent comme le ciel, l'inclinaison i ne joue plus et dans ce cas le rayonnement diffus I_{di} sur un plan incliné est égale à I_{dh} , la valeur du rayonnement diffus sur un plan horizontal. Il vient donc que :

$$I_i = I_{Di} + I_{dh} \quad (1.20)$$

Où I_i désigne le rayonnement global tombant sur un plan incliné.

(b) Ce modèle peut être amélioré en supposant qu'un plan faisant un angle i avec l'horizontale voit une partie du ciel sous l'angle solide $\frac{1 - \cos i}{2}$.

Si A_o est l'albédo du sol, on déduit que :

$$I_{di} = I_{dh} \frac{1 + \cos i}{2} + (I_{Dh} + I_{dh}) A_o \frac{1 - \cos i}{2} \quad (1.21)$$

et

$$I_i = I_{Di} + I_{di} \quad (1.22)$$

Pour un sol sans neige, on peut prendre $A_o = 0.2$.

1.3.4 Le Rayonnement Global

C'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. En l'absence des données sur le rayonnement, son estimation semble difficile et on utilise le plus souvent la formule régressive de type d'Angström.

$$H = H_o' (a' + b' \frac{n}{N}) \quad (1.23)$$

où n est le nombre d'heure d'ensoleillement par jour

N le nombre maximal d'heures d'ensoleillement par jour

H le rayonnement journalier global sur un plan horizontal

H_o' le rayonnement journalier global par ciel clair sur un plan horizontal

$\frac{n}{N}$ la fraction d'insolation

a' et b' sont des coefficients à déterminer

Certains auteurs ont utilisé l'ensoleillement et les données sur le rayonnement pour déterminer expérimentalement les valeurs des coefficients a' et b' , c'est ainsi que Fritz (1951) proposa $a' = 0.35$ et $b' = 0.61$.

Néanmoins, cette formule présente des lacunes compte tenu des difficultés liées à la détermination des termes H_o' et $\frac{n}{N}$.

Pages (1964) et quelques auteurs ont reformulé cette expression de sorte à faire apparaître le rayonnement extraterrestre sur un plan horizontal H_o sous la forme :

$$H = H_o \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (1.24)$$

Où a et b sont des constantes à déterminer expérimentalement pour chaque région.

Une régression de type d'Angström qui a été développée par Hussain (1985) pour déterminer le rayonnement journalier moyen est :

$$\frac{H_m}{H_o} = 0.18 + 0.39 \frac{n}{N} \quad (1.25)$$

où H_m désigne le rayonnement journalier moyen.

D'autres auteurs proposent :

$$H = H_o(1 - 0.65C^2) \quad (1.26)$$

où C désigne la nébulosité décimale du ciel exprimée en Octas variant entre 0 pour un ciel clair et 1 pour un ciel nuageux.

Ou encore :

$$H = \left(1 - 0.25 \frac{n}{N} - 0.60 \sqrt{\frac{n}{m}} \right)^{-1} H_d \quad (1.27)$$

Où H_d est le rayonnement diffus journalier arrivant sur un plan horizontal.

De toutes ces analyses ; celles de mesures du rayonnement solaire de Liu et Jordan semblent les plus valides et les plus utilisées.

1.4 Evaluation de l'ensoleillement selon l'analyse de Lui et Jordan

Il s'agit de formules établies par lissage, par différents auteurs, à partir des abaques construits par Liu et Jordan et basées sur les mesures statistiques du rayonnement journalier évalué en moyenne mensuelle.

1.4.1 Détermination du Rayonnement Global Horaire en Moyenne Mensuelle à partir du Rayonnement Global Journalier, en Moyenne Mensuelle

On utilise les formules de Collares-Pereira et Rabl (1979):

$$I_m / H_m = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) (\cos \omega - \cos \omega_s) / (\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s) \quad (1.28)$$

où $a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

ω est l'angle horaire

ω_s est l'angle horaire au lever du soleil

I_m est le Rayonnement Global Horaire en Moyenne Mensuelle

H_m est le Rayonnement Global Journalier, en Moyenne Mensuelle

1.4.2 Détermination du Rayonnement Diffus Journalier H_d à partir du Rayonnement Global Journalier

On utilise l'équation de lissage de la courbe de variation de $\frac{H_d}{H}$ de Liu Jordan selon Klein :

$$H_d/H = 1.0045 + 0.04349K_T - 3.5227K_T^2 + 2.63K_T^3 \quad (1.29)$$

Où K_T est l'indice de clarté journalier définie par :

$$K_T = H/H_0 \quad (1.30.a)$$

En moyenne mensuelle, cette formule de Klein devient :

$$H_{dm}/H_m = 1.390 - 4.027K_{Tm} + 5.531K_{Tm}^2 - 3.108K_{Tm}^3 \quad (1.30.b)$$

Où H_{dm} est le Rayonnement Diffus Journalier en Moyenne Mensuelle

$$K_{Tm} = H_m/H_{om} \quad (1.31)$$

l'indice de clarté journalier moyen mensuel avec H_{om} le rayonnement extraterrestre journalier en moyenne mensuelle (Daguenet, 1985).

Collares-Pereira et Rabl ont proposé récemment la formule (Collares-Pereira & Rabl, 1979) :

$$\begin{aligned} \frac{H_d}{H} &= 0.99 ; && \text{pour } K_T < 0.17 \\ &= 1.188 - 2.272 K_T + 9.473 K_T^2 - 21.856 K_T^3 + 14.648 K_T^4 ; && \text{pour } 0.17 < K_T < 0.8 \\ &= 0.2 ; && \text{pour } K_T > 0.8 \end{aligned} \quad (1.32)$$

En moyenne mensuelle, ils ont proposé une formule plus simple :

$$H_{dm} / H_m = 0.775 + 0.347\left(\omega_s - \frac{\pi}{2}\right) - (0.505 + 0.262\left(\omega_s - \frac{\pi}{2}\right)) \cos(2K_{Tm} - 1.8) \quad (1.33)$$

ω_s exprimé en radian, est l'angle solaire au crépuscule.

1.4.3 Rayonnement sur un plan sur un plan incliné

1.4.3.1 Conversion du Rayonnement Horaire

Le Rayonnement Horaire Total I_i sur un plan incliné regardant l'équateur et faisant un angle i avec le plan horizontal peut être déduit du Rayonnement Horaire Total I_h sur un plan horizontal à partir de l'équation suivante qui tient compte des composantes directe, diffuse et réfléchie du rayonnement total :

$$I_i = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_h} (I_h - I_d) + \frac{1}{2} (1 + \cos i) I_d + \frac{1}{2} (1 - \cos i) A_o I_h \quad (1.34)$$

avec A_o l'albédo du sol

I_d le rayonnement diffus horaire total sur un plan horizontal

θ_h, θ_i les angles d'incidence sur le plan horizontal et sur le plan incliné de l'heure considérée.

1.4.3.2 Conversion du Rayonnement Journalier

L'équation permettant de passer du rayonnement journalier total H sur un plan horizontal au rayonnement correspondant H_i sur un plan incliné d'après Liu et Jordan est :

$$H_i = (H - H_d) R_b + \frac{1}{2} (1 + \cos i) H_d + \frac{1}{2} (1 - \cos i) \rho H \quad (1.35)$$

Où R_b est le rapport du rayonnement direct journalier sur un plan incliné au rayonnement direct journalier sur un plan horizontal donné par :

$$R_b = \frac{\cos(\phi - i) \cos \delta \sin \omega_{si} + \frac{\pi}{180} \omega_{si} \sin(\phi - i) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (1.36)$$

ω_{si} désigne l'angle horaire (en degrés) du lever du soleil sur le plan incliné et ϕ la latitude du lieu.

En moyenne mensuelle :

$$\frac{H_{im}}{H_m} = (1 - \frac{H_{dm}}{H_m}) R_{bm} + \frac{1}{2} (1 + \cos i) \frac{H_{dm}}{H_m} + \frac{1}{2} (1 - \cos i) \rho \quad (1.37)$$

Où H_{im} est le rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur le plan incliné

1.5 La Température équivalente de la Voûte Celestre ($T_c(K)$)

Tout corps situé à la surface de la terre échange de l'énergie par rayonnement thermique avec la voûte Celestre. En considérant celle-ci comme un corps noir, plusieurs auteurs ont proposé des relations liant sa température équivalente soit à la température ambiante, soit à la pression partielle P_v de la vapeur d'eau dans l'air exprimée en millibars (Bliss, 1961; Brunt, 1932), ou encore à la nébulosité du ciel exprimée en Octas.

Parmi ces relations, les plus simples reliant la température du ciel $T_c(K)$ à la température ambiante $T_a(K)$ sont :

(2) La relation de Swinbank(1963) : $T_c = 0.0552 T_a^{1.5}$ (1.38)

(3) La relation de Whiller (1967) : $T_c = T_a - 6$ (1.39)

D'autres auteurs ont proposé les relations (Daguenet, 1985):

$$T_c = T_a - 12 \quad (1.40)$$

$$T_c = T_a \quad (1.41)$$

$$T_c = T_a - 20 \quad (1.42)$$

$$T_c = T_a^4 [1 - 0.261 \exp(-7.77 \cdot 10^{-4} (T_a - 273)^2)] \quad (1.43)$$

ANNEXE II : Caractéristiques physico-chimiques de la mangue

Les différentes caractéristiques données ici, à titre indicatif pour toutes les variétés de mangue, sont des valeurs moyennes obtenues à partir des données de base de la littérature. Ces valeurs sont à considérer comme des ordres de grandeurs susceptibles de varier selon les variétés, la saison, le degré de maturité ou les conditions de culture.

2.1 Propriétés physiques de la pulpe de mangue

Viscosité apparente μ_{ap} (Pa.s ou kg/m.s)	Tension superficielle σ (Pa.m)	Masse volumique (kg/m ³)	Concentration (%)°BRIX *	pH
104.6	4.43	1079	17.5	4.16

Tableau 2.1.1 : Propriétés physiques d'une pulpe de mangue standard (Medeiros et al., 2002).

2.2 Composition biochimique

Il s'agit d'une composition moyenne de la mangue pour 100 grammes net.

Composants	Masses en g
Glucides	14.0 - 14.3
Protéines	0.5 - 0.6
Lipides	0.1
Eau	80.0 - 87.0
Fibres alimentaire	1.9 - 2.0

<i>Minéraux</i>	<i>Masses en mg</i>
Potassium	145.0 - 150.0
Phosphore	22.0 - 25.0
Calcium	20.0 - 22.0
Magnésium	8.0 - 9.0
Sodium	0.0 - 2.0
Fer	1.0 - 1.2
Cuivre	0.1
Zinc	0.1
Manganèse	0.16

<i>Vitamines</i>	<i>Masses en mg</i>
Vitamine C(acide ascorbique)	44 - 45
Vitamine B1(thiamine)	0.03 - 0.32
Vitamine B2 (riboflavine)	0.05 - 0.4
Vitamine B3 ou PP ou Niacine	0.40 - 0.5
Vitamine B5(acide pantothénique)	0.13 - 0.16
Vitamine B6 (pyridoxine)	0.05 - 0.08
Vitamine B9(acide folique ou folate)	0.04 - 0.05
Vitamine A	4.00

Tableau 2.1.2 : Composition biochimique de la mangue

Annexe III : Programmes de Lissage

3.1 Lissage de la courbe caractéristique de séchage MATLAB 7.0.1

```
clear all
x0=[ ];y=[ ];
% Dérivation de la teneur en eau en fonction du temps
z0=-diff(y(:))./diff(x(:)); z=z0.*((1+1.4687*y(2:length(y)))/(1+1.4687*y(1))).^(-2/3)); z=[0;z];
for i=1:length(y)
    A(i)=y(i);%Les valeurs de la teneur en eau sont rangées dans A
end
clear i
for i=1:length(z)
    B(i)=z(i);%Les valeurs de la vitesse de séchage sont rangées dans B
end
clear i
for j=1:length(A)-4
    %ajustement des valeurs de la teneur en eau et de la vitesse de %séchage
    for i=j:j+4
        T(i)=A(i);%teneur en eau rangé en T
        k(i)=B(i);%vitesse rangée en k
    end
    %Ajustement polynomiale de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau
    p= polyfit(T,k,2);
    yt(j)=polyval(p,A(j));%Valeurs de series calculées à partir du polynome
end
clear j
for j=length(A:)-4:length(A:))
    yt(j)=polyval(p,A(j));
end
clear j
c=corrcoef(B(:)',yt)
[yy,m]=max(yt) % vitesse de séchage et nombre de point de la 1ère phase
V1=yy*1000
for i=m:length(yt)
    f(i-m+1)=yt(i)/yy;%vitesse de séchage reduite par celle en 1ère phase
end
for i=m:length(y)
    hred(i-m+1)=(y(i)-y(length(y)))/(y(m)-y(length(y)));% Teneur en eau normée
end
figure
plot(hred,f,'*')
hred'
f'
Q= polyfit(hred,f,2) %fonction caractéristique
clear j
for j=1:length(hred)
    ft(j)=polyval(Q,hred(j));% Valeur des points de la série avec la fonction caractéristique
end
hold on
c=corrcoef(f,ft)
plot(hred,ft,'r')
hred'
ft'
hold on
for i=1:m
    yt1(i)=yt(i)/yy; hred1(i)=(y(i)-y(length(y)))/(y(m)-y(length(y)));
end;c=corrcoef(hred1,yt1)
plot(hred1,yt1,'*')
hred1'
yt1'
y(m)
```

3.2 Macro de lissage des cinétiques de séchage Excel 2003 Visual BASIC

```
Sub Lissage()
'Version définitive
'DECLARATION
'Coordonnées de la première cellule à traiter
Dim Premiere As String
Dim premiereligne As Integer
'Confirmation
Dim confirmation As String
'Nombre de lignes à traiter
Dim Nb_lignes As Integer
' Colonne de calcul
Dim colonnetraitee As Integer
'Nombre de lissages
Dim lissagesmacro As Integer
'Compteurs de boucle
Dim Compteur As Integer
Dim CompteurPrincipal As Integer
'----- PROGRAMME PRINCIPAL -----
'Confirmation du lancement de la macro
confirmation = InputBox("Attention cette macro remplace la colonne traitée. Voulez-vous continuer (O/N)?")
If confirmation = "N" Then
    Stop
End If
'Choix utilisateur
Premiere = InputBox("Coordonnées de la cellule située à droite de la première cellule à traiter (exemple format : A2)")
lissagesmacro = Val(InputBox("Nombre de lissages ?"))
'Calcul du nombre de lignes
Nb_lignes = Val(InputBox("Nombre de lignes à lisser ?"))
Range(Premiere).Select
premiereligne = ActiveCell.Row
colonnetraitee = ActiveCell.Column
For CompteurPrincipal = 1 To lissagesmacro
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=1/8*(5*RC[-1]+3*R[+1]C[-1]+R[+2]C[-1]-R[+4]C[-1])"
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=1/8*(2*R[-1]C[-1]+4*RC[-1]+2*R[+1]C[-1])"
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=1/5*(R[-2]C[-1]+R[-1]C[-1]+RC[-1]+R[1]C[-1]+R[+2]C[-1])"
    Range(Cells(premiereligne + 2, colonnetraitee), Cells(premiereligne + Nb_lignes - 5, colonnetraitee)).Select
    Selection.FillDown
    'Selection.Copy
    'For Compteur = 1 To (Nb_lignes - 7)
    '    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    '    ActiveSheet.Paste
    'Next Compteur
    Cells(premiereligne + Nb_lignes - 4, colonnetraitee).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=1/41*(R[-5]C[-1]+2*R[-4]C[-1]+3*R[-3]C[-1]+4*R[-2]C[-1]+5*R[-1]C[-1]+10*RC[-1]+16*R[+1]C[-1])"
    Selection.Copy
    For Compteur = 1 To 2
        ActiveCell.Offset(1, 0).Select
        ActiveSheet.Paste
    Next Compteur
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=1/6*(R[-1]C[-1]+R[-2]C[-1]+4*RC[-1])"
    'Copie de la colonne lissée sur la colonne originale
    colonne = ActiveCell.Column
    Columns(colonne).Select
    Selection.Copy
    Columns(colonne - 1).Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
        False, Transpose:=False
    Columns(colonne).Clear
    ActiveCell.Offset(premiereligne - 1, 1).Select
Next CompteurPrincipal
End Sub
```

Annexe IV-1 Dimensions du capteur et propriétés physiques des organes

4.1.1 Dimension du Capteur

Capteur	
Vitre	– Longueur :2.02m – Largeur :0.93m – Épaisseur :5mm – Surface totale de captation :1.8786 m²
Conduit d'air confiné	– Distance vitre-tôle absorbante $e_1=3.5$ cm
Tôle absorbante	– Epaisseur : 0.27 mm – Longueur : 2 m – Largeur : 0.90 m
Conduit d'air utile	– Longueur :2.02 m – Largeur :0.85 m – Distance tôle-isolation arrière :6.5 cm – Diamètre hydraulique équivalent $D_h = \frac{4S}{P} = 12.08\text{cm}$
Absorbeur poreux	– Volume apparent:0.1116 m³ – Nombre de tampons métalliques :700 – Volume de la phase solide d'un tampon :5.5 cm³ – Volume de la matrice solide:3850 cm³ – Porosité:$\varepsilon=0.9655$
Isolation arrière	- Copeaux de bois : $e'=5$ cm - Laine de verre : $e= 5\text{cm}$
Isolation Latérale	- Bois :3cm
Cadre de support	- Hauteur sortie haute :75 cm - Hauteur entrée basse :44 cm - Longueur totale du capteur :206 cm - Largeur totale du capteur :96.5 cm - Angle d'inclinaison :8.65°

4.1.2 Propriétés physiques

- * La tôle absorbante
 - Absorptivité : $\alpha_2=0.95$
 - Emissivité : $\varepsilon_2=0.95$
- * La vitre
 - Transmissivité du rayonnement direct :0.9169
 - Transmissivité du rayonnement diffus :0.7617
 - Réflexivité du rayonnement direct :0.0434
 - Réflexivité du rayonnement diffus :0.1461
 - Emissivité : $\varepsilon_1=0.88$
- * La matrice solide de l'absorbeur poreux
 - Masse d'un tampon métallique : 13.6710 g
 - Masse de la matrice solide :9.5697g
 - Masse volumique de la matrice solide :2702 kg/m³
 - Conductivité thermique moyenne de la matrice : 237,9 W/m.K
- * L'isolation arrière
 - Copeaux de bois () :
 - Conductivité thermique : 0.059 W/m.K
 - Masse volumique : $\rho'=140 \text{ kg/m}^3$ (à 303 K)
 - Laine de verre () :
 - Conductivité thermique : $\lambda=0.04 \text{ W/m.K}$
 - Masse volumique : $\rho=200 \text{ kg/m}^3$
 - Chaleur spécifique: $C_p=670 \text{ J/kg.K}$

Annexe IV-2: Calcul des coefficients d'échanges thermiques

4.2.1 Transferts convectifs de la vitre dus au vent

Le coefficient d'échange convectif entre la vitre et le vent est calculé à partir de la formule de Mc Adams (ONG,1995) :

$$h_v = 5.67 + 3.86 V_v \quad (4.2.1)$$

où V_v est la vitesse du vent en m/s

La formule de Mc Adams est utilisée car elle donne, de façon générale, de meilleurs résultats par rapport aux autres (ONG,1995).

4.2.2 Transfert radiatif entre la vitre et le ciel

Le coefficient de transfert par rayonnement entre la vitre et le ciel assimilé à un corps noir est donné par la relation :

$$h_{rlc} = \epsilon_1 \sigma (T_1^2 + T_c^2)(T_1 + T_c) \quad (4.2.2)$$

La température de la voûte céleste T_c est obtenue à par de la relation de Swinbank(1963):

$$T_c = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (4.2.3)$$

4.2.3 Transfert convectif entre l'absorbeur et la vitre

Il s'agit de la convection naturelle entre deux plaques parallèles. On utilise alors la formule de Hollands [82] reliant le nombre de Nusselt et de Rayleigh pour la convection naturelle entre deux plans inclinés d'angle i :

$$N_u = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos i} \right]^+ \times \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8i)^{1.6}}{Ra \cos i} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos i}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (4.2.4)$$

Dans cette expression, la notation $[]^+$ signifie que si la quantité entre les crochets est négative, elle est alors prise égale à zéro. En plus, il faut utiliser la distance e_{12} entre l'absorbeur et la vitre comme diamètre équivalent pour le calcul du coefficient d'échange h_1 .

4.2.4 Transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre

C'est le coefficient de transfert par rayonnement entre deux plaques parallèles donné par la relation (4.27) :

$$h_{r21} = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4.2.5)$$

4.2.5 Transfert entre le milieu poreux et la tôle

On définit un coefficient global de transfert entre le milieu poreux et la tôle donné par :

$$h_2 = h_{c2f} + h_{v2f} \quad (4.2.6)$$

Où h_{c2f} le coefficient d'échange par conduction entre la tôle et le milieu poreux,

h_{v2f} le coefficient d'échange par convection forcée entre la tôle et l'air ;

- Calcul h_{c2f}

$$h_{c2f} = \frac{\lambda_f}{e_3} = \frac{\epsilon \lambda_a + (1 - \epsilon) \lambda_s}{e_3} \quad (4.2.7)$$

Où ϵ porosité du milieu poreux ($\epsilon=0.9655$),

λ_f conductivité thermique du milieu poreux

λ_s conductivité thermique de la matrice solide en aluminium ($\lambda_s=237.9\text{W/m.K}$)

λ_a conductivité thermique de l'air ($\lambda_a \approx 0.0287 \text{ W/m.K}$)

A la gamme de températures d'utilisation, l'ordre de h_{c2f} est estimé à 126.6963 W/m.K

- Calcul de h_{v2f}

Diverses corrélations ont été développées pour calculer le coefficient d'échange par convection forcées. En ce qui concerne l'air, dans le cas des conduits rectangulaires, on peut utiliser la corrélation de Tan et Charters :

$$N_u = 0.018 R_e^{0.8} P_r^{0.4} C \quad (4.2.8)$$

$$\text{Avec : } C = 1 + \frac{D_h}{L} (14.3 \log\left(\frac{L}{D_h}\right) - 7.9) \quad \text{si } \frac{L}{D_h} < 60$$

$$C = 1 + 7.5 \frac{D_h}{L} \quad \text{si } \frac{L}{D_h} > 60$$

Annexe IV-3 : Programme de simulation du couplage capteur-séchoir

close all, clear all

format short

```
%===== FIXATION DES DONNEES DE BASE =====  
%CARACTERISTIQUES ET DIMENSIONS DES ORGANES  
%Surface totale de captation  
S1=1.8786;  
%Angle d'inclinaison du capteur en °degré  
beta=8.65;  
%=====
```

1- LE RAYONNEMENT

```
%=====
```

%CALCUL DU RAYONNEMENT GLOBAL SUR LA SURFACE INCLINEE DU CAPTEUR

```
%Io: constante solaire en W/m2  
Io=1353;  
%Saison sèche A=0.872 et B=0.75  
AT=0.872; %(Desmorieux, 1992)  
BT=0.75;  
%Orientation du capteur'  
nu=0;  
%phi: latitude du lieu étudié en [°] : Ouaga-Aérodrome phi=12°21'N  
phi=12.35;  
%d :numéro du jour dans le moi  
d=15;  
%m: numéro du mois dans l'année  
m=5;  
%calcul du facteur de correction du à la variation de la distance terre-soleil:C  
CO=1+0.034*cos(pi/180*(30*(m-1)+d));  
%calcul de la déclinaison solaire en [°]:delta  
delta=23.45*cos(pi/180*(30*m+d-202));  
%calcul de l'heure du lever du soleil: HLS  
HLS=12-180/pi*acos(-tan(pi/180*(phi-beta))*tan(pi/180*delta))/15;  
%calcul de l'heure du coucher du soleil: HCS  
HCS=12+180/pi*acos(-tan(pi/180*(phi-beta))*tan(pi/180*delta))/15;  
%calcul de l'angle horaire ou de l'heure solaire en [°]:w  
t=[HLS:0.1:HCS];  
%angle horaire  
w=15*(t-12);  
%calcul de la hauteur du soleil: h  
h=180/pi*asin(sin(pi/180*phi)*sin(pi/180*delta)+cos(pi/180*phi)*cos(pi/180*delta)*cos(pi/180*w));  
%azimut du soleil  
a=180/pi*acos((sin(pi/180*phi)*cos(pi/180*delta)*cos(pi/180*w)-cos(pi/180*phi)*sin(pi/180*delta))./cos(pi/180*h));  
%le signe de l'azimut a du soleil est le même que celui de l'angle horaire w  
for i=1:length(t)  
    if w(i)<=0  
        if a(i)>=0  
            a(i)=-a(i);  
        end  
    else  
        if a(i)<=0  
            a(i)=-a(i);  
        end  
    end  
end  
%calcul de l'angle d'incidence formé par le rayon solaire incident et la normale au plan récepteur  
I=180/pi*acos(sin(pi/180*beta)*cos(pi/180*h).*cos(pi/180*(a-nu))+cos(pi/180*beta)*sin(pi/180*h));  
%rayonnement solaire direct  
IDB=Io*CO*AT*exp(-BT./sin(pi/180*h)).*cos(pi/180*I);  
%rayonnement solaire diffus sur une surface unité horizontale  
Id=Io*CO*sin(pi/180*h).*(0.271-0.2939*exp(-BT./sin(pi/180*h)));  
%rayonnement solaire diffus sur une surface inclinée S
```

```
IdB=(1+cos(pi/180*beta))/2*S1*Id+(1-cos(pi/180*beta))/2*S1*AT*(Io*sin(pi/180*h)+Id);
%rayonnement solaire global
PB=IDB+IdB;
%FIGURE DE L'EVOLUTION DES DONNEES SUR LE RAYONNEMENT ET LA PUISSANCE ABSORBEE
figure(1)
plot(t,IDB,'k','linewidth',1.25);
hold on
plot(t,IdB,'ko','linewidth',1.25);
hold on
plot(t,PB,'k-', 'linewidth',1.25);
%=====
=
%
%
%=====
=
%ENTREE DES DONNES
%LAVITRE
%transmissivité du rayonnement direct TOD
TOD=0.9169;
%transmissivité du rayonnement diffus,T0d
T0d=0.7617;
%Réflexivité du rayonnement direct
R0D=0.0434;
%reflexivité du rayonnement diffus
R0d=0.1461;
%%%PUISSANCE ABSORBEE
%coefficient d'absorption de l'absorbeur
alfaN=0.95;
%%Propriétés du vitrage
TOALFA=alfaN*(IDB*TOD+IdB*T0d)/((1-(1-alfaN)*R0D)*(IDB+IdB));
PN=TOALFA*PB;
hold on
plot(t,PN,'k^','linewidth',1.25);
Axis([6.3 18 0 1000])
%Température ambiante
TA0=32.5;TA0K=(273+TA0);
%Débit massique du fluide
mpoint=5e-03;
%Température d'entrée du fluide
TE0=32.5;TE0K=273+TE0;
%Constante de stephane boltzman
sigma=5.6697e-08;
%Autres constantes
g=9.81;beta50=0.003;beta75=1/345;
%VALEURS ARBITRAIRES
%-----
%Température moyenne du fluide
TMF0=60; TMF0K=273+TMF0;TV0=55;
%Température moyenne de l'absorbeur
TN0=90; TN0K=273+TN0;
%Inclinaison
teta=(beta/180)*pi;
%Longueur, largeur et Section du conduit
L=2;l=0.93;Section=0.05;
%Surface du capteur
A=1.8786;
%Vitesse de l'air dans le conduit, %Diamètre hydraulique du conduit
Vair=0.4;DH=0.12;
%Viscosité cinématique, Nombre de Prandtl
nu=1.85e-5;Pr=0.7;
%épaisseur de la couche d'air entre la vitre et l'absorbeur
e1=0.05;
%diffusité t moyenne de l'air
alfair50=2.59e-5;alfair75=29.44e-6;
%Viscosité cinématique moyenne
```

```

nuair50=1.79e-5;
%Conductivité thermique de l'air confiné
lambdair50=0.028;lambdair75=0.03;
%émissivité de l'absorbeur incliné de b
epsab=0.95;
%émissivité de la vitre inclinée de b
epsvb=0.88;
%Vitesse du vent au dessus de la vitre
Vent=0.5;tetadegre=12;
%épaisseur de l'isolant ,épaisseur des faces latérales
ei=0.1; e3=0.03;
%Température moyenne de la face inférieure
TMFI0=40; TMFI0K=(273+40);
%coefficient beta à 35°C
beta35=1/((TMFI0+TA0K)/2);
%%diffusivité thermique moy 35°C
alfair35=2.38e-5;
%Viscosité cinématique air
nuair35=1.62e-5;nuair75=2.08e-5;
%cond thermique air35
lambdair35=0.0262;
%cond thermique isolant laine de verre ; des copeaux de bois et du bois
lambda22=0.04;lambdai21=0.12; lambda3=0.059;
%Nombre de Prandtl à 35°C
Prair35=0.708;
%Surface paroi latérale
Sp3=(2.06+0.965)*2*0.15;
%débit d'air
mpoint=Vair*0.065*0.85;
%Chaleur massique air
Cpair=1009;
%Facteur tenant compte de l'inclinaison sur les coefficients de transfert
C=365.9*(1-0.00883*tetadegre+0.00012*tetadegre^2);
%CALCUL DES COEFFICIENTS D'ECHANGE THERMIQUE
%Calcul du CET convectif entre la vitre et l'ambiance
%-----
HCVVA=5.7+3.8*Vent;
%Facteur correctif tenant compte de l'effet du vent
%-----
f=(1-0.04*HCVVA+0.0005*HCVVA^2)*(1+0.091);
%Processus itératif
for i=16:length(t)-15
TA(i)=32.5;TAK(i)=305.5;TE(i)=32.5;TEK(i)=273+TE(i);TMF(i)=60;TMFK(i)=273+TMF(i);TN(i)=90;TNK(i)=273+TN(i);
for it=1:1000
    %Calcul des propriétés thermophysiques de l'air
    T(i)=(TMF(i)+TN(i))/2;
    muair(i)=(1.983+0.00184*(T(i)-27))*1e-5;
    roair(i)=1.1774-0.00359*(T(i)-27);
    nuair(i)=muair(i)/roair(i);
    lambdair(i)=0.02624+0.0000758*(T(i)-27);
    Cpair(i)=1005.7+0.000066*(T(i)-27);
    %Calcul du CET de l'air dans le conduit utile
    %=====
    %Calcul du nombre de Reynolds
    Re(i)=Vair*DH/nuair(i);
    %Nusselt Tan et Charters
    Nu(i)=0.018*(Re(i)^0.8)*(Pr^0.4)*(1+(DH/L)*(14.3*log(L/DH)-7.9));
    HCVNF(i)=lambdair(i)*Nu(i)/DH;
    %Calcul du CET convectif entre la face arrière et l'ambiance
    %=====
    Ray(i)=g*cos(pi/2-teta)*beta35*(TMFI0K-TAK(i))*L^3/(alfair35*nuair35);
    Nuy(i)=(0.1+0.05*teta/pi)*Ray(i)^0.333; HCVFIA(i)=lambdair35*Nuy(i)/L;
    %Calcul du coefficient global des pertes à l'avant
    z(i)=C/TN(i);
    PP1(i)=(TN(i)-TA(i))/((z(i))*(((TN(i)-TA(i))/(1+f))^0.31 +1/HCVVA)) + sigma*(TNK(i)^4-
    TAK(i)^4)/( 1/(epsab+0.0425*(1-epsab)) + (2+f-1)/epsvb -1 );
    %Calcul des pertes thermiques de la face inférieure(TMFI=35°C)

```

```

PP2(i)=(TN(i)-TA(i))/((ei/2)/lambda22+(ei/2)/lambda21+1/HCVFIA(i));
%Calcul des pertes thermiques ds les parois latérales
PP3(i)=2*(lambda3/e3)*(TN(i)-TA(i));      %coefficient UL de pertes totales
%-----
UL(i)=(A*PP1(i)+A*PP2(i)+Sp3*PP3(i))/(A*(TN(i)-TA(i)));
%Calcul du coef de correction FP
FP(i)=1/(1+UL(i)/HCVNF(i));
%Calculde FR
FR(i)=(mpoint*Cpair(i)/(A*UL(i)))*( 1-exp(-A*UL(i)*FP(i)/(mpoint*Cpair(i))));
%Puissance utile
PU(i)=PN(i)-UL(i)*(TN(i)-TA(i));
% Nouveau calcul de la température moy du fluide
TMF(i)=TE(i)+(PU(i)/(UL(i)*FR(i)))*(1-FR(i)/FP(i));
%Nouveau calcul de la température moy de l'absorbeur
TN(i)=TMF(i)+PU(i)/HCVNF(i);
%température à la sortie du capteur
TS(i)=TE(i)+A*PU(i)/(mpoint*Cpair(i));
end;
i=i+1;
end;
%Ajustement de la Puissance utile
for i=16:length(t)-15
if PU(i)<0
PU(i)=0;
end;
end;
%Calcul de la température de la vitre
for i=16:length(t)-15
TNK(i)=TN(i)+273;TV(i)=60;TVK(i)=TV(i)+273;
%Température Voute celestre (Swimbank)
TC(i)=0.0552*(TA(i)^1.5);
for it=1:1000
ROV=2710;CpV=837;eV=0.005; deltat=360;
%Calcul du CET par convection entre la vitre et l'air confiné
%=====
Ra12(i)=g*beta75*(e1^3)*(TNK(i)-TVK(i))/(alfair75*nuair75);
Gr12(i)=Ra12(i)*(alfair75/nuair75);
%=====Formule de Dropkin=====
Nu120(i)=(0.060-0.017*(beta/90))*(Gr12(i)^(1/3));
Nu12(i)=Nu120(i);HCVVN(i)=Nu12(i)*lamdair75/e1;
%Calcul du CET par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre
HRVN(i)=sigma*(TNK(i)^2+TVK(i)^2)*(TNK(i)+TVK(i))/(1/epsab+1/epsvb-1);
%Calcul du CET entre la vitre et le milieu ambiant
%=====
%Entre la vitre et la voute celestre
HRVV(i)=epsvb*sigma*(TV(i)^2+TC(i)^2)*(TV(i)+TC(i));
%Entre la vitre et le milieu ambiant
HRCVA(i)=HCVVA+HRVV(i)*(TV(i)-TC(i))/(TV(i)-TA(i));
%Puissance absorbée par la vitre
%=====
PV(i)=(1-T0D-R0D)*IDB(i)+(1-T0d-R0d)*IdB(i);
%Température de la vitre
%=====
TV(i)=TN(i)-(HRCVA(i)*(TN(i)-TA(i))-PV(i))/(HRVN(i)+HCVVN(i)+HRCVA(i));
TVK(i)=TV(i)+273;
end;
i=i+1;
end;
%=====
%
%
%=====
format long;
%oooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
% LES CONSTANTES UTILES
%Pression atmosphérique (en Pascal)
Pat=1.01325e5;

```

```
%L'intensité de la pesanteur (m²/s)
g=9.81;
%Constante des gaz parfaits molaire de la vapeur d'eau en (j/gK) et de l'air sec (j/gK)
Ras=287.19;Rv=461.917;
%Surface d'une claie et taux de contact
S0=0.3564;tau=0.9;
%Longeur et largeur des claies
Lc=0.81; lc=0.44;
%Diamètre Hydraulique des claies
DHC=S0/(2*(Lc+lc));
%onstante des gaz parfaits et constante des gaz parfaits de l'air humide(kJ/gK)
R=8.3145;Ro=0.4676;
%oooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
% INITIALISATION
%pas de temps, Pas d'espace
deltat=360;t0=0;deltax=0.2;
%Constantes de Xeq du modèle d'Henderson modifié
a=0.01932; b=0.3316; c=44.36;
%Constantes du modèle de Page du séchage solaire avec t en seconde
ko=0.0001551;y=0.8081;
%Nombre de pas de temps et d'espace
nmax=92;
jmax=5;
for n=2:nmax-1
Teta0(n)=abs(TS(n+15))+273.15;
end;
% % % Conditions d'entrée dans le canal
for n=2:nmax-1
for j=2:jmax
%oooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
% PROPRIETES DE L'AIR HUMIDE
%Température de l'air au départ
Teta(2,n)=Teta0(n);
%Humidité relative moyen de l'air en équilibre
phi4=0.8463;
%Hygrométrie relative de l'air au départ
HR(2,n)=0.0992; HR(1,n)=0.0992;
%Humidité absolue de l'air à l'entrée
W(2,n)=0.015;
%Fraction massique de la vap. eau ds l'air à l'entrée
CV(2,n)=0.0148;
%Masse volumique de l'air
roa(2,n)=1.1774-0.00359*(Teta(2,n)-273.15-27);%roa=1.073;
%chaleur spécifique air sec
Cpas(2,n)=1005.7+0.000066*(Teta(2,n)-273.15-27);%Cpas=1006;
%Conductivité thermique de l'air;
lambda(2,n)=0.02624+0.0000758*(Teta(2,n)-273.15-27);%lambdair=0.028;
% vitesse d'écoulement ;Débit volumique de l'air ( en m³/s)
va=0.03125;dva=0.018;
%Débit massique de l'air
ma(2,n)=roa(2,n)*dva;%ma=0.0193;
%viscosité cinématique de l'air
nua(2,n)=(1.983+0.00184*(Teta(2,n)-273.15-27))*1e-5;
%viscosité dynamique
mua(2,n)=nua(2,n)/roa(2,n);
%Pression de l'air variable en bars
p(2,n)=(roa(2,n)*R/29)*Teta(2,n)*1e-2;
%Chaleur Latente de vaporisation
Lva(2,n)=Ro*(6435.7-Teta(2,n)*3.868);
%Pression de vapeur saturant dans la couche limite d'air au départ
coef1(2,n)= 17.443-( 2795/Teta(2,n) );
coef2(2,n)= -3.868*log10(Teta(2,n));
coef3(2,n)= coef1(2,n)+coef2(2,n);
PVS0(2,n) =(10^coef3(2,n));
PVS(2,n)=101330 *PVS0(2,n);%Bertrand
%oooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
%CALCUL DES COEFFICIENTS DE TRANSFERTS DE MASSE
```

```
%Diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air (Avec p en bars)
Dv(2,n)=2.26e-5*(1/p(2,n))*((Teta(2,n)/273.15)^1.81);%Daguenet(1985)
%Nombre de Schmid
Sc(2,n)=mua(2,n)/Dv(2,n);
%Nombre de Reynold massique
Rem(2,n)=(va*DHC)/mua(2,n);
%Nombre de Sherwood
Sh(2,n)=0.692*(Rem(2,n)^0.514)*(Sc(2,n)^(1/3));
%oooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
%CALCUL DES COEFFICIENTS DE TRANSFERTS DE CHALEUR
%Nombre de Reynold Thermique
Re(2,n)=(va*DHC)/mua(2,n);
%Nombre de Nusselt
Nuss(2,n)=0.692*(Re(2,n)^0.614)*(Pr^1/3);%(Desmorieux,1992)
%oooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
% PROPRIETES PHYSIQUE DE LA MANGUE ET DE L'EAU
%Température des tranches de fruits au départ
Te(j,1)=308.15;Te(j,2)=308.15;
%fraction massique d'eau du produit au départ
CI(j,2)= 0.85735041229297;CI0= 0.85735041229297;
%Teneur en eau iniale des tranches
X(j,2)=CI(j,2)/(1-CI(j,2));Xi(j,n)=CI0/(1-CI0);
%Teneur en eau initiale
X0=CI0/(1-CI0);
%Energie d'activation
Ea=25355;
%Taux de contraction surfacique
Ss(j,2)=1;
D(j,2)=2.77e-6*exp(0.12*X(j,2))*exp(-Ea/(R*Te(j,2)));
% chaleur spécifique vapeur d'eau (en J/kgK)
Cpv=4185;%Geankoplis(1978)
% F chaleur spécifique de l'eau
Cpe=4183;
%chaleur spécifique de la matière sèche de mangue
Cpd=1657;%Mujumdar(1993)
%Chaleur spécifique de la mangue sèche
Cps(j,2)=Cpd+Cpv*X(j,2);
%conductivité thermique de la mangue (en J/(m.s.K)
lambdas(j,2)=0.1418+0.0493*X(j,2)/(1+X(j,2));%Singh & Heldman (1993)
%Masse volumique de la mangue(kg/m3)
ross(j,2)=(350-30*X(j,2))*e3; %Ruiz Lopez(2007)
%épaisseur des tranches
e=0.01;
end; end;
%Coefficient d'échange externe
for n=2:nmax-1
he(2,n)=((Sh(2,n))*Dv(2,n))/DHC;
end;
%Coefficient d'échange interne
for j=2:jmax
hi(j,2)=D(j,2)/e;
end;
%Coefficient d'échange thermique
for n=2:nmax-1
h(2,n)=nua(2,n)*lambda(2,n)/DHC;
end;
%Evaluation de certaines constantes
m0=1; ms=m0/(X0+1);
for n=2:nmax-1
H1(2,n)=h(2,n)*S0*tau;C1=ma(2,n)*Cpas(2,n);
end;
for j=2:jmax
m4(j,2)=1; C2(j,2)=m4(j,2)*Cps(j,2)/(deltat*3600);
end;
%INITIALISATION DES CALCULS
for n=2:nmax+1
tp(n-1)=(n-1)*deltat;
```

```

    if n==nmax+1
        break
    end;
end;
%=====
% ALGORITHMES ITERATIFS
%=====
for it=1:5
    for n=2:nmax-1
        for j=2:jmax
            Teta(1,n)=Teta(2,n);
            X(j,2)=X0;X(j,3)=X0;X(j,4)=X0;X(j,5)=X0; Te(j,3)=T0;Te(j,4)=T0
            Te(j,5)=T0;
            %Calcul de la teneur en eau équivalente du produit
            Xeq(j,n)=(-log(1-HR(j-1,n)))/(a*(Teta(j-1,n)-273+c))^(1/b);
            %Vitesse de séchage déduite du modèle de Page
            deltac(j,n)=(deltat)*(Xi(j,n)-Xeq(j,n))*(-ko*y*(tp(n)^(y-1)))*exp(-ko*(tp(n)^y));
            X(j,n)=X(j,n-1)+deltac(j,n);
            CI(j,n)=X(j,n)/(X(j,n)+1);
            %Variation de la masse de fruit au cours du temps
            deltam(j,n)=deltac(j,n)*ms;
            %Nouvelle masse de produit
            m4(j,n)=m4(j,n-1)+deltam(j,n);
            %Nouvelle Chaleur spécifique du produit
            Cps(j,n)=Cpd+Cpv*X(j,n);
            %Nouvelle chaleur de vaporisation de l'instant n+1 sur la claie j
            Lva(j,n)=Ro*(6435.7-Teta(j-1,n)*3.868);
            C2(j,n)=m4(j-1,n)*Cps(j,n)/(deltat);
            %Calcul des coefficients de transfert de masse au temps n
            D(j,n)=2.5331e-6*exp(-0.55*X(j,n))*exp(-Ea/(R*Te(j,n-1)));
            hi(j,n)=D(j,n)/e;
            roa(j,n)=1.1774-0.00359*(Teta(j-1,n)-273.15-27);
            nua(j,n)=(1.983+0.00184*(Teta(j-1,n)-273.15-27))*1e-5;
            mua(j,n)=nua(j,n)/roa(j,n);
            p(j,n)=(roa(j,n)*R/29)*Teta(j-1,n)*1e-2;
            Dv(j,n)=2.26e-5*(1/p(j,n))*((Teta(j-1,n)/273.15)^1.81);
            Sc(j,n)=mua(j,n)/Dv(j,n);
            Rem(j,n)=(va*DHC)/mua(j,n);
            Sh(j,n)=0.692*(Rem(j,n)^0.514)*(Sc(j,n)^(1/3));
            he(j,n)=((Sh(j,n))*Dv(j,n))/DHC;
            Ss(j,n)=((1+1.4687*X(j,n))/(1+1.4687*Xi(j,n)))^(2/3);
            S(j,n)=Ss(j,n)*S0;
            H2(j,n)=S(j,n)*tau*Lva(j,n)*(hi(j,n)*he(j,n)/(he(j,n)+hi(j,n)));
            lambda(j,n)=0.02624+0.0000758*(Teta(j-1,n)-273.15-27);
            %Nombre de Reynold
            Re(j,n)=(va*DHC)/mua(j,n);
            Nuss(j,n)=0.692*(Re(j,n)^0.614)*(Pr^(1/3));
            h(j,n)=Nuss(j,n)*lambda(j,n)/DHC;
            H1(j,n)=h(j,n)*S(j,n)*tau;
            PEV(j,n)=H2(j,n)*S(j,n)*tau*(CI(j,n)-CV(j-1,n));
            Te(j,n)=(1/(H1(j,n)+C2(j,n)))*(C2(j,n)*Te(j,n-1)+H1(j,n)*Teta(j-1,n)-PEV(j,n));
            ma(j,n)=roa(j,n)*dva;
            Cpas(j,n)=1005.7+0000.066*(Teta(j-1,n)-273.15-27);
            C1(j,n)=ma(j,n)*Cpas(j,n);
            C2(j,n)=m4(j,n)*Cps(j,n)/(deltat*3600);
            PP(j,n)=H1(j,n)*(Teta(j-1,n)-Te(j,n));
            Teta(j,n)=-PP(j,n)/C1(j,n)+Teta(j-1,n);
            %Calcul du new CV
            %Calcul de la nouvelle HR au départ
            coef1(j,n)= 17.443-( 2795/Teta(j,n) );
            coef2(j,n)= -3.868*log10(Teta(j,n));
            coef3(j,n)= coef1(j,n)+coef2(j,n);
            PVS0(j,n) =(10^coef3(j,n));
            PVS(j,n)=101330 *PVS0(j,n);
            HR(j,n)=1-exp( -a*(Te(j,n)-273+c)*Xeq(j,n)^b);
            %Chaleur de sorption

```

```
W(j,n)=0.622*HR(j,n)* PVS(j,n)/(1.013-HR(j,n)* PVS(j,n));
CV(j,n)=W(j,n)/(1+W(j,n));
Te(j,n)=(1-(H1(j,n))/(C1(j,n)))*Teta(j-1,n)+((H1(j,n))/(C1(j,n)))*Teta(j,n);
PV(j,n)=HR(j,n)*PVS(j,n);
if j==jmax
    break
end; j=j+1;
if n==nmax-1
    break
end; n=n+1;
end;%pour le it
end;%pour le n
end;%pour j
figure(1)
for j=2:jmax
    for n=2:nmax-1
        plot(tp(n),X(j,n),'ko');
    end;hold on
end;
figure(2)
for j=2:jmax
    for n=2:nmax-1
        plot(tp(n),Te(2,n),'ko'); hold on
    end; hold on
end; hold on
for j=2:jmax
    for n=5:nmax-1
        plot(tp(n),Teta(2,n),'ko');hold on
    end;
end;
```

Annexe IV-4 : Propriété de l'air humide et paramètres de simulation du séchage

4.4.1 Composition de l'air humide

L'air humide est le mélange homogène d'air sec et de vapeur d'eau. Si P_{as} est la pression partielle de l'air sec, P_v la pression partielle de la vapeur d'eau et P la pression totale de l'air humide ; en utilisant la loi de Dalton, on a :

$$P = P_{as} + P_v \quad (4.4.1)$$

et

$$\rho = \rho_{as} + \rho_v \quad (4.4.2)$$

Où ρ , ρ_{as} , ρ_v sont les masses volumiques respectives de l'air humide, de l'air sec et de la vapeur d'eau.

4.4.2 Humidité relative

Encore appelée hygrométrie relative ou degré hygrométrique ou tout simplement hygrométrie et désignée par H_r ou Φ ; elle est donnée par :

$$H_r = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (4.4.3)$$

où ρ_{vs} et P_{vs} sont respectivement la masse volumique et la pression de la vapeur à la saturation.

4.4.3 Humidité absolue

Elle est notée ω ou H_{ab} et est donnée par l'expression :

$$H_{ab} = \frac{m_v}{m_{as}} = 0.622 \frac{P_v}{P_{as}} = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (4.4.4)$$

où m_v et m_{as} sont les masses d'eau et d'air sec contenues dans l'air humide.

4.4.4 Fraction massique de la vapeur d'eau dans l'air humide

Elle est donnée par (4.4.5):

$$C_v = \frac{m_v}{m} = \frac{m_v}{m_v + m_{as}} = \frac{m_v / m_{as}}{1 + m_v / m_{as}} = \frac{H_{ab}}{1 + H_{ab}} = \frac{0.622 \frac{P_v}{P - P_v}}{1 + 0.622 \frac{P_v}{P - P_v}} = \frac{0.622 P_v}{P - 0.378 P_v}$$

4.4.5 Chaleur latente de vaporisation

Elle est donnée par la relation de Clapeyron (Daguenet, 1985)

$$L_V = T(V_{VS} - V_L) \frac{d}{dT}(P_{VS}) \quad (4.4.6)$$

où V_{vs} est le volume massique de la vapeur saturante et V_L le volume massique du liquide.

4.4.6 Pression de vapeur saturante

Elle est donnée par la formule expérimentale de Bertrand des logarithmes décimaux (Daguenet, 1985) :

$$P_{VS} = 10^{17.443 - \left(\frac{2795}{T}\right) - 3.868 \log_{10} T} \quad (4.4.7)$$

où $T(K)$ et $P_{vs} (Atm)$

4.4.7 Coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air

Il est donné par la formule de Shirmer (Daguenet, 1985) :

$$D_V = 2.26 \times 10^{-5} \cdot \frac{1}{P} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.81} \text{ en m}^2/\text{s} \quad (4.4.8)$$

où P est en bars et T en °C

4.4.8 Propriétés physique de l'air (Ong, 1995)

- Viscosité dynamique : $\mu_a = [1.983 + 0.00184(T-27)] \cdot 10^{-5} \text{ (kg/m.s)}$ (4.4.9.a)
- Masse volumique : $\rho_a = 1.1774 - 0.00359(T-27) \text{ (kg/m}^3\text{)}$ (4.4.9.b)
- Conductivité thermique : $\lambda_a = 0.02624 + 0.0000758(T-27) \text{ (kg/m}^3\text{)}$ (4.4.9.c)
- Chaleur spécifique : $C_{p_a} = 1.0057 + 0.000066(T-27) \text{ (J/kg.K)}$ (4.4.9.d)
- Vitesse moyenne dans le conduit utile : $v_a = 0.3258 \text{ m/s}$ (4.4.9.e)

4.4.9 Coefficient de transferts de chaleur et de masse

Le coefficient d'échange thermique à la surface de l'échantillon est évalué à partir de la formule (Incropera & Dewitt, 1996 in Hassini, Azouz, Peczalski & Belghith, 2007) :

$$h = 0.232 \frac{\lambda_a}{l} \left(\frac{v_a l}{\nu_a} \right)^{0.731} Pr^{0.35} \quad (4.4.10)$$

Où l est la largeur de la tranche, λ_a , ν_a et v_a la conductivité thermique, la viscosité cinématique et la vitesse de l'air.

La valeur du coefficient de transfert de masse K_m est déduite de celle de h en se basant sur l'analogie de Colburn sur les transferts couplés de chaleur et de masse généralement utilisée en séchage. K_m est alors donné par la relation (*Peczalski & Laurent, 2001 in Hassini, Azouz, Pecalski & Belghith, 2007*) :

$$K_m = \frac{h}{65Lv(T_h)} \quad (4.4.11)$$

Pour le séchage en couche mince, les coefficients de transfert de masse et de chaleur sont déterminés à partir des nombres de Sherwood et de Nusselt grâce à la loi de Pasternak et Gauvin (*Desmorieux, 1992*):

$$Nu = 0.692 Re^{0.514} Pr^{1/3}, \text{ pour } 500 < Re < 5000 \quad (4.4.12a)$$

$$Sh = 0.692 Re^{0.514} Sc^{1/3}, \text{ pour } 500 < Re < 5000 \quad (4.4.12b)$$

4.4.10 Chaleur spécifique de la mangue (*Greankoplis, 1978*) :

$$C_p = 1.658X + 1.658; (J.g^{-1}.K^{-1}) \quad (4.4.13)$$

Nom: DISSA

Prénom: Alfa Oumar

**SECHAGE CONVECTIF DE LA MANGUE
ANALYSE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES AERAULIQUES ET
INTRINSEQUES, CONCEPTION ET MODELISATION DU
FONCTIONNEMENT D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT.**

RESUME

La caractérisation du séchage convectif de la mangue, la conception et la modélisation d'un séchoir solaire indirect à claie adapté au séchage en couche mince de ce fruit ont été présentées dans ce travail. Les conditions d'équilibre entre l'air et le produit au cours du séchage ont été illustrées à travers l'isotherme de désorption et la contraction volumique. L'influence des paramètres aérauliques et intrinsèques sur la cinétique de séchage de la mangue a été analysée; la diffusivité d'eau a été identifiée et l'influence du retrait du produit sur celle-ci a ainsi démontrée. Un séchoir solaire indirect a été conçu et ensuite modélisé. Une caractérisation expérimentale du séchoir prototype a été effectuée et les courbes de séchage expérimentales ont été comparées aux courbes simulées. Une étude expérimentale comparée des cinétiques de séchages établies à l'aide du séchoir solaire indirect étudié et des cinétiques obtenues à partir d'un séchoir solaire direct et d'un séchoir électrique convectif à été ensuite présentée. Une analyse comparée de l'influence de la variété du fruit sur chaque type de séchoir a enfin été illustrée.

MOT CLES : mangue, maturité, séchage convectif, isotherme de désorption, contraction, cinétiques, diffusivité d'eau, Teneur en eau, capteur solaire, Séchage solaire indirect, couche mince, modélisation.

LABORATOIRES DE RECHERCHE

LABORATOIRE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

.....

LABORATOIRE D'AUTOMATISME ET DE GENIE DES PROCEDES