



Université d'Abobo-Adjamé

République de Côte d'Ivoire
Union-Discipline-Travail
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Année Universitaire
2008-2009

Numéro d'ordre
...93...

Soutenu publiquement
Le 22-07-2010

THESE

Pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences et
Technologies des Aliments de l'Université d'Abobo-Adjamé

Spécialité : Biochimie et Technologie des Aliments

Présentée par

AKMEL Djedjro Clément

THEME

**SECHAGE SOLAIRE DES FEVES DE CACAO :
étude expérimentale et modélisation
de la cinétique de séchage**

Commission d'examen :

AMANI N'guessan Georges	Professeur Titulaire	UAA	Président
KOUAME Patrice	Professeur Titulaire	UAA	Co-Directeur
ASSIDJO Nogbou Emmanuel	Professeur Titulaire	INP-HB	Co-Directeur
TANO Kablan	Maître de Conférences	UAA	Rapporteur
ANDOH Yobouet Honoré	Maître de Conférences	INP-HB	Rapporteur
BOA David	Maître de Conférences	UAA	Examineur
BOHOUA Louis Guichard	Maître de Conférences	UAA	Examineur

A

Erdice et Loïs Daniella

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été effectué au sein du Laboratoire des Procédés Industriels, de Synthèses, de l'Environnement et des Energies Nouvelles (LAPISEN) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) en collaboration avec l'Entreprise Coopérative de Yamoussoukro (ECOYA).

Tout d'abord, Je tiens à remercier le Professeur Benjamin YAO, Directeur du Département Génie Chimique et Agro Alimentaire de l'INP-HB et directeur du LAPISEN, dont le Laboratoire a servi de lieu de déroulement de stage et aussi pour l'encadrement.

Je remercie avec déférence le Professeur N'guessan Georges AMANI, pour avoir accepté mes nombreuses visites au Laboratoire de Biochimie alimentaire et de Technologies des produits tropicaux qu'il dirige et par ailleurs en sa qualité de président de jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également à l'endroit du Professeur Patrice KOUAME, doyen de l'Unité Formation et de Recherche (UFR) des Sciences et Technologies des Aliments (STA) de l'Université d'Abobo Adjamé (UAA), pour la direction scientifique de cette thèse.

Leur collaboration a favorisé le rapprochement du LAPISEN (INP-HB) et de l'UFR-STA (UAA).

Je tiens également à remercier le Professeur Emmanuel ASSIDJO qui a accepté la co-direction de cette thèse. Il a su me faire profiter de son expérience au travers des discussions au cours desquelles il m'a fait partager sa vision toujours claire de la maîtrise des procédés par la modélisation et la simulation. Ses qualités scientifiques et pédagogiques sont pour beaucoup dans l'aboutissement de ces travaux.

J'exprime toute ma reconnaissance envers le Professeur Yobouet Honoré ANDOH et le professeur TANO Kablan pour avoir accepté de juger cette thèse et pour leurs remarques pertinentes.

Je tiens également à remercier sincèrement le Professeur Louis Guichard BOHOUA et le Professeur David BOA pour leur participation à mon jury.

J'exprime toute ma gratitude à M. LATH, directeur de la coopérative ECOYA, pour m'avoir mis en contact avec les planteurs KOFFI Jean et KOUADIO Léonce pour la livraison de fèves fermentées et pour m'avoir autorisé à suivre toutes les activités post-récoltes du cacao dans le village Toumbokro.

Je tiens à adresser mes remerciements à M. TANO Kassi, ex-Directeur Général de la Bourse du Café et du Cacao (BCC) et à tout le personnel de la Direction Technique et des Etudes de la BCC avec qui nous avons discuté de la contribution de ma thèse dans la lutte contre la mauvaise qualité du cacao bord champ. Je remercie en particulier Mme TANOË, responsable de cette direction, qui, vu l'intérêt du sujet, a insisté auprès de son Directeur Général afin de m'accorder une aide financière pour entamer mes travaux de recherche.

Je tiens également à souligner la contribution importante de :

- Professeur Augustin ADIMA dont les conseils en matière de dosage des acidités ont été primordiaux pour l'exécution du protocole de dosage;
- M. Michel BAREL, responsable CIRAD-CP (Cultures Pérennes) qui a fourni, dans le cadre de notre collaboration, les méthodes d'analyse chimique des fèves de cacao ;
- Professeur Prosper GBAHA et Professeur Yobouet Honoré ANDOH du Département Génie Mécanique et Energétique de l'INP-HB qui ont mis à ma disposition tout le matériel de suivi des paramètres aérothermiques;
- Dr Mathias DANHO; Dr Kouamena ABOH et tout le personnel du Département Agriculture et Ressource Animale de l'INP-HB pour leur collaboration ;
- M. BOUA Tenin, pour l'autorisation de travail sur la station météo de l'Ecole Supérieure d'Agronomie de l'INP –HB ;
- M. TANOH Firmin du Laboratoire National de Semences pour tout le matériel utilisé.
- Messieurs AKON Amoua, N'GORAN Koffi Félix et YAO Koffi du Laboratoire de Pédologie de l'INP-HB pour tout le matériel utilisé ;
- L'équipe de recherche de Nutrition et Technologies des Aliments du LAPISEN pour la franche collaboration.

Mes remerciements vont bien entendu à ma famille particulièrement à mon père AKMEL et à mon petit frère AKPESS, sans oublier mes amis qui ont su m'entourer au cours de ces années d'une inestimable affection.

Je profite de ces quelques lignes pour saluer la générosité de M. KOUAME Badou Jérémie, mon tuteur qui m'a supporté pendant toute la durée de mon stage pratique. Je tiens également à remercier M. Sui Théodore, mon compagnon durant tout le moment pratique de ce stage.

Je remercie aussi toutes les personnes que j'ai pu côtoyer au sein du l'INP-HB, qu'elles soient enseignantes et/ou stagiaires et qui ont contribué au bon déroulement de mes travaux de recherche.

RESUME

En Côte d'Ivoire, dans la majorité des cas, le cacao est séché à l'air libre en couche mince sur des aires cimentées, des claies ; des bâches noires en plastiques et bien d'autres dispositifs généralement déconseillés que sont les tôles et les bitumes. Bien que n'ayant pas fait réellement l'objet d'étude, ces dispositifs de séchage à l'air libre sont quelque fois mentionnés comme responsable de la mauvaise qualité du cacao bord champ et contribueraient à une augmentation de l'acidité des fèves. Un autre problème lié au séchage est que la teneur en eau des fèves reste au dessus des 8 % en fin de séchage. Les objectifs de cette étude ont été d'évaluer l'influence de ces dispositifs de séchage au soleil sur l'acidité des fèves ; d'accroître les connaissances dans le domaine du séchage solaire à l'air libre et sous serre des fèves de cacao ; et de développer un modèle de simulation numérique permettant de décrire le comportement du séchage. Pour mener à bien ce travail, les cinétiques de séchage à l'air libre sur différents dispositifs et sous une serre expérimentale ont été observées durant deux campagnes cacaoyères. Les résultats ont montré qu'il n'y a pas de différence significative ($p=0.05$) de l'effet des dispositifs de séchage à l'air libre sur l'acidité des fèves de cacao. Les isothermes de désorption des fèves de cacao ont été décrites avec satisfaction par le modèle d'Oswin à 30, 40 et 60°C. Les courbes de séchage des fèves de cacao ont compris une seule phase à allure décroissante avec un front de séchage qui se retirait. Parmi tous les modèles empiriques testés, le modèle Logarithmique a décrit au mieux le comportement du séchage des fèves de cacao. Ses coefficients phénoménologiques, tenant compte de l'effet des paramètres aérothermiques dans le processus de séchage, ont permis, d'une part, un meilleur ajustement avec une corrélation r de 0,995; un $RMSE$ de 0,022 et un R^2 de 0,079 et, d'autre part, une bonne simulation des essais de séchage du cacao non intervenus dans la construction du modèle. Ce modèle, obtenu dans les conditions réelles de séchage, présente un grand intérêt. Il permet de suivre la teneur en eau des fèves à tout moment de la journée et de prévoir la durée d'exposition solaire des fèves pour atteindre la teneur en eau de 8%. Cette étude démontre que le séchage sous serre est performant surtout à cause de sa courte durée.

Mots clés : dispositif de séchage ; acidités du cacao ; isothermes de désorption ; courbes de cinétique ; modèles empiriques.

ABSTRACT

In Ivory Coast, most of the time cocoa beans are dried on the sun in thin layer with the cemented surfaces, the wooden surfaces, the black tarpaulin and with other surfaces generally advised against as the sheet metal and the asphalts. Although, not having really been the subject of research, the surfaces used for sun drying by the free air are sometimes mentioned as factors of the bad quality of the cocoa beans. Another problem of sun drying is the moisture content of the beans which is above 8% at the end of drying. The objectives of this survey were to evaluate the effect of the surface type used on the acidity of beans during sun drying; to increase the knowledge in the domain of the solar drying by free air and under greenhouse of the cocoa beans; and to develop a numeric simulation model to explain the drying behaviour. This model would help the trainer of the planters to follow the drying in the improvement of the quality. In this work, the sun drying kinetics of thin layer cocoa beans on the free air and under an experimental greenhouse were investigated during two cocoa campaigns. The data obtained were adjusted to several regression models in order to determine the best fit. Results showed that there is no statistical differences ($p=0.05$) among the acidities of the cocoa beans on the surfaces used for sun drying by the free air. The isotherms of the cocoa beans have been described successfully by the model of Oswin at 30, 40 and 60°C. The drying curves of the cocoa beans put on sun show only a failing drying rate period with a receding front model. Among all empiric models adjusted, the Logarithmic model was found satisfactorily to describe the drying curves of the cocoa beans with the highest determination coefficient (0.995) and the lowest RMSE (0.022) and χ^2 (0.079). This model, obtained under the real conditions of drying, is of great interest. It allows, knowing the conditions of drying, on the one hand to follow the moisture content of broad beans constantly of the day and on the other hand to predict the solar exposure time of beans to reach the 8% of moisture. This study shows that drying under greenhouse is powerful because of its short duration of drying.

Key words: surfaces; acidities of the cocoa, Sorption isotherms, drying curves , empiric models.

TABLE DES MATIERES

	Page
DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIERES	VIII
LISTES DES TABLEAUX ET FIGURES	X
SIGLES ET ABREVIATIONS	XIII
NOMENCLATURE	XIV
INTRODUCTION	1
I-REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1.1 LE CACAO	5
1.1.1 HISTOIRE DE LA CULTURE DU CACAOYER	5
1.1.2 STRUCTURE DE LA FILIERE CACAO DANS LE MONDE	6
<i>1.1.2.1 Production</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2.2 Consommation: Les broyeurs</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2.3 Négoce et Marchés à terme</i>	<i>7</i>
1.1.3 ACTEURS DE LA FILIERE CACAO EN COTE D'IVOIRE	9
<i>1.1.3.1 Structures institutionnelles de la filière</i>	<i>9</i>
<i>1.1.3.2 Structures actuelles de gestion de la filière</i>	<i>9</i>
<i>1.1.3.3 Producteurs</i>	<i>9</i>
<i>1.1.3.4 Acheteurs ou traitants et pisteurs</i>	<i>10</i>
<i>1.1.3.5 Usines de conditionnement</i>	<i>10</i>
<i>1.1.3.6 Autres intervenant à l'embarquement</i>	<i>11</i>
<i>1.1.3.7 Transporteurs</i>	<i>11</i>
<i>1.1.3.8 Sociétés concessionnaires de qualité</i>	<i>11</i>
<i>1.1.3.9 Exportateurs</i>	<i>13</i>
<i>1.1.3.10 Transformateurs locaux de cacao</i>	<i>13</i>
1.1.4 QUALITES ET CATEGORIES DES CACAOS DU MARCHE	14
<i>1.1.4.1 Producteurs de Bulk</i>	<i>15</i>
<i>1.1.4.2 Producteurs de cacaos fins et rares</i>	<i>16</i>
1.1.5 DESCRIPTION DE LA PLANTE	16
<i>1.1.5.1 Classification et groupes</i>	<i>16</i>
<i>1.1.5.2 Arbre et fleurs</i>	<i>19</i>
<i>1.1.5.3 Cabosse et fèves</i>	<i>19</i>
1.1.6 TRAITEMENT POST-RECOLTE	21
<i>1.1.6.1 Fermentation</i>	<i>21</i>
<i>1.1.6.2 Séchage</i>	<i>22</i>
<i>1.1.6.3 Bilan de la fermentation et du séchage</i>	<i>23</i>
1.2 TECHNIQUES DE SECHAGE	24
1.2.1 SECHAGE SOLAIRE	25

1.2.1.1 Séchage solaire naturel	25
1.2.1.2 Séchage solaire direct	27
1.2.1.3 Séchage solaire indirect	30
1.2.2 SECHAGE ARTIFICIEL	31
1.3 NOTIONS GENERALES SUR LE SECHAGE	33
1.3.1 BUT DU SECHAGE	33
1.3.2 FORMES D'EAU DANS UN PRODUIT	33
1.3.3 ACTIVITE DE L'EAU DANS UN PRODUIT	35
1.3.3.1 Isothermes de sorption	36
1.3.3.2 Modèles et forme des isothermes de sorption	38
1.3.3.3 Chaleur isostérique de désorption	40
1.3.4 DIFFERENTES ETAPES DU SECHAGE D'UN PRODUIT HUMIDE	41
1.3.4.1 Teneur en eau	41
1.3.4.2 Etablissement des courbes de séchage	41
1.3.4.3 Analyse de la cinétique de séchage	42
1.3.5 MODELISATION SIMPLIFIEE DES PHASES DE SECHAGE	46
1.3.5.1 Période à vitesse constante	46
1.3.5.2 Période à flux décroissant	47
1.3.6 CLASSIFICATION DES MODELES DE SECHAGE	49
1.3.6.1 Modèles empiriques	49
1.3.6.2 Modèles diffusifs	50
1.3.6.3 Modèles basés sur les transferts couplés de masse et de chaleur.....	50
1.4 CONCLUSION.....	55
II-MATERIEL ET METHODES	56
2.1 MATERIEL	57
2.1.1 MATERIEL VEGETAL	57
2.1.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL	57
2.1.2.1 Dispositif de séchage à l'air libre	57
2.1.2.2 Dispositif de séchage solaire direct	58
2.2 METHODES	59
2.2.1 ACIDITES DES FEVES DE CACAO	59
2.2.1.1 Détermination de l'acidité Totale	59
2.2.1.2 Détermination du pH	59
2.2.1.3 Détermination de l'acidité Volatile	60
2.2.1.4 Détermination de la teneur en acide gras libre	60
2.2.2 CARACTERISTIQUES DE L'AIR DE SECHAGE	61
2.2.2.1 Détermination des températures et de l'humidité relative	61
2.2.2.2 Détermination de la vitesse de l'air	61
2.2.3 CARACTERISTIQUES DES FEVES DE CACAO	61
2.2.3.1 Détermination des isothermes de désorption	61
2.2.3.1.1. Principe de détermination des isothermes	61
2.2.3.1.2 Principe de la méthode gravimétrique	62
2.2.3.1.3. Mode opératoire	63

2.2.3.2 Détermination de la chaleur isosthérique nette de désorption	65
2.2.4 DETERMINATION DES COURBES DE CINETIQUE DE SECHAGE	66
2.2.5 DETERMINATION DES MODELES DE COURBE CARACTERISTIQUE DE SECHAGE.....	67
2.2.6 DETERMINATION DES MODELES EMPIRIQUES.....	70
2.2.7 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE DIFFUSION	71
2.2.8 ANALYSE STATISTIQUE	72
III-RESULTATS ET DISCUSSION	74
3.1 EFFETS DES DISPOSITIFS DE SECHAGE A L’AIR LIBRE SUR L’ACIDITE DES FEVES	75
3.1.1 ACIDITE TOTALE	75
3.1.2 pH	75
3.1.3 ACIDITE VOLATILE	75
3.1.4 ACIDE GRAS LIBRE	78
3.1.5 DISCUSSION	78
3.1.6 CONCLUSION PARTIELLE	79
3.2 CARACTERISTIQUES LIEES A L’AIR DE SECHAGE	80
3.2.1 OBSERVATIONS GENERALES	80
3.2.2 VARIATION AEROTHERMIQUE AU COURS D’UN ESSAI DE SECHAGE	82
3.2.2.1 <i>Température</i>	82
3.2.2.2 <i>Humidité relative</i>	84
3.2.2.3 <i>Vitesse de l’air</i>	84
3.2.3 DISCUSSION	85
3.2.4 CONCLUSION PARTIELLE	85
3.3 CARACTERISTIQUES LIEES AUX FEVES DE CACAO	87
3.3.1 ISOTHERMES DE DESORPTION	87
3.3.1.1 <i>Représentation graphique</i>	87
3.3.1.2 <i>Modélisation des isothermes</i>	88
3.3.2 CHALEUR DE DESORPTION	93
3.3.2.1 <i>Représentation graphique</i>	93
3.3.2.2 <i>Modélisation de la chaleur isosthérique nette de désorption</i>	94
3.3.3 DISCUSSION	95
3.3.4 CONCLUSION PARTIELLE	97
3.4 COURBES DE CINETIQUE DE SECHAGE	98
3.4.1 EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU DES FEVES DE CACAO	98
3.4.1.1 <i>Influence du dispositif</i>	98
3.4.1.2 <i>Influence de la période de campagne de l’année</i>	100
3.4.2 EVOLUTION DE LA VITESSE DE SECHAGE DES FEVES DE CACAO	100
3.4.2.1 <i>Evolution journalière de la vitesse de séchage</i>	100
3.4.2.2 <i>Phases de séchage</i>	103
3.4.3 DISCUSSION	105
3.4.4 CONCLUSION PARTIELLE	108
3.5 COURBE CARACTERISTIQUE DE SECHAGE	109

3.5.1 ANALYSE DES COEFFICIENTS STATISTIQUES	109
3.5.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE	111
3.5.3 DISCUSSION	113
3.5.4 CONCLUSION PARTIELLE	117
3.6 MODELE SEMI EMPIRIQUE	118
3.6.1 ANALYSE DES COEFFICIENTS STATISTIQUES	118
3.6.2 EFFETS DES VARIABLES DE L’AIR	121
3.6.3 VALIDATION DU MODELE	123
<i>3.6.3.1 Confrontation des résultats expérimentaux et prédits</i>	<i>123</i>
<i>3.6.3.2 Simulation numérique</i>	<i>124</i>
3.6.4 DISCUSSION	127
3.6.5 CONCLUSION PARTIELLE	128
3.7 COEFFICIENT DE DIFFUSION	129
3.7.1 EVOLUTION DU COEFFICIENT DE DIFFUSION	129
3.7.2 EFFETS DES VARIABLES DE L’AIR	130
3.7.3 DISCUSSION	132
3.7.4 CONCLUSION PARTIELLE	134
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	135
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	138
ANNEXES	157

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

	Page
Tableau I.1 : Statistique de lots non-conformes à l'embarquement du cacao (campagne 2003/2004)	12
Tableau I.2 : Statistique de non-conformités du cacao suivant la saison (en nombre de lots) de la campagne 2003/2004	13
Tableau I.3 : Normes de classification du cacao	15
Tableau I.4 : Composition chimique des cotylédons de fèves de cacao fermentées et non fermentées après séchage	20
Tableau I.5 : Effet de la fermentation et du séchage sur la flaveur du cacao	24
Tableau I.6 : Modèles d'isothermes les plus couramment utilisés	39
Tableau II.1 : Valeurs des humidités relatives (HR) des différentes teneurs d'acide sulfurique utilisées pour la détermination des courbes de désorption	64
Tableau II.2 : Modèles mathématiques donnés par différents auteurs pour les courbes de séchage	70
Tableau III.1 : Table d'analyse de variance	76
Tableau III.2 : Valeurs moyennes des caractéristiques de l'air pour différents essais	81
Tableau III.3 : Analyse statistique des caractéristiques de séchage	83
Tableau III.4 : Tests d'analyse de variance sur les caractéristiques de séchage	83
Tableau III.5 : EQM relatives à chaque ajustement des modèles d'isotherme de désorption pour les fèves de cacao à différentes températures	89
Tableau III.6 : Paramètres d'Oswin et EQM relative à chaque ajustement	89
Tableau III.7 : Paramètres du modèle d'Oswin selon des domaines de validité de HR	92
Tableau III.8 : Coefficients du modèle à chaque essai et les premières vitesses	110
Tableau III.9 : Valeurs des paramètres statistiques et des coefficients de séchage des modèles mathématiques déterminés par la méthode de régression	110
Tableau III.10 : Nouvelles estimations valeurs des coefficients A_1 , A_2 et A_3	115
Tableau III.11 : Paramètres statistiques et coefficients de séchage des modèles par la méthode de régression pour le séchage à l'air libre	120
Tableau III.12 : Paramètres statistiques et coefficients de séchage des modèles par la méthode de régression pour le séchage sous serre	121

FIGURES

	Page
Figure I.1 :	Evolution des huit premiers pays producteurs de cacao entre 1970 et 2004..... 6
Figure I.2 :	Principaux broyeurs de cacao..... 8
Figure I.3 :	Evolution des prix..... 8
Figure I.4 :	Principales formes de cabosses..... 18
Figure I.5 :	Coupe de la graine..... 21
Figure I.6 :	Séchage au soleil des fèves de cacao sur une claie..... 26
Figure I.7 :	Séchoir de type «autobus» pour exploitation familiale..... 27
Figure I.8 :	Séchoir basculant..... 29
Figure I.9 :	Etuve solaire..... 29
Figure I.10 :	Séchoir tente solaire à Toumbokro..... 30
Figure I.11 :	Prototype d'un séchoir solaire indirect..... 30
Figure I.12 :	Schéma d'un séchoir rotatif cylindrique de type «Guardiola»..... 32
Figure I.13 :	Schéma de principe d'un séchoir à air chaud..... 32
Figure I.14 :	Différents types d'eau dans le grain..... 35
Figure I.15 :	Représentation de l'activité de l'eau..... 36
Figure I.16 :	Courbes d'Adsorption-désorption..... 37
Figure I.17 :	Forme générale des isothermes..... 38
Figure I.18 :	Courbe de Krischer théorique..... 42
Figure I.19 :	Types de courbes de flux en fonction de la teneur en eau sur base sèche référencées par Sherwood..... 45
Figure I.20 :	Courbe caractéristique de séchage de la banane pour différents essais..... 55
Figure I.21 :	Courbe caractéristique de séchage de la mangue pour différents essais..... 55
Figure II.1 :	Serre expérimentale 58
Figure II.2 :	Schéma du dispositif expérimental de détermination des isothermes de désorption 63
Figure III.1:	Distribution de l'acidité totale dans la fève de cacao 76
Figure III.2:	Distribution du pH dans la fève de cacao 76
Figure III.3:	Histogrammes de l'acidité volatile des amandes de fèves de cacao..... 77
Figure III.4:	Histogrammes de la teneur en AGL des fèves en fin de séchage 77
Figure III.5 :	Variation de la température de l'air de séchage au cours d'un essai 82
Figure III.6 :	Variation de l'humidité relative de l'air de séchage au cours d'un essai 83
Figure III.7 :	Variation de la vitesse de l'air de séchage au cours d'un essai 84
Figure III.8 :	Isothermes de désorption expérimentales pour les fèves de cacao à différentes températures 87
Figure III.9 :	Comparaison des valeurs expérimentales et des valeurs de l'ajustement du modèle d'Oswin à différentes températures 91
Figure III.10 :	Nouvel ajustement du modèle d'Oswin à différentes températures selon des domaines de validité de HR 91
Figure III.11 :	Droite et pente à partir de l'équation de Clausius-Claperon pour chaque teneur en eau d'équilibre 93
Figure III.12 :	Chaleur de désorption d'eau des fèves de cacao de Toumbokro entre 30 et 60 °C . 94
Figure III.13 :	Comparaison expérimentale et prédites de la chaleur de désorption des fèves de cacao 95
Figure III.14 :	Evolution de la teneur en eau des fèves de cacao en fonction du temps pour tous les essais confondus..... 99
Figure III.15 :	Evolution de la teneur en eau des fèves de cacao(essai 14)..... 99
Figure III.16 :	Influence des saisons de l'année sur l'évolution de la teneur en eau des fèves au

	cours du temps : cas de la claie	100
Figure III.17 :	Evolution de la vitesse de séchage dans le temps (essai 5).....	101
Figure III.18 :	Evolution de la vitesse de séchage dans le temps (essai 18)	101
Figure III.19 :	Evolution de la vitesse séchage au cours des périodes de la journée (essai 18).....	102
Figure III.20 :	Evolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau (essai 18)	104
Figure III.21 :	Courbe de tendance de l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau (essai 18)	104
Figure III.22 :	Courbe caractéristique du séchage des fèves de cacao obtenue pour différents essais à l'air libre	111
Figure III.23 :	Courbe caractéristique du séchage des fèves de cacao obtenue pour différents essais à l'air libre	112
Figure III.24 :	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites des vitesses réduites pour différents essais de séchage à l'air libre et sous serre	113
Figure III.25 :	Courbe caractéristique du séchage des fèves de cacao reprise pour X_r simplifiée pour des essais à l'air libre	116
Figure III.26 :	Courbe caractéristique du séchage des fèves de cacao reprise pour X_r simplifiée pour des essais sous serre	116
Figure III.27 :	Evolution au cours du temps de la teneur en eau réduite à l'air libre	118
Figure III.28 :	Evolution au cours du temps de la teneur en eau réduite sous serre	119
Figure III.29 :	Comparaison entre des cinétiques expérimentales et courbe moyenne	123
Figure III.30 :	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites des teneurs en eau réduites par le modèle Logarithmique pour différentes conditions de séchage à l'air libre et sous serre	124
Figure III.31 :	Comparaison des valeurs simulées et expérimentales des essais à l'air libre.....	125
Figure III.32 :	Comparaison des valeurs simulées et expérimentales des essais sous serre	126
Figure III.33 :	Evolution du coefficient de diffusion au cours du temps en eau réduite	129
Figure III.34 :	Evolution du coefficient de diffusion en fonction de la vitesse de l'air	130
Figure III.35 :	Evolution du coefficient de diffusion en fonction de la vitesse de l'air	131
Figure III.36 :	Evolution du coefficient de diffusion en fonction de la vitesse de l'air	131
Figure III.37 :	Variation de $\ln(D)$ en fonction de $1/T$	132

SIGLES ET ABREVIATIONS

ANADER	Agence Nationale d'Appui au Développement Rural
ANOVA	Analyse de la variance (Analysis Of Variance)
ARCC	Autorité de Régulation du Café et du Cacao
BCC	Bourse du Café et du Cacao
CAISTAB	Caisse de Stabilisation et de Soutien des Prix des Produits Agricoles
C.C.S	Courbe caractéristique de séchage
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNRA	Centre National de Recherche Agronomique
DROPA	Direction de la Promotion Rurale et des Organisations Professionnelles Agricoles
FDPCC	Fond de Développement et de Promotion des Activités des Producteurs de Café et du Cacao
FCC	Fédération du Commerce du Cacao
FGCCC	Fond de Garantie des Coopératives de Café et du Cacao
FRC	Fond de Régulation et de Contrôle du Café et du Cacao
IFCC	Institut Français du Café et du Cacao et des plantes stimulantes
MINAGRA	Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales
OICCC	Organisation Internationale du Cacao, du Chocolat et de la Confiserie
OPA	Organisations Professionnelles Agricoles
SGS	Société Générale de Surveillance

NOMENCLATURE

A_1, A_2, A_3	Coefficients caractéristiques de séchage (-)
a, b, c, g, h, n	Coefficients empiriques dans les modèles mathématiques de séchage (-)
A_w	Activité de l'eau des fèves (-)
$b.h$	Base humide (-)
$b.s$	Base sèche (-)
C	Concentration d'eau dans le produit en kg/m^3 .
D	Coefficient de diffusion apparent en m^2/s
D_0	Constante d'Arrhenius en m^2/s
E_a	Energie d'activation en kJ/mol
EQM	Erreur quadratique moyenne (ou moyenne de la somme des carrés des écarts) (-)
H	Coefficients de transferts de chaleur ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
HR	Humidité relative en %
J	Flux d'évaporation en $\text{kg/m}^2\text{s}$
k, k_0, k_1	Constantes empiriques dans les modèles mathématiques de séchage (h^{-1})
k, n	Paramètres d'Oswin (-)
K	Coefficient de transfert d'eau (m/s)
L	Démi épaisseur de la fève (0,0025m)
L_v	Chaleur latente de vaporisation (J/kg)
M	Masse du produit (kg)
m_e	Masse de l'eau dans le produit (kg)
m_i	Masse du produit (kg)
m_s	Matière sèche du produit (kg)
N	Nombre de coefficients dans le modèle (-)
N	Nombre d'observations (-)
P_v	Pression de vapeur d'eau à la surface du produit (Pa)
P_{Va}	Pression de vapeur d'eau de l'air (Pa)
$P_{V_s}, P_{V_{Sat}}$	Pression de vapeur à la surface de l'eau pure à la température du produit (Pa)
Q_s	Chaleur de désorption (kJ/mol)
Rd	Rayonnement diffus en Wh/m^2
R	Coefficient de corrélation (-)
R	Constante des gaz parfaits (0,00831 kJ/mol K)
R^2	Coefficient de détermination (-)
$RSME$	Racine carrée de la moyenne de la somme des carrés des écarts (-)
S	Surface d'échange entre l'air et le produit (m^2)
T	Temps (h)
T ou T_a	Température de l'air (K).
T_h	Température humide de l'air à la surface du produit (K).
T_p	Température sèche de l'air à la surface du produit (K).
(x,y,z)	Repère cartésien de l'espace (m)
X	Teneur en eau du produit l'instant t (% kg eau / kg ms).
X_{eq}	Teneur en eau d'équilibre du produit (% kg eau / kg ms).
$X_{eq\text{ cal}}$	Teneur en eau d'équilibre calculée (% kg eau / kg ms).
$X_{eq\text{ exp}}$	Teneur en eau d'équilibre expérimentale (% kg eau / kg ms).
X_{cr}	Teneur en eau critique (% kg eau / kg ms)
X_i	Teneur initial en eau du produit (% kg eau / kg ms)

X_h	Teneur en eau du produit en base humide à l'instant initial (% kg eau / kg ms)
X_r	Teneur en eau réduite (-)
$X_{r\ exp,i}$	Teneur en eau réduite expérimentale pour la i ème observation (-)
$X_{r\ pre,i}$	Teneur en eau réduite pour la i ème observation (-)
$\left(-\frac{dX}{dt}\right)$	Vitesse de séchage du produit l'instant t (% kg eau/ kg ms.h)
$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$	Vitesse de la première phase de séchage ou Première vitesse de séchage à la phase décroissante (% kg eau/ kg ms.h)
$F(X_r)$ ou Vr	Vitesse de séchage réduite (-)
$\frac{2}{}$	Khi deux (-)

INTRODUCTION

La cacaoculture est l'activité principale de petits planteurs qui fournissent les 95 % de la production mondiale sur des surfaces inférieures à 10 ha avec un rendement moyen, assez faible de l'ordre de 350 à 400 kg de fèves marchandes par hectare (**Barel, 2005**).

L'économie de certains pays repose en grande partie sur cette denrée. C'est le cas de la Côte d'Ivoire et du Ghana qui fournissent à eux seuls 60 % de la production mondiale. Ainsi, six millions de personnes vivent de la filière cacaoyère au Ghana. En Côte d'Ivoire, la part du cacao représente 10 % du PIB et 40 % des recettes d'exportation (**Anonyme 1, 2001 ; Banzio, 2003**).

Depuis quelques années, et suite à la libéralisation survenue en 1999, l'on fait face à une situation récurrente de mauvaise qualité du cacao d'origine Côte d'Ivoire sur le marché mondial (**Anonyme 2, 2006**). La teneur en acide gras libre du cacao d'origine Côte d'Ivoire dépasse les normes admises de 1,75 %, ce qui a pour conséquence la baisse de sa qualité (**Guehi et al., 2005**). En outre, une partie de la production nationale souffre de mauvais stockage et d'un taux d'humidité au dessus de la norme (plus de 8%). Cette situation prend de l'ampleur et a pour conséquence une décote du cacao d'origine Côte d'Ivoire, ce qui constitue une perte financière pour les producteurs et donc pour l'Etat. Les raisons de cette détérioration de la qualité du cacao ne sont pas suffisamment cernées. Elles semblent multiples et complexes et se situent à tous les niveaux de la filière, depuis le producteur jusqu'aux marchés extérieurs (**Anonyme 2, 2006**). Certaines causes ont toutefois été évoquées pour expliquer cette détérioration. Il s'agit du :

- *traitement post-récolte (fermentation, séchage) mal effectué et la dégradation des produits bords champs*. A ce niveau, citons le cas où les conditions climatiques sont défavorables comme on l'observe dans la région forestière de San Pédro avec un taux d'humidité de l'air avoisinant les 95 % toute l'année. Cette situation rend difficile le séchage des fèves de cacao à l'air libre. Aussi, par impatience du fait du temps trop long du séchage à l'air libre, le planteur préfère-t-il sécher partiellement sa production et la vendre à des acheteurs peu exigeants en qualité. Ces derniers doivent à leur tour traiter les fèves de sorte à les ramener à un taux d'humidité inférieure à 8 % bien avant l'exportation. Cette façon de procéder entraîne l'apparition de moisissures, et génère des hydrolyses de la matière grasse, qui donnent des beurres acides et déstructurés (**Pontillon, 1997**).

- *système inefficace de contrôle qualité des produits*. Les acheteurs ou traitant et pisteurs, attirés par la part du gain, ramassent les produits tout-venant, procèdent couramment

à des mélanges, et livrent finalement un cacao de qualité très moyenne voir médiocre. Les usines de conditionnement ne sont pas efficaces car ne pouvant empêcher la sortie du pays des produits de mauvaises qualités (**Anonyme 2, 2006**).

- *système de commercialisation intérieur et extérieur mal maîtrisé*. Environ un tiers de la production est considéré comme étant du hors grade et donc officiellement interdit d'exportation. Mais ces produits hors grades (difficiles à quantifier), se retrouvent sur le marché international mettant en doute le cacao de Côte d'Ivoire (**Anonyme 2, 2006**).

De toutes ces difficultés susmentionnées, celles relatives à la technologie post-récolte, plus particulièrement le séchage à l'air libre, ont retenu notre attention. Dans l'ensemble des premières transformations subies par les fèves de cacao, le séchage est une étape cruciale qui influence la qualité finale du produit puisque cette opération est déterminante dans l'expression du potentiel aromatique du cacao (**Cros, Jeanjean, 1995 ; Vincent, 1996**). En effet, après la fermentation, les fèves qui contiennent 50 à 60 % d'eau doivent être séchées pour permettre leur conservation sur une longue période sans perdre leur qualité initiale. Il est à noter qu'au cours du séchage solaire, les réactions biochimiques entamées au cours de la fermentation peuvent en général se poursuivre naturellement (**Cros, Jeanjean, 1995**). Ainsi, le séchage solaire permet-il, souvent de parfaire un processus de fermentation insuffisante contrairement au séchage artificiel, plus brutal, stoppant rapidement les réactions biochimiques et conduisant à un cacao très acide (**Cros, Jeanjean, 1995 ; Pointillon, 1997**).

Les travaux de Vincent (**1968**) ont accordé une large place à l'influence de trois types de séchoirs solaires (séchoir autobus avec fond en natte; séchoir autobus avec fond en treillis; séchoir basculant) sur la qualité physique et chimique du cacao. Néanmoins, ces dispositifs n'ont pas toujours connu de vulgarisation dans le milieu des producteurs de cacao.

Jinap *et al.* (**1994**) ont également expérimenté les effets de quatre méthodes de séchage (four à 60°C; four convectif à air chaud; soleil et ombre) sur l'acidité des fèves et la saveur du chocolat. Mais, ces travaux n'ont pas mis l'accent sur les dispositifs de séchage à l'air libre.

Bien que, n'ayant pas fait réellement l'objet de travaux de recherche, les dispositifs de séchage à l'air libre sont mentionnés quelquefois comme responsables de la mauvaise qualité du cacao bord champ et contribueraient à une augmentation de l'acidité des fèves. Or, la plupart des travaux relatifs au séchage du cacao, en rapport avec l'acidité, portent sur des séchoirs artificiels à convection forcée où il est possible de faire varier les paramètres de l'air, et rarement sur les séchoirs solaires. C'est le cas des études menées par Augier (**1999**) sur les modélisations de transferts de l'eau et de l'acide acétique dans la graine de cacao. Nganhou *et al.* (**2003**), travaillant sur la simulation numérique du comportement dynamique du séchage

des fèves de cacao, ont mis en évidence le mécanisme de séchage en lit épais de ce produit et l'influence de divers paramètres sur les performances d'un système de séchage en convection forcée. Pourtant une grande partie de la production mondiale du cacao est séchée au soleil en couche mince sur des aires cimentées, des Claies, des Bâches noires en plastique (**Endamne, 1991 ; Mossu, 1990 ; Ghosh, 1973**) et sur bien d'autres dispositifs généralement déconseillés (Bitume; Tôle ; feu de bois). Par conséquent, une meilleure connaissance de l'effet de chaque type de dispositif de séchage à l'air libre sur la qualité bord champ des fèves faciliterait le choix du meilleur dispositif ou permettrait de prendre plus de précautions dans leur utilisation.

La durée de séchage nécessaire pour réduire la teneur en eau des fèves à 8% dépend de plusieurs facteurs qui ne sont pas toujours maîtrisés par les planteurs. La mise en place d'un modèle mathématique pourrait être une solution.

Ce travail s'inscrit dans l'amélioration et l'optimisation du séchage des fèves de cacao ivoirien dont l'intérêt économique n'est plus à démontrer. En plus du séchage à l'air libre, il expérimente le séchage solaire sous serre dans le traitement des fèves de cacao.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont de trois ordres :

- évaluer l'influence des dispositifs de séchage au soleil sur la qualité du cacao bord champ en particulier au niveau de son acidité ;
- accroître les connaissances en matière de gestion des dispositifs de séchage solaire à l'air libre et sous serre ;
- développer un modèle de simulation numérique permettant de prévoir des teneurs en eau et des temps de séchage en fonction de la teneur en eau initiale du produit et des caractéristiques pertinentes de l'air de séchage.

Ainsi, la méthodologie mise en œuvre pour atteindre ces objectifs se présente en trois principales parties :

La première partie relate succinctement l'historique, la structure de la filière, les qualités ainsi que les caractéristiques biologiques du cacao, puis détaille les étapes du traitement post-récolte en particulier les techniques de séchage du cacao. Elle s'achève sur une étude bibliographique des notions générales sur le séchage en vue de la modélisation.

La deuxième partie, intitulée matériel et méthodes, présente le dispositif expérimental et détermine les acidités, les caractéristiques de l'air de séchage et du cacao de Toumbokro (village situé dans la région de Yamoussoukro), la cinétique de séchage et la démarche pour la construction des modèles.

Enfin, la troisième partie présente les résultats obtenus suivis de leur discussion. La validation du modèle par une approche expérimentale est également abordée dans cette partie.

I-REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 LE CACAO

1.1.1 HISTOIRE DE LA CULTURE DU CACAOYER

Le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.), est la seule espèce du genre *theobroma* de la famille des Sterculiacées cultivé pour ses graines (Asiedu, 1991). Il est originaire des forêts tropicales humides d'Amérique centrale et du sud (Burle, 1961 ; Anonyme 3, 2001). Le premier peuple évolué ayant cultivé rationnellement le cacao serait les Mayas et plus tard les Aztèques. Ils se servaient des fèves de cacao pour la préparation d'un breuvage nourrissant (xocoatl) ou comme monnaie d'échange (cacahuatl). Les cérémonies religieuses qui accompagnaient le planting et la récolte sont à l'origine du nom scientifique *Theobroma* (du grec Theos = dieu ; broma = nourriture) donné par Linné (Burle, 1961 ; Asiedu, 1991).

Moins d'un siècle après l'arrivée des espagnols au Mexique en 1519, la culture du cacaoyer s'étend à toute l'Amérique tropicale et l'usage se répand peu à peu dans les cours royales en Europe, où les recettes s'affinent. En Europe, le développement de l'industrie cacaoyère donne naissance à de grandes firmes telles que Van Houten en 1815, Menier en 1825 ou encore Suchard en 1826. Cependant, le mélange de pâte et de beurre de cacao additionné de sucre n'apparaît qu'en 1847, sous le nom de chocolat (Burle, 1961 ; Braudeau., 1969).

Le cacaoyer est introduit en Afrique au 19^{ème} siècle par les hollandais venant du Brésil, en 1879 au Ghana par Fernando Po, en Côte d'Ivoire en 1892 sur les bords du Cavally par les américains en provenance du Liberia, en 1905 à Dabou par le Ghana. Les agriculteurs ne se sont pas intéressés à la culture du cacao spontanément. C'est pourquoi les plantations furent obligatoires en 1908. En 1918, on assiste aux premières exportations (Braudeau., 1969).

Le 20^{ème} siècle voit un développement considérable de la production du cacao, caractérisée par une extension rapide de la culture en Afrique. En 1900, la production mondiale était de 115 000 tonnes, dont trois-quarts en Amérique et un-cinquième en Afrique (Braudeau, 1969). En 1964, elle atteint 1 545 000 tonnes avec des proportions exactement inversées pour les deux continents. Les années 1970 furent celles du boom du cacao : la demande dépassait l'offre et les prix flambaient. Les progrès effectués dans le domaine de la cacaoculture (sélection, défense des cultures, technologie, etc.) ont permis aux pays tropicaux de l'Asie du Sud-Est de rivaliser

rapidement avec les premiers producteurs mondiaux. C'est le cas de l'Indonésie, qui occupe actuellement le troisième rang mondial (Barel, 2005).

Avec le déplacement vers l'Est et l'intensification de la production, l'économie du cacao a connu au milieu des années 80 une période de crise et de chute des prix. Des opérations de spéculation sur les grandes quantités de cacao asiatique, nouvellement arrivées sur le marché, en sont la principale cause (Pontillon, 1997).

1.1.2 STRUCTURE DE LA FILIERE CACAO DANS LE MONDE

1.1.2.1 Production

Dans la période de 1990 à 1995, la production mondiale (Figure I.1) était stable et s'élevait en moyenne à 2 449 000 tonnes par an (Pontillon, 1997). Pour la campagne 2002-2003, l'Afrique de l'Ouest détenait 70 % du volume mondial estimé à 3 000 000 de tonnes avec pour la seule Côte d'Ivoire une production record de 1 405 000 tonnes (Barel, 2005). L'Asie (17%) et l'Amérique Latine (13%) reculent, et des pays tels que la Malaisie et le Brésil connaissent maintenant de graves problèmes de production.

Quatre-vingt-quinze pour cent de la production mondiale de cacao proviennent de petites plantations familiales de moins de 10 ha d'où le rendement mondial moyen est assez faible, de l'ordre de 350 à 400 kg de fèves marchandes par hectare (Anonyme 3, 2003).

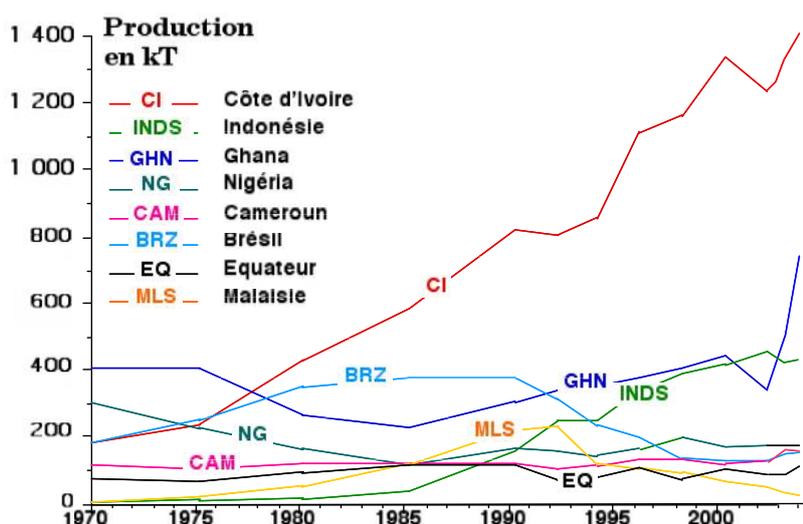


Figure I.1: Evolution des huit premiers pays producteurs de cacao entre 1970 et 2004 (Barel, 2005); 1K T= 1000 tonnes

1.1.2.2 Consommation: les broyeurs

Les broyeurs de cacao sont des entreprises qui achètent des fèves, les torréfient, les décortiquent et les fondent, pour produire la masse (ou liqueur, ou pâte) de cacao, matière première de l'industrie chocolatière. En général, les broyeurs extraient également le beurre de cacao et commercialisent le tourteau dégraissé ou même la poudre de cacao qui en provient (**Pontillon, 1997, Barel 2005**).

Ce secteur de la filière est dominé par quatre entreprises multinationales (Figure I.2). En 2002, elles ont traité 400 000 tonnes de fèves pour l'Américain Cargill, 380 000 tonnes pour le Franco-Belgo-Suisse Barry-Callebaut, 360 000 tonnes pour l'Américain ADM-Cocoa et 270 000 tonnes pour le Suisse Nestlé ; c'est-à-dire près de 60% des fèves produites (**Barel 2005**). Ceci illustre le fort déséquilibre des forces entre les millions de tout petits producteurs et les quatre grandes multinationales, acheteurs de cacao.

Ce déséquilibre se traduit par des prix bas (plus bas niveau historique en décembre 2000, après la libéralisation de la filière cacao en Côte d'Ivoire) qui ne parviennent pas à grimper (Figure I.3).

1.1.2.3 Négoce et Marchés à terme

Le négoce et les marchés à terme résultent d'un système qui est appliqué à la plupart des matières premières, dont le cacao. Sa principale utilité est d'amortir les cycles de production, les variations offre/demande et les fluctuations entre les monnaies. Le négoce fonctionne selon un mode spéculatif : bien avant la récolte, un contrat est passé entre le négociant et le chocolatier, pour la vente de lots de cacao "papier", avec un accord sur l'origine des fèves, définie principalement par pays, sur le niveau de qualité et sur la date de livraison. Au moment de réaliser la vente, le négociant va acheter les lots de cacao "physique", correspondants au contrat, en recherchant le meilleur prix, afin de réaliser une marge bénéficiaire la meilleure possible. Bien entendu, cette pratique ne peut pas être favorable au décollage des prix (**Banzio, 2003 ; Barel, 2005**).

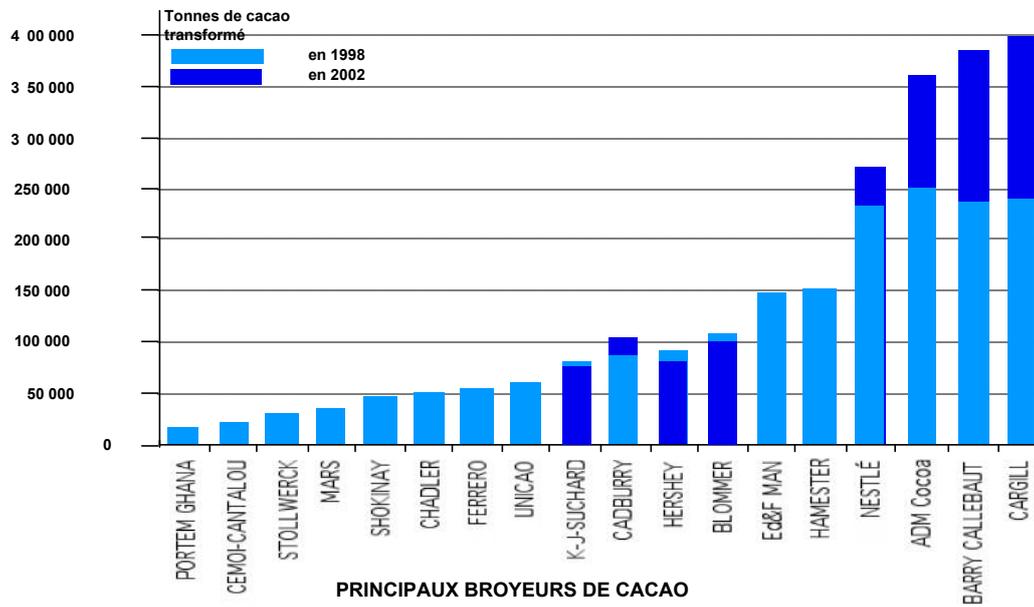


Figure I.2 : Principaux broyeurs de cacao (Barel, 2005)



Figure I.3 : Evolution des prix (Barel, 2005)

1.1.3 ACTEURS DE LA FILIERE CACAO EN COTE D'IVOIRE

1.1.3.1 Structures institutionnelles de la filière

Dans le cadre de l'encadrement des producteurs et de divers appuis institutionnels, on note l'intervention des institutions et structures suivantes :

- la DROPA (chargée de la promotion des OPA au Ministère de l'Agriculture) ;
- l'ANADER (chargé de l'encadrement technique) ;
- le CNRA (pour la conduite de la recherche).

1.1.3.2 Structures actuelles de gestion de la filière

Après la dissolution de la CAISTAB et de la nouvelle CAISTAB respectivement en 1999 et 2000, les différentes fonctions dévolues à ces anciennes structures vont être réparties entre plusieurs structures. Il s'agit de deux structures de gestion, l'ARCC et la BCC ; une structure d'encadrement, le FDPCC ; et une structure de contrôle financier, le FRC. Il existe également une structure de financement des coopératives, le FGCCC (**Anonyme 2, 2006**).

1.1.3.3 Producteurs

Le nombre des producteurs est estimé entre 700 000 et 800 000 environ (**Gono, 2004**). Ils sont répartis dans 17 régions administratives, comportant 32 départements du pays (**Sahoré, 2004**).

On compte environ 3 à 4 millions de personnes qui travaillent dans la filière café et cacao en Côte d'Ivoire. Il s'agit généralement de petits planteurs de café et de cacao, possédant pour la plupart des exploitations de type familial dont la superficie varie de 4 à 5 ha en moyenne. Mais, on note également à côté de ces petites exploitations de grandes exploitations dont la superficie peut avoisiner 50 ha. La tendance actuelle des producteurs est à l'augmentation des superficies pour compenser la chute des prix (**Banzio, 2003 ; Nguessan, 2004**). Organisés en coopératives depuis la loi coopérative de 1997 qui en font de véritables entreprises, on dénombre depuis la campagne 2003/2004, 374 coopératives (**Gono, 2004**). Ces coopératives commercialisent environ 20 à 30 % de la production.

La responsabilité des producteurs et des coopératives est importante en ce qui concerne la qualité. En effet, ils doivent suivre l'itinéraire cultural adapté et conseillé par l'encadrement, effectuer de façon convenable la récolte et le traitement post-récolte à savoir la fermentation et le séchage qui sont des étapes cruciales influençant

la qualité finale du cacao, et bien entreposer le produit. Ainsi, une part importante de la non qualité, est réalisée auprès des producteurs (**Anonyme 2, 2006**).

1.1.3.4 Acheteurs ou traitants et pisteurs

Intermédiaires principaux entre le producteur et l'exportateur, les acheteurs ou traitants au nombre de 700 environ (agréés pour la campagne 2003/2004), commercialisent entre 70 et 80 % de la production. Ils disposent souvent d'importants moyens financiers, mis en place par les exportateurs et les multinationales.

Les pisteurs sont souvent de petits collecteurs de café et de cacao pour le compte des acheteurs assurant l'achat bord champ. Ils disposent en ville ou au village des magasins plus ou moins adaptés. Ils travaillent dans des conditions précaires : routes en mauvais état, camions de ramassage non protégés avec les produits exposés aux intempéries, magasins d'entreposage inadaptés.

Très proche des paysans, ils sont souvent leurs premiers interlocuteurs dans le circuit de commercialisation. Ils subissent les pressions aussi bien des producteurs que des exportateurs. Dans leur système, ils ramassent les produits tout-venant, procèdent couramment à des mélanges, en vue de respecter leur engagement en volume et en temps. Ils livrent finalement un produit de qualité très moyenne voire médiocre (**Anonyme 2, 2006**).

1.1.3.5 Usines de conditionnement

Tout produit à l'exportation doit être conditionné à savoir : calibré, nettoyé et ensaché dans des sacs alimentaires neufs. Après entreposage, les produits sont stockés et conservés dans des entrepôts appropriés, dans l'attente d'être expédiés. On note bien que les usines de conditionnement sont un maillon essentiel de la qualité. Leurs fonctions permettent de :

- réduire le taux d'humidité ;
- éliminer les corps étrangers, les grains noirs ;
- calibrer et classer le produit ;
- identifier et gérer les hors grades (**Anonyme 2, 2006**).

La responsabilité des usiniers est donc grande dans le maintien de la qualité. Cependant, leur efficacité peut être mise en doute. En effet, elles se situent à l'ultime étape de l'action qualité où la réduction des défauts, la gestion des sous-grades et le

maintien de la qualité, ne devaient pas permettre la sortie du pays, des produits de mauvaise qualité (**Sahoré, 2004**).

1.1.3.6 Autres intervenants à l'embarquement

Après l'usinage et avant embarquement, d'autres acteurs interviennent, ce sont :

- les agents de contrôle phytosanitaire du MINAGRA ;
- les applicateurs phytosanitaires chargés du traitement des produits, des locaux et du matériel de transport maritime ;
- les transitaires, les acconiers, les courtiers ;
- le manutentionnaire, le chargeur ;
- le peseur ;
- les assureurs, les banquiers, les tiers détenteurs (**Anonyme 2, 2006**).

1.1.3.7 Transporteurs

Plusieurs compagnies maritimes assurent le transport du cacao vers les pays consommateurs. Pour ce transport, les navires de haute mer sont sollicités, et force est de reconnaître que ces navires ne font pas toujours l'objet d'inspection.

Les modes de transport généralement utilisés varient selon les pays ou les ports de débarquement :

- le transport en vrac en cale sèche ;
- le transport en sacs ;
- le transport en containers.

En Côte d'Ivoire, le cacao est couramment transporté dans des sacs exports de 65 kg après usinage ou dans le big bag, de contenance 1 250 kg. Le transport en vrac n'est pas courant.

1.1.3.8 Sociétés concessionnaires de qualité

Le contrôle qualité autrefois réalisé par la CAISTAB et à travers un service spécialisé, avait permis à la Côte d'Ivoire d'obtenir sur le marché international des produits d'excellente qualité. Avec le processus de libéralisation de la filière café et cacao, une lente et progressive détérioration de la qualité du café et du cacao a été observée dans le temps (**Anonyme 2, 2006**).

La privatisation de la CAISTAB s'étant faite par étapes, la gestion de la qualité a été concédée à deux structures, peu avant la dissolution définitive de la caisse de stabilisation en 1998/1999, à savoir SGS et Cornelder (**Anonyme 2, 2006**).

Les résultats escomptés en cette phase n'ont pas pu être atteints. En effet, la masse importante de travail ne pouvait permettre à ces structures d'assumer efficacement leur mission. Les carences sont allées, dans certains cas, jusqu'à la délivrance de bulletins de complaisance, et à la dégradation consécutive de la qualité du café et du cacao sur le marché international (**Sahoré, 2004 ; Anonyme 2, 2006**).

Pus tard, avec la libéralisation total de la filière en 2000, quatre autres structures supplémentaires ont été ajoutées aux deux précédentes sans qu'on puisse observer un effet significatif sur les résultats attendus. Les tableaux I.1 et I.2 donnent les taux de non-conformités enregistrés par ces structures de contrôle pour la campagne 2003/2004.

En 2004, pour faire face à ce problème, il a été procédé à des modifications en retenant que quatre structures concessionnaires de contrôle qualité en Côte d'Ivoire pour le café et le cacao. Ce sont : Bureau Véritas ; SGS ; Unicontrol et ACE (qui détient par ailleurs le monopole du pesage).

**Tableau I.1 : Statistique de lots non-conformes à l'embarquement du cacao
(campagne 2003/2004)**

Concessionnaires de qualité	Nombre de lots			% de non- conforme
	Contrôlé	Conforme	Non-conforme	
ACE	333	252	81	24,3
BV	449	299	150	33,4
Cornelder	857	616	241	28,1
SGS	391	276	115	29,4
Unicontrol	481	343	138	28,7
Wilhem-Meyer	289	214	75	26
	2800	2000	800	28,6

Source : **Sahoré, 2004**

Tableau I.2 : Statistique de non-conformités du cacao suivant la saison (en nombre

de lots) de la campagne 2003/2004

Mois	Total	Conformes	Non-conformes	% de non-conforme
Oct-nov-dec	1345	1116	229	17
Jan-fev-mars	682	337	345	51
Avr-mai-juin	564	409	155	27
Juil-août	185	130	55	30
Sept	24	8	16	67
Cumul	2800	2000	800	29

Source : **Sahoré, 2004**

1.1.3.9 Exportateurs

Les exportateurs s'occupent de l'achat et de la vente des produits sur le marché international. Leurs clients sont souvent des transformateurs extérieurs. Ils sont tributaires de la qualité rapportée par le traitant ou le pisteur. Ce maillon de la filière comprend :

- les multinationales ;
- les exportateurs nationaux.

Les grands groupes internationaux traitent et exportent environ 78 % de la récolte tandis que les nationaux n'en commercialisent que 22 % (**Anonyme 2, 2006**).

1.1.3.10 Transformateurs locaux de cacao

Les transformateurs locaux ont pour mission d'assurer la transformation sur place des fèves de cacao vert en vue :

- d'augmenter la valeur ajoutée locale ;
- de favoriser la création d'emplois ;
- de réaliser des investissements nouveaux ;
- de soutenir les prix sur les marchés internationaux ;
- de traiter localement les produits hors normes.

Quatre usines assurent la transformation du cacao avec une capacité de broyage total de 300 000 tonnes, représentant 52 à 35 % de la production de cacao et faisant de la Côte d'Ivoire le quatrième broyeur mondiale de cacao (**Anonyme 2, 2006**).

1.1.4 QUALITES ET CATEGORIES DES CACAOS DU MARCHÉ

Pour le marché mondial, la qualité d'un lot de cacao est décrite par 3 grandeurs:

- la **teneur en eau**, qui doit être de 8 % ;
- le **grainage** (nombre de fèves aux 100 grammes), qui doit être de 100 fèves ou moins ;
- L'**épreuve à la coupe** (Cut test), qui détermine le niveau de fermentation (couleur des fèves) et le nombre de défauts, tels que fèves ardoisées, moisies, mitées, etc. Mais en aucun cas il n'existe de mesure, ni même d'indication de la qualité aromatique des lots. Chaque pays dispose de normes qui lui sont propre et qui s'inscrivent dans le cadre plus général des directives des pays acheteurs et/ou des organismes internationaux (**Anonyme 2, 2006**). Ces normes sont des lignes directives et constituent souvent des prescriptions minimales. Le tableau I.3 donne des valeurs des normes retenues par certains pays.

Les fèves bord champs ne respectent cette classification en ce qui concerne le taux d'humidité. Les planteurs ne disposant pas d'outil de contrôle du taux d'humidité, l'arrêt du séchage se fait sur des critères subjectifs tels que l'appréciation visuelle de la couleur des fèves ou le craquement de celles-ci au touché. Ainsi, le taux d'humidité peut être plus élevé mais il existe la possibilité de le réduire lors de l'usinage. Toutefois, en Côte d'Ivoire, une réfaction est appliquée au cacao livré par la coopérative ou le producteur dès que le taux d'humidité atteint ou excède 8,50 % (**Anonyme 4, 2004**).

Le marché mondial segmente les lots de cacao en 3 catégories :

- le "**Bulk** ", ou **cacao courant**. Il représente 90 % du marché et il est vendu aux cours définis par les bourses de New York ou de Londres ;
- le **Cacao Fin**. Des quotas sont définis par un Comité de l'OICCC, qui tiennent plus compte de la qualité aromatique réelle du cacao que du rapport entre l'offre et la demande. Ces cacaos peuvent être vendu jusqu'à 2 fois le cours du marché ;
- les **Cacaos Rares**. Ils sont très recherchés et font l'objet de tractations commerciales de gré à gré (**Barel, 2005**).

Tableau I.3 : Normes de classification du cacao

Pays	Classification	Grainage	Taux d'humidité	Fèves moisies	Fèves défectueuses (=germées, mitées et plates)	Fèves ardoisées
Côte d'Ivoire	Grade I	105 fèves/ 100g	< 8%	3%	3%	3%
	Grade II			4%	6%	8%
	Sous grade			> 4%	> 6%	> 8%
Ghana	Grade I	100 fèves/ 100g	< 8%	3%	3%	3%
	Grade II			4%	6%	8%
Europe (FCC)		100 fèves/ 100g	< 8%	Défectuosité=moisies+mitées. Les fèves plates sont comptées soit en défauts soit en grainage		
	Bien fermentée				5%	
	Faiblement fermentée				10%	
	Mauvaise fermentation				15%	
USA	Grade I	100 fèves/ 100g	< 8%	6% dont maximum 4% moisie et/ou 4% mitées		NB : les qualités inférieures ne sont pas acceptées

Source : **Anonyme 1, 2001 ; Anonyme 2, 2006 ;**

1.1.4.1 Producteurs de Bulk

Le cacao Bulk est produit sur les 3 continents :

- **l'Afrique** produit 70 % de la production mondiale, avec la Côte d'Ivoire qui a produit à elle seule 1 405 000 tonnes en 2002/2003 : c'est la plus grosse production mondiale et le Ghana (736 000 tonnes), qui propose le meilleur Bulk, est vendu au-dessus du cours ;
- **l'Asie** commercialise surtout des cacaos "beurriers", destinés à l'extraction du beurre de cacao. L'Indonésie produit 415 000 tonnes, vendu en-dessous du cours

(sauf le Java qui est un cacao rare) et la Malaisie dont la production est en diminution ;

- **l'Amérique Latine** est le producteur de Bulk des USA, avec le Brésil : 163 000 tonnes, mais en grosse baisse de production, à cause du « balai de sorcière », le Mexique et le cacao Sanchez de République Dominicaine (qui représente 80 % de la production de ce pays) (**Barel, 2005**).

1.1.4.2 Producteurs de cacaos fins et rares

Le monde du cacao considère qu'il y a 7 origines principales de cacaos fins et rares. Ce sont:

- **l'Équateur**, avec sa variété *Nacional* (seulement 30 % de la production du pays) qui est réputée pour ses notes florales : le fameux arôme "Arriba" ;
- **le Venezuela** possède principalement 2 régions cacaoyères sur 8 qui produisent des cacaos fins ;
- **les Caraïbes** : toutes les îles depuis Trinidad jusqu'à Cuba produisent des cacaos aux notes de tabac, de bois, de fruits secs ;
- **l'archipel de Saõ Tomé et Príncipe** est le lieu par lequel le cacao est entré en Afrique, en 1822. On y trouve encore aujourd'hui des *Forastero Amelonados* anciens qui produisent un arôme cacao subtil ;
- **le Madagascar** est réputé pour ses cacaos un peu acides et fruités de la vallée du Sambirano. La demande dépasse largement l'offre, ce qui fait que même des cacaos ordinaires de cette origine sont vendus comme cacaos fins ;
- **l'île de Java**, en Indonésie sont plantée de *criollo* anciens, très appréciés pour leurs notes tourbées ou épicées, qui peuvent se négocier à 3 fois la valeur du marché ;
- **la Papouasie-Nouvelle Guinée** possède des sols volcaniques, propices à la production de cacaos fins, proches de ceux de Java (**Barel, 2005**).

1.1.5 DESCRIPTION DE LA PLANTE

1.1.5.1 Classification

Le cacaoyer est une plante classée dans l'ordre des Malvales, la famille des Sterculiacées, la tribu des Bythéries et le genre *Theobroma*. Ce dernier regroupe une vingtaine d'espèces de petits arbres, tous originaires des zones tropicales humides de l'Amérique centrale et du sud. L'espèce *Theobroma cacao* est répartie en 3 grands

groupes inter-fertiles : Criollo (en espagnol, indigène), Forastero (étranger) et Trinitario (de Trinidad) (**Burle, 1961 ; Pontillon, 1998**).

Groupe Criollo

Les cacaoyers Criollo proviennent d'Amérique centrale. Leurs fruits (appelés cabosses), de forme angoleta ou cundeamor (Figure I.4), pointus et très verruqueux. Ils sont verts ou rouges, et deviennent jaunes ou oranges à maturité. Les fèves dodues, aux cotylédons blancs, fournissent un cacao fin et aromatique utilisé en chocolaterie pour les produits de luxe. Les arbres sont peu vigoureux et peu résistants aux maladies. Alors que les Mayas (Guatemala et péninsule du Yucatan) cultivaient cette variété, elle a presque disparu et on rencontre actuellement que quelques groupes d'arbres isolés ou de petites plantations très anciennes (**Bradeau, 1969 ; Wood, 1975 ; Mossu, 1990 ; Anoyme 3, 2002**).

Groupe Forastero

On distingue les Forastero haut-amazonien et bas-amazonien, selon leur lieu d'origine dans le bassin amazonien. Leurs fruits, de formes très variables, mais généralement amelonado ou calabacillo (Figure I.4), sont de couleur verte virant au jaune à maturité. Les fèves sont violettes et plus ou moins aplaties. Elles donnent un cacao peu aromatique et de saveur relativement amère, qualifié de cacao "courant". Robustes et précoces, les Forastero fournissent la presque totalité des cacaos du Brésil, de l'Afrique de l'ouest et du sud-est Asiatique, où ils sont souvent mélangés aux Trinitario (**Bradeau, 1969 ; Wood, 1975 ; Mossu, 1990 ; Anoyme 3, 2002**). La variété Forastero est estimée à environ 80 % de la production mondiale de cacao (**Asiedu, 1991 ; Anoyme 3, 2002**).

Groupe Trinitario

Issu de croisements spontanés entre les deux premiers groupes, les cacaoyers Trinitario ont été décrits à Trinidad. Etant donné la grande hétérogénéité de leur population, leurs caractéristiques botaniques sont difficiles à définir. Ils se situent entre les Criollo et les Forastero en termes de vigueur et qualité du cacao (**Bradeau, 1969 ; Wood, 1975 ; Mossu, 1990 ; Anoyme 3, 2002**). Les Trinitario fournissent environ 20 % de la production mondiale de cacao (**Anoyme 3, 2002**).

La productivité moyenne en production de type industriel, recourant fortement aux intrants (engrais et pesticides), varie en moyenne de 1 à 2,5 t/ha de cacao marchand

et par an. En exploitation familiale, la productivité est en général de 300 à 700 kg/ha et par an, mais elle dépasse 1 t/ha dans les systèmes intensifiés de Sulawesi (Indonésie) (Anonyme 3, 2002).

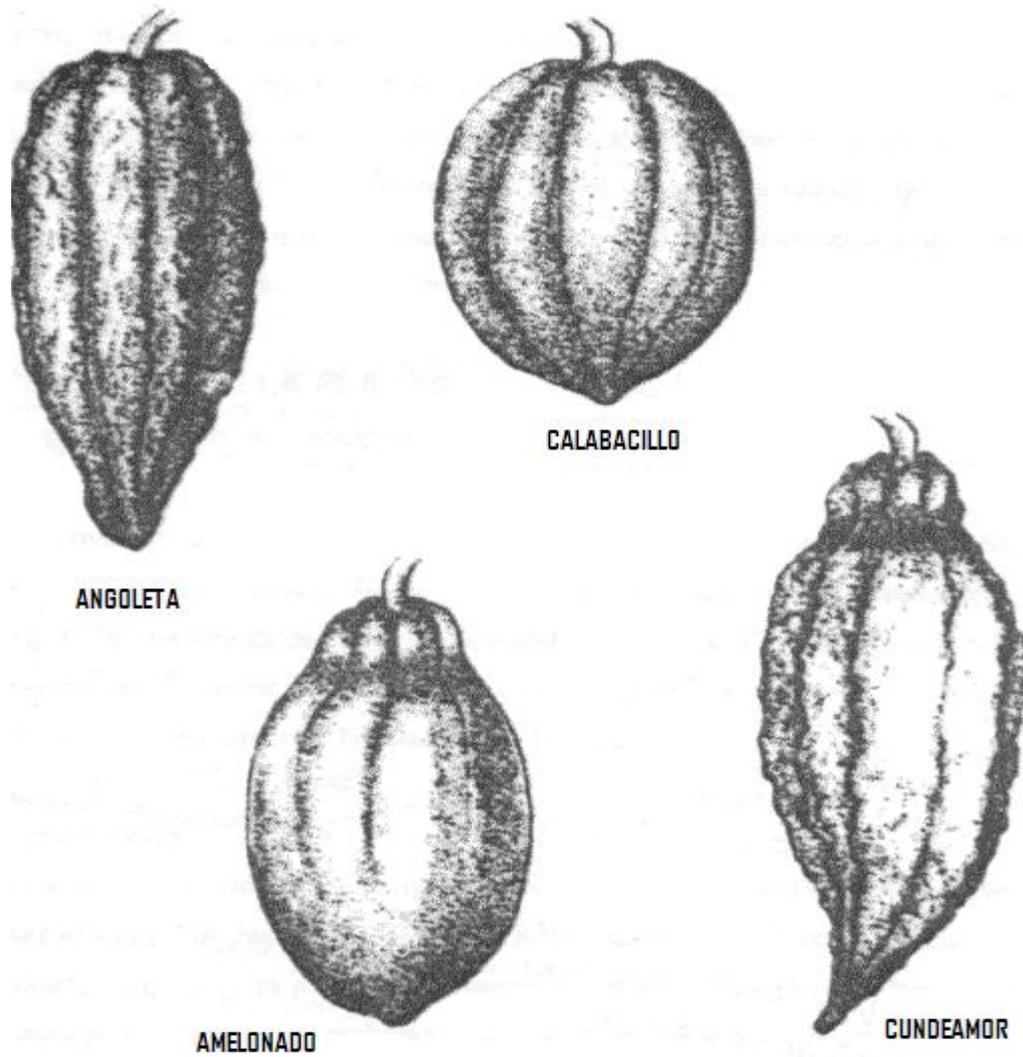


Figure I.4 : Principales formes de cabosses (Braudeau, 1969)

1.1.5.2 Arbre et fleurs

Le cacaoyer est un arbre de petite taille, pouvant atteindre 10 m à l'état sauvage mais ne dépassant pas 5 à 7 m lorsqu'il est cultivé. Le tronc est droit, court et supporte une couronne ramifiée, qui peut mesurer 6 à 8 m de diamètre si elle n'est pas entravée dans son développement. Le cacaoyer atteint sa maturité à l'âge de dix ans et une plantation bien conduite peut demeurer rentable pendant plus de 30 ans (**Anonyme 3, 2002**).

Les fleurs, de très petite taille, apparaissent sur le tronc ou sur les grosses branches selon des périodes de floraison marquées (pics). La floraison a lieu, en général, deux fois par an et est séparée par des floraisons modestes mais continues pour certaines variétés. De la fécondation des fleurs, naissent les chérelles (jeunes fruits) dont un grand nombre se dessèche naturellement sous l'effet d'un mécanisme régulateur du cacaoyer. A l'issue de cette étape, les fruits se développent et atteignent la maturité au bout de 7 mois (**Bradeau, 1969 ; Wood, 1975 ; Mossu, 1990**).

1.1.5.3 Cabosse et fèves

Le fruit du cacaoyer est la cabosse, dont les principales formes sont représentées à la figure I.4. Une cabosse mûre peut mesurer 10 à 20 cm de longueur sur 6 à 10 cm de largeur. Sa coloration initiale varie du vert au rouge foncé, selon la variété, puis vire au jaune et à l'orange quand le fruit est parvenu à maturité. Elle pèse alors 400 g en moyenne et contient une quarantaine de graines (fèves fraîches), entourées d'une pulpe mucilagineuse et fixées sur un rachis central. L'écorce du fruit est dure et épaisse. Le mucilage blanchâtre enrobant les fèves a une saveur sucrée et acidulée (acide citrique). Les graines sont riches en matière grasse, polyphénols, protéines et alcaloïdes à propriétés stimulantes (essentiellement théobromine et caféine) (**Cros, Jeanjean, 1995 ; Pointillon, 1997**). Le tableau I.4 fournit une description plus détaillée de la composition des cotylédons de fèves de cacao fermentées et non fermentées après séchage.

Tableau I.4 : Composition chimique des cotylédons de fèves de cacao fermentées et

non fermentées après séchage

Constituants	Fèves non fermentées (%)	Fèves (%) fermentées
Eau	3,65	2,13
Matières grasses	53,05	54,68
Cendres'	2,63	2,74
Azote total	2,28	2,16
Azote protéinique	1,50	1,34
Azote ammoniacal	0,028	0,042
Azote d'amide	0,18	0,336
Théobromine	1,71	1,42
Caféine	0,085	0,066
Glucose	0,30	0,10
Sucrose	Néant	Néant
Amidon	6,10	6,14
Pectines	2,25	4,11
Fibres	2,09	2,13
Cellulose	1,92	1,96
Pentosanes	1,27	1,21
Mucilage et gommés	0,38	1,84
Acide	0,3	0,43

Source: **Opeke, 1982.**

Les dimensions des fèves (Figure I.5) varient de 2 à 3 cm en longueur, de 1 à 1,5 cm en largeur et de 0,5 à 0,7 cm en épaisseur. Le volume de la graine, à l'intérieur du tégument (enveloppe), est principalement occupé par les deux cotylédons de l'embryon, fortement plissés et présentant de nombreux lobes imbriqués les uns dans les autres. Ils sont réunis à leur base par l'axe embryonnaire, appelé germe, qui a la forme d'un petit cylindre de 6 à 7 mm de long. Les caractéristiques des fruits et des graines, telles que la taille, la couleur, la forme, le poids, etc., sont très variables d'un arbre à l'autre (**Bradeau, 1969 ; Wood, 1975 ; Mossu, 1990**).

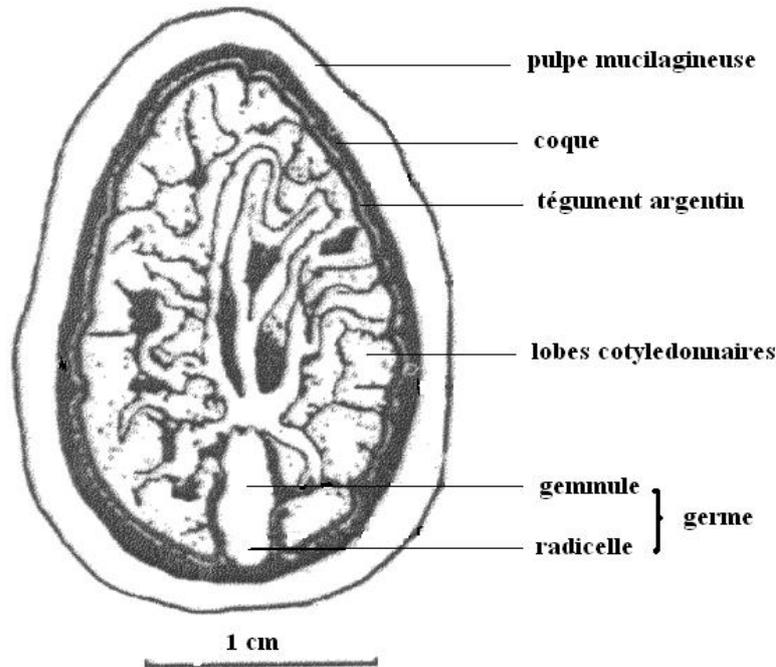


Figure I.5 : Coupe de la graine (Mossu, 1990)

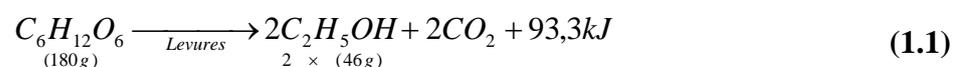
1.1.6 TRAITEMENT POST-RECOLTE

Après ouverture manuelle des fruits (écabossage), les fèves sont soumises aux opérations de fermentation et de séchage qui conduisent au cacao marchand, matière première de l'industrie chocolatière.

1.1.6.1 Fermentation

Cette opération qui dure en général de quatre à sept jours, comporte deux phases bien distinctes: une fermentation microbiologique de la pulpe, puis un ensemble de réactions biochimiques internes au cotylédon (Cros, Jeanjean, 1995).

La pulpe, riche en sucres et en acide citrique, est abondante et collante. L'installation d'une flore de levures pectinolytiques (Ramarinjanahary-Ravelomanana, 1984) déclenche, dans ces conditions anaérobies, une fermentation alcoolique. Cette réaction, moyennement exothermique, entraîne une légère élévation de température (Pontillon, 1997) :



Après un à deux jours de fermentation, la désagrégation de la pulpe permet une circulation de l'air dans la masse. La présence d'oxygène, favorisée par un brassage des fèves, ainsi que l'augmentation du pH de la pulpe (dû à la consommation de l'acide citrique par les levures) favorisent l'installation d'une flore de bactéries acétiques, conduisant à la formation abondante d'acide acétique (imprégnant les cotylédons) par consommation de l'éthanol. Cette étape fermentaire, fortement exothermique, élève brutalement la température, qui peut atteindre 50°C, quarante cinq à soixante douze heures après la mise en fermentation (**Pontillon, 1997**) :



Dès 40 °C, la flore de levure disparaît.

Les réactions biochimiques internes au cotylédon sont induites par l'élévation de la température de la masse de cacao en fermentation, et la migration d'acide acétique de la pulpe vers la fève. En effet, l'action combinée de la température et de l'augmentation de l'acidité conduit non seulement à la mort de l'embryon, mais également à une lyse partielle des parois cellulaires qui permet, par exemple, la mise en contact des divers enzymes et de leurs substrats respectifs. La fermentation dans son ensemble permet de développer les précurseurs de l'arôme du chocolat, de diminuer l'astringence et d'amener l'amertume à un niveau agréable (**Cros et Jeanjean, 1995 ; Pontillon, 1997**).

1.1.6.2 Séchage

Lorsque la fermentation arrive à son terme, le cacao est mis au séchage. L'intérêt du séchage est de ramener la teneur en eau des fèves fermentées, qui est d'environ 50 à 60 % d'humidité, à moins de 8 %, de manière à assurer au cacao de bonnes conditions de conservation pour le stockage et le transport. Le séchage est le siège de réactions chimiques et biochimiques complémentaires. Certaines oxydations continuent d'avoir lieu, en particulier celles dues à la polyphénoloxydase responsable du brunissement du produit (**Asiedu, 1991 ; Cros et Jeanjean, 1995**).

Au début du séchage, la pulpe dégradée qui enrobe les graines rend le produit très collant. Peu à peu, ce mucilage sèche, ce qui a pour effet de consolider le tégument qui prend alors le nom de coque. Ensuite, à mesure que l'humidité diminue, la fève devient de plus en plus friable. Outre la réduction de l'eau, le séchage doit être mis à profit pour abaisser la teneur en acide acétique. Ce composé volatil, qui a joué un rôle primordial

dans le développement de l'arôme, peut par la suite altérer la qualité du cacao s'il est présent en trop grande quantité (**Pontillon, 1997**).

Plusieurs techniques de séchage du cacao existent, elles sont étudiées au paragraphe 1.2.

1.1.6.3 Bilan de la fermentation et du séchage.

L'ensemble des réactions se déroulant au cours du traitement post-récolte conduit à une profonde modification de la composition biochimique des fèves.

La comparaison de chocolats élaborés à partir du même lot de fèves, non fermenté ou fermenté, montre que la fermentation conduit à des chocolats moins amers, beaucoup moins astringents et plus acides (Tableau I.5). Ces caractéristiques organoleptiques sont respectivement liées aux teneurs en méthylxanthines (caféine et théobromine) (**Pickenhagen *et al.*, 1975**), composés phénoliques (flavan-3-ols) (**Villeneuve *et al.*, 1989**) et acide acétique. De plus, seuls les cacaos fermentés présentent un arôme typique. Celui-ci est lié à :

- la nature et la teneur en précurseurs de la réaction de Maillard (sucres réducteurs et acides aminés libres), lesquels sont consommés au cours de la torréfaction pour conduire à la formation d'un arôme thermique (**Mermet, 1989**);
- la formation d'une fraction aromatique après fermentation et séchage (**Ziegleder, 1991 ; Jeanjean *et al.*, 1994**).

L'analyse du cacao étant jusqu'à présent, pour des raisons techniques, effectuée sur des fèves séchées, il est difficile de déterminer la part respective de la fermentation et du séchage dans la formation des composés impliqués directement, ou indirectement, dans l'arôme final (**Cros et Jeanjean, 1995**).

Tableau I.5 : Effet de la fermentation et du séchage sur la saveur du cacao
(Cros et Jeanjean, 1995)

Flaveur	Effet	Composés impliqués
Amertume	↘	méthylxanthines (caféine, théobromine)
Astringence	↘ ↘	composés phénoliques (procyanidines)
Acidité	↗ ↗	acides volatils (acétique principalement)
Arôme	↗ ↗ ↗	- arôme d'origine «fermentaire» - précurseurs (sucres réducteurs, acides aminés) - composés phénoliques

↘ : Moins ; ↘ ↘ : Beaucoup moins
↗ ↗ : Plus ; ↗ ↗ ↗ : Beaucoup plus.

1.2 TECHNIQUES DE SECHAGE DU CACAO

Dans l'ensemble des transformations que subissent les graines de cacao, le séchage constitue une étape cruciale qui peut influencer la qualité finale du produit (Cros et Jeanjean, 1995 ; Barel, 1995 ; Pontillon, 1998). Cependant, cette étape a été relativement peu étudiée, tant en ce qui concerne l'évolution de l'acidité des fèves qu'au point de vue des transferts de matières (Augier, 1999). Les quelques études faites sur le séchage des fèves de cacao ont porté généralement sur des séchoirs mécaniques à convection forcée (Barel, 1995 ; Augier, 1999 ; Nganhou et Nganya, 2003) au détriment du séchage naturel, le plus pratiqué (Asiedu, 1991 ; Pontillon, 1997). Dans cette partie du travail, quelques méthodes de séchage du cacao ont été passées en revue et classées selon le type d'énergie utilisée : naturelle (soleil) ou artificielle (bois, gaz, fuel, résidus agricoles, etc).

1.2.1 SECHAGE SOLAIRE

On entend par séchage solaire un système ne faisant appel qu'à l'usage de l'énergie solaire pour extraire l'eau du produit (**Rosiz et al., 1995**). Dans cette famille on peut citer le séchage naturel et le séchage solaire proprement dit.

1.2.1.1 *Séchage solaire naturel*

On entend par séchage solaire naturel une exposition directe des fèves de cacao au soleil. Le rayonnement solaire élève la température du produit et les mouvements de l'air ou le vent enlèvent l'eau du produit affluant à sa surface. C'est le système de séchage le plus simple et le moins onéreux. Il reste fréquemment employé dans la plupart des pays producteurs. Cependant, il n'est possible que si :

- les précipitations ne sont pas excessives pendant la saison de la récolte ;
- la durée d'ensoleillement est suffisante ;
- les quantités mises à sécher n'entraînent pas des besoins de surfaces trop importantes.

Le séchage naturel nécessite en général sept à huit jours d'exposition dans les conditions favorables mais peut durer parfois quinze jours, trois ou quatre semaines en cas d'intempéries (**Wood, 1975 ; Asiedu, 1991 ; Pontillon, 1997**).

1.2.1.1.1 *Séchage à l'air libre ou séchage au soleil*

Cette pratique est courante en Afrique et en Amérique Latine. Le cacao fraîchement fermenté est étalé en couche mince sur des claies placées à mi hauteur au dessus du sol. Les claies se composent de tiges de bambou, de bouts de rachis de palmier à huile ou de raphia espacés pour permettre à l'air de circuler de bas en haut (Figure I.6) (**Asiedou, 1991**). Les fèves sont séchées également sur des aires cimentées et de plus en plus sur des bâches en polyéthylène. La charge des fèves au séchage est de 15 à 25 kg de fèves fermentées par m² (**Pontillon, 1997**). Chaque soir ou dès que survient la pluie, les fèves sont roulées dans la natte et mises à l'abri, sous un toit ou sous de large feuilles (**Ghosh, 1973 ; Endammé, 1991**). Cette opération, lorsqu'elle est menée au début du séchage, à l'inconvénient de maintenir les fèves dans une humidité relative élevée entraînant l'apparition fréquente de levures et moisissures à la surface des graines. Mais tant que la coque protège les cotylédons, les expériences réalisées sur les propriétés organoleptiques n'ont révélé aucun dommage (**Ghosh, 1973**).

1.2.1.1.2 *Barçaça ou séchoir à toit mobile*

Largement répandues à Bahia au Brésil, les Barcaça sont de grandes plate-formes de séchage faites de bois ou de ciment, sur lesquelles est séché le cacao. Un toit est monté sur des rails et permet de couvrir rapidement les fèves en cas de pluie. On trouve également ce type de séchoir au Vénézuala, en Equateur et à Trinidad (**Mossu, 1990 ; Endanné, 1991**).

1.2.1.1.3 Séchoir autobus ou à plate-forme amovible

Le séchoir Autobus est constitué d'un abri d'où sortent de chaque côté des rampes, sur lesquelles peuvent coulisser des claies de séchage (Figure I.7). Plusieurs étages peuvent être superposés afin d'augmenter la surface d'exposition des claies pour un même toit. Ce séchoir est plutôt employé en Afrique (**Mossu, 1990**).

Ces trois techniques, qualifiées de séchage naturel, sont les plus souvent utilisées. D'autres séchoirs sont quelques fois employés. Il s'agit des séchoirs solaires directs.

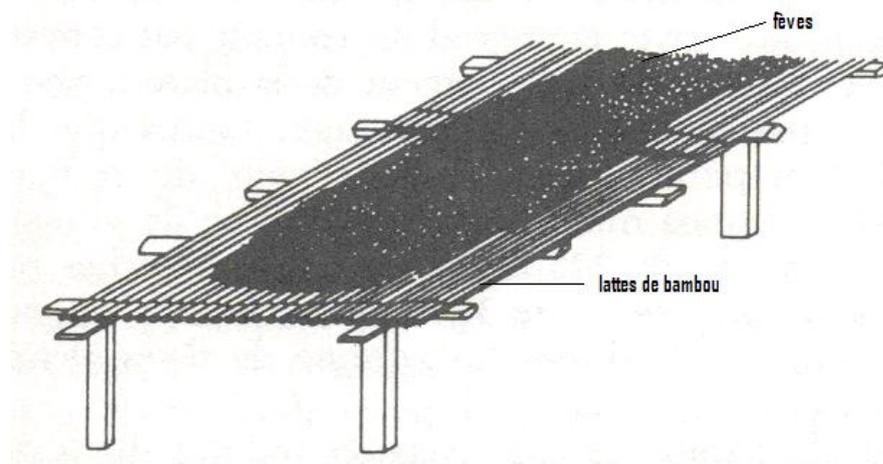


Figure I.6 : Séchage au soleil des fèves de cacao sur une claie (Asiedu, 1991)

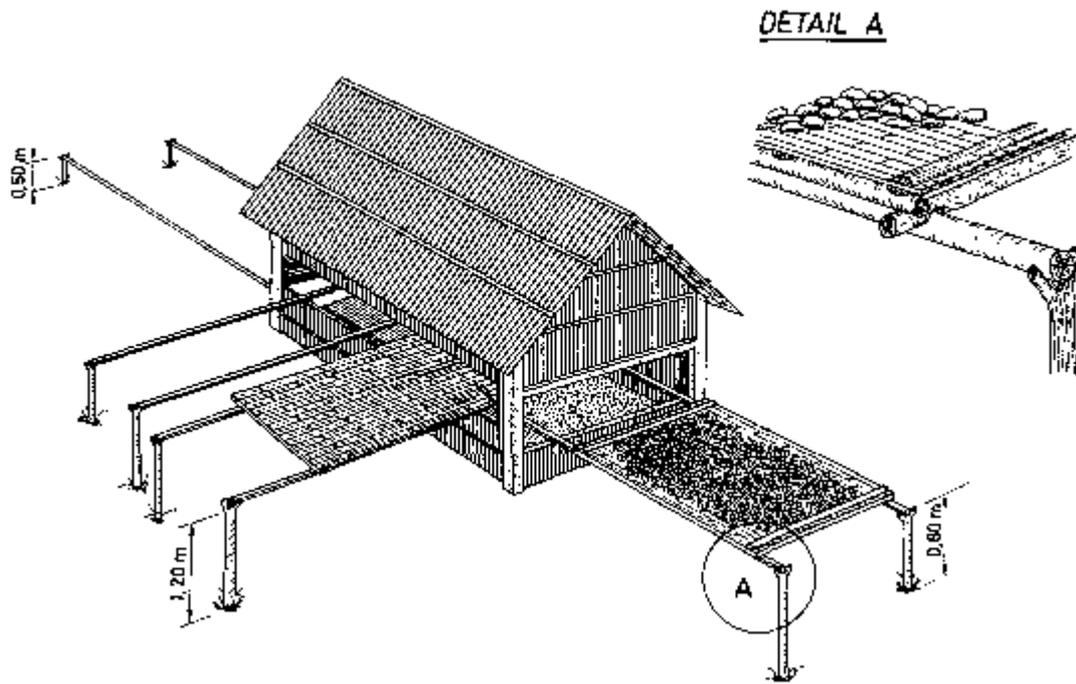


Figure I.7 : Séchoir de type «autobus» pour exploitation familiale (Mossu, 1990)

1.2.1.2 Séchage solaire direct

Dans le séchage solaire direct, les rayons solaires frappent directement les fèves, après avoir traversé une couverture transparente (vitre, feuille de plastique). L'air et le produit sont plus chauds du fait de l'effet de serre («piégeage de la chaleur du soleil»), et des faibles mouvements de l'air dans l'enceinte de séchage qui traversent, et réchauffent par convection naturelle, l'épaisseur de cacao (**Rozis et al., 1995**)

1.2.1.2.1 Séchoir à bascule

Constitué d'un cadre de 4 à 5 m de long sur 0,8 m de large, il est muni d'un fond de treillis métallique supportant le cacao (Figure I.8). Le tout est couvert d'un film plastique transparent. Ce séchoir repose au milieu de sa longueur sur une barre horizontale placée à 1 m au-dessus du sol, afin de régler son inclinaison. Il peut pivoter pour recevoir le maximum d'énergie solaire (**Endamn , 1991**).

1.2.1.2.2 *Etuve solaire*

L'air frais pénètre sous les fèves, placées dans une sorte de serre, s'échauffe et traverse le lit de cacao par convection naturelle, avant d'être évacué chargé d'humidité (Figure I.9). Ce principe est ingénieux car le film plastique transparent utilisé pour chauffer l'air protège le cacao des intempéries (**Vieira et Sena, 1984**).

Ces deux derniers séchoirs sont des faibles capacités et sont destinés aux petits planteurs.

1.2.1.2.3 *Séchoir tente solaire*

Les fèves sont séchées sous une tente transparente généralement en couverture plastique et surélevée d'une certaine hauteur permettant le passage du planteur pour effectuer le brassage et le triage des fèves (Figure I.10). L'air frais pénètre dans les ouvertures de la tente puis s'échauffe par effet de serre et traverse le lit de cacao en le réchauffant par convection naturelle, avant d'être évacué chargé d'humidité. En cas d'apparition brusque d'aléa climatique (vent ; averse ; etc.), les ouvertures de la tente sont refermées, les fèves sont recouvertes avec du plastique transparent sans être déplacées (**Assidjo et al., 2008**). Cette sorte de serre a l'avantage de s'étendre sur une grande surface et peut se confectionner à moindre coût avec du matériel local.

Ces quelques descriptions laissent entrevoir les difficultés du séchage solaire :

- lorsque les conditions climatiques sont défavorables, le risque de moisissure s'accroît. La qualité du cacao n'est donc pas uniforme au cours de la saison (**Ghosh, 1973**) ;
- des pluies fréquentes peuvent ralentir très fortement le séchage surtout en séchage naturel, retardant alors la vente du cacao ;
- les fèves sont étalées en couche mince fine (3 à 4 cm), sur des surfaces d'autant plus grandes que la production est importante ;
- certains séchoirs, tels que les Barçaças, ont des coûts très élevés par rapport à leur rendement ;
- les graines doivent être remuées régulièrement, surtout au début du séchage, afin d'éviter leur colmatage et d'homogénéiser le séchage. Le brassage s'effectue soit grâce à un râteau de bois, soit avec les pieds. Dans tous les cas, cette opération nécessite une main d'œuvre importante surtout pour des productions élevées ;

- les séchoirs à bascule et étuve solaire, plus originaux mais de faible capacité, sont destinés aux petits planteurs et ne peuvent s'adapter aux productions élevées.
- les séchoirs tentés solaires ont des ouvertures trop grandes pour les entrées et sorties d'air. Ceci a pour conséquence un mauvais rendement thermique du séchoir. L'effet de serre ne se produit pas convenablement parce que l'air est trop vite évacué (Assidjo *et al.*, 2008).

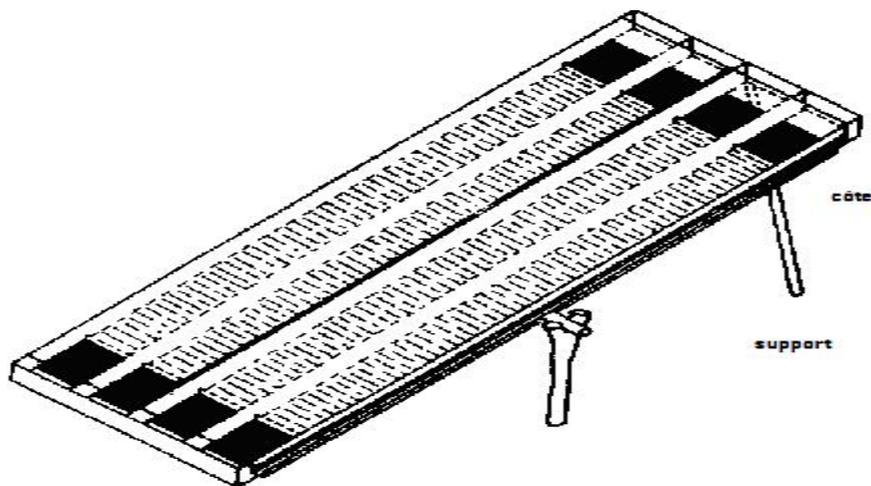


Figure I.8 : Séchoir basculant (Endamn , 1991)

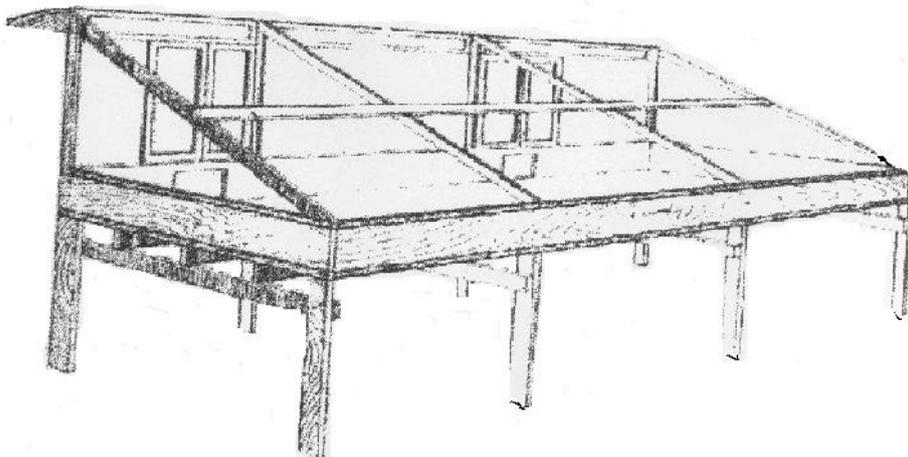


Figure I.9 :  tuve solaire (Vieira et Sena, 1984)



Figure I.10 : Séchoir tente solaire à Tombokro (Assidjo *et al.*, 2008)

1.2.1.3 Séchage solaire indirect

Dans le séchage solaire indirect, l'air est chauffé par un capteur, qui peut être distinct de l'enceinte de séchage (Figure I.11). Le produit reste à l'ombre, isolé du rayonnement solaire. Il n'est donc pas réchauffé par le soleil. Le séchage se produit par échange d'eau avec l'air chaud. Ce mode de séchage limite les pertes en vitamines notamment en vitamines A et C et est utilisé pour les fruits et les produits carnés (Rozis *et al.*, 1995).

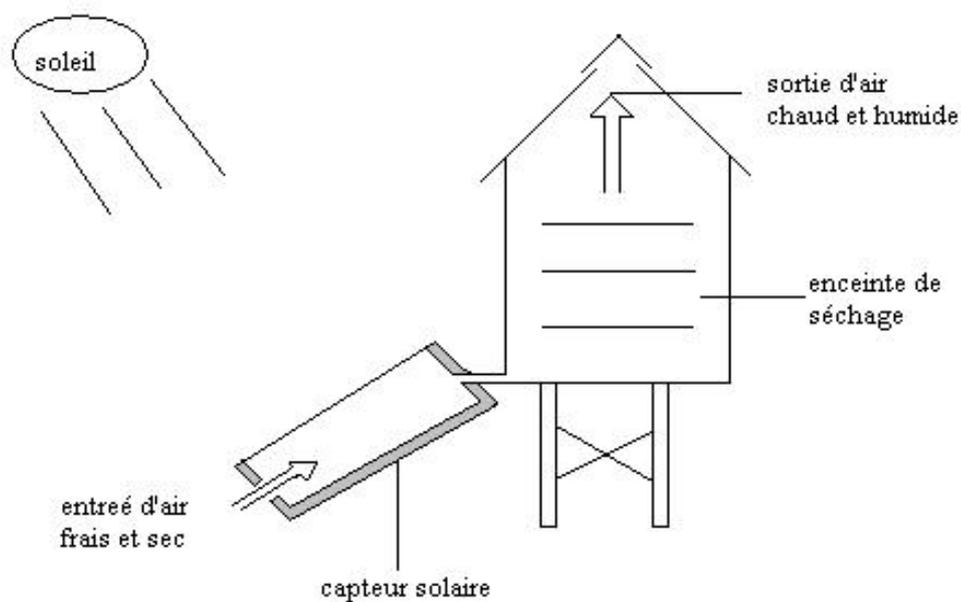


Figure I.11 : Prototype d'un séchoir solaire indirect (Rozis, 1995)

1.2.2 SECHAGE ARTIFICIEL

Dès que l'on dispose de grande quantité de cacao, les surfaces nécessaires au séchage solaire deviennent trop importantes et le coût de la main d'œuvre devient lourd. De même, lorsque la récolte a lieu dans une période particulièrement humide, le séchage solaire se révèle inefficace. Dans ce cas, le séchage artificiel peut s'avérer nécessaire.

Ce séchage est beaucoup plus rapide et dure en général un à deux jours (**Pontillon, 1997**).

Il utilise des tables de séchage en tôle perforée, rectangulaires ou circulaires, sur lesquelles le cacao est disposé en couche épaisse (30 à 50 cm). Sous la tôle perforée est pulsé de l'air chaud provenant d'un générateur à échangeur, alimenté soit au fuel, soit au bois. Cet air chaud traverse le lit de cacao, et généralement des systèmes mécaniques assurent le brassage régulier des fèves (**Ghosh, 1973 ; Pontillon, 1997**).

Il existe également des séchoirs rotatifs cylindriques, dans lesquels l'air chaud est amené par l'axe perforé de l'appareil (Figure I.12). L'air chaud provenant, d'un échangeur de chaleur, chauffe l'air extérieur par contact avec une chambre de combustion. En aucun cas les fumées et gaz brûlés ne doivent être en relation avec l'air qui traverse le cacao, faute de quoi des odeurs et arômes étrangers (fumé, jambon, etc.) risquent d'apparaître (Figure I.13) (**Ghosh, 1973 ; Pontillon, 1997**).

Le séchage artificiel présente des avantages importants :

- rapidité et simplicité d'organisation ;
- économie de main-d'œuvre et de surface ;
- Obtention d'un produit très homogène ;
- inexistence des risques de réhumidification (donc absence de fèves moisies)

(**Ghosh, 1973 ; Pontillon, 1997**).

Toutefois, le séchage artificiel, en plus d'être inaccessible à la grande majorité de planteurs à cause de son coût énergétique et de son investissement trop important, est prohibé pour les cacaos biologiques « porteurs d'avenir ». Aussi, le séchage artificiel présente de sérieux inconvénients parmi lesquels la rétention des acides volatils dans les cotylédons qui est un problème non encore appréhendé par certains producteurs (**Jacquet et al., 1980**).

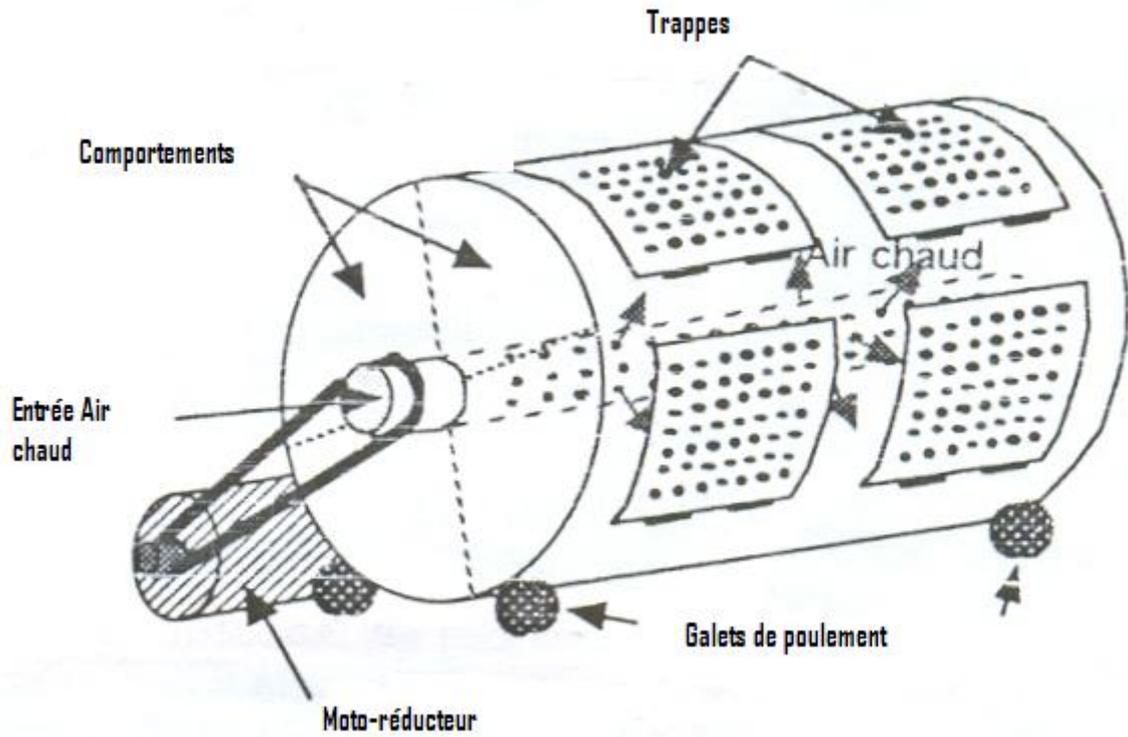


Figure I.12 : Schéma d'un séchoir rotatif cylindrique de type «Guardiola»
(Pontillon, 1997)

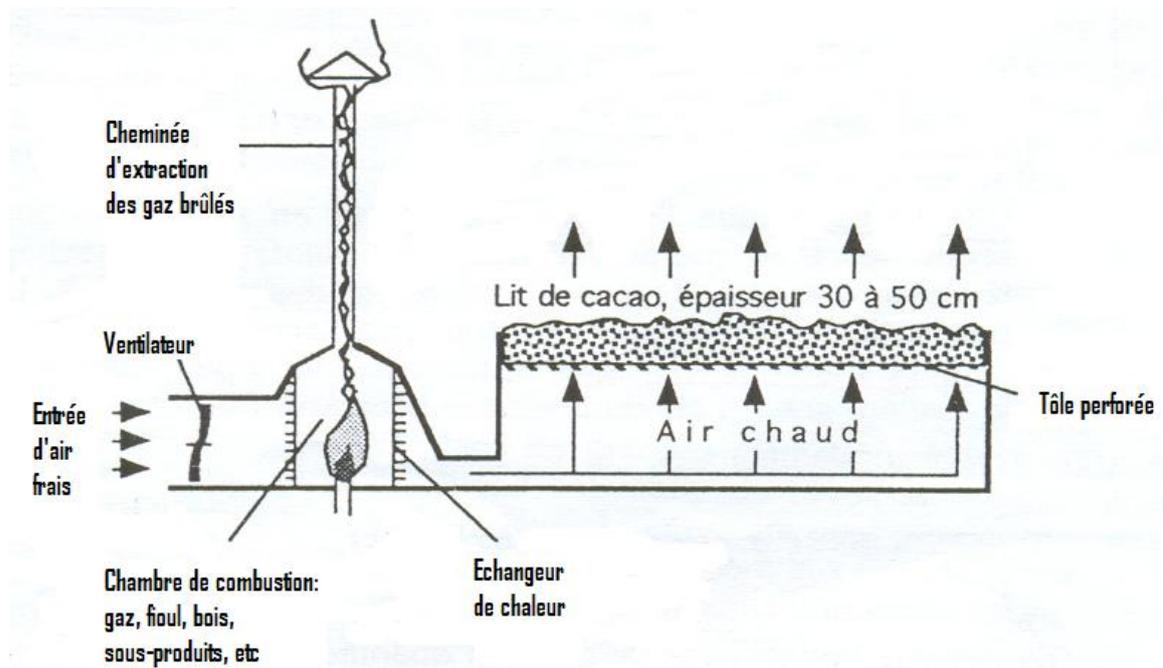


Figure I.13 : Schéma de principe d'un séchoir à air chaud (Pontillon, 1997)

La comparaison entre un séchage solaire et un séchage artificiel montre que le séchage solaire permet d'obtenir des fèves de qualité supérieure et de faible acidité (**Bopaiah et al.,1991**). Les différents travaux réalisés par Barel (**1995**), Nganhou (**1996**) et Augier *et al.*(**1998**) ont confirmé que le séchage artificiel sous air chaud est bien responsable de la plus grande acidité volatile des cacaos. Les modélisations de transferts de matière ont montré le mécanisme de diffusion de l'eau et de l'acide acétique dans la graine de cacao, mais n'ont pas encore permis de trouver un moyen économiquement acceptable, de sécher rapidement du cacao sans avoir de rétention d'acide acétique (**Augier, 1999**).

1.3 NOTIONS GENERALES SUR LE SECHAGE

1.3.1 BUT DU SECHAGE

Le but du séchage est de déshydrater un produit de façon à abaisser sa teneur en eau en dessous d'une valeur permettant sa conservation à température ambiante. Il consiste à extraire une part importante de l'eau pour réduire fortement les réactions diverses participant à la décomposition de l'aliment. Cette eau est éliminée par évaporation dans l'air environnant. Pour cela, il faut fournir de l'énergie (énergie d'activation) et, grâce à cette énergie, faire en sorte que cette eau migre de l'intérieur à la surface du produit (**Rozis et al., 1995**).

1.3.2 FORMES D'EAU DANS UN PRODUIT

On peut distinguer deux types d'eau d'un point de vue thermodynamique: l'eau libre et l'eau liée. Ces concepts ne sont pas respectés au sens strict dans la littérature abordant la répartition des différents types d'eau dans le produit. On constate l'apparition de sous-catégories particulières selon les auteurs et les méthodes utilisées pour caractériser les formes d'eau.

Vesilind et Martel (**1989**) proposent la classification suivante suite à des tests dilatométriques : *l'eau libre* est celle qui peut être éliminée par simple décantation gravitationnelle ; *l'eau interstitielle* est celle qui est enfermée dans des structures cellulaires, son enlèvement nécessite la rupture des cellules; *l'eau vicinale* est celle qui est retenue en surface des particules solides par des liaisons hydrogènes, son élimination passe par un traitement thermique; enfin *l'eau d'hydratation* est celle qui

est chimiquement liée et qui nécessite une importante dépense énergétique pour son enlèvement.

Smollen (1990) utilise un séchage basse température pour distinguer les catégories d'eau dans un produit déshydraté. L'eau qualifiée de libre est celle qui a pu être éliminée par déshydratation mécanique. Lors du séchage, l'auteur constate qu'une certaine quantité d'eau appelée '*eau immobilisée*' est éliminée à une vitesse constante. L'eau qui subsiste est de l'eau liée, physiquement et chimiquement.

Rozis *et al.* (1995), en se basant sur un schéma classique (Figure I.14), distinguent trois sortes d'eau contenues dans le même temps dans le grain :

- *l'eau libre*, en surface du produit ou dans des «poches», est facilement évacuée car elle n'est pas adsorbée. Pour certains produits destinés au séchage, cette eau est en grande partie éliminée au moment des étapes préparatoires précédant le séchage ;
- *l'eau faiblement adsorbée*, retenue par capillarité dans les tissus du produit ;
- *l'eau fortement liée*, cette dernière étant retenue aux molécules de matière sèche par des forces électrochimiques dites liaisons de Van Der Waals (**Rozis *et al.*, 1995, Cruz *et al.*, 1988 ; Daguinet, 1985**).

La figure I.14 fournit une illustration de fixation de l'eau dans le grain. L'eau de types 1 et 2 est fortement liée au produit. Non solvante, elle n'interviendra pas dans le processus de dégradation. Il n'est donc pas nécessaire de l'éliminer au cours du séchage.

L'eau de type 3 et 4 est solvante et responsable de la dégradation du produit, c'est donc cette eau que l'on cherche à éliminer par le séchage.

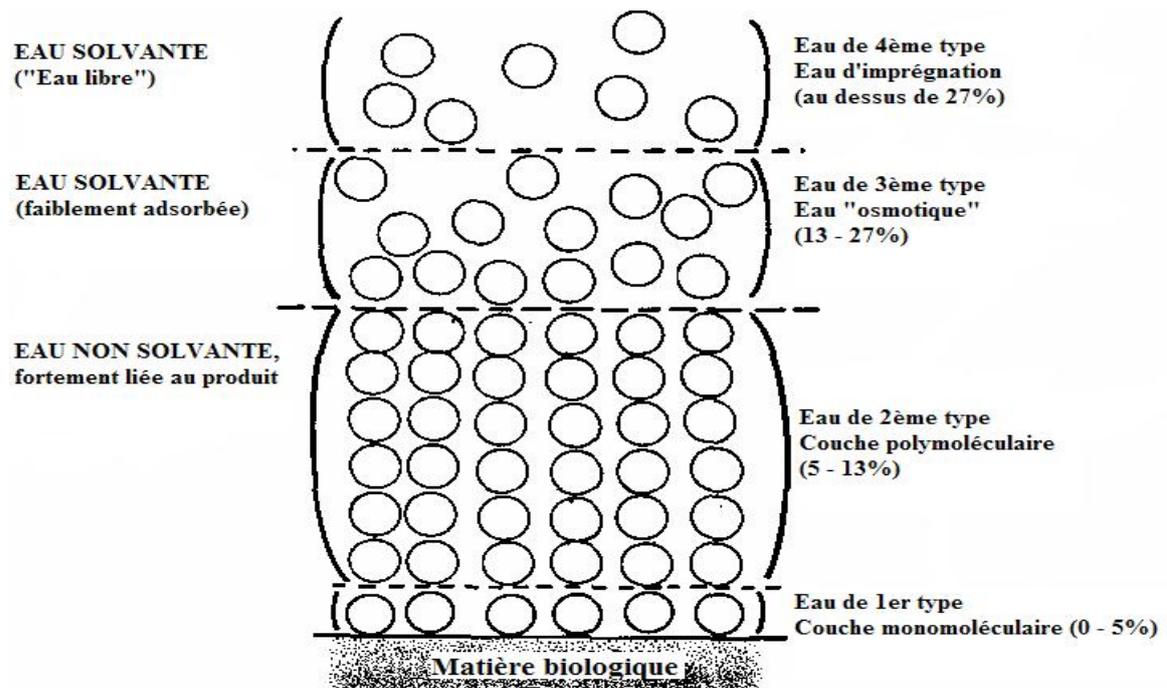


Figure I.14 : Différents types d'eau dans le grain (Rozis *et al.*, 1995)

1.3.3 ACTIVITE DE L'EAU DANS UN PRODUIT

Dans un matériau humide, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure: sa tension de vapeur correspond à sa tension de vapeur saturante à la température considérée. Par contre, l'eau liée va développer une tension de vapeur inférieure à la valeur de saturation. L'activité de l'eau vaut 1 dans le cas de l'eau libre et est inférieure à 1 dans le cas de l'eau liée (Rozis *et al.*, 1995, Cruz *et al.*, 1988). L'activité de l'eau d'un produit, à une température T (figure I.15), est définie comme le rapport entre la pression de vapeur d'eau à la surface du produit (P_v) et la pression de vapeur de l'eau pure à la même température T ($P_s(T)$) (Jannot, 2003 ; Talla *et al.*, 2001):

$$A_w = \frac{P_v}{P_s(T)} \quad (1.3)$$

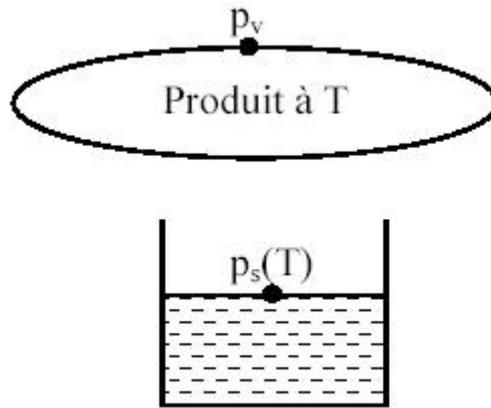


Figure I.15 : Représentation de l'activité de l'eau (Jannot, 2003)

Considérons un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre. Soient P_v, T et P_{v_a}, T_a , les pressions de vapeur d'eau et les températures respectives du produit et de l'air. L'équilibre impose :

- $T = T_a$ pas de transfert de chaleur ;
- $P_v = P_{v_a}$ pas de transfert de masse.

Or l'humidité relative de l'air s'écrit (Talla *et al.*, 2001 ; Jannot, 2003) :

$$HR = 100 \times \frac{P_{v_a}}{P_s(T_a)} \quad \text{d'où} \quad HR = 100 \times A_w \quad (1.4)$$

L'activité de l'eau dans un produit est donc l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit. Dans le domaine du séchage, cet équilibre, obtenu à une température constante, est présenté sous forme d'un diagramme (A_w, X_{eq}) appelé *isotherme de sorption*. (Rozis *et al.*, 1995 ; Talla *et al.*, 2001 ; Jannot, 2003 ; Haoua, 2007)

1.3.3.1 Isothermes de sorption

L'activité de l'eau (A_w) dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température (Pillard, 1997; Ahouannou *et al.*, 2000 ; Jannot, 2003 ; Lashani *et al.*, 2003 ; Haoua, 2007). La courbe représentant, pour une température T donnée, la teneur en eau (X) d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau (A_w) ou de l'humidité relative (HR) de l'air en équilibre est appelée :

- *isotherme d'adsorption* si elle a été déterminée expérimentalement à partir d'un produit sec ;

- *isotherme de désorption* si elle a été déterminée expérimentalement à partir d'un produit saturé en eau.

Le phénomène d'hystérésis (Figure I.16) est généralement observé pour les isothermes de sorption des produits agroalimentaires (Rozis *et al.*, 1995 ; Talla *et al.*, 2001 ; Lamharrar *et al.*, 2007). Les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de $A_w = 1$ à $A_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure irréversibles (Talla *et al.*, 2001 ; Jannot, 2003).

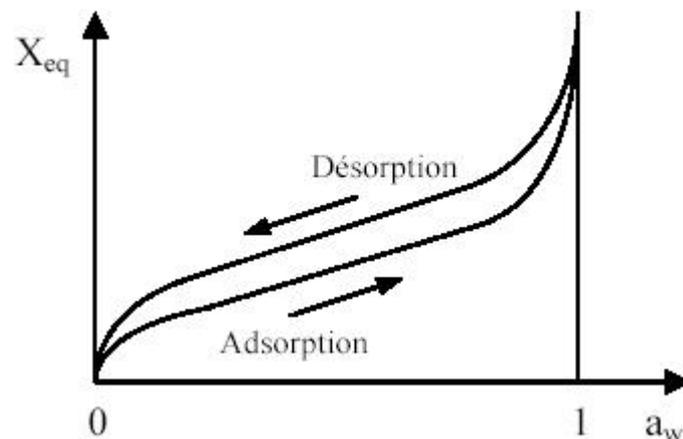


Figure I.16 : Courbes d'Adsorption-désorption et mise en évidence de l'effet d'hystérésis (Rozis *et al.*, 1995 ; Jannot, 2003)

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit par entraînement : produit placé dans un courant d'air chaud et sec. L'isotherme de désorption permet de calculer la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau (X) du produit en fin de séchage. La valeur de X_{eq} est un paramètre qui apparaît en particulier dans les modèles permettant de prévoir l'évolution de la teneur en eau d'un produit au cours de son séchage (Inci *et al.*, 2003 ; Noumi *et al.*, 2004 ; Haoua, 2007 ;).

Remarque :

- Les isothermes de désorption peuvent présenter une variabilité selon le mode de préparation ou de fabrication du produit s'il n'est pas naturel ou selon le degré de maturité ou l'espèce du produit s'il s'agit d'un produit végétal. Dans ce dernier cas, les variations sont toutefois peu importantes (Jannot, 2003).

- Les isothermes de désorption sont également utiles pour calculer la chaleur de désorption et préciser la quantité d'énergie nécessaire à l'élimination de l'eau la plus liée (Veltchev *et al.*, 2000 ; Noumi *et al.*, 2004 ; Ferradji *et al.*, 2008).

1.3.3.2 Modèles et forme des isothermes de sorption

De nombreuses équations ont été proposées pour modéliser les isothermes de sorption. Certaines sont basées sur un modèle théorique d'adsorption, alors que d'autres sont de nature empirique. Un inconvénient de ces relations est qu'elles ne sont pas applicables sur toute la gamme des humidités relatives. Le tableau I.6 reprend les modèles les plus couramment utilisés.

L'équation de Langmuir (1918) fait référence à une adsorption monocouche et n'est donc valable que dans la première partie de l'isotherme : zone 1 (Figure I.17).

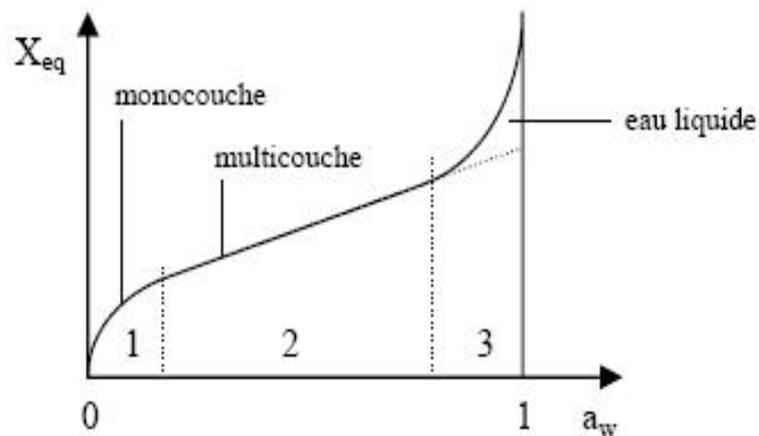


Figure I.17 : Forme générale des isothermes (Pillard, 1997 ; Jannot, 2003)

Le modèle de Brunauer-Emmet-Teller (BET) tient compte d'une adsorption multicouche. Il suppose que la chaleur de sorption de la première couche est différente des couches suivantes, assimilées à de l'eau pure (Brunauer *et al.*, 1938). X_m est la teneur en eau de la monocouche et C_{BET} la constante de BET. Ce modèle est

utilisé pour des isothermes de forme sigmoïdale, pour des valeurs d'humidité relative inférieures à 50% (**Brunauer et al., 1938**).

Tableau I.6 : Modèles d'isothermes les plus couramment utilisés (Haoua, 2007)

Modèle	Formulation de $X_{eq} = f(HR)$	Conditions d'utilisation
Langmuir	$X_{eq} = \frac{knHR}{1+HR}$	Faibles HR
BET	$X_{eq} = \frac{X_m C_{BET} HR}{(1-HR)(1+(C_{BET}-1)HR)}$	$HR < 0,5$
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m C_G K HR}{(1-HR)(1+C_G K HR - K HR)}$	$0,1 < HR < 0,9$
Chung-Pfost	$X_{eq} = \frac{1}{n}(\ln k - \ln(-\ln HR))$	$0,2 < HR < 0,9$
Hasley	$X_{eq} = \left(-\frac{k}{\ln HR}\right)^{\frac{1}{n}}$	$0,1 < HR < 0,8$
Harkins-Jura	$X_{eq} = \left(-\frac{n}{\ln(HR) - k}\right)^{\frac{1}{2}}$	$HR > 0,8$
Henderson	$X_{eq} = \left(-\frac{\ln(1-HR)}{k}\right)^{\frac{1}{n}}$	$0,5 < HR < 0,95$
Kuhn	$X_{eq} = \frac{k}{\ln HR} + k$	$HR < 0,5$
Oswin	$X_{eq} = k\left(\frac{HR}{1-HR}\right)^n$	$0,1 < HR < 0,9$
Smith	$X_{eq} = k - n \ln(1-HR)$	$0,5 < HR < 0,95$

L'équation de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) peut être considérée comme l'amélioration du modèle de BET en introduisant un comportement intermédiaire différent de l'eau pure pour les couches suivant la monocouche initiale (**Anderson, 1946; De Boer, 1953 ; Guggenheim, 1966**). La zone de validité est très large ($HR < 90\%$). C_G est appelée la constante de Guggenheim et correspond à la chaleur de sorption totale de la première couche adsorbée. K est un facteur correctif tenant compte des propriétés de sorption des multicouches.

Les équations de Chung-Pfost (**1967**), d'Halsey (**1948**), d'Harkins-Jura (**1944**), d'Henderson (**1952**), de Kuhn (**1967**), d'Oswin (**1946**) et de Smith (**1947**) sont empiriques ou semi-empiriques. Certains de ces modèles existent également en

versions dites modifiées afin de tenir compte de la température (**Veltchev et Menkov, 2000**).

1.3.3.3 Chaleur isostérique de désorption

A partir des isothermes, il est également possible de déterminer la chaleur isostérique de sorption qui est une mesure du degré de liaison de l'eau et de la quantité d'énergie à fournir pour libérer cette eau (**Ferradji et al., 2005 ; Bellagha et al., 2007 ; Lamharrar et al., 2007 ; Ferradji et al., 2008**). Cette contribution énergétique doit être prise en compte lors du dimensionnement de séchoirs destinés à traiter des produits fortement hygroscopiques (**Noumi et al., 2004**). Un matériau est qualifié d'hygroscopique lorsqu'il absorbe et retient facilement l'humidité de l'air.

La chaleur isostérique nette de désorption peut être calculée à partir d'une relation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron (Équation 1.5) (**Labuza, 1984; Tsami et al., 1990; Veltchev et Menkov, 2000**). Cette relation nécessite de déterminer les isothermes à différentes températures afin de calculer la variation logarithmique de l'humidité relative en fonction de l'inverse de la température, pour une teneur en eau d'équilibre fixée. Cependant, à partir des équations modifiées, il est possible d'obtenir l'expression analytique de la chaleur de sorption Q_{st} .

$$Q_{st} = -R \left(\frac{\partial \ln(HR/100)}{\partial (1/T)} \right) \quad (1.5)$$

Avec:

HR humidité relative (%);

Q_{st} chaleur isostérique nette de désorption (kJ/mol) ;

R constante des gaz parfaits (kJ/mol K) ;

T température absolue de l'air (K).

1.3.4 DIFFERENTES ETAPES DU SECHAGE D'UN PRODUIT HUMIDE

1.3.4.1 Teneur en eau

Tout produit qu'il soit d'origine végétale, animale ou minérale contient de l'eau.

On peut distinguer dans tout produit de masse totale m :

- une masse d'eau m_e ;
- une masse restante $m_s = m - m_e$ appelée masse anhydre ou masse sèche

(Jannot, 2003).

On définit l'humidité ou la teneur en eau du produit en base sèche par (Cruz *et al.*, 1988 ; Rozis *et al.*, 1995 ; Talla *et al.*, 2001 ; Jannot, 2003):

$$X = \frac{m_e}{m_s} \quad (1.6)$$

L'humidité d'un produit peut être aussi définie par la teneur en eau base humide :

$$X_h = \frac{m_e}{m} \quad (1.7)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad \text{et} \quad X_h = \frac{X}{1 + X} \quad (1.8)$$

On utilise le plus souvent la teneur en base sèche, sauf précision (Cruz *et al.*, 1988 ; Rozis *et al.*, 1995).

1.3.4.2 Etablissement des courbes de séchage

Les courbes de séchage désignent, soit les variations de la teneur en eau moyenne $\left(X = \frac{m - m_s}{m_s} \right)$ du produit en fonction du temps, soit celle donnant la vitesse de séchage $\left(-\frac{dX}{dt} \right)$ en fonction du temps t ou même la courbe proposée par Krischer $\left(-\frac{dX}{dt} \right)$ en fonction de X , soit enfin une forme réduite de ces premières (teneur et vitesse de séchage) et visant à donner une représentation unique pour différentes conditions de séchage.

1.3.4.3 Analyse de la cinétique de séchage

L'examen de l'allure des courbes de Krischer permet une première approche macroscopique du comportement du produit pendant le séchage. Sur la courbe schématisée présentée à la figure I.18, on peut distinguer 3 ou 4 phases selon les cas (Krischer *et al.*, 1978 ; Daguinet, 1985 ; Rozis *et al.*, 1995).

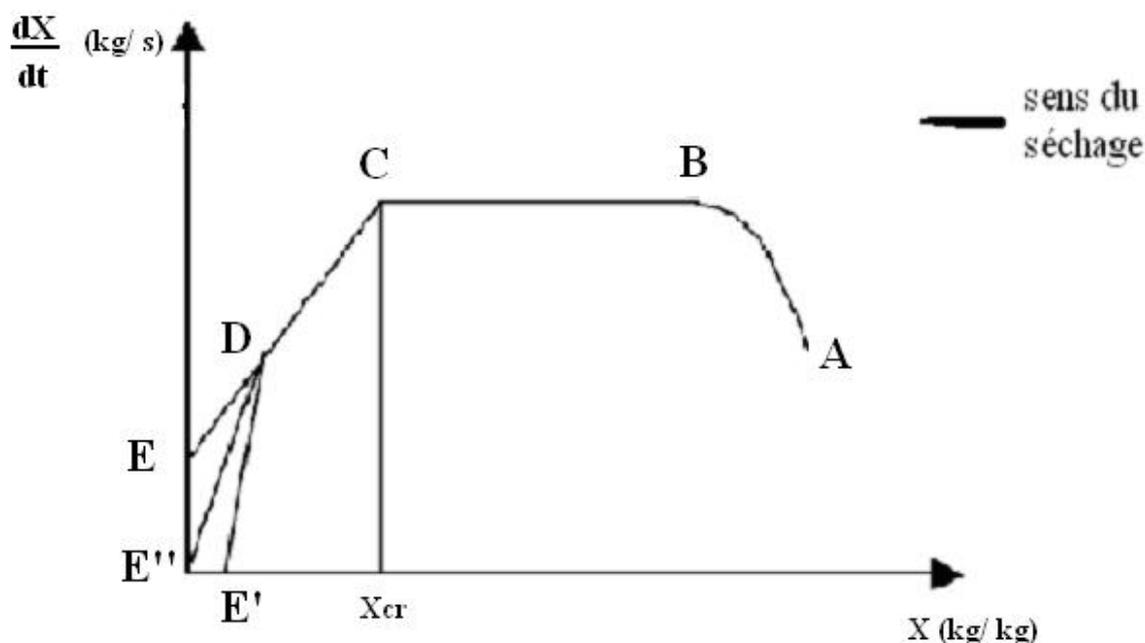


Figure I.18 Courbe théorique de Krischer (Krischer *et al.*, 1978)

AB= Période de mise en température du produit ;

BC= Période à vitesse de séchage constante ;

CD= Première période de ralentissement ;

DE'= Seconde période de ralentissement pour les matériaux hygroscopiques ;

DE''= Seconde période de ralentissement pour les matériaux non hygroscopiques ;

DE= Prolongement de la première période de ralentissement pour les matériaux non hygroscopiques.

1.3.4.3.1 Période de mise en température

La période de mise en température est une phase durant laquelle les transferts de chaleur et de masse à la surface du produit s'établissent jusqu'à une valeur d'équilibre. La température du produit à sécher monte jusqu'à atteindre la température humide correspondant à l'environnement séchant (zone A-B). Cette période est généralement très courte vis-à-vis du temps de séchage total (Rozis *et al.*, 1995 ; Krischer *et al.*, 1978).

1.3.4.3.2 Période à vitesse de séchage ou flux constant

Pendant la période à vitesse constante, souvent isenthalpique, l'eau est évacuée à flux constant (zone B-C). Le qualificatif isenthalpique est employé lorsque la chaleur échangée par convection est intégralement utilisée pour la vaporisation de l'eau. Ceci n'est plus vrai lorsqu'une partie de la chaleur est échangée par rayonnement ou par conduction en plus de la convection. On considère que l'évaporation s'effectue à la surface du matériau et que la surface est couverte d'un film d'eau continu. L'eau éliminée est libre et la surface conserve la température humide mentionnée dans la première période. Cette phase perdure tant que la surface est alimentée de manière suffisante en eau venant de l'intérieur du solide. Le flux de chaleur demeure constant lui aussi pendant toute cette période. Les résistances au transfert se situent presque exclusivement dans la couche limite. La vitesse de séchage ne dépend donc principalement que des conditions externes, c'est-à-dire la vitesse superficielle, l'humidité et la température de l'agent séchant, la surface exposée au séchage et la pression. Toutefois, l'état de surface peut avoir une importance car le flux peut être plus important pour une surface rugueuse que pour une surface plane (**Geankoplis, 1993**).

1.3.4.3.3 Périodes de ralentissement

Les interprétations sont différentes quelque peu selon le modèle évoqué. Deux modèles sont couramment cités: le receding front model et le 'wetted-surface model' (**Keey, 1978**). Le premier modèle pose l'hypothèse que le front de vaporisation se déplace vers l'intérieur du matériau alors que le second postule que la vaporisation se déroule en surface, mais que celle-ci est partiellement sèche.

- **Receding front model**

La première période de ralentissement (zone C-D) commence lorsque la surface du matériau en contact avec l'air chaud atteint soit le seuil hygroscopique (toute l'eau libre a été éliminée en surface). Le front de séchage qui se trouvait en surface migre vers l'intérieur du produit. Dans cette phase, ce sont les différentes résistances internes du produit aux transferts de chaleur et de matière qui contrôlent la vitesse de séchage. Ces résistances seront d'autant plus grandes que le front de séchage se situe loin de la surface externe du produit (**Nadeau et Puiggali, 1995**).

Une fois que l'ensemble du produit se situe dans le domaine hygroscopique, c'est-à-dire qu'il ne subsiste plus que de l'eau liée, la seconde phase de ralentissement

commence. Le séchage est terminé lorsque le solide a atteint sa teneur en eau d'équilibre dans les conditions opératoires considérées (zone D-E'). Si le matériau est non hygroscopique, cette seconde période n'existe pas: la première zone de décroissance se poursuit jusqu'au terme du séchage (zone D-E).

- **Wetted-surface model**

La chute du flux de séchage est liée à l'apparition de zones sèches à la surface du produit, correspondant à une teneur en eau globale. Cependant, si on rapporte le flux à la fraction de surface mouillée, celui-ci est constant. Cette période se poursuit jusqu'à assèchement complet de la surface externe (**Keey, 1978 ; Nadeau et Puiggali, 1995**) (zone CD). La seconde zone de ralentissement est le reflet d'un contrôle de la vitesse par la diffusion de l'eau à l'intérieur du produit. Le séchage se termine à teneur en eau nulle (zone D-E") ou à teneur en eau d'équilibre pour les matériaux hygroscopiques (zone D-E'). Le front de séchage peut également se retirer dans le produit et on retrouve alors le premier modèle (**Haoua, 2007**).

1.3.4.3.4 Classification de Sherwood

L'interprétation des courbes de Krischer (Figure I.18) correspond à des cas idéaux de courbes de séchage. Dans la pratique, la situation peut être plus complexe, avec des zones de transition. Globalement, on peut retenir que les courbes présentent:

- une zone de préchauffage;
- une phase à vitesse constante contrôlée par les conditions externes;
- une phase de décroissance majoritairement contrôlée par les transferts internes.

Selon la forme de la courbe et l'orientation des concavités (Figure I.19), Sherwood (**1936**) fut l'un des premiers à proposer une classification portant sur l'importance plus ou moins grande des résistances aux transferts. La courbe B, de concavité tournée vers le haut, est typique d'un séchage contrôlé par des limitations intragranulaires ; la phase à flux constant décrite par la zone B-C sur la figure I.18 n'est pas toujours présente. La courbe D, de concavité orientée vers le bas, illustre le cas inverse pour lequel les transferts sont limités par les transferts externes dans la couche limite. La courbe A est un cas mixte: la portion de décroissance linéaire est contrôlée par des résistances externes au transfert, alors que la fin de la courbe ressemble à la courbe B (concavité vers le haut) et indique des limitations intragranulaires en fin de séchage. La courbe C correspond à un produit dans lequel le

front de séchage se retire. Au début du recul du front, la diffusion du liquide est limitante. Vers la fin du séchage, c'est la diffusion de l'eau sous forme vapeur à travers le solide qui est limitante (**Sherwood, 1936**).

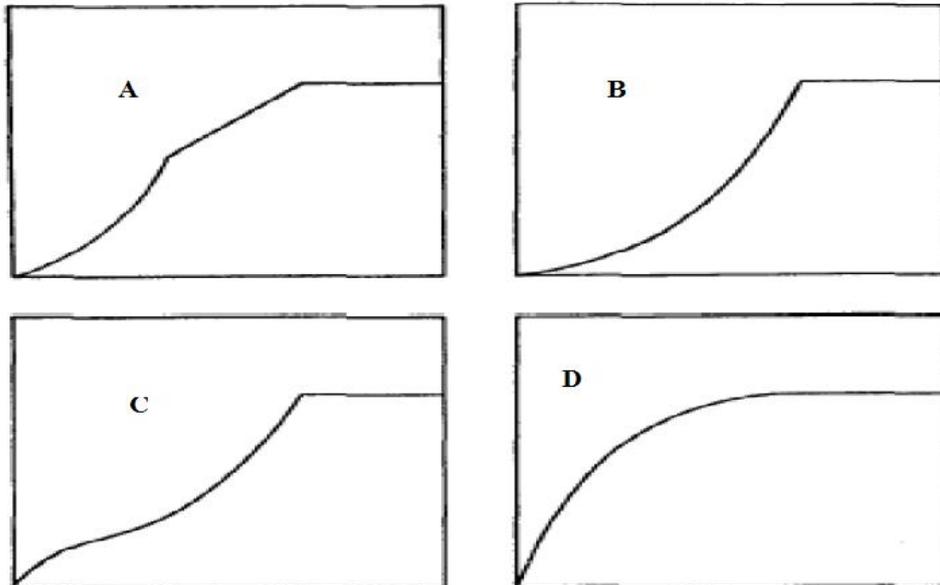


Figure I.19 Types de courbes de flux en fonction de la teneur en eau sur base sèche (**Sherwood, 1936**).

B= Séchage contrôlé par des limitations intragranulaires ;

D= Séchage contrôlé par des résistances externes au transfert dans la couche limite ;

A= Cas mixte (D+B) ;

C= Séchage dans le cas d'un produit dont le front de séchage se retire.

1.3.5 MODELISATION SIMPLIFIEE DES PHASES DE SECHAGE

Dans une première approche de modélisation, on peut envisager séparément les périodes à vitesse constante et à vitesse décroissante, et décrire les mécanismes de transfert de matière et de chaleur qui sont rencontrés (**Haoua, 2007**).

1.3.5.1 Période à vitesse constante

Les résistances au transfert pendant cette période sont presque exclusivement confinées dans une couche limite à la surface du produit humide. La nature et la structure interne du produit n'interviennent pas. Dans ce cas, les quantités de matière (Équation 1.9) et de chaleur (Équation 1.10) peuvent être exprimées comme le produit d'un coefficient de transfert (K ou h) et d'un potentiel moteur au transfert. La quantité de chaleur Q est liée à celle de matière via la chaleur latente de vaporisation (Équation 1.11) (**Daguenet, 1985**).

$$ms \left(-\frac{dX}{dt} \right) = K S (P_{V Sat} - P_V) \quad (1.9)$$

$$Q = h S (T_a - T_p) \quad (1.10)$$

$$Q = ms \left(-\frac{dX}{dt} \right) L_V \quad (1.11)$$

avec :

- K Coefficient de transfert de matière (m/s) ;
- h Coefficient de transferts de chaleur (W/m².K) ;
- S Surface d'échange entre l'air et le produit (m²) ;
- T_p Température sèche de l'air à la surface du produit (K) ;
- T_a Température de l'air ;
- P_V Pression de vapeur d'eau en surface du produit (Pa) ;
- $P_{V Sat}$ Pression de vapeur à la surface de l'eau pure à la température du produit (Pa) ;
- ms Matière sèche (kg) ;
- L_V Chaleur latente de vaporisation (J/kg) ;
- X Teneur en eau du produit à l'instant t (kg eau / kg ms).

Dans le cas où l'activité de l'eau vaut 1, la température qui règne à l'interface est la température humide et la pression correspond à la pression de saturation. Si l'apport

de chaleur par radiation ou par conduction est négligé, pendant la période de séchage à vitesse constante, l'expression de la vitesse devient donc (**Daguenet, 1985 ; Haoua, 2007**):

$$ms \left(- \frac{dX}{dt} \right) = K S (P_{v, sat}(T_h) - P_v) \quad (1.12)$$

Lorsqu'une autre forme d'énergie telle que l'énergie solaire intervient, la surface du produit pendant cette phase a une température supérieure à la température humide (T_h). La valeur de cette température de quasi-équilibre est donnée par l'équilibre entre l'apport d'énergie thermique sous toutes ses formes (convective et radiative) et la consommation de l'énergie pour l'évaporation de l'eau (**Daguenet, 1985 ; Haoua, 2007**).

L'équation (Équation 1.12) montre qu'une augmentation de la vitesse d'évaporation (ou vitesse de séchage) peut donc être provoquée par:

- une augmentation du coefficient de transfert de matière (eau) K ;
- une diminution de la teneur en humidité de l'air de séchage;
- une augmentation de la surface d'échange S entre l'air et le produit ;
- une augmentation de la température humide.

Les coefficients de transferts de chaleur h et de matière K peuvent être déterminés à partir de la mesure du flux de vitesse pendant cette période contrôlée par les résistances extra granulaires (cf. Équation. 1.9 et 1.10). Lorsque l'activité de l'eau devient inférieure à 1, on peut observer que la température à l'interface augmente et que le potentiel moteur diminue suite à l'abaissement de la teneur en humidité à l'interface. Progressivement, les résistances intra granulaires deviennent limitantes.

1.3.5.2 Période à flux décroissant

Durant la période à flux décroissant, la structure du matériau détermine la manière dont le transport de l'eau (sous forme liquide ou vapeur) s'effectue. Les deux principaux mécanismes sont la diffusion et la capillarité. En général un mécanisme prédomine à un temps donné, mais différents mécanismes peuvent se succéder dans le temps. Dans le cas de systèmes homogènes où les phases solide et liquide sont

mutuellement solubles (savons, colles, pâtes, gélatine, etc.), le transport s'effectue par diffusion (**Lewis, 1921 ; Sherwood, 1929**). On peut également inclure dans cette catégorie les matériaux dont les pores sont suffisamment fins ($r_p < 0,1\mu\text{m}$) pour lesquels le liquide est réparti uniformément et les matériaux fibreux. Bien que le transport de l'eau puisse être très complexe dans cette dernière catégorie (forces osmotiques, capillaires, etc.), il est assimilé à la diffusion pour la modélisation (**Vanderschuren, 2000 ; Mourad et al., 1995**). Le transport s'effectue aussi par diffusion lors de la fin du séchage de certains matériaux comme l'argile, l'amidon, la farine, le papier, le bois, etc. Les modèles utilisés se basent sur la première loi de Fick (Équation. 1.13) (**Lewis, 1921 ; Sherwood, 1929**).

$$\vec{J} = -D \vec{\nabla} C = -D \times \left(\frac{\partial C}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial C}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial C}{\partial z} \vec{k} \right) \quad (1.13)$$

\vec{J} est le flux d'évaporation en $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, D le coefficient de diffusion en m^2/s et C la concentration en kg/m^3 . L'opérateur $\vec{\nabla}$ (« nabla ») se lit : « gradient de C » est un vecteur de coordonnées $\left(\frac{\partial C}{\partial x}, \frac{\partial C}{\partial y}, \frac{\partial C}{\partial z} \right)$ dans un repère cartésien.

Dans le cas du séchage de la fève de cacao, les travaux menés par Augier (**1999**) ont montré que la diffusion est majoritairement effectuée dans la direction de l'épaisseur de la fève. En effet, de part sa forme aplatie, la fève de cacao peut être assimilée à une plaque infinie. On peut ainsi supposer que les transferts de matière ont lieu dans une seule direction, celle de l'épaisseur représentée par l'axe x . Dans ce cas, la relation vectorielle de l'équation de diffusion devient un scalaire :

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1.14)$$

Historiquement, les premières études sur le séchage ne considéraient que le mode de transport par diffusion suivant la première loi de Fick (**Lewis, 1921 ; Sherwood, 1929**). Quelques années plus tard, notamment sous l'impulsion des recherches dans le domaine de la physique des sols, le transport de liquide lors du séchage de matériaux poreux a été attribué à la capillarité (**Comings et Sherwood, 1934**). Ceaglske et Hougen (**1937**) ont émis des restrictions quant à l'utilisation du

concept de diffusion de liquide et ils ont affirmé que le transport d'eau est induit par des gradients de pression dans les solides granulaires.

Le mécanisme de transport d'eau par diffusion est souvent utilisé en modélisation même si certaines réserves peuvent être émises sur le sens physique d'un tel mécanisme.

1.3.6 CLASSIFICATION DES MODELES DE SECHAGE

Les modèles de séchage en couche mince qui décrivent le phénomène de séchage des produits agricoles se classent principalement dans trois types de modèle (**Midilli et al., 2002; Panchariya et al., 2002**).

1.3.6.1 Modèles empiriques

Les modèles empiriques dérivent d'un rapport direct entre la teneur moyenne en eau et le temps de séchage. Ces modèles sont basés sur l'expérimentation pour la détermination des coefficients de séchage.

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

- Modèle exponentiel ou de Newton $X_r = \exp(-kt)$ (1.15)

- Modèle deux termes $X_r = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$ (1.16)

- Modèle de Page $X_r = \exp(-kt^n)$ (1.17)

- Modèle de Henderson et Pabis $X_r = a \exp(-kt)$ (1.18)

- Modèle Logarithmique $X_r = a \exp(-kt) + c$ (1.19)

Dans ces relations, X_r représente la teneur en eau réduite moyenne.

Ces modèles sont en fait des modèles semi-empiriques. Les deux premiers utilisent la forme des deux premiers termes de la série infinie de la seconde loi de Fick, les modèles suivants en sont des formes modifiées empiriquement.

L'inconvénient de ces modèles est que les coefficients a_i , k_i et n qui y figurent varient à priori avec les conditions de l'air de séchage. Pour les utiliser dans un programme de calcul de la vitesse de séchage dans des conditions d'air très variables, il faut connaître la valeur de ces paramètres sur une plage de conditions assez large.

Le nombre de paramètres nécessaires pour décrire les valeurs de a_i , k_i et n peut alors devenir important (**Jannot, 2006**).

1.3.6.2 Modèles diffusifs

Les modèles diffusifs qui ont constitué le point de départ de la théorie de séchage, sont basés sur la seconde loi de Fick. Cette dernière décrit l'origine des mouvements moléculaires par l'équation suivante:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D.\nabla X) \quad (1.20)$$

Avec

D Coefficient de diffusion de l'eau dans le produit (m^2/s) ;

X Teneur en eau du produit (kg eau / kg ms) ;

t temps (s).

Sherwood (**1929**) et Neuman (**1931**) ont été les premiers à utiliser les modèles diffusifs dans le cas monodimensionnel. En supposant la diffusivité massique constante, l'équation 1.20 devient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (1.21)$$

1.3.6.3 Modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse

Depuis les premiers travaux de Lewis (**1921**) jusqu'à ce jour, des modèles phénoménologiques de plus en plus élaborés ont été proposés par différents auteurs. Ces modèles, basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse, sont les modèles qui détaillent le plus finement les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage.

Ils permettent de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur. Les travaux de Luikov (**1966**), Philip et De Varies, Krischer et Kast (**1978**) et Whitaker (**1977**) ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse. Les plus connus de ces modèles sont les suivants:

1.3.6.3.1 Modèles issus de la thermodynamique des phénomènes irréversibles

La thermodynamique des phénomènes irréversibles (TPI) a été exploitée dans le domaine du séchage en vue d'apporter des explications aux phénomènes physiques mal pris en compte par les autres théories. En partant de l'étude de la source d'entropie, la TPI permet d'écrire des équations constitutives mettant en jeu divers phénomènes physiques élémentaires. La démarche se base sur le fait qu'un certain nombre de flux se produit à partir des forces qui peuvent se développer dans un système thermodynamique quelconque (**Fortes et Okos, 1976**). La TPI a beaucoup inspiré les travaux de Luikov qui font référence dans ce domaine.

1.3.6.3.2 Modèle de Luikov

Les travaux de Luikov, dans le séchage pour une pression de la phase gazeuse uniforme et des températures comprises entre 0 et 100°C, ont abouti à un système d'équations différentielles, qui régit le transport de chaleur et de masse. Les équations différentielles constituant ce système sont les suivantes:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} \left[D_m \vec{\text{grad}} X + u \vec{\text{grad}} T \right] \quad (1.22)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} D_T (\vec{\text{grad}} X) + \frac{v.r}{C} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad (1.23)$$

Avec

- D_m Diffusivité massique (m^2s^{-1});
- D_T Diffusivité thermique (m^2s^{-1});
- C Chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$);
- r Chaleur spécifique d'évaporation (J.kg^{-1});
- T Température (°C);
- t Temps (s);
- v Taux de changement de phase;
- u Coefficient du gradient thermique basé sur la différence de teneur en eau (°C^{-1}).

La contribution la plus importante de ce modèle est la mise en évidence de l'influence de la température et de la pression interne sur la migration de la vapeur d'eau à l'intérieur des produits poreux durant le séchage (**Hamed, 1985 ; Amir, 1987**). Toutefois, l'inconvénient de ce modèle est que le taux de changement de phase (v) n'est pas issu d'une loi physique et sa détermination empirique est délicate (**Touati, 2008**).

1.3.6.3.3 Modèle de Philip et De Varies

En procédant à une analyse du comportement hydrique et thermique des matériaux Philip et De Varies ont élaboré un autre modèle basé aussi sur le couplage des transferts thermique et massique, et qui tient compte de l'effet de la pesanteur g . Le système d'équations décrivant ce modèle est le suivant :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} \left[D_{-} \vec{\text{grad}} X + D_{+} \vec{\text{grad}} T - \frac{\dots_e}{\dots_0} K \right] \quad (1.24)$$

$$\dots_c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\} \cdot \vec{\text{grad}} T) + \dots_e L_v (D_{-v} \vec{\text{grad}} X + D_{+v} \vec{\text{grad}} T) \quad (1.25)$$

Avec

- D_{-} Coefficient de diffusion massique isotherme (m^2s^{-1}) ;
- D_{+} Coefficient de diffusion massique non isotherme (m^2s^{-1}) ;
- D_{-v} Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur (m^2s^{-1}) ;
- D_{+v} Coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur (m^2s^{-1}) ;
- K Conductivité hydraulique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) ;
- \dots_c Capacité calorifique équivalente ($\text{J m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) ;
- \dots_0 Masse volumique de la phase solide (kg m^{-3}) ;
- \dots_e Masse volumique de la phase liquide (kg m^{-3}) ;
- $\}$ Conductivité thermique apparente ($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Ce modèle est adapté pour le séchage des sols et des matériaux de construction pour lesquels la migration de l'eau par gravité joue un rôle non négligeable (**Bennis, 1997**).

1.3.6.3.4 *Modèle de Whitaker*

Le modèle de Whitaker tient compte de la morphologie du milieu poreux, constitué d'une matrice solide inerte, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse (mélange de vapeur d'eau et d'air). La modélisation de tels milieux n'est utilisable qu'à l'échelle macroscopique, après avoir effectué un changement d'échelle. Le passage des équations de l'échelle de pores (du milieu réel discontinu) aux équations macroscopiques (à un milieu continu fictif dans lequel les équations de la mécanique classique sont applicables) s'effectue par la technique de la prise de la moyenne sur un volume élémentaire représentatif (**Whitaker, 1977 ; Perré et Degiovanni, 1990 ; Perré et Tunner, 1990**).

1.3.6.3.5 *Concept de la courbe caractéristique de séchage*

Le concept de la courbe caractéristique de séchage, noté CCS, est mis au point par **Van Meel** en 1957 et repris par **Krisher et Kast** en 1978.

L'objectif consiste à modéliser la vitesse de séchage. Il s'agit en quelque sorte d'examiner si, en dépit de la complexité des phénomènes au niveau microscopique (c'est-à-dire dans les pores du milieu), il est possible d'obtenir au niveau macroscopique une certaine simplicité d'interprétation des résultats expérimentaux (**Moyne, 1985 ; Midilli et Kucuk, 2003**) et un même modèle de comportement du produit étudié, quelles que soient les conditions de l'expérience.

La démarche consiste à "normer" les teneurs en eau moyennes et les vitesses de séchage pour obtenir une courbe unique pour un produit donné, de dimensions déterminées et indépendamment des conditions aérothermiques (vitesse, température, et hygrométrie de l'air de séchage) (**Mohammed, 2006, Doymaz, 2007**).

Les figures I.20 et I.21 représentent des courbes caractéristiques de séchage de la banane (**Talla et al., 2001**) et de la menthe (**Aghfir et al., 2008**) obtenues par pour différents essais.

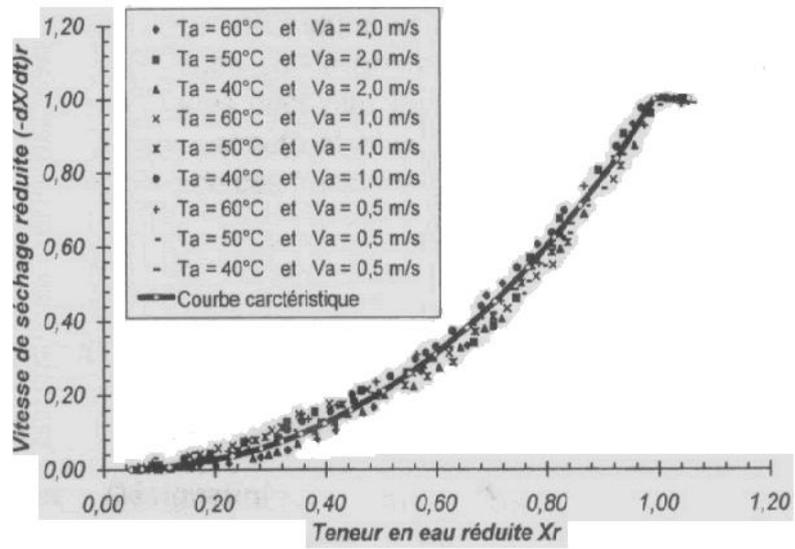


Figure I.20 : Courbe caractéristique de séchage de la banane pour différents essais

(Talla *et al.*, 2001).

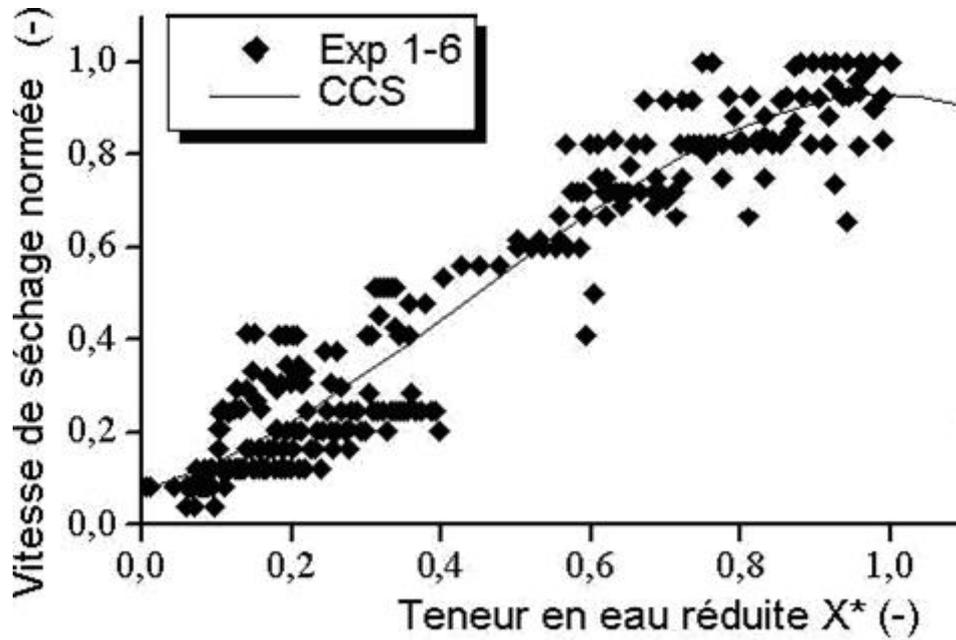


Figure I.21 : Courbe caractéristique de séchage de la menthe (Aghfir *et al.*, 2008).

1.4 CONCLUSION

Plusieurs techniques de séchage sont utilisées pour les produits agroalimentaires. Cependant, dans le traitement post récolte du cacao, le séchage solaire naturel, pratiqué sur différents supports occupe une place de choix chez la majorité des planteurs. Cette prédilection pour ce mode de séchage se justifie par sa simplicité et son coût bas.

Sécher un produit en vue de sa conservation, nécessite la connaissance de ses propriétés hydriques (activité de l'eau, isothermes) et thermodynamiques (chaleur de sorption isostérique). La connaissance de ses propriétés, permet d'étudier le séchage.

L'étude et la modélisation du séchage peuvent s'effectuer suivant plusieurs approches classées en trois types : une approche basée sur les transferts couplés de chaleur et de masse, une approche empirique et une autre diffusive. Chacune de ces démarches a été exploitée dans cette étude en vue de trouver une meilleure simulation du séchage solaire du cacao dans les conditions naturelles.

Concernant les modèles complets de transfert, ils ne sont pas tous applicables aux produits agroalimentaires du fait de leur complexité. C'est à juste titre que la méthode de la courbe caractéristique de séchage a été retenue, car elle exploite les résultats expérimentaux tout en évitant une analyse théorique des mécanismes interne au produit.

II-MATERIEL ET METHODES

2.1 MATERIEL

2.1.1 MATERIEL VEGETAL

- **Matériel végétal**

Les expériences ont été réalisées sur des fèves de cacao préalablement fermentées. La récolte a eu lieu pendant la deuxième campagne 2006-2007 (Avril 07 à Août 07) et dans la première campagne 2007-2008 (Octobre 07 à Janvier 08) à Toumbokro.

- **Préparation du matériel végétal**

La campagne cacaoyère débute en Octobre et s'achève fin Septembre de l'année suivante. Cependant, en fonction des périodes de récolte dans l'année, la campagne est subdivisée en deux traites ou "sous campagnes" : une grande campagne (Octobre à Mars) et une campagne intermédiaire (Avril à Septembre). Dans ce travail, en moyenne deux récoltes ont été effectuées chaque mois pendant les différentes campagnes (Annexe 1). Après écabossage en plantation, les fèves sont mises en fermentation pendant 6 jours. Après la fermentation, un échantillon de 30 kg de fèves en moyenne est prélevé aléatoirement et trié pour éliminer toutes les fèves présentant des défauts. Les fèves ont été ensuite ensachées et stockées dans une chambre froide à une température comprise entre 0 et 5 °C. Dans ces conditions, avant chaque période d'essai de séchage, il a été nécessaire d'attendre au moins 30 min pour amener le contenu du sachet, toujours fermé, à la température ambiante (**Augier, 1999**).

2.1.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Deux types de dispositifs de séchage ont été utilisés pour cette étude : les dispositifs de séchage à l'air libre et un dispositif de séchage solaire direct.

2.1.2.1 Dispositifs de séchage à l'air libre

Il s'est agi des supports sur lesquels ont été exposées au soleil les fèves de cacao durant les essais de séchage. Ils sont au nombre de cinq :

- **la claie** ; elle est constituée de plusieurs tiges de bois de 1,5 à 2 cm d'épaisseur et parallèles entre elles de sorte à ménager des espaces de 0,2 à 0,3 cm. La surface de la claie est de 1 m² surélevée de 80 cm du sol sur quatre pieds en bois ;

- **la tôle** ; elle est métallique de couleur grise, de surface 1 m² et posée directement au sol ;
- **la bâche** ; elle est en plastique polyéthylène de couleur noire, de surface 1 m² et posée à même le sol ;
- **l'aire cimentée** ; elle est confectionnée en dalle de ciment de surface 1 m² ;
- **le bitume** ; il est situé à proximité du site d'expérimentation non loin des quatre autres aires de séchage sur le trottoir.

2.1.2.2 Dispositif de séchage solaire direct

Il s'est agi d'une serre expérimentale (Figure II.1). A l'intérieur de la serre, les fèves ont été exposées sur une claie. Le séchoir utilisé était un ensemble de six serres accolées trois par trois de sorte à ménager une allée dans la direction Nord-Sud. Seule une serre a été utilisée. Celle-ci a respecté les recommandations concernant l'orientation des serres isolées. Le grand axe de la serre était parallèle à la direction Est-Ouest.

Les parois latérales et les capteurs étaient en verre à l'exception de la surface Ouest qui est en plastique transparent. L'inclinaison des capteurs est de 30 degrés par rapport à l'horizontale et est restée perpendiculaire aux rayons incidents.



Figure II.1 : Serre expérimentale

2.2 METHODES

Ce chapitre fournit de façon concise les détails relatifs aux méthodes intervenant dans la résolution des problèmes suscités au cours de cette étude. Les différents outils statistiques utilisés pour l'évaluation des différentes modélisations effectuées y sont présentés.

2.2.1 ACIDITES DES FEVES DE CACAO

Les méthodes d'analyse chimique effectuées ont été celles pratiquées au Laboratoire de Chimie et de Technologie du Cacao du CIRAD à Montpellier (Augier, 1999). Les analyses ont porté essentiellement sur la détermination de la teneur en acidité totale, en acidité volatile, en acide gras libre et sur le pH du matériel végétal séché.

A la fin de chaque essai de séchage, caractérisée par une teneur en eau des fèves inférieure à 8 % base sèche, les fèves ont été broyées pendant 120 s dans un broyeur IKA (Universalmu M20, Allemagne) à circulation d'eau afin d'éviter tout échauffement et toute évaporation pendant l'opération.

2.2.1.1 Détermination de l'acidité totale

L'acidité totale a été faite par suivi pH-métrique de 5 g de poudre de cacao dans 50 ml d'eau distillée bouillie et refroidie. Le dosage a été fait avec une solution fraîche de soude 0,1 N jusqu'à pH égal à 8,3.

L'acidité totale (*AcT*) a été exprimée en ml de soude par g de poudre de cacao selon la relation suivante:

$$AcT = \frac{\text{Volume en ml de NaOH}}{\text{Poids en g de poudre de cacao}} \quad (2.1)$$

2.2.1.2 Détermination du pH

Pour la mesure du pH, la préparation a été faite pour 10 g de poudre de cacao dans 90 ml d'eau distillée bouillante homogénéisée puis refroidie jusqu'à 25°C. Un pH-mètre Schott Grerate(Allemagne) étalonné à pH 4 et 7 a permis la détermination du pH de la solution placée sur un agitateur magnétique. L'erreur absolue sur la mesure du pH a été de 0,05 ;

2.2.1.3 Détermination de l'acidité Volatile

Pour la mesure de l'acidité volatile, un (1) g de poudre de cacao à 0,001 g a été introduit dans un ballon à fond rond de 500 ml avec ajout de 2 à 3 gouttes d'acide sulfurique fumant. Après ajout de 400 ml d'eau distillée, le ballon a été placé dans un chauffe ballon Electrothermal (MK1) puis ajusté sous un extracteur. Une colonne de distillation-réfrigérant a été placée à la partie haute de l'extracteur. Un erlenmeyer de 500 ml, contenant 50 ml d'eau distillée a été placé, à la sortie du réfrigérant.

Le ballon à fond rond a été chauffé jusqu'à l'obtention d'environ 300 ml de distillat dans l'erlenmeyer. L'extraction a pu prendre environ 90 min. Le distillat a été dosé, en présence de phénol phtaléine, avec une solution fraîche de soude 0,10 N placée dans une microburette de 2 ml (précision 0,01 ml).

L'acidité Volatile (AcV) a été exprimée en ml de soude par g de poudre de cacao selon la relation:

$$AcV = \frac{\text{Volume en ml de NaOH}}{\text{Poids en g de poudre de cacao}} \quad (2.2)$$

2.2.1.4 Détermination de la teneur en acide gras libre

La détermination de la teneur en acide gras libre, a consisté dans un premier temps à l'extraction du beurre de cacao au soxhlet à l'hexane pendant 8 h, et à prélever 5 g de ce beurre à 10^{-3} g près. A cette quantité sont ajoutés 100 ml d'alcool à 95% préalablement neutralisé avec la soude 0,1 N en présence de phénophtaléine. Puis, dans un deuxième temps, une solution alcoolique de potasse (0,5 g/l) a été préparée. Le dosage de la solution de beurre obtenue a été fait sous agitation permanente, en versant goutte à goutte la solution de potasse alcoolique déjà titrée et contenue dans une microburette. L'arrêt du dosage a été marqué par un virage au rose de la solution de beurre.

La teneur en acides gras libres (AGL) représentée par le seul acide oléique ($C_{17}H_{33}CO_2H$) a été exprimée en pourcentage d'acide gras libre par gramme de matière grasse selon la relation suivante:

$$AGL = \frac{\text{Volume en ml de KOH} \times N_{KOH} \times 282}{\text{masse de beurre}} \quad (2.3)$$

Masse molaire de l'acide oléique = 282 g / mol

2.2.2 CARACTERISTIQUES DE L'AIR DE SECHAGE

Le processus de séchage a été suivi par la mesure de certains paramètres pertinents de l'air (ou paramètres aérothermiques) que sont la température ; l'humidité relative et la vitesse de l'air.

2.2.2.1 Détermination des températures et de l'humidité relative

Pendant le séchage, il a été nécessaire de suivre la température sèche et l'humidité relative de l'environnement de séchage par un psychromètre à deux thermomètres gradués au 1/10. L'un des thermomètres indique la température sèche (T_s). L'autre, dont le bulbe est entouré d'une mèche constamment humide, indique la température humide (T_h). Son bulbe doit être à l'ombre et placé dans un courant d'air à une vitesse supérieure à 2 m/s. Dans le cas contraire la mesure est mauvaise. L'erreur absolue sur les mesures de températures faites a été de 0,5 °C.

L'humidité relative est obtenue à partir de la différence entre T_s et T_h et à l'aide d'un diagramme de l'air humide (Annexe 2) ou de la table psychrométrique.

2.2.2.2 Détermination de la vitesse de l'air

La mesure des différentes vitesses de l'air sur le site a été faite à l'aide d'un anémomètre à fil chaud à sonde discrète portable. La méthode a consisté à maintenir la sonde de façon perpendiculaire au courant d'air afin de réaliser les mesures. La gamme théorique de vitesse de l'anémomètre a été de 0,05 à 30 m/s (Koua, 2007). L'erreur absolue sur les mesures faites a été de 0,01 m/s.

2.2.3 CARACTERISTIQUES DES FEVES DE CACAO

Les propriétés thermodynamiques des fèves prises en compte dans la modélisation ont été les isothermes de désorption et la chaleur de désorption des fèves de cacao.

2.2.3.1 Détermination des isothermes de désorption

2.2.3.1.1 Principe de détermination des isothermes

La teneur en eau d'un produit humide placé dans une ambiance atmosphérique à humidité relative maintenue constante, évolue vers un équilibre hygroscopique. L'équilibre est atteint lorsqu'il n'y a plus d'évolution de masse du produit : l'humidité relative de l'air est alors identique à l'activité de l'eau du produit.

La relation d'équilibre, traduite par l'isotherme de désorption, est habituellement décrite par une courbe rapportant la teneur en eau d'équilibre X_{eq} du produit étudié en fonction de l'humidité relative HR de l'atmosphère qui l'entoure (**Talla et al., 2001 ; Jannot, 2003 ; Daguinet, 1985**).

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

Avec

P_v Pression de vapeur d'eau à la surface du produit (Pa) ;

P_{vs} Pression de vapeur de l'eau pure à la température (Ta) en surface du produit (Pa) ;

Ta Température de l'air (°C).

La méthode utilisée pour déterminer les isothermes a été la méthode gravimétrique.

2.2.3.1.2 Principe de la méthode gravimétrique

Il s'agit de mesurer la masse d'un échantillon du produit en contrôlant la température et l'humidité relative de l'enceinte gazeuse. La pesée peut être effectuée en continue. Deux techniques sont généralement utilisées pour le contrôle de l'humidité relative : la technique dite chimique et celle dite physique.

La plus répandue en laboratoire de la *méthode chimique*, et qui a été utilisée pour ce travail, est celle dite des bocaux (Figure II.1). Le produit est placé dans un bocal étanche à l'intérieur duquel une solution saline saturée en sel (ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixée) maintient une humidité relative constante. La température du bocal est maintenue constante en plaçant celui-ci dans une enceinte thermostatée. Cette méthode est très longue : l'équilibre air-produit n'est parfois atteint qu'après plusieurs semaines. Elle ne convient donc pas à la détermination des points de l'isotherme correspondant aux valeurs élevées de l'humidité relative pour les produits biologiques qui subiraient des dégradations dues aux moisissures avant que l'équilibre ne soit atteint (**Jannot, 2003**).

La *méthode physique* contrôle la pression partielle de vapeur d'eau en travaillant dans une ambiance de vapeur d'eau pure et d'air humide (**Jannot, 2003**).

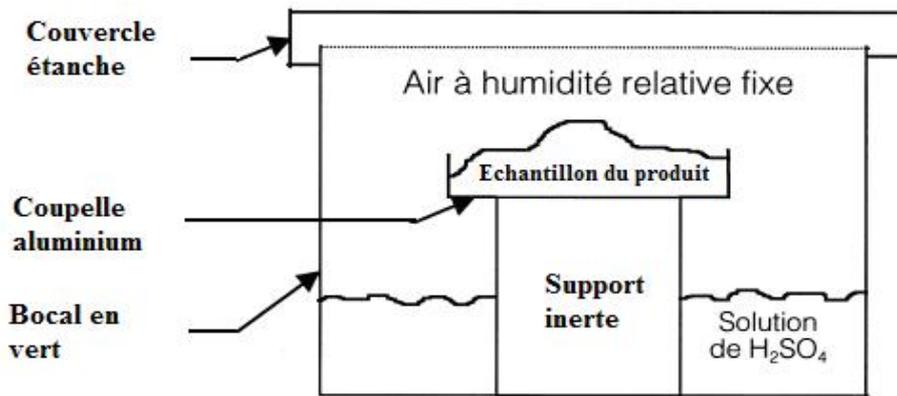


Figure II.2 : Schéma du dispositif expérimental de détermination des isothermes de Désorption (Noumi *et al.*, 2002)

2.2.3.1.3. Mode opératoire

Lors de cette expérience, des échantillons de 25 g de fèves de cacao fermentées, placés dans des coupelles (figure II.2) préalablement tarées, ont été posés chacun dans un bocal à différentes concentrations d'acide sulfurique (Tableau II.1). Les bocaux ont été ensuite fermés hermétiquement et introduits dans une étuve de température maintenue fixe. L'ensemble coupelle + échantillon a été pesé régulièrement jusqu'à ce que la masse ne varie plus. Pour éviter de perturber le phénomène de mise en équilibre, l'ensemble coupelle + échantillon n'a été sorti qu'une seule fois tous les deux à trois jours pour la pesée qui ne durait pas plus de quatre (4) secondes (Noumi *et al.*, 2002). Une fois la masse a été stable, l'équilibre est alors établi entre la teneur en eau du produit et l'ambiance de l'enceinte du bocal. On a ainsi obtenu un point de la courbe de désorption à la température fixée. La courbe de l'isotherme de désorption des fèves de cacao a été déterminée avec plusieurs points d'équilibre.

Dans cette étude, la disponibilité du matériel n'a permis que l'obtention de sept (7) points d'équilibre pour chaque isotherme entre 10 et 90 % d'humidité relative (Tableau II.1). Trois niveaux de température (30 ; 40 et 60 °C) ont été utilisés pour la réalisation des isothermes. Ces températures ont été choisies afin de pouvoir estimer les teneurs en eau d'équilibre de désorption des fèves de cacao fermentées dans une gamme de températures plus étendue. Les températures 30 °C et 40 °C servent de limites de

températures du séchage à l'air libre tandis que sous serre, les températures enregistrées sont comprises entre 30 °C et 60 °C.

Après équilibre, la masse anhydre du produit a été déterminée en plaçant les échantillons dans une enceinte de dessiccation à 105 °C pendant 24 h (Augier, 1999 ; Talla *et al.*, 2001 ; Touati, 2008). Puis, les différentes teneurs en eau ont été déterminées en base sèche selon la relation utilisée par Talla *et al.* (2001):

$$X_i = 100 \left(\frac{m_i}{m_s} - 1 \right) \quad \text{et} \quad X = \frac{m}{m_i} (X_i + 100) - 100 \quad (2.5)$$

Avec

m_i masse du produit à l'instant initial (kg) ;

m masse du produit à l'instant t (kg) ;

m_s masse anhydre du produit (kg) ;

X_i teneur en eau du produit en base sèche à l'instant initial (% kg eau / kg ms) ;

X teneur en eau du produit en base sèche à l'instant t (% kg eau / kg ms).

Tableau II.1 : Valeurs des humidités relatives (HR) des différentes teneurs d'acide sulfurique utilisées pour la détermination des courbes de désorption

Teneur en H_2SO_4 (%)	HR (%)		
	30 °C	40 °C	60 °C
65,47	9	10	12
58,03	21	21	24
48,12	41	41	43
38,23	61	61	63
29,90	76	76	76
22,98	85	85	85
11,60	95	95	95

2.2.3.2 Détermination de la chaleur isostérique nette de désorption

La méthode utilisée couramment pour la détermination de la chaleur de désorption (Q_{st}) résulte de l'application de l'équation de Clausius-Clapeyron (Equation 2.6) qui n'est valable que pour des teneurs en eau constantes (Derdour, 1998 ; Do Amaral *et al.*, 1999 ; Noumi *et al.*, 2004 ; Ferradji *et al.*, 2005 ; Touati, 2008):

$$Q_{st} = -R \left(\frac{\partial \ln(A_w)}{\partial (1/T)} \right) \quad (2.6)$$

avec

A_w activité de l'eau ;

Q_{st} chaleur isostérique nette de désorption (kJ/mol) ;

R constante des gaz parfaits (kJ/mol K) ;

T température absolue de l'air (K).

Dans la pratique, à une teneur en eau d'équilibre donnée, pour déterminer la chaleur de désorption (Q_{st}), les correspondances entre les activités de l'eau (A_w) et les températures (T) ont été établies sur chaque isotherme à 30 ; 40 et 60°C. Puis, la courbe $\ln(A_w)$ en fonction de $(1/T)$ a été tracée pour cette teneur en eau d'équilibre. Cette courbe réalisée à une même teneur en eau est appelée isostère ou courbe isostérique. Dans cette étude, sept (7) courbes isostériques ont été construites en raison des sept (7) points d'équilibre utilisées dans la réalisation des isothermes.

De la pente des isostères et pour chaque teneur en eau (X_{eq}), on a pu d'abord déduire la chaleur isostérique (Q_{st}) correspondante par analogie à l'équation de Clausius-Clapeyron (Equation 2.6) et ensuite tracer la courbe $Q_{st} = f(X_{eq})$.

Les chaleurs isostériques de désorption (Q_{st}) de l'eau des fèves de cacao fermentées ont été corrélées avec les teneurs en eau d'équilibre (X_{eq}) du produit par une relation empirique proposée par Noumi *et al.* (2002) :

$$Q_{st} = C + B \exp(AX_{eq}) \quad (2.7)$$

Les coefficients A , B et C de cette équation ont été déterminés par ajustement de celle-ci aux valeurs expérimentales de la chaleur isostérique de désorption (Q_{st}).

2.2.4. DETERMINATION DES COURBES DE CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

En raison de 21 essais par dispositif, c'est au total 126 essais de séchage qui ont été effectués durant la petite campagne 2006-2007 et la grande campagne 2007-2008.

Pour la détermination des courbes de perte d'humidité X , des pesées m ont été effectuées, chaque heure, durant toute l'opération de l'essai de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse m du produit (ce qui correspond en général à une teneur en eau des fèves environ de 8 % kg eau / kg ms (**Nganhou et Nganya, 2003**)). L'humidité initiale X_i est déduite à la fin de l'opération de séchage après détermination de la masse anhydre du produit final.

La charge moyenne des fèves par unité de surface a été de 20 kg/m². Cependant pour faciliter la pesée, les fèves ont été regroupées par quantité de 0,226 kg sur une surface délimitée par des nacelles de 113 cm². L'acquisition des données expérimentales sur la masse des fèves de cacao a permis de représenter la courbe donnant la perte de masse en fonction du temps (t). Cependant, on utilise généralement la teneur en eau X (calculée à partir de l'Equation 2.5) du produit sur base sèche et non la masse, pour représenter les courbes de cinétique de séchage. Selon l'usage, ces données ont été transformées afin de tracer soit la courbe de vitesse de séchage, soit la courbe dite de Krisher (**Kemp et al., 2001**) selon que la vitesse de séchage ($-dX/dt$) a été représentée en fonction du temps t ou de la teneur en eau X sur base sèche.

En pratique, la courbe $X = f(t)$ obtenue expérimentalement est celle qui contient plus d'informations. La courbe de vitesse de séchage (Equation 2.8) peut s'obtenir en calculant cette dérivée après lissage de la courbe $X = f(t)$ ou directement à partir des points expérimentaux :

$$-\frac{dX}{dt} = f(X) \quad (2.8)$$

Dans ce travail, il a été procédé chaque fois à un ajustement de cinq (5) points de la courbe $X = f(t)$ par un polynôme d'ordre 2 (**Talla et al., 2001 ; Haoua, 2007**). La vitesse de séchage au point médian a été ensuite obtenue par dérivation de ce polynôme.

2.2.5 DETERMINATION DES MODELES DE COURBE CARACTERISTIQUE DE SECHAGE

La courbe caractéristique de séchage (C.C.S) est importante pour décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelles conditions de l'air connaissant les valeurs initiales de la teneur en eau et la teneur en eau d'équilibre (**Noumi et al., 2002**).

Le principe de la courbe caractéristique de séchage est de réduire l'ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir les mettre sous une forme utilisable non seulement par l'expérimentateur lui-même, mais aussi par l'ensemble de la communauté scientifique (**Van Meel, 1958**).

La démarche suivie pour réaliser une C.C.S, consiste à représenter dans les mêmes conditions de l'air une normalisation (ou réduction) de la vitesse de séchage $(-dX/dt)$ par la vitesse de la première phase $(-dX/dt)_1$ en fonction de la teneur en eau réduite X_r (**Kechaou, 2000 ; Kouhila, 2001**). Par conséquent, les cinétiques de séchage sont représentées sous forme adimensionnelle (**Belahmidi et al., 1993**) :

$$\frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1} = f(X_r) \quad (2.9)$$

La fonction $f(X_r)$ ou V_r est la vitesse réduite de séchage (ou vitesse de séchage normée). X_r représente la teneur en eau réduite définie par :

$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad (2.10)$$

avec

X_{cr} Teneur en eau (% kg eau/ kg ms) marquant la transition de la phase de séchage à vitesse constante et celle à vitesse décroissante ; c'est la teneur en eau critique à identifier à partir des résultats expérimentaux ;

$X_{eq}(T, HR)$ Teneur en eau d'équilibre (% kg eau/ kg ms) déduite de l'isotherme de désorption à la température T et à l'humidité relative HR de l'air de séchage ;

$(-dX/dt)_1$ Vitesse de la première phase de séchage (% kg eau/ kg ms.h),
 qui peut être déduite théoriquement ou mesurée sur la courbe
 expérimentale donnée par l'équation 2.8 (**Talla et al. 2001** ,
Noumi et al., 2004 ; Haoua, 2007 ; Touati, 2008).

On impose arbitrairement une expression mathématique à la fonction $f(X_r)$;
 cette fonction doit vérifier les propriétés suivantes (**Kouhila ,2001 ; Ahouannou., 2001**
Haoua, 2007 ; Touati, 2008) :

$$f(X_r) = 0 \text{ pour } X_r = 0 \text{ et } f(X_r) = 1 \text{ pour } X_r = 1$$

$$0 \leq f(X_r) \leq 1 \text{ pour } 0 \leq X_r \leq 1.$$

En général, il est envisagé les fonctions de type polynomial d'ordre 3 (**Koua, 2007, Haoua, 2007 ; Touati, 2008**) ou les fonctions puissances (**Noumi et al., 2004 ; Talla et al., 2001**) pour représenter les courbes caractéristiques de séchage des produits agricoles. Dans ce travail, les fonctions polynomiales utilisées par Koua (**2007**), Haoua (**2007**) et Touati (**2008**) ont été retenues:

$$f(X_r) = A_1 X_r + A_2 X_r^2 + A_3 X_r^3 \quad (2.11)$$

La vitesse de séchage a été alors simulée par la relation :

$$-\frac{dX}{dt} = \left(-\frac{dX}{dt} \right)_1 (A_1 X_r + A_2 X_r^2 + A_3 X_r^3) \quad (2.12)$$

Avec A_1, A_2 et A_3 des coefficients à identifier à partir des résultats expérimentaux.

- **Détermination de la teneur en eau critique**

La teneur en eau critique X_{cr} est la teneur en eau de transition entre la phase à vitesse constante et la phase à allure décroissante. Elle est généralement fonction des conditions de séchage. Dans le cas des produits biologiques, plusieurs auteurs (**Fornel, 1979 ; Desmorieux et Moyne, 1992 ; Belahmidi et al., 1993**), relèvent qu'il est difficile de localiser une première phase de séchage et identifient la teneur en eau critique X_{cr} à la teneur en eau initiale X_i .

- **Détermination de la vitesse de la première phase de séchage**

La vitesse de la première phase de séchage $(-dX/dt)_1$ est prise au point $X_r = 1$. Cette vitesse peut être déterminée en utilisant une corrélation qui inclut les conditions aérodynamiques externes et prenant en compte le caractère déformable des produits biologiques ou en utilisant l'analogie des transferts de chaleur et de la masse à travers la couche limite d'une surface totalement mouillée (Talla *et al.*, 2001). Dans ce travail, la vitesse de la première phase de séchage a été identifiée graphiquement à la vitesse initiale de séchage de la courbe $X = f(t)$ en calculant la dérivée pour $t=0$ (Noumi *et al.*, 2004 ; Touati, 2008).

- **Identification d'une courbe caractéristique de séchage**

La courbe de vitesse de séchage réduite a été déterminée sous la forme polynomiale (Equation 2.9) après avoir effectué plusieurs essais. Dans cette étude, on a supposé, durant l'essai, les caractéristiques de l'air ambiant constantes et représentées par des valeurs moyennes. La courbe caractéristique a été déterminée à partir des essais obtenus sur le dispositif claie à l'air libre et sous une serre expérimentale.

Pour chaque essai, les coefficients A_i de la fonction polynôme $f(X_r)$, ajustées aux valeurs expérimentales $\left(-\frac{dX}{dt}\right) / \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$ ont été déterminés. La valeur moyenne des coefficients A_i pour l'ensemble des essais a été ensuite calculée par la relation:

$$A_i = \frac{1}{p} \sum_j^p A_{ij} \quad \text{avec } 1 \leq i \leq 3 \quad (2.13)$$

Avec :

- p nombre d'essai;
- j numéro de l'essai;
- A_i coefficients des fonctions $f(X_r)$.

2.2.6 DETERMINATION DES MODELES EMPIRIQUES

La détermination des modèles a consisté à établir une corrélation qui donne directement l'évolution de la teneur en eau réduite X_r des fèves de cacao en fonction du temps (Sokhansanj et Cenkowski, 1989 ; Lopez *et al.*, 2000 ; Lashani *et al.*, 2002).

Plusieurs modèles ont été expérimentés et publiés (Tableau II.2). Pour la modélisation mathématique en couche mince des fèves de cacao, ces équations de séchage ont été examinées pour choisir le meilleur modèle qui décrit au mieux la courbe de séchage dans les conditions expérimentales étudiées.

Tableau II.2 Modèles mathématiques donnés par différents auteurs pour les courbes de séchage

N° du modèle	Equation du modèle	Nom	Références
1	$X_r = \exp(-kt)$	Newton	O'Callaghan, Menzies et Bailey (1971) ; Liu et Bakker-Arkema (1977)
2	$X_r = \exp(-kt^n)$	Page	Zhang et Litchfield (1991); Agrawal et Singh (1977)
3	$X_r = \exp(-(kt)^n)$	Page modifié I	Overhults, White, Hamilton et Ross (1973); White, Ross et Ponekert(1981)
4	$X_r = a \exp(-kt)$	Henderson et Pabis	Westerman, White et Ross (1973); Chminman (1984)
5	$X_r = a \exp(-kt) + c$	Logarithmique	Yagcioglu, Degirmencioglu et Cagatay (1999)
6	$X_r = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Deux termes	Henderson (1974); Rahman, Perera et Theband (1998)
7	$X_r = 1 + at + bt^2$	Wang et Singh	Wang et Singh (1978)
8	$t = a \ln X_r + b(\ln X_r)^2$	Thomson	Paulsen et Thomson (1973); Thomson, Peart et Foster (1968)
9	$X_r = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Approche de Diffusion	Kassem (1998)
10	$X_r = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Verma	Verma, Bucklin, Endan et Wratten (1985) Karathanos (1999)
11	$X_r = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Henderson et Pabis modifié	Karathanos (1999)
12	$X_r = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Deux termes exponentiel	Sharaf- Elden, Blaisdell et Hamdy (1980)
13	$X_r = a \exp(-c(t/L^2))$	Equation simplifiée de diffusion de Fick	Diamante et Munro (1991)
14	$X_r = \exp(-k(t/L^2)^n)$	Page modifié II	Diamante et Munro (1991)

Les coefficients phénoménologiques intervenant dans ces équations sont déterminés par ajustement de celles-ci aux valeurs expérimentales de la teneur en eau réduite X_r .

Dans cette étude, les relations entre les constantes du meilleur modèle approprié et les paramètres aérothermiques ont été également déterminés par la technique de régression multiple (Yaldiz et Ertekin, 2001; Akpınar *et al.*, 2003 ; Togrul et Pehlivan, 2003; Ertekin et Yaldiz, 2004 ; Erenturk *et al.*, 2004; Gunhan *et al.*, 2005 ; Simal *et al.*, 2005a ; Simal *et al.*, 2005b).

2.2.7 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE DIFFUSION

Le mécanisme de transport de l'eau à l'intérieur de la fève est la diffusion (Augier, 1999) comme dans la plupart des produits biologiques. Les données expérimentales de séchage pour la détermination des coefficients de diffusion ont été interprétées en employant la deuxième loi de diffusion de Fick :

$$\frac{dX}{dt} = D \frac{d^2 X}{dx^2} \quad (2.14)$$

Pour résoudre l'équation 2.14, on a supposé que la concentration initiale en humidité est uniforme, et la résistance externe de transfert de masse en phase gazeuse a été négligeable, c'est à dire, le mouvement d'humidité est commandé par la résistance interne, et la concentration à la surface externe n'a pas varié dans le temps. Dans ces conditions, des solutions analytiques de l'équation 2.14 pour une fève de cacao assimilée à une plaque infinie sont données dans la littérature (Crank, 1975) comme suit :

$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{f^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)^2} \exp\left[-\frac{(2k-1)^2 f^2 Dt}{4L^2}\right] \quad (2.15)$$

Pendant des temps de séchage suffisamment longs, seulement le premier terme pour $k=1$ dans l'équation 2.15 a été employé avec une petite erreur (Inci , 2003 ; Akpınar *et al.*, 2006; Hayaloglu *et al.*, 2007)

La diffusivité de l'humidité a été calculée par l'équation 2.15, en utilisant des pentes dérivées de la régression linéaire $\ln(X_r)$ en fonction des données de temps t (To rul et Pehlivan, 2003 ; Karim et Hawlader, 2005 ; Jannot , 2006.).

2.2.8 ANALYSE STATISTIQUE

Les analyses de variances (ANOVA) ont été réalisées au seuil de 5 % pour comparer l'acidité des fèves issues des différents dispositifs de séchage à l'air libre.

Modéliser le comportement au séchage de différents produits agricoles exige souvent les méthodes statistiques d'analyse de régression et de corrélation.

L'analyse de la régression a été exécutée en utilisant le logiciel Matlab R2007b et Microsoft Excel 2003. Le coefficient de corrélation (r) a été le premier critère de sélection de la meilleure équation pour décrire la courbe de séchage (**Inci et Dursun, 2003**). En plus du r , les calculs des valeurs du t^2 et du $RMSE$ ont été employés pour justifier le choix du modèle. Plus les valeurs du r sont élevées, et les valeurs de t^2 et du $RMSE$ plus basses, plus le modèle est meilleur (**Yaldiz et Ertekin, 2001; Akpinar et al., 2003; Doymaz et al., 2004; Gunhan et al., 2005; Sacilik et Elicin, 2005**). Ces paramètres statistiques peuvent être calculés comme suit:

$$r = \frac{\text{cov}(X_{r \text{ exp}, i}; X_{r \text{ pre}, i})}{s_{r \text{ exp}, i} \times s_{r \text{ pre}, i}} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{r \text{ exp}, i} - \bar{X}_{r \text{ exp}, i})(X_{r \text{ pre}, i} - \bar{X}_{r \text{ pre}, i}) / N}{s_{r \text{ exp}, i} \times s_{r \text{ pre}, i}} \quad (2.16)$$

$$t^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{r \text{ exp}, i} - X_{r \text{ pre}, i})^2}{N - n} \quad (2.17)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{r \text{ exp}, i} - X_{r \text{ pre}, i})^2 \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

Avec :

- r : Coefficient de corrélation ;
- $\text{cov}(X_{r \text{ exp}, i}; X_{r \text{ pre}, i})$: Covariance de $X_{r \text{ exp}, i}$ et $X_{r \text{ pre}, i}$;
- $X_{r \text{ exp}, i}$: Teneur en eau réduite expérimentale pour la i ème observation ;
- $X_{r \text{ pre}, i}$: Teneur en eau réduite prédite pour la i ème observation ;
- t^2 : khi deux ;
- $RMSE$: Racine carrée de la moyenne de la somme des carrés des écarts entre $X_{r \text{ exp}, i}$ et $X_{r \text{ pre}, i}$
- N : Nombre d'observations ;
- n : Nombre de coefficients dans le modèle.

La validation du modèle a été faite en deux étapes successives :

1. *Qualité de l'ajustement*

La qualité de l'ajustement, c'est-à-dire la confrontation des résultats expérimentaux $X_{r\text{exp},i}$ et des résultats prédits $X_{r\text{pre},i}$ (ou calculés ou théoriques), a été appréciée graphiquement par une bonne distribution des couples de résultats ($X_{r\text{exp},i}$; $X_{r\text{pre},i}$) autour de la première bissectrice.

2. *Bonne simulation numérique*

La bonne simulation numérique de cas réels d'essai de séchage n'ayant pas participé à la construction de modèle a été effectuée. Le critère utilisé pour évaluer la fiabilité de la simulation a été l'erreur relative moyenne de déviation E(%) enregistrée sur l'évolution de la teneur en eau entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques. Cette erreur, rencontrée dans la littérature (**Ahouannou et al., 2000 ; Kaymak et Sultanoglu , 2001 ; Kouhila et al., 2002 ; Noumi et al., 2004 ; Lamharrar et al., 2007**), est calculée de la manière suivante :

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{r\text{exp},i} - X_{r\text{pre},i}|}{X_{r\text{exp},i}}. \quad (2.19)$$

La modélisation des courbes de cinétique de séchage des fèves de cacao a été effectuée pour deux modes de séchage :

- le séchage à l'air libre sur claie, généralement utilisé dans le monde agricole. La modélisation relative aux autres dispositifs se déduit par analogie ;
- le séchage sous serre, mal connu par les agriculteurs.

II-RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 INFLUENCES DES DISPOSITIFS DE SECHAGE A L'AIR LIBRE SUR L'ACIDITE DES FEVES

Cette partie du travail évalue l'influence des dispositifs de séchage à l'air libre sur la qualité du cacao bord champ en particulier au niveau de son acidité.

3.1.1 ACIDITE TOTALE

L'acidité totale est inégalement répartie dans les compartiments (coque et amande) des fèves de cacao analysées. Quelque soit le dispositif de séchage à l'air libre, l'acidité totale de l'amande est plus élevée que celle de la coque (Figure III.1)

L'analyse de variance (ANOVA), pour les types d'acidité étudiée, montre qu'entre les dispositifs, il n'y a pas de différence significative au niveau des acidités totales de l'amande de cacao avec un risque de 5 % (Tableau III.1). Le dispositif de séchage solaire n'influence pas l'acidité totale de la fève.

3.1.2 pH

Contrairement à l'acidité totale, le pH des fèves de cacao est plus élevé dans la coque que dans l'amande.

Le F de Fisher calculé (0,244) est inférieur à F critique (3,055) (Tableau III.1), il n'existe donc pas de différence significative au niveau du pH des amandes. Le dispositif de séchage à l'air libre n'influence pas le pH.

3.1.3 ACIDITE VOLATILE

La teneur en acide volatil varie aussi bien au cours des périodes de séchage que d'un dispositif à un autre (Figure III.3).

Le test de l'ANOVA relatif à l'acidité volatile (tableau III.1), présente un F de Fisher (0.314) qui n'est pas significatif. Les dispositifs de séchage n'ont pas d'effet significatif sur l'acidité volatile des amandes de cacao. Cependant, il faut noter qu'au cours des essais, des valeurs relativement élevées de l'acidité volatile ont été enregistrées pour les dispositifs Bitume ($1,42 \pm 0,32$), Bâche ($1,35 \pm 0,30$) ; Tôle ($1,35 \pm 0,25$) et Serre ($1,32 \pm 0,25$) contrairement aux dispositifs Claire ($1,22 \pm 0,18$) et Aire cimentée ($1,28 \pm 0,30$). Toutefois, ces résultats satisfont la norme comprise entre 1,0 et 1,50 ml de Soude 0,1 N par gramme de cacao.

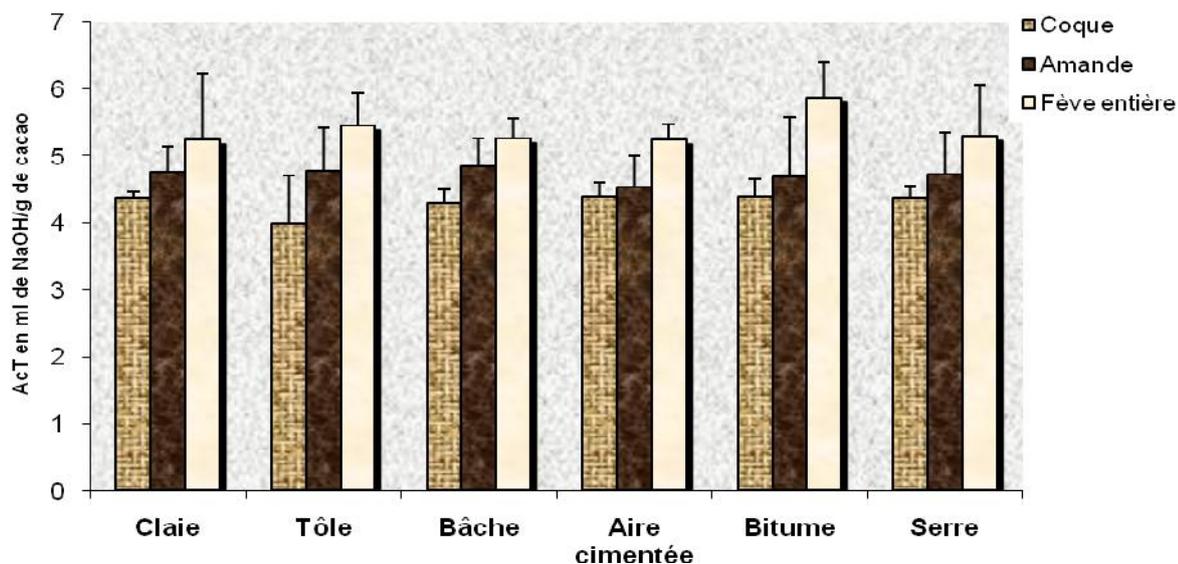


Figure III.1: Distribution de l'acidité totale (Act) dans la fève de cacao (Période de juillet)

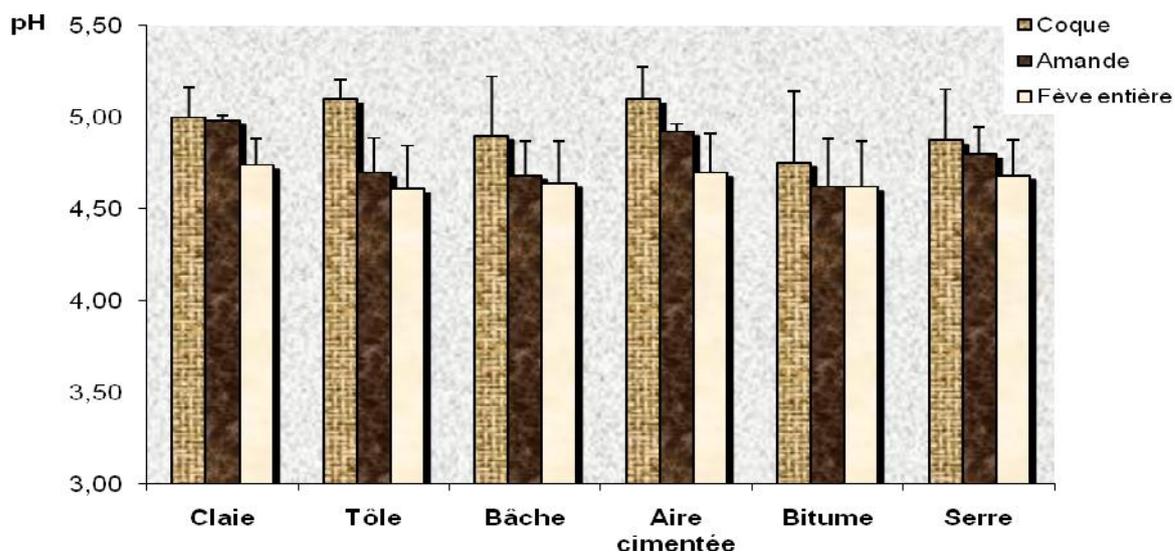


Figure III.2: Distribution du pH dans la fève de cacao (Période de juillet)

Tableau III.1: Table de l'ANOVA sur les types d'acidité de fèves séchées à l'air libre

TYPES D'ACIDITE	F calculé	Probabilité	F critique
Acidité totale	0,112	0,976	
pH	0,244	0,908	3,055
Acidité Volatile	0,314	0,864	
AGL	2,925	0,057	

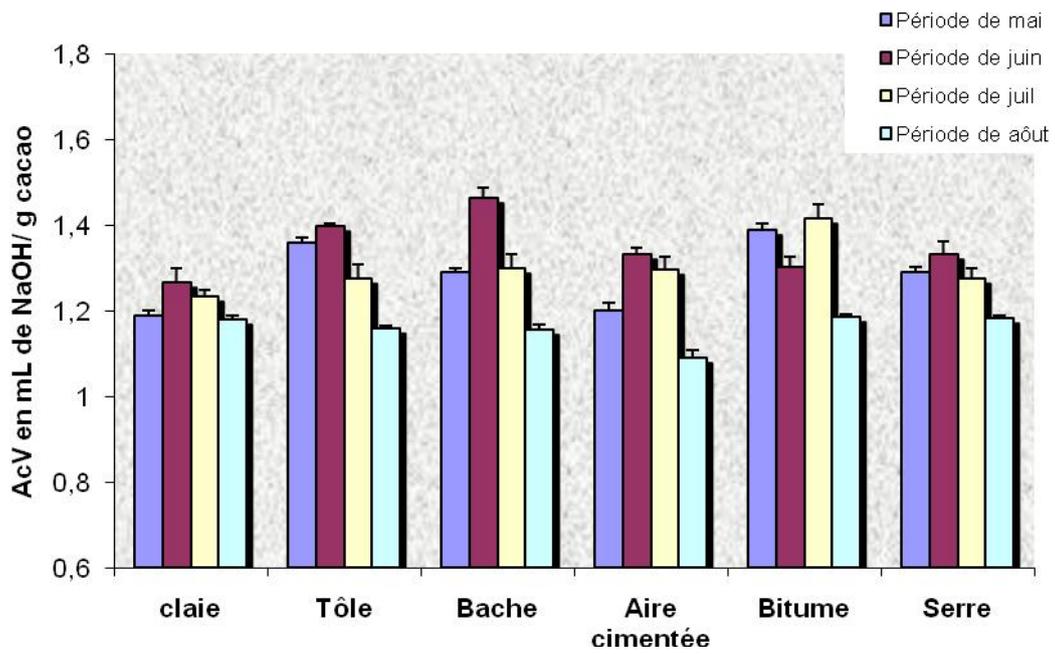


Figure III.3: Teneur en acide volatil (AcV) des amandes de fèves de cacao

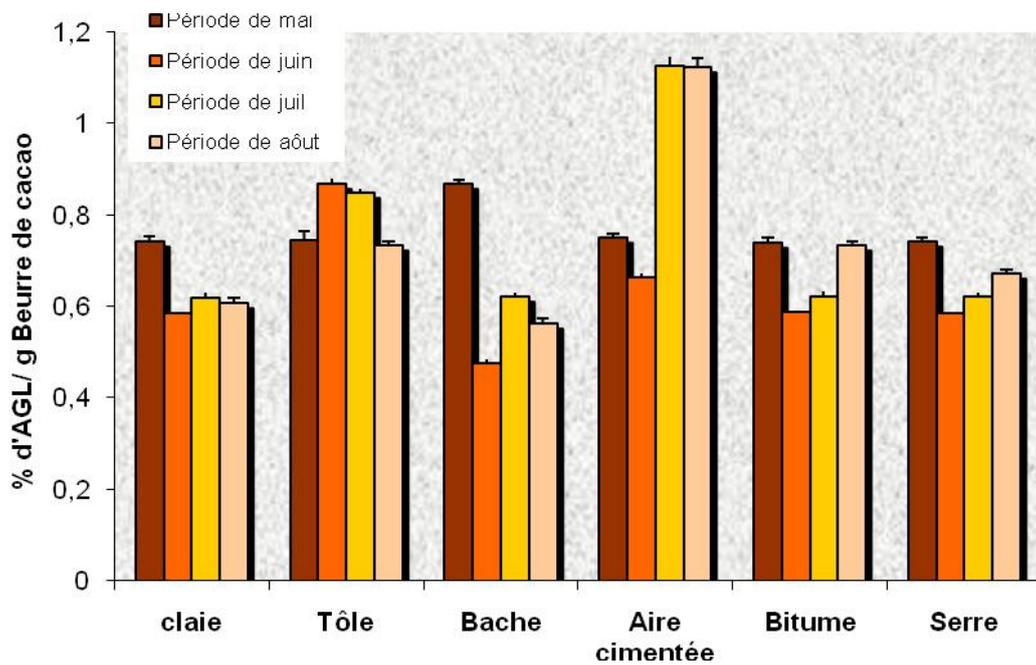


Figure III.4: Teneur en acide gras libre (AGL) des amandes de fèves de cacao

3.1.4 ACIDE GRAS LIBRE

La teneur en acide gras libre (AGL) n'est pas toujours la même au niveau de chaque dispositif durant les périodes d'essais (Figure III.4). On note des valeurs moyennes de 0,64 % \pm 0,07 (Claie); 0,80 % \pm 0,07 (Tôle); 0,63 % \pm 0,17 (Bâche) 0,92 % \pm 0,24 (Aire cimentée) ; 0,67 % \pm 0,08 (Bitume) et 0,65 % \pm 0,07 (Serre).

La comparaison des dispositifs au niveau de la teneur en acide gras libre des fèves en fin de séchage par le test de l'ANOVA donne un F de Fisher calculé (2,925) inférieur au F critique (3,055) (Tableau III.1). Il n'y a donc pas une différence significative de l'effet des dispositifs sur la teneur en acide gras libre.

Par ailleurs, sur tous les dispositifs, les valeurs des acidités libres restent inférieures à 1,75 %, teneur limite proscrite d'AGL dans le beurre de cacao selon la **méthode OICCC n° 43 (1993)**.

3.1.5 DISCUSSION

Les résultats relatifs à la distribution de l'acidité totale dans la fève après le séchage ont montré que la teneur de l'acidité totale n'est pas la même. Ce constat pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité biochimique de la fève. Augier (1999) a fait la même remarque lors de l'étude du transport d'eau et d'acide à l'intérieur d'une fève de cacao au cours du séchage artificiel. Il a observé que les phénomènes de diffusion de l'acidité n'étaient pas la même dans les différentes couches de la fève. L'analyse de variance a relevé que le dispositif de séchage solaire n'influence pas l'acidité totale de la fève. Notons toutefois que l'acidité de l'amande sur Claie (4,10 \pm 0,48), dispositif généralement utilisé en milieu villageois (Pontillon, 1997) est faible. Cette faible acidité observée sur ce dispositif serait certainement imputable au séchage lent qu'il offre (Godfrey, 1990) contrairement aux dispositifs Bitume (4,52 \pm 0,99) et Tôle (4,22 \pm 0,41).

Au niveau du pH des fèves après le séchage, les mêmes observations faites au niveau de l'acidité totale ont été constatées. L'explication réside dans la relation liant le pH et l'acidité.

Les valeurs élevées des acidités volatiles notées sur les dispositifs Bitume, Tôle et Bâche seraient imputables à la capacité de ces dispositifs à se surchauffer facilement. Ainsi, les fèves directement en contact avec ces dispositifs ont sûrement bénéficié d'une élévation de leur température qui a contribué sûrement à augmenter

leur acidité volatile. En effet, des études ont montré que la teneur en acide volatil dans les fèves augmente avec des températures élevées comme c'est le cas des séchoirs industriels (**Lewis et Lee, 1986 ; Bopaiah, 1991 ; Nganhou, 1996 ;**). Des corrélations établies entre acidité volatile et pH, entre acidité volatile et acidité totale ont montrées que les acides volatils (acide acétique principalement) peuvent être les premiers responsables d'une acidité élevée des fèves de cacao (**Jinaps et Thien, 1994**).

La teneur en AGL des fèves issues des différents dispositifs de séchage est restée inférieure à 1,75 %, teneur en AGL maximale admissible dans le beurre de cacao.

Les dispositifs de séchage à l'air libre étudiés n'ont pas contribué à une augmentation de l'acidité libre du beurre de cacao au-delà de la limite proscrite.

Des études ont montré qu'au cours du stockage le cacao fixe des odeurs étrangères et peut devenir non-conforme à la consommation. Sa teneur en AGL augmente au cours du stockage en corrélation avec le défaut de qualité des fèves (**Barel, 1995 ; Guehi et al., 2005**). Dans cette étude, les fèves ont été soigneusement triées avant leur mise en séchage. Cette manière de procéder a certainement contribué à une réduction de la teneur en AGL des fèves sur chacun des dispositifs.

3.1.6 CONCLUSION PARTIELLE

On constate qu'il n'y a pas de différence significative de l'effet des dispositifs de séchage à l'air libre étudiés sur les types d'acidité des fèves de cacao.

Les dispositifs tels que Bitume et Tôle généralement proscrits car soupçonnés de contribuer à une augmentation de l'acidité ont présenté des acidités globalement identiques à celles des autres dispositifs. Cependant, ces résultats ne doivent pas encourager leur utilisation puisque pour le Bitume par exemple, le ramassage des fèves peut provoquer la présence de sable ou de particules bitumineuses parmi les fèves ou même introduire des saveurs indésirables comme le goût de fumé ou de terre.

3.2 CARACTERISTIQUES LIEES A L'AIR DE SECHAGE

Les conditions aérothermiques (Températures, Humidités relatives et Vitesses de l'air) du déroulement du séchage des fèves de cacao au cours des différents essais dans la zone d'études sont présentées et analysées dans ce paragraphe.

3.2.1 OBSERVATIONS GENERALES

Pendant le déroulement du séchage des fèves de cacao, les paramètres aérothermiques (température, humidité relative et vitesse de l'air) ont été régulièrement mesurés pour chaque essai de séchage. Le tableau III.2 présente de façon synthétique les résultats obtenus au cours du séchage à l'air libre et du séchage sous serre.

L'analyse du tableau III.2, montre que les valeurs moyennes des caractéristiques de l'air varient de 28,46 à 31,66 °C pour la température, de 35,66 à 76,50 % pour l'humidité relative et de 0,65 et 1,21 m/s pour la vitesse de l'air. Sous serre, les conditions de séchage sont plus chaudes et plus sèches avec des températures moyennes élevées allant de 38,68 à 42,62 °C, des valeurs moyennes d'humidités relatives plus basses de l'ordre de 28,00 à 47,50 % et des valeurs moyennes de vitesses de l'air plus lentes comprises entre 0,31 et 0,72 m/s.

L'analyse des écart-types des différentes caractéristiques de l'air pour les essais considérés montre bien que ceux-ci sont relativement faibles. Au niveau du séchage à l'air libre, les variations maxima des écart-types sont de $\pm 2,68$ °C; $\pm 8,54$ % et $\pm 0,80$ m/s respectivement pour la température ; l'humidité relative et la vitesse de l'air. Cependant, au niveau de la serre expérimentale, des variations maxima de $\pm 4,55$ °C ; $\pm 6,18$ % et $\pm 0,29$ m/s ont été notées respectivement pour la température ; l'humidité relative et la vitesse de l'air.

Tableau III.2 : Valeurs moyennes des caractéristiques de l'air pour différents essais

ESSAI	A l'air libre			Sous serre expérimentale		
	Température (°C)	Humidité relative de l'air (%)	Vitesse de l'air (m/s)	Température (°C)	Humidité relative de l'air (%)	Vitesse de l'air (m/s)
1	30,83 ± 0,96	68,67 ± 5,58	1,07 ± 0,22	38,68 ± 3,68	43,22 ± 5,53	0,54 ± 0,14
2	30,05 ± 1,75	68,89 ± 7,53	1,12 ± 0,06	39,00 ± 3,25	46,65 ± 5,33	0,45 ± 0,04
3	30,66 ± 2,68	69,00 ± 6,54	1,21 ± 0,80	38,85 ± 3,15	46,6 ± 5,92	0,51 ± 0,14
4	29,66 ± 2,28	76,50 ± 6,15	1,16 ± 0,33	38,87 ± 2,02	45,72 ± 4,53	0,41 ± 0,29
5	30,83 ± 2,51	68,67 ± 7,45	1,02 ± 0,54	40,23 ± 3,76	46,61 ± 4,34	0,31 ± 0,11
6	30,59 ± 1,08	68,06 ± 6,69	1,03 ± 0,07	41,58 ± 4,41	47,50 ± 5,74	0,4 ± 0,02
7	30,59 ± 0,76	67,96 ± 6,10	1,16 ± 0,23	41,58 ± 4,55	47,50 ± 6,18	0,42 ± 0,10
8	28,46 ± 0,79	70,35 ± 2,54	0,72 ± 0,33	39,83 ± 3,67	46,26 ± 5,87	0,33 ± 0,13
9	28,67 ± 2,04	69,97 ± 8,54	0,66 ± 0,19	40,00 ± 2,09	45,11 ± 5,09	0,40 ± 0,03
10	29,97 ± 1,55	68,01 ± 5,45	0,93 ± 0,21	39,79 ± 2,14	45,37 ± 5,56	0,43 ± 0,05
11	30,13 ± 0,86	67,26 ± 4,67	0,86 ± 0,23	41,05 ± 3,10	40,25 ± 3,66	0,36 ± 0,05
12	28,74 ± 0,93	69,70 ± 5,53	0,66 ± 0,19	39,79 ± 4,02	45,13 ± 4,98	0,34 ± 0,03
13	28,67 ± 0,57	69,97 ± 3,03	0,65 ± 0,23	38,83 ± 0,59	41,11 ± 2,68	0,42 ± 0,04
14	29,92 ± 0,39	68,33 ± 2,99	0,79 ± 0,08	40,10 ± 2,45	44,40 ± 4,91	0,32 ± 0,11
15	29,89 ± 0,41	68,20 ± 2,75	0,97 ± 0,08	38,86 ± 0,64	45,71 ± 1,53	0,72 ± 0,03
16	30,85 ± 0,30	64,80 ± 4,10	0,79 ± 0,12	39,80 ± 2,02	47,47 ± 4,72	0,31 ± 0,07
17	30,80 ± 1,12	66,50 ± 5,59	0,76 ± 0,17	39,75 ± 2,53	43,50 ± 4,91	0,42 ± 0,09
18	29,85 ± 1,32	64,80 ± 4,54	1,00 ± 0,23	41,03 ± 2,81	39,70 ± 3,89	0,34 ± 0,05
19	31,01 ± 0,42	58,23 ± 3,13	0,94 ± 0,12	39,63 ± 1,40	35,86 ± 2,25	0,31 ± 0,10
20	31,66 ± 1,10	57,50 ± 8,13	0,87 ± 0,17	42,62 ± 3,20	33,63 ± 3,63	0,36 ± 0,14
21	31,60 ± 2,25	35,66 ± 7,50	0,89 ± 0,20	39,97 ± 2,69	28,00 ± 5,12	0,46 ± 0,16
Moyenne générale	30,16	66,05	0,92	39,99	43,10	0,41
Ecart type	0,93	8,02	0,17	1,06	5,14	0,10

3.2.2 VARIATION AEROTHERMIQUE AU COURS D'UN ESSAI DE SECHAGE

Afin de justifier l'utilisation de certains modèles tels que ceux relatifs aux courbes caractéristiques de séchage qui ne s'appliquent que dans des conditions constantes des paramètres de l'air, il importe d'apprécier de plus près leur variabilité au cours d'un essai de séchage.

3.2.2.1 Température

La figure III.5 représente les variations de la température au cours d'un essai de séchage. Pour cet essai, la durée journalière d'exposition au soleil des fèves a été de 9h. Les températures de séchage ont été représentées aussi bien à l'air libre que sous serre. L'analyse de cette figure montre que les températures moyennes du jour varient très peu d'une journée à l'autre par rapport aux températures enregistrées toutes les heures de séchage.

L'analyse des coefficients de variation (CV) relatifs aux températures moyennes du jour (1,36 % à l'air libre et 1,66 % sous serre) indique une faible variation des températures car les CV restent inférieurs à 5 % (Tableau III.3). Ces observations se confirment avec le test de l'analyse de variance. Il n'y a pas de différence significative des températures de l'air de séchage d'un jour à l'autre au cours du séchage car F calculé est inférieur à F lu au niveau des deux modes de séchage.

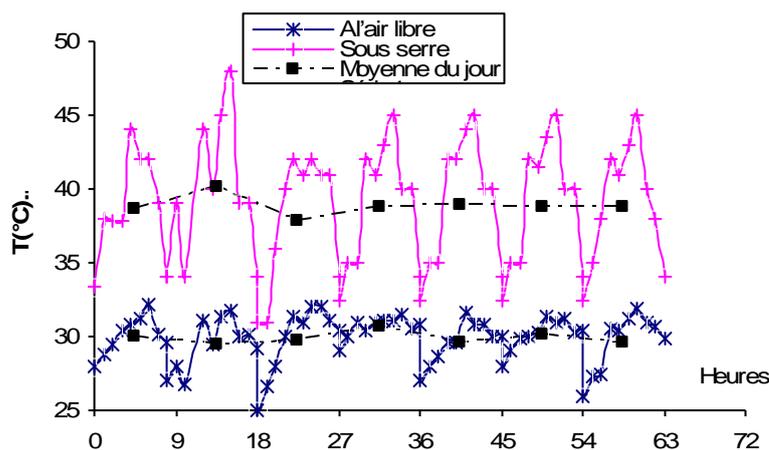


Figure III.5 : Variation de la température de l'air de séchage au cours (essai 15)

Tableau III.3 : Analyse statistique des caractéristiques de séchage

	A l'air libre			Sous serre expérimentale		
	T (°C)	HR (%)	Vitesse (m/s)	T (°C)	HR (%)	Vitesse (m/s)
Moyenne	29,89	68,2	0,97	38,86	45,71	0,72
Ecart type	0,41	2,75	0,08	0,64	1,53	0,03
CV (%)	1,36	4,03	8,25	1,66	3,35	4,07

Tableau III.4 : Tests d'analyse de variance sur les caractéristiques de séchage

Caractéristique c l'air	A l'air libre			Sous serre expérimentale		
	F calculé	Probabilité	F critique	F calculé	Probabilité	F critique
T(°C)	0,644	0,695	2,249	0,132	0,992	2,249
HR (%)	2,127	0,063	2,249	0,200	0,975	2,249
Vitesse (m/s)	1,206	0,315	2,249	0,705	0,647	2,249

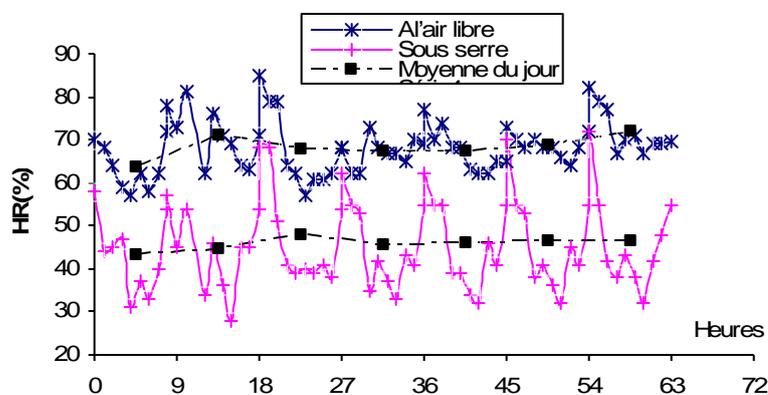


Figure III.6 : Variation de l'humidité relative de l'air de séchage au cours (essai 15)

3.2.2.2 Humidité relative

Au cours d'un essai, les moyennes des humidités relatives du jour varient faiblement aussi bien à l'air libre que sous serre (figure III.6). L'analyse des CV (4,03 % à l'air libre et 3,35 % sous serre) indique bien que ces variations d'un jour à l'autre sont faibles (tableau III.3). Les tests de l'analyse de variance relatifs à l'humidité relative ne laissent apparaître aucune différence significative entre les valeurs moyennes des humidités relatives (tableau III.4).

3.2.2.3 Vitesse de l'air

Les moyennes du jour au niveau des vitesses de l'air au cours d'un essai de séchage varient très peu (figure III.7) dans les conditions étudiées comme observées dans les cas précédents au niveau des températures et des humidités relatives. Toutefois, à l'air libre, ces variations ne sont pas toujours faibles car le CV obtenu est de 8,25 %. Cependant, le test de l'analyse de variance (tableau III.4) montre qu'il n'y a pas de différence significative de vitesse moyenne journalière de l'air au cours du séchage à l'air libre et sous serre.

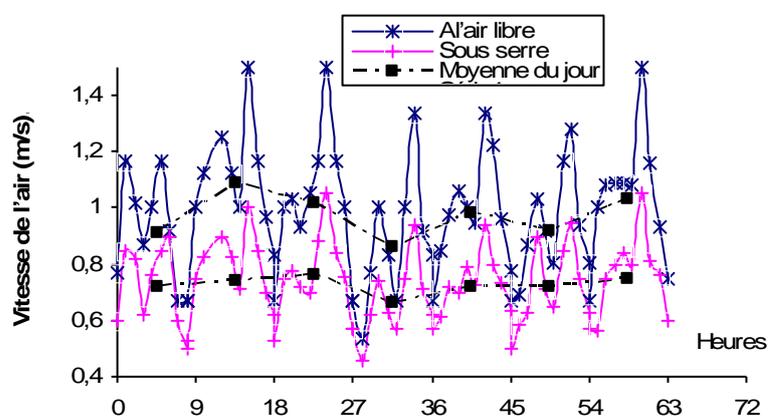


Figure III.7 : Variation de la vitesse de l'air de séchage au cours (essai 15)

3.2.3 DISCUSSION

Les mesures des caractéristiques de l'air ont montré que celles-ci peuvent varier d'un essai à l'autre, avec des moyennes générales à l'air libre de 30,16 °C ; 66,05 % et de 0,92 m/s respectivement pour les températures ; les humidités relatives et pour la vitesse de l'air. Les coefficients de variation déductibles sur la base des écart-types et des moyennes générales ont été de 3,08 ; 12,14 et 19,00 % respectivement au niveau des températures ; des humidités relatives et au niveau des vitesses à l'air libre. Ces valeurs sont restées supérieures à 5 % pour l'humidité relative et la vitesse de l'air. En effet, au cours des campagnes cacaoyères, on note une alternance de saison sèche et pluvieuse qui influence les caractéristiques de l'air d'où les variations de celles-ci observées d'un essai à l'autre. Cependant, pour des essais consécutifs, ces variations restent généralement faibles, surtout au niveau des températures où les coefficients de variation sont inférieurs à 5 %.

Pendant le déroulement du séchage, l'évolution des paramètres aérothermiques à l'intérieur d'un essai de séchage a été étudiée. Il n'a pas été observé de différences significatives de l'évolution des valeurs moyennes du jour des caractéristiques de l'air au cours du séchage sur la base des tests statistiques. En effet, Koua (2007) travaillant dans la même zone d'étude sur le séchage du manioc fit les mêmes observations : « la variation de la température et de l'humidité relative de l'air étant faibles, elles peuvent être supposées constantes ». Ce dernier constat, soutenu dans ce travail par des tests statistiques, permet de supposer que les caractéristiques de l'air restent presque identiques chaque jour au cours d'un essai de séchage. Il est donc possible de représenter par une valeur moyenne chaque caractéristique de l'air au cours d'un essai de séchage comme indiquée au tableau III.2.

3.2.4 CONCLUSION PARTIELLE

De façon globale, hormis les moments de pluies où le séchage est interrompu, les conditions de séchage dans la zone d'étude peuvent être considérées comme constantes et une valeur moyenne pour chaque caractéristique de l'air pourrait être utilisée pour apprécier le déroulement d'un essai de séchage aussi bien à l'air libre et sous serre. Les conditions de déroulement du séchage pouvant être supposées constantes, les modèles

mathématiques de séchage relatifs aux courbes caractéristiques de séchage peuvent s'appliquer sans difficultés. Outre les caractéristiques de l'air, autres caractéristiques prises en compte dans la modélisation sont celles liées au produit.

3.3 CARACTERISTIQUES LIEES AUX FEVES DE CACAO

L'objectif de ce paragraphe est de modéliser les isothermes de désorption des fèves de cacao de Toumbokro après les avoir déterminées expérimentalement à différentes températures. En outre, la chaleur isostérique de désorption en relation avec la teneur en eau d'équilibre des fèves de cacao est déterminée.

3.3.1 ISOTHERMES DE DESORPTION

3.3.1.1 Représentation graphique

La figure III.8 représente la variation des teneurs en eau d'équilibre des fèves de cacao fermentées en fonction de l'humidité relative du milieu pour les trois températures étudiées 30, 40 et 60 °C. On constate qu'à ces différentes températures, les isothermes obtenues présentent la même allure, la forme sigmoïdale.

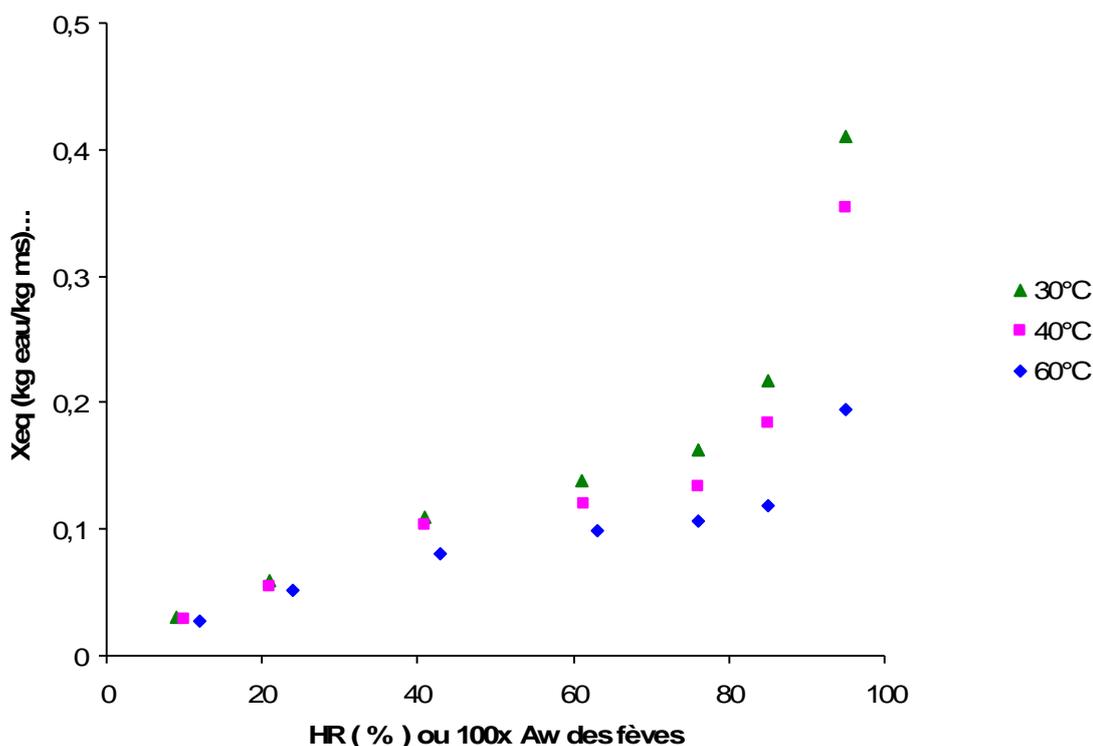


Figure III.8 : Isothermes de désorption expérimentales pour les fèves de cacao de Toumbokro à différentes températures

A une même activité de l'eau du produit ou à une même humidité relative d'équilibre de l'enceinte expérimentale, la teneur en eau d'équilibre du produit diminue lorsque la température augmente.

A des températures constantes, la teneur en eau d'équilibre du produit diminue avec l'activité de l'eau du produit ou l'humidité relative d'équilibre.

3.3.1.2 Modélisation des isothermes

Un certain nombre de modèles présentés dans le paragraphe 1.3.3.2 a été testé pour modéliser les isothermes de désorption. Seuls les modèles de Smith ; de Henderson ; de Oswin et de GAB, couramment utilisés pour les produits agroalimentaires, ont été testés dans leur domaine de validité.

Pour chacun de ces modèles testés, les paramètres k et n (pour les modèles de Smith ; de Henderson ; de Oswin) et les paramètres X_{12} , C et K (pour le modèle de GAB) ont été déterminés par identification aux courbes expérimentales de désorption, en minimisant l'erreur quadratique moyenne (EQM) selon la formule :

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_1^N |X_{eq\ cal} - X_{eq\ exp}|^2 \quad (3.1)$$

Avec

- $X_{eq\ cal}$ teneur en eau d'équilibre calculée (kg eau /kg ms) ;
- $X_{eq\ exp}$ teneur en eau d'équilibre expérimentale (kg eau /kg ms) ;
- N Nombre de points observés; soit 7 points par isotherme.

Le tableau III.5 présente les valeurs de l' EQM obtenues après ajustement, et les coefficients de corrélations r correspondants pour les différents modèles.

Tableau III.5 : EQM et coefficients de corrélations r relatifs à chaque modèle d'isotherme de désorption à différentes températures

		GAB	Oswin	Smith	Henderso
T=30°C	EQM	9,69 E-04	1,45 E-04	4,87 E-04	1,10 E-03
	r	0,9693	0,9947	0,9412	0,9647
T=40°C	EQM	1,01 E-03	2,07 E-04	5,14 E-04	8,86 E-04
	r	0,9566	0,9896	0,9260	0,9556
T=60°C	EQM	1,38 E-04	7,40 E-05	1,18 E-04	1,68 E-04
	r	0,9719	0,9850	0,9365	0,9759

Tableau III.6 : Paramètres d'Oswin et EQM relative à chaque ajustement

	Paramètre k	Paramètre N	Domaine de validité (EQM	r
T=30°C	0,1049	0,4567	0,10 HR 0,90	1,45 E-04	0,9947
T=40°C	0,0909	0,4530	0,10 HR 0,90	2,07 E-04	0,9896
T=60°C	0,0752	0,3191	0,10 HR 0,90	7,40 E-05	0,9850

L'analyse du tableau III.5 montre que tous les modèles testés donnent de bons résultats puisque leurs coefficients de corrélation r sont élevés aux différentes températures. Il y a donc une adéquation de chacun des modèles avec les résultats expérimentaux sur la base du coefficient de corrélation r . Toutefois, le modèle d'Oswin

sera retenu pour la suite de cette étude, car il permet d'obtenir la meilleure corrélation r et la plus petite valeur de l'EQM à toutes les températures par rapport aux trois autres

modèles. En outre, il offre un large domaine de validité intégrant les humidités relatives obtenues durant les essais de séchage, contrairement aux modèles de Smith et de Henderson.

Le tableau III.6 reprend les valeurs des paramètres k et n d'Oswin donnés par l'équation 3.2 et les erreurs quadratiques moyennes (EQM) relatives à chaque ajustement de l'isotherme obtenue.

$$X_{eq} = k \left(\frac{Aw}{1 - Aw} \right)^n \text{ ou } X_{eq} = k \left(\frac{HR/100}{1 - HR/100} \right)^n \quad (3.2)$$

L'analyse du tableau III.6 montre que pour le produit étudié, les valeurs des paramètres d'Oswin (k et n) diminuent quand la température augmente. On observe également des valeurs sensiblement égales de k (respectivement n) entre 30 et 40°C. Ceci laisse entrevoir qu'une fluctuation de la température de quelques degrés Celsius n'influence pas trop les isothermes des fèves de cacao dans la plage de 30 à 40 °C. Dans les conditions ambiantes, c'est-à-dire à 30 °C sous une humidité relative de 66 %, les fèves de cacao sèchent jusqu'à une teneur en eau d'équilibre de 14 %.

Les courbes d'ajustement des isothermes générées par les modèles d'Oswin n'ont pas pris en compte toute la totalité des points expérimentaux (figure III.9). Il y a une

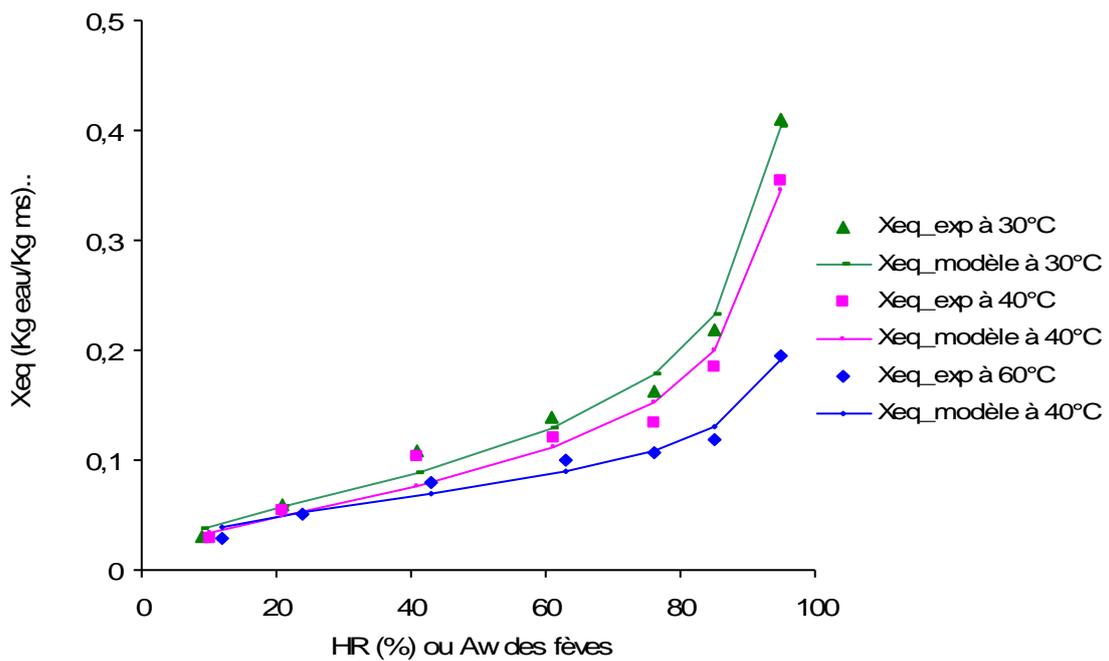


Figure III.9 : Comparaison des valeurs expérimentales et des valeurs de l'ajustement du modèle d'Oswin à différentes températures

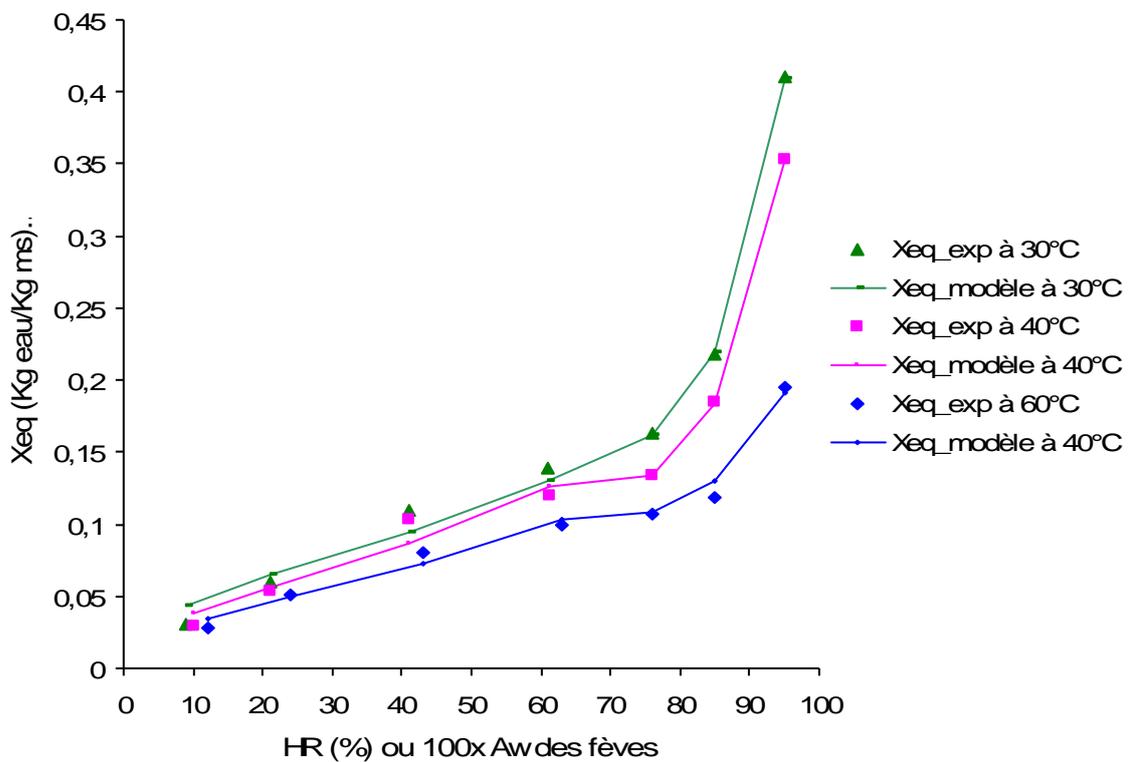


Figure III.10 : Nouvel ajustement du modèle d'Oswin à différentes températures selon des domaines de validité de HR

tendance des courbes à se placer au dessus des points expérimentaux pour des humidités relatives relativement élevées ($HR \geq 75\%$) et une autre tendance en dessous des points expérimentaux pour des humidités relatives inférieures à 75 %. Les modèles ne couvrent donc pas, en une seule équation, tous les points expérimentaux (Figure III.9).

Vu le rôle important des isothermes dans la détermination de la chaleur de désorption et dans la détermination des modèles de séchage, il importe d'évaluer à nouveau les paramètres k et n afin d'affiner les modèles obtenus. Etant données les deux tendances qu'ont présentées les courbes issues des modèles d'Oswin pour des humidités relatives inférieures et supérieures à 75 %, les paramètres k et n ont été déterminés dans deux domaines de validités pour chaque température. Les valeurs de ces paramètres sont consignées dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Paramètres du modèle d'Oswin selon des domaines de validité de HR

	Paramètre k	Paramètre n	Domaine de validité (%)	EQM
T=30°C	0,1092	0,3947	10 HR < 76	1,15 E-04
	0,0892	0,5178	76 HR < 90	6,69 E-07
T=40°C	0,1029	0,4534	10 HR < 76	7,94 E-05
	0,0721	0,5402	76 HR < 90	9,88 E-08
T=60°C	0,0819	0,4318	10 HR < 63	2,94 E-05
	0,0754	0,3159	63 HR 90	6,23 E-05

Les EQM sont encore plus faibles par rapport aux cas précédents. Ainsi, à l'aide des nouvelles valeurs prises par les paramètres k et n , on obtient une bonne simulation théorique de l'isotherme de désorption des fèves de cacao par le modèle d'Oswin aux différentes températures d'étude comme présenté à la figure III.10.

3.3.2 CHALEUR ISOSTERIQUE DE DESORPTION

3.3.2.1 Représentation graphique

La chaleur de désorption (Q_{st}) a été déterminée graphiquement en calculant pour chaque teneur en eau fixée, la pente $\left(-\frac{Q_{st}}{R}\right)$ de la droite obtenue à partir de l'équation de Clausius-Clapeyron (Equation 1.2).

La figure III.15 présente pour chaque teneur en eau des fèves les points obtenus expérimentalement dans le plan $-\ln(A_w)$ en fonction de l'inverse des températures T .

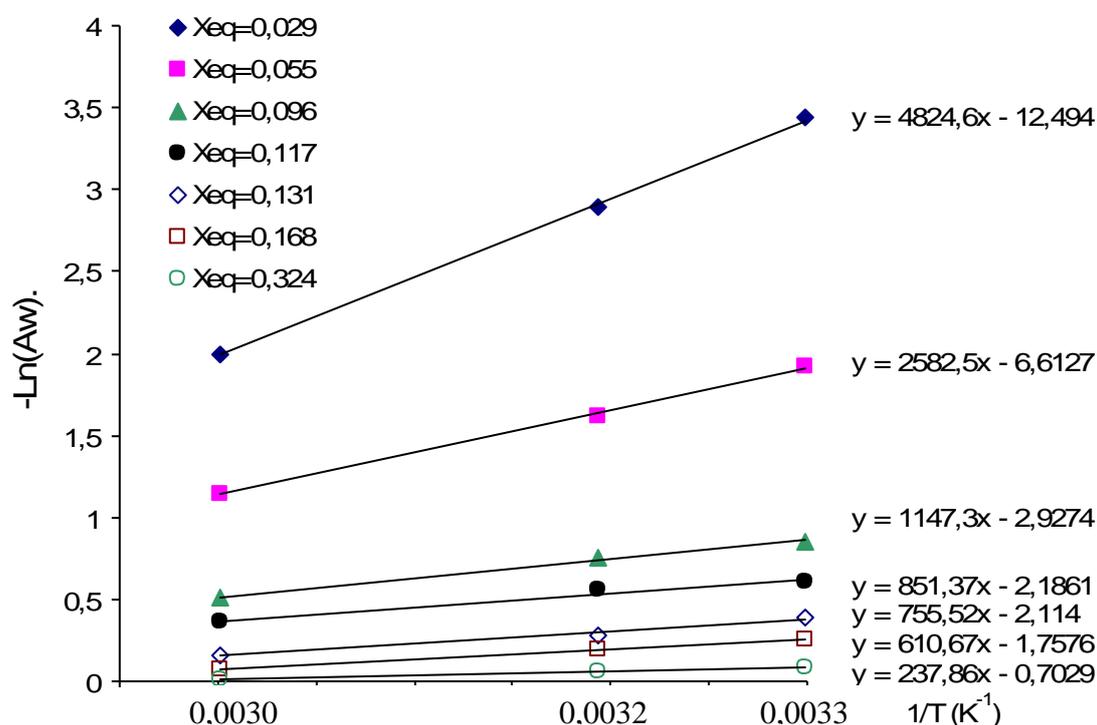


Figure III.11 : Droite et pente $\left(\frac{Q_{st}}{R}\right)$ des isostères à partir de l'équation de Clausius-Clapeyron

L'analyse de la figure III.11 montre que pour une même teneur en eau, les points semblent être alignés et peuvent par conséquent être contenus par une même droite dont

la pente $\left(\frac{Q_{st}}{R}\right)$ diminue quand la teneur en eau augmente.

A partir de la pente, la chaleur isostérique nette de désorption Q_{st} est déduite dans l'intervalle de températures 30 et 60 °C pour chaque teneur en eau. La figure III.12 montre une augmentation de l'énergie nécessaire à l'élimination de l'eau du produit passant de 1,977 à 40,093 kJ/mol pour des teneurs en eau allant de 32,4 à 2,9 %.

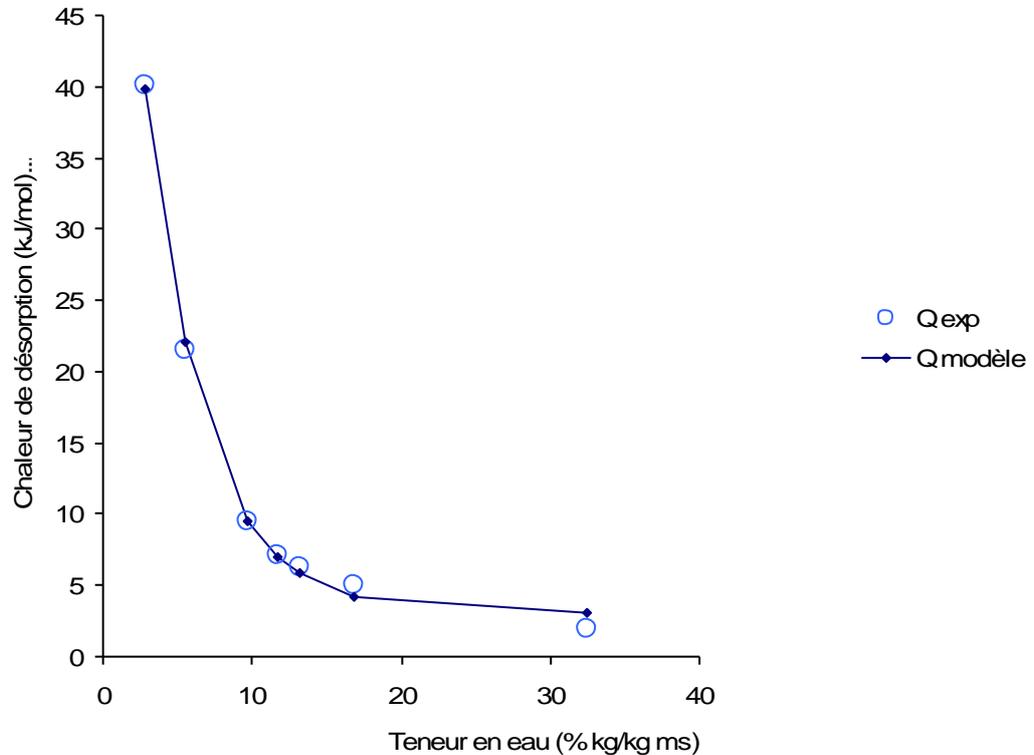


Figure III.12 : Chaleur isostérique nette de désorption d'eau des fèves de cacao de Toumbokro entre 30 et 60 °C.

3.3.2.2 Modélisation de la chaleur isostérique nette de désorption

La chaleur de désorption Q_{st} a été modélisée en fonction de la teneur en eau par la relation :

$$Q_{st} = 3,085 + 75,546 \exp(-0,25275X) \quad (3.3)$$

Cette équation est d'une grande utilité car elle permet de dimensionner les séchoirs en fonction de l'énergie à fournir aux produits pour la teneur désirée. Ainsi pour une teneur de 8%, la chaleur isostérique nette de désorption est estimée à 13,09 kJ/mol.

La figure III.13, comparant les valeurs de la chaleur de désorption expérimentale à celles prédites par le modèle, montre une relation linéaire, tendant à se confondre à la première bissectrice, entre ces deux types de valeurs, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,997$. Ces observations indiquent bien la convenance du modèle dans la description de la chaleur de désorption.

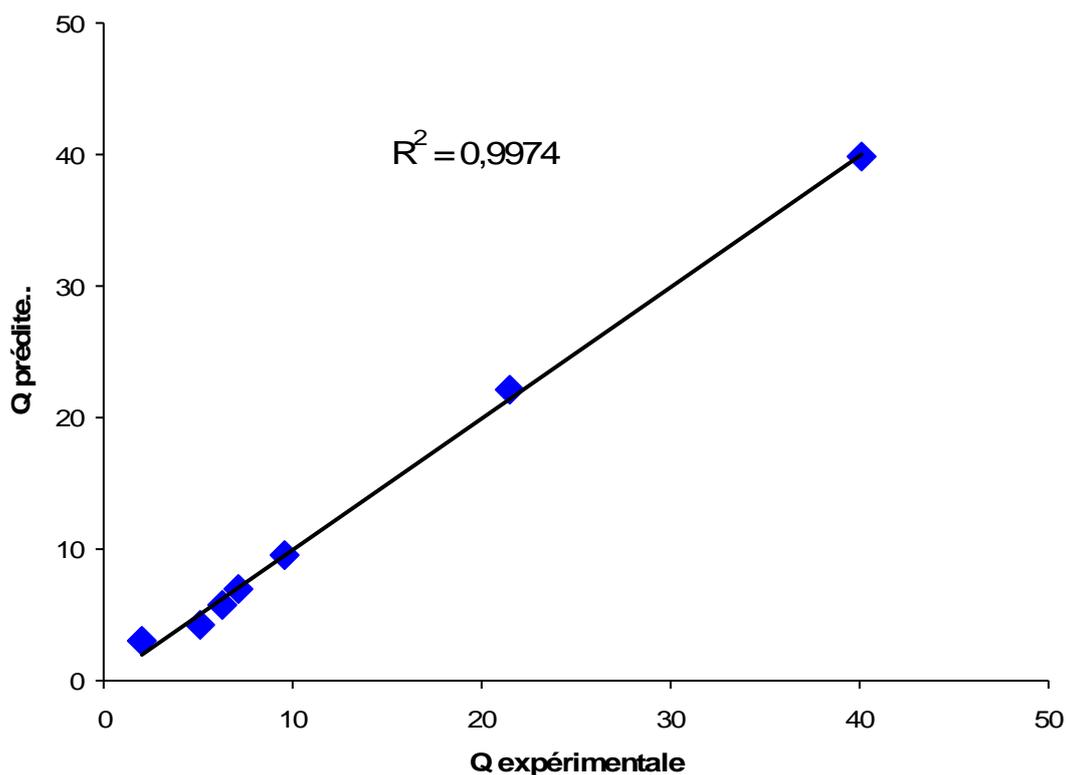


Figure III.13 : Comparaison expérimentale et prédite de la chaleur de désorption des fèves de cacao

3.3.3 DISCUSSION

L'allure de forme sigmoïdale qu'ont présentée les courbes d'équilibre sont typiques aux isothermes, particulièrement pour les produits biologiques. Ces résultats obtenus sont similaires à d'autres résultats rapportés dans la littérature (**Desmorieux et al., 1992 ; Belahmidi et al., 1993 ; Kechaou et al., 1996 ; Myhara et al., 1996 ; Park et al., 1996 ; Gogus et al., 1999 ; Kouhila et al., 2002 ; Lahsasni et al., 2003 ; Touati, 2008**).

L'analyse des figures a montré qu'à une même humidité relative du milieu (ou activité de l'eau du produit), la température augmente inversement avec la teneur en eau du produit. En effet, la teneur en eau d'équilibre du produit dépend de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant. Pour des températures élevées, l'état d'excitation des molécules d'eau est plus important, entraînant une diminution des forces d'attraction des molécules d'eau entre elles (**Kouhila et al., 2002 ; Irzyniec R et al., 2003 ; Lahsasni et al., 2003 ; Touati, 2008**).

Le modèle d'Oswin est l'un des plus fréquemment utilisés pour modéliser les isothermes des produits agroalimentaire (**Bassal, 1993 ; Haoua, 2007**). On a pu observer des valeurs sensiblement égales de k (respectivement n) du modèle entre 30 et 40°C, laissant entrevoir qu'une fluctuation de la température de quelques degrés Celsius n'influence pas trop les isothermes des fèves de cacao. Ce constat a été fait par d'autres auteurs. Ce furent les cas observés, à des faibles humidités relatives, dans les travaux de Sandoval *et al.* (2002) entre 25°C et 35°C sur les fèves de cacao; et Talla *et al.* (2001) entre 50°C et 60°C sur la mangue et la banane. En effet, ceux-ci ont observé que l'influence de la température sur les teneurs en eau d'équilibre est négligeable pour des écarts de températures inférieures à 10°C (**Adams, 1986 ; Belahmidi et al, 1993 ; Talla et al. 2001 ; Sandoval et al., 2002**)

Le modèle n'avait pas permis dans un premier temps de couvrir, en une seule équation, tous les points d'équilibre. Ce résultat concorde avec les recommandations de Iglesias et Chirife (1982) qui proposent de scinder la plage des humidités relatives comprises entre 10 et 80 % lors des applications des modèles théoriques d'isothermes des produits agricoles.

Comme l'ont remarqué Myhara *et al.* (1996) et bien d'autres auteurs (**Kechaou et al., 1999 ; Kaymak et al., 2001 ; Hossain et al., 2001**), la chaleur de désorption augmente avec la diminution de la teneur en eau. Cette observation est en accord avec nos résultats. En effet, aux basses teneurs en eau correspondent de plus fortes interactions de l'eau avec la matière organique.

Dans le cas de cette étude, menée sur les fèves de cacao, le maximum de chaleur de désorption calculé a été de l'ordre de 40,093 kJ/mol. Cette valeur correspond à une

teneur en eau de 2,90 % kg eau/ kg ms. Cette valeur est plus petite que celles obtenues pour le manioc (48 kJ/mol) (**Sanni et al., 1999**). Par contre, elle reste supérieure à celles du piment (38 kJ/mol), de l'ananas (30 kJ/mol) et des dattes (7kJ/mol) (**Myhara et al., 1996 ; Sanni et al., 1999 ; Kechaou et al., 1999 ;Hossain et al., 2001 ; Kaymak et al., 2001**). Entre 30 et 60 °C, les chaleurs isosthérique nette de désorption (Q_{st}) des fèves de cacao ont été corrélées de façon satisfaisante à la teneur en eau avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,997$. Cette valeur est comparable à celle obtenue par Noumi (**2004**) pour la déshydratation de la pulpe de l'aïélé avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,993$.

3.3.4 CONCLUSION PARTIELLE

Les points d'équilibre des fèves de cacao obtenus à différentes températures (30 ; 40 et 60 °C) peuvent être ajustés par le modèle d'Oswin pour l'obtention des courbes de désorption. Une variation de la température de quelques degrés Celsius près, dans la plage de 30 à 40 °C, n'a pas trop d'influence sur ces courbes d'équilibre (les isothermes).

A partir des isothermes, la chaleur de désorption des fèves de cacao est déterminée pour différents teneurs en eau du produit. Ainsi, on estime à 13,09 kJ/mol la chaleur de désorption nécessaire pour avoir une teneur en eau des fèves de 8 %.

L'étude thermodynamique ou la détermination des isothermes constitue une étape préliminaire pour étudier la cinétique de séchage en couche mince des fèves de cacao.

3.4 COURBES DE CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

Le but essentiel de ce paragraphe est de présenter les allures des courbes de perte de teneur en eau et de vitesse de séchage des fèves de cacao obtenues sur différents dispositifs de séchage à l'air libre et sous une serre expérimentale.

3.4.1 ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU DES FÈVES DE CACAO

La figure III.14 présente, pour tous les essais confondus, les nuages de points matérialisant la zone d'évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour différentes conditions naturelles de séchage.

L'observation de l'ensemble des courbes montre une superposition de celles-ci, ne permettant pas de distinguer l'évolution de la teneur en eau pour chaque dispositif. Ainsi pour la suite de ce travail, les courbes de cinétique de séchage seront représentées par essai sur une même figure. L'objectif est d'avoir des courbes obtenues dans les mêmes conditions de séchage au niveau expérimental (température ; humidité relative ; vitesse de l'air), ainsi que dans les mêmes conditions initiales au niveau de la fève (teneur en eau ; siccité) sur chaque dispositif.

3.4.1.1 Influence du dispositif

L'évolution de la teneur en eau des fèves pour tous les dispositifs donne des courbes exponentielles décroissantes (Figure III.15). Les dispositifs de séchage n'ont donc pas influencé l'allure des courbes de séchage. Toutefois, la fin du séchage, caractérisée par une teneur inférieure ou égale à 8 % b.s, varie d'un dispositif à un autre dans les mêmes conditions expérimentales. A titre d'exemple, la fin du séchage au niveau de la serre expérimentale a lieu le quatrième jour (plus précisément en 28 heures d'ensoleillement continu, en raison de 8 heures de séchage par jour), vers la fin de la cinquième journée au niveau du bitume (soit 38 heures) et entre la sixième et la huitième journée au niveau des dispositifs bâche (45 heures) ; tôle (48 heures) ; claie (48 heures) et aire cimentée (64 heures).

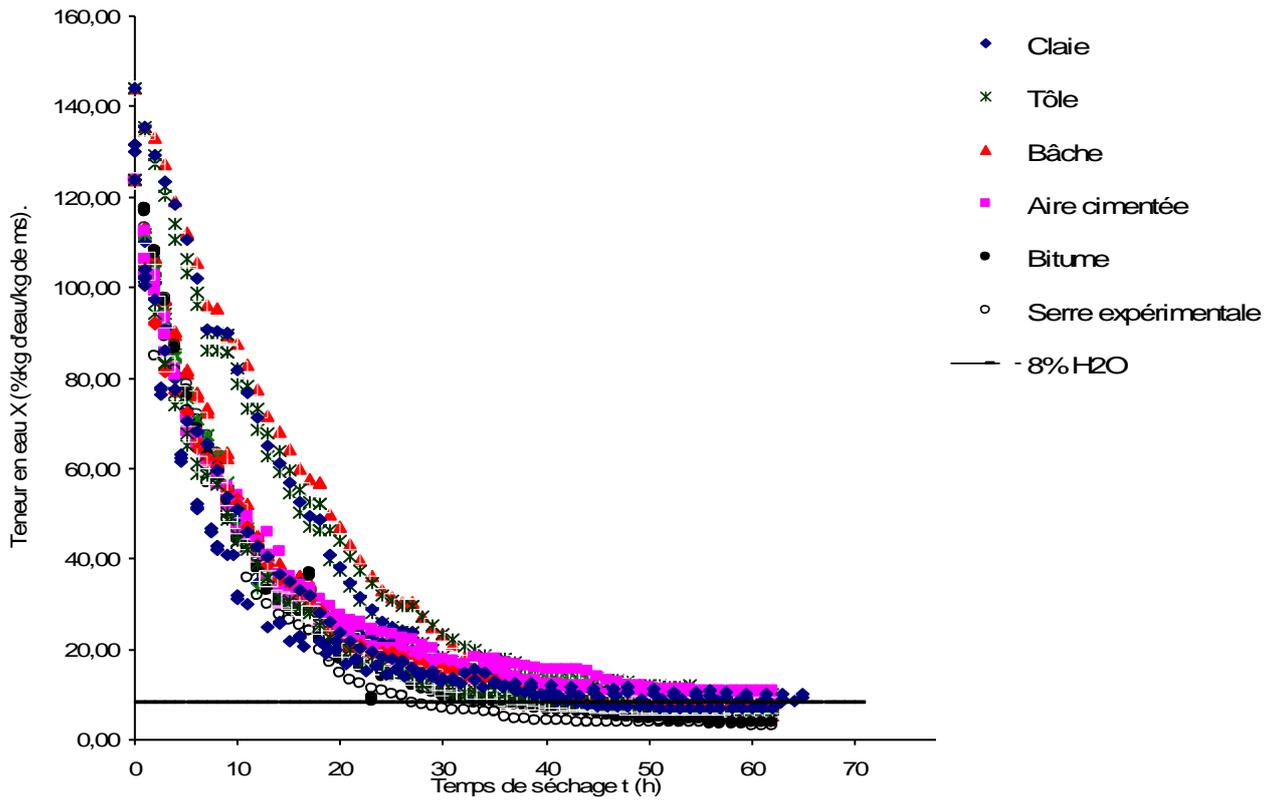


Figure III.14 : Evolution de la teneur en eau des fèves de cacao en fonction du temps pour tous les essais confondus

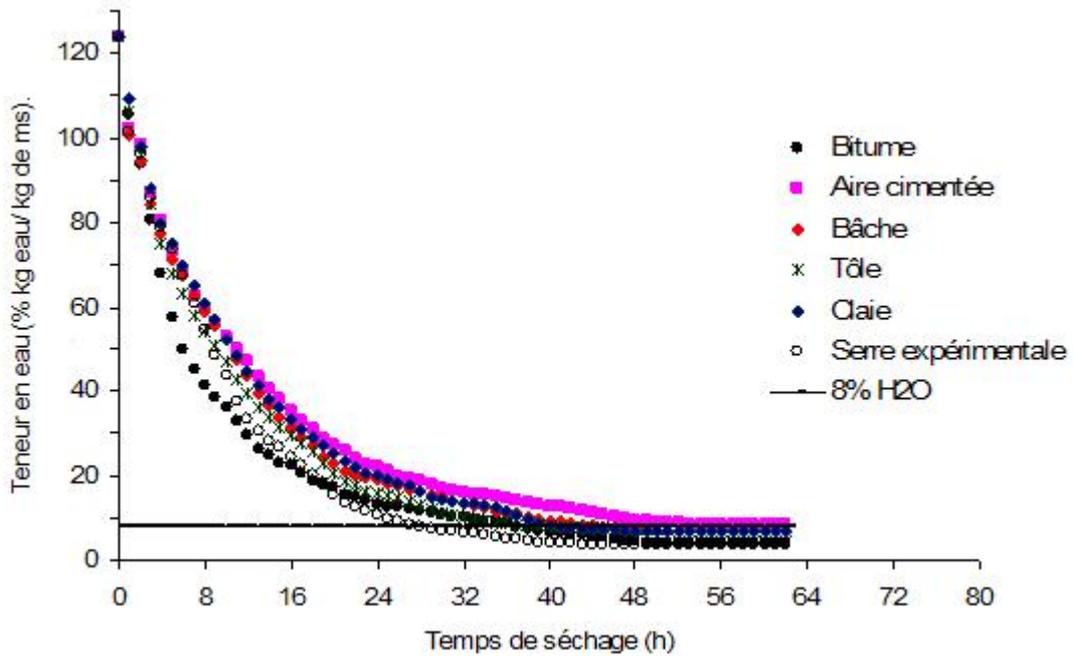


Figure III.15 : Evolution de la teneur en eau des fèves de cacao, essai 14 (période de Octobre)

3.4.1.2 Influence de la période de l'année

La teneur en eau des fèves semble ne plus évoluer, mais se stabilise autour de 8% b.s à partir de 40 heures de séchage (Figure III.16). De Octobre à Janvier, période de la grande campagne, les fèves sèchent plus facilement car la teneur en eau des fèves se stabilise en dessous de 8% b.s . Cette dernière observation n'est pas toujours le cas de Avril à Aout qui coïncide avec la période de la petite campagne (ou campagne intermédiaire).

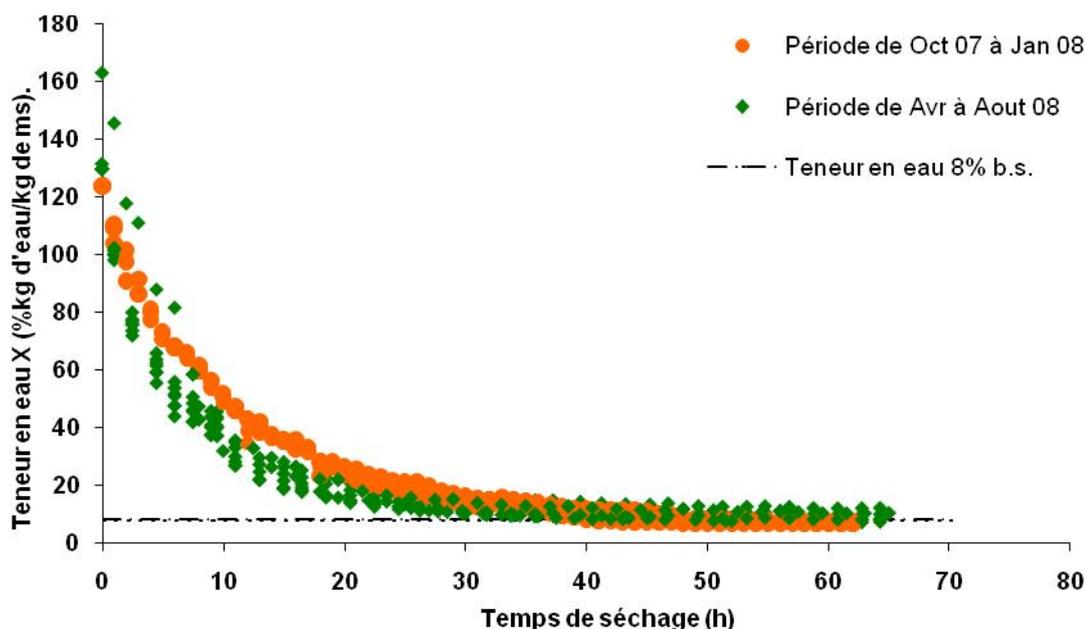


Figure III.16 : Influence des périodes de l'année sur l'évolution de la teneur en eau des fèves au cours du temps : séchage sur claie

3.4.2 EVOLUTION DE LA VITESSE DE SECHAGE DES FEVES DE CACAO

3.4.2.1 Evolution journalière de la vitesse de séchage

Les courbes de vitesse de séchage des fèves de cacao présentent la même allure sur toutes les aires de séchage étudiées (Figures III.17 et III.18). Elles débutent par un maximum dans les premières heures de séchage ; puis décroissent progressivement jusqu'à atteindre des valeurs presque nulles en fin de séchage.

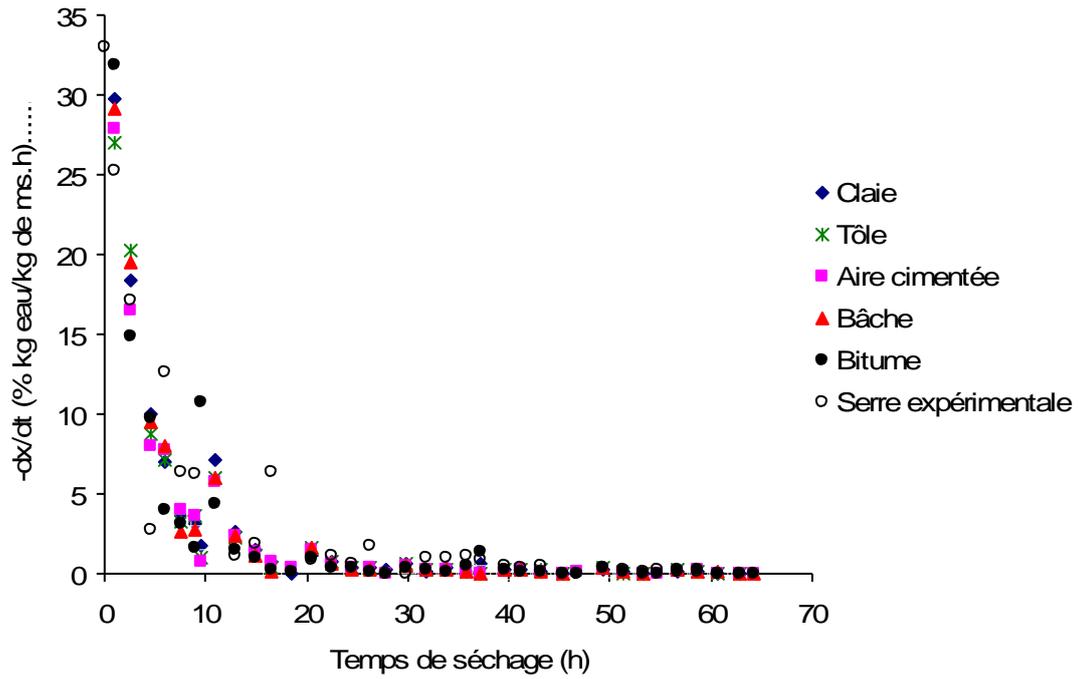


Figure III.17 : Evolution de la vitesse de séchage dans le temps, essai 05 (période de Mai)

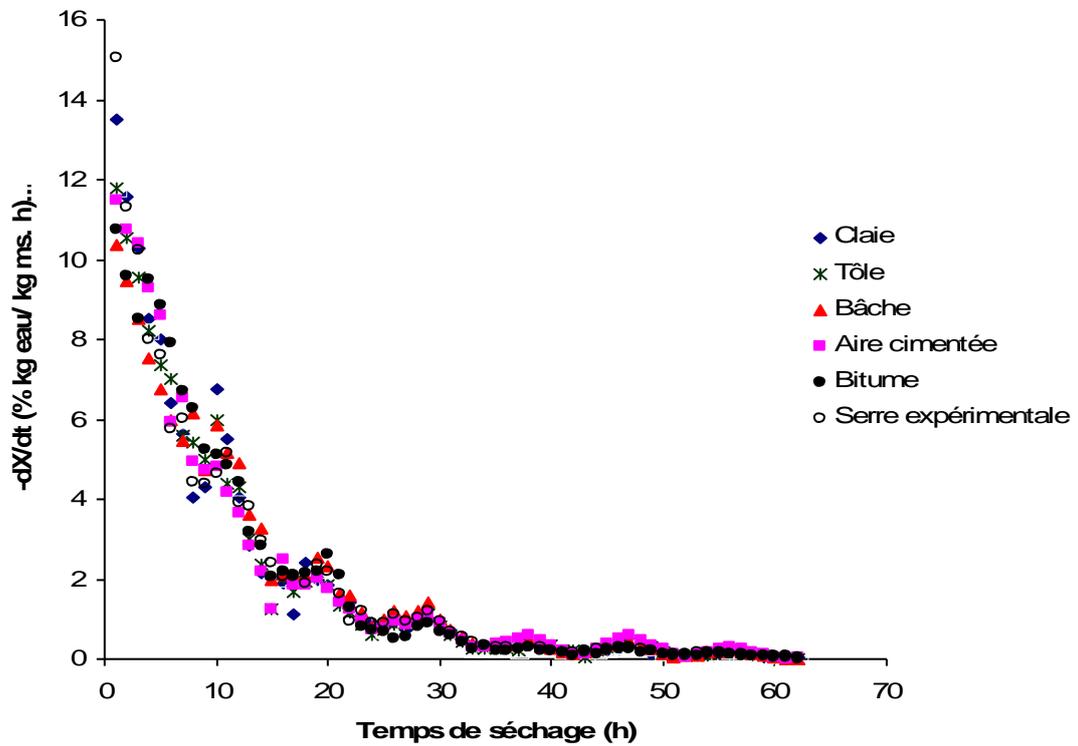


Figure III.18 : Evolution de la vitesse de séchage dans le temps, essai 18 (période de Mai)

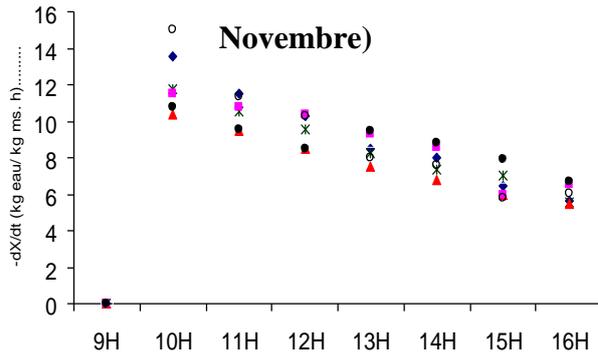


Fig III.19 a : Première journée

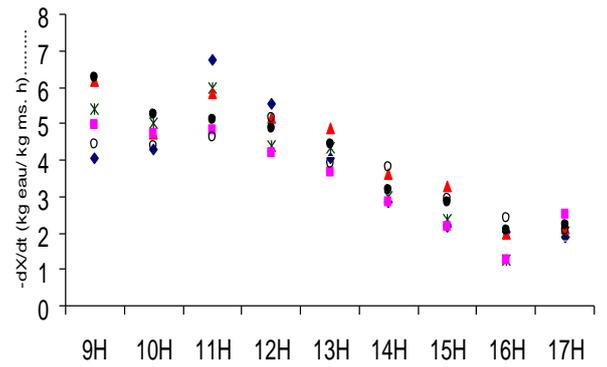


Fig III.19 b : Deuxième journée

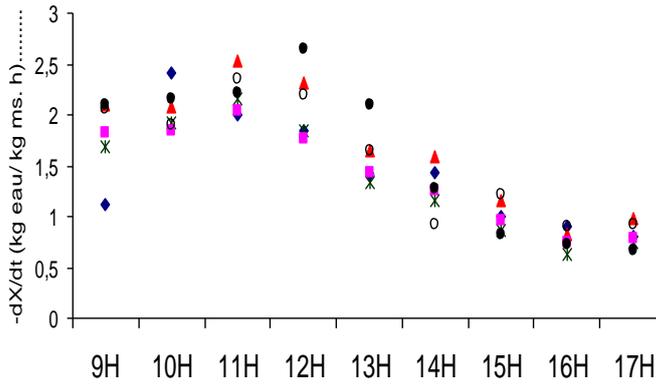


Fig III.19 c : Troisième journée

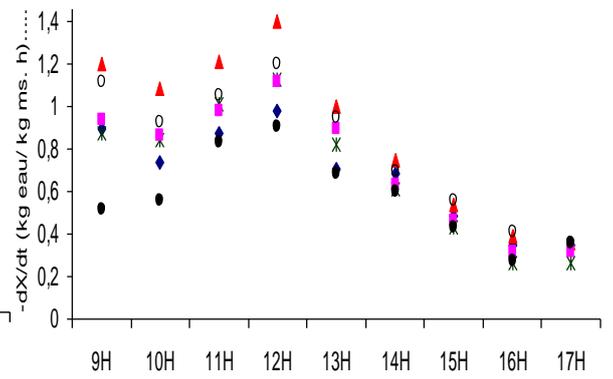


Fig III.19 d : Quatrième journée

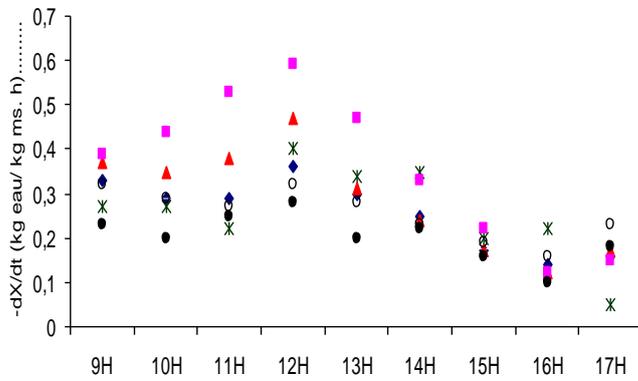


Fig III.19 e : Cinquième journée

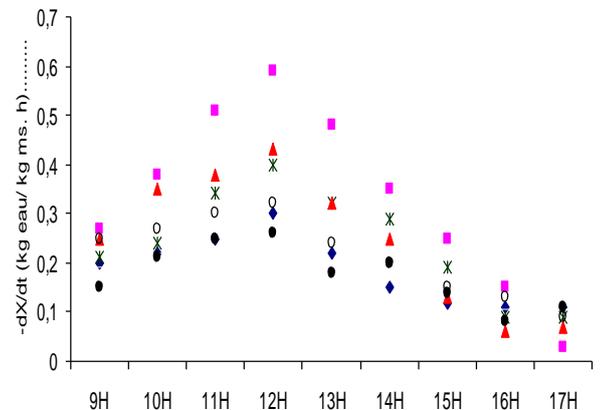


Fig III.19 f : Sixième journée

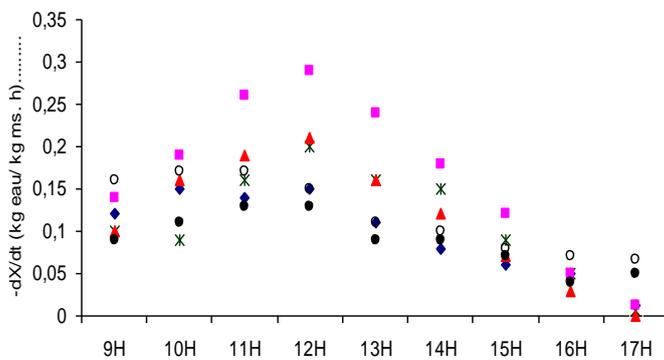


Fig III.19 g : Septième journée

- ◆ Claire
- × Tôle
- ▲ Bâche
- Aire cimentée
- Bitume
- Serre expérimentale

Figure III.19 : Evolution de la vitesse de séchage au cours de la journée (essai 18)

Une observation de plus près des courbes de vitesse de séchage montre que cette décroissance n'est pas continue tout au long de la durée de séchage. On observe plutôt une irrégularité du sens de variation de la vitesse de séchage au cours de la journée (Figures III.19). Dans la première journée, la vitesse de séchage diminue jusqu'à une valeur minimale à 16h (Fig III.19 a). Pour les autres jours de séchage (Fig III.19b à Fig III.19g), la vitesse initiale, déterminée le matin, augmente pour atteindre le maximum en mi journée (11 h à 13 h). Ensuite, une diminution de la vitesse de séchage s'en suit. Il arrive quelque fois qu'après la phase de réduction de la vitesse, on assiste à une légère augmentation de la celle ci.

3.4.2.2 Phases de séchage

Les différentes courbes observées sur la figure III.20, représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau, ne laisse pas apparaître les différentes phases caractéristiques du séchage. Néanmoins, vu l'allure générale de l'évolution des courbes, on retient que la vitesse de séchage diminue avec la teneur en eau des fèves au cours du séchage au niveau de tous les dispositifs. Afin de faire ressortir l'évolution type de la vitesse de séchage, ces courbes ont été approchées par des courbes de tendance de type polynomial d'ordre 3 (Figure III.21). L'analyse des courbes de tendance obtenues à la figure III.21 met en évidence l'absence de la phase de mise en température et de la phase de séchage à vitesse constante au niveau de tous les dispositifs étudiés. Seule la phase à allure décroissante (ou période de ralentissement) est présente. L'allure et l'orientation des courbes obtenues correspondent à une courbe de type C dans la classification de Sherwood (1936). Cette forme de courbe est caractéristique d'un produit dont le front de séchage se retire.

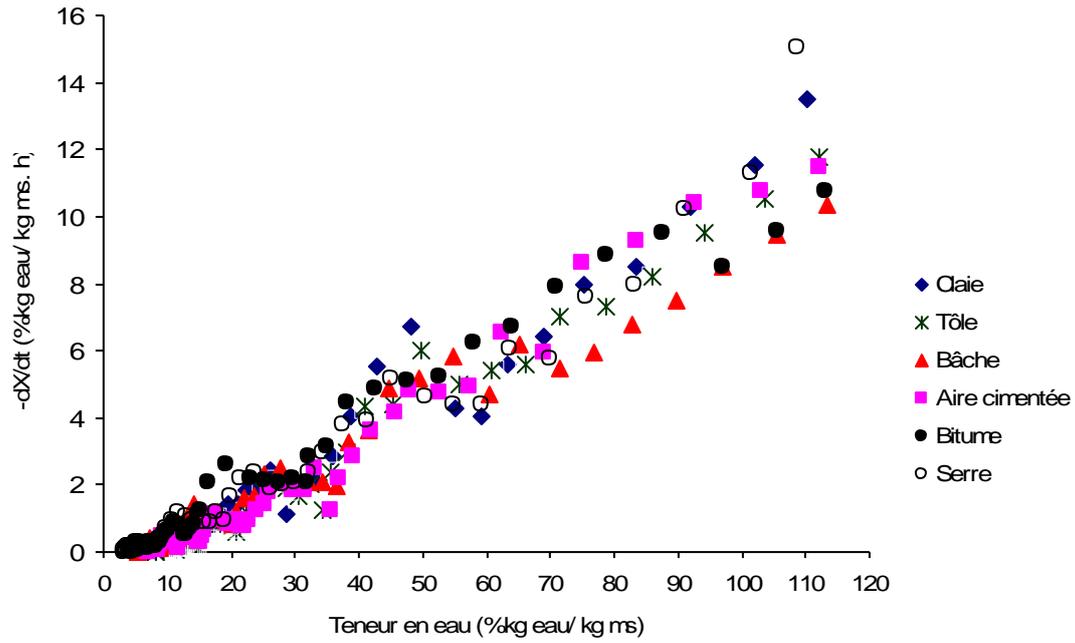


Figure III.20 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau des fèves de cacao (essai 18)

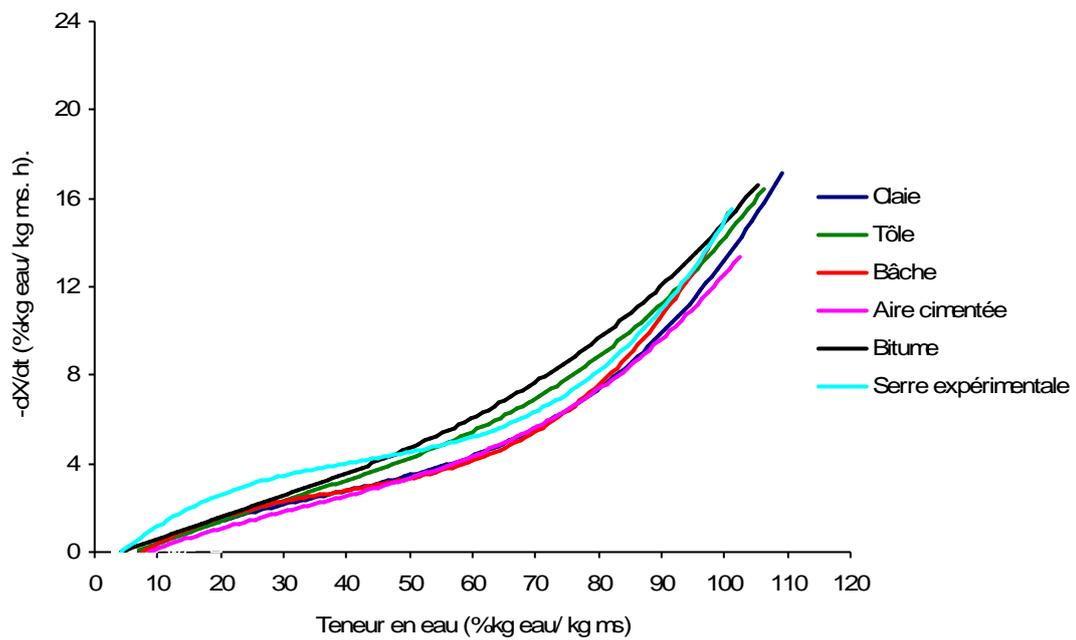


Figure III.21 : Courbe de tendance de l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau des fèves de cacao (essai 18)

3.4.3 DISCUSSION

L'allure exponentielle décroissante de la variation de la teneur en eau des fèves au cours du temps est une caractéristique du séchage des produits biologiques. Dans cette étude, ce constat a été observé sur tous les supports de séchage. Les différences de durée de séchage, notées au niveau des dispositifs, dans les mêmes conditions expérimentales, pourraient être liées à l'état de surface et aux propriétés thermodynamiques des matériaux utilisés pour le séchage (**Rozis *et al.* 1995**). En effet, tous les corps exposés au soleil présentent des caractéristiques différentes vis-à-vis du rayonnement solaire (**Bernard *et al.*, 1980 ; Daguinet, 1985 ; Cruz *et al.*, 1988**)

En ce qui concerne l'état de surface, la claie présente un avantage car les fèves qui y sont posées peuvent être traversées horizontalement et verticalement par l'air. Il y a à ce niveau plus d'échanges convectifs entre l'air et le produit. De plus, dès les premières heures de séchage, les fèves étant plus humides (50 à 60% b.h) peuvent quelquefois s'égoutter au travers des mailles de la claie sans que l'eau ne soit retenu à sa surface, ce qui n'est pas le cas pour les dispositifs non perforés (tôle ; bâche ; aire cimentée et bitume). Ces derniers dispositifs, en plus d'être susceptibles de retenir l'eau à leur surface dans les toutes premières heures de séchage, n'autorisent que le mouvement horizontal de l'air.

Quant aux propriétés thermodynamiques des dispositifs utilisés, il faut noter qu'à la différence de la claie, les dispositifs tôle ; bâche ; aire cimentée et bitume peuvent être assimilés à des corps «chauds» qui s'échauffent sous l'effet croissant de l'intensité du rayonnement solaire au cours de la journée. Cette dernière observation est plus significative surtout au niveau du dispositif bitume qui sèche en premier après la serre expérimentale. En effet, le bitume, comme un corps «chaud», absorbe beaucoup le rayonnement solaire et s'échauffe fortement. L'air à son contact se réchauffe et réchauffe à son tour les fèves. Ainsi, dans le cas du séchage en couche mince à l'air libre, la conductivité thermique du matériau de séchage a une contribution non négligeable dans la réduction de la teneur en eau des fèves. Dans le cas du séchage sous serre, comme l'ont constaté plusieurs auteurs (**Drosrier, 1963 ; Daguinet, 1985 ; Cruz *et al.*, 1988 ; Benkhelfellah *et al.*, 2005**), le produit (placé sous une couverture transparente) et l'air

sont plus chauds du fait de l'effet de serre («piégeage» de la chaleur du soleil) et des faibles mouvements de l'air dans l'enceinte de séchage.

L'influence de la période de l'année sur le séchage des fèves de cacao en Côte d'Ivoire a été mentionnée par Cruz *et al.* (1988) et sur l'activité post récolte cacaoyère en général par bien d'autres auteurs (Bopaiah *et al.*, 1991 ; Pontillon, 1997). En effet, en petite campagne ou campagne intermédiaire, la période de la récolte coïncide avec la saison des pluies (mai ; juin ; juillet et août), les conditions climatiques deviennent défavorables au séchage solaire contrairement à la grande campagne (octobre ; novembre ; décembre et janvier).

Les différents sens de variation de la vitesse de séchage observés pendant les périodes de la journée, pourraient être dus à l'état initial des fèves de cacao bien avant leur mise au soleil, à la variation du pouvoir évaporatoire de l'air ambiant à la surface du produit pendant la journée de séchage et à l'intermittence du séchage des fèves de cacao imposée par la pratique du séchage solaire.

Au niveau de l'état initial des fèves, on constate qu'à chaque journée de séchage, les fèves ne présentent pas les mêmes disponibilités en eau. Cette «disponibilité» est fonction de la teneur en eau du produit, de sa forme, de son degré de maturité et de sa composition biochimique (Cruz *et al.*, 1988 ; Rozis *et al.*, 1995 ; Augier, 1999). Au premier jour de séchage, plus précisément dans la toute première heure de séchage, l'eau dans les fèves est plus disponible car sa teneur est élevée (50 à 60% b.h), elle s'évapore rapidement. Cette évaporation nécessite peu d'énergie (Rozis *et al.*, 1995). L'évaporation de cette eau a pour conséquence, l'augmentation de la vitesse de séchage observée dès la première heure de séchage sur tous les dispositifs. A mesure que le séchage se déroule, la disponibilité de l'eau diminue. L'eau est d'avantage retenue par les constituants du produit et son évaporation à la surface du produit se fait difficilement et nécessite plus d'énergie, d'où la diminution progressive de la vitesse de séchage observée après la première heure de séchage au premier jour.

Les jours suivants, l'évolution de la vitesse de séchage des fèves est généralement influencée par le pouvoir évaporatoire de l'air ambiant. Comme l'ont souligné bien des auteurs (Guinebault, 1986. ; Rozis *et al.*, 1995), lorsque l'air est réchauffé, son humidité relative diminue et son pouvoir évaporatoire augmente (Rozis *et al.*, 1995 ; Nganhou *et al.*, 2003). En effet, au cours de la journée (entre 10 h et 13 h), avec le réchauffement de

l'air à la surface du produit, dû aux rayonnements solaires, l'eau affluant à la surface des fèves est continuellement évacuée sous l'effet du gradient de l'humidité entre l'air et le produit entraînant une augmentation de la vitesse de séchage. En revanche, dans l'après midi (généralement après 13 h ou 14 h), avec la réduction progressive de l'intensité du rayonnement solaire (**Touati et al., 2006**), l'air est de moins en moins chaud, quelquefois refroidi et son pouvoir évaporatoire diminue. Ceci a pour conséquence une diminution de la vitesse de séchage. Ce phénomène va se reproduire chaque jour de séchage, mais de plus en plus lentement car freiné par les cellules «qui ont tendance à retenir l'eau». Les dernières humidités deviennent alors plus difficiles à retirer que les premières car nécessitant plus d'énergie comme cela a été prouvé précédemment au niveau de la chaleur de désorption pour des faibles teneurs en eau des fèves. L'échange entre l'air et le produit tend vers une limite liée aux conditions de séchage et donnée par les isothermes de desorption (**Cruz et al., 1988 ; Rozis et al., 1995**).

Outre l'état initial des fèves et le pouvoir évaporatoire de l'air ambiant, la vitesse de séchage est également influencée par l'alternance entre le séchage le jour et la relaxation du produit la nuit. Cette opération est qualifiée de séchage intermittent. Le jour, le séchage est réalisé diminuant la teneur en eau à la surface du produit, puis le séchage est interrompu bien avant la nuit. Les fèves sont alors laissées au repos pendant toute la nuit. Ceci a pour conséquence de favoriser une homogénéisation de la teneur en eau dans le produit. D'où une augmentation de la teneur en eau à la surface du produit et donc de l'activité de l'eau en surface. Ainsi, on observe une vitesse de séchage plus élevées à la reprise (**Ablan, 1985 ; Courtois et al., 1989 ; Laguerre et al., 1989**).

L'analyse des courbes de vitesse de séchage, a mis en évidence que les phases de mise en température et de séchage à vitesse constante n'ont pas été observées. Comme l'ont remarqué d'autres auteurs (**Bimbenet, 1978 ; Moyne, 1985 ; Silou et al., 1991 ; Ratti et al., 1992 ; Kechaou et al., 1996 ; Al Hodali et al., 1997 ; Lavialle et al., 1997 ; Yaldyz et al., 2001 ; Nganhou et al., 2003 ; Lahsasni et al., 2004**), les produits biologiques sèchent généralement à allure décroissante. L'explication proposée par ces

auteurs réside dans le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface des produits. Il convient de préciser que cette analyse intègre l'idée que les fèves de cacao ont été préalablement fermentées donc ne sont plus dans leur état d'hydratation saturée (turgescence). Ainsi, dès leur mise au soleil, le séchage des fèves de cacao présente directement une période de séchage à vitesse décroissante. Durant cette phase, la vitesse de séchage diminue lentement jusqu'à ce que la teneur en eau du produit atteigne une teneur en eau d'équilibre pour laquelle l'activité de l'eau du produit est égale à l'humidité relative de l'air ambiant (**Bimbinet *et al.*, 2002**).

3.4.4 CONCLUSION PARTIELLE

Les différences de durée de séchage notées au niveau des dispositifs, dans les mêmes conditions expérimentales, pourraient être liées à l'état de surface et aux propriétés thermodynamiques des matériaux utilisés pour le séchage. La claie présente un avantage car il y a à ce niveau plus de convection et de contact entre l'air et le produit. Ce phénomène est plus prononcé avec la claie sous serre où les conditions sont plus chaudes et plus sèches, donc provoquant un séchage de courte durée.

Les courbes de vitesse de séchage des fèves de cacao comprennent une seule phase : la phase à allure décroissante. Par conséquent, la teneur en eau critique est égale à la teneur en eau initiale.

Les courbes de cinétique étant déterminées, il convient de les reproduire par des modèles en coordonnées réduites soit à partir de la vitesse de séchage ou de la teneur en eau.

3.5 MODELES DE COURBE CARACTERISTIQUE DE SECHAGE

Ce paragraphe présente et exploite les résultats de la modélisation de la vitesse de séchage en coordonnée réduite des fèves de cacao à l'air libre et sous serre expérimentale.

3.5.1 ANALYSE DES PARAMETRES STATISTIQUES

La modélisation de la courbe caractéristique de séchage des fèves de cacao a été formulée selon l'expression suivante :

$$-\frac{dX}{dt} = \left(-\frac{dX}{dt} \right)_i (A_1 X_r + A_2 X_r^2 + A_3 X_r^3) \quad (2.12)$$

Les coefficients A_1, A_2 et A_3 sont disponibles seulement quand les caractéristiques de l'air restent constantes. En effet, les études précédentes (paragraphe 3.2) ont montré que les variations de la température, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air sont faibles. Elles peuvent être supposées constantes.

Dix séries d'essais prises de façon aléatoire ont été utilisées pour la construction des modèles (tableau III.8).

Le tableau III.8 donne les résultats des valeurs des coefficients A_i identifiées à chaque essai de séchage, suivis de l'erreur EQM et de la première vitesse de séchage en phase décroissante.

A l'air libre, des valeurs moyennes de 0,6254 ; -0,3920 et 0,7052 peuvent être associées respectivement aux coefficients A_1, A_2 et A_3 pour simuler l'ensemble des essais. Sous la serre expérimentale, les valeurs moyennes des coefficients A_1, A_2 et A_3 sont respectivement de 0,9636 ; -0,2335 et 0,1343 pour l'ensemble des essais.

La connaissance des valeurs des coefficients A_i permet de prévoir l'évolution de la teneur en eau réduite X_r du produit à un instant t quelconque par intégration de l'équation de la courbe caractéristique de séchage (Equation 2.12). La teneur en eau X du produit est ensuite déduite de l'expression de la teneur en eau réduite X_r .

Tableau III.8 : coefficients du modèle à chaque essai et les premières vitesses en phase décroissante

ESSAI	A l'air libre					Sous serre expérimentale				
	A1	A2	A3	EQM	$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$ (%kg eau/ kg ms.h)	A1	A2	A3	EQM	$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$ (%kg eau/ kg ms.h)
1	0,9743	-2,0787	2,0528	0,0027	26,38	1,3855	-1,4166	0,9619	0,0019	14,4548
3	0,2592	0,1841	0,4892	0,0027	31,71	1,4893	-1,8386	1,3285	0,0021	14,1061
4	0,6665	-1,3716	1,6173	0,0036	29,81	0,8528	1,3269	-1,3755	0,0056	13,5410
7	0,6409	-0,9497	1,2221	0,0044	29,72	0,5613	0,2047	-0,0437	0,0045	16,2106
14	0,3492	0,6785	-0,0797	0,0041	14,70	0,7194	-0,0708	0,2626	0,0036	15,5840
16	0,5423	0,7342	-0,3485	0,0034	13,49	0,8265	-0,2310	0,1768	0,0036	13,8888
17	0,4887	0,7886	-0,3945	0,0039	13,56	0,6118	0,1632	0,0365	0,0034	15,0520
19	0,7814	-0,6670	0,8658	0,0059	17,44	1,2286	-0,8237	0,4320	0,0024	14,5375
20	0,7695	-0,5886	0,7842	0,0064	16,47	0,8745	0,6040	-0,5077	0,0009	12,1611
21	0,7819	-0,6512	0,8432	0,0061	16,95	1,0869	-0,2532	0,0707	0,0013	13,3493
Moyenne	0,6254	-0,3920	0,7052	0,0043	21,02	0,9636	-0,2335	0,1343	0,0029	14,29
Ecart type	0,2184	0,9681	0,8130	0,0014	7,44	0,3204	0,9332	0,7419	0,0015	1,16

Tableau III.9 : Valeurs des paramètres statistiques et des coefficients de séchage des modèles mathématiques déterminés par la méthode de régression

N° du modèle	Mode de séchage	Coefficients du modèle	Coefficients de corrélation (r)	RMSE	t ²
1	A l'air libre	A1 = 0,6254 A2 = -0,3920 A3 = 0,7052	0,939	0,0697	4,893 x 10 ⁻³
2	Sous serre	A1 = 0,9636 A2 = -0,2335 A3 = 0,1343	0,957	0,0660	4,390 x 10 ⁻³

L'analyse des paramètres statistiques (r , RMSE et t²) respectivement à l'air libre et sous serre montre que les résultats sont satisfaisants et restent dans le même ordre de grandeur

sur les deux modes de séchage (Tableau III.9). Toutefois, les résultats restent meilleurs au niveau du séchage sous serre.

3.5.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE

Les teneurs en eau pour les différents essais de séchage sont transformées en teneurs en eau réduites X_r et les vitesses de séchage en vitesse de séchage normées $f(X_r)$ (Figures III.26 et III.27). Ces figures présentent une dispersion plus ou moins importante de points expérimentaux autour d'une courbe moyenne. Cette courbe représente la courbe caractéristique de séchage (CCS) des fèves de cacao dans les conditions d'étude.

On peut observer sur les figures III.22 et III.23 des valeurs négatives des teneurs en eau réduite X_r , lorsque le séchage tire à sa fin. Ce qui n'est pas conforme au domaine de validité de X_r . On observe aussi que les dispersions des cinétiques de séchage se situent plus au niveau de la zone des fortes teneurs en eau.

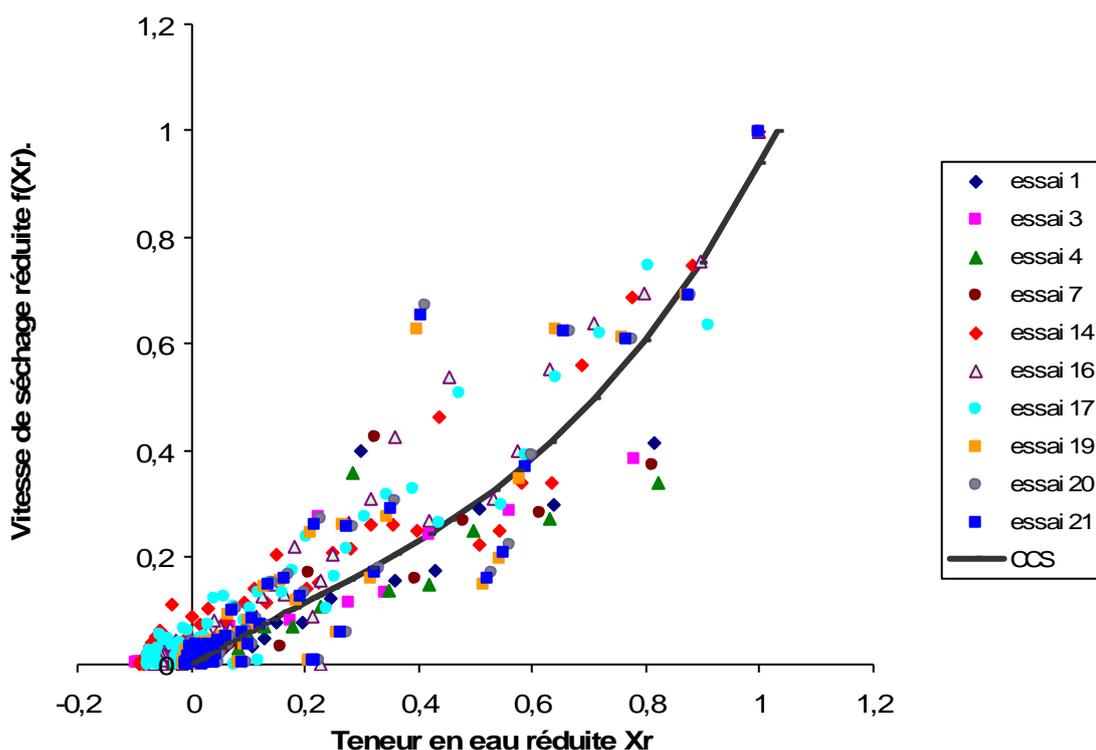


Figure III.22 : Courbe caractéristique du séchage des fèves de cacao obtenue pour différents essais à l'air libre

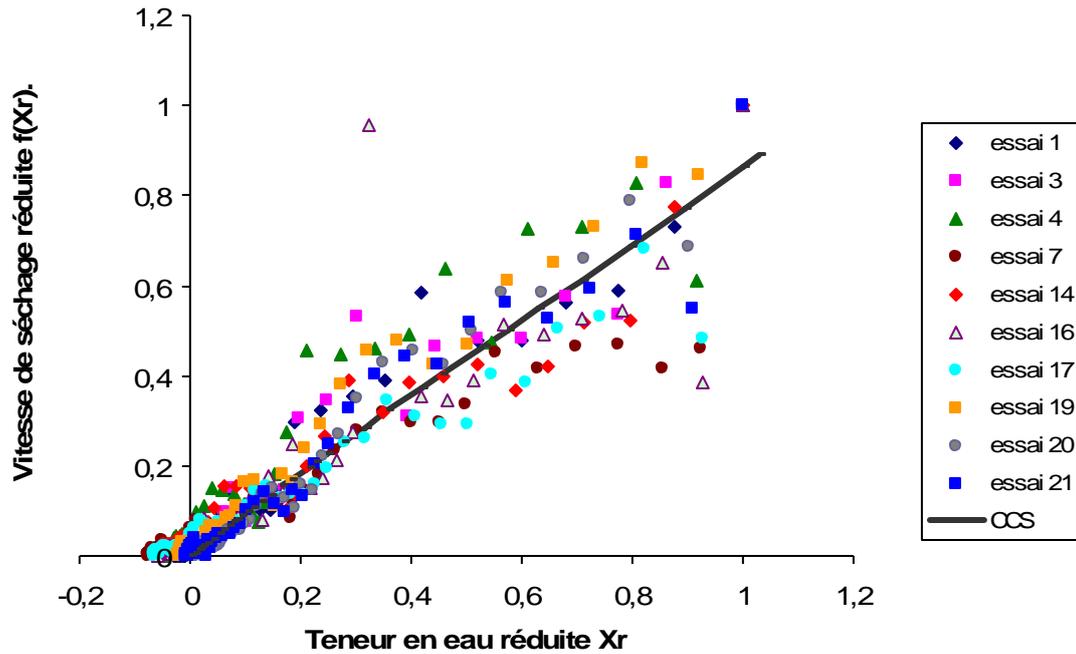


Figure III.23 : Courbe caractéristique du séchage des fèves de cacao obtenue pour différents essais sous serre

La performance des modèles à décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelle condition de l'air est illustrée à la figure III.24. La dispersion des points autour de la première bissectrice est très prononcée. L'ajustement entre valeurs théoriques et valeurs expérimentales ne semble donc pas satisfaisant. Les modèles obtenus ne peuvent ainsi permettre une meilleure prévision de la teneur en eau des fèves de cacao au cours du séchage.

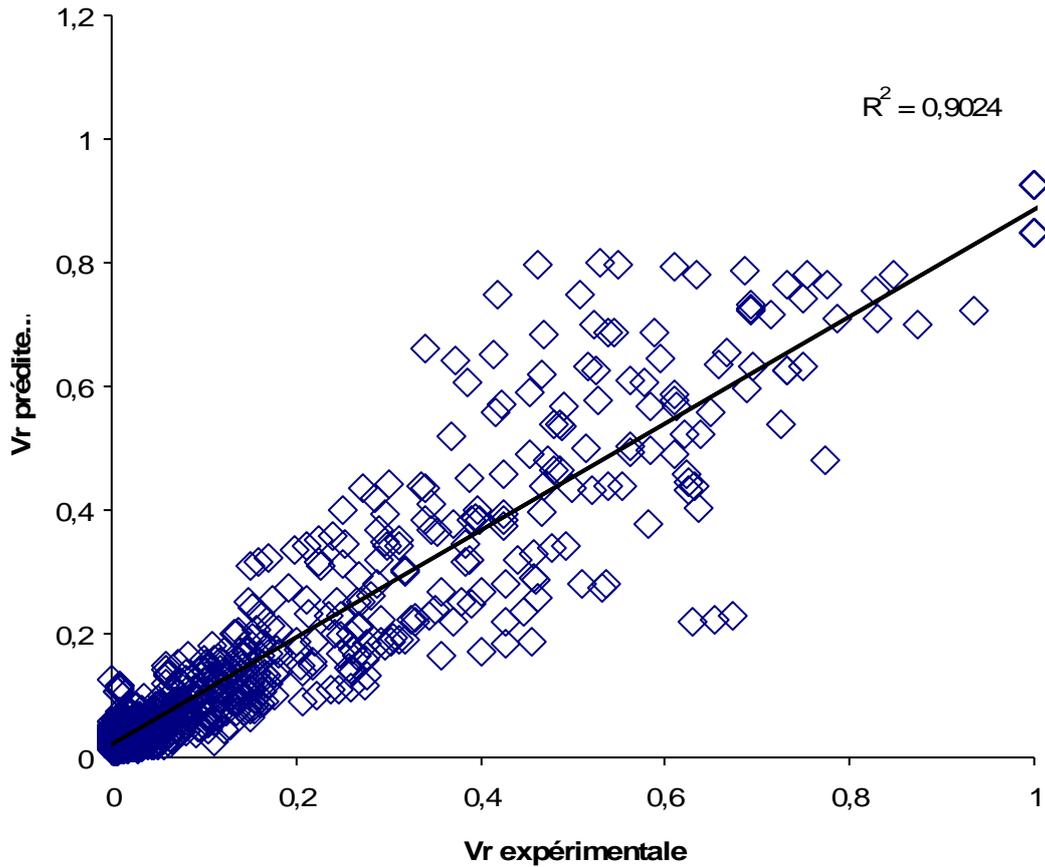


Figure III.24 : Comparaison des valeurs expérimentales et prédites des vitesses réduites pour différents essais de séchage à l'air libre et sous serre

3.5.3 DISCUSSION

Les résultats relatifs aux paramètres statistiques r , $RMSE$ et t^2 sont théoriquement adaptés pour l'utilisation des modèles de CCS dans la prévision de la cinétique de séchage. Néanmoins, les dispersions des cinétiques autour des courbes caractéristiques de séchage laissent apparaître quelques insuffisances de ces modèles à reproduire l'ensemble des cinétiques de séchage obtenues expérimentalement à l'air libre et sous serre. Il en est de même des observations faites sur la droite de régression.

Plusieurs raisons peuvent expliquer les dispersions des cinétiques autour des courbes caractéristiques de séchage au niveau de la zone des fortes teneurs en eau.

Talla *et al.* (2001), Noumi *et al.* (2004) et Touati (2008) ont réalisé avec succès respectivement la modélisation des fruits tropicaux (banane ; mangue) ; de l'ailé et des feuilles de la menthe par des CCS. A la différence de nos travaux, ceux-ci ont travaillé pour chaque essai de séchage dans des conditions contrôlées de température, d'humidité relative et de vitesse de l'air. Ainsi, le mode de séchage pratiqué pourrait en parti expliquer les dispersions observées. Cependant, Simal *et al.* (1996) et Aghfir *et al.* (2008) ont réalisé respectivement les CCS de la menthe et des pois verts dans des conditions maîtrisées. Ils ont pu constater de fortes dispersions des cinétiques autour des CCS. Pour eux, l'explication résiderait dans le fait que, en coordonnées réduites, les vitesses de séchage se confondent au départ alors que les vitesses initiales de séchage ne sont pas les mêmes pour tous les essais

Il a été remarqué la valeur de plus en plus négative prise par la teneur en eau réduite X_r quand le séchage tire à sa fin. L'explication se trouverait dans l'utilisation des teneur en eau d'équilibre X_{eq} dans le calcul de X_r . En effet, il faut rappeler que les études précédentes relatives aux isothermes de sorptions du cacao ont montrées qu'il existe une relation entre l'humidité relative de l'air et la teneur en eau d'équilibre X_{eq} suivant la formule d'Oswin :

$$X_{eq} = k \left(\frac{HR/100}{1 - HR/100} \right)^n \quad (3.2)$$

D'après cette relation, la teneur en eau d'équilibre X_{eq} pour les fèves de cacao devrait être de l'ordre de 14.10^{-2} kg eau / kg ms pour des conditions moyennes de séchage à l'air libre (la température T de l'air vaudrait 30°C et l'humidité relative HR de l'air serait de 66% avec les constantes d'Oswin de 0,1092 ; 0,3947 respectivement pour k et n). Or, on considère que les fèves de cacao sont sèches lorsque la teneur eau résiduelle X est de 7,5 % base humide, soit 8 % base sèche (Nganhou et Nganya, 2003) ce qui correspond à

$8 \cdot 10^{-2}$ kg eau / kg ms. Ainsi, lorsque le séchage tire à sa fin, les quantités $(X - X_{eq})$ deviennent négatives d'où les valeurs négatives des teneurs en eau réduite X_r .

Pour cette raison, plusieurs auteurs (**Diamante et al., 1993 ; Yaldyz et al., 2001 ; Midilli et al., 2003 ; Haoua, 2007**) confrontés à cette réalité, ont adapté la simplification de

l'équation $X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_i - X_{eq}}$ (Equation 2.6) à une forme plus simple, $X_r = \frac{X}{X_i}$.

L'explication résiderait dans le fait que la teneur en eau d'équilibre X_{eq} est déterminée expérimentalement dans des conditions constantes d'humidité relative et de température, alors que l'humidité relative HR peut fluctuer énormément sur un système réel de séchage. Par ailleurs, la valeur X_{eq} exprimant la teneur en eau limite à laquelle on tend en fin de séchage, est négligeable devant les autres teneurs en eau (**Haoua, 2007**).

Le tableau III.10 donne, pour l'expression simplifiée X_r , les nouvelles valeurs des coefficients A_1, A_2 et A_3 des modèles mathématiques de la courbe caractéristique de séchage à l'air libre et sous serre. Les représentations graphiques dans ces conditions sont illustrées dans les figures III.25 à l'air libre et III.26 sous serre.

Tableau III.10 : Nouvelles estimations des valeurs des coefficients A_1, A_2 et A_3

	A l'air libre				Sous serre expérimentale			
	A1	A2	A3	EQM	A1	A2	A3	EQM
Moyenne	0,10	0,68	0,60	0,00	0,42	1,04	-0,61	0,00
Ecart type	0,20	0,43	0,28	0,00	0,23	1,09	0,87	0,00

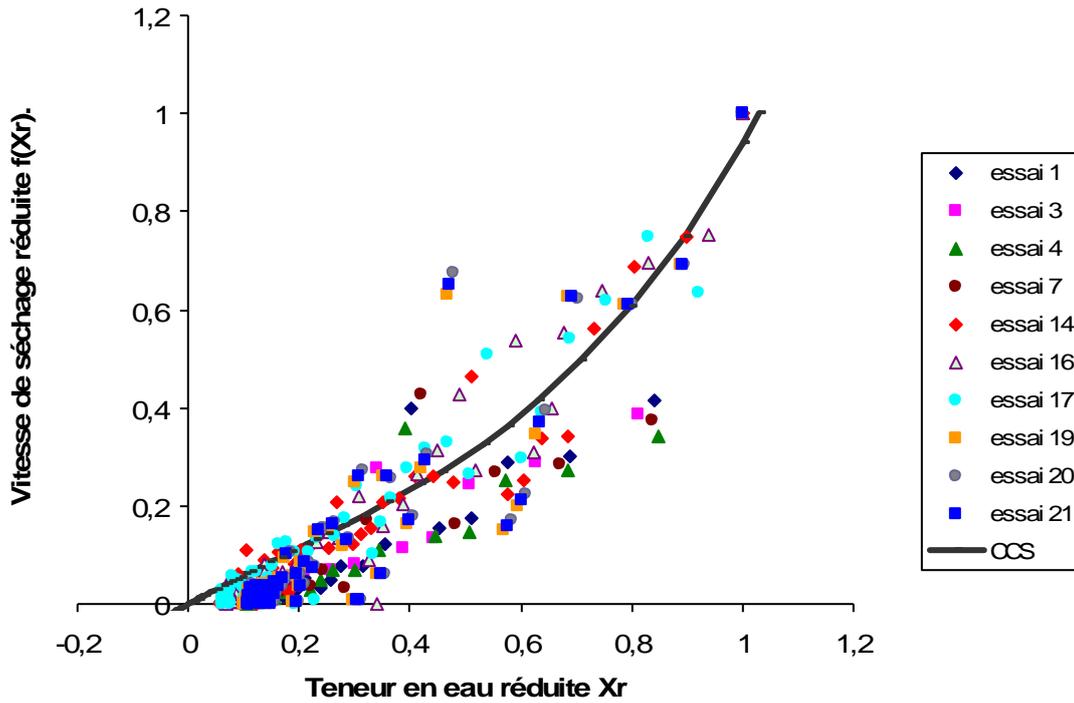


Figure III.25 : Courbe caractéristique du séchage des fèves de cacao reprise pour X_r , simplifiée pour des essais à l'air libre

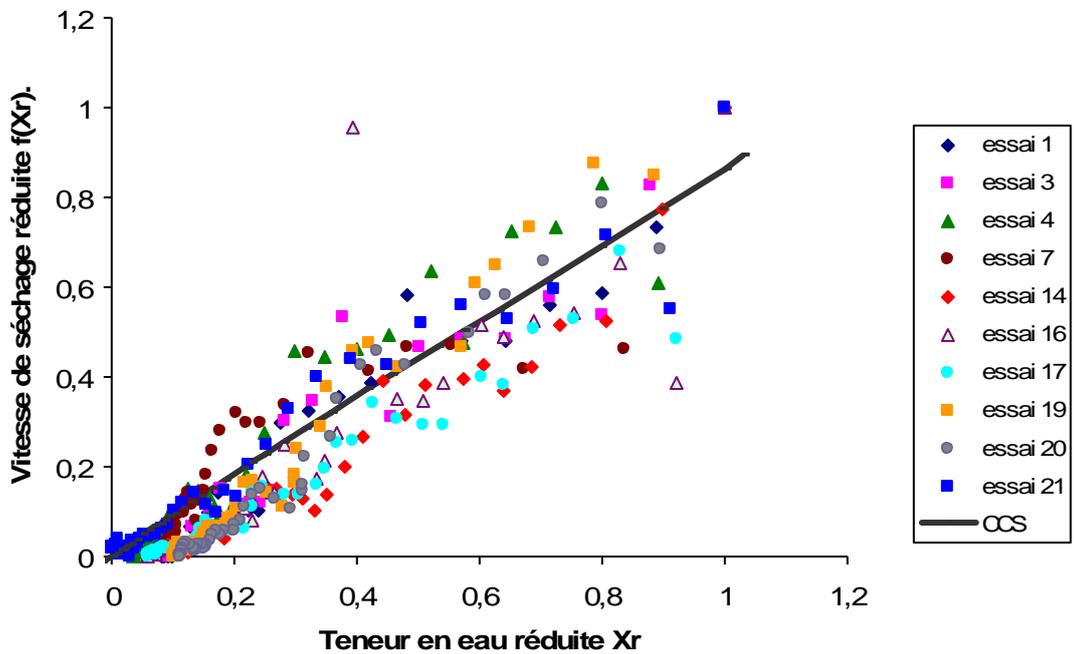


Figure III.26 : Courbe caractéristique du séchage des fèves de cacao reprise pour X_r , simplifiée pour des essais sous serre

3.5.3 CONCLUSION PARTIELLE

Selon les résultats obtenus dans cette étude, les modèles de CCS ne peuvent être utilisés pour prévoir de façon satisfaisante le séchage à l'air libre et sous serre des fèves de cacao malgré de bons résultats statistiques obtenus. La raison est due à un mauvais ajustement entre valeurs théoriques et expérimentales. C'est pourquoi il est envisagé dans la suite du travail, d'autres types de modèles en l'occurrence les modèles empiriques dont les coefficients de séchage sont susceptibles d'incorporer les caractéristiques de l'air dans leur formulation.

Afin d'éviter d'avoir des valeurs négatives de la teneur en eau réduite X_r en fin de séchage, il conviendrait d'utiliser l'expression simplifiée de la teneur en eau réduite dans l'écriture des modèles empiriques.

3.6 MODELES EMPIRIQUES

Contrairement aux CCS qui fournissent une modélisation de la vitesse de séchage réduite, les résultats présentés et exploités dans ce paragraphe sont relatifs à la modélisation de la teneur en eau réduite des fèves de cacao obtenue par ajustement à un modèle empirique. Aussi, la validation de ce modèle d'un point de vue expérimental y est-elle abordée.

3.6.1 ANALYSE DES PARAMETRES STATISTIQUES

Les figures III.27 et III.28 présentent l'évolution au cours du temps de la teneur en eau réduite sous sa forme simplifiée respectivement à l'air libre et sous serre. On observe la même évolution pour ces modes de séchage, avec cependant des teneurs en eau réduite plus basses ou presque nulles au niveau de la serre lorsque le séchage tend à sa fin.

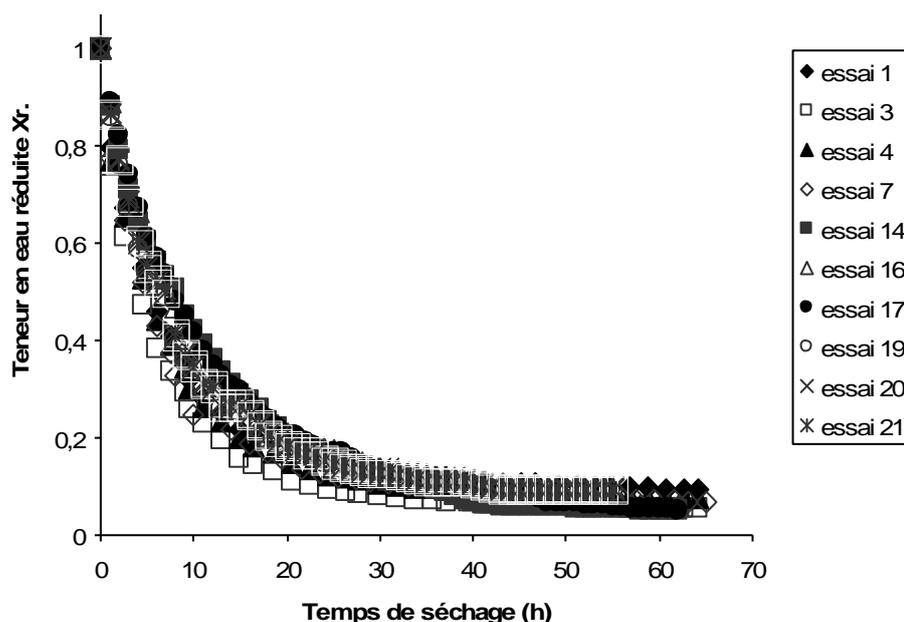


Figure III.27 : Evolution au cours du temps de la teneur en eau réduite à l'air libre

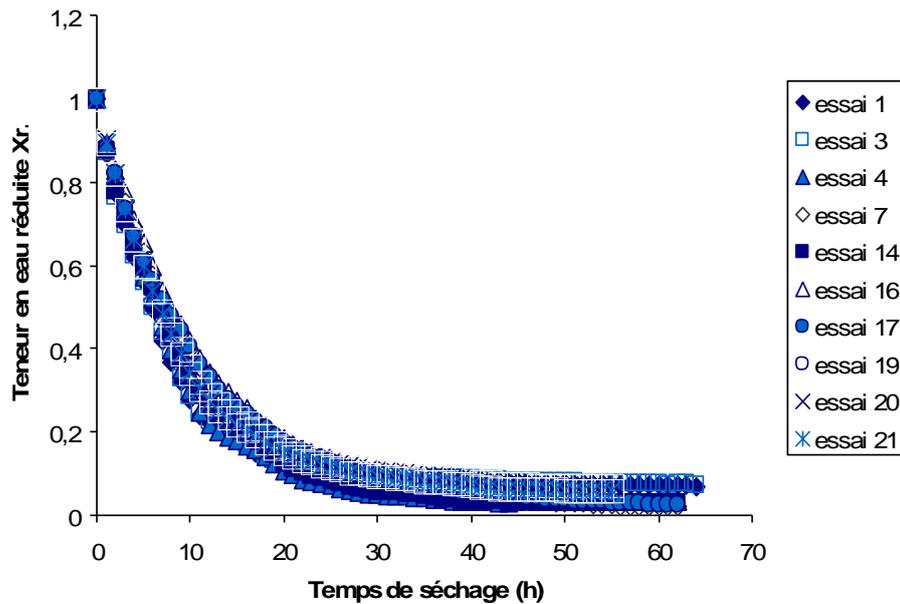


Figure III.28 : Evolution au cours du temps de la teneur en eau réduite sous serre

Les résultats statistiques utilisés pour évaluer la cohérence des modèles empiriques à décrire ces courbes de cinétique de séchage sont donnés dans les tableaux III.11 et III.12.

A l'air libre, on obtient des valeurs de 0,794 à 0,988 pour le coefficient de corrélation r ; de 0,0128 à 3,0058 pour le $RMSE$ et de $0,144 \cdot 10^{-3}$ à $8146,2 \cdot 10^{-3}$ pour le t^2 . Le modèle Logarithmique et le modèle de Verma prennent la valeur de r la plus élevée (0,988). Cependant, le modèle Logarithmique a l'avantage de donner des valeurs plus basses de $RMSE$ (0,0128) et du t^2 ($0,144 \cdot 10^{-3}$).

Sous serre, les résultats statistiques varient de 0,793 à 0,994 pour le coefficient de corrélation r , de 0,0012 à 2,7111 pour $RSME$ et de $0,020 \cdot 10^{-3}$ à $7281,9 \cdot 10^{-3}$ au niveau du t^2 . Le modèle Logarithmique prend la valeur de r (0,994) la plus élevée. Les valeurs les plus basses de $RMSE$ et du t^2 sont enregistrées respectivement au niveau du modèle modifié de Henderson et Pabis ($0,0012$) et du modèle à deux Termes ($0,020 \cdot 10^{-3}$).

Tableau III.11 : Résultats statistiques et coefficients de séchage des modèles par la méthode de régression pour le séchage à l'air libre

N° du modèle	Nom du modèle	Coefficients du modèle	Coefficients de corrélation (r)	RMSE	t ²
1	Newton	k = 0,0968	0,986	0,0608	3,456 x 10 ⁻³
2	Page	k = 0,2334	0,987	0,0245	0,566 x 10 ⁻³
3	Page modifié I	n = 0,6564 k = 0,1065	0,987	0,0245	0,566 x 10 ⁻³
4	Henderson et Pabis	n = 0,6564 a = 0,7834	0,969	0,0446	1,869 x 10 ⁻³
5	Logarithmique	k = 0,0697 a = 0,8676	0,988	0,0128	0,144 x 10⁻³
6	Deux terms	k = 0,1230 c = 0,0837 a = 0,4318	0,977	0,0519	2,500 x 10 ⁻³
7	Wang et Singh	k ₀ = 0,0797 b = 0,4318 k ₁ = 0,0797	0,926	0,1265	14,496 x 10 ⁻³
8	Thomson	a = -0,0508 b = 0,0006	0,97	3,0058	8146,2 x 10 ⁻³
9	Approche de diffusion	a = 0,6114 b = 7,8658	0,794	0,2899	80,647 x 10 ⁻³
10	Verma	a = -0,0001 k = -19,949 b = -8,6036	0,988	0,0146	0,197 x 10 ⁻³
11	Henderson et Pabis modifié	a = 0,2085 k = 0,0195 g = 0,1618	0,977	0,0519	2,51 x 10 ⁻³
12	Deux termes exponentiels	a = 0,2879 k = 0,0797 b = 0,2879 g = 0,0797 c = 0,2879 h = 0,0797	0,804	0,2797	74,807 x 10 ⁻³
13	Equation simplifiée de diffusion de Fick	a = -2,4016 k = -0,0022	0,979	0,0519	2,495 x 10 ⁻³
14	Page modifié II	a = 0,8637 c = 1132,3160 L = 118,0535	0,987	0,0274	0,677 x 10 ⁻³

Tableau III.12 : Résultats statistiques et coefficients de séchage des modèles par la méthode de régression pour le séchage sous serre

N° du modèle	Nom du modèle	Coefficients du modèle	Coefficients de corrélation (r)	RMSE	t ²
1	Newton	k = 0,0982	0,986	0,0362	1,315 x 10 ⁻³
2	Page	k = 0,1510 n = 0,8357	0,991	0,0264	0,706 x 10 ⁻³
3	Page modifié	k = 0,1015 n = 0,8357	0,990	0,0264	0,706 x 10 ⁻³
4	Henderson et Pabis	a = 0,9540 k = 0,0930	0,990	0,0345	1,2 x 10 ⁻³
5	Logarithmique	a = 0,9526 k = 0,1159 c = 0,0484	0,994	0,0075	0,055 x 10 ⁻³
6	Deux termes	a = 0,4770 k ₀ = 0,0930 b = 0,4770 k ₁ = 0,0930	0,990	0,0519	0,020 x 10⁻³
7	Wang et Singh	a = -0,0524 b = 0,0007	0,937	0,1096	12,177 x 10 ⁻³
8	Thomson	a = -3,2120 b = 4,1909	0,957	2,7111	7281,9 x 10 ⁻³
9	Approche de Diffusion	a = 0,0143 k = -0,0482 b = -3,8752	0,852	0,0128	0,166 x 10 ⁻³
10	Verma	a = 0,0526 k = -0,0051 g = 0,0951	0,991	0,0081	0,066 x 10 ⁻³
11	Henderson et Pabis modifiées	a = 0,3180 k = 0,0930 b = 0,3180 g = 0,0930 c = 0,3180 h = 0,0930	0,990	0,0012	1,208 x 10 ⁻³
12	Deux termes exponentiels	a = -2,4228 k = -0,0022	0,793	0,2761	76,902 x 10 ⁻³
13	Equation simplifiée de diffusion de Fick	a = 0,9540 c = 930,1073 L = 100,0007	0,979	0,0345	1,202 x 10 ⁻³
14	Page modifié II	k = 0,3481 n = 0,8356 L = 1,6031	0,992	0,0264	0,707 x 10 ⁻³

3.6.2 EFFET DES VARIABLES DE L'AIR

Pour expliquer l'effet des paramètres de l'air environnant sur la constante k (h^{-1}) et les coefficients a et c (adimensionnels) du modèle Logarithmique, ces derniers ont été corrélés aux paramètres de l'air environnant par une analyse de régression linéaire multiple. Les résultats des diverses régressions obtenues, au seuil de 5%, ont été examinés. Les régressions donnant des valeurs élevées du coefficient de corrélation r ont

été retenues. Les expressions analytiques de a , k et c en fonction des variables de l'air sont ensuite incluses dans la formulation du modèle Logarithmique. On obtient ainsi un modèle unique qui décrit l'évolution de la teneur en eau des fèves de cacao au cours du temps en fonction des contraintes de séchage (Température, Humidité relative et vitesse de l'air). Ce modèle se présente comme suit :

$$\left. \begin{aligned}
 X_r &= \frac{X}{X_i} = a \exp(-kt) + c \\
 \text{avec :} \\
 a &= 0,8969 + 0,0021T - 0,0917V & r &= 0,930 \\
 k &= -0,1576 + 0,0065T - 0,0006HR + 0,1272V & r &= 0,909 \\
 c &= 0,2015 - 0,0024T - 0,0019HR + 0,0866V & r &= 0,840 \\
 t &: \text{ temps d'exposition des fèves au soleil (h);} \\
 X &: \text{ teneur en eau à } t \text{ (\% kg eau / kg ms).}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

La consistance du modèle unique intégrant les contraintes de séchage est satisfaisante puisque les résultats statistiques donnent un coefficient de corrélation r de 0,995, et un $RMSE$ de 0,022 et un t^2 de $79 \cdot 10^{-3}$ toujours faibles.

La figure III.29 donne une illustration de l'évolution de l'ensemble des cinétiques expérimentales réalisées à l'air libre et sous serre, en comparaison à une courbe moyenne dont les valeurs a , k et c ont été calculées par la moyenne de l'ensemble des a_i , k_i et c_i des modèles relatifs à chaque essais. Cette courbe donne une bonne représentation de l'ensemble des essais de séchage.

Le domaine de validité des corrélations obtenues pour a , k et c est tel que les valeurs moyennes des caractéristiques de l'air ambiant au cours de la journée vérifient l'équation 3.5:

$$\left. \begin{aligned}
 28,46 \text{ }^\circ\text{C} &\leq T \leq 42,62 \text{ }^\circ\text{C} \\
 28 \% &\leq HR \leq 76,50 \% \\
 0,31 \text{ m/s} &\leq V \leq 1,21 \text{ m/s}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

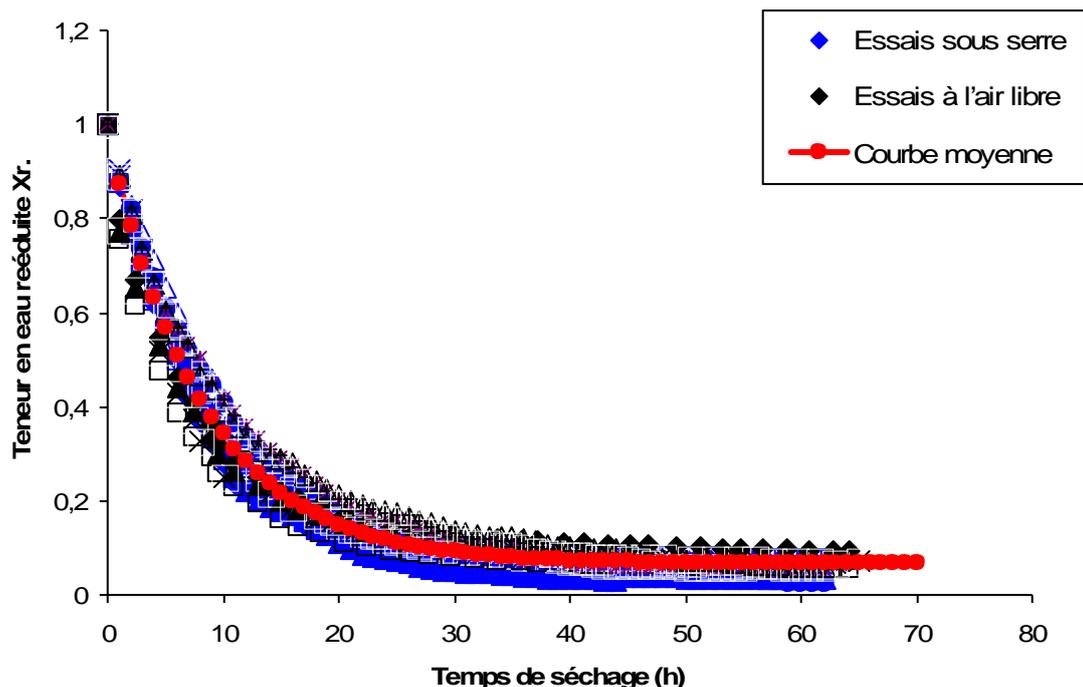


Figure III.29 : Comparaison entre des cinétiques expérimentales et une courbe moyenne

3.6.3 VALIDATION DU MODELE

La validation du modèle Logarithmique établi (Equation 3.4) a été faite en comparant les résultats expérimentaux de teneurs en eau et ceux simulés. Pour simuler un essai de séchage, les conditions opératoires de séchage au niveau expérimental (la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air) et les conditions initiales de la fève sont les données d'entrées du modèle.

3.6.3.1 Confrontation des résultats expérimentaux et prédits

La figure III.30 représente les comparaisons des résultats obtenus sur les dix essais (énumérés au tableau III.8 du paragraphe III.5.1) qui ont permis de construire le modèle. Cette figure montre une bonne qualité de l'ajustement entre les teneurs en eau réduites prédites et celles mesurées au cours des essais. On observe une faible dispersion des points ($X_{r,exp,i}$; $X_{r,pre,i}$) autour de la première bissectrice avec un coefficient de détermination R^2 de 0,990.

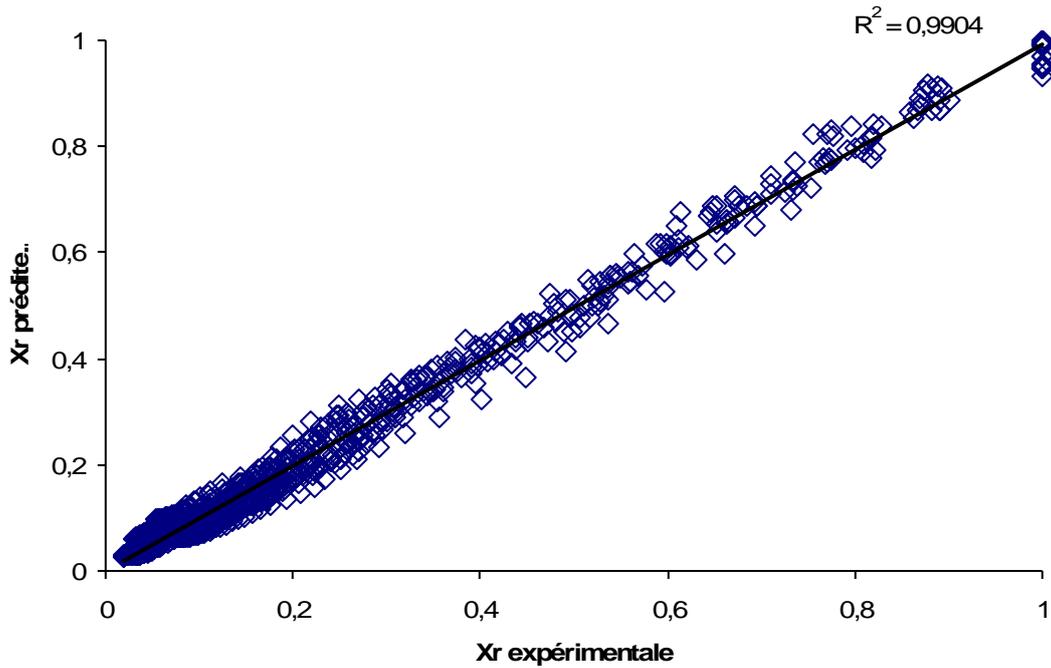


Figure III.30 : Comparaison des valeurs expérimentales et prédites des teneurs en eau réduites par le modèle Logarithmique pour différentes conditions de séchage à l'air libre et sous serre.

3.6.3.2 Simulation numérique

Dans cette phase de validation du modèle, on cherche à voir dans quelle mesure l'utilisation du modèle Logarithmique obtenu à partir des essais pourrait être étendue à d'autres essais de séchage. Ces essais doivent être réalisés dans des conditions proches que les précédents mais n'ayant pas été pris en compte pour la détermination du modèle.

Les essais 5 ; 9 ; 13 et 18, choisis de façon aléatoires, ont été utilisés pour cette simulation. Les résultats de simulation montrent un accord satisfaisant entre les valeurs simulées et les mesures expérimentales (Figures III.31 et III.32). Sous serre, la simulation donne des erreurs plus faibles avec une bonne coïncidence à la fin du séchage entre les valeurs simulées et expérimentales. Ce qui n'est pas toujours le cas à l'air libre. Les valeurs moyennes de l'erreur relative de déviation E (%) sont $15,18 \% \pm 6,41$ pour le séchage à l'air libre et $10,76 \% \pm 1,40$ pour le séchage sous serre.

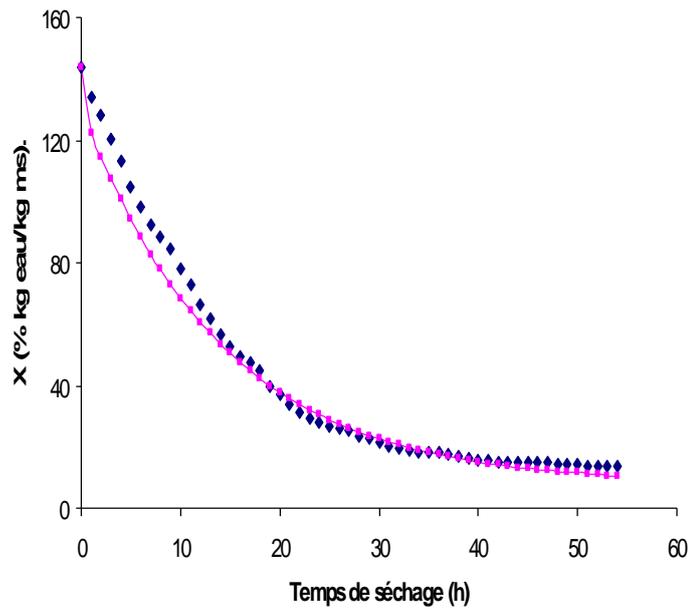
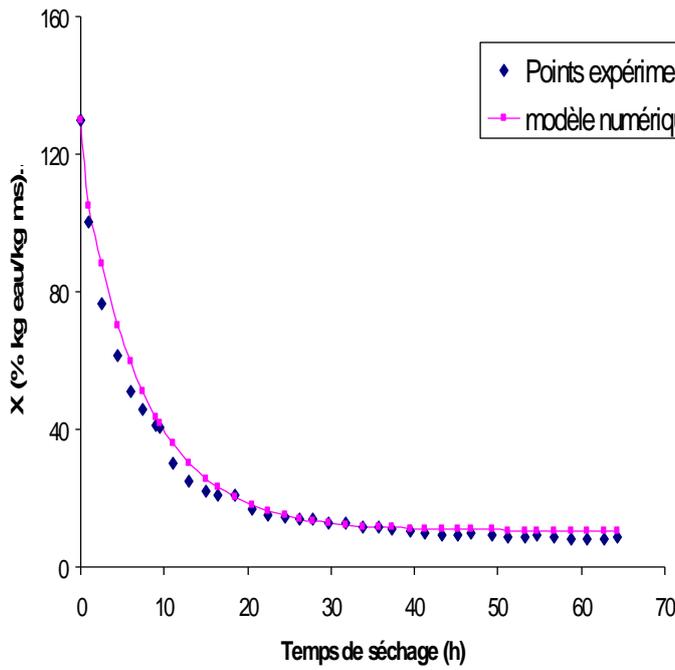


Figure III.31 a : Simulation de l'essai 5 ; Figure III.31 b : Simulation de l'essai 9 ;

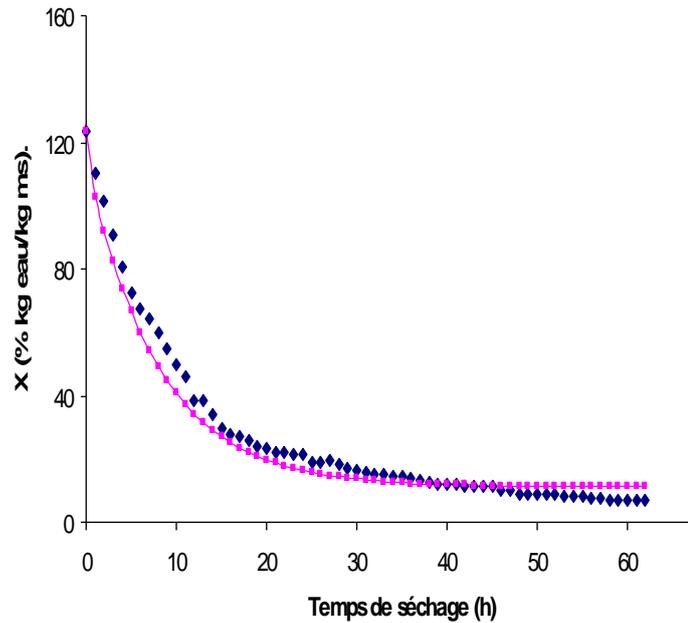
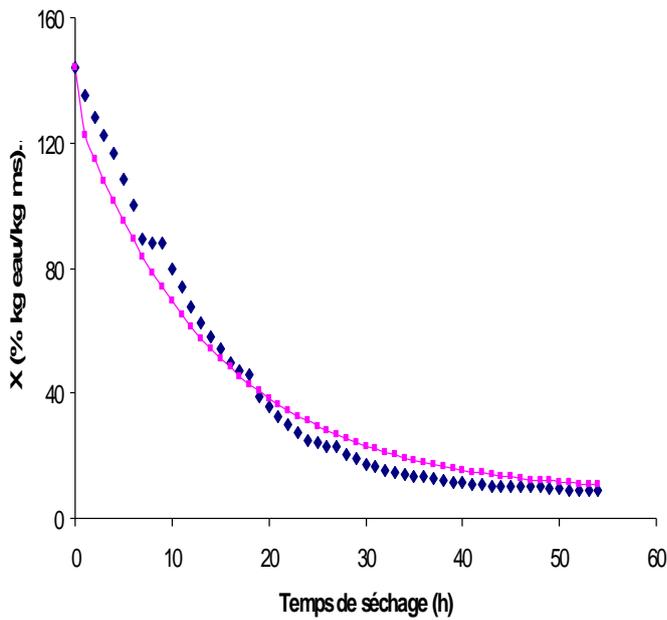


Figure III.31 c : Simulation de l'essai 13 ; Figure III.31 d : Simulation de l'essai 18

Figure III.31: Comparaison des valeurs simulées et expérimentales des essais à l'air libre

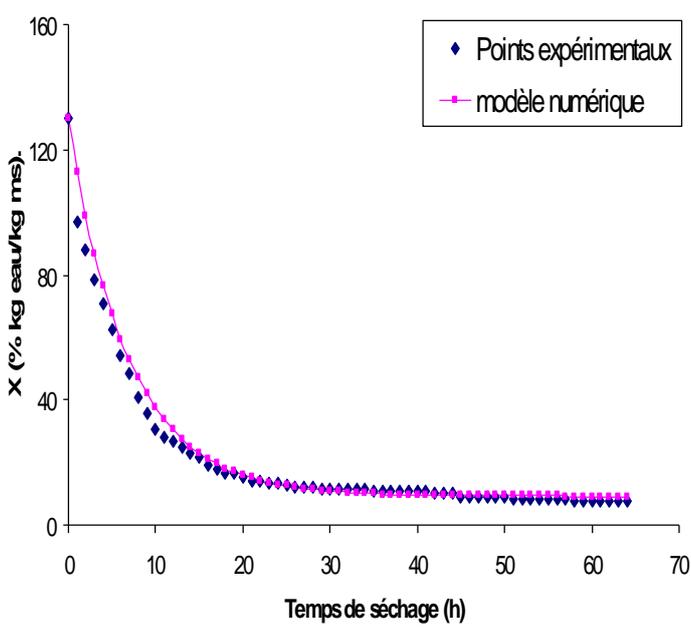


Figure III.32 a : Simulation de l'essai 5

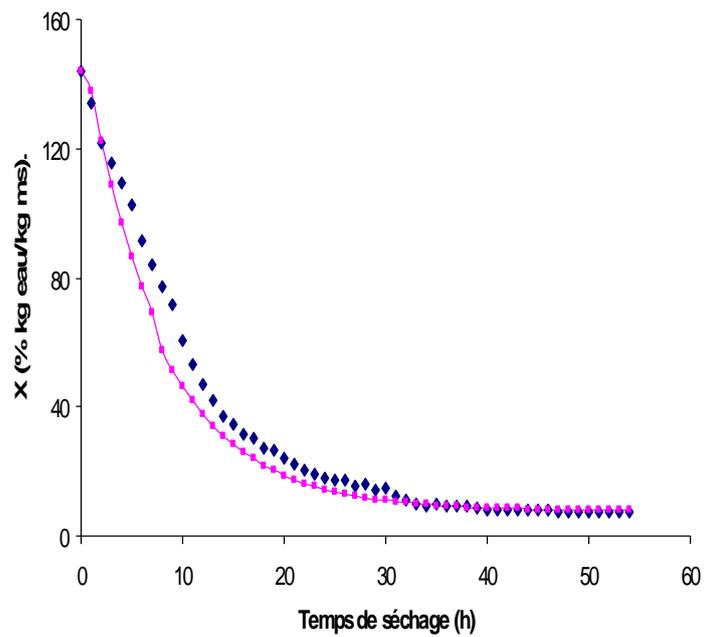


Figure III.32 b : Simulation de l'essai 9

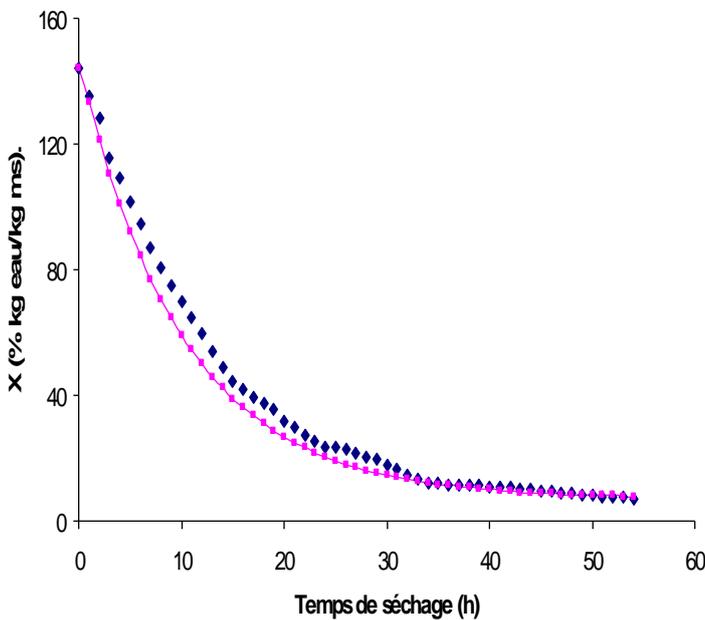


Figure III.32 c : Simulation de l'essai 13

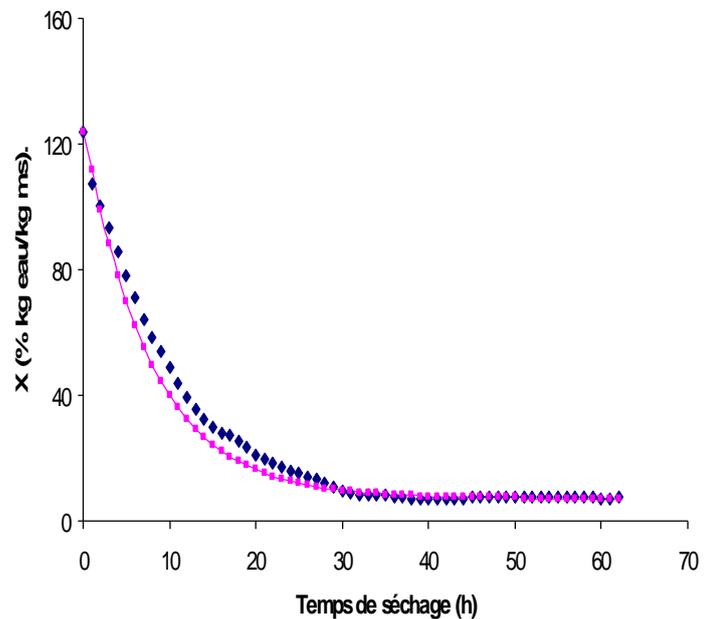


Figure III.32 d : Simulation de l'essai 18

Figure III.32: Comparaison des valeurs simulées et expérimentales des essais sous serre

3.6.4 DISCUSSION

L'analyse des résultats statistiques portant sur les quatorze (14) modèles empiriques, montre qu'à l'air libre, le modèle Logarithmique et le modèle de Verma ont présenté des coefficients de corrélation r (0,988) identiques et des valeurs faibles de $RMSE$ (0,0146 et 0,0128) et de t^2 ($0,197 \cdot 10^{-3}$ et $0,144 \cdot 10^{-3}$) de même ordre de grandeur. Néanmoins, le modèle Logarithmique convient le mieux pour toutes les conditions de l'air ambiant des deux modes de séchage. Ainsi donc, ce modèle pourrait bien permettre la représentation du comportement du séchage solaire des fèves de cacao. De plus, le modèle Logarithmique est d'une utilisation simple à cause de son expression analytique (**Yagcioglu et al., 1999**) qui favorise son acceptation dans les problèmes de modélisation de séchage (**Togrul et Pehlivan, 2003**). Il a été également possible de parfaire le modèle Logarithmique en une seule équation décrivant les courbes de séchage des fèves de cacao, avec un coefficient de corrélation r de 0,995 nettement supérieur à ceux des modèles Logarithmiques obtenus séparément. Cette performance pourrait s'expliquer par le fait que le modèle unique tient compte des caractéristiques de l'air de séchage au niveau de ses coefficients.

Des modèles semi empiriques intégrant les caractéristiques de l'air au niveau des coefficients ont été utilisés avec succès pour décrire le séchage de l'apricot avec une corrélation r de 0,994 (**Togrul et Pehlivan, 2003**) et le séchage des fraises avec une corrélation de 0,997 (**Kavak et Bicer, 2006**).

Les résultats statistiques satisfaisants obtenus au niveau du modèle Logarithmique unique montre la pertinence de l'effet des caractéristiques de l'air dans le déroulement du comportement du séchage. Contrairement aux modèles de courbes caractéristiques de séchage dont les coefficients de séchage n'ont aucune interprétation physique, le modèle semi empirique, notamment le modèle Logarithmique, considère au mieux la résistance au transfert d'humidité entre le produit et l'air ambiant au travers des coefficients de séchage (**Bruce, 1985 ; Parti, 1993 ; Ozdemir et Devres, 1999**).

Avec un coefficient de détermination R^2 de 0,990, le modèle Logarithmique a donné un très bon ajustement entre les résultats prédits et expérimentaux. De plus, les simulations ont montré un accord satisfaisant entre les valeurs simulées et

expérimentales ; même si à l'air libre, on a pu observer parfois un écart entre les résultats numériques et expérimentaux avec une erreur de déviation de $15,18\% \pm 6,41$. Le modèle Logarithmique peut être donc considéré comme validé par comparaison des données expérimentales et numériques des teneurs en eau des fèves de cacao. Les écarts observés à l'air libre sont raisonnables. A ce niveau, il y'a une instabilité des paramètres aérothermiques. Sous serre, le modèle Logarithmique a décrit de manière satisfaisante les cinétiques expérimentales avec une moyenne d'erreur de déviation de $10,76\% \pm 1,40$; valeur proche de celle obtenue par Noumi *et al.*(2004). En effet, Noumi *et al.* (2004), travaillant sur la modélisation de la déshydratation de la pulpe de l'aiélé dans un séchoir à circulation d'air chaud aux propriétés fixées et contrôlées, trouve une moyenne d'erreur de $10,029\% \pm 1,014$. Kouhila *et al.*(2002) considèrent qu'une valeur voisine de 10% est le reflet d'une bonne simulation des résultats obtenus expérimentalement.

3.6.5 CONCLUSION PARTIELLE

Le modèle Logarithmique est le modèle semi empirique qui décrit au mieux le comportement du séchage des fèves de cacao à l'air libre et sous serre. Ses coefficients phénoménologiques tiennent compte de l'effet pertinent des caractéristiques de l'air de séchage dans les domaines de validité du modèle. Cependant, Il ne prend pas en compte la résistance interne au transfert d'humidité représentée par le coefficient de diffusion. Toutefois, le modèle Logarithmique obtenu est d'un grand intérêt pratique car il permet de suivre et de prévoir la teneur en eau des fèves de cacao dans toutes les conditions de séchage inscrites dans son domaine de validité.

3.7 COEFFICIENT DE DIFFUSION

Ce paragraphe essaie d'élaborer un modèle diffusif après une analyse du coefficient de diffusion des fèves cacao pour différentes conditions de l'air de séchage.

3.7.1 EVOLUTION DU COEFFICIENT DE DIFFUSION

Le coefficient de diffusion effectif D a été calculé à partir de l'équation 2.15, en utilisant des pentes dérivées de la régression $\ln(X_r)$ en fonction du temps t et en supposant que les caractéristiques de l'air sont constantes à chaque essai. Ceci a conduit à l'obtention de la figure III.33. Cette figure présente l'évolution du coefficient de diffusion D en fonction de la teneur en eau réduite aux différentes températures et vitesses de l'air. Les courbes obtenues ont une forme concave orientée vers le bas. On note, sur toutes les courbes, que le coefficient de diffusion D est très faible en début de séchage. Puis, il augmente rapidement et atteint son maximum au bout d'une teneur en eau réduite moyenne de 0,35. Ceci pourrait correspondre à une durée moyenne de 10 h de séchage. Après ce maximum, le coefficient de diffusion est caractérisé par une décroissance de plus en plus lente jusqu'à la fin du séchage où sa valeur semble être stable autour de $3,12 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. L'ensemble des points moyens du coefficient de diffusion D est compris dans l'intervalle $[3,78 \cdot 10^{-11} ; 5,38 \cdot 10^{-11}] \text{ m}^2/\text{s}$.

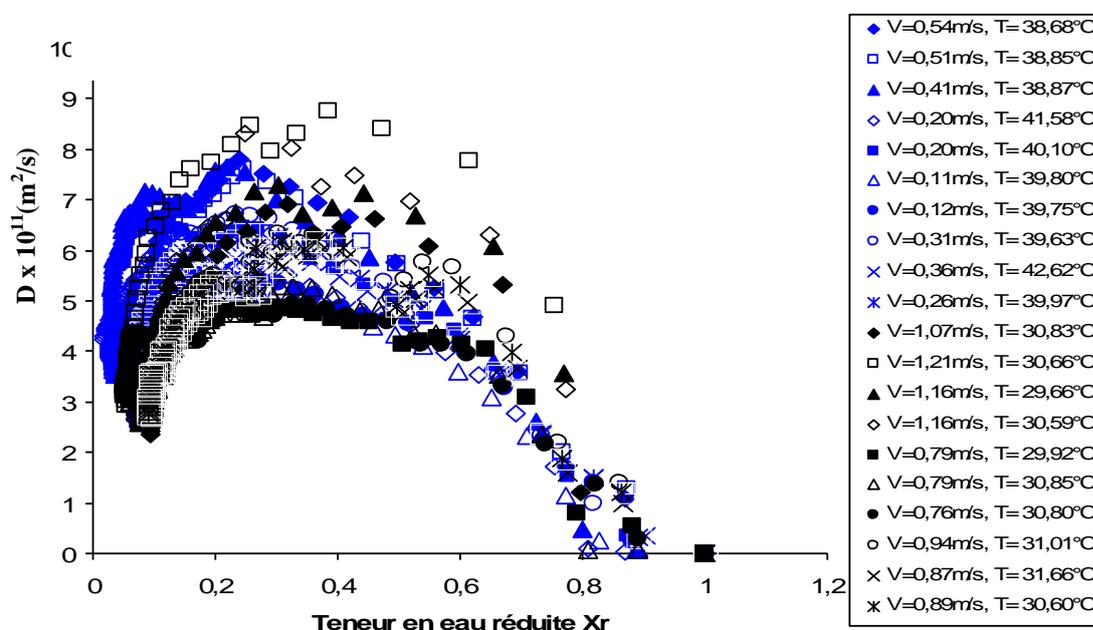


Figure III.33 : Evolution du coefficient de diffusion au cours du temps en eau réduite

3.7.2 EFFETS DES VARIABLES DE L'AIR

Les figures III.34, III.35 et III.36 représentent les variations du coefficient de diffusion moyen respectivement dans la gamme moyenne de températures, des humidités relatives et de vitesses de l'air présentée en équation 3.5 rappelée ci-dessous :

$$\left. \begin{array}{l} 28,46 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 42,62 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ 28 \% \leq HR \leq 76,50 \% \\ 0,31 \text{ m/s} \leq V \leq 1,21 \text{ m/s} \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

Il n'est pas aisé de donner une allure générale de l'évolution du coefficient de diffusion dans la gamme des valeurs des caractéristiques de l'air.

Au niveau de l'humidité relative et de la vitesse de séchage, on ne note aucune similitude de l'allure de la diffusion. Toutefois, la diffusion reste plus élevée au cours du séchage sous serre qu'à l'air libre où les humidités relatives et les vitesses de séchage ont été relativement élevées (Figure III.34 et III.35).

On observe une tendance de la diffusion à augmenter avec la température de façon linéaire (Figure III.36). Ainsi au niveau de la serre, où les températures restent élevées, la diffusion est aussi élevée contrairement au séchage à l'air libre.

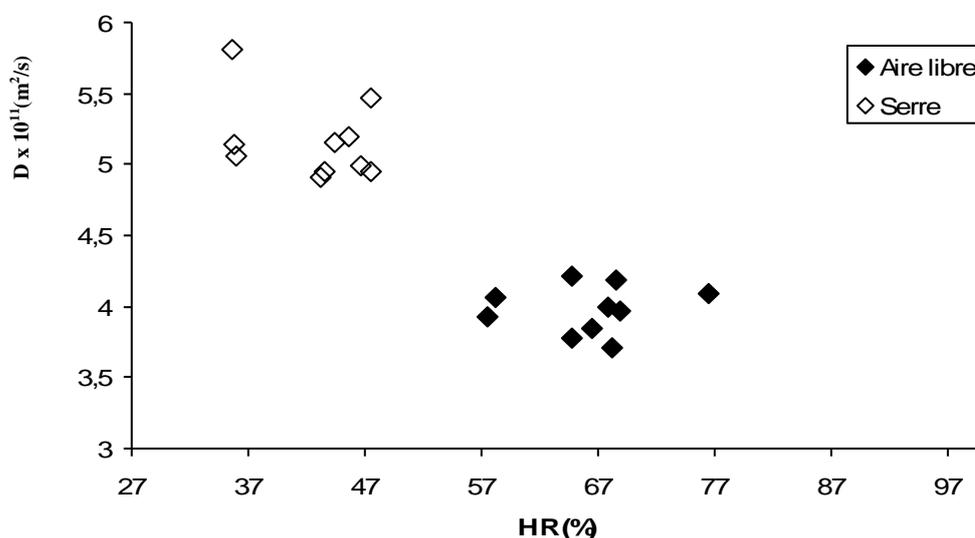


Figure III.34 : Evolution du coefficient de diffusion en fonction de l'humidité relative l'air

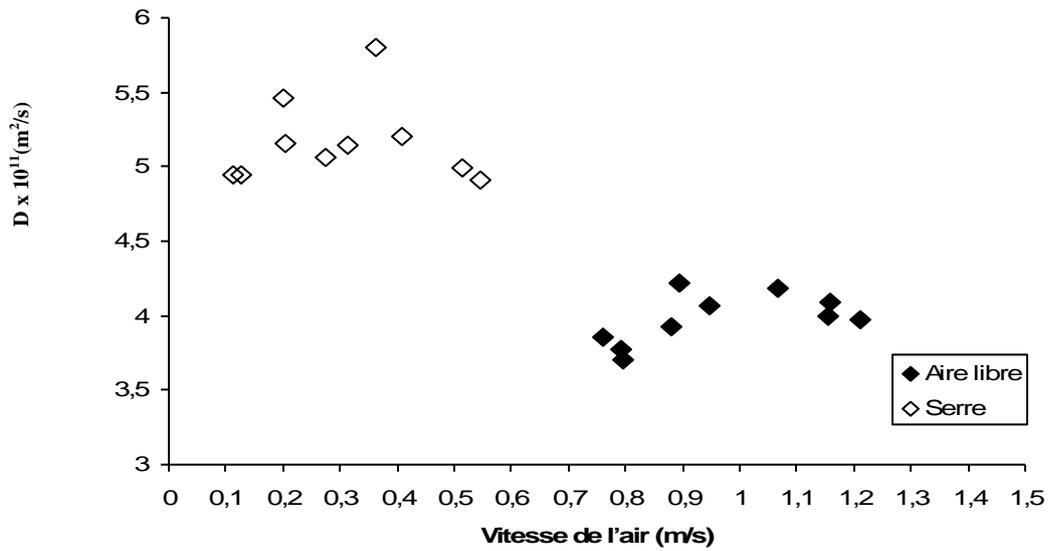


Figure III.35 : Evolution du coefficient de diffusion en fonction de la vitesse de l'air

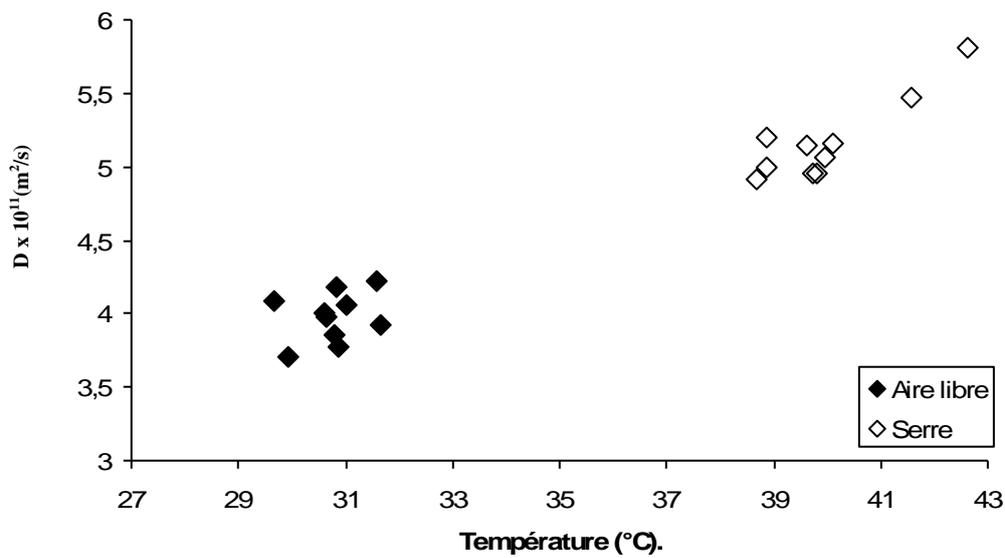


Figure III.36 : Evolution du coefficient de diffusion en fonction de la température de l'air

Selon l'équation d'Arrhenius (Equation 3.6), le logarithme du coefficient de diffusion D est de façon linéaire inversement proportionnel à 1/T.

$$\ln(D) = +\ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.6)$$

La figure III.37 obtenue expérimentalement confirme cette linéarité.

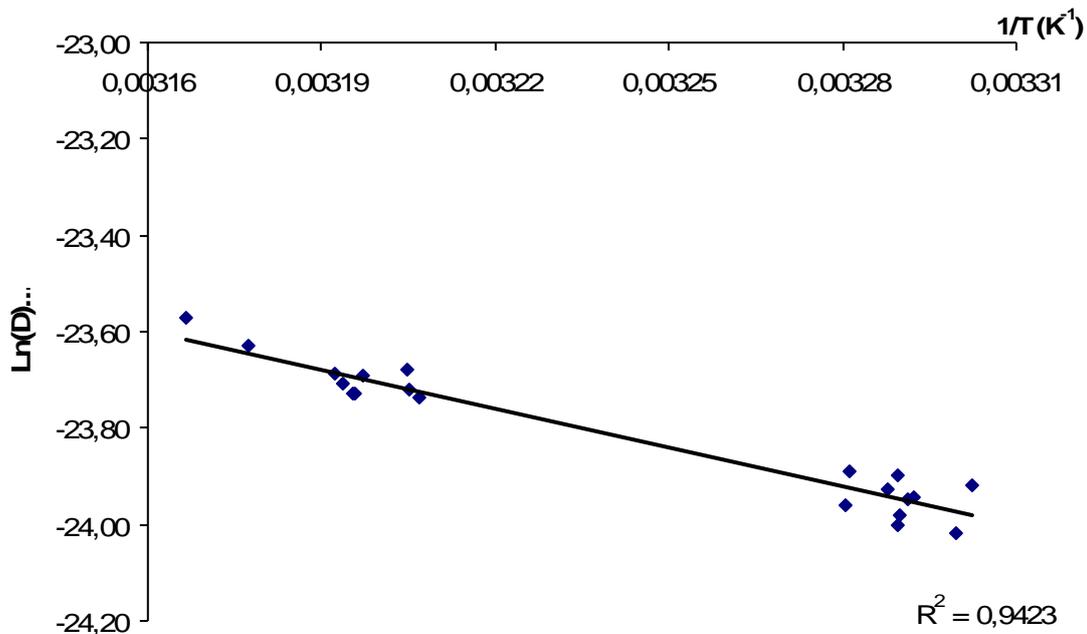


Figure III.37 : Variation de Ln(D) en fonction de 1/T dans l'intervalle d'étude avec

$$28,46^\circ\text{C} \leq T \leq 42,62^\circ\text{C} \text{ soit } 0,00316 \text{ K}^{-1} \leq 1/T \leq 0,00331 \text{ K}^{-1}$$

L'équation de la droite Ln(D) en fonction de 1/T permet de déduire par analogie au logarithme de l'équation d'Arrhenius (Equation 3.6), les estimations de l'énergie d'activation E_a et de la constante d'Arrhenius D_0 . Ainsi, on obtient :

$E_a = 22,478 \text{ kJ/mol}$ (Energie d'activation),

$D_0 = 2,91 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Constante d'Arrhenius).

3.7.3 DISCUSSION

Les courbes de diffusion obtenues ont présenté une forme concave orientée vers le bas avec un coefficient de diffusion qui a cru rapidement dès les premières heures de séchage jusqu'à un maximum, puis a décliné pour atteindre une valeur stable. Ces

observations ont été faites par Augier (1999) travaillant sur le coefficient de diffusion de l'eau à l'intérieur d'une fève moyenne. Selon ces travaux, le coefficient de diffusion évoluant en forme de cloche inachevée est toujours plus fort à la périphérie de la fève qu'au centre. Cette variation plus grande du flux d'eau au bord qu'au milieu montre que ce matériau présente une grande hétérogénéité à l'intérieur. L'explication retenue met en jeu l'étape précédant le séchage. Lors de la fermentation, la pénétration d'acide acétique aurait une action contribuant à " perméabiliser " les tissus (lyse des parois cellulaires). Les tissus périphériques sont exposés plus longtemps à l'attaque acide et sont traversés par une plus grande quantité que la partie centrale, ce qui les rendrait plus perméables. Le coefficient de diffusion D , descriptif des mouvements d'eau dans les tissus du cacao fermenté, traduit un phénomène propre au traitement de la fève. Cette hypothèse peut être agrémentée d'une autre remarque portant sur l'histologie de la fève. En effet, la fève de cacao contient en sa périphérie beaucoup plus de grosses cellules à pigment dont la disposition en alignement constituerait un chemin privilégié pour le passage des fluides (Augier, 1999).

Cette étude a révélé que le coefficient de diffusion D des fèves de cacao variait dans l'intervalle $[3,78.10^{-11} ; 5,38.10^{-11}]$ m^2/s dans le domaine d'étude considéré. Ce résultat est jugé satisfaisant car, dans les mêmes conditions de température, il se situe dans la marge générale de $[10^{-11} ; 10^{-9}]$ m^2/s pour les produits agroalimentaires (Madamba *et al.*, 1996).

Mise à part une tendance du coefficient de diffusion à augmenter sous serre en fonction de la température de l'air, aucune corrélation véritable du coefficient de diffusion avec les caractéristiques de l'air n'a pu être relevée au sein de chaque mode de séchage. Ce constat pourrait être dû, d'une part, au mode de séchage pratiqué où toutes les caractéristiques de l'air varient simultanément et, d'autre part, les études préliminaires sur les caractéristiques de l'air ont montré une faible variation de celles-ci à l'air libre et sous serre. Cette faible variation ne permet pas d'observer une influence des paramètres de l'air sur la diffusion des fèves au niveau de chaque mode de séchage. Toutefois, des essais de séchage sous contrôle, ont montré que le coefficient de diffusion D augmente avec la température et la vitesse de l'air de séchage (Augier, 1999 ; Inci et Dursan, 2003 ; Akpınar *et al.*, 2006; Aghfir *et al.*, 2008).

3.7.4 CONCLUSION PARTIELLE

Au cours du séchage, le coefficient de diffusion croit rapidement dès les premières heures jusqu'à un maximum, puis décroît pour atteindre une valeur stable autour de $3,12 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette variation, imputable à l'hétérogénéité de la fève, se situe en moyenne entre $3,78 \cdot 10^{-11}$ et $5,38 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

A l'air libre comme sous serre, l'effet des variables caractéristiques de l'air de séchage sur le coefficient de diffusion s'apprécie difficilement. Toutefois, pendant le séchage sous serre, on observe une tendance du coefficient de diffusion à croître avec la température de l'air.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail contribue à améliorer les connaissances dans le domaine du séchage solaire des fèves de cacao. Les résultats expérimentaux et théoriques proposés sont nécessaires à la maîtrise de la cinétique de séchage des fèves de cacao.

Cette étude montre que le type de dispositif utilisé pour le séchage à l'air libre n'a aucune influence sur les types d'acidité des fèves de cacao. Les dispositifs tels que Bitume et Tôle généralement proscrits présentent des teneurs en acide globalement identiques à celles des autres dispositifs. Toutefois, leur utilisation n'est pas à encourager au risque d'avoir, dans les lots de fèves, la présence de sable ou de particules goudroneuses ou même l'introduction des saveurs indésirables comme le goût de fumé ou de terre dans le cas du séchage sur bitume. C'est pourquoi, en plus des tests d'acidité, d'autres analyses telles que la détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques doivent servir d'analyse complémentaire dans l'appréciation de l'influence des dispositifs sur la qualité bord champ des fèves de cacao. Toujours au niveau post récolte, des études doivent être envisagées sur les conditions d'une bonne fermentation, car cette opération et le séchage restent des points critiques pour l'obtention d'un cacao de qualité.

Les isothermes de désorption de cacao montrent qu'à 30 °C, la teneur en eau d'équilibre du cacao est de 0,14 kg eau/kg ms dans une région où le degré hygroscopique moyen atteint 66 % l'an. Ces isothermes ont été simulées par le modèle d'Oswin. Entre 30 et 60 °C, le maximum de chaleur de désorption des fèves de cacao calculé est de 40,093 kJ/mol, valeur correspondant à 2,9 0% kg d'eau par kg de matière sèche.

Les différences de durée de séchage, notées au niveau des dispositifs, dans les mêmes conditions expérimentales, pourraient être liées à l'état de surface et aux propriétés thermodynamiques des matériaux utilisés pour le séchage. La claie présente un avantage car il y a, à ce niveau, plus de convection et de contact entre l'air et le produit. Ce phénomène est plus prononcé avec la claie sous serre où les conditions sont plus chaudes et plus sèches, donc provoquant un séchage de courte durée.

Les courbes de vitesse de séchage des fèves de cacao mises en séchage solaire comprennent une seule phase : la phase à allure décroissante. Au cours de cette phase, on observe chaque jour une augmentation suivie d'une diminution de la vitesse de séchage.

Cette variation pourrait s'expliquer par l'état initial des fèves de cacao bien avant leur mise au soleil, la variation du pouvoir évaporatoire de l'air ambiant à la surface du produit au cours de la journée et par l'intermittence du séchage des fèves de cacao imposée par la pratique du séchage solaire.

Contrairement aux modèles relatifs aux courbes caractéristiques de séchage dont les coefficients n'ont aucune interprétation physique, les modèles semi empiriques, particulièrement le modèle Logarithmique décrit au mieux le comportement du séchage des fèves de cacao à l'air libre et sous serre. Ses coefficients phénoménologiques tiennent compte de l'effet des paramètres aérodynamiques intervenant dans le processus de séchage. Ceci permet d'obtenir un meilleur ajustement avec un coefficient de détermination R^2 de 0,990, et de réaliser une bonne simulation des essais avec des moyennes d'erreur relative de déviation de $15,18 \% \pm 6,41$ pour le séchage à l'air libre et $10,76 \% \pm 1,40$ pour le séchage sous serre. Ce modèle, obtenu dans les conditions réelles de séchage, présente un grand intérêt. Il permet, connaissant les conditions de séchage, d'une part, de suivre la teneur en eau des fèves à tout moment de la journée et, d'autre part, de prévoir la durée d'exposition solaire des fèves pour atteindre la teneur en eau de 8%. Bien qu'ayant été construit à partir d'une base de données riche de plus d'une centaine d'essais effectués sur le site de Yamoussoukro, ce modèle peut s'appliquer à d'autres régions cacaoyères du fait de sa flexibilité.

Cette étude montre que le séchage sous serre est performant et présente de nombreux avantages (courte durée de séchage, protection des fèves). Cependant, il nécessite un investissement non négligeable. La construction d'un tel système exige des matériaux élaborés que peuvent seulement s'acheter de riches planteurs ou certaines coopératives. Son implantation dans les milieux des planteurs ne se fera pas sans difficulté car elle doit prendre en compte les aspects culturels, sociaux et économiques de ceux-ci. Combien de séchoirs solaires tous ingénieux les uns par rapport aux autres sont en train de finir paisiblement leurs jours dans un coin d'atelier, sur le terrain vague d'un groupement villageois ? Pour cette raison, Les séchoirs doivent être compatibles avec le contexte d'application et les conditions de production (organisation du travail, période de récolte et rendement). A défaut d'avoir une serre en verre, il est possible d'utiliser une serre en plastique ou une tente solaire en plastique.

Les serres en plastique et les tentes solaires, du fait de leur faible coût d'investissement (utilisation de matériaux locaux), d'entretien et leur rendement énergétique élevé par rapport au séchage à l'air libre, peuvent connaître une large diffusion auprès des planteurs de cacao. Ainsi, en se basant sur les résultats et la connaissance du produit décrit dans ce mémoire, l'optimisation et le dimensionnement de ces séchoirs doivent être mis à profit. Il s'agira de déterminer :

- l'influence de la hauteur des tentes sur les paramètres aérothermiques de sorte à trouver la hauteur optimale ;
- la charge de cacao sur les claies et la surface maximale exploitable ;
- le type de matière plastique qui optimise au mieux l'effet de serre.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ablan E, 1985. Influence de l'histoire du produit sur la cinétique de séchage. *Mémoire de DEA*, ENSIA Massy, p 30 - 45.

Aghfir A., Akkad S., Rhazi M., Kane C.S.E et Kouhila M., 2008. Détermination du coefficient de diffusion et de l'énergie d'activation de la menthe lors d'un séchage conductif en régime continu. *Revue des Energies Renouvelables 11 (3) : 385 – 394*

Agrawal Y. C., Singh, R. P., 1977. Thin layer drying studies on short grain rough rice. *American Society of Agricultural Engineers (ASAE) Paper No: 3531.*

Ahouannou C., 2001. Etude du séchage de produits agroalimentaires tropicaux : Cas du manioc, du gingembre, du gombo et du piment. *Thèse de doctorat*, Université Nationale du Bénin, p 61- 92.

Ahouannou C., Jannot Y., Lips B., Lallemand A., 2000. Caractérisation et modélisation de trois produit tropicaux: manioc, gingembre et gombo. *Sciences des aliments*, 20: 413-432.

Ajibola O., Adams B. A., 1986. Desorption equilibrium moisture content of cassava at several temperatures. *International. Agrophysics*, 2: 235-239.

Akpınar E., Midilli A., Bicer Y., 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44: 1689-1705.

Akpınar E. K., Bicer Y., Midilli A., 2003. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 26(6): 515-541.

Akpınar E.K, Bicer Y., 2006. Mathematical modeling and experimental study on thin layer drying of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 75(3): 308-315

Al Hodali R., 1997. Numerical simulation of an agricultural foodstuffs drying unit solar energy and absorption process. *PhD thesis*. Bruxelles, Belgium: University of Bruxelles, 186 p.

Amir H., 1987. Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud : Couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite. *Int. J. Heat Mass Transfert*, 30 (6) : 1149- 1158.

Anderson R. 1946. Modifications of the BET equation. *Journal of the American Chemical Society.*, 68: 689-691

Anonyme 1, 2001. Centre du commerce international: CACAO. Guide des pratiques commerciales, Genève, p 15-30.

Anonyme 2, 2006. Elaboration d'un plan national qualité café cacao: Etude diagnostique. *Rapport final, Bourse du café et du cacao (BCC)*, Abidjan, 60 p.

Anonyme 3, 2002. Mémento de l'agronome. Editions du *GRET, CIRAD, Ministère de l'agriculture et de la pêche (France)*, Paris, p 1051-1063.

Anonyme 4, 2004. Commercialisation du cacao : Tables indicatives de réfaction. *Manuel d'information à l'usage des producteurs et des coopératives, BCC, Abidjan*, p 19-21

Assidjo E., Akmel C., Konan A., Sui T., Gooré Bi, 2008. Réhabilitation de la plantation d'Etat de Toumbokro en vue de la production du cacao biologique : Diagnostic des activités post-récolte. *Rapport du District de Yamoussoukro*, Côte d'Ivoire, p 9-11.

Asiedu J.J., 1991. La transformation des produits agricoles en zone tropicale, Approche technologique. *Editions Karthala (Paris) et CTA (Centre Technique de coopération Agricole et rurale) (Wageningen)*, p 39-60.

Augier F.,1999. Transport d'eau et d'acide en milieu complexe- Application au séchage de la fève de cacao. *Thèse de doctorat*, Université Montpellier II, 187 p.

Augier, Fabrice Nganhou, J. Barel, Michel Bénét, J.C. Berthomieu, G.,1998. Réduction de l'acidité du cacao lors du séchage. *Plantations Recherche Développement*, 5:127-133

Barel M., 1995. Traitement du cacao : fermenteur et séchoir intégrés. *Plantation Recherche et Développement*, 2 : 35-42.

Barel M., 2005. Le commerce du cacao dans le Monde. Cirad, *Chocolat et Confiserie*, Magazine N° 410

Banzio D., 2003. Comprendre et opérer dans les filières café et cacao en dix modules. Ed. Eburnie, Abidjan, p 10- 23.

Bassal A., 1993. Etude de l'activité de l'eau dans les aliments au dessus de 100°C. *Thèse de doctorat*, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et alimentaires, Massy, 145p.

Belahmidi E., Belghit A., Mrani A., Mir A., Kaoua M., 1993. Approche expérimentale de la cinétique du séchage des produits agroalimentaires : application aux peaux d'orange et à la pulpe de betterave. *Revue. Générale de Thermique*, 380-381, 444-453.

Belghit A., Kouhila M., Boutaleb B.C., 2000. Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants. *Energy Conversion & Management*, 41: 1303-1321.

Bellagha S., Glenza A., Kechaou N., 2007. Isothermes de désorption de la sardine (*Sardinella aurita*) légèrement salée. *An international journal of food science and technology*. 27(6) :439-453.

Benkhelfellah R., El Mokretar S, Miri R., Belhamei M., 2005. Séchoirs solaires: étude comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct et indirect. 12^{ème} journées internationales de thermique, *Tanger*, Maroc, p 259-262.

Bernard R., Menguy G., Schwartz M., 1980. Le rayonnement solaire. Lavoisier.
Bimbenet J.J.,1978. Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires. 4^{ème} *Cahier du GIA, SEPAIC*, Paris 30 p.

Bimbinet J.J., Duquenoy A., Trystram G., 2002. Génie des procédés alimentaires : des bases aux applications. *Dunod, Paris*, p 10-16.

- Bogdanis E., 2001.** Modélisation des transports de chaleur et de matière lors du séchage d'un milieu élastique ou viscoélastique. Résolution par des méthodes aux éléments finis. *Thèse de doctorat*, Université de Pau et des pays de l'Adour, 184 p.
- Bopaiah B.M., Shantaram M.V. ,1991.** Influence of season and drying temperature on the quality of cocoa beans. In: Indian Cocoa, *Areca nut and Spices Journal*, 15 (2): 37-39
- Bradeau J., 1969.** Le cacaoyer. Collection Techniques Agricoles et Productions tropicales. *Edition Maisonneuve et Larose, Paris*, p 13-37.
- Bruce D. M., 1985.** Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32: 337-347.
- Brunauer S., Emmet, P. H., Teller E., 1938.** "Adsorption of gases in multimolecular layers, *Journal of the American Chemical Society*,, 60: 309-319.
- Burle L., 1961.** Le Cacaoyer, Tome premier. *G.-P Maisonneuve et Larose, Paris*.
- Ceaglske N., Hougen, O. A., 1937.** Drying granular solids. *Industrial and Engineerig. Chemistry*, 29: 805-813.
- Chhninman M. S., 1984.** Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 27: 610–615.
- Chung D. S., Pfof H. B., 1967.** Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. *Transaction of ASAE*, 10: 552-575.
- Comings E. W., Sherwood T. K., 1934.** The drying of solids VII. *Industrial and Engineerig. Chemistry*, 26: 10961098.
- Courtois F., Lebert A., Duquenoy A., Lasseran J. C., Bimbenet J. J., 1989.** Modélisation du séchage du maïs. Les Techniques Electriques de Séchage, 4ème *Colloque Université Industries, CEE-CFE, Marseille*.
- Crank J., 1975.** The Mathematics of Diffusion. *Clarendon press, Oxford*.
- Cros E., Jeanjean N. 1995.** Qualité du cacao : influence de la fermentation et du séchage. Plantation, recherche et développement, *CIRAD-CP, Montpellier*, p 21-25.

Cruz J.F., Troude F., Griffon D., Hébert J.P. 1988. Conservation des grains en régions chaudes- 2. ed.- «*Techniques rurales en Afrique*». Paris, France, Ministère de la Coopération et du Développement, 545 p.

Daguenet M., 1985. Les séchoirs solaires : théorie et pratique. *Publication de l'UNESCO*, Paris, p 191-568.

Dandamrongrak R., Young G., Mason R., , 2002. Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, 55:139-146.

De Boer, 1. H., 1953. *The dynamic character of adsorption*. Clarendon Press: Oxford, UK, p 56- 104.

Derdour L., 1998. Contribution à l'étude du concept de la Courbe Caractéristique de Séchage (C.C.S.): application au séchage de produits de type plâtre. *Thèse de doctorat*, Université Claude Bernard – Lyon 1, France, 193p.

Desamorieux H., 1992. Le séchage en zone subsaharienne : une analyse technique à partir des réalités géographiques et humaines. *Thèse de Doctorat* de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, p 203.

Desamorieux H., Moyne C. 1992. Analysis of dryers performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept. *In : Drying 92, Elsevier Amsterdam*, 834-843.

Diamante L. M., Munro, P. A., 1991. Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 26: 99.

Diamante L.M., Munro P.A., 1993. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato silices. *Solar Energy*, 51: 271-276.

Do Amaral Sobral J.P., Lebert A., Bimbenet J.J., 1999, Isothermes de désorption de la pomme de terre entre 40 et 70 °C. *Sciences des aliments*, 19 : 711-720.

Doymaz I., 2007. The kinetic of forced convective air drying of pumpkin slices. *J. Food. Engng.*, 79: 243-248.

- Doymaz I., Gorel O., Akgun N. A., 2004.** drying characteristics of the solid by-product of olive oil extraction. *Biosystems Engineering*, 88(2): 213-219.
- Drosrier N.W., 1963.** The technology of food preservation Westport. Connecticut: Avi. Publishing.
- Duffie J.A., Beckman W.A., 1980.** Méthodes de calcul pour le dimensionnement des systèmes énergétiques (solaire thermique). *Solar engineering of thermal process*, 750 p.
- Endamn  E., 1991.** Faisabilité technico-économique d'un système de séchage solaire des fèves de cacao au Gabon. Constit  d'un séchoir situé   l'intérieur d'une serre agricole. *Thèse de Doctorat*, 106 p
- Erenturk S., Gulaboglu M. S., Gultekin S., 2004.** The thin-layer drying characteristics of rosehip. *Biosystems Engineering*, 89(2): 159-166.
- Ertekin C., Yaldiz O., 2004.** Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63: 349-359.
- Feinberg M., 1996.** La validation des methods d'analyse: Une approche chimiométrique de l'assurance qualité au laboratoire. *Collection Sciences de l'Ingénieur, Ed. Masson, Paris*, p 145-150.
- Ferradji A., Acheheb H., Malek A., Hadjad N., 2008.** Isothermes d'adsorption   25  C et 45  C des pommes chargées de solutés et séchées. *Revue des Energies Renouvelables* 11 (4)
- Ferradji A., Malek A., 2005.** Isothermes d'adsorption des Abricots secs   25  C et 45  C. *Revue des Energies Renouvelables*, 8 : 39-48.
- Fornell A. 1979.** Séchage des produits biologiques par air chaud : calcul de séchoirs. *Thèse de Doctorat*, Ecole Nationale Supérieures des Industries Agricoles et Alimentaires, Montpellier, France, p 164.
- Fortes M., Okos M. R., 1976.** A Non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary porous media. First Int. Symp. Science Press Princeton, p. 100-109.

Geankoplis C. J., 1993. *Transport processes and unit operations.* Prentice-Hall : Englewood Cliffs, New Jersey.

Ghosh B.N., 1973. Drying of Cocoa beans by Gas. *World Crops*, vol 25, n°5, Sept-Oct, p 232-237.

Gocus F., Maskan M., 1999. Water adsorption and drying characteristics of okra (*Hibiscus esculentus L.*). *Drying technology*, 17 : 4-5, 883-894.

Godfrey G., 1990. The Sime-Cadbury process. Design and operational considerations. In Seminar on improvements of cocoa beans processing. - *Jakarta : INCA*, 1990/02, p.43-53

Gono Kapie, 2004. Identification et analyse des causes d'impayés dans le financement des coopératives café-cacao. *Mémoire de fin d'études ESA/INP-HB yamoussoukeo.*

Guehi T., Dingkuhn M., Vilda A., Crose E., Fourny G., Ratomahenina R., Moulin G., 2005. Détermination de l'origine de l'activité enzymatique impliquée dans la formation des acides libres du cacao .In : 14th International Cocoa Research Conference. Lagos : *Cocoa Producers' Alliance.* p. 869-873

Guggenheim E., 1966. Applications of statistical mechanics, *Clarendon Press: Oxford, UK*, p 12-28.

Guinebault A., 1986. Le point sur le séchage solaire. *Edition G.R.E.T*, France, p 5- 78.

Gunhan T., Demir V., Hancioglu E., Hepbasli A., 2005. Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46: 1667-1679.

Halsey G., 1948. Physical adsorption on non-uniform surfaces . *J. Chem. Phys.*, 16 :931-945.

Hamed A., 1985. Séchage d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud : Couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite «Application au séchage solaire du bois». Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, p 193.

Haoua A., 2007. Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines. *Thèse de doctorat*, Université Louis Pasteur- Strasbourg I, France, p 205.

Hayaloglu A., Karabulut I., Alpaslan M., Kelbaliyev G.,2007. Mathematical modeling of drying characteristics of strained yoghurt in a convective type tray-dryer . *Journal of Food Engineering* 78: 109–117

Harkins W., Jura G., 1944. Surfaces of solids. XIII. A vapor adsorption method for the determination of the area of a solid without the assumption of a molecular area, and the area as occupied by nitrogen and other molecules on the surface of a solid, *J. Am. Chem. Soc.*, 66: 1366-1381.

Henderson, S. M., 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17: 1167–1168.

Hossain M.D., Bala B.K., Hossain M.A., Mondol M.R.A., 2001. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. *Journal of food engineering*, 48: 103-107.

Iglesias H. A., Chirife J., 1982. Handbook of food isotherms water sorption. Parameters for food and food components. *Academic Press*, New York.

Inci T., Dursun P., 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering* 58: 23-32.

Irzyniec R., Klimczak J., 2003. Effect of temperature on sorption isotherms of Brussels sprout. *Nahrung/ Food*, 47 (1): 24-27.

Jacquet M., Vincent J-C., Hahn J., Lotode R., 1980. Le séchage artificiel des fèves de cacao, *Café Cacao Thé*, XXIV, 1: 43-56,

Jannot Y., 2006. Du séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation thermophysique des solides. *Exposé général* pour obtenir le diplôme d'habilitation à diriger des recherches, Université Bordeaux, 35p.

Jannot Y., 2003. Isothermes de sorption: modèles et détermination. Paris, p 2-5.

Jeanjean N., Cros E., Flora A., 1994. Cocoa flavour : correlation between non-volatile and volatile compounds. *In : Malaysian International Cocoa Conference, Kuala Lumpur, Malaisie, 20-21 octobre 1994, sous presse.*

Jinaps S., Thien J., 1994. Effect of drying on Acidity and Volatile Fatty Acids Content of cocoa beans. *Journal of science food and agriculture, 65: 67-75.*

Karathanos, V. T., 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering, 39: 337–344.*

Karim M.A., Hawlader M.N.A., 2005. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 48:4914-4925.*

Kassem, A. S., 1998. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In 13th *International Congress on Agricultural Engineering, Morocco 6:1–37.*

Kaymak-Ertekin F., Sultanoglu M., 2001. Moisture sorption isotherm characteristics of peppers. *Journal of food engineering, 47: 225-231.*

Kechaou N., 2000. Etude théorique et expérimentale du processus de séchage de produits agroalimentaires. *Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des sciences, Tunis, 192 p.*

Kechaou N., Bagane M., Maalej M., Kapseu C., 1996. Approche empirique de la cinétique du séchage des dattes. *Sciences des aliments, 16: 593-606.*

Kechaou N., Maalej, M., 1999. Desorption isotherms of imported bananas – Application of the GAB theory. *Drying technology, 17(6) : 1203-1213.*

Keey R. B., 1978. Introduction to industrial drying operations, *Pergamon Press: Oxford.*

Kemp I.C., Fyhr B.C., Laurent S., Roques M.A, Groenewold C.E, Tsotsas E., Sereno A.A, Bonazzi C., Bimbenet J.J., Kind J.J., 2001. Methods for processing experimental drying kinetics data. *Drying technology, 19: 15-34.*

Ketelaars A. A. J., Jomaa W., Puiggali J. R., Coumans W. J., 1992. Drying shrinkage and stresses. *Elsevier Science Publishers, p 1- 22.*

Koua K. Blaise., 2007. Etude expérimentale d'un séchoir solaire direct utilisant circulateur thermique. *Thèse de Doctorat*, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 129 p.

Kouhila M., 2001. Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques de la région de Marrakech. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 170 p.

Kouhila M., Belghit A., Daguinet M., Boutalet B.C., 2002. Experimental determination of the sorption isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia officinalis*) and verbena (*Lippia citriodora*), *Journal of food engineering*, 47: 281- 287.

Krischer O., Kast W., 1978. The scientific bases of the drying technology, Springer : Berlin, p 3- 12.

Kuhn, 1967. Generalized potential theory of adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 23:563-578.

Labuza T. P., 1984. Moisture sorption : Practical aspects of isotherm measurement and use, *American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN*.

Laguerre J.C, 1986. Influence de l'histoire du produit sur la cinétique de séchage: variation de l'humidité de l'air. *Mémoire DEA*, ENSIA, Massy, 91p.

Lamharrar A., Kane C.S.E., Idlimam A., Akkad S., Kouhila M., Mimet A., Ahachad M., 2007. Détermination expérimentale des isothermes de sorption et de la chaleur isostérique des feuilles d'absinthe et de menthe pouliot. *13èmes Journées Internationales de Thermique. Albi, France, 5p.*

Langmuir I., 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass. *Journal of the American Chemical Society.*, 40: 1361-1402.

Laguerre J.C, Lebert A., Trystram G., Bimbenet J., 1989. Drying curves of foostuffs under variable conditions : modelling and interpretation. *Elsevier*, London, 2: 558-568.

Lashani S., Kouhila M., Mahrouz M., Jaouhari J.T., 2004. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of food engineering*, 61(2): 173-179.

- Lashani S., Kouhila M., Mahrouz M., Fliyou M., 2003.** Moiture adsorption-desorption isotherms of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*) at different temperatures. *Energy conversion and management*, 44: 923-936.
- Lashani S., Kouhila M., Mahrouz M., Kechaou N., 2002.** Experimental Study and Modelling of Adsorption and Desorption Isotherms of Prickly Pear Peel (*Opuntia Ficus Indica*). *Journal of Food Engineering*, 55(3): 201 – 207.
- Lavialle E., Puiggali J-R., Nadeau J-P, 1997.** Cinétique de séchage et qualité de la noix. *Sciences des aliments*, 17 : 471-485.
- Lewis J.F., Lee M.T., 1986.** The influence of harvesting, fermentation and drying on cocoa flavour quality. *In: Planter* , 62 (721): 134-141
- Lewis W. K., 1921.** The rate of drying of solid materials. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13: 427-438.
- Liu Q., Bakker-Arkema F. W.; 1997.** Stochastic modelling of grain drying, Part 2: Model development. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66: 275–280.
- Lopez A., Iguaz A., Esnoz A., Virseda P., 2000.** Thin Layer Drying Behaviour of Vegetable Wastes From Wholesale Market. *Drying Technology*, 18: 995 - 1006.
- Luikov A. V., 1966.** Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, *Pergamon Press*: Oxford, p 23- 45.
- Luikov A. V., 1975.** Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillaryporous bodies. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 18: 1-14 .
- Madamba P. S., Driscoll R. H., Buckle K. A., 1996.** The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29: 75-97.
- Mermet G., 1989.** Cacao: influence des paramètres de torréfaction sur la consommation des précurseurs d'arôme et la formation de quelques composés volatils. *Thèse de doctorat*. Université de Montpellier II, France, 145 p.
- Midilli A., Kucuk H., Yapar Z.A., 2002.** New model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7): 1503-1513.

Midilli A., Kucuk H., 2003. Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, 44 : 1111-1122.

Mohammed Ait L., 2005. Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection. *Energy Conversion and Management*. 46: 1473- 1483.

Mossu G., 1990. Le cacaoyer. Collection Le technicien d'agriculture tropicale. *Edition Moissonneuve et Larose*, Paris.

Moyne C., 1985. Etablissement des courbes caractéristiques et exploitation. *Cahier de l'AFSIA*, 1 : 3-18.

Mourad M., Hémati C., Laguérie, 1995. Séchage de ma s en lit fluidisé à flottation II : modélisation de la cinétique de séchage. *The chemical Engineering Journal*, 60: 39-47.

Myhara R., Taylor M., Al- Balushi I., 1996. The moisture sorption isotherms of omani dates. *Drying*, 96 : 989-996.

Nadeau J.-P., Puiggali J. R., 1995. Séchage. Des processus physiques aux procédés industriels, *Technique et Documentation - Lavoisier*: Paris.

Newmann A.B, 1931. The drying of porous solids diffusion calculation. *Trans. Amer. Inst. Engng.* 27: 310-333.

N'Guessan K., 2004. Gestion des filières café et cacao en Côte d'Ivoire, Bilan et perspectives. *Edition muse*.

Nganhou J., 1996. Mise au point d'une méthode de micro-analyse d'eau et d'acide acétique dans une fève de cacao en cours de séchage. *Rapport de stage du 15 sept 1995 au 15 jan 1996. Université de Yaoundé-ENSP - 16 p.*

Nganhou J., Nganya T., 2003. Simulation numérique du comportement dynamique d'un système de séchage solaire de fèves de cacao au Cameroun. *Laboratoire d'Energétique (LAEN), ENSP B.P. 8390 Yaoundé Cameroun ;*

Noumi G.B., Ngameni E., Kapseu C., Permentier M. 2002. Variation de la composition en acide gras et en triglycérides de l'huile des fruits de l'aiélé en fonction des conditions

d'extraction et de la couleur du fruit. *La rivista italiana delle sostanze grasse*, 79 : 315-318.

Noumi G.B., Laurent S., Ngameni E., Kapseu C., Jannot Y., Permentier M., 2004. Modélisation de la déshydratation de la pulpe des fruits du *Canarium schweinfurthii* Engl.. *Tropicultura*, 22(2): 70-76.

O'Callaghan J. R., Menzies D. J., Bailey P. H., 1971. Digital simulation of agricultural dryer performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16, 223–244.

Opéké I. K., 1982. Tropical Tree Crops. John Wiley and Sons Ltd., 108-119.

Oswin G. R., 1946. The kinetics of package life. *Int. Chem. Ind.*, 65, 419.

Overhults D. D., White G. M., Hamilton M. E., Ross I. J., 1973. Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16, 195–200.

Ozdemir M., Devres Y. O., 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42: 225-233.

Panchariya P.C., Popovic D., Sharma A.L., 2002. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52: 349-357.

Parti M., 1993. Selection of mathematical models for drying grain in thin layers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54: 339-352.

Paulsen M. R., Thomson T. L., 1973. Drying endysus of grain sorghum. *Transactions of the ASAE*, 16, 537–540.

Perrin de Brichambaut C., Vange C., 1982. Le gisement solaire, Editions Lavoisier 75008, Paris, 222p.

Pickenhagen W., Dietrich P., Keil B., Polonsky J., Nouaille F., Lederer E., 1975. Identification of the bitter principle of cocoa. *Helvetica Chemica. Acta* 58 : 1078-1086.

Pillard W., 1997. Evolution des propriétés hydriques et rhéologiques d'un gel d'alumine au cours d'un processus de séchage isotherme. *Thèse de doctorat*, Université Montpellier II, 167p.

Pointillon J., 1997. Cacao et chocolat : production, utilisation et caractéristiques. Tech & Doc/ Lavoisier. *Collection sciences et techniques agroalimentaires*. Paris. p 96-115.

Rahman M. S., Perera C. O., Theband C., 1998. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*, 30: 485–491.

Ramarinjanahary-Ravelomanana H., 1984. Contribution à l'étude de la flore de levures intervenant dans la fermentation du cacao. *Thèse de docteur-ingénieur*, Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier, France, 155p.

Ratti C., 1994 . Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering.*, 23: 101-105 .

Ratti C., Crapiste G. H., 1992. A generalized drying curve for shrinking food materials. In A.S. Mujumdar (Ed), *Drying*, 92: 864-873.

Rozis J.F, Guinebault A., 1995. Sécher des produits alimentaires, coll. « Le point sur », *Editions du GRET, ministère de la coopération, CTA , GERES, FAO*.Paris, 244pages.

Sacilik K., Elicin A. K., 2005. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, in press p 31- 33.

Sahoré E., 2004. Etude sur les sociétés agréées pour le contrôle qualité du café et du cacao destinés à l'exportation de octobre 2002 à juin 2003. *BCC, Rapport définitif, p 3-19*

Sandoval A.J., Barreiro J.A., 2002. Water sorption isotherms of non-fermented cocoa beans. *Journal of food engineering* ; 51 : 119-123.

Sanni L.O., Kolawole A.G., Akingbala J.O., Kuye A., 1999. Effect of drying methods moisture sorption isotherms of fufu at three temperatures. *Drying technology*, 17: 1–2, 285-297.

Sharaf-Elden Y. I., Blaisdell J. L., Hamdy M. Y., 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5: 1261–1265.

Sherwood T. K., 1929. The drying of solids-I. *Industrial and Engineering Chemistry*, 21:12-16.

Sherwood T.K., 1936. The air drying of solids. *Transaction of American Institute of Chemical Engineers*, 32: 150-168.

Silou T., Goma Manouigui J., Bounou P., Ouamba J.M., 1991. Etude du séchage de la pulpe de Safou : résultats préliminaires. *Tropicultura*, 9(2): 61-68.

Simal S., Femenia A., Garau M. C., Rosella C., 2005a. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, 66(3): 1-12.

Simal S., Garau C., Femenia A., Rosella C., 2005b. Drying of red pepper (*Capsicum Annuum*): Water desorption and quality. *International Journal of Food Engineering*, 1(4): 323-328.

Simal S., Mulet A., Tarrazo J. and Rosello C. 1996. Drying Models for Green Peas. *Food Chemistry*, 55(2): 121 – 128.

Sjoholm Gekas V., 1995. Apple shrinkage upon drying. *Journal of Food Engineering*, 25: 123-130.

Smith S. E., 1947. Sorption of water vapor by proteins and high polymers. *J Am. Chem. Soc.*, 69: 646-653.

Smollen M., 1990. Evaluation of municipal sludge drying and dewatering with respect to sludge volume reduction. *Water Science and Technology*, 22:153-161.

Sokhansanj S., Cenkowski 1989. Equipment and methods of thin-layer drying. An review. In *Mujumdar A.S. and Roques M.(eds.)*, Hemisphere Publishing Co., New York, *Drying's* 89: 276-287.

Talla A., 1999. Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des fruits tropicaux en vue de leur séchage : application à la banane, la mangue et la papaye. *Mémoire de DEA*, ENSP, Yaoundé, 98p.

Talla A., Jannot Y., Kapseu C., Nganhou J., 2001. Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage de fruits tropicaux : Application à la banane et à la mangue. *Sciences des aliments*, 21: 499-518.

- Thomson T. L., Peart P. M., Foster G. H., 1968.** Mathematical simulation of corn drying a new model. *Transactions of the ASAE*, 11: 582–586.
- Timoumi S., Zagrouba F., 2005.** Water sorption and dehydration kinetics of Tunisian rosemary leaves. *Desalination*, 185:517-521.
- Togrul I. T., Pehlivan D., 2003.** Modeling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58(1): 23-32.
- Touati B., 2008.** Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*). *Thèse de doctorat*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 142 p.
- Touati B., Lips B., Benyoucef B. Virgonne J., Kouhila M., Kerroumi N., 2006.** Séchage solaire des produits en feuilles : étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire a air. *8ème Séminaire International sur la Physique Energétique*. Béchar, Algérie, p 291-295.
- Tsami E., Maroulis Z. B., Marinos-Kouris D., et Savaracos G. D., 1990.** Heat sorption of water in dried fruits. *International Journal of Food and Science Technology*, 25: 350-359
- Tsang K. R., Vesilind P. A., 1990.** Moisture distribution in sludges. *Water Science and Technology*, 22: 135-142
- Van Meel D.A., 1957.** Adiabatic convection batch drying with recirculation of air. *Chemical Engineering and Science*, 9, p. 36.
- Van M., 1958.** Adiabatic convection drying with recirculation of air. *Chemical Engineering and Science*; 9 : 36-44.
- Vanderschuren J., 2000.** Les principes fondamentaux du séchage. Le Séchage: État De La Question, SRBII, *Comité Valorisation & Technologie Des Solides*, 30 Mars 2000,
- Veltchev Z. N., Menkov, N. D., 2000.** Desorption isotherms of apples. *Drying Technology*, 18: 1127-1137.

- 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.
- Vesilind P. A., Martel, C. J., 1989.** Freezing of water and wastewater sludges. *J. Environ.Eng. ASCE*, 116: 854-861.
- Vieira P. F., Sena Freire E., 1984.** Natural drying cocoa in stoving solar. Results preliminaries, p 6-23.
- Villeneuve F., Cros E., Vincent J.C., Macheix J.J., 1989.** Recherche d'un indice de fermentation du cacao. 111. Evolution des flavan-3-ols de la fève. *Café Cacao Thé* 33 : 165-170.
- Vincent J.C., 1968.** Influence du type de séchage solaire sur les qualités physiques et chimiques du cacao. *In : Café Cacao Thé*, 12(4):343-348
- Vincent J. C., 1996.** Quality evaluation of cocoa beans in relation to post harvest processing: acidity, weakness of aroma, off flavours and their control by sensory and chemical analyses. *In : Proceedings of the Malaysian international cocoa conference, Mastura Mansor (ed.); MCB. - Kota Kinabalu : Malaysian Cocoa Board. p.231-241 ,*
- Wang C. Y., Singh R. P., 1978.** A single layer drying equation for rough rice. *ASAE Paper No: 3001.*
- Westerman P. W., White G. M., Ross I. J., 1973.** Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. *Transactions of the ASAE*, 16: 1136–1139.
- Whitaker S., 1977.** Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advances in Drying*, HPC : New York; p.23-61.
- White G. M., Ross I. J., Ponekert R., 1981.** Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE*, 24: 466–468.
- Wood G.A.R., 1975.** Cocoa. Tropical Agriculture Series, Third edition, *Ed. Longman Green*, Londre, p 7-21.

Yagcioglu A, Degirmencioglu A., Cagatay F., 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. *In A. Bascetincinelik* (Ed.), Proceeding of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and energy, p 565-569.

Yaldyz O., Ertekin C., Uzun H. I., 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5): 457- 465.

Yaldiz O., Ertekin C., 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19: 583-596.

Zhang Q., Litchfield J. B., 1991. An optimisation of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, 9: 383–395.

Ziegleder G., 1991. Composition of flavor extracts of œw and roasted cocoa. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* 192 (6) : 521-525.

ANNEXES

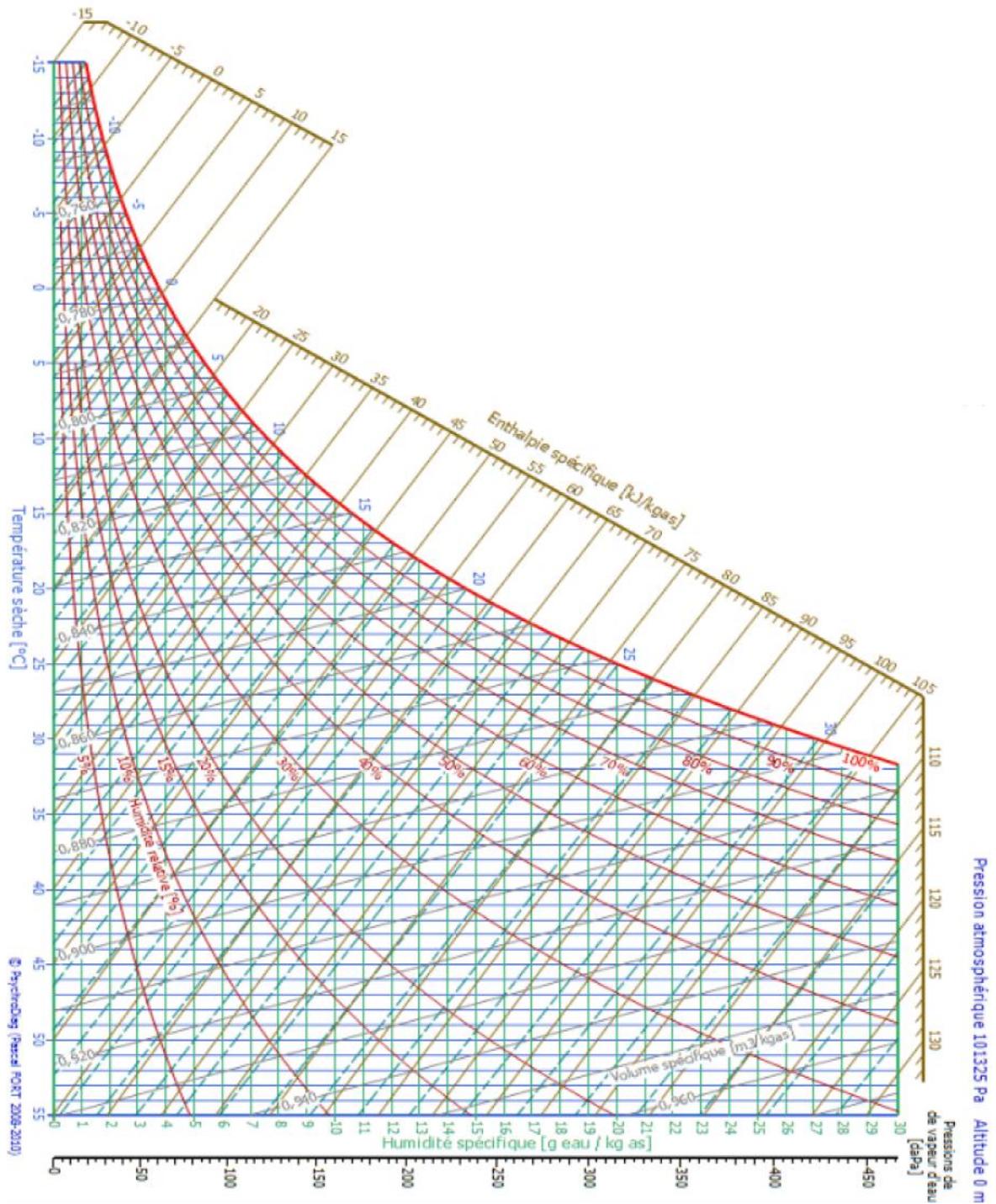
ANNEXES

ANNEXE 1 : Quantités de fèves prélevées au cours des différentes campagnes

Campagne	Période de récolte et d'essai	Quantité de fèves (kg) après élimination des déchets	Numéro de l'essai de séchage
Campagne intermédiaire 2006-2007 (ou Petite campagne)	mars-07	30	1
	avr-07	30	2
	avr-07	25	3
	mai-07	29	4
	mai-07	30	5
	juin-07	32	6
	juin-07	30	7
	juil-07	30	8
	juil-07	32	9
	juil-07	30	10
	août-07	33	11
	août-07	30	12
	août-07	31	13
Campagne principale 2007-2008 (ou Grande campagne)	oct-07	35	14
	oct-07	38	15
	nov-07	35	16
	nov-07	35	17
	nov-07	32	18
	déc-07	36	19
	déc-07	35	20
janv-08	35	21	

En réalité, il s'agit plutôt de la période de prélèvements des fèves après leur fermentation et non de la période de récolte. Nous n'assistons pas à la récolte, cependant, on observe au moins 10 à 14 jours entre deux récoltes consécutives.

ANNEXE 2 : DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE



ANNEXE 3 : METEOROLOGIE

Relevé météorologique de la station SODEXAM Yamoussoukro : Janv 07 à Juin 07

		min	max	moy	ecart type
janv-07	<i>Tsec</i>	26,65	32,48	30,27	1,74
	<i>HR</i>	20,75	60,50	39,33	12,82
	<i>Insolation</i>	0,00	9,00	5,20	2,64
	<i>pluviométrie</i>	0,00	0,00	0,00	0,00
févr-07	<i>Tsec</i>	29,75	33,18	31,98	0,83
	<i>HR</i>	38,50	66,75	53,95	7,64
	<i>Insolation</i>	0,00	9,50	7,21	2,31
	<i>pluviométrie</i>	0,00	0,00	0,00	0,00
mars-07	<i>Tsec</i>	26,43	34,25	32,35	1,51
	<i>HR</i>	43,00	73,00	53,79	7,02
	<i>Insolation</i>	0,00	9,50	6,77	2,32
	<i>pluviométrie</i>	0,00	15,00	1,18	3,53
avr-07	<i>Tsec</i>	24,85	32,85	30,33	1,70
	<i>HR</i>	57,50	88,75	67,85	6,58
	<i>Insolation</i>	0,00	10,30	6,59	3,51
	<i>pluviométrie</i>	0,00	74,10	8,10	19,30
mai-07	<i>Tsec</i>	26,95	32,08	29,89	1,32
	<i>HR</i>	57,75	86,25	70,95	5,65
	<i>Insolation</i>	0,00	10,50	6,50	2,97
	<i>pluviométrie</i>	0,00	45,20	4,00	10,48
juin-07	<i>Tsec</i>	25,25	30,55	28,50	1,18
	<i>HR</i>	62,00	82,75	72,32	5,26
	<i>Insolation</i>	0,20	10,20	5,00	2,34
	<i>pluviométrie</i>	0,00	12,20	1,17	2,65

Relevé météorologique de la station SODEXAM Yamoussoukro : Juil 07 à Janv

08

		min	max	moy	ecart type
juil-07	<i>Tsec</i>	24,13	29,13	27,39	1,10
	<i>HR</i>	68,50	90,00	75,40	5,13
	<i>Insolation</i>	0,00	8,00	3,91	2,32
	<i>pluviométrie</i>	0,00	62,40	8,03	15,73
août-07	<i>Tsec</i>	24,30	28,23	26,78	0,89
	<i>HR</i>	67,00	87,50	77,51	4,09
	<i>Insolation</i>	0,00	9,60	3,52	2,93
	<i>pluviométrie</i>	0,00	75,80	3,35	13,65
sept-07	<i>Tsec</i>	24,60	29,68	27,75	1,35
	<i>HR</i>	70,25	87,50	76,92	5,03
	<i>Insolation</i>	0,00	7,90	4,28	2,25
	<i>pluviométrie</i>	0,00	26,70	4,12	7,57
oct-07	<i>Tsec</i>	25,63	30,00	28,20	0,98
	<i>HR</i>	67,25	84,50	74,27	4,04
	<i>Insolation</i>	0,10	10,30	5,58	2,37
	<i>pluviométrie</i>	0,00	30,00	5,12	9,05
nov-07	<i>Tsec</i>	27,18	30,15	28,86	0,76
	<i>HR</i>	62,00	81,50	72,53	4,01
	<i>Insolation</i>				
	<i>pluviométrie</i>	0,00	12,90	1,37	3,38
déc-07	<i>Tsec</i>	27,10	38,43	29,53	1,81
	<i>Moyenne</i>	37,25	81,75	62,78	10,92
	<i>Insolation</i>	4,40	9,50	6,92	1,59
	<i>pluviométrie</i>	0,00	0,00	0,00	0,00
janv-08	<i>Tsec</i>	26,10	31,25	29,67	1,16
	<i>Moyenne</i>	17,00	61,25	32,00	14,18
	<i>Insolation</i>	1,00	10,00	8,31	1,78
	<i>pluviométrie</i>	0,00	0,00	0,00	0,00

A l'air libre				
ESSAI	PERIODE D'ESSAI	Température (°C)	Humidité relative de l'air (%)	Vitesse de l'air (m/s)
1	mars-07	30,83 ± 0,96 27,33 - 34,50	68,67 ± 5,58 36,00 - 77,83	1,07 ± 0,22 0,63 - 2,28
2	Avr-07	30,05 ± 1,75 26,00 - 32,80	68,89 ± 7,53 57 - 82,53	1,12 ± 0,06 0,53 - 1,85
3	Avr-07	30,66 ± 2,68 26,00 - 34,80	69 ± 6,54 51,00 - 92,00	1,21 ± 0,80 0,66 - 3,00
4	Mai-07	29,66 ± 2,28 27,00 - 33,00	76,5 ± 6,15 62 - 86	1,16 ± 0,33 0,15 - 1,50
5	Mai-07	30,83 ± 2,51 26,58 - 34,50	68,67 ± 7,45 59,00 - 85,87	1,02 ± 0,54 0,13 - 1,50
6	Juin-07	30,59 ± 1,08 25,59 - 33,00	68,06 ± 6,69 60,00 - 85,53	1,03 ± 0,07 0,05 - 1,85
7	Juin-07	30,59 ± 0,76 25,59 - 33,00	67,96 ± 6,10 60,00 - 85,53	1,16 ± 0,23 0,05 - 1,50
8	Juil-07	28,46 ± 0,79 25,59 - 33,00	70,35 ± 3,54 65 - 86	0,72 ± 0,33 0,29 - 1,67
9	Juil-07	28,67 ± 2,04 24,66 - 32,00	69,97 ± 8,54 65,00 - 87,96	0,66 ± 0,19 0,05 - 1,30
10	Juil-07	29,97 ± 1,55 24,66 - 32,00	68,01 ± 5,45 65,00 - 87,96	0,93 ± 0,21 0,10 - 1,35
11	août-07	30,13 ± 0,86 23,88 - 31,00	67,26 ± 4,67 50 - 86	0,86 ± 0,23 0,19 - 1,22
12	août-07	28,74 ± 0,93 23,88 - 31,00	69,70 ± 5,53 67,00 - 89,87	0,66 ± 0,19 0,10 - 1,55
13	août-07	28,67 ± 0,57 23,88 - 31,00	69,97 ± 3,03 67,00 - 89,87	0,65 ± 0,23 0,05 - 1,30
14	Oct-07	29,92 ± 0,39 24,91 - 32,5	68,33 ± 2,99 60,00 - 86,83	0,79 ± 0,08 0,05 - 2,30
15	Oct-07	29,89 ± 0,41 24,91 - 32,50	68,20 ± 2,75 60,00 - 86,83	0,97 ± 0,08 0,05 - 2,00

16	nov-07	30,85 ± 0,30 26,60 - 34,00	64,80 ± 4,10 43,00 - 80,00	0,79 ± 0,12 0,63 - 1,50
17	nov-07	30,80 ± 1,12 25,66 - 33,00	66,50 ± 5,59 33,00 - 86,00	0,76 ± 0,17 0,58 - 1,43
18	nov-07	29,85 ± 1,32 27,00 - 33,80	64,80 ± 4,54 33,00 - 86,00	1,00 ± 0,23 0,63 - 1,33
19	déc-07	31,01 ± 0,42 26,00 - 35,00	58,23 ± 3,13 42,00 - 80,00	0,94 ± 0,12 0,63 - 1,50
20	déc-07	31,66 ± 1,10 29,80 - 33,20	57,50 ± 8,13 41,00 - 86,38	0,87 ± 0,17 0,79 - 1,45
21	janv-08	31,60 ± 2,25 23,50 - 35,00	35,66 ± 7,50 22 - 59	0,89 ± 0,20 0,63 - 1,51

Sous serre expérimentale

ESSAI	PERIODE D'ESSAI	Température (°C)	Humidité relative de l'air (%)	Vitesse de l'air (m/s)
1	mars-07	38,68 ± 3,68 33,80 - 52,00	43,22 ± 5,53 29,50 - 60,00	0,54 ± 0,14 0,05 - 0,65
2	Avr-07	39,00 ± 4,25 30,80 - 52,00	46,65 ± 7,33 34,50 - 64,00	0,45 ± 0,04 0,05 - 0,80
3	Avr-07	38,85 ± 4,15 30,50 - 48,00	46,6 ± 5,92 31,00 - 64,50	0,51 ± 0,14 0,05 - 0,75
4	Mai-07	38,87 ± 2,02 32,50 - 46,00	45,72 ± 4,53 33,00 - 68,50	0,41 ± 0,29 0,05 - 0,65
5	Mai-07	40,23 ± 3,76 29,80 - 50,00	46,61 ± 4,34 30,00 - 66,50	0,31 ± 0,21 0,4 - 0,50
6	Juin-07	41,58 ± 4,41 29,50 - 44,00	47,50 ± 5,74 34,00 - 63,50	0,4 ± 0,11 0,05 - 0,60
7	Juin-07	41,58 ± 4,55 30,00 - 49,00	47,50 ± 6,18 34,00 - 62,00	0,42 ± 0,10 0,04 - 0,65
8	Juil-07	39,83 ± 3,67 28,00 - 48,00	46,26 ± 5,87 35,00 - 60,00	0,33 ± 0,23 0,05 - 0,85
9	Juil-07	40,00 ± 2,09 28,50 - 48,00	45,11 ± 5,09 35,00 - 60,00	0,40 ± 0,13 0,05 - 0,70
10	Juil-07	39,79 ± 2,14 28,50 - 48,00	45,37 ± 5,56 35,50 - 60,00	0,43 ± 0,15 0,05 - 0,60

11	août-07	41,05 ± 3,10 29 - 48,00	40,25 ± 3,66 37,00 - 64,00	0,36 ± 0,15 0,05 - 0,55
12	août-07	39,79 ± 4,02 28,50 - 48,00	45,13 ± 4,98 36,00 - 65,00	0,34 ± 0,14 0,05 - 0,65
13	août-07	38,83 ± 0,59 29,00 - 48,00	41,11 ± 2,68 36,00 - 68,00	0,42 ± 0,10 0,03 - 0,50
14	oct-07	40,10 ± 2,45 29,00 - 49,00	44,40 ± 4,91 34,00 - 53,00	0,32 ± 0,11 0,03 - 0,50
15	oct-07	38,86 ± 0,08 29,00 - 46,00	45,71 ± 5,53 34,00 - 65,00	0,72 ± 0,03 0,04 - 0,98
16	nov-07	39,80 ± 2,02 29,80 - 58,00	47,47 ± 6,72 28,00 - 78,00	0,31 ± 0,07 0,05 - 0,50
17	nov-07	39,75 ± 2,53 30,00 - 48,00	43,50 ± 5,91 28,00 - 78,00	0,42 ± 0,09 0,05 - 0,53
18	nov-07	41,03 ± 2,81 33,80 - 51,00	39,70 ± 3,89 40,00 - 63,00	0,34 ± 0,09 0,09 - 0,55
19	déc-07	39,63 ± 1,40 29,80 - 48,80	35,86 ± 2,25 19,00 - 60,00	0,31 ± 0,10 0,07 - 0,51
20	déc-07	42,62 ± 3,20 34,00 - 50,00	33,63 ± 3,63 23,00 - 53,00	0,36 ± 0,14 0,05 - 0,62
21	janv-08	39,97 ± 2,69 28,50 - 48,00	28,00 ± 5,12 12,00 - 48,00	0,46 ± 0,16 0,05 - 0,56

ANNEXE 4 : DETERMINATION DES ISOTHERMES

Le tableau ci-dessous donne les teneurs d'acide sulfurique avec l'humidité relative pour les températures allant de 30 °C à 60 °C à des pas de 10.

X(H ₂ SO ₄)	HR (%)			
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
1	0	0	0	0
0,7054	5	6	6	7
0,6547	9	10	11	12
0,5803	21	21	22	24
0,4812	41	41	42	43
0,3823	61	61	64	63
0,299	76	76	75	76
0,2298	85	85	84	85
0,1160	95	95	94	95
0	100	100	100	100

ANNEXE 5 : COURBE CARACTERISTIQUE DE SECHAGE

AVEC LA FONCTION PUISSANCE DE TYPE $f(X_r) = X_r^n$

Avec $X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}}$ et n un coefficient à déterminer expérimentalement.

Le tableau ci-dessous donne les résultats, à chaque essai à l'air libre, d'une fonction puissance en comparaison à une fonction polynomiale sur la base de l'erreur quadratique moyenne.

ESSAI	Fonction puissance		polynomiale
	n	EQM	EQM
1	2,47	0,0045	0,0019
3	2,44	0,0028	0,0021
4	2,90	0,0051	0,0056
7	2,43	0,0056	0,0045
14	1,79	0,0029	0,0036
16	1,58	0,0025	0,0036
17	1,58	0,0025	0,0034
19	1,82	0,0063	0,0024
20	1,81	0,0069	0,0009
21	1,82	0,0066	0,0013
<i>MOYENNE</i>	2,06	0,0046	0,0029
<i>LC à 95''%</i>	0,46	0,0018	0,0015

ANNEXE 6 : SIMULATIONS

Données d'entrée du modèle logarithmique pour la simulation des essais 5 ; 9 ; 13 et 18 et calculs de l'erreur de déviation E(%)

- Essai à l'air libre

Essais	Paramètres aérothermiques			Paramètres du modèle Logarithmique				Erreur de déviation E(%)
	T(°C)	HR(%)	V(m/s)	X0 (% kg eau/ kg ms)	a	c	k	
5	30,83	68,67	1,02	129,89	0,87	0,09	0,13	11,98
9	28,67	69,97	0,66	143,90	0,90	0,06	0,07	8,84
13	28,67	69,97	0,65	143,90	0,90	0,06	0,07	20,03
18	29,85	64,80	1,00	123,76	0,87	0,09	0,12	19,88
Moyenne générale des erreurs relatives de déviation entre Xexp et Xth								15,18
Ecart type général des erreurs relatives de déviation entre Xexp et Xth								± 6,42

- Essai sous serre expérimentale

Essais	Paramètres aérothermiques			Paramètres du modèle Logarithmique				Erreur de déviation E(%)
	T(°C)	HR(%)	V(m/s)	X0 (% kg eau/ kg ms)	a	c	k	
5	40,23	46,61	0,31	129,89	0,95	0,04	0,11	9,50
9	40,00	45,11	0,40	143,90	0,94	0,05	0,13	12,63
13	38,83	41,11	0,42	143,90	0,96	0,05	0,10	11,01
18	41,03	39,70	0,34	123,76	0,95	0,06	0,13	9,90
Moyenne générale des erreurs relatives de déviation entre Xexp et Xth								10,76
Ecart type général des erreurs relatives de déviation entre Xexp et Xth								± 1,40

