



Contribution au séchage solaire des produits carnés : Modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux.

Ahmat Tom

► To cite this version:

Ahmat Tom. Contribution au séchage solaire des produits carnés : Modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux.. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015. Français. <NNT : 2015ENAM0013>. <tel-01179979>

HAL Id: tel-01179979

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01179979>

Submitted on 23 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n°432 : Sciences et Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

I'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité “Génie énergétique”

présentée et soutenue publiquement par

Ahmat TOM

le 10 Juillet 2015

CONTRIBUTION AU SÉCHAGE SOLAIRE DES PRODUITS CARNÉS: MODÉLISATION ET RÉALISATION D'UN SÉCHOIR ADAPTÉ AUX PAYS TROPICAUX.

Directeur de thèse : **Denis BRUNEAU**
Co-directeur de la thèse : **Aworou Waste AREGBA**

Jury

- M. Jean-Rodolphe PUIGGALI**, Professeur des Universités, Université de Bordeaux
M. Ali AHMED, Maître de Conférences - HDR, Université de N'Gaoundéré (Cameroun)
M. Yves JANNOT, Ingénieur de Recherche CNRS-HDR, LEMTA (Nancy)
M. Aworou Waste AREGBA, Maître de Conférences-CAMES, Université de Bordeaux
M. Henri BERTIN, Directeur de Recherche CNRS, I2M dept TREFLE (Bordeaux)
M. Denis BRUNEAU, Maître de Conférences - HDR, Arts et Métiers ParisTech
Mme Claire GOBBE, Professeur des Universités, Université de Bordeaux
M. Wahbi JOMAA, Professeur des Universités, Université de Bordeaux
M. Abdessattar HADJ SASSI, Maître de Conférences, Institut Polytechnique de Bordeaux
M. Alain SOMMIER, Ingénieur de Recherche CNRS, I2M-dept TREFLE (Bordeaux)

- Président
Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Invité
Invité

T
H
È
S
E

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le résultat de trois années d'efforts, de collaboration et de soutiens financier et moral. C'est l'occasion pour moi de montrer ma gratitude à tous ceux qui y ont contribué. Je tiens à remercier :

- le Département **TREFLE** de l'**I2M**, pour son accueil et les moyens mis à ma disposition,
- la **Banque Islamique de Développement (BID)**, qui m'a accordé une bourse de thèse de trois ans,
- mon Directeur de thèse, **Denis BRUNEAU**, qui a été pour beaucoup dans l'aboutissement de cette thèse, et à mon Co-Directeur **Aworou-Waste AREGBA** pour son encadrement et ses conseils,
- Messieurs **Jean-Rodolphe PUIGGALI**, et **Alain SOMMIER** pour leur conseils et contributions,
- Messieurs les Membres du Jury de cette thèse, **Yves JANNOT**, **Ali AHMED**, **Henri BERTIN**, **Wahbi JOMMA**, **Claire GOBBE**, **Jean-Rodolphe PUIGGALI**, **Alain SOMMIER** et **Hadj SASSI** pour l'évaluation de ce travail.
- **L'Université de N'Gaoundéré** pour avoir accepté de me libérer pendant ces trois années cette thèse.
- Madame **Maud CANSEL** et Monsieur **Hadj SASSI** pour leurs contributions aux analyses biochimiques et microbiologiques,
- Messieurs **Dimitri JAUPART**, **Serge GENDRON**, pour leur participation active aux travaux de réalisation du séchoir solaire de laboratoire,
- Les stagiaires **Fernando DE PABLO**, **Helena RODRIGUEZ ENTEM**, **Aurélie SIRIACO**, pour leurs aides et participations à ce travail.
- Mes collègues doctorants du Trèfle, pour les bons moments partagés ensemble,
- Mon épouse **Nanné MOUSSA** et mes enfants pour leur patience et leur compréhension, pendant mon absence,
- Ma mère **Mariam ABAKAR** et mon père **TOM Djidda** pour leurs affections.
- Tous les frères et amis qui m'ont témoigné leurs soutiens.

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1: MISE EN SITUATION	4
1.1 Production et consommation de la viande au Cameroun	4
1.1.1 Situation géographique et contexte socio-économique	4
1.1.2 Contexte météorologique.....	5
1.1.3 Production de la viande au Cameroun.....	6
1.1.4 Consommation de la viande au Cameroun.....	8
1.2 Définition et composition de la viande.....	9
1.2.1 Composition chimique de la viande	9
1.2.2 Propriétés nutritionnelles de la viande.....	9
1.2.3 Propriétés thermo-physiques de la viande.....	10
1.2.4 Qualités microbiologiques de la viande.....	11
1.3 Quelques exemples de produits carnés séchés dans les Pays En Développement.....	12
1.3.1 Le <i>Biltong</i>	13
1.3.2 Le <i>Charqui</i>	14
1.3.3 Le <i>Kilichi</i>	16
1.4. Le séchage du <i>Kilichi</i>	19
1.4.1 Conditions de séchage du <i>Kilichi</i>	19
1.4.2 Expression du besoin de séchoir solaire des produits carnés	20
1.5 Le séchage	21
1.5.1 Différents modes de séchage	21
1.5.2 Le séchage solaire.....	22
1.5.3. Modélisation de l'ensoleillement	23
1.5.3.1 Facteurs et types de rayonnement.....	23
1.5.3.2 Expression des facteurs géométriques de la modélisation du rayonnement	24
1.5.3.3 Modélisation du rayonnement solaire.....	25
1.5.4 Présentation des différents types de séchoirs solaires	28
1.5.5 Etude comparative des différents types de séchoirs solaires	30
1.5.6 Quelques concepts et éléments de conception d'un séchoir solaire.	31
1.6 Les isothermes de sorption	34
1.6.1 Définition et application	34
1.6.2 Modélisation des isothermes de sorption	36
1.6.3 Isothermes de sorption des produits carnés	37

1.7 Les cinétiques de séchage.....	39
1.7.1 Evolution de la vitesse et de la température au cours du séchage	39
1.7.2 Modélisation des cinétiques de séchage	40
1.7.2.1 Le modèle Diffusif	41
1.7.2.2 Les modèles semi-empiriques	41
1.7.2.3 La méthode de Courbe Caractéristique de Séchage (CCS)	43
1.7.2.4 Méthode du flux masse isenthalpe	44
1.7.3 Cinétiques de séchage des produits carnés.....	46
CHAPITRE 2. CARACTERISATION DU COMPORTEMENT HYGROSCOPIQUE DE LA VIANDE AU COURS DU SECHAGE	47
2.1 Matériel et méthodes	48
2.1.1 Matériel et méthodes des isothermes de désorption	48
2.1.1.1 Dispositif expérimental d'isothermes de désorption	48
2.1.1.2 Méthodes de détermination des isothermes de désorption	48
2.1.1.3 Méthode de détermination des paramètres intervenant dans les modèles d'isothermes de sorption.....	50
2.1.1.4 Détermination des propriétés de l'eau liée	52
2.1.1.5 Détermination de la taille des pores de la viande de bœuf	52
2.1.1.6 Détermination de la chaleur isostérique de sorption	53
2.1.2 Matériel et méthodes de cinétiques de séchage	54
2.1.2.1 Dispositif expérimental utilisé pour les cinétiques.....	54
2.1.2.2 Obtention des cinétiques de séchage et de la surface du produit : méthode	55
2.2 Résultats et discussion.....	60
2.2.1 Etude des isothermes de désorption de la viande de bœuf	60
2.2.1.1 Détermination expérimentale des isothermes de désorption	60
2.2.1.2 Modélisation des isothermes de désorption.....	61
2.2.1.3 Dépendance en température des paramètres du modèle de GAB	65
2.2.1.4 Chaleur isostérique de désorption de la viande de bœuf	66
2.2.1.5 Propriétés de l'eau liée	68
2.2.1.6. Taille des pores de la viande de bœuf.....	69
2.2.2 Détermination expérimentale et modélisation des cinétiques de séchage	70
2.2.2.1 Influence des paramètres de l'air sur les cinétiques de séchage de la viande de bœuf..	70
2.2.2.2 Modélisation des cinétiques de séchage	74
CHAPITRE 3. CONCEPTION ET REALISATION DE SECHOIRS SOLAIRES	79
3.1 Conception et réalisation du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	80
3.1.1 Analyse du besoin	80

3.1.2 La fonction globale du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	80
3.1.2.1 Entités nécessaires pour satisfaire la fonction globale	80
3.1.2.2 Critères d'appréciation de la fonction globale du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	81
3.1.3 Cahier de charge fonctionnel du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	81
3.1.4 Organigramme Technique étendu (OTé) du séchoir solaire de <i>Kilichi</i> et modes.....	84
3.1.5 Choix du type de séchoir solaire	85
3.1.6 Flux d'interactions du séchoir solaire local.....	86
3.1.7 Choix des composants du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	87
3.1.8 Les variables de la démarche de conception du séchoir	88
3.1.8.1 Les variables liées au cahier de charge du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	89
3.1.8.2 Les variables de conception.....	89
3.1.9 Fonctionnement du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	93
3.1.10 Dimensionnement du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	94
3.1.11 Dimensions du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	96
3.1.12 Réalisation du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	98
3.2 Conception et réalisation du séchoir solaire de laboratoire	100
3.2.1 Expression et analyse du besoin du séchoir solaire de laboratoire	100
3.2.2 Cahier de charge du séchoir de laboratoire	100
3.2.3 Organigramme Technique étendu (OTé) du séchoir solaire de laboratoire.....	102
3.2.4 Présentation des solutions techniques retenues	105
3.2.4.1 Solutions techniques pour l'unité de rayonnement solaire	105
3.2.4.2 Solution technique pour l'unité de séchage.....	105
3.2.4.3 Solution technique pour l'unité de chauffage de l'air	106
3.2.4.4 Solution technique pour l'unité de contrôle de l'hygrométrie.....	106
3.2.4.5 Solutions techniques pour l'unité aéraulique.....	107
3.2.4.6 Solutions techniques pour l'unité de mesures et de commande	108
3.2.5. Schémas du séchoir solaire de laboratoire.....	109
CHAPITRE 4. MISE EN PLACE ET VALIDATION EXPERIMENTALE D'UN MODELE DE SECHAGE SOLAIRE DE VIANDE DE BOEUF ADAPTE AU SECHOIR SOLAIRE DE KILICHI	117
4.1 Modélisation du séchage solaire de la viande de bœuf adapté au séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	118
4.1.1 Hypothèses de la modélisation	118
4.1.2 Surfaces d'échanges et volume de contrôle du séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	118
4.1.3 Bilan masse dans le séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	120
4.1.3.1 Bilan de masse sur les produits	120
4.1.3.2 Bilan masse sur l'air intérieur du séchoir	124

4.1.4 Bilan d'énergie dans le séchoir solaire de <i>Kilichi</i>	125
4.1.4.1 Bilan d'énergie sur les produits	126
4.1.4.2 Bilan d'énergie sur l'air humide du séchoir	128
4.1.4.3 Bilan d'énergie sur les parois du séchoir solaire de Kilichi	129
4.1.5 Modélisation de la vitesse de l'air dans le séchoir	130
4.1.5.1 Trajets de l'air et zones de pertes de charge	130
4.1.6 Modélisation des flux de chaleur dans le séchoir solaire	133
4.1.6.1 Modélisation du rayonnement solaire direct dans le séchoir.....	133
4.1.6.2 Modélisation du rayonnement solaire diffus dans le séchoir.....	136
4.1.7 Méthode de résolution des équations du modèle	142
4.2 Mise en place d'essais sur le séchoir de <i>Kilichi</i> et validation expérimentale	144
4.2.1 Localité et période des essais	144
4.2.2 Matériel et méthodes	145
4.2.2.1 Préparation des échantillons	145
4.2.2.2 Protocole expérimental	145
4.2.2.3. Méthodes de mesures des paramètres de séchage	146
4.2.3 Résultats des essais de validation	149
4.2.3.1 Rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur le site des essais.....	149
4.2.3.2 Evolution des températures à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir	151
4.2.3.3 Cinétiques de séchage de la viande par la méthode traditionnelle et avec le séchoir : valeurs expérimentales et modélisées.....	153
CHAPITRE 5. IMPACT DU SECHAGE SOLAIRE SUR LES QUALITES MICROBIOLOGIQUE ET BIOCHIMIQUE DE LA VIANDE DE BOEUF.....	159
5.1 Caractérisation du séchoir solaire de laboratoire.....	160
5.1.1 Composition spectrale et évolution du rayonnement dans le séchoir solaire	161
5.1.2 Calibrage du rayonnement dans le séchoir	162
5.1.3 Mesure et évolution de la température et de l'humidité relative dans le séchoir.....	164
5.2 Séchage solaire des échantillons de viande de bœuf	166
5.2.1 Préparation des échantillons	166
5.2.3 Cinétiques de séchage solaire des échantillons de viande de bœuf.....	168
5.3 Analyses microbiologiques et biochimiques	174
5.3.1 Matériel et méthodes des analyses microbiologiques et biochimiques	174
5.3.1.1 Procédure expérimentale d'analyses microbiologiques.....	174
5.3.1.2 Procédure expérimentale d'analyses biochimiques	178
5.3.2 Résultats des analyses microbiologiques et biochimiques	180
5.3.2.1 Résultats et discussion des analyses microbiologiques	180

5.3.2.2 Résultats et discussion des analyses biochimiques.....	183
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	188
NOMENCLATURE	192
BIBLIOGRAPHIE	195
ANNEXES.....	203
ANNEXE 1.....	203
ANNEXE 3.1.....	204
ANNEXE 3.2.....	205
ANNEXE 3.3.....	208
ANNEXE 3.4.....	209
ANNEXE 3.5.....	210
ANNEXE 4.1.....	211
ANNEXE 4.2.....	212
ANNEXE 4.3.....	214
ANNEXE 4.4.....	216
ANNEXE 4.5.....	219
ANNEXE 4.6.....	223
ANNEXE 4.7.....	227
ANNEXE 4.8.....	228
ANNEXE 5.1.....	231

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1 Zones agro-écologiques du Cameroun (IRAD, 2011)	4
Fig. 1.2 Profil météorologique de la ville de N'gaoundéré (Nasa, 2014)	6
Fig. 1.3 Photo du Goudali de l'Adamaoua (Ahmat, 2013)	7
Fig. 1.4 Photo du produit carné <i>Biltong</i> (Bigstock blog, 2014)	14
Fig. 1.5 Photo du produit carné <i>Charqui</i> (Stravaganza blog, 2015)	15
Fig. 1.6 Photo du produit carné <i>Kilichi</i> (Ahmat, 2013)	16
Fig. 1.7 Procédé de séchage du <i>Kilichi</i> (Résumé par Ahmat, 2015)	17
Fig. 1.8 Producteur de <i>Kilichi</i> exposant son produit au soleil (Blog Sophie au Niger, 2015)	19
Fig. 1.9 <i>Kilichi</i> au soleil (Blog A moveable kitchen, 2014)	20
Fig. 1.10 Séchoir solaire direct passif (Sharma et al., 2010)	29
Fig. 1.11 Séchoir solaire indirect passif (Rabl, 1985)	29
Fig. 1.12 Séchoir solaire mixte passif (Ekechukwu et al., 1999)	30
Fig. 1.13 Séchoir solaire doté d'un dispositif de stockage d'énergie (Jain, 2005)	32
Fig. 1.14 Séchoir à inclinaison variable (Gikuru et al., 2005)	32
Fig. 1.15 Séchoir solaire direct amélioré (Kherrou et al., 2008)	33
Fig. 1.16 Différentes zones des isothermes de sorption	35
Fig. 1.17 Différentes phases de vitesse séchage	40
Fig. 1.18 Evolution de la température du produit au cours du séchage	40
Fig. 2.1 Schéma d'échantillons dans un bocal de sorption	48
Fig. 2.2 Différentes parties du bœuf (www.cuisine-astuce.com, 2015)	49
Fig. 2.3 Photo de la veine séchage du département Trefle de l'I2M de Bordeaux	54
Fig. 2.4 Schéma du dispositif expérimental d'obtention des cinétiques (Jannot et al., 2004)	55
Fig. 2.5 Photo d'un échantillon de viande placé dans le séchoir	57
Fig. 2.6 Images de la viande filmée par la caméra infra rouge du séchoir convectif	57
Fig. 2.7 Isotherme de désorption de la viande de bœuf (résultats expérimentaux): teneur en eau d'équilibre en fonction de l'activité d'eau pour différentes températures d'air	61
Fig. 2.8 Valeurs expérimentales et modélisées (BET, GAB et Halsey) des isothermes de désorption de la viande de bœuf	62
Fig. 2.9 Résidus (Eq. (2.3)) des teneurs en eau d'équilibre entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par le modèle GAB	63
Fig. 2.10 Résidus (Eq. (2.3)) des teneurs en eau d'équilibre entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par le modèle BET	64
Fig. 2.11 Résidus (Eq. (2.3)) des teneurs en eau d'équilibre entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par le modèle de Halsey	64
Fig. 2.12 Isostères de désorption de la viande de bœuf en fonction de la température [$-Ina_w = f(1/T)$], pour différentes teneur en eau	67
Fig. 2.13 Chaleur isostérique de désorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre	68
Fig. 2.14 Courbes linéaires de Caurie (Caurie, 1981) à différentes températures	69
Fig. 2.15 Evolution de la teneur en eau expérimentale W de la viande de bœuf en fonction du temps t : influence de la température de l'air séchant	71
Fig. 2.16 Evolution du flux-masse F_m de séchage de la viande de bœuf en fonction de la teneur en eau W : influence de la température de l'air séchant	71
Fig. 2.17 Evolution de la teneur en eau expérimentale W en fonction du temps t à différentes vitesses d'air : influence de la vitesse de l'air séchant	72
Fig. 2.18 Evolution du flux-masse F_m en fonction de la teneur en eau W : influence de la vitesse de l'air séchant	73

Fig. 2.19 Evolution de la teneur en eau expérimentale W en fonction du temps t à différentes humidités relatives.....	74
Fig. 2.20 Evolution du flux-masse Fm en fonction de la teneur en eau W: influence de l'humidité relative de l'air séchant.....	74
Fig. 2.21 Evolution des teneurs en eau expérimentales W_{exp} et modélisées par le flux masse W_{mod} en fonction du temps à différentes températures de séchage.	78
Fig. 2.22 Evolution des teneurs en eau expérimentales W_{exp} et modélisées par le flux masse W_{mod} en fonction du temps à différentes vitesses d'air de séchage.	78
Fig. 3.1 Entités minimales du séchoir solaire séchoir solaire de Kilichi.....	80
Fig. 3.2 Organigramme Technique (OTé) de niveau 2 du séchoir solaire de Kilichi.	84
Fig. 3.3 Possibilités d'agencement du séchoir solaire de Kilichi.	85
Fig. 3.4 Agencement 1 de type capteur enveloppant la chambre de séchage.	85
Fig. 3.5 Choix définitif du séchoir solaire de Kilichi.....	86
Fig. 3.6 Organigramme Technique (OTé) de niveau 3 du séchoir solaire de Kilichi.	87
Fig. 3.7 Flux d'interactions dans le séchoir solaire local.	87
Fig. 3.8 Variables de conception de l'unité de chauffage.	90
Fig. 3.9 Schéma d'illustration de la variable de conception « angles d'inclinaison » de la variable de la couverture transparente du capteur.....	91
Fig. 3.10 Schéma du séchoir : variables de conception de l'unité de chauffage.....	91
Fig. 3.11 Variables de conception de l'unité de séchage.	92
Fig. 3.12 Schéma d'une claire: variables de conception « longueur » et « largeur » d'une claire.....	92
Fig. 3.13 Schéma du séchoir : variable de conception de la chambre de séchage.	93
Fig. 3.14 Evolution de la hauteur du soleil en fonction des heures de la journée.	95
Fig. 3.15 Inclinaison des vitres du séchoir solaire de Kilichi.....	95
Fig. 3.16 Simulation de l'évolution de l'éclairement solaire global sur les trois vitres du séchoir solaire de Kilichi pour la journée du 27 Août dans la localité de N'gaoundéré.....	96
Fig. 3.17 Vue arrière du séchoir solaire de Kilichi.	97
Fig. 3.18 Vue de face du séchoir solaire de Kilichi.	97
Fig. 3.19 Vue de droite du séchoir solaire de Kilichi.....	98
Fig. 3.20 Photo de la vue de face du séchoir solaire de Kilichi	99
Fig. 3.21 Photo de la vue intérieure du séchoir solaire de Kilichi.....	99
Fig. 3.22 Photo de la vue de gauche du séchoir solaire de Kilichi.....	100
Fig. 3.23 Organigramme technique (OTé) de niveau 3 du séchoir solaire de laboratoire.....	104
Fig. 3.24 Vue profil de l'unité de rayonnement solaire.....	105
Fig. 3.25 Schéma de la position du produit par rapport aux lampes.	106
Fig. 3.26 Position des résistances chauffantes dans la conduite d'air	106
Fig. 3.27 Position des évaporateurs de déshumidification et de l'orifice d'injection de la vapeur d'eau dans la conduite d'air.	107
Fig. 3.28 Forme de la conduite d'air du séchoir solaire de laboratoire.	107
Fig. 3.29 Exemple d'une interface graphique du programme Labview du séchoir solaire de laboratoire	109
Fig. 3.30 Schéma du séchoir solaire de laboratoire: Vue de profil.	110
Fig. 3.31 Schéma du séchoir solaire de laboratoire: Vue arrière.	110
Fig. 3.32 Schéma de l'unité aéraulique du séchoir solaire de laboratoire.	111
Fig. 3.33 Vue de droite du séchoir solaire de laboratoire.....	112
Fig. 3.34 Vue de dessus du séchoir solaire de laboratoire.	112
Fig. 3.35 Vue de dessus de la chambre de séchage du séchoir de laboratoire.	113
Fig. 3.36 Introduction du ventilateur dans la conduite d'air	113

Fig. 3.37 Fixation des résistances chauffantes dans la conduite d'air.....	113
Fig. 3.38 Assemblage de la conduite d'air du séchoir solaire de laboratoire	114
Fig. 3.39 Vue de face-avant du séchoir solaire de laboratoire	115
Fig. 3.40 Photo de profil de la face-avant du séchoir solaire de laboratoire	115
Fig. 3.41 Vue de profil de la face-arrière du séchoir solaire de laboratoire	116
Fig. 4.1 Schéma de principe de la modélisation à l'échelle procédé.....	117
Fig. 4.2 Vue de face intérieure du séchoir solaire de Kilichi: décomposition des surfaces du séchoir.	119
Fig. 4.3 Vue de gauche du séchoir de Kilichi: décomposition des parois verticales.	119
Fig. 4.4 Schématisation des échanges de matière entre le produit et l'air.....	121
Fig. 4.5 VC où l'air échange avec 1 produit : (a) cas du VC 1 ; (b) cas du VC 4.....	124
Fig. 4.6 VC où l'air échange avec 2 produits : (a) cas du VC 2 et (b) cas du VC 3.....	124
Fig. 4.7 Bilan d'énergie sur un produit : représentation schématique.....	126
Fig. 4.8 Bilan d'énergie sur les vitres et parois du séchoir de <i>Kilichi</i> :i.....	130
Fig. 4.9 Schéma de circulation de l'air dans le séchoir et débits d'air dans le séchoir :	132
Fig. 4.10 Modélisation du rayonnement solaire direct dans le séchoir solaire de Kilichi rayonnement solaire direct.	134
Fig. 4.11 Modélisation du rayonnement solaire diffus dans le séchoir solaire de Kilichi.....	137
Fig. 4.12 Modélisation du comportement du rayonnement réfléchi dans le séchoir solaire de Kilichi.	138
Fig. 4.13 Modélisation du rayonnement infrarouge dans le séchoir solaire local.....	140
Fig. 4.14 Modélisation des échanges convectifs dans le séchoir solaire local.....	141
Fig. 4.15 Structure du programme de résolution du modèle.....	143
Fig. 4.16 Localisation de la ville de N'gaoundéré sur la carte du Cameroun (www.maps.google.com).	144
Fig. 4.17 Séchage du Kilichi par la méthode traditionnelle : produit étalé sur une natte , à l'air libre.	145
Fig. 4.18 Protocole expérimental des essais de séchage de la viande.....	146
Fig. 4.19 Position des appareils de mesures dans le séchoir. Appareil de mesures.	147
Fig. 4.20 Mesure des paramètres de l'air intérieur du séchoir	147
Fig. 4.21 Mesure de masse du produit dans le séchoir.....	148
Fig. 4.22 Mesure du rayonnement solaire global.....	148
Fig. 4.23 Densité de flux de rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur une surface horizontale : valeurs modélisées ; flux global : valeurs expérimentales. Journée du 18 Août 2014... 150	
Fig. 4.24 Densité de flux de rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur une surface horizontale : valeurs modélisées ; flux global : valeurs expérimentales. Journée du 22 Avril 2014... 150	
Fig. 4.25 Densité de flux de rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur une surface horizontale : valeurs modélisées ; flux global : valeurs expérimentales. Journée du 12 Décembre 2012.	151
Fig. 4.26 Evolution de la température ambiante et des températures des airs au dessus des claires du séchoir : Valeur expérimentales et valeurs modélisées pour la journée du 18 Août 2014.....	152
Fig. 4.27 Evolution de la température ambiante et des températures des airs au dessus des claires du séchoir : Valeur expérimentales et valeurs modélisées pour la journée du 22 Avril 2014.....	152
Fig. 4.28 Evolution de la température ambiante et des températures des airs au dessus des claires du séchoir : Valeur expérimentales et valeurs modélisées pour la journée du 12 Décembre 2012.....	153
Fig. 4.29 Evolution de la teneur en eau W en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre (séchage traditionnel) : valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 18 Août 2014.....	155

Fig. 4.30 Evolution de la teneur en eau W en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre (séchage traditionnel): valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 22 Avril 2014.....	155
Fig. 4.31 Evolution de la teneur en eau W en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre (séchage traditionnel) : valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 12 Décembre 2012.....	156
Fig. 4.32 Evolution du flux masse Fm en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre: valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 18 Août 2014.	157
Fig. 4.33 Evolution du flux masse Fm en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre : valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 22 Avril 2014.....	157
Fig. 4.34 Evolution du flux masse Fm en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre : valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 12 Décembre 2012.....	158
Fig. 5.1 Photo du séchoir solaire de laboratoire.....	160
Fig. 5.2 Spectre du rayonnement des lampes solaires du séchoir de laboratoire (Hoenle UV-Technology, 2015).....	161
Fig. 5.3 Spectre du rayonnement du soleil (Wikipedia, 2015).....	161
Fig. 5.4 Spectre du rayonnement Ultra-Violet des lampes du séchoir de laboratoire (Hoenle UV-Technology, 2015).....	162
Fig. 5.5 (a) Différentes positions de lampes solaires ; (b) Distance lampe-produit D.	163
Fig. 5.6 Intensité du rayonnement solaire reçu par le produit en fonction de la distance lampes-produit D.....	163
Fig. 5.7 Position des thermocouples et hygromètres dans le séchoir de laboratoire.....	164
Fig. 5.8 Evolution de la température dans le séchoir en fonction du temps pour deux valeurs d'intensité de rayonnement solaire.....	165
Fig. 5.9 Evolution de l'humidité relative dans le séchoir en fonction du temps pour deux valeurs d'intensités de rayonnement solaire.	166
Fig. 5.10 Viande fraîche utilisée : (a) round de tranche entier ; (b) échantillon frais conditionné pour les analyses microbiologiques et biochimiques.....	167
Fig. 5.11 Découpe de la viande en lanière de 3 mm d'épaisseur.	167
Fig. 5.12 Viande en cours de séchage dans le séchoir solaire de laboratoire.....	168
Fig. 5.13 Evolution de la teneur en eau W de la viande en fonction du temps t pour deux valeurs d'intensités de rayonnement solaire (360 W/m^2 et 700 W/m^2).	169
Fig. 5.14 Evolution du flux masse Fm en fonction de la teneur en eau W pour deux valeurs d'intensités de rayonnement solaire (360 W/m^2 et 700 W/m^2)....	169
Fig. 5.15 Evolution de la teneur en eau W de la viande en fonction du temps t pour deux valeurs de température (40°C et 60°C).	170
Fig. 5.16 Evolution du flux masse Fm en fonction de la teneur en eau W pour deux valeurs de températures (40°C et 60°C).	171
Fig. 5.17 Echantillons de viande de bœuf utilisés pour le suivi de retrait (a) avant séchage, (b) après séchage.	171
Fig. 5.18 Evolution de la surface relative de quatre échantillons de viande séchés dans les mêmes conditions.	172
Fig. 5.19 Evolution de la surface relative de la viande de bœuf pour deux valeurs d'intensités de rayonnement (360W/m^2 et 700W/m^2).	173
Fig. 5.20 Evolution de la surface relative de la viande de bœuf pour deux valeurs de températures (40°C et 60°C).	173
Fig. 5.21 Conditionnement des échantillons séchés pour leurs transports entre leur lieu de séchage et leur lieu d'analyse.	174

Fig. 5.22 Préparation de la suspension mère : Mélange échantillon-eau physiologique.....	175
Fig. 5.23 Formation de colonies de la FMAT dans le milieu PCA.....	176
Fig .5.24 Evolution de la teneur en lipides totaux des viandes fraîche et séchée.....	184
Fig. 5.25. Evolution de l'indice de peroxyde IP en fonction du pourcentage de dilution des lipides taotaux dans le myoglyol: Viande fraîche.....	185
Fig. 5.26. Evolution de l'indice de peroxyde IP en fonction du pourcentage de dilution des lipides taotaux dans le myoglyol : Viande séchée à 40°C et 360 W/m ²	185
Fig. 5.27. évolution de l'indice de peroxyde IP en fonction du pourcentage de dilution des lipides taotaux dans le myoglyol : Viande séchée à 60°C et 360 W/m ² .	186
Fig. 5.28. Evolution de l'indice de peroxyde IP en fonction du pourcentage de dilution des lipides taotaux dans le myoglyol : Viande séchée à 60°C et 700 W/m ² .	186

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Consommation de viande au Cameroun (MINEPIA, 2011)	8
Tableau 1.2: Comparaison de quelques nutriments des viandes de bœuf, d'agneau et de porc fraîches (par 100g de matière sèche). (Chan et al., 1995).....	10
Tableau 1.3: Critères microbiologiques pour la mise sur le marché des produits carnés (Gormley et al.,2010).....	12
Tableau 1.4: Composition chimique du Charqui (Torres et al., 1994).....	15
Tableau 1.5: Composition chimique du <i>Kilichi</i>	18
Tableau 1.6: Equations des modèles BET, GAB et Halsey	36
Tableau 1.7: Modèles semi-empiriques de cinétiques de séchage les plus utilisés.....	42
Tableau 2.1: Solutions salines saturées: humidité relative en fonction de la température (Bizot et Multon, 1978).....	50
Tableau 2.2: Conditions expérimentales des cinétiques de séchage	56
Tableau 2.3: Composition de la viande.....	60
Tableau 2.4 : Paramètres des modèles d'isothermes de désorption obtenus par ajustement sur les résultats expérimentaux	62
Tableau 2.5: Propriétés de l'eau liée dans la viande de bœuf pour différentes températures	69
Tableau 2.6: Taille moyenne des pores (en Angströms) de la viande de bœuf à différentes températures	70
Tableau 2.7: Paramètres et précisions des modèles de cinétiques utilisés (HR=25%, V=0,33m/s). ...	75
Tableau 2.8: Paramètres expérimentaux du modèle du flux masse	76
Tableau 3.1: Cahier de charge fonctionnel du séchoir solaire local.....	82
Tableau 3.2: Critères d'évaluation pour le choix des composants du séchoir solaire de Kilichi	88
Tableau 3.3: Cahier de charge du séchoir solaire laboratoire	101
Tableau 4.1: Equations des flux de rayonnements solaire diffus reçus par les vitres et absorbés par les produits.....	137
Tableau 4.2: Equations de flux de rayonnement solaire réfléchi reçu par les vitres et les produits...	139
Tableau 4.3: Equations des flux de rayonnements infrarouges échangés par les produits.....	140
Tableau 5.1: Conditions expérimentales de séchage solaire de la viande de bœuf	168
Tableau 5.2: Résultats des analyses microbiologiques effectuées sur les viandes fraîche et séchée .	180
Tableau 5.3 : Résultats des analyses microbiologiques sur la viande séchée au soleil et le Kilichi. .	182
Tableau 5.4: Indice de peroxyde des viandes fraîche et séchée	187

INTRODUCTION GENERALE

La viande est l'un des aliments les plus consommés dans le monde et joue un rôle important dans le régime alimentaire humain en raison de sa richesse nutritionnelle. C'est une source précieuse de protéines, de fer, de vitamine B12 et vitamines B complexe, de zinc, de sélénium et de phosphore. Avec la croissance démographique et l'augmentation des revenus de la population mondiale, la consommation de viande a augmenté de 60% entre 1990 et 2009 et cette tendance devrait se poursuivre, d'ici 2050 (FAO, 2009). Dans les Pays En Développement (PED) la consommation de viande est passée de 10 kg de viande par habitant en 1960 à 26 kg de viande par habitant en 2000, et pourrait atteindre 36 kg de viande par habitant en 2030 (Heinz et al., 2007). Cette augmentation est cependant inégalement répartie, selon le niveau de richesse des pays. En 2011, la consommation annuelle de viande au Cameroun a été estimée à 13,3 kg par habitant (MINEPIA, 2011), soit environ la moitié de la moyenne de la consommation de viande dans les PED. La consommation de la viande bovine représente 55% de la consommation totale de viande au Cameroun (MINEPIA, 2011).

La viande est un produit très périssable qui nécessite des moyens de conservation adéquats pour préserver sa stabilité microbiologique et organoleptique. Les techniques modernes de conservation de la viande (congélation, lyophilisation, réfrigération) nécessitent des équipements de production de froid et la disponibilité de l'énergie électrique. Une grande partie des populations des Pays En Développement, en particulier celles de zones rurales des pays de l'Afrique Sub-saharienne, n'a pas accès à ces moyens de conservation modernes à cause du faible pouvoir d'achat de ces populations et de l'indisponibilité de l'énergie électrique dans certaines régions de ces pays. La conservation de viande est donc très difficile dans certains Pays En Développement, surtout ceux qui ont un climat chaud qui favorise la dégradation de la viande. La difficulté de conservation de la viande fraîche dans ces pays a eu pour conséquences, d'une part, la commercialisation de la viande suivant le rythme du débit d'abattage des animaux car l'excédent de viande ne peut être stocké pour une utilisation ultérieure, et d'autre part, le développement des techniques traditionnelles de conservation. Ces techniques traditionnelles combinent souvent le séchage solaire avec d'autres procédés tels que le salage, la friture, le fumage et la fermentation, donnant ainsi naissance à divers produits carnés traditionnels comme le *Biltong* en Afrique du Sud, le *Charqui* au Brésil et le *Kilichi* en Afrique Sub-Saharienne. Faute d'équipements adaptés, l'opération de séchage solaire de ces produits, se fait au soleil (à l'air libre) à la merci des insectes et intempéries et sans aucune maîtrise du procédé de séchage. L'opération devient donc tributaire des

conditions climatiques, ce qui a pour conséquence d'augmenter le risque de dégradation du produit et la durée de séchage.

Au Cameroun, une enquête du Ministère de l'Elevage, des Pêches et des Industries Animales (MINEPIA) a montré que les pertes liées à la mauvaise conservation de viande constituent l'une des principales causes de la sous-consommation des protéines animales au Cameroun (MINEPIA, 2009). Les études réalisées par la FAO, en 1994, sur les pays les moins avancés ont montré que l'absence de techniques de conservation de la viande présente un grave obstacle au développement viable de la production de viande par les petits éleveurs de bétail en milieu rural. Le séchage solaire, qui est déjà largement utilisé, à l'air libre, par les populations pour la conservation des produits, peut donc être, s'il est bien maîtrisé d'un point de vue énergétique et sanitaire, une bonne solution pour ces pays où l'énergie solaire est abondante et dont les populations n'ont pas accès aux moyens de conservation par le froid.

L'objectif de cette thèse est de proposer une compréhension avancée du procédé de séchage solaire de la viande de bœuf à travers une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui se déroulent entre ce produit (viande) et son environnement pendant le séchage solaire, et les conséquences de celui-ci sur la qualité sanitaire de ce produit; ceci a pour but de faciliter la conception de séchoirs solaires adaptés au contexte économique et à l'environnement des pays tropicaux. La démarche scientifique adoptée est, dans un premier temps, de modéliser à l'échelle du produit puis à l'échelle du procédé, les transferts de chaleur et de masse prenant place au cours du séchage. Cette modélisation permet dans un second temps de concevoir, dimensionner et réaliser un séchoir solaire adapté au *Kilichi*, qui est le produit carné séché le plus consommé en Afrique Sub-saharienne. Des essais sont menés avec celui-ci pour qualifier l'aptitude de cette modélisation à décrire précisément les transferts prenant place au sein de ce séchoir. D'autre part, l'évolution des qualités microbiologiques et biochimiques de la viande au cours du séchage solaire est étudiée; dans ce but, un deuxième séchoir solaire, de laboratoire, est conçu et réalisé, permettant ainsi le contrôle des paramètres externes de séchage solaire afin d'évaluer l'impact du séchage solaire sur la qualité du produit.

Ce mémoire de thèse est organisé en cinq chapitres: le premier chapitre est une mise en situation qui présente le contexte de l'étude et l'état de l'art sur la viande, les isothermes de sorption, les cinétiques de séchage et le séchage solaire. Le deuxième chapitre porte sur l'étude expérimentale et la modélisation des isothermes de désorption et cinétiques de séchage. Le troisième chapitre aborde les démarches de conception et de réalisations des deux séchoirs solaires à savoir le séchoir solaire adapté au contexte tropical et le séchoir solaire de

laboratoire. Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation du séchage solaire de la viande et aux essais de validation du modèle. Le cinquième chapitre porte sur l'impact du séchage solaire sur les qualités microbiologiques et biochimiques de la viande de bœuf.

CHAPITRE 1: MISE EN SITUATION

1.1 Production et consommation de la viande au Cameroun

1.1.1 Situation géographique et contexte socio-économique

Le Cameroun est situé dans le Golfe de Guinée et couvre une superficie de 475442km². Il est limité à l'Ouest par le Nigeria, à l'Est par la République Centrafricaine, au Nord par le Tchad et au Sud par le Gabon, la Guinée Equatoriale et le Congo (Brazzaville), et compte 402 km de côtes.

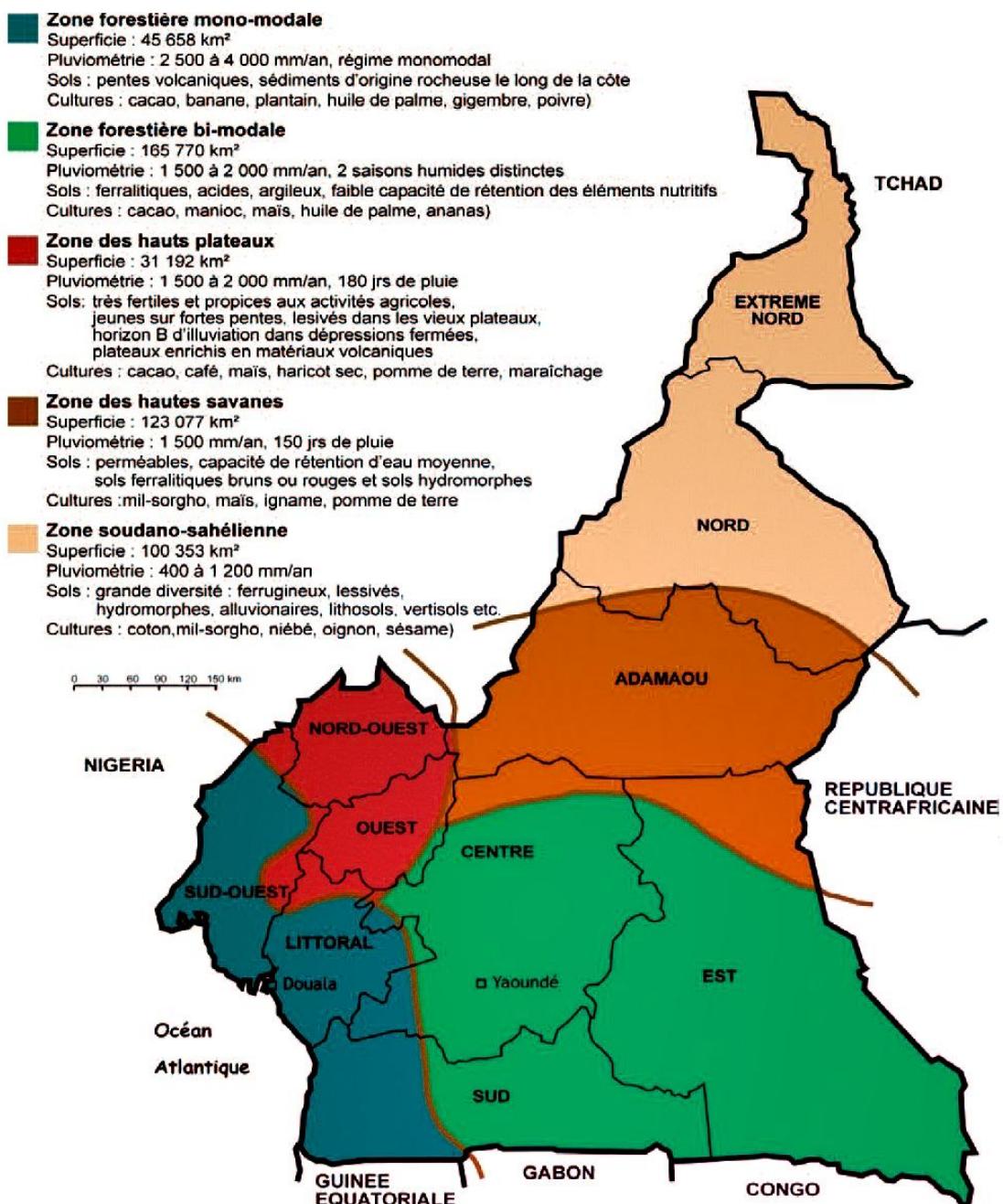


Fig. 1.1 Zones agro-écologiques du Cameroun (IRAD, 2011).

Sur la base des conditions climatiques, du couvert végétal, des sols et de l'altitude, le pays peut être divisé en cinq zones agro écologiques homogènes propices à une agriculture variée et favorable à l'élevage de plusieurs espèces d'animaux domestiques (Fig. 1.1): zone soudano sahélienne, zone des hautes savanes, zone des hauts plateaux, zone forestière monomodale, et Zone forestière bimodale.

La population camerounaise a été estimée à 17,5 millions d'habitants (Recensement Général de la Population et de l'Habitat) en 2005 avec un taux de croissance annuel de 2,9% par an (BUCREP, 2005) et une fraction rurale estimée à 52% de la population nationale. Les prévisions de l'Institut Nationale des Statistiques indiquent une population de 22 millions d'habitants en 2015 (INS, 2013). Le Produit Intérieur Brut du Pays est de 30 milliards de Dollars environ et le taux de pauvreté est de 40%, avec une forte concentration en zone rurale (Banque Mondiale, 2015). Malgré l'absence d'une estimation précise et récente, il est communément admis que le secteur de l'élevage représente environ 12% du PIB agricole et 5% du PIB total (MINEPIA, 2009).

1.1.2 Contexte météorologique

Le Cameroun se situe dans la zone intertropicale avec des températures moyennes qui varient entre 20°C et 28°C et une irradiation solaire journalière qui est comprise entre 4 $\text{kWh.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ et 6,5 $\text{kWh.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$. La température de l'air et l'ensoleillement augmentent globalement du Sud vers le Nord et le climat varie selon les régions. Le Cameroun est séparé en deux grands domaines climatiques : un domaine équatorial au Sud du pays qui regroupe les zones agro-écologiques des hauts plateaux, forestière monomodale, et forestière bimodale (cf. Fig. 1.1) et un domaine tropical au Nord du pays qui est constitué des zones soudano-sahélienne et des hautes-savanes (cf. Fig. 1.1). Le domaine équatorial se caractérise par des précipitations abondantes, une humidité relative de l'air élevée et des faibles amplitudes thermique diurne et annuelle. Le secteur côtier de la région du littoral est très humide: avec une saison de pluie qui couvre presque toute l'année (neuf mois de pluies). Dans le domaine climatique tropical, la pluviométrie est faible, les saisons sèches (sans pluie) sont plus longues et les amplitudes diurnes et annuelles sont plus importantes. Dans ce domaine, la durée des saisons varie en fonction de la latitude selon qu'on se rapproche ou s'éloigne du lac Tchad. Le climat tropical à longue saison sèche se manifeste sur le versant nord de l'Adamaoua. A l'Extrême-Nord, la saison des pluies est encore plus faible et la saison sèche dure six à huit mois dans l'année.

N'Gaoundéré, capitale régionale de l'Adamaoua (cf. Fig.1.1), a un climat tropical humide avec deux saisons à peu près également reparties dans l'année: une saison des pluies du mois de Mai au mois d'Octobre, et une saison sèche de Novembre à Avril. Les températures moyennes mensuelles varient entre 22°C et 27°C, l'humidité relative est comprise entre 21% et 80% et la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale journalière est comprise entre 4,66 kWh.m⁻².j⁻¹ et 6,74 kWh.m⁻².j⁻¹ (Fig. 1.2).

Globalement le climat camerounais est caractérisé par des températures élevées et une hygrométrie de l'air très variable en fonction des saisons (Très humide en saison de pluie et trop sec en saison sèche). Ces conditions climatiques sont très favorables au développement des microorganismes, ce qui pose un problème de conservation des produits alimentaires, en particulier les aliments à hautes activités de l'eau comme la viande, dont le Cameroun est producteur.

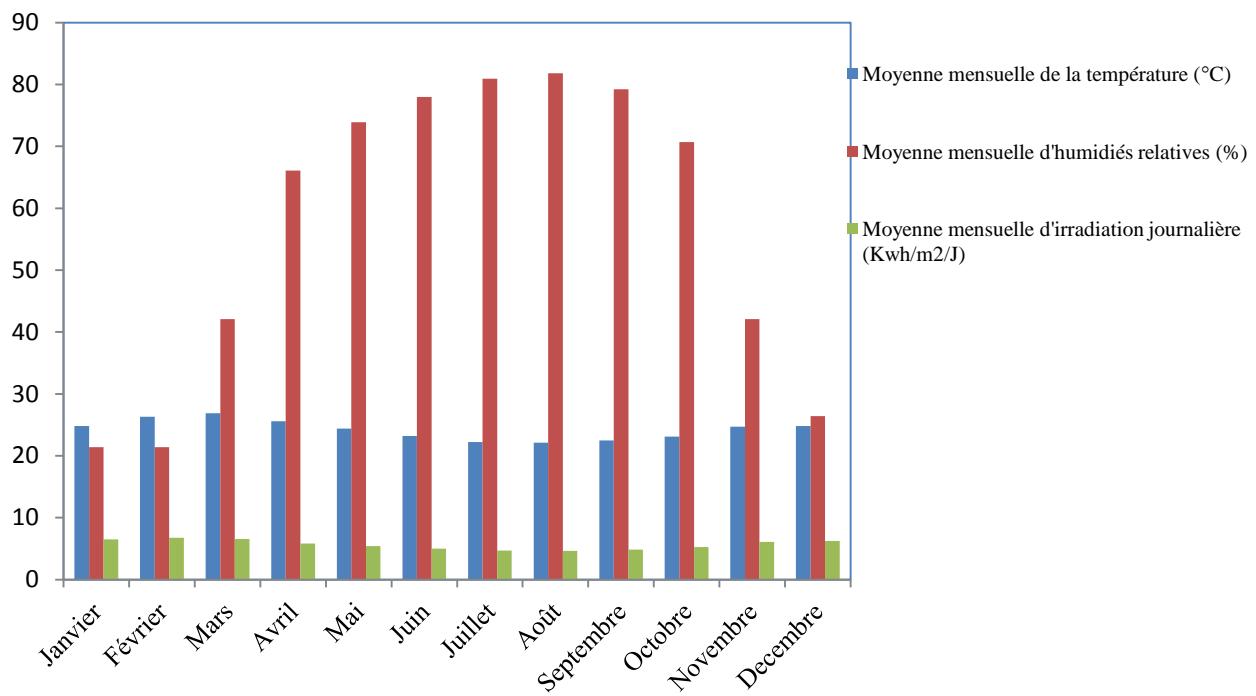


Fig. 1.2 Profil météorologique de la ville de N'gaoundéré (Nasa, 2014).

1.1.3 Production de la viande au Cameroun

Avec la croissance démographique et l'augmentation des revenus, la consommation de viande devrait augmenter de 73% d'ici 2050, l'effort de production émanant majoritairement des pays sous-développés (FAO, 2009). L'expansion du marché de la viande offre donc une opportunité aux producteurs et transformateurs de la viande dans le continent. Qu'a cela ne

tienne, augmenter et améliorer la production et la transformation de la viande demeure un défi de taille.

En dépit du potentiel fort intéressant dont dispose le Cameroun en matière d'élevage, le pays ne dispose pas de base de données actualisée relative aux statistiques des cheptels. En effet, le dernier recensement du cheptel date des années 1980 et les statistiques actuelles du secteur de l'élevage présentent des écarts importants suivant les sources d'information. Les dernières estimations de la FAO et du MINEPIA, datant de 2011, évaluent à 4 millions de têtes l'effectif du cheptel bovin camerounais (FAOSTAT, 2011), ce qui classe le Cameroun au deuxième rang des Pays d'Afrique Centrale après le Tchad (environ 5 millions de têtes) mais loin derrière la France (19 millions de têtes) (FranceAgriMer, 2014). Le Cameroun dispose d'une variété de race bovine indigène dans chaque zone agro-écologique, allant des zébus (*Bos indicus*) aux taurins (*Bos taurus*) en passant par des races issues de métissage. Parmi les zébus les plus importants en nombre, on distingue le Goudali de l'Adamaoua (Fig.1.3).



Fig. 1.3 Photo du Goudali de l'Adamaoua (Ahmat, 2013).

Au Cameroun, la production annuelle de viande est estimée à 105.000 tonnes diversement repartie dans les cinq zones agro-écologiques. Les zones agro-écologiques soudano-sahélienne et des hautes savanes, correspondant au domaine climatique tropical, fournissent environ 70% de la production de viande de bœuf. La production de la viande de bœuf représente plus de 60% de la production totale. Cette production totale de viande ne parvient pas à satisfaire une demande qui est estimée à 260.000 tonnes de viande en 2010 et

qui atteindrait 400.000 tonnes en 2015 (MINEPIA, 2009). Pour compenser ce déficit, le pays a importé 1.150.000 tonnes de viande entre 2008 et 2015 (soit une moyenne annuelle d'importation de viande de 150.000 tonnes environ), dont 400. 000 tonnes de viandes rouges, 400.000 tonnes de viande de volaille et 350.000 tonnes de viande porcine. Le coût total de ces importations est estimé 2.874 milliards de francs CFA (environ 5.75 milliards de Dollars) (MINEPIA, 2009). Ces importations ont un grand impact sur la balance commerciale Camerounaise et sur toute l'économie du pays.

1.1.4 Consommation de la viande au Cameroun

D'une manière générale, le monde connaît une augmentation de la consommation de viande et des produits de l'élevage. Cette augmentation s'avère cependant très inégale selon les pays. Les pays qui consomment le moins de produits carnés se situent en Afrique et en Asie. Le pilier essentiel de l'augmentation de la consommation de viande semble être le niveau de richesse de la population. En 2011, la consommation annuelle de viande au Cameroun est estimée à 13,3 kg par habitant et les études sur les niveaux de consommation par types de viande ont montré une prédominance de la viande bovine (Tableau 1.1). En effet, de tous les types d'élevage pratiqués au Cameroun, seul l'élevage bovin bénéficie des conditions d'abattage et de mise en marché quasi-généralisées sur l'ensemble du territoire national.

Tableau 1.1: Consommation de viande au Cameroun (MINEPIA, 2011)

Type de viande	Consommation (kg/ha/an)
Viande de bovins	7,11
Viande de moutons et chèvres	1,74
Viande porc	2,2
Viande de poulet	2,3
Total	13,3

La viande est l'un des aliments les plus présents dans les assiettes des ménages à cause de ses qualités nutritionnelles et gustatives qui ont fait l'objet de plusieurs études scientifiques.

1.2 Définition et composition de la viande

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé Animale (OMSA, 2007), la viande désigne toutes les parties comestibles d'un animal. Selon la réglementation européenne, ce sont les parties comestibles des animaux, y compris le sang. Pour certains auteurs, la viande est le produit issu du muscle ayant subit successivement l'état pantelant, l'état rigide et l'état mature (Ouali, 1990). Elle se compose de trois tissus principaux: le tissu conjonctif, le tissu adipeux et le tissu musculaire. Sa composition dépend de l'espèce, de la race, du sexe, de l'âge, de l'alimentation et de l'entretien des animaux (Diarra, 2007).

1.2.1 Composition chimique de la viande

La détermination de la composition chimique de la viande vise à fournir un certain nombre de paramètres aux consommateurs concernant l'aspect diététique de la viande rouge. Le muscle constitue la partie la plus nourrissante de la viande rouge. Il a une teneur en eau comprise entre 55% et 75%, et contient également 15% à 22% de protéines, 1% à 15% de lipides, 1% à 2% de glucides, 0,5% à 1% de sels minéraux et des vitamines du groupe B notamment (Cheftel *et al.*, 1985 ; Laurent, 1981). La viande possède un pH compris entre 5,5 et 5,9 (pour un muscle de boeuf) et 5,7 et 6,2 pour le porc, après 24h de ressuage (Cheftel, 1977 ; Laurent, 1981). Son activité de l'eau (a_w) est de 0,99 (Girard, 1988) d'où sa grande sensibilité aux attaques microbiennes. De ce fait, elle nécessite une stabilisation rapide en utilisant un moyen de conservation préservant au maximum ses propriétés nutritionnelles.

1.2.2 Propriétés nutritionnelles de la viande

La viande est une source importante de nombreux nutriments indispensables pour une alimentation équilibrée. Les protéines musculaires représentent 50% à 95% de la matière organique (Cheftel *et al.*, 1985). Ces protéines sont d'excellente qualité car 40% des acides aminés qu'elles renferment sont des nutriments essentiels. La viande renferme également une quantité notable de sels minéraux (fer, zinc ...) et de la vitamine B (Briggs, 1985 ; Herman et Albers, 1986). La plupart des muscles contiennent moins de 5% de lipides malgré sa forte teneur en acides gras saturés: 1g/100g de matière fraîche (Bernard *et al.*, 1992). Chan *et al.*, (Chan *et al.*, 1995) ont mené une étude comparative dans quatre pays sur quelques propriétés nutritionnelles des viandes de bœuf d'agneau et du porc (Tableau 1.2).

Tableau 1.2: Comparaison de quelques nutriments des viandes de bœuf, d'agneau et de porc fraîches (par 100g de matière sèche). (Chan *et al.*, 1995)

	Danemark	Royaume Uni	Australie	Etats Unis
Bœuf maigre				
Energie (kJ)	470	571	520	531
Protéine(g)	22,3	22,5	23	22,3
Lipide (g)	2,5	5,1	3,6	3,5
Niacine (mg)	10,1	5	3	6,5
Vitamine B12 (μg)	1,4	2	1,1	0,9
Fer (mg)	2,4	1,8	2	1,6
Zinc (mg)	4,7	4,1	4,2	4
Sélénium (μg)	6,5	7	10	30,8
Agneaux maigre				
Energie (kJ)	545	651	501	561
Protéine (g)	20,2	20,2	20,4	20,5
Lipide (g)	5,5	8,3	4,2	5,1
Niacine (mg)	7,5	5,4	5,6	6,3
Vitamine B12 (μg)	1,2	2	0,9	2,8
Fer (mg)	2,2	1,4	2,3	1,8
Zinc (mg)	3,3	3,3	3,4	3,8
Sélénium (μg)	1,4	2	10	23,4
Porc maigre				
Energie (kJ)	445	519	Pas étudié	502
Protéine (g)	21,6	21,8	Pas étudié	20,9
Lipide (g)	2,1	4	Pas étudié	3,4
Niacine (mg)	7,3	6,9	Pas étudié	4,4
Vitamine B12 (μg)	0,7	1	Pas étudié	0,8
Fer (mg)	0,7	0,7	Pas étudié	1,2
Zinc (mg)	3,6	2,1	Pas étudié	2
Sélénium (μg)	6,9	13	Pas étudié	28,9

1.2.3 Propriétés thermo-physiques de la viande

Les propriétés thermo-physiques (chaleur spécifique, conductivité thermique, masse volumique) des produits alimentaires sont essentielles pour la compréhension et la modélisation des phénomènes de transferts de chaleur et de matières dans les procédés thermiques en général et le séchage en particulier. Plusieurs travaux ont été menés sur la

détermination des propriétés thermo-physiques de la viande (Zhang *et al.*, 2004 ; Farag *et al.*, 2008 ; Marcotte *et al.*, 2008 ; Hassan et Ramaswamy, 2011). Il se dégage des ces études que la conductivité thermique est hautement dépendante de la température, avec un impact plus significatif pour les températures supérieures à 50°C (Marcotte *et al.*, 2008; Karunakar *et al.*, 1998). Il a été également démontré que la conductivité thermique et la chaleur spécifique augmentent avec la teneur en eau (Shmalko *et al.*, 1996). L'impact de la teneur eau est plus significatif sur la chaleur spécifique comparé aux autres propriétés thermo-physiques (Unklesbay *et al.*, 1999). Quant à la masse volumique, celle-ci varie au cours du procédé du séchage du fait de l'évolution du volume et de la masse du produit. Une diminution de la masse volumique de la viande est généralement observée au cours du séchage (Mohsenin, 1980). Marcotte *et al.* (Marcotte *et al.*, 2008) ont évalué les propriétés thermo-physiques de plusieurs produits à base de viande de bœuf et de volaille à différentes températures (20°C, 40°C, 60°C et 80°C). Ils ont obtenu des valeurs de conductivités thermiques comprises entre 0.26 et 0.48 Wm⁻¹K⁻¹ et une chaleur spécifique variant entre 2850 J.kg⁻¹°C⁻¹ et 3350 J.kg⁻¹°C⁻¹.

1.2.4 Qualités microbiologiques de la viande

La viande, comme tout produit, alimentaire doit respecter une certaine qualité sanitaire pour pouvoir être consommée. Du fait de sa grande activité de l'eau ($a_w=0.99$), la viande peut être le siège de développement des microorganismes si les conditions hygiéniques ne sont pas respectées. Les microorganismes les plus susceptibles d'être présents dans la viande, dont la présence est contrôlée par la réglementation sur les produits carnés, sont *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria spp.*, *Listeria monocytogene* et *Salmonella spp.*. Les normes de qualité microbiologiques définissent un indicateur à trois ou quatre niveaux de critères de qualité (satisfaisant, acceptable, pas satisfaisant ou inacceptable) en fonction du niveau de contamination bactérienne. Le tableau 1.3 présente les normes de Health Protection Agency (HPA) du Royaume-Uni et de la Commission de Régulation de l'Union Européenne (European Commission, EC) sur la qualité microbiologique des produits carnés. Dans ce tableau, le terme «Pas Applicable, PA» signifie que la norme ne s'applique pas au type de microorganisme concerné ou au niveau de critère concerné. Par exemple, dans le même tableau, la norme HPA ne s'applique pas au microorganisme *Listeria monocytogenes* et la norme EC ne définit pas un niveau de qualité «pas satisfaisant» pour les microorganismes *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria spp.*, et *Salmonella spp.*

Tableau 1.3: Critères microbiologiques pour la mise sur le marché des produits carnés (Gormley *et al.*, 2010)

P/A=Pas Applicable

Norm	Guidelines: microbiological quality (UFC/g) (HPA, 2005a; 2005b; 2008 and 2009)				Regulation (EC) No 2073/2005
Critères	Satisfaisant	Acceptable	Pas satisfaisant	Inacceptable	Pas satisfaisant
<i>Escherichia coli</i>	<20	20-<100	≥100	P/A	P/A
<i>Staphylococcus aureus</i>	<20	20-<100	100-<10 ⁴	≥10 ⁴	P/A
<i>Listeria</i> spp. (Total)	P/A	20-<100	≥100	P/A	P/A
<i>Listeria monocytogenes</i>	P/A	P/A	P/A	P/A	>100
<i>Salmonella</i> spp.	Pas détecté dans 25g	P/A	P/A	Détecté dans 25g	

D'une manière générale, tous les produits carnés doivent répondre aux critères «satisfaisant» ou «acceptable» pour être consommés. Les produits carnés dans les Pays En Développement (PED), en particulier en Afrique, ne satisfont pas toujours ces critères à cause des conditions de séchage. Celui-ci se fait en effet souvent au soleil, à l'air libre, exposant ainsi le produit à des contaminations microbiologiques.

1.3 Quelques exemples de produits carnés séchés dans les Pays En Développement

La viande est un produit très périssable et par conséquent difficile à conserver sans traitement particulier. Le séchage est le premier moyen de conservation des aliments utilisés par les hommes et le demeure dans certaine régions, bien que de nouvelles méthodes aient été développées pour la garder fraîche (congélation, produits chimiques, etc). L'objectif du séchage des produits carnés est non seulement d'augmenter la durée de conservation mais aussi de leur conférer de nouvelles propriétés organoleptiques appréciées par les consommateurs.

Plusieurs produits traditionnels à base de viande séchée sont développés à travers le monde et en particulier dans les pays chauds. Les produits à base de viande séchée les plus connus sont le *Biltong* en Afrique du Sud (Laurent, 1981), le *Charqui* en Amérique du Sud (Shimokomaki *et al.*, 1987; Torres *et al.*, 1994) et le *Kilichi* en Afrique Centrale et de l'Ouest (Kalilou et Zakhia, 1997).

1 3.1 Le *Biltong*

Le *biltong* (Fig. 1.4) est un produit carné Sud Africain préparé à partir de lanières de viande séchées, salées et assaisonnées avec des épices (poivres, ail, anis, coriandre). Le procédé traditionnel de fabrication consiste à découper la viande sous forme de lanières d'épaisseur 1 à 2 cm puis de les enrober dans une solution de mélange de sel et d'épices. Les lanières sont ensuite placées dans un récipient en couches légèrement aspergées de vinaigre et bien tassées. Mis en saumure pendant maximum 12 heures, puis trempé dans un mélange d'eau chaude et de vinaigre, le *Biltong* est ensuite séché au soleil pendant une journée avant d'achever son séchage à l'ombre (Laurent, 1981). Les parties préférées pour la fabrication du *Biltong* sont les morceaux tendres des carcasses de bœuf relativement jeunes et maigres.

Le produit final est caractérisé par une teneur en eau comprise entre 15%-50% (base sèche) et une activité d'eau comprise entre 0.6 and 0.85 (Strydom et Zondagh, 2014). Le *Biltong* est généralement considéré comme stable sur la plan microbiologique en raison de son activité d'eau, de sa teneur en sels non négligeable et des faibles valeurs de son pH allant de 4,8 à 5,8 (Attwell, 2003; Dzimba *et al.*, 2007; Nortje *et al.*, 2005; Van den Heever, 1970; Van der Riet, 1982). Petit *et al.* (Petit *et al.*, 2014) ont étudié la qualité microbiologique des échantillons de *Biltong* fait à base de bœuf, d'antilope et de gazelle en utilisant la méthode TPC (Total Plaque Count) de dénombrement de la flore microbienne totale. Les résultats ont montré que le *Biltong* a un $\text{TPC} < 10^7$ Unité Formant Colonie (UFC/g) et par conséquent il respecte le standard de qualité hygiénique défini par la Food Standard Agency (Agence de contrôle de qualité des produits alimentaires du Royaume-Uni).

Bien qu'étant à l'origine consommé en tant que source de protéine, le *Biltong* est devenu au fil des années un produit de grande consommation. En 2003, la valeur annuelle du marché du *Biltong* a été estimée entre 40 et 70 millions d'euros (Attwell, 2003). Plus récemment, la production à grande échelle du *Biltong* a émergé. Il est facilement disponible dans les supermarchés sud-africains ou dans les magasins spécialisés.



Fig. 1.4 Photo du produit carné *Biltong* (Bigstock blog, 2014).

1.3.2 Le *Charqui*

Le *Charqui* (Fig.1.5) est un produit carné traditionnel Brésilien qui est défini par le Ministère de l’Agriculture de ce pays comme de la viande de bœuf séchée dont la teneur en eau est inférieure à 45% (base sèche) avec moins de 15% de résidus minéraux (Ministério da Agricultura, 1962). Le *Charqui* est consommé par les Brésiliens depuis le 19^{ème} siècle (Garcia *et al.*, 2001) et son procédé de préparation a fait l’objet de plusieurs travaux (Shimokomaki *et al.*, 1998; Torres *et al.*, 1989; Torres *et al.*, 1994). Selon Shimokomaki *et al.*, (Shimokomaki *et al.*, 1998), le *Charqui* est fait à base de la viande de bœuf découpée en morceaux d’environ 5 cm d’épaisseur maximum. Les morceaux sont plongés pendant une heure environ dans des cuves contenant une solution saline, puis étalée sur des lattes ou des étagères pour s’égoutter. La viande peut être salée à sec et retournée toutes les huit heures. Le processus de salaison se répète pendant cinq jours, puis les morceaux de viande sont rapidement lavés pour éliminer l’excès de sel adhérant en surface; ils peuvent être pressés pour éliminer un surplus d’humidité et prendre une forme plate. Ils sont ensuite étalés sur des lattes de bambou ou des rayonnages en bois pour un séchage au soleil de 4 à 6 heures. Pour éviter des températures supérieures à 40 °C et assurer un séchage uniforme, la viande est exposée au soleil au cours de la matinée et retirée dans l’après-midi, ceci pendant 4 à 5 jours. Après chaque période d’exposition, les lots sont recouverts d’une toile imperméable pour les protéger de la pluie et du vent et retenir la chaleur absorbée. Le produit final a une activité d’eau comprise entre 0,7

et 0,75 et peut être stable pendant 6 mois dans les conditions ambiantes de stockage (Torres *et al.*, 1994).



Fig. 1.5 Photo du produit carné *Charqui* (Stravaganza blog, 2015).

Torres *et al.* (Torres *et al.*, 1994) ont déterminé la composition chimique du *Charqui* au cours des différentes étapes de son procédé de production (Tableau 1.4). On peut remarquer qu'à l'issue du séchage les teneurs (base sèche) en protéine, lipide et cendre du *Charqui* sont plus élevées.

Tableau 1.4: Composition chimique du *Charqui* (Torres *et al.*, 1994)

Etapes du procédé	Jours	Teneur en eau (% base humide)	Lipide (%) base sèche)	Cendre (%) base sèche)	Protéine (% base sèche)	Activité de l'eau
Viande fraîche	0	75,5	2,5	0,9	18,7	0,98
Salage	5	52,1	2,7	16,6	26,2	0,74
Séchage	10	23,6	7,7	18	44,2	0,71
Produit fini (Charqui)	25	30,8	6,7	13,8	45	0,72
Emballage	40	33,2	7,9	19,2	37,2	0,70

1.3.3 Le Kilichi

Le *Kilichi* (Fig. 1.6) est un produit carné fabriqué généralement à base de la viande de bœuf découpée en lanière fine (2 à 4 mm), puis séchée, assaisonnée avec les épices locales, de la pâte d'arachide, puis rôti au feu. C'est un produit très connu dans les zones sahéliennes d'Afrique Centrale et de l'Ouest (Florand, 1995). Le procédé traditionnel consiste à sécher au soleil (à l'air libre) les tranches de viande qui sont ensuite mises dans un mélange composé d'une pâte d'arachide ou de farine de soja (50%), d'eau (30 %), d'ail (10 %), de cubes de bouillon (5%), de sel (2%) et d'épices comme le poivre, le gingembre et l'oignon (Ndihi, 2002). Lorsqu'on ajoute du piment rouge (*Capsicum frustescens*) (1% à 3%) à ces ingrédients, on obtient à la fin du procédé du *Kilichi* dit pimenté. Le produit humide est à nouveau exposé au soleil pour être séché jusqu'à une teneur finale en eau comprise entre 10% et 20% (base sèche) (Kalilou *et al.*, 1998). Les tranches de viande sont finalement rôties sur un feu ardent pendant environ cinq minutes. Cette torréfaction détruit certains microorganismes et améliore la saveur. Lorsque l'ensoleillement est faible, certains producteurs préfèrent sauter l'étape du deuxième séchage au soleil et passer directement le produit enrobé au rôtissage, ce qui leur permet de gagner du temps mais la qualité du produit n'est pas meilleure. En effet, la deuxième étape du séchage confère au produit des qualités organoleptiques appréciées par les consommateurs. La figure 1.7 récapitule le procédé d'obtention du *Kilichi*.



Fig. 1.6 Photo du produit carné *Kilichi* (Ahmat, 2013).

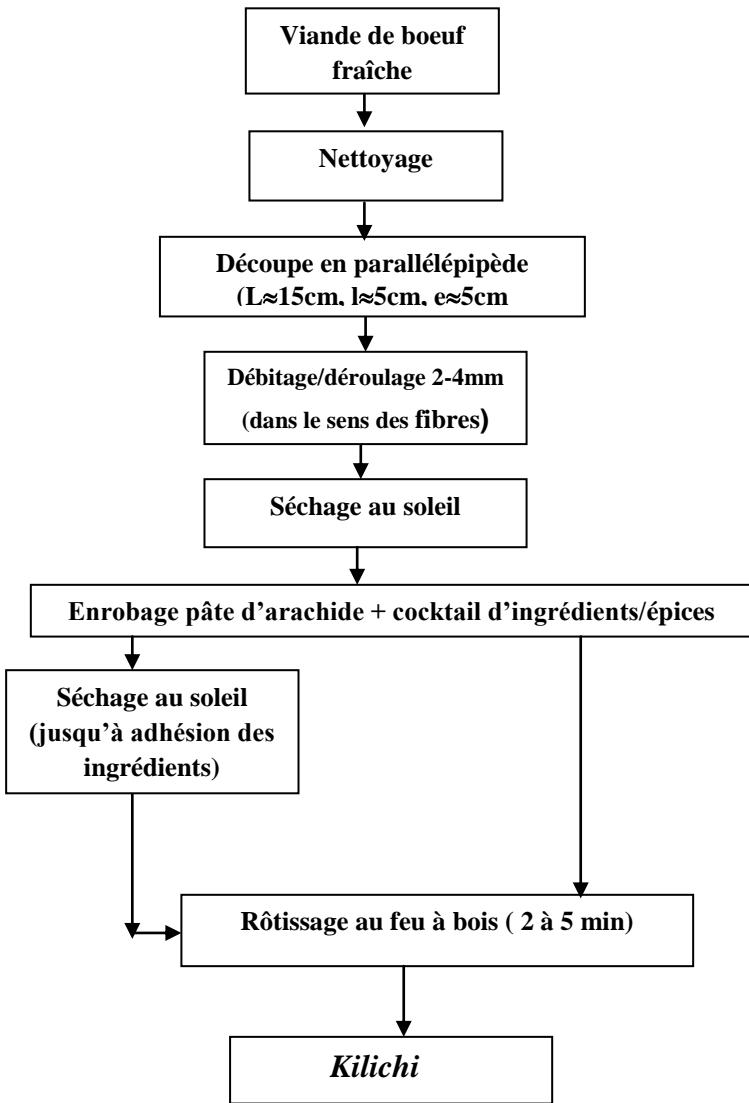


Fig. 1.7 Procédé de séchage du *Kilichi* (Résumé par Ahmat, 2015).

Les caractéristiques biochimiques du *Kilichi* ont été déterminées et comparées à celles de la viande fraîche par Igene *et al.* (Igene *et al.*, 1990) (Tableau 1.5). Il se dégage de leur étude que le *Kilichi* contient une proportion significative de nutriments tels que les protéines et les lipides. La teneur en protéines moyenne du *Kilichi* est de 50,2%, ce qui en fait un produit hautement protéique (Igene *et al.*, 1990) comparé au *Charqui* et au *Bilton*. La teneur en cendre (9.6%) est aussi élevée comparée à celle de la viande fraîche (1.04%) et est supérieure à la limite de Freeman (3,5% à 6 %). Cette teneur élevée en cendre est attribuée à l'utilisation des condiments utilisés dans la production du *Kilichi* (Mbofung, 1993). Les teneurs en calcium, magnésium et phosphore sont aussi supérieures à celle de la viande fraîche (Jones *et al.*, 2001). Le suivi de l'évolution de l'oxydation des lipides dans le *Kilichi* pendant 60 semaines a montré qu'il n'y a pas oxydation des lipides et ceci s'expliquerait par

l'utilisation, pour la préparation du *Kilichi*, des ingrédients qui ont des propriétés anti oxydantes tels l'oignon et les épices (Igene *et al.*, 1990).

Tableau 1.5: Composition chimique du *Kilichi*

Produit	Teneur en eau (% base humide)	Proteine (%) base sèche)	Lipide (%) base sèche)	Cendre (%) base sèche
Viande fraîche	76.2	19.8	1.5	1.04
<i>Kilichi</i>	7.5	50.2	17.8	9.6

Mbwala *et al.* (Mbwala *et al.*, 2010) ont analysé 24 échantillons de *Kilichi* pimentés et non pimentés afin d'évaluer la charge microbienne totale et d'identifier le type de germe. Les résultats ont montré que 33% et 50% des échantillons pimentés sont contaminés par les microorganismes *B. cereus* et *Salmonella spp.*, respectivement, tandis qu'un taux de 83% des échantillons non pimentés de *Kilichi* sont contaminés par ces deux micro-organismes. Les conclusions de cette étude affirment que le *Kilichi*, tel qu'il est produit, ne respecte pas les normes de qualité. Les micro-organismes d'altération du *Kilichi* sont: *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens*, le groupe des coliformes fécaux, moisissure et levures (Ndih, 2002). Ndayo *et al.* (Ndayo *et al.*, 2000) ont montré que 75% des sandwiches à base de viande et le *Kilichi*, vendus sur la voie publique de Yaoundé et Douala (Cameroun) contiennent des coliformes fécaux.

La consommation du *Kilichi* est limitée aux zones rurales et aux villes des régions de production ; d'où la lenteur observée pour l'accroissement de sa production. Cependant, avec les mouvements des populations et surtout l'immigration des africains vers les pays d'Europe et d'Amérique, ce produit très apprécié, est de plus en plus demandé (Musonge *et al.*, 1994). Cette diaspora africaine, relativement riche, sera un grand marché pour ce produit assez léger en terme de poids et qui est réputé pour sa stabilité de conservation; ce qui facilite son transport et sa commercialisation à longues distances. Le produit est déjà exporté vers l'Arabie Saoudite, particulièrement en période de pèlerinage à la Mecque. Le marché des produits carnés en général est donc prometteur dans l'avenir et sera une source importante de revenus pour l'économie de cette région d'Afrique (Igene *et al.*, 1990).

Dans cette thèse nous allons orienter nos travaux vers l'étude du séchage du *Kilichi*, qui est le produit carné séché le plus connu dans les zones sahéliennes d'Afrique Centrale et de l'Ouest.

1.4. Le séchage du *Kilichi*

1.4.1 Conditions de séchage du *Kilichi*

Les producteurs des produits carnés séchés dans les Pays En Développement sont en général des artisans et des bouchers à capacités d'investissement très limitées (Fig. 1.8). Leurs méthodes de production laissent envisager une qualité douteuse du produit (Kalilou, 1992). Il faut signaler que la manipulation d'un produit carné, siège par excellence des évolutions biochimiques et microbiologiques, est une opération délicate qui nécessite au préalable l'identification des causes, générées par cette manipulation, susceptibles d'affecter la qualité du produit final. Des études ont été menées par certains chercheurs dans le but de suivre le produit au cours de sa fabrication et d'identifier, plus largement, les points critiques et les facteurs risques de la qualité du *Kilichi* (Mbofung *et al.*, 2004 ; Jones *et al.*, 2001). Il ressort de ces études que le séchage est une étape sensible et incontournable dans la réussite du produit (Kalilou, 1997). D'où la nécessité de l'améliorer pour faire face aux exigences des normes sanitaires.



Fig. 1.8 Producteur de *Kilichi* exposant son produit au soleil (Blog Sophie au Niger, 2015).

Le séchage des produits carnés en Afrique Subsaharienne se fait souvent au soleil, à la merci de la poussière et des mouches, sans aucune maîtrise des paramètres de séchage (Fig. 1.9). Le temps de séchage est très variable et dépend des conditions climatiques: en saison de pluie, avec la réduction de l'ensoleillement et l'augmentation de l'humidité, il est très difficile d'obtenir un produit de bonne qualité compte tenu de la durée du processus de fabrication (environ 2 à 3 jours de séchage). Dans ce contexte d'absence totale d'équipements de séchage adapté à ce produit, il est nécessaire de revoir et de concevoir des dispositifs de séchage en

intégrant l'environnement de l'utilisateur, non seulement dans ses dimensions technique, sociale et économique, mais également dans sa dimension sanitaire.



Fig. 1.9 *Kilichi* au soleil (Blog A moveable kitchen, 2014).

1.4.2 Expression du besoin de séchoir solaire des produits carnés

Pour recueillir les informations sur les besoins réels et les exigences des producteurs, une enquête a été menée auprès de 8 producteurs de *Kilichi* dans deux villes Camerounaises (Yaoundé et N'Gaoundéré), à raison de quatre producteurs par ville. Un questionnaire a été conçu à cet effet pour faciliter l'enquête (cf. Annexe 1.1). Les personnes enquêtées ne parlant aucune des deux langues officielles du Cameroun (Français et Anglais), les questions sont traduites oralement en langue locale (foufouldé) par l'enquêteur (en l'occurrence l'auteur de cette thèse). Cette enquête est basée sur la méthode Check-lists (Delafolie, 1991) qui va de la connaissance de l'existant à la projection de l'équipement à concevoir.

Il ressort de cette enquête que les producteurs sont tous conscients de l'impact du séchage sur la qualité finale de leur produit. Ils estiment que le temps de séchage traditionnel (à l'air libre) est long et constitue une limite à la vulgarisation et à l'exportation de leurs produits, qui sont systématiquement considérés par les services d'hygiène comme des produits ne respectant pas les normes sanitaires. Aucun des producteurs enquêtés n'a jamais testé un séchoir solaire pour la production du *Kilichi*. Les deux principales raisons pour lesquelles les artisans n'utilisent pas les séchoirs sont l'ignorance de l'existence même de ceux-ci et le souci de ne pas changer le procédé traditionnel par crainte de ne pas obtenir le même produit final.

De manière générale les producteurs de *Kilichi* ont exprimé le souhait d'avoir un séchoir solaire qui permette d'obtenir un produit ayant les mêmes propriétés organoleptiques que celles obtenues traditionnellement, qui réduise la durée du séchage, qui soit facilement manipulable, dont le coût d'acquisition est abordable, les coûts d'exploitation faibles et la maintenance simple. Ce défi ne saurait être relevé sans une bonne connaissance des phénomènes physiques qui se déroulent au cours de l'opération de séchage.

1.5 Le séchage

Le séchage est l'opération ayant pour but d'extraire tout ou une partie de l'eau (solvant) d'un matériau, par évaporation (Nadeau et Puiggali, 1995). L'objectif étant non seulement la conservation des produits, mais également la diminution du poids afin de réduire les coûts de transport et de stockage, ou de donner une présentation particulière au produit. Pendant le séchage, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire l'eau d'un produit; il s'agit de l'évaporation et/ ou de l'entraînement (convection). Dans tous les cas lorsqu'un produit est placé dans un environnement gazeux, un phénomène de transfert d'eau s'établit lorsqu'il existe une différence de pression partielle d'eau entre le produit et son environnement. Les dispositifs de séchage permettent d'établir cette condition en exploitant différentes technologies consistant à générer autour du produit des conditions thermodynamiques favorables à l'évaporation.

1.5.1 Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur (Mujumdar, 1995 ;Van't Land,1991). Ainsi, on distingue:

- **le séchage par conduction** où l'échange de chaleur se fait par contact entre la surface du matériel chauffant et le produit. Il est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie.
- **le séchage convectif** où le produit est séché par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur appelé agent séchant. Il se produit un échange de chaleur et de matière entre le produit et son milieu environnant. Il représente plus de 85% des séchoirs industriels (Mujumbar, 2000) et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.
- **le séchage par infrarouge** qui permet un chauffage rapide des produits en couches minces ; la faible pénétration des IR dans le produit fait qualifier ce séchage de chauffage

surfacique, la chaleur absorbée diffusant ensuite dans le produit par conduction. Il est très appliqué dans l'industrie des vernis, des peintures et des pellicules photographiques.

- **le séchage par micro ondes** où le transfert se fait grâce aux propriétés diélectriques des matériaux. L'eau est très réceptive à ce type de chauffage. Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Il est appliqué aux séchages d'encre, de peinture, des adhésifs et au séchage sous vide des produits pharmaceutiques.
- **la lyophilisation** où le séchage se produit en dessous du point triple de l'eau par sublimation (passage direct de la matière congelée de l'état solide à l'état vapeur). La vapeur est alors enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur. Ce mode de séchage est plus utilisé pour les matériaux biotechnologiques, pharmaceutiques et les aliments dont on cherche à conserver la saveur.
- **le séchage solaire** utilise l'énergie des rayonnements solaires pour chauffer le produit et l'air environnant. On peut utiliser des capteurs solaires pour capter et/ou concentrer le rayonnement solaire, assurant ainsi une augmentation de la température de l'air. Il est de plus en plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

Tous ces modes de séchage, à l'exception du séchage solaire, engendrent un coût énergétique et des équipements pour la fourniture en énergie qui peuvent rendre leur application difficile, coûteuse et voire impossible dans certaines régions; surtout dans les Pays En Développement (PED). Le séchage solaire est donc le mode le plus adapté pour les PED ce d'autant plus que la plupart de ces pays possèdent un potentiel énergétique solaire assez important (Muhlbauer *et al.*, 1993).

1.5.2 Le séchage solaire

La terre reçoit chaque année environ dix milliardèmes de l'énergie rayonnée par le soleil, soit une puissance de $1,6 \times 10^{18}$ kW, ceci représente annuellement cinq à dix fois l'ensemble des réserves fossiles connues (uranium compris) (Malton, 1998). Cette énergie est essentiellement caractérisée par sa gratuité et le caractère inépuisable, à notre échelle de temps, de sa source qui est le soleil. Mais le caractère intermittent du soleil rend cette énergie indisponible à certaines heures. Notons que la flambée du prix du pétrole ces dernières années justifie pleinement la nécessité de l'utilisation de l'énergie solaire (Karekezi *et al.*, 1997). Elle peut être utilisée pour produire de l'électricité ou pour produire de la chaleur. Quand elle sert à produire de l'électricité, on parle de solaire électrique et quand elle est convertie en chaleur,

on parle de solaire thermique. L'une des applications du solaire thermique est le séchage solaire.

Le séchage solaire est la plus ancienne méthode utilisée par les hommes pour conserver les aliments. Dans les pays en développement où les pertes des produits agro-alimentaires sont importantes et où la disponibilité des énergies conventionnelles est faible, le séchage solaire constitue une solution adéquate et adaptée pour résoudre le problème de conservation et de transformation des produits. Le séchage solaire traditionnel (à l'air libre) est largement utilisé par les producteurs dans les Pays en Développement mais il présente quelques limites : temps de séchage long, grande surface de séchage, dépôt de poussières et particules sur les produits, exposition aux insectes et autres animaux, perturbations climatiques (pluie, vents etc...). Le séchage solaire traditionnel doit donc être amélioré pour réduire la durée du séchage et assurer la bonne qualité des produits. Ceci passe par la conception de séchoirs solaires adaptés au contexte local en prenant en compte l'environnement météorologique de ces Pays, en particulier le rayonnement solaire.

1.5.3. Modélisation de l'ensoleillement

1.5.3.1 Facteurs et types de rayonnement

Une bonne connaissance du rayonnement solaire dans une localité donnée est fondamentale pour toutes les applications utilisant l'énergie solaire tels que le photovoltaïque et les systèmes thermiques solaires. Les données sur le rayonnement solaire donnent des informations sur la manière dont l'énergie solaire arrive sur une surface située dans une localité donnée et pendant une période de temps donnée (Khatib *et al.*, 2012). Ces données doivent être fiables et facilement disponibles pour la conception, le dimensionnement et l'évaluation des performances des systèmes solaires. La meilleure façon de déterminer la quantité de rayonnement solaire sur un site est d'y installer les instruments de mesure tels que les Pyranomètre et Pyrheliomètre pour mesurer et enregistrer les données solaires en temps réel; ceci est très fastidieux et coûteux (Fariba *et al.*, 2013). En dépit de l'importance d'une bonne connaissance du rayonnement solaire, cette information n'est pas souvent disponible dans des nombreux Pays En Développement parce que ceux-ci ne disposent pas toujours d'équipements de mesures ou les moyens techniques que cela implique. Par conséquent, un certain nombre de modèles empiriques ont été développés pour estimer le rayonnement solaire journalier ou mensuel sur la base des données météorologiques plus facilement accessibles à la majorité de stations météorologiques.

Il existe deux composantes de rayonnement solaire :

- le « rayonnement direct » qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- le « rayonnement diffus » qui est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère.

On appelle « rayonnement global » la somme du rayonnement direct et diffus.

Les modèles empiriques utilisés pour le calcul du rayonnement solaire sont généralement influencés par cinq familles de facteurs:

- les facteurs astronomiques (constante solaire, distance Terre-Soleil, déclinaison du soleil et angle horaire).
- les facteurs géographiques (latitude et longitude).
- les facteurs géométriques (angle d'azimut de la surface, angle d'inclinaison de la surface, angle d'élévation solaire, azimut du soleil).
- les facteurs physiques (diffusion des molécules d'air, teneur en eau de l'air, dispersion de poussières et constituants atmosphériques tels O₂, N₂, CO₂, O, etc.).
- les facteurs météorologiques (rayonnement extraterrestre solaire, la durée de l'ensoleillement, la température, les précipitations, l'humidité relative, la nébulosité, la température du sol, l'évaporation, la réflexion des environs etc.).

1.5.3.2 Expression des facteurs géométriques de la modélisation du rayonnement

Pour modéliser le rayonnement solaire, il faut tenir compte de la position du soleil à travers les aspects astronomiques et géométriques tels que la déclinaison (δ), l'angle horaire (ω), le temps solaire TS , la hauteur angulaire h , l'azimut a , la durée du jour d .

La déclinaison δ , est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre -23,45° et +23,45° et peut être calculée à partir de l'équation de Cooper (Cooper, 1969):

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365}(N + 284)\right) \quad (1.1)$$

Où N est le numéro du jour de l'année à compter du premier janvier.

L'angle horaire est défini par l'équation (1.2) et est compté positivement dans l'après midi

$$\omega = 15^\circ(TS - 12) \quad (1.2)$$

$$\text{Avec } TS = TL - C + ET[(l_{ref} - l)]/15 \quad (1.3)$$

Où TL désigne le temps légal (Temps montre) et C la différence entre TL et le temps civile TCF du fuseau horaire dans lequel se trouve la localité. ET exprime l'équation du temps

(Eq.1.4), l_{ref} désigne la longitude de référence au temps légal (en général le centre du fuseau), l représente la longitude de la localité. Dans l'équation (1.4), ω' est égal à 0.984.

$$ET = - \left[\begin{array}{l} 0,0002 - 0,4797 \cos(\omega' j) + 3,2265 \cos(2\omega' j) + 0,0903 \cos(3\omega' j) + \\ 7,3509 \sin(\omega' j) + 9,3912 \sin(2\omega' j) + 0,3361 \sin(3\omega' j) \end{array} \right] \quad (1.4)$$

L'angle horaire au lever du soleil ω_l est relié à la déclinaison δ et à la latitude L par l'expression suivante (Eq. (1.5)) :

$$\omega_l = \cos^{-1}(-\tan L * \tan \delta) \quad (1.5)$$

Où L est la latITUDE du site.

La hauteur du soleil h qui correspond à l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal, est donnée par :

$$\sin(h) = \sin(l) \sin(\delta) + \cos(l) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (1.6)$$

où l désigne la longitude du lieu.

L'azimut a est défini comme l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction du Sud ; elle se calcule par la relation suivante:

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (1.7)$$

La durée du jour d , exprimée en heures, peut être calculée par la formule ci-dessous :

$$d = \frac{2\omega}{15} \quad (1.8)$$

1.5.3.3 Modélisation du rayonnement solaire

Plusieurs modèles empiriques ont été développés pour estimer le rayonnement solaire (Angström, 1924; Prescott, 1940; Liu et Jordan, 1960; Collares-Pereira et Rabl, 1979 ; Lewis, 1992), rendant peu évident le choix d'un modèle, approprié pour un usage spécifique et un site particulier. En effet, ce choix d'un modèle doit reposer sur les données météo disponibles (les modèles utilisent des variables quotidiennes disponibles à la majorité des stations météorologiques) et sur la précision du modèle à prédire les données réelles (Farida *et al.*, 2013). Les modèles empiriques de rayonnement solaire sont classés en quatre catégories en fonction des paramètres météorologiques qu'ils utilisent: les modèles basés sur la durée d'ensoleillement (Angström, 1924 ; Jain, 1986), les modèles basés sur les nuages (Black, 1956; Badescu, 1999), les modèles basés sur la température (Hargreaves, 1982; Allen, 1997) et

les modèles basés sur les autres paramètres météorologiques (Swartman et Ogunlade, 1967). De tous ces modèles, celui basé sur la durée d'ensoleillement est largement le plus utilisé pour prédire l'ensoleillement global dans une localité donnée, du fait de la facilité à mesurer la durée d'ensoleillement et de sa précision (Yorukoglu et Naci, 2006).

1.5.3.3 1 Modélisation de l'irradiation globale journalière

Le modèle empirique de calcul de la moyenne mensuelle de l'irradiation globale journalière le plus utilisé est celui d'Angström, basé sur la durée du rayonnement :

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{d}{d_0} \quad (1.9)$$

où G désigne l'irradiation globale journalière sur un plan horizontal ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$), G_0 la moyenne mensuelle de l'irradiation globale au-dessus de l'atmosphère sur une surface horizontale ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$), d la durée moyenne mensuelle d'ensoleillement sur le site (heure) et d_0 la durée moyenne mensuelle maximale d'ensoleillement possible (heure).

1.5.3.3. 2 Modélisation de l'irradiation globale diffuse

L'irradiation solaire diffuse sur un plan horizontal peut être déterminée de plusieurs manières en fonction des données disponibles. Plusieurs auteurs proposent des modèles permettant de calculer l'irradiation diffuse à partir de la connaissance de l'irradiation globale journalière G (mesurée ou calculée par un modèle). L'un des modèles les plus connus est celui de Collares-Pereira et Rabl (Collares-Pereira et Rabl, 1979) qui est une amélioration du modèle Lui-Jordan (Lui-Jordan, 1962) basé sur des équations empiriques, résultat de quatre années d'expériences.

Connaissant l'irradiation globale journalière (G) Collares-Pereira et Rabl proposent de calculer l'irradiation diffuse journalière à partir des Equations (1.10), (1.11), (1.12) et (1.13). Dans le cas où on ne dispose que d'une moyenne mensuelle journalière de l'irradiation globale journalière \bar{G} alors l'irradiation moyenne mensuelle diffuse journalière \bar{D} est donnée par l'équation (1.14).

$$D = 0.99G \quad \text{si } K_T \leq 0,17 \quad (1.10)$$

$$D = (14,648K_T^4 + 21,865K_T^3 + 9,473K_T^2 - 2,272K_T + 1,188)G \quad \text{si } 0,17 < K_T \leq 0,75 \quad (1.11)$$

$$D = -(0,54K_T + 0,632)G \quad \text{si } 0,75 < K_T \leq 0,8 \quad (1.12)$$

$$D = 0,2G \quad \text{si } K_T \geq 0,8 \quad (1.13)$$

$$\bar{D} = \{0,775 + 0,00606(\omega_l - 90^\circ) - [0,505 + 0,00455(\omega_l - 90^\circ)]\cos(115K_T - 103)\}\bar{G} \quad (1.14)$$

$$\text{où } K_T = \frac{G}{G_0} \quad (1.15)$$

G_0 étant l'irradiation journalière sur un plan horizontal placé au-dessus de l'atmosphère calculable par l'équation (1.16).

$$G_0 = 3,795 * 10^4 \cos(L) \cos(\delta) * \left(\sin(\omega_l) - \frac{\pi \omega_l}{180} \cos(\omega_l) \right) \quad (1.16)$$

où ω_l est en degré et G_0 en $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

Généralement l'irradiation solaire directe se déduit des irradiations globale et diffuse par la formule ci-dessous:

$$S = G - D \text{ (ou } \bar{S} = \bar{G} - \bar{D}) \quad (1.17)$$

1.5.3.3 Modélisation de l'éclairement ou densité de flux solaire sur un plan incliné

Le rayonnement global journalier reçu par une surface n'est optimal que si celle-ci est orientée suivant un angle précis qui dépend de sa localisation géographique. Il est donc important d'avoir une connaissance de l'éclairement reçu par une surface inclinée car les stations météorologiques et les appareils de mesures donnent généralement l'éclairement sur une surface horizontale. Plusieurs modèles ont été développés pour estimer l'éclairement incident sur une surface inclinée à partir de la connaissance de l'éclairement sur un plan horizontal (Liu et Jordan 1961 ; Hay, 1979; Klucher, 1979).

Pour une surface plane inclinée d'un angle i par rapport à l'horizontale et orientée vers une direction faisant un angle γ avec la direction du Sud (γ compté positivement vers l'Ouest), les éclairages solaires (densité de flux solaire) direct ($S^*(i, \gamma)$), diffus ($D^*(i, \gamma)$), réfléchi ($R^*(i, \gamma)$) et global ($G^*(i, \gamma)$) sont donnés par les équations (1.18), (1.19), (1.20) et (1.21).

$$S^*(i, \gamma) = \frac{S^*}{\sin(h)} (\cos(h) * \sin(i) * \cos(a - \gamma) + \sin(h) \cos(i)) \quad (1.18)$$

$$D^*(i, \gamma) = \frac{D^*}{2} (1 + \cos(i)) \quad (1.19)$$

$$R^*(i, \gamma) = \frac{G^*}{2} \rho (1 - \cos(i)) \quad (1.20)$$

$$G^*(i, \gamma) = S^*(i, \gamma) + D^*(i, \gamma) + R^*(i, \gamma) \quad (1.21)$$

Où S^* désigne l'éclairement solaire direct sur un plan horizontal (Eq. (1.22)), D^* l'éclairement solaire diffus sur un plan horizontal (Eq. (1.23)), G^* l'éclairement global et ρ est l'albedo.

Dans les équations (1.18) à (1.21), les expressions de S^* , D^* et G^* sont :

$$S^* = \frac{\pi}{24} (a + b \cos(\omega)) \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_l)}{\sin(\omega_l) - \frac{\pi \omega_l}{180} \cos(\omega_l)} S \quad (1.22)$$

où S est défini dans l'équation 1.17.

$$D^* = \frac{\pi}{24} (a + b \cos(\omega)) \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_l)}{\sin(\omega_l) - \frac{\pi \omega_l}{180} \cos(\omega_l)} D \quad (1.23)$$

Où D est défini dans les équations 1.10 à 1.14.

$$a = 0,409 + 0,502 \sin(\omega_l - 60^\circ)$$

$$b = 0,661 - 0,477 \sin(\omega_l - 60^\circ)$$

$$G^* = S^* + D^*$$

1.5.4 Présentation des différents types de séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont généralement classés en deux grandes catégories : Les séchoirs solaires passifs (convection naturelle) et les séchoirs solaires actifs (convection forcée). Dans chacune de ces catégories, trois familles de séchoirs solaires sont identifiées en fonction de la façon dont l'énergie de radiation arrive dans la chambre de séchage: les séchoirs solaires directs, les séchoirs solaires indirects et les séchoirs mixtes et hybrides (Kreider *et al.*, 1981).

Dans les séchoirs directs (Fig. 1.10), la chaleur est générée par absorption des radiations solaires sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage (Sharma *et al.*, 2009). Pour ce type de séchoir, le capteur solaire est directement intégré dans la chambre de séchage. Les séchoirs solaires directs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la localité et orienté généralement au Sud.

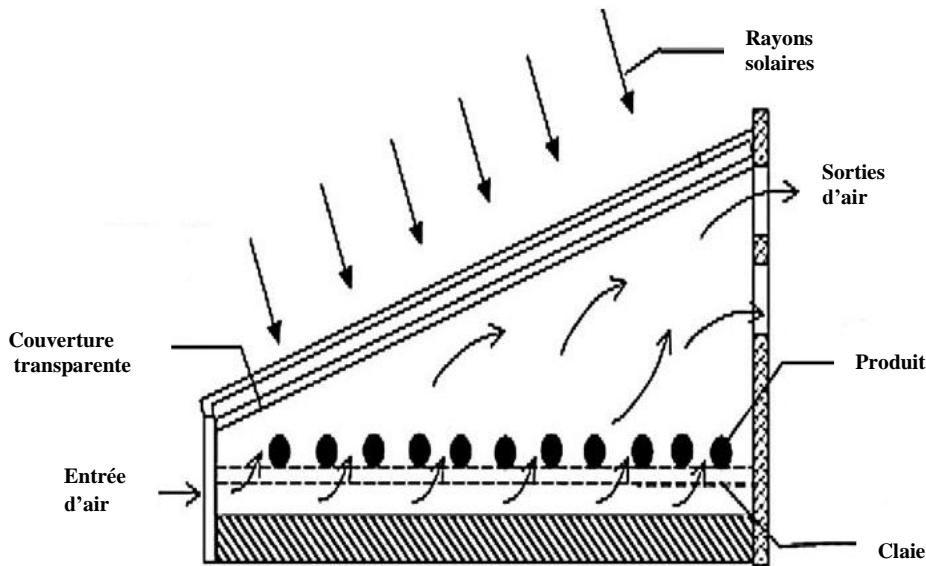


Fig. 1.10 Séchoir solaire direct passif (Sharma *et al.*, 2010).

Dans les séchoirs solaires indirects (Fig. 1.11), les radiations n’arrivent pas directement sur les produits à sécher. L’air est d’abord chauffé dans un collecteur solaire, constitué d’une surface vitrée située au dessus et d’une surface absorbante, généralement peinte en noir, puis conduit dans la chambre de séchage pour sécher le produit (Rabl, 1985). Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l’exposition au soleil et dont l’inclinaison a pour but de maximiser le captage de l’énergie solaire.

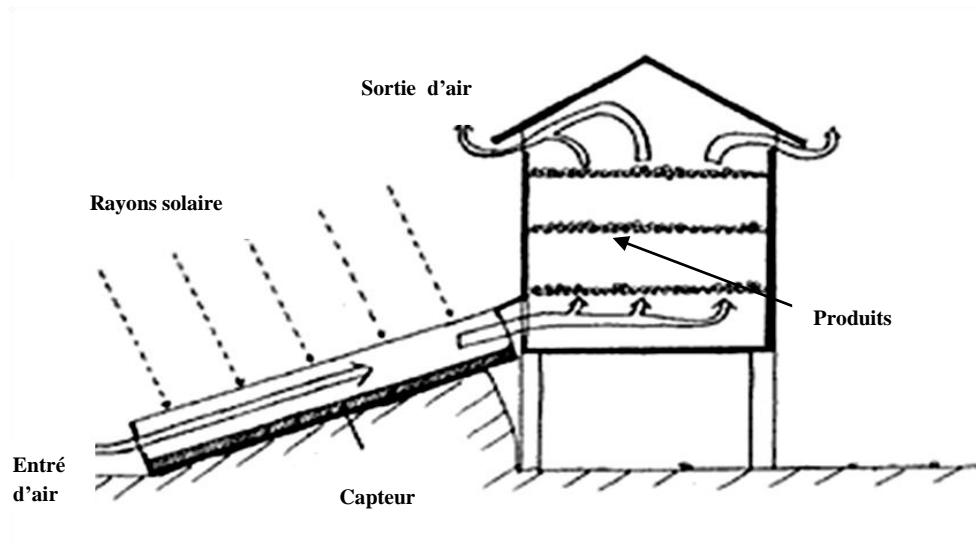


Fig. 1.11 Séchoir solaire indirect passif (Rabl, 1985).

Les séchoirs solaires mixtes (Fig. 1.12) associent les principes des séchoirs direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des radiations solaires et de l'air réchauffé dans un capteur placé en dessous de la chambre de séchage. Pour les séchoirs mixtes, les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont couvertes par des vitres ou des films transparents.

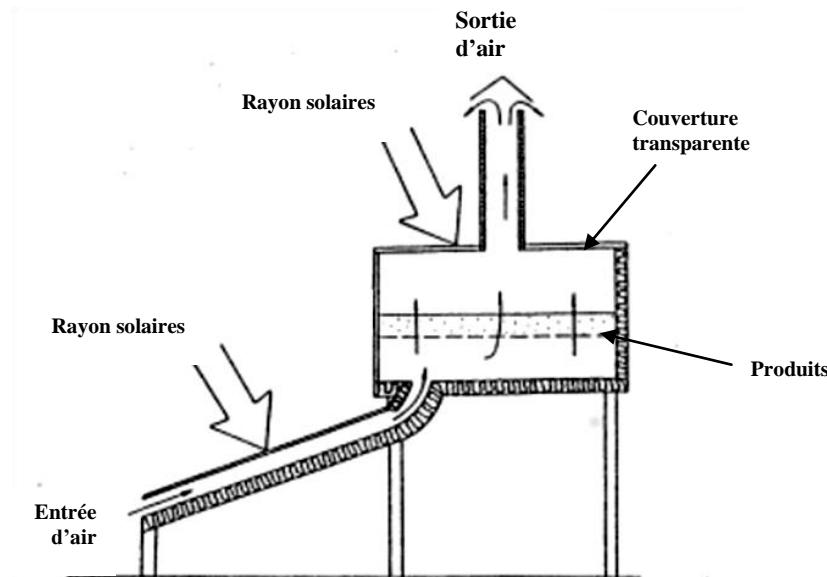


Fig. 1.12 Séchoir solaire mixte passif (Ekechukwu *et al.*, 1999).

Il existe aussi des séchoirs hybrides qui utilisent, en plus de l'énergie solaire une autre source énergétique consommatrice de réserves fossiles ou de courant électrique pour suppléer au chauffage et/ou à la ventilation. Ces types de séchoirs sont souvent utilisés pour des produits qui ne tolèrent pas des températures en dessous d'un certain seuil ou une humidité de l'air trop importante.

Le choix d'un type de séchoir solaire n'est pas chose aisée, car il dépend de plusieurs critères (produits, coût, maintenabilité...). Quelques études comparatives ont été menées pour aider l'utilisateur en lui donnant les avantages et les inconvénients de chaque type.

1.5.5 Etude comparative des différents types de séchoirs solaires

Des études ont été menées par certains auteurs pour comparer les vitesses de séchage, les coûts de séchage, la maintenance et la manipulation des différents types de séchoirs solaires (Gikuru et Njoroge, 2006 ; Simata, 2003). Il ressort de ces études que les séchoirs solaires indirects sont plus efficaces que les séchoirs solaires directs mais présentent l'inconvénient d'être moins compacts, plus délicats à manipuler et à maintenir (Gikuru *et al.*, 2006). Selon Simata (Simata, 2003), qui a modélisé et comparé les coûts des séchoirs solaires

mixtes et indirects, le coût d'exploitation annuel du séchoir solaire mixte est inférieur à celui du séchoir direct. L'application de son modèle pour le séchage de 90kg de maïs a permis d'obtenir pour la même largeur de capteur solaire, une longueur de 1,8m pour le mode mixte et de 3,3 m pour le mode indirect et un coût annuel de 12,76 US dollars pour le séchoir mixte contre 16,05 US dollars pour le séchoir indirect.

En résumé, les séchoirs indirects sont plus rentables sur le plan économique que les séchoirs directs mais le sont moins que les séchoirs mixtes. Pour améliorer les séchoirs solaires classiques d'autres modèles plus ou moins adaptés à l'environnement et aux besoins des utilisateurs ont été développés.

1.5.6 Quelques concepts et éléments de conception d'un séchoir solaire.

Le caractère particulier de l'énergie solaire (sa variabilité et son indisponibilité à certaines heures de la journée) est à l'origine de la conception de certains types de séchoirs. C'est ainsi que certains chercheurs ont conçu des séchoirs dont les capteurs ont plusieurs angles d'inclinaisons en vue de limiter l'impact de la variabilité de l'énergie solaire sur le séchage (Aboul-Enein *et al.*, 2000; Jain, 2004). D'autres proposent des séchoirs dont l'inclinaison du capteur est variable (Gikuru *et al.*, 2006). Pour assurer la continuité du séchage pendant les heures de non ensoleillement, des séchoirs dotés des dispositifs de stockage d'énergie ont été conçus et expérimentés (Jain, 2005; Shanmugam *et al.*, 2005).

La figure 1.13 présente un exemple de séchoir doté d'un dispositif de stockage d'énergie. Ce séchoir est doté de 2 capteurs: un premier capteur horizontal (capteur 1) placé sous la chambre de séchage et qui reçoit les rayons solaires issus d'un polygone réfléchissant, et un deuxième capteur incliné de 30° (capteur 2) placé au dessus de la chambre de séchage et qui reçoit directement les rayons solaires. Ce dernier transmet la chaleur captée à un accumulateur de chaleur (matériaux de stockage) pour assurer la continuité du séchage pendant les heures de non ensoleillement. Ce type de séchoir est plus adapté pour des produits dont le lit de séchage est transversal (l'air circule perpendiculairement aux surfaces des produits) et par conséquent son application pour des produits de faibles épaisseurs est inefficace. Par ailleurs, le dispositif de stockage et le calcul des angles du polygone compliquent sa maintenance en cas de défaillance. En plus, ce séchoir n'optimise pas le captage du rayonnement solaire direct car son deuxième capteur a un seul angle d'inclinaison.

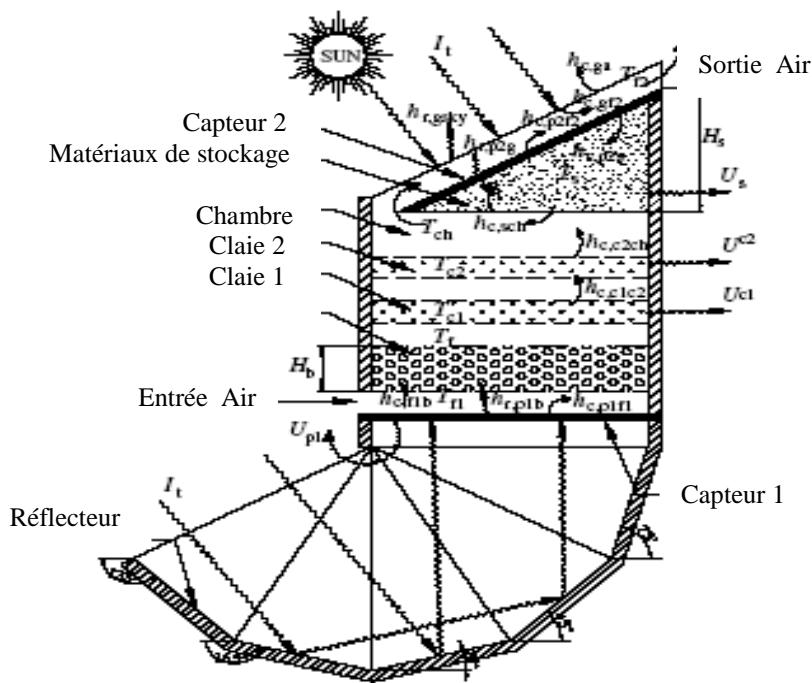


Fig. 1.13 Séchoir solaire doté d'un dispositif de stockage d'énergie (Jain, 2005)

Gikuru *et al.* (2006) ont conçu un séchoir solaire doté d'un dispositif qui permet d'ajuster manuellement l'angle d'inclinaison par incrément de 15° (Fig. 1.14). Ce séchoir a permis de réduire de façon considérable le temps le séchage du café qui était passé de 7 à 2 jours. La difficulté avec ce séchoir est qu'il nécessite la présence permanente d'un opérateur pour faire varier l'angle, et des claies spéciales pour retenir le produit à sécher pendant le mouvement de rotation.



Fig. 1.14 Séchoir à inclinaison variable (Gikuru *et al.*, 2005).

Des modèles de séchoirs solaires directs améliorés ont également été proposés pour optimiser le captage de rayonnement. Kherrou et al. (Kherrou *et al.*, 2008) ont réalisé et

modélisé un séchoir solaire direct composé de 2 vitres latérales et trois vitres inclinées de 15°, 35° et 55° (Fig. 1.15). Ces angles ont été obtenus en déterminant l'inclinaison optimale des capteurs en fonction des numéros de jours de l'année. Trois journées reparties dans l'année ont été retenues pour déterminer ces 3 angles. La vitre inclinée de 55° est conçue pour maximiser le captage pendant la période froide, la vitre inclinée de 15° permet d'optimiser la transmission pendant la période estival et la vitre inclinée de 35° joue le rôle intermédiaire.



Fig. 1.15 Séchoir solaire direct amélioré (Kherrou et al., 2008).

Ce séchoir a permis d'avoir un captage d'énergie supérieur à celui des séchoirs solaires directs avec un seul angle d'inclinaison, mais ce gain est relativement faible, ce qui peut avoir pour conséquence de diminuer la performance globale du séchoir.

Les séchoirs présentés (Fig. 1.13 à 1.15) restent des prototypes de laboratoire parce que l'utilisateur, que l'on doit satisfaire, n'a pas été associé à la conception.

L'objectif visé par les concepteurs de ces modèles de séchoirs solaires est d'optimiser le séchage solaire des produits. Mais cet objectif ne peut être atteint que pour une famille très réduite de produits pour lesquels ces séchoirs ont été conçus. En ce qui concerne la viande, nous n'avons pas rencontré de séchoir solaire qui soit spécialement conçu pour ce produit en prenant en compte ses caractéristiques hygroscopiques et son environnement d'utilisation. Cette dernière devant aussi tenir compte du comportement du produit au cours du séchage à travers une bonne connaissance des isothermes de désorption et cinétiques de séchage.

1.6 Les isothermes de sorption

1.6.1 Définition et application

La stabilité des produits alimentaires est étroitement liée à leur activité de l'eau. L'activité de l'eau est définie comme l'indicateur de la disponibilité de l'eau dans un produit. Elle se mesure sur une échelle qui varie de 0 à 1. Plus elle est basse, mieux l'aliment se conserve. En général on considère qu'une activité d'eau inférieure à 0,6 protège les produits contre les réactions de dégradation. En effet, la croissance des microorganismes est alors inhibée et les enzymes sont inactivées.

L'activité d'eau a_w d'un produit dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température. Lorsque l'eau présente dans le matériau est en équilibre avec la vapeur d'eau contenue dans l'air qui l'entoure, la température du produit est égale à la température de l'air (pas de transfert de chaleur) et la pression de vapeur d'eau du produit est égale à la pression de vapeur d'eau de l'air (pas de transfert de masse): L'activité de l'eau dans le produit est donc égale à l'humidité relative de l'air. A l'équilibre, la relation entre l'activité d'eau et l'humidité relative du milieu environnant est donnée par la relation 1.24:

$$a_w = \frac{P_v}{P_{v,sat}} = \frac{HR(\%)}{100} \quad (1.24)$$

Où P_v désigne la pression de vapeur contenue dans le produit, $P_{v,sat}$ la pression de vapeur saturante de l'eau pure à la même température.

Les isothermes de sorption sont des courbes qui représentent l'évolution de la teneur en eau d'équilibre W_{eq} d'un produit en fonction de son activité d'eau a_w . Ces courbes sont généralement de forme sigmoïdale (Chirife, 1983) et sont utilisées dans les sciences et technologies alimentaires dans des nombreux objectifs. Les principaux domaines d'applications sont le séchage, le stockage, l'emballage et le mélange. Les isothermes de désorption sont obtenues lorsque l'expérience part d'échantillons humides qui rentrent en équilibre avec l'air environnant en lui cédant de l'humidité et les isothermes d'adsorption représentent un processus d'équilibre qui part d'un échantillon sec.

Une bonne connaissance de la relation qui existe entre la teneur en eau d'équilibre d'un produit et son activité d'eau est essentielle pour une bonne maîtrise des opérations de séchage et de stockage de ce produit (Gal, 1983). La teneur en eau d'équilibre d'un produit avec son environnement est un indicateur du niveau de stabilité que le produit peut atteindre dans les conditions de température et d'humidité relatives données. Dans les procédés de

séchage, les isothermes de désorption permettent de déterminer la teneur en eau d'équilibre du produit avec son environnement, qui est la limite de teneur en eau en fin de séchage. La valeur de la teneur en eau d'équilibre est d'autre part un paramètre important apparaissant dans les modèles qui permettent de prédire l'évolution de la teneur en eau du produit au cours de son séchage, puis lors de son stockage. Les isothermes de désorption sont aussi utilisées pour calculer la quantité de chaleur nécessaire pour évaporer les molécules d'eau jusqu'à la teneur en eau d'équilibre (Talla *et al.*, 2005). Cette chaleur est égale à la somme de la chaleur latente de changement de phase de cette eau, en l'état «libre», et de la chaleur isostérique nette de désorption de cette eau, liée, obtenue à partir des isothermes de désorption. La connaissance de cette quantité de chaleur totale est importante pour le dimensionnement des équipements de séchage et de stockage dans une moindre mesure.

Les isothermes de sorption présentent en général 3 zones correspond chacune à un niveau de fixation de l'eau sur le produit (Fig. 1.16).

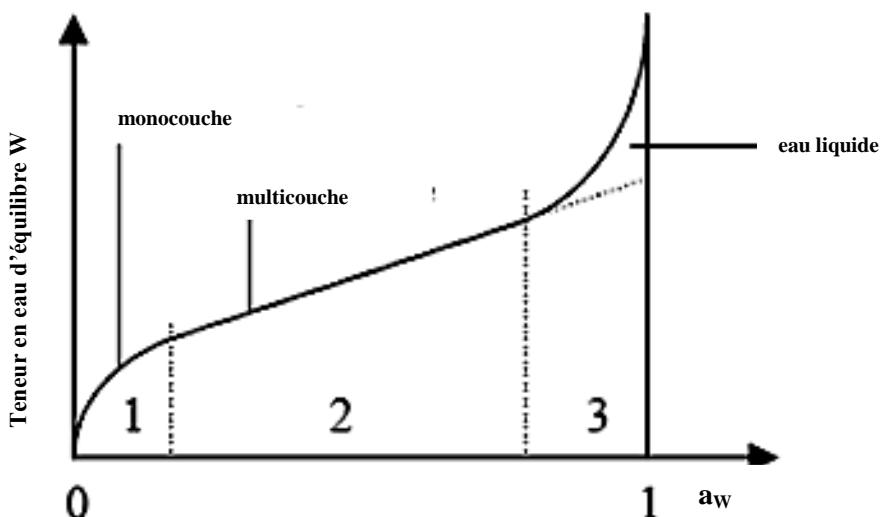


Fig. 1.16 Différentes zones des isothermes de sorption.

-Zone 1 : c'est la zone de la monocouche moléculaire à la surface du produit. Les molécules d'eau dans cette zone sont fortement liées aux groupements hydrophiles par les forces de Van der Waals.

-Zone 2 : c'est la zone où d'autres couches sont superposées à la monocouche. Les molécules d'eau sont faiblement liées et se trouvent dans un état intermédiaire entre solide et liquide.

-Zone 3 : dans cette zone, l'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit à l'état liquide dans les pores du matériau : C'est la zone de l'eau liquide.

1.6.2 Modélisation des isothermes de sorption

De nombreux modèles ont été proposés pour représenter les isothermes de sorption des produits alimentaires. Parmi les modèles les plus couramment utilisés pour représenter les isothermes de sorption des produits alimentaires, on peut citer les modèles BET (Brunauer *et al.*, 1938), GAB (Anderson, 1946; de Boer, 1953; Guggenheim, 1966), Henderson (Henderson ,1952), Oswin (Oswin, 1946), Harkins (Harkins *et al.*, 1944) , Caurie (Caurie, 1981) and Halsey (Halsey ,1948). Les isothermes de sorption des aliments peuvent être décrites par plus d'un modèle de sorption (Lomauro *et al.*, 1985) étant donné qu'elles représentent les propriétés hygroscopiques internes de divers constituants qui peuvent changer au cours du séchage en raison des modifications et interactions chimiques et physiques induites par la chaleur. Il est par conséquent difficile d'avoir un modèle mathématique unique, qu'il soit théorique ou empirique, qui décrit avec précision les isothermes de sorption pour l'ensemble des activités de l'eau et pour différents types d'aliments (Chirife et Iglesias, 1978). Les critères de choix pour tester un modèle sur un produit reposent généralement sur sa simplicité et la signification physique de ses paramètres. C'est ainsi que nous considérons dans le cadre de cette étude les modèles BET, GAB et Halsey dont les équations sont récapitulées dans le tableau 1.6. Dans ce tableau, les constantes constants a , b , C , K et W_0 sont des paramètres à déterminer, a_w et W_{eq} représentent l'activité d'eau et la teneur en eau d'équilibre, respectivement.

Tableau 1.6: Equations des modèles BET, GAB et Halsey

Nom du modèle	Equation	Numéro de l'équation
Brunauer-Emmet-Teller (BET)	$\frac{a_w}{(1-a_w)W_{eq}} = \frac{1}{CW_0} + \frac{(C-1)}{CW_0}a_w$	(1.25)
Guggenheim-Anderson-Boer (GAB)	$W_{eq} = \frac{W_0 a_w C K}{(1-a_w K)(1+a_w C K - a_w K)}$	(1.26)
Halsey	$a_w = \exp\left[\frac{-a}{W_{eq}^b}\right]$	(1.27)

Le modèle BET (Eq. (1.25)) a été largement utilisé et a plus donné satisfaction pour des activités d'eau comprises entre $0,05 < a_w < 0,45$ (Chirife and Iglesias, 1978). C'est un modèle à deux paramètres à savoir la teneur en eau de la monocouche (W_0) et la constante d'énergie C qui est liée à la chaleur isostérique nette de désorption (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

Le modèle GAB (Guggenheim-Anderson-de-Boer) (Eq. (1.26)) qui est une extension du modèle BET à 3 paramètres est de loin le plus utilisé pour la modélisation des isothermes des produits agroalimentaire (Singh *et al.*, 2006, Aktas *et al.*, 2005, Kalilou *et al.*, 1998, Talla *et al.*, 2005). Dans le modèle GAB, le troisième paramètre K est la constante d'énergie liée à l'enthalpie de sorption (Van den Berg *et al.*, 1981). Le modèle GAB a été recommandé par le Groupe de projet COST européenne 90 sur les propriétés physiques des aliments (Wolf *et al.*, 1985), comme l'équation fondamentale pour la caractérisation de sorption d'eau des produits alimentaires. Dans l'équation du modèle GAB (Eq. (1.26)) présentée dans le tableau 1.6, les grandeurs W_0 , C et K sont les fonctions suivantes de la température :

$$W_0(T) = W'_0 e^{\Delta H / RT} \quad (1.28)$$

$$C(T) = C' e^{(H_L - H_m) / RT} \quad (1.29)$$

$$K(T) = K' e^{(H_L - H_m) / RT} \quad (1.30)$$

où W'_0 , C' et K' sont des constantes du modèle GAB à ajuster, H_L la chaleur de condensation de l'eau, H_I la chaleur de sorption totale de la monocouche, H_m la chaleur de sorption totale de la multicouche, ΔH l'enthalpie molaire partielle de sorption et R la constante des gaz parfaits.

Le modèle de Halsey (Eq. (1.27)) tient compte de la condensation des multicouches d'eau en considérant que l'énergie potentielle de la molécule, qui intervient dans l'expression des paramètres a et b du modèle, est inversement proportionnelle à la $b^{\text{ème}}$ puissance de sa distance à la surface du substrat sec (Halsey, 1948). Selon Iglesias *et al.* (1975), l'équation Halsey a été utilisée pour décrire avec précision 220 isothermes de sorption expérimentaux de 69 aliments différents dans la plage de $0,1 < a_w < 0,8$.

1.6.3 Isothermes de sorption des produits carnés

Plusieurs études ont été effectuées sur les isothermes de sorptions de la viande et ses produits dérivés (Kabil *et al.*, 2012; Farid *et al.*, 2010; Clemente *et al.*, 2009; Aktas, *et al.*, 2005; Trujillo *et al.*, 2003; Singh *et al.*, 2001; Comaposada *et al.*, 2000); celles-ci se sont intéressées à l'effet de la température sur les isothermes de sorption, à la chaleur de sorption et à la modélisation des isothermes de sorption. Certains auteurs ont montré que les données expérimentales de isothermes de sorption peuvent être utilisées pour déterminer la chaleur de sorption isostérique et les propriétés de l'eau liée (Singh *et al.*, 2006; Delgado et Sun, 2002a;

Mulet *et al.*, 1999). La chaleur isostérique de désorption est l'énergie nécessaire pour éliminer les molécules d'eau de la matière solide du produit. Elle est égale à la somme de la chaleur de vaporisation de l'eau pure et la chaleur isostérique nette de désorption. Cette dernière peut être déterminée par application de l'équation de Clapeyron aux isothermes de désorption. Clemente *et al.* (Clemente *et al.*, 2009) et Singh *et al.* (Singh *et al.*, 2006) ont étudié la chaleur isostérique de désorption de la viande de porc fraîche préalablement congelée et de la viande de chèvre, respectivement. Kabil *et al.* (Kabil *et al.*, 2012) ont étudié la chaleur isostérique de désorption du bœuf pour des températures d'air inférieures à 25° C, des températures qui ne sont pas généralement rencontrées dans les processus de séchage solaire dans les pays tropicaux. Il est donc nécessaire de fournir des informations sur la chaleur isostérique de désorption de la viande de bœuf à des températures de séchage solaire afin d'avoir une idée plus précise de l'énergie nécessaire pour le séchage solaire du bœuf dans les pays tropicaux.

L'eau liée est généralement définie comme l'eau qui est si étroitement liée aux autres constituants du produit que ses propriétés diffèrent de celles de l'eau libre. La quantité d'eau liée présente dans le produit est un bon indicateur de la stabilité intrinsèque du produit, car cette eau ne permet pas, ou peu, le développement de micro-organismes ou de réaction chimique (Caurie, 1981). Rizvi (1986) a démontré que la température a un impact sur les propriétés de l'eau liée de produits alimentaires. Certaines études ont porté sur l'effet de la température sur les propriétés de l'eau liée dans les produits carnés (Singh *et al.*, 2001 et 2006), mais aucune d'elles ne s'est penchée sur la viande de bœuf. Par conséquent, l'étude de l'influence de la température sur les valeurs de teneur en eau de la monocouche, le nombre de couches adsorbées sur la surface du produit, la densité de l'eau adsorbée, la surface de l'adsorbant et le pourcentage de l'eau liée sont utiles pour évaluer les changements intervenant dans l'eau adsorbée en fonction de la température.

L'évaluation de la distribution de taille des pores dans les matériaux poreux est également d'une grande importance dans la pratique de séchage (Strumillo et Kudra, 1986). Certains auteurs indiquent que la zone de sorption totale, le taux et le degré d'hydratation de matières alimentaires peuvent être déterminés à partir du nombre, de la taille et de propriétés de surface des pores dans la matrice du produit (Singh *et al.*, 2006). En outre, l'influence de la température sur la taille des pores a été soulignée (Kapsalis, 1981). Singh *et al.* (Singh *et al.*, 2001 et 2006) ont étudié cette influence de la température sur la taille des pores, pour les saucisses de poulet fumé et de la viande de chèvre.

Rappelons que les isothermes de désorption permettent d'autre part de connaître la teneur en eau d'équilibre d'un produit avec son environnement, qui est un paramètre essentiel pour la détermination et la modélisation des cinétiques de séchage.

1.7 Les cinétiques de séchage

1.7.1 Evolution de la vitesse et de la température au cours du séchage

L'analyse d'un problème de séchage, effectué dans des conditions de séchage données en termes d'apport d'énergie au produit, peut s'effectuer à partir de deux représentations graphiques de la perte en solvant :

- la courbe qui représente l'évolution de la teneur en eau (base sèche) en fonction du temps ($W=f(t)$)
- la courbe qui trace la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau ($-dW/dt=f(W)$)

Le processus de séchage est généralement subdivisé en 3 phases (Fig. 1.17):

-une phase 0 de mise en température. En effet quand le produit est introduit dans le séchoir il est généralement froid et l'énergie apportée en début de séchage sert à le chauffer (Fig. 1.21).
-une phase I correspondant à une vitesse de séchage constante pendant laquelle la quantité de chaleur apportée au produit est égale à la quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau libre. C'est la phase isenthalpe pendant laquelle la température du produit est uniforme et égale à la température humide de l'air $T_{h\infty}$ (Fig.1.18), si l'apport de chaleur est uniquement convectif.

-une phase II dite phase de ralentissement, démarrant à une teneur en eau dite « critique » W_{cri} , au cours de laquelle la vitesse de séchage diminue et la température du produit augmente (de sa surface vers l'intérieur) pour tendre vers la température de l'air de séchage T_∞ . La teneur en eau du produit diminue jusqu'à atteindre la teneur en eau d'équilibre (W_{eq}) qui est la teneur en eau limite de séchage du produit dans cet environnement (température et humidité relative).

Pour certains produits agroalimentaires on n'observe pas la phase de vitesse de séchage constante et pour d'autres la phase de ralentissement peut se subdiviser en deux ou trois sous-phases qui correspondent à des changements structuraux dans le produit. Pour les produits dont la première phase de séchage est peu marquée, la teneur en eau initiale (W_o) peut être assimilée à la teneur en eau critique (W_{cri}).

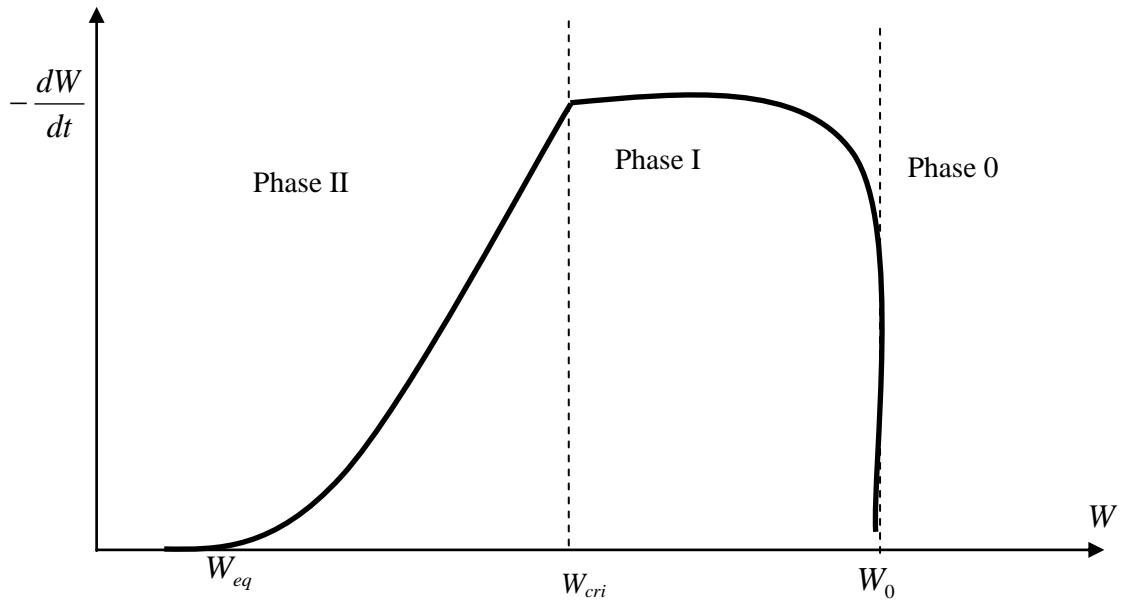


Fig. 1.17 Différentes phases de vitesse séchage.

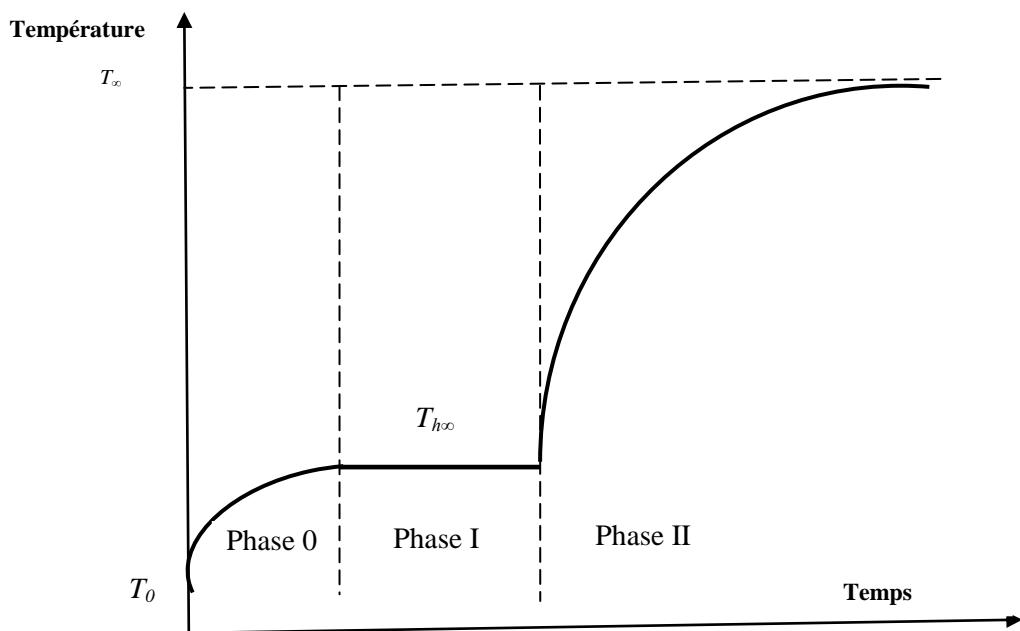


Fig. 1.18 Evolution de la température du produit au cours du séchage.

1.7.2 Modélisation des cinétiques de séchage

Pour prédire le comportement du produit au cours du séchage, quatre types de modèles sont généralement utilisés: le modèle diffusif, les modèles semi-empiriques, la méthode de la Courbe Caractéristique de Séchage (CCS) et la méthode du flux-masse isenthalpe.

1.7.2.1 Le modèle Diffusif

Dans le modèle diffusif, la description du séchage se traduit par une équation de diffusion dans laquelle chaque phase macroscopique de séchage intervient par son propre coefficient de transport de masse noté D_β . Ces coefficients étant constants sur chaque phase identifiée; par exemple phase isenthalpe, phase de premier ralentissement et en fin phase totalement ralentie (Nadeau et Puiggali, 1995).

$$\frac{\partial W}{\partial t} - D_\beta(T_\beta) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0 \quad (1.31)$$

où $\beta=1,2,3$ indique la phase de séchage, T_β est la température de référence pour la phase de séchage considérée.

L'objectif d'un tel modèle est de simuler une cinétique globale de séchage du matériau, tout en donnant des informations réalistes sur le champ interne de teneur en eau. Le modèle intègre donc les effets multiples (2D, 3D, hétérogénéités, interaction séchage-couche limite...) qui différencient la cinétique réelle expérimentale de celle théorique, que l'on peut obtenir avec un milieu homogène, décrite par un modèle de connaissance classique. Dans le modèle diffusif on suppose souvent que le produit conserve sa forme initiale et que le phénomène de retrait est idéal (la variation de volume est égale au volume d'eau liquide évaporée) (Trujillo *et al.*, 2007; Karim et Hawlader, 2005; Simal *et al.*, 2003; Desmorieux et Moyne, 1992). Ces hypothèses, si elles facilitent la résolution du modèle, ne permettent pas souvent d'avoir une bonne représentation de l'évolution de la teneur en eau. Le modèle diffusif repose sur la connaissance de coefficient de diffusion de l'eau ou diffusivité de l'eau, qui est un paramètre très important dans la modélisation des cinétiques et l'analyse des systèmes de séchage. D'après certains auteurs, le modèle diffusif n'est pas adapté pour les produits à très fortes teneurs en eau et qui subissent une contraction et une déformation très importantes au cours de leur séchage (Jannot, 2006). Pour résoudre ce problème ils préconisent l'utilisation des modèles semi-empiriques.

1.7.2.2 Les modèles semi-empiriques

Un certain nombre de modèles semi-empiriques a été proposé pour représenter l'évolution de la teneur en eau d'un produit, à teneur en eau supposée uniforme et soumis à des conditions d'air de séchage constantes. Les modèles semi-empiriques les plus couramment utilisés sont récapitulés dans le tableau 1.7 (Dandamrongrak *et al.*, 2002., Toğrul et Pehlivan, 2002).

Tableau 1.7: Modèles semi-empiriques de cinétiques de séchage les plus utilisés

Nom du modèle	Equation	Numéro
Logarithmique (Togrul et al., 2002)	$W_r(t) = a \exp(-kt) + b$	(1.32)
Newton (Mohapatra et Rao, 2005)	$W_r(t) = \exp(-kt)$	(1.33)
Page (Page, 1949)	$W_r(t) = \exp(-kt^n)$	(1.34)
Henderson et Pabis (Henderson et Pabis, 1961)	$W_r(t) = a \exp(-kt)$	(1.35)
2 termes (Henderson, 1974)	$W_r(t) = a \exp(-kt) + b \exp(-ht)$	(1.36)
Exponentiel à 2 termes (Sharaf-Eldeen, 1980)	$W_r(t) = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	(1.37)
Diffusion approximation (Rapusas et Driscoll, 1995)	$W_r(t) = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(1.38)
Wang et Sing (Wang et Singh, 1978)	$W_r(t) = 1 + at + bt^2$	(1.39)
Verma <i>et al.</i> (Verma <i>et al.</i> , 1985)	$W_r(t) = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	(1.40)
Midilli <i>et al.</i> (Midilli <i>et al.</i> , 2002)	$W_r(t) = a \exp(-kt^n) + bt$	(1.41)

Où $W_r(t)$ désigne la teneur en réduite (Eq. (1.42)), a, b, k, g et h sont les paramètres des modèles à déterminer.

$$W_r(t) = \left(\frac{W - W}{W_{cri} - W_{eq}} \right) \quad (1.42)$$

où W_{cri} désigne la teneur en eau critique (teneur en eau de transition entre la phase à vitesse constante et la phase à vitesse décroissante) correspondant à la fin de phase de séchage isenthalpe de séchage.

Dans les modèles semi-empiriques, la vitesse de séchage est caractérisée, non pas en fonction d'un champ de teneur en eau, mais en fonction de la teneur en eau moyenne du produit et des paramètres de l'air de séchage. L'inconvénient de ces modèles est que les coefficients qui y figurent varient à priori avec les conditions de l'air de séchage. Pour les utiliser dans un programme dédié au calcul de la vitesse de séchage dans des conditions d'air très variables, il faut connaître les valeurs de ces paramètres sur une plage de conditions de séchage assez large. Le nombre de paramètres nécessaires pour décrire les valeurs peut alors devenir important (Jannot, 2006).

1.7.2.3 La méthode de Courbe Caractéristique de Séchage (CCS)

Pour les produits dont les évolutions des formes seraient très difficilement modélisables, certains auteurs préconisent d'utiliser la méthode de Courbe Caractéristique de Séchage (CCS). Cette méthode permet de caractériser les cinétiques de séchage par un modèle de comportement (Van Meel, 1958) sans faire d'hypothèse préalable sur sa forme. Cette méthode a été utilisée pour modéliser beaucoup de produits agroalimentaires (Torres *et al.*, 2015; Baini et Langrish, 2007; Timoumi et Zagrouba, 2005; Jannot *et al.*, 2004; Belghit *et al.*, 2000 ; Desmorieux et Moine, 1992) mais pas pour la viande.

La méthode de la courbe caractéristique de séchage consiste, pour l'ensemble des conditions expérimentales maintenues constantes pendant toute la durée de l'expérience, à représenter les cinétiques de séchage sous la forme de l'équation (1.43).

$$V_r = \frac{-\frac{dW}{dt}}{\left(-\frac{dW}{dt}\right)_0} = f(W_r) \quad (1.43)$$

où W_r représente le teneur en eau réduite et $(-dW/dt)_0$ est la vitesse de séchage de la phase initiale isenthalpe ou flux masse isenthalpe, qui reste constante pour $W < W_{cri}$ avant de décroître. Cette vitesse n'est pas parfois évidente pour les produits agroalimentaires. Dans ce cas, elle est généralement remplacée par une vitesse de référence V_{ref} qui est considérée comme un paramètre du modèle de CCS à déterminer.

Pour un certain nombre de produits, les courbes de séchage réduites obtenues sous conditions expérimentales se superposent et peuvent être représentées par une courbe unique $V_r=f(W_r)$ que l'on appelle Courbe Caractéristique de Séchage CCS du produit (Jannot *et al.*, 2004).

Pour déterminer l'expression de la courbe caractéristique de séchage, on impose arbitrairement une expression mathématique à la fonction $f(W_r)$; cette fonction doit vérifier les propriétés suivantes:

$$f(W_r) = 0 \text{ pour } W_r = 0 \quad (1.44)$$

$$0 < f(W_r) < 1 \text{ pour } 0 < W_r < 1 \quad (1.45)$$

$$f(W_r) = 1 \text{ pour } W_r = 1 \quad (1.46)$$

L'identification des différentes phases de vitesse de séchage permet de définir la fonction $f(W_r)$ par les relations (1.47), (1.48) et (1.49).

$$\text{Si } W_r = 1; f(W_r) = 1 \quad (1.47)$$

$$\text{Si } W_r < W_{rcr}; f(W_r) = CW_r + d \quad (1.48)$$

$$\text{Si } W_r > W_{rcr}; f(W_r) = \frac{\exp(bW_r)}{\exp(b)} \quad (1.49)$$

où W_{rcr} désigne la teneur en eau réduite correspondant à la transition entre les phases 1 et 2 (cf Fig 1.17). Sa valeur doit être déterminée graphiquement de la courbe $V_r=f(W_r)$. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne s'applique que si on arrive à obtenir une représentation unique des cinétiques expérimentales sous la forme $V_r=f(W_r)$.

1.7.2.4 Méthode du flux masse isenthalpe

Dans cette méthode, l'écriture du flux-masse est basée sur la phase isenthalpe (Phase I) et fait intervenir des paramètres liés au produit, aux paramètres de pilotage du procédé, ou induits par le couplage produit/procédé. La phase de ralentissement est décrite comme étant une réduction du flux-masse isenthalpe (F_{mis}) par une fonction pertinente. Si une phase isenthalpe est observée lors des essais de séchage alors cette phase servira de base à l'écriture du flux-masse isenthalpe en fonction des paramètres l'air de séchage (Température d'air, vitesse d'air et humidité relative de l'air) de l'état du produit en début de séchage (W_0) et d'autres paramètres liés aux caractéristiques particulières du procédé employé (apports par rayonnement solaire et infrarouge par exemple). Puis, il faut prendre en compte le ralentissement inhérent au produit (modification de l'état d'hydratation de la surface, déformation et modifications internes, etc) et aux conditions de séchage. Ce ralentissement intervient à partir d'une teneur en eau critique (W_{cri}) tributaire, elle aussi, des conditions de séchage. Il suffit alors simplement de minorer le flux masse isenthalpe par une fonction puissance (Eq.(1.50)). Les valeurs de β et de la teneur en eau critique W_{cri} sont identifiées expérimentalement, sur la courbe du flux-masse en fonction de la teneur en eau.

$$F_m = F_{mis} \left(\frac{W - W_{eq}}{W_{cri} - W_{eq}} \right)^\beta \quad (\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}) \quad (1.50)$$

Pendant la phase isenthalpe, toute la chaleur cédée par l'air ou la source d'énergie sert à vaporiser l'eau extraite. En l'absence d'énergie absorbée dans le volume du produit, le bilan d'énergie pendant la phase isenthalpe s'écrit alors:

$$F_{mis}L_v = h(T_\infty - T_{surf}) + \varphi \quad (1.51)$$

où h désigne le coefficient d'échange par convection entre la surface du produit et l'air, T_∞ , et T_{surf} , sont la température sèche de l'air et la température de surface du produit respectivement, L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau et φ le flux de chaleur surfacique apporté par les autres types de transfert (à l'exception du convectif).

Le coefficient de convection h dépend des paramètres de l'air séchage et des dimensions de la conduite d'écoulement de l'air. Pour le modéliser, il suffit de déterminer les nombres adimensionnels de Reynolds (R_e), de Nusselt (Nu) et de Prandlt (P_r) et d'écrire la relation empirique du $Nu = f(R_e, P_r)$ de laquelle sera déduit le coefficient de convection h par l'équation (1.52).

$$h = \frac{\lambda_\infty * N_u}{D_h} \quad (1.52)$$

Où λ_∞ désigne la conductivité de l'air et D_h désigne le diamètre hydraulique de la conduite.

Notons ici que ce coefficient h peut aussi être identifié sur la phase isenthalpe à l'aide de l'équation 1.51 pour un transfert purement convectif ($\varphi=0$). La connaissance de ce coefficient de convection h permet de retrouver une expression qui modélise le F_{mis} en fonction des paramètres de convection. Le modèle du F_{mis} sera utilisé dans l'expression (1.50) pour écrire un modèle du flux masse. La connaissance du modèle du flux masse permet alors de remonter à un modèle de l'évolution de la teneur en eau au cours du séchage par simple intégrale du flux masse.

Cette méthode présente un grand intérêt pour la modélisation des cinétiques de séchage convectif parce qu'elle intègre la modélisation du coefficient de convection en prenant en compte les paramètres de l'air de séchage et du séchoir. En plus, elle prenant en compte les paramètres du produit (W_0, W_{eq}, W_{cri}) et propose une modélisation simple de la phase de ralentissement. Son principal inconvénient est qu'elle ne s'applique que pour des processus de séchage où une phase isenthalpe (vitesse constante de séchage) a été observée.

1.7.3 Cinétiques de séchage des produits carnés

Certaines études ont été menées sur la cinétique de séchage de viande (Clemente *et al.*, 2011 et 2009; Trujillo *et al.*, 2007; Gou *et al.*, 2003 et 2004; Simal *et al.*, 2003; Radford, 1976; Moutarjemi, 1988) et se sont principalement intéressées à l'effet des paramètres de l'air de séchage et à la modélisation de ces cinétiques. Clemente *et al.* (Clemente *et al.*, 2011) et Trujillo *et al.* (Trujillo *et al.*, 2007) ont étudié et modélisé les cinétiques de séchage de la viande de porc décongelée et de la viande de bœuf fraîche, respectivement, pour des températures d'air inférieures à 40 °C. Pour la même limitations en température d'ai séchant, la vitesse de séchage de la viande bovine a été étudiée par quelques auteurs parmi lesquels certains ont pu identifier une période de vitesse de séchage constante (Musonge *et al.*, 1994; Igene *et al.*, 1990) contrairement à d'autres (Kalilou *et al.*, 1998).

L'ensemble de ces résultats nous amène à penser qu'il est nécessaire que nous étudions expérimentalement et modélisons les cinétiques de séchage de la viande de bœuf, notamment pour des températures supérieures à 40°C (rencontrées dans les séchoirs solaires en pays tropicaux), mais pas uniquement.

CHAPITRE 2. CARACTERISATION DU COMPORTEMENT HYGROSCOPIQUE DE LA VIANDE AU COURS DU SECHAGE.

La caractérisation du comportement hygroscopique d'un produit au cours du séchage présente deux aspects : un aspect statique qui consiste à déterminer la teneur en eau d'équilibre du produit, qui est la teneur en eau limite au delà de laquelle un produit ne se déhydrate plus dans un environnement donné, à évaluer l'énergie nécessaire pour atteindre cette teneur en eau d'équilibre et à caractériser les propriétés microscopiques de l'eau contenue dans le produit après l'équilibre ; et un deuxième aspect dynamique qui consiste à suivre l'évolution de la teneur en eau et de la vitesse de séchage du produit au cours de sa déshydratation afin d'identifier ses différentes phases de séchage. Ceci revient donc à déterminer expérimentalement les isothermes de désorption et les cinétiques de séchage du produit et à les modéliser afin de pouvoir prédire son comportement au cours du séchage. Les isothermes de désorption et les cinétiques de séchage constituent une étude de comportement à l'échelle du produit qui permettra de passer de ce produit à une modélisation du séchage à l'échelle du procédé (produit, environnement et séchoir).

Les isothermes de sorption et cinétiques de séchage de la viande de bœuf à des températures proches de celles rencontrées dans les processus de séchage solaire dans les pays tropicaux (supérieures à 40°C) n'ont pas été étudiées (cf. paragraphe 1.6.3 et 1.7.3 du chapitre 1). Le présent chapitre a pour objectif de caractériser la viande de bœuf sur le plan hygroscopique. Il s'agit spécifiquement de :

- déterminer expérimentalement, les isothermes de désorption de la viande de bœuf à 30°C, 40°C et 50 °C, d'identifier le modèle qui les décrit le mieux, de déterminer la chaleur de désorption et de décrire les propriétés de l'eau liée en fonction de la température de sorption.

- déterminer expérimentalement les cinétiques de séchage de la viande de bœuf pour différents paramètres (température, vitesse, humidité relative) de l'air de séchage, d'identifier les différentes phases de séchage et d'identifier le modèle de type flux masse isenthalpe qui décrit le mieux ces cinétiques.

2.1 Matériel et méthodes

2.1.1 Matériel et méthodes des isothermes de désorption

2.1.1.1 Dispositif expérimental d'isothermes de désorption

Le dispositif utilisé est une enceinte climatique régulée en température (étuve) de modèle 53L 220°C UFB400 (société Memmert, Schwabach, Allemagne). C'est une étuve universelle à convection forcée, de type basique et de volume 53 litres; le domaine de température de cette étuve s'étend de 10°C au-dessus de l'ambiance à 220°C. L'incertitude de mesure est de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Les échantillons ont été placés dans des bocaux scellés hermétiquement contenant des solutions salines. Les pots avaient 11 cm de hauteur et 10 cm de diamètre (Fig. 2.1), conformément aux recommandations de Spiess et Wolf (Spiess et Wolf, 1987). Les échantillons ont été placés sur une grille de 10 mm au-dessus de la surface de la solution afin d'éviter que les échantillons ne se mouillent, comme suggéré par Trujillo *et al.* (Trujillo *et al.*, 2003).

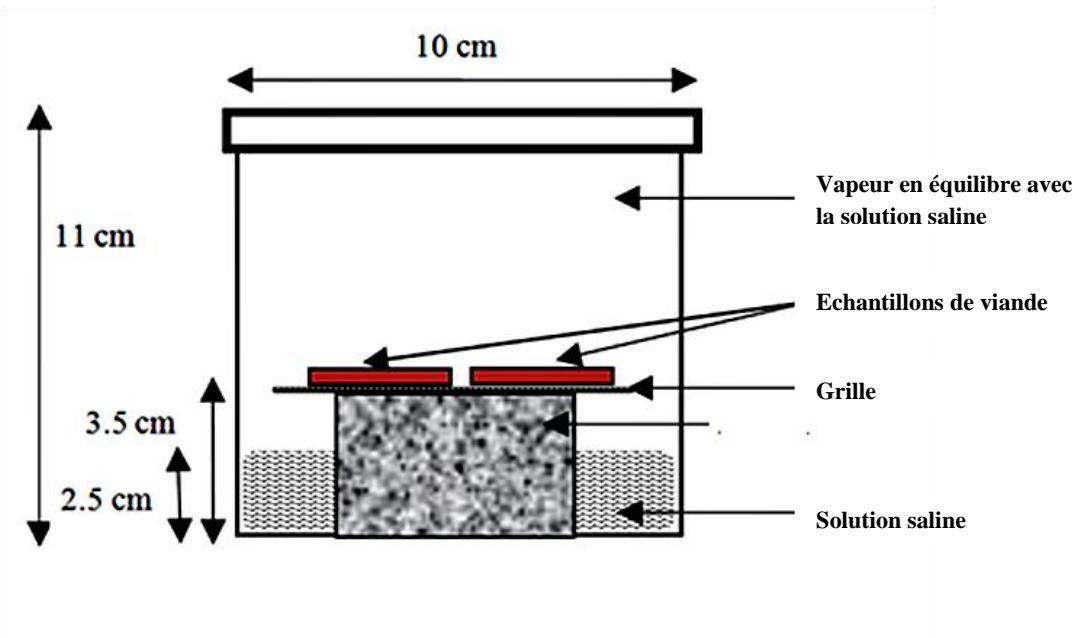


Fig. 2.1 Schéma d'échantillons dans un bocal de sorption.

2.1.1.2 Méthodes de détermination des isothermes de désorption

2.1.1.2.1 Préparation des échantillons

La viande de boeuf utilisée a été achetée aux bouchers du marché local de la ville de N'Gaoundéré au Nord Cameroun. La viande provient d'un bœuf fraîchement abattu et n'a donc subi aucun traitement post-mortem. L'animal était de la race Zébus Goudali, âgé entre 4

ou 5 ans. La partie du bœuf utilisée est le rond de tranche de la cuisse arrière (Fig. 2.2). D'abord, la viande fraîche est débarrassée des tendons et de la graisse, puis est découpée le long de la direction des fibres en lamelles minces de 5 cm de longueur, 3 cm de largeur et 3 mm d'épaisseur. Les teneurs en lipide, protéines, eau et cendre de la viande ont été déterminées en utilisant la méthode AOAC (AOAC, 1997).

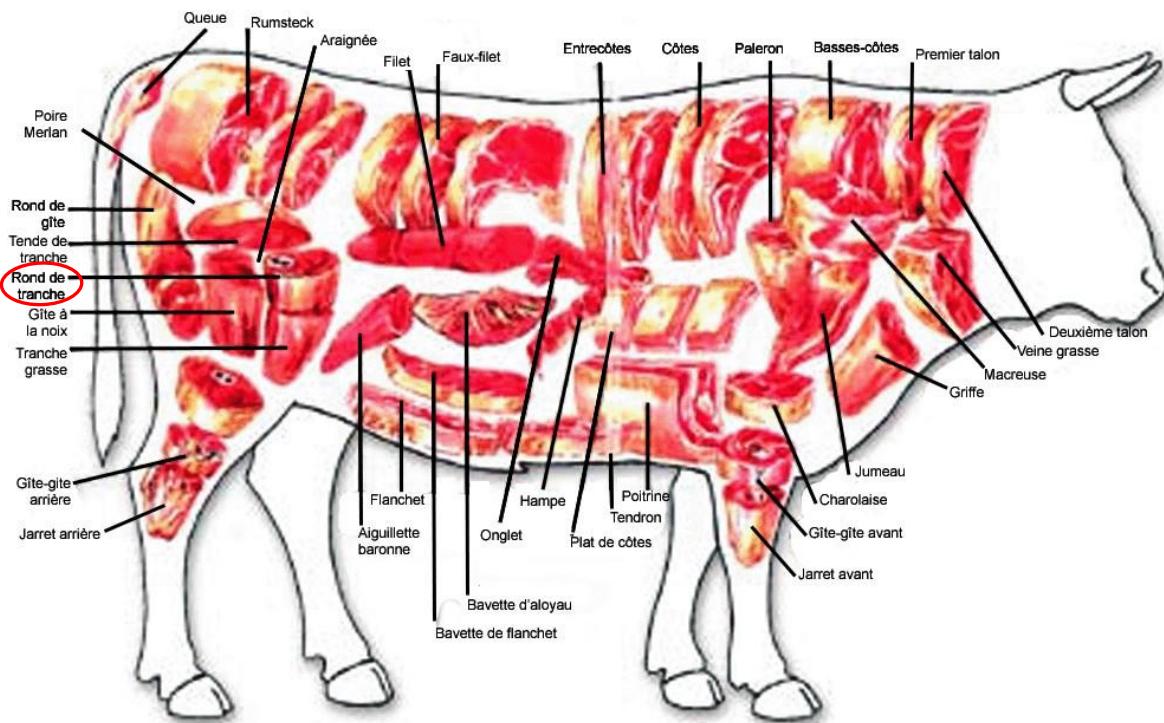


Fig. 2.2 Différentes parties du bœuf (www.cuisine-astuce.com, 2015).

2.1.1.2.2 Détermination de la teneur en eau d'équilibre de désorption

Les isothermes de désorption ont été déterminées par la méthode gravimétrique statique. Nous avons utilisé des solutions salines saturées couvrant un intervalle d'humidité relative compris entre 5% et 84% (Tableau 2.1) (Bizot et Multon, 1978). Ces solutions ont été préparées dans des bocaux hermétiquement fermés et maintenus dans l'enceinte thermostatée. Deux échantillons ont été placés dans chaque bocal au-dessus des solutions salines, dans une atmosphère stabilisée en température et humidité relative. Les essais ont été effectués pour trois valeurs de température: 30°C, 40°C et 50°C. Pour éviter la détérioration de la viande, le sorbate de potassium a été utilisé comme agent de conservation pour quatre solutions dont les activités d'eau sont supérieures ou égales à 50% (NaBr, CuCl₂, NaCl, KCl). Ainsi, 25 mg de sorbate de potassium ont été saupoudrés sur chaque échantillon à raison de 5 mg pour 1 g du produit. Cette masse est retranchée de la masse d'équilibre final. Cet agent de conservation a

été recommandé et utilisé par Singh *et al.* (Singh *et al.*, 2006) dans les proportions indiquées ci-dessus et est considéré comme n'ayant pas d'influence sur les isothermes de sorption.

Tableau 2.1: Solutions salines saturées: humidité relative en fonction de la température (Bizot et Multon, 1978).

Sels	30°C	40°C	50°C
KOH	8,2	6,3	5,7
LiCl	11,3	11,2	11,4
KCH ₃ CO ₂	22,5	21,6	21,6
MgCl ₂	32,8	31,6	30,5
K ₂ CO ₃	43	42,2	42,2
NaBr	57,6	53,2	50,9
CuCl ₂	68,5	68	65,5
NaCl	75,3	74,7	74,4
KCl	84,3	82,3	81,2

Les échantillons ont été pesés toutes les 24 heures sur une balance de précision 0,001g. La condition d'équilibre était atteinte lorsque la différence entre trois mesures consécutives de la masse était de l'ordre de 0,001g. Après l'équilibre, les échantillons sont séchés dans une étuve conventionnelle à 103°C pendant 24 heures; ceci permet de déterminer la teneur en eau d'équilibre en utilisant l'équation $W = 100 \left(\frac{m_{eq}}{m_s} - 1 \right)$, où m_{eq} représente la masse de l'échantillon en équilibre et m_s la masse anhydre. Chaque expérience a été répétée trois fois, à raison de deux échantillons par expérience. Les teneurs en eau d'équilibre calculées sont donc des moyennes de six valeurs expérimentales.

2.1.1.3 Méthode de détermination des paramètres intervenant dans les modèles d'isothermes de sorption

Trois modèles, parmi les plus couramment utilisés pour modéliser les produits alimentaires, ont été choisis pour décrire les isothermes de désorption de la viande de bœuf, à savoir les modèles BET GAB et Halsey (cf. Eqs. (1.25), (1.26), (1.27), paragraphe 1.6.2 du chapitre 1). Ce choix a été guidé par la simplicité mathématique de ces modèles et surtout la signification physiques des paramètres qui interviennent dans ces modèles. Les paramètres d'ajustement des différents modèles (BET et GAB : C , K et W_0 ; Halsey : a et b) ont été

estimés à partir des résultats expérimentaux, en appliquant la méthode de Newton pour minimiser la somme S des erreurs quadratiques entre les teneurs en eau d'équilibre obtenues expérimentalement (W_{eq_exp}) et celles obtenues à partir de l'expression donnée par le modèle considéré (W_{eq_mod}).

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\frac{W_{eq_exp} - W_{eq_mod}}{W_{eq_exp}} \right)_i^2 \quad (2.1)$$

où n désigne le nombre de mesures effectuées pour une température donnée. Dans notre cas, $n=9$ correspondant aux neuf solutions salines utilisées. La résolution a été menée en utilisant le Solveur Excel de Microsoft office XP 2007 pour 200 itérations avec une précision de 10^{-6} , une valeur de tolérance de 1% et une convergence de 10^{-6} .

L'acceptabilité d'un modèle en terme de description des valeurs expérimentales est appréciée à l'aide des valeurs du coefficient de corrélation r^2 et du pourcentage de déviation P défini par:

$$P = 100 \times \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_1^n \left(\frac{W_{eq_exp} - W_{eq_mod}}{W_{eq_exp}} \right)^2 \right]} \quad (2.2)$$

Un modèle est considéré comme acceptable lorsque son pourcentage de déviation est inférieur à 10 % (Brunauer *et al.*, 1940) et son coefficient de corrélation r^2 est proche de 1.

Les résidus des teneurs en eau d'équilibre R^* , qui sont la distance relative entre chaque valeur expérimentale et la valeur de modélisation correspondant, définis par l'équation (2.3) ont été déterminés et leur évolution en fonction de l'activité d'eau a_w a été représentée pour chaque température et pour tous les modèles, afin de déterminer si un modèle est plus efficace qu'un autre dans un intervalle d'activité d'eau donnée.

$$R^* = 100 \times \left(\frac{W_{eq_exp} - W_{eq_mod}}{W_{eq_exp}} \right) \quad (2.3)$$

Le paramètre W_0 des modèles GAB et BET, obtenue par ajustement de ces modèles avec les résultats expérimentaux, est appelé teneur eau de la monocouche. Celle-ci est définie comme la teneur en eau à partir de laquelle l'eau forme une monocouche moléculaire à la surface du produit. Cette teneur en eau de la monocouche W_0 permet de déterminer les propriétés de l'eau liées du produit (zone 1 et zone 2 de la courbe de sorption) (cf. Fig. 1.16, paragraphe 1.6.1 du chapitre 1) dont les propriétés diffèrent de celles d'une eau libre à cause

des fortes liaisons entre les molécules d'eau et les composants hydrophiles du produit (Caurie, 1981).

2.1.1.4 Détermination des propriétés de l'eau liée

Les propriétés de l'eau liée à déterminer, pour une température donnée, sont : la densité de l'eau liée C , le nombre de monocouches adsorbées N , la surface de sorption A et le pourcentage d'eau liée. Rappelons que pour les teneurs en eau d'équilibre W_{eq} supérieures à la teneur en eau de monocouche W_0 (zone 2 de la courbe de sorption), d'autres couches d'eau liée sont adsorbées et viennent se superposer à la monocouche (Zone 1 de la courbe de sorption) : ce sont les monocouches adsorbées.

La densité de l'eau liée C et le nombre de monocouches adsorbées N sont obtenus à partir de l'équation linéarisée de Caurie (Eq.(2.4)) en minimisant la somme des erreurs quadratiques S (Eq. (2.1)) entre les teneurs en eau d'équilibre expérimentales et celles obtenues par le modèle de Caurie. Dans l'équation (2.4), la teneur en eau de la monocouche W_0 retenue est celle du modèle qui a le plus faible pourcentage de déviation parmi les modèles BET et GAB.

$$\ln\left(\frac{1}{W_{eq}}\right) = -\ln(CW_0) + \left(\frac{2}{N}\right) \ln\left(\frac{1-a_w}{a_w}\right) \quad (2.4)$$

Pour chaque température, le nombre de monocouches adsorbées N est déduit de la pente $2/N$ de la droite $\ln(1/W_{eq})$ en fonction de $\ln[(1-a_w)/a_w]$. La surface de sorption A , exprimée en m^2/g , est un paramètre associé au phénomène d'adsorption et est alors déterminé comme suit (Caurie, 1981) :

$$A = \frac{V}{d} \quad (2.5)$$

où $V=[2.10^{-8}/(2/N)]$ (m^3/g) et $d=3.673.10^{-10}$ (m).

Le pourcentage d'eau liée est alors obtenu par l'équation suivante :

$$\%bw = W_0 * N \quad (2.6)$$

2.1.1.5 Détermination de la taille des pores de la viande de bœuf

L'équation de Kelvin (Eq. (2.7)) permet alors de déterminer le rayon critique.

$$r_c = \frac{-2\sigma V_M}{RT \ln a_w} \quad (2.7)$$

où r_c est le rayon critique (m), σ la tension superficielle ($N.m^{-1}$), V_M le volume molaire de l'adsorbant ($m^3.mol^{-1}$), R la constante des gaz parfaits ($kJ.mol^{-1}.K^{-1}$), T la température (K) et a_w l'activité de l'eau.

L'épaisseur de la couche d'eau adsorbée est ensuite obtenue en utilisant l'équation de Halsey (Eq. (2.8)).

$$t = 3.54 * \left(\frac{-5}{\ln a_w} \right)^{1/3} \quad (2.8)$$

où t est l'épaisseur de la multicouche (mm). La taille moyenne des pores r_p est obtenue en additionnant le rayon critique r_c et l'épaisseur de la monocouche t (Eq. (2.8)) (Singh *et al.*, 2001).

$$r_p = r_c + t \quad (2.9)$$

2.1.1.6 Détermination de la chaleur isostérique de sorption

La chaleur isostérique de sorption est la somme de la chaleur latente de vaporisation et de la chaleur isostérique nette de désorption (Eq. (2.10)). Cette dernière peut être obtenue à partir des isostères de désorption qui représentent, à teneur en eau constante, l'évolution du logarithme des activités d'eau en fonction de l'inverse de la température. L'équation de ces isostères de désorption est donnée par l'équation de Clausius-Clapeyron (Eq (2.11)). La chaleur latente de vaporisation de l'eau pure est considérée comme indépendante de la température et égale à 2401 kJ/kg, qui est la chaleur de vaporisation moyenne de l'eau pure dans les plages des températures d'études ($30^\circ C$, $40^\circ C$ et $50^\circ C$).

$$Q_s = Q_{sn} + L_v \quad (2.10)$$

$$\frac{d \ln a_w}{d(1/T)} = -\frac{Q_s}{R} \quad (2.11)$$

où Q_s et Q_{sn} exprimés en (kJ/kg) désignent respectivement la chaleur isostérique de sorption, et la chaleur isostérique nette de désorption. R est la constante des gaz parfaits et T la température (K).

2.1.2 Matériel et méthodes de cinétiques de séchage

2.1.2.1 Dispositif expérimental utilisé pour les cinétiques

Le dispositif expérimental est une veine de séchage à convection forcée. Les paramètres de l'air de séchage (température, vitesse et humidité relative de l'air) sont contrôlés par un régulateur PID. La masse du produit est mesurée avec une précision de 0,001g. La température; l'humidité relative et la vitesse de l'air de séchage sont mesurées avec une précision de 0,5°C, 2% et 0,1 m/s respectivement. Les figures 2.3 et 2.4 montrent respectivement une photo et le schéma de la veine de séchage qui a servi aux essais.



Légende

- 1- Balance
- 2- Chambre de séchage
- 3- Camera infrarouge
- 4- Armoire électrique
- 5- Humidificateur
- 6- Régulateur
- 7- Ordinateur d'acquisition

Fig. 2.3 Photo de la veine séchage du département Trefle de l'I2M de Bordeaux.

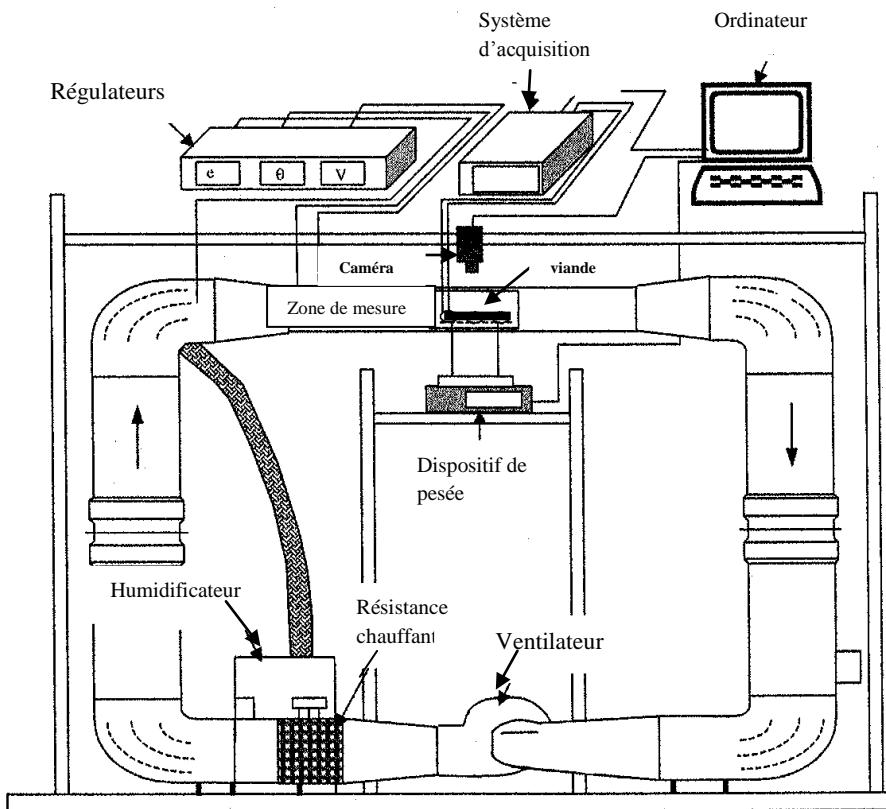


Fig. 2.4 Schéma du dispositif expérimental d'obtention des cinétiques (Jannot *et al.*, 2004).

2.1.2.2 Obtention des cinétiques de séchage et de la surface du produit : méthode

2.1.2.2.1 Préparation des échantillons

La viande de Bœuf utilisée est achetée aux bouchers grossistes du marché local de la ville de Bordeaux (France). Les parties du bœuf utilisées sont les muscles des cuisses arrières. La viande fraîche est d'abord débarrassée des tendons et matières grasses avant d'être découpée en lanière d'épaisseur 3mm. Les dimensions des échantillons sont mesurées par un pied à coulisse de précision 1/50^{ème} de mm. Les masses des échantillons sont pesées par une balance de précision 0,001 g.

2.1.2.2.2 Conditions et procédures expérimentales des cinétiques de séchage

Trois paramètres de séchage ont été considérés pour les expériences: la température (T), la vitesse d'air (V) et l'humidité relative (HR) de l'air. Ainsi, sept conditions expérimentales (Tableau 2), proches de celles rencontrées dans les processus de séchage solaire des pays tropicaux, ont été explorées ; chaque expérience a été dupliquée.

Tableau 2.2: Conditions expérimentales des cinétiques de séchage

N° essai	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	W_{iniale} (Kge/kgms)	W_{finale} (Kge/kgm s)	Weq (Kge/kgms)
1	40	25	0,33	2,75	0,17	0,081
2	50	25	0,33	2,65	0,14	0,067
3	60	25	0,33	2,67	0,07	0,038
4	50	25	0,66	2,70	0,10	0,067
5	50	25	1	2,64	0,09	0,067
6	50	50	1	2,64	0,17	0,108
7	50	65	1	2,64	0,2	0,157

Une fois les échantillons de viande préparés et les conditions de séchage réglées, le produit est placé sur une grille en une seule couche et introduit dans la chambre de séchage en position horizontale, parallèlement au sens de l'écoulement de l'air (Fig. 2.4 et 2.5). La masse du produit est mesurée automatiquement toutes les 30 secondes pendant une durée de séchage d'environ 24 heures qui permet d'avoir un produit final dont la teneur en eau est comprise dans l'intervalle 10%-20% (base sèche) c'est-à-dire une teneur en eau correspondant au produit fini traditionnel (Kalilou *et al.*, 1998). Après séchage, le produit est envoyé à l'étuve à 103°C pendant 48 heures, afin de déterminer sa masse sèche et calculer la teneur en eau en utilisant l'équation (2.12).

$$W = \left(\frac{m_t - m_s}{m_s} \right) \quad (2.12)$$

où m_s désigne la masse sèche du produit (kg), m_t représente la masse de l'échantillon à l'instant t du séchage (kg) et W la teneur en eau du produit à l'instant t du séchage (kg eau/kg matière sèche).

La teneur en eau réduite W_r est calculée par la formule (1.42) donnée au paragraphe 1.7.2.2 du chapitre 1.

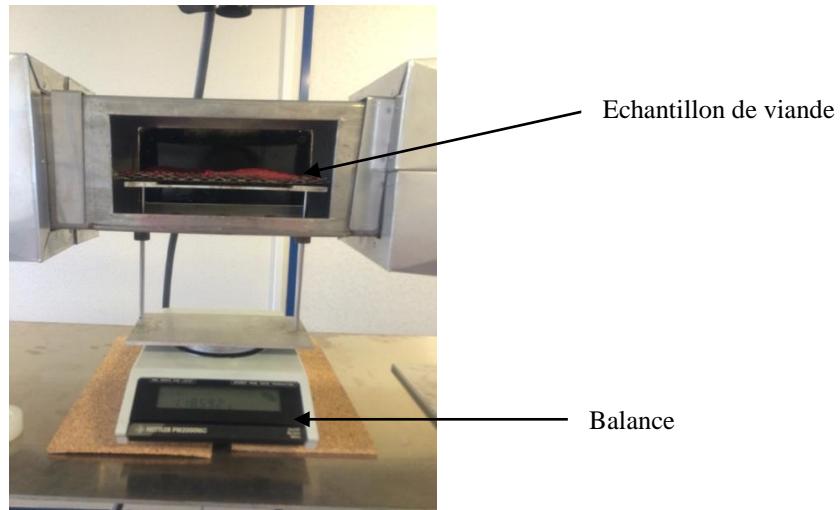


Fig. 2.5 Photo d'un échantillon de viande placé dans le séchoir.

2.1.2.2.3 Détermination de la surface du produit

Pour déterminer la surface des échantillons, nous avons utilisé une méthode numérique basée sur le traitement d'image. Une caméra infrarouge est placée au dessus de la chambre de séchage (cf. Fig. 2.4) et filme l'échantillon de viande au cours du séchage toutes les 15 minutes. Les images sont par la suite traitées grâce au logiciel libre de traitement d'image « ImageJ » (ImageJ, 2014) pour déterminer l'air de la surface du produit. Un paramétrage du logiciel a été effectué au préalable sur un morceau de viande de dimensions connues (5cmx5cm). Les mesures des surfaces (répétées 3 fois) obtenues avec le logiciel donnent une précision de $\pm 1,5\%$.

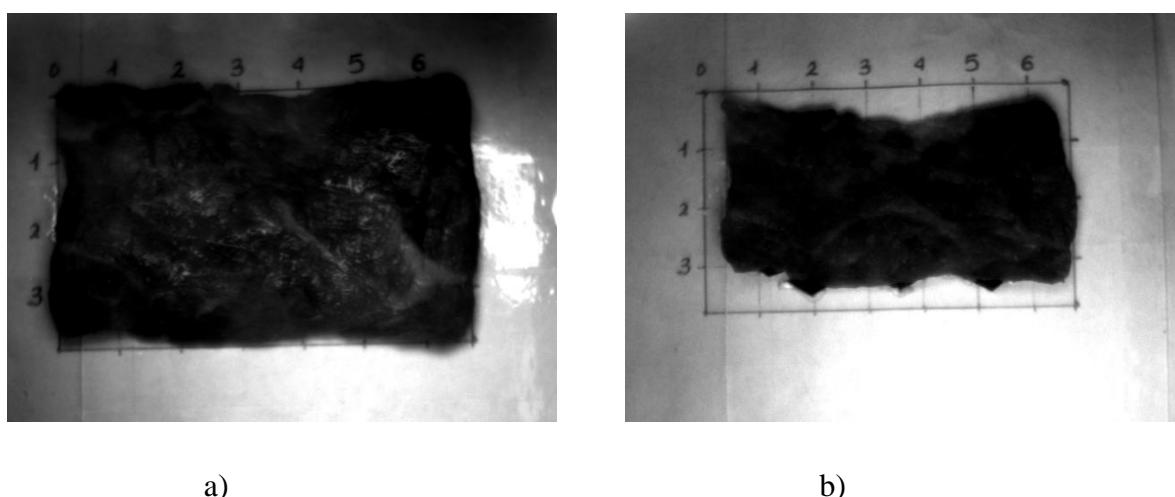


Fig. 2.6 Images de la viande filmée par la caméra infra rouge du séchoir convectif. a) avant séchage, b) produit séché.

2.1.2.2.4 Calcul du flux masse

Le flux de masse à l'interface air/produit est calculé par l'équation (2.13).

$$F_m = -\frac{\rho_s}{\alpha_s} \frac{dW}{dt} \quad (\text{kg.m}^2.\text{s}^{-1}) \quad (2.13)$$

où ρ_s désigne la masse volumique apparente du produit sec qui est égale au rapport entre la masse du produit sec et le volume du produit sec ($\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$) (Eq. (2.14)) et α désigne la compacité du produit qui représente le rapport entre la surface d'échange du produit avec l'air séchant et son volume :

$$\alpha = \frac{S}{V} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2.15)$$

Le volume V du produit s'écrit:

$$V = S * e_p \quad (2.16)$$

L'épaisseur du produit (viande) e_p ne variant pas, ou de façon négligeable, au cours du séchage, la compacité du produit $\alpha = \frac{S}{V} = \frac{1}{e_p}$ est constante et égale à $\frac{S_s}{V_s}$.

Dans les équations précédentes m_s , V_s , S_s désignent respectivement la masse et le volume et la surface du produit sec et V , S , e_p désignent respectivement le volume, la surface et l'épaisseur du produit au cours du séchage. W désigne la teneur en eau (base sèche) du produit au cours du séchage.

Ainsi, les équations 2.14, 2.15 et 2.16 amènent à l'expression suivante du flux masse :

$$F_m = -\frac{m_s}{S_s} \frac{dW}{dt} \quad (2.17)$$

La surface du produit sec est déterminée suivant la méthode de traitement des images du produit décrite précédemment et la variation de la teneur en eau, entre deux prises de mesures de masse du produit $m(t)$, est estimée par les expressions suivantes :

Avec:

$$\frac{dW}{dt} = \left[\frac{W_1 - W_0}{t_1 - t_0} \right] \text{ à l'instant initial } t_0 \quad (2.18)$$

$$\frac{dW}{dt} = \left[\frac{W_n - W_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right] \text{ à l'instant } t_n \text{ de fin du séchage} \quad (2.19)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \left[\frac{W_i - W_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} + \frac{W_{i+1} - W_i}{t_{i+1} - t_i} \right] \text{ à l'instant } t_i \text{ pour } i \text{ compris entre 1 et } n-1 \quad (2.20)$$

où W_0 désigne la teneur en eau initiale à l'instant t_0 , W_1 la teneur en eau à l'instant t_1 , W_i la teneur en eau du produit à un instant t_i du séchage, W_n la teneur en eau de fin de séchage et n le nombre de points de mesures.

2.1.2.2.5 Méthodes de détermination des paramètres des modèles et outils de comparaison

Les modèles de cinétiques de séchage les plus utilisés pour décrire les cinétiques de séchage des produits alimentaires ont été testé pour prédire le comportement de la viande de bœuf au cours du séchage. Il s'agit du modèle diffusif (Eq. (1.31)), des modèles semi-empiriques (Eqs. (1.32)-Eq.(1.41)), de la méthode de Courbe Caractéristique de Séchage (Eqs. (1.43)-(1.49)) et de la méthode du flux masse isenthalpe (Eqs. (1.50)-(1.52)) (cf. paragraphe 1.7.2 du chapitre 1). Les paramètres des modèles sont déterminés en utilisant la méthode de Newton décrite au paragraphe 2.1.1.3 pour minimiser la somme des erreurs quadratiques entre les teneurs en eau obtenues expérimentalement (W_{exp}) et celles obtenues par les modèles (W_{mod}).

Trois outils statistiques ont été utilisés comme critères d'évaluation du niveau de précision d'un modèle: la racine carrée des erreurs moyennes quadratiques ($RMSE$, de l'anglais Root Mean Square Error) (Eq. (2.21)), le chi-2 (χ^2) réduit (Eq. (2.22)) et l'efficacité (EF) (Eq. (2.23)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_1^n \left(\frac{W_{exp} - W_{mod}}{W_{exp}} \right)_i^2 \right]} * 100 \quad (2.21)$$

où n désigne le nombre de points de mesures au cours d'un essai,

$$\chi^2 = \frac{\sum_1^n (W_{exp} - W_{mod})_i^2}{n - N} \quad (2.22)$$

où N désigne le nombre de constantes du modèle,

$$EF = \frac{\sum_1^n (W_{exp} - W_{exp,moy})_i^2 - \sum_1^n (W_{exp} - W_{mod})_i^2}{\sum_1^n (W_{exp} - W_{exp,moy})_i^2} \quad (2.23)$$

où $W_{exp,moy}$ est la moyenne des teneurs en eau expérimentales W_{exp} .

Ces grandeurs ont été utilisées par certains auteurs pour faire une comparaison entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par les modèles de cinétiques (Hankan et Can, 2005; Doymaz, 2012). Le *RMSE* donne l'écart entre les valeurs expérimentales et modélisées et sa valeur est comprise entre 0% (aucun écart entre W_{exp} et W_{mod}) et 100% (W_{mod} ne correspondent pas du tout aux W_{exp}). S'il s'avère que 2 modèles ont presque les mêmes valeurs de *RMSE*, le test de χ^2 , permettra de choisir le modèle qui convient le mieux. Le modèle qui a la plus petite valeur de χ^2 , donne une meilleure description des valeurs expérimentales. Si deux modèles ont sensiblement les mêmes valeurs *RMSE* et χ^2 , alors on compare leurs efficacités (*EF*). Les valeurs de (*EF*) varient de 1 (modèle très efficace) à 0 (modèle pas du tout efficace).

En définitive, le modèle qui donne les plus petites valeurs de *RMSE* et de χ^2 , et la plus grande valeur de *EF* sera choisi pour décrire les cinétiques de séchage.

2.2 Résultats et discussion

2.2.1 Etude des isothermes de désorption de la viande de bœuf

2.2.1.1 Détermination expérimentale des isothermes de désorption

La composition moyenne des échantillons de viande de bœuf utilisés pour les isothermes de désorption est donnée dans le tableau 2.3. Les valeurs obtenues sont proches de celles de certains auteurs (Kabil *et al.*, 2012; Ockerman, 1985).

Tableau 2.3: Composition de la viande

Teneur en eau moyenne % (base humide)	Teneur en eau moyenne (%) base sèche)	Teneur en matière grasse (%) base sèche)	Teneur en protéine (%) base sèche)	Teneur en cendre (% base sèche)	PH
75,70±0,2	305,89±1,2	4,3±0,3	22,2±0,5	1,02±0,1	5,6±0,1

La figure 2.7 représente l'évolution de la teneur en eau d'équilibre (W_{eq}) de la viande de bœuf fraîche, en fonction de l'activité d'eau (a_w), pour différentes températures (30°C, 40°C et 50°C) : ces isothermes sont de type II (forme sigmoidale), d'après la classification de Brunauer *et al.* (Brunauer *et al.*, 1940). On note de façon générale que les isothermes obtenues à des températures plus élevées sont en dessous de celles obtenues à des températures plus faibles. Autrement dit, pour une activité d'eau donnée, la teneur en eau d'équilibre de la viande diminue lorsque la température augmente, ce qui corrobore les résultats obtenus par

beaucoup d'auteurs pour les produits à haute teneur en protéine (Singh *et al.*, 2001; Singh *et al.*, 2006; Delgado *et al.*, 2002). Notons ici que pour assurer la qualité microbiologique de la viande après le séchage, l'activité de l'eau doit être inférieure à 0,60 (Cheftel et Cheftel, 1977). Cette valeur d'activité correspond à des teneurs en eau d'équilibre comprises entre 0,25 (base sèche) et 0,15 (base sèche) (Fig. 2.7), pour des températures de l'air comprises entre 30° C et 50° C.

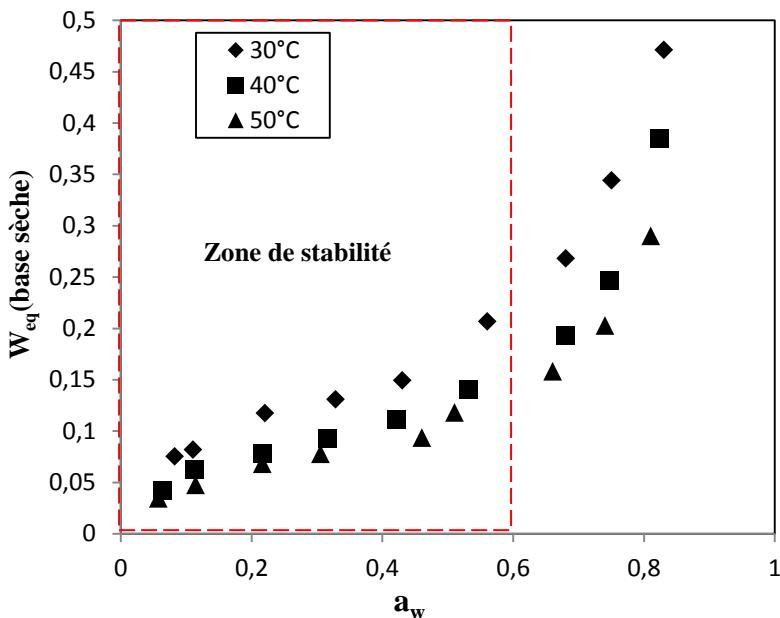


Fig. 2.7 Isotherme de désorption de la viande de bœuf (résultats expérimentaux): teneur en eau d'équilibre en fonction de l'activité d'eau pour différentes températures d'air.

2.2.1.2 Modélisation des isothermes de désorption

Les paramètres d'ajustement sur les résultats expérimentaux, les pourcentages de déviation P (Eq. (2.2)) et les coefficients de corrélation r^2 des trois modèles sélectionnés sont récapitulés dans le tableau 2.4. Pour les trois modèles, à savoir GAB, BET et Halsey, le pourcentage de déviation est inférieur à 10% quelle que soit la température considérée; ces trois modèles peuvent donc être utilisés pour modéliser les isothermes de désorption de la viande de bœuf (Brunauer *et al.*, 1940). Le modèle le plus adapté à la description de nos courbes expérimentales de sorption est le modèle GAB (pour lequel les valeurs de P en% à 30°C, 40°C et 50°C sont respectivement de 3,69; 1,97 et 5,46) suivi, dans l'ordre, par les modèles BET et Halsey. La figure 2.8 représente les points expérimentaux des isothermes de désorption à 30° C, 40° C et 50° C et leur description par les modèles BET, GAB et Halsey.

On remarque de façon générale une bonne adéquation entre les valeurs expérimentales et celles obtenues à partir de ces modèles.

Tableau 2.4 : Paramètres des modèles d'isothermes de désorption obtenus par ajustement sur les résultats expérimentaux

Modèle	Température (°C)	Paramètres						
		W ₀	C	K	a	b	P (%)	r ²
GAB	30	0,096	29,71	0,96	-	-	3,69	0,999
	40	0,069	23,92	0,98	-	-	1,97	0,997
	50	0,056	23,79	0,99	-	-	5,46	0,998
BET	30	0,088	46,39	-	-	-	6,15	0,997
	40	0,067	25,34	-	-	-	5,51	0,997
	50	0,056	24,12	-	-	-	5,57	0,998
Halsey	30	-	-	-	0,0602	1,4418	4,527	0,998
	40	-	-	-	0,0487	1,3170	7,807	0,993
	50	-	-	-	0,03951	1,3032	7,188	0,996

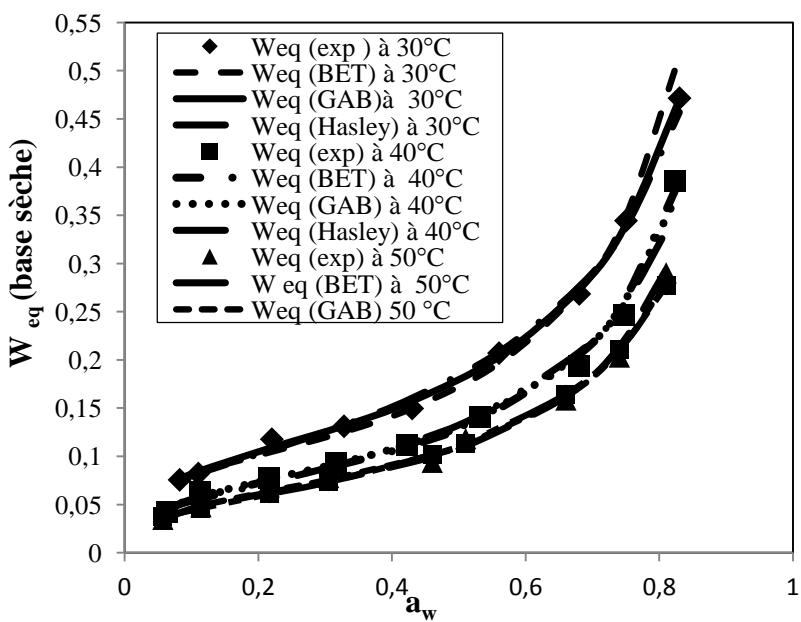


Fig. 2.8 Valeurs expérimentales et modélisées (BET, GAB et Halsey) des isothermes de désorption de la viande de bœuf.

L'efficacité du modèle de GAB à décrire les courbes expérimentales de désorption de la viande de bœuf peut être confirmée en traçant les résidus (Eq. (2.3)) pour toute température d'air et activité de l'eau explorée. Ceux-ci sont tous inférieurs à $\pm 10\%$ (Fig. 2.9). Ce résultat corrobore ceux obtenus par certains auteurs qui considèrent que le modèle GAB est le plus approprié pour modéliser les produits agroalimentaires (Trujillo *et al.*, 2003; Singh *et al.*, 2006). Contrairement à certains auteurs qui affirment que le modèle BET est plus efficace pour des activités d'eau comprises entre 0 et 0,45 (Aktas *et al.*, 2005; Labuza *et al.*, 1985), nous pouvons constater que pour la viande de bœuf la précision du modèle de BET n'est pas meilleure que celle du modèle de GAB quelle que soit la plage d'activité d'eau considérée (Fig. 2.10). Par contre, le modèle Halsey a montré une meilleure efficacité pour des activités d'eau comprises entre 0,4 et 0,8 (Fig. 2.11).

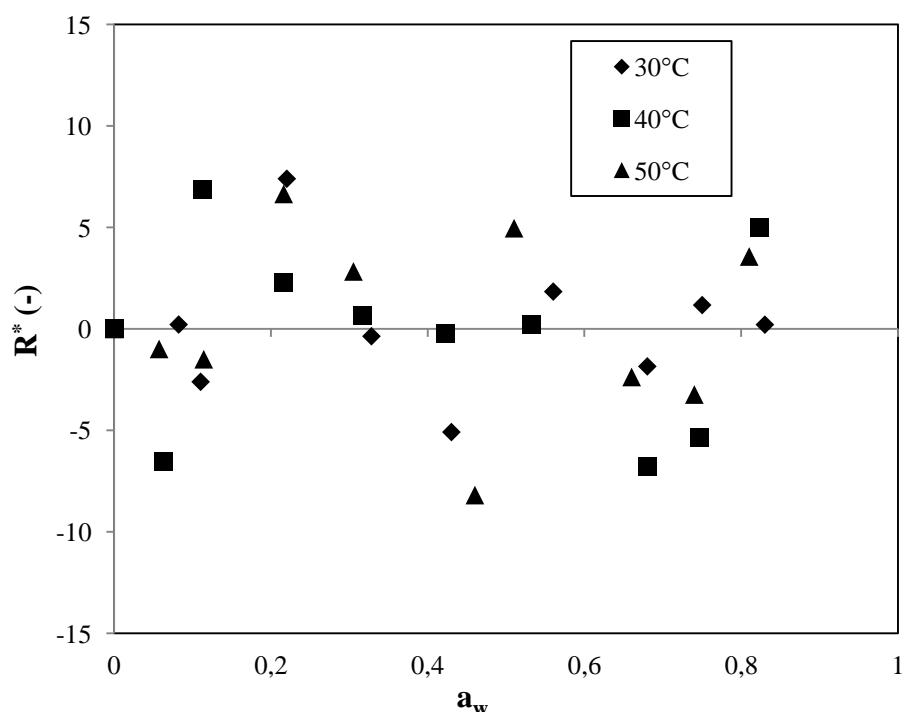


Fig. 2.9 Résidus (Eq. (2.3)) des teneurs en eau d'équilibre entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par le modèle GAB.

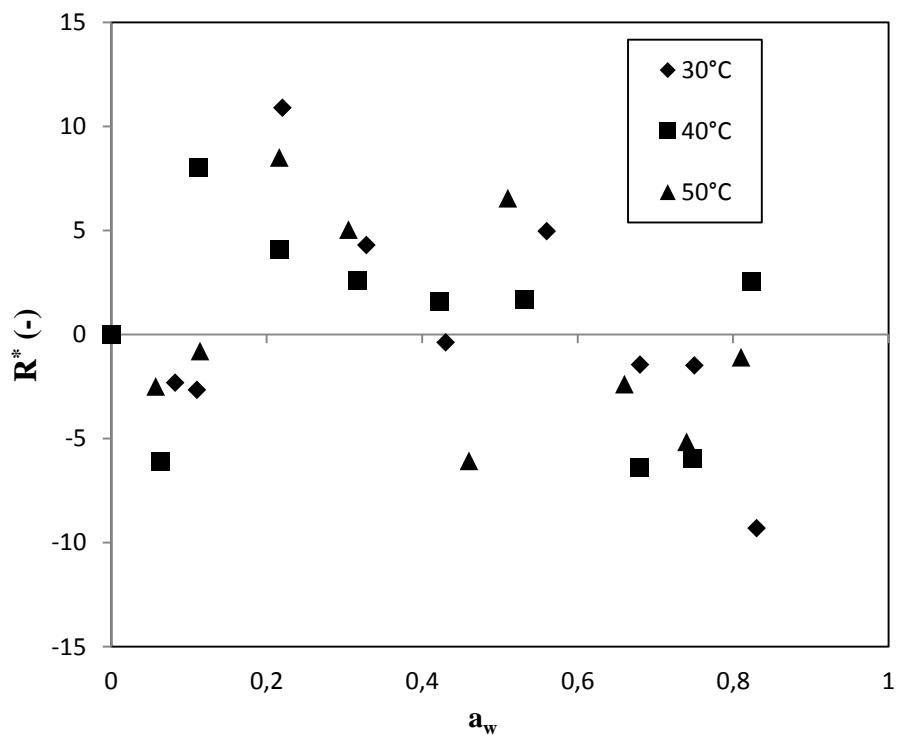


Fig. 2.10 Résidus (Eq. (2.3)) des teneurs en eau d'équilibre entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par le modèle BET.

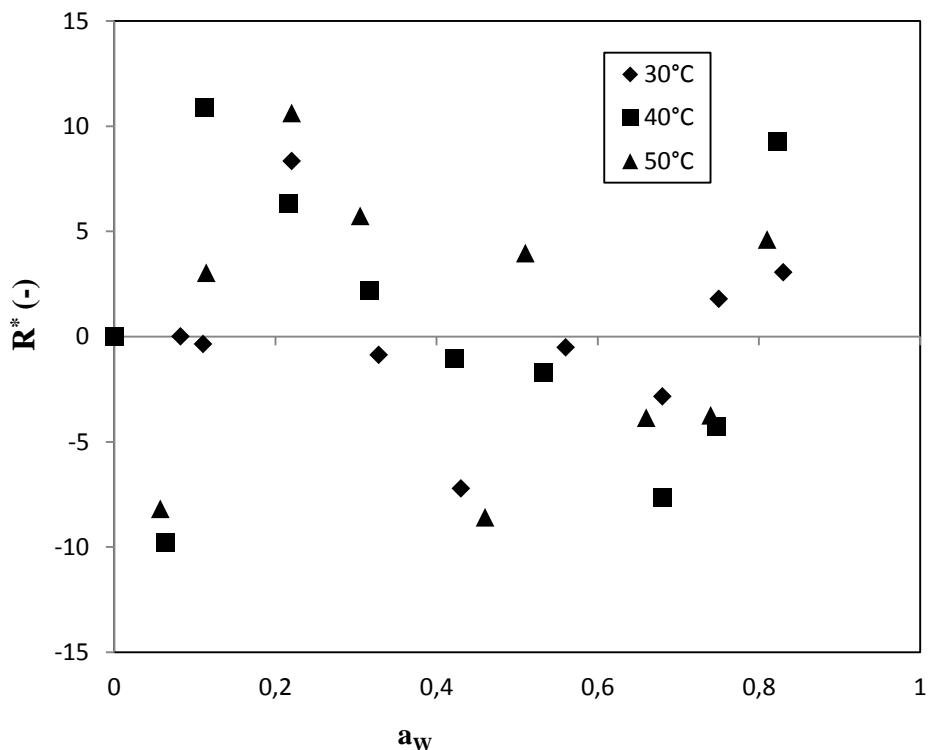


Fig. 2.11 Résidus (Eq. (2.3)) des teneurs en eau d'équilibre entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par le modèle de Halsey.

On peut remarquer que pour toutes les températures, la teneur en eau de la monocouche W_0 obtenue à partir du modèle GAB est légèrement supérieure ou égale à celle obtenue par le modèle BET, alors que la constante d'énergie C obtenue du modèle GAB est inférieure à celle obtenue du modèle BET (Tableau 2.4). Les mêmes observations ont été faites par plusieurs auteurs (Timmermann *et al.*, 2001; Duras et Hiver, 1993). La teneur en eau de la monocouche obtenue à partir du modèle de GAB à 40 °C ($W_0=0,0624$) est supérieure à celle obtenue par Trujillo *et al.* en 2003 ($W_0=0,0527$). Cette différence peut s'expliquer par la méthode utilisée par ces auteurs qui consiste à accélérer la mise en équilibre de désorption de leurs échantillons en utilisant pour la première étape du processus de désorption, un sel dont l'activité de l'eau est très faible, tel que suggéré par Delgado et Sun (Delgado et Sun, 2002b). Dans les deux modèles (GAB et BET), la teneur en eau de la monocouche diminue lorsque la température augmente (Tableau 2.4). Ce résultat est conforme à celui obtenu sur la plupart des produits agroalimentaires (Singh *et al.*, 2006; Delgado et Sun, 2002a; Singh *et al.*, 2001).

En ce qui concerne l'eau contenue dans la multicouche, c'est-à-dire l'eau associée aux molécules voisines par des liaisons eau-eau ou eau-substrat solide, celle-ci est caractérisée par la constante de l'énergie du GAB, K (cf. Tableau 1.6, paragraphe 1.6.2 du chapitre1), dont la valeur varie entre 0 et 1. Une valeur élevée de K indique que l'eau dans la zone multicouche est bien structurée et pas fortement liée; une faible valeur de K indique que l'eau n'est pas du tout congelable et moins fortement liée (Timmermann *et al.*, 2001). Pour la viande de bœuf, cette valeur varie entre 0,96 et 0,99 dans une plage de température de 30-50 °C (cf. Tableau 2.4); ce résultat est en accord avec celui obtenu par Trujillo *et al.* en 2003. On notera que pour le modèle Halsey, la valeur du paramètre b est dans la gamme de 1,30 à 1,44 et diminue quand la température augmente (cf. Tableau 2.4); cela indique que l'interaction entre les molécules d'eau et la matière solide diminue lorsque la température de l'air augmente. Ce résultat corrobore ceux obtenus pour d'autres types de viande (Singh *et al.*, 2006 et 2001).

2.2.1.3 Dépendance en température des paramètres du modèle de GAB

L'analyse de la modélisation des isothermes de désorption a permis de montrer que le modèle GAB est plus adapté pour prédire les isothermes de désorption de la viande de bœuf. Cette équation de GAB a souvent été utilisée pour étudier l'effet de la température sur la teneur en eau de la monocouche. Les valeurs des paramètres intervenant dans ce modèle (W_0 , C et K) ont été obtenues pour des valeurs discrètes de la température 30°C, 40°C et 50°C par ajustement sur les résultats expérimentaux (cf. Tableau 2.4). Les inconnues W_0' , C' , K' , ΔH , H_I , H_L et H_m , apparaissant dans ces équations ont été obtenues par ajustement sur les

identifications des paramètres W_0 , C et K obtenues pour chacune des 3 températures (30°C, 40°C et 50°C). Ceci amène à la description suivante :

$$W_0(T) = 1.93 \cdot 10^{-5} e^{21393,4/RT} \quad (2.24)$$

$$C(T) = 0.125 e^{13738,54/RT} \quad (2.25)$$

$$K(T) = 1.35 e^{-835,13/RT} \quad (2.26)$$

2.2.1.4 Chaleur isostérique de désorption de la viande de bœuf

Les valeurs des teneurs en eau d'équilibre que nous avons obtenues expérimentalement pour différentes températures sont toutes inférieures à 0,5 (base sèche) (Fig. 2.7); pour cette raison, ces courbes expérimentales ont été utilisées pour déterminer la chaleur isostérique (Eq. (2.11)), uniquement pour les valeurs des teneurs en eau d'équilibre dans la plage de 0,1-0,5 (base sèche). Des valeurs de teneurs en eau d'équilibre complémentaire, non expérimentales, supérieures à 0,5 (base sèche) ont été obtenues par extrapolation en utilisant le modèle GAB dont les paramètres ont été identifiés dans le paragraphe précédent. Les courbes de désorption expérimentales et leur extrapolation, par le modèle de GAB, ont été utilisées pour tracer les courbes des isostères de désorption [-ln a_w = f(1/T)] (Fig. 2.12). La pente Q_{sn}/R de ces isostères (Eq. (2.11)), obtenue par régression linéaire, est une fonction croissante de la teneur en eau d'équilibre. La chaleur isostérique nette de désorption Q_{sn} correspondant est présentée sur la figure 2.13.

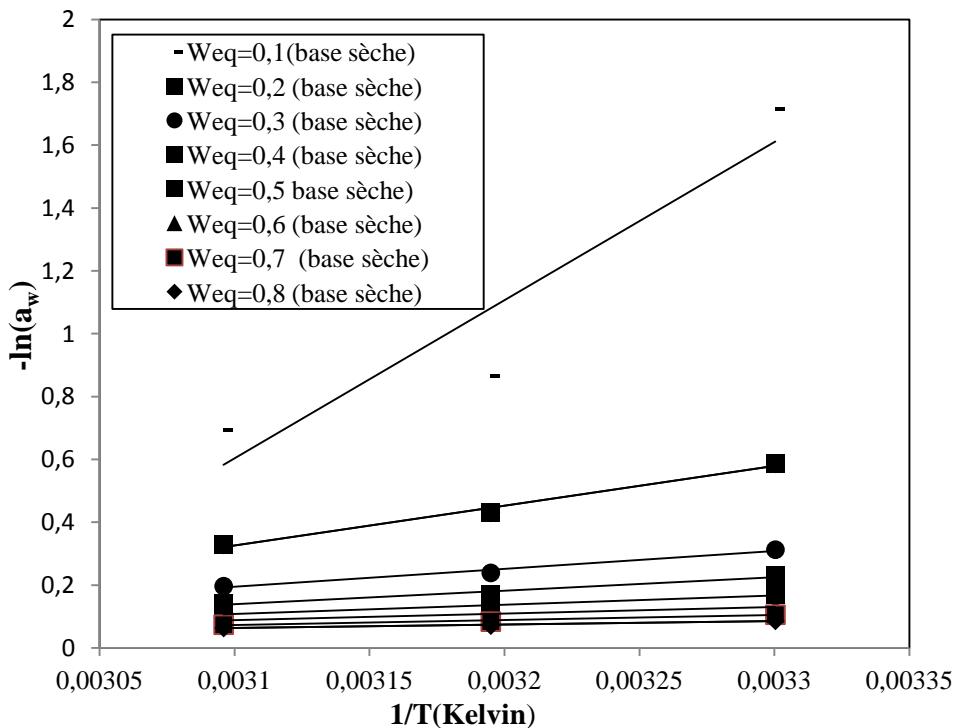


Fig. 2.12 Isostères de désorption de la viande de bœuf en fonction de la température [$-ln a_w = f(1/T)$], pour différentes teneur en eau.

Cette figure 2.13 montre que la chaleur isostérique de désorption décroît lorsque la teneur en eau d'équilibre augmente. Pour les petites valeurs de la teneur en eau (moins de 0,2 (base sèche)), cette baisse est très rapide; puis la chaleur isostérique tend asymptotiquement vers la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure (2401 kJ/kg). Ceci montre que pendant le séchage, l'énergie à apporter pour enlever les dernières traces d'eau est importante. Ces résultats corroborent ceux généralement observés pour la plupart des produits agroalimentaires (Clemente *et al.*, 2009; Delgado *et al.*, 2002a; Igbeka *et al.*, 1982). La connaissance de la chaleur isostérique de désorption est donc très importante pour une bonne conception des équipements de séchage. En effet, par exemple, il s'avère que pour atteindre les valeurs d'activités d'eau permettant d'assurer la stabilité de la viande de bœuf ($a_w < 0,6$), c'est-à-dire des valeurs de teneur en eau d'équilibre entre 0,15 (base sèche) et 0,25 (base sèche) selon la température de l'air séchant (Cf. Fig. 2.7), une énergie d'eau moins 3000kJ/kg est nécessaire, ce qui représente une quantité d'énergie qui est supérieure à la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure d'environ 25%.

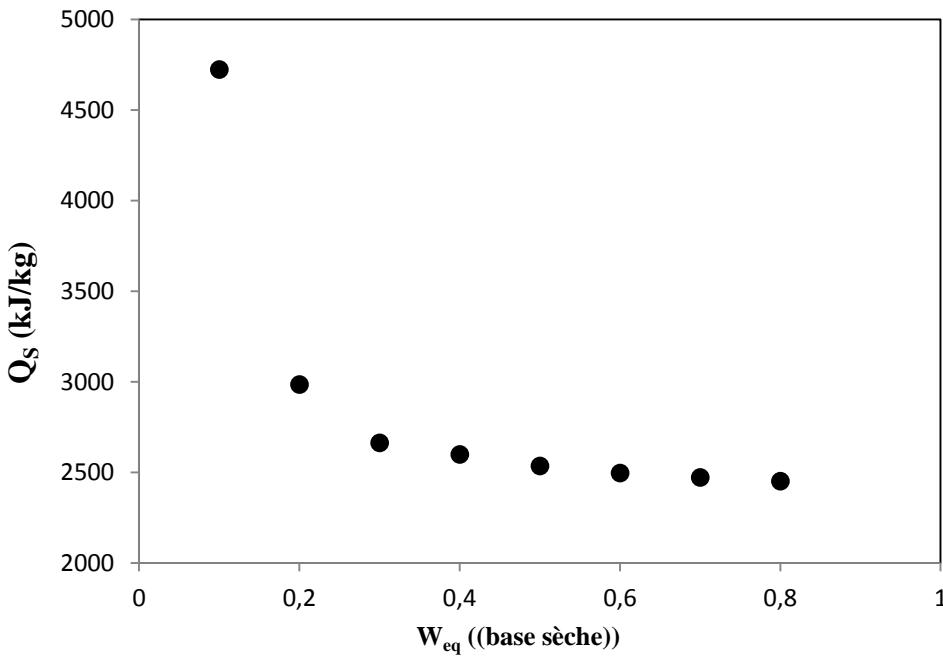


Fig. 2.13 Chaleur isostérique de désorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

2.2.1.5 Propriétés de l'eau liée

Les propriétés de l'eau liée ont été déterminées à 30 °C, 40 °C et 50 °C (Tableau 2.5). Les courbes linéaires de Caurie (cf. Eq. (2.4)) à 30 °C, 40 °C et 50 °C sont présentées sur la figure 2.14. L'influence de la température sur les pentes de ces courbes est nette: ces pentes augmentent avec la température. Or, ces pentes sont inversement proportionnelles au nombre de sites d'adsorption N sur la surface du produit (cf. Eq. (2.4)). Ainsi, le nombre de sites d'adsorption N diminue avec la température (Tableau 2.5). Les mêmes observations ont été faites par Singh *et al.* (Singh *et al.*, 2006) pour la viande de chèvre ; ils ont expliqué ce comportement par la dégradation des protéines au cours du séchage. Connaissant les pentes des courbes de Caurie, on peut calculer l'aire de la surface d'adsorption A en utilisant l'équation (2.5). Cette surface de sorption décroît avec la température (Tableau 2.5). Ceci indique que la disponibilité des surfaces spécifiques aux liaisons hydrophiles décroît avec l'augmentation de la température. La densité de l'eau liée ainsi que son pourcentage (cf. Eq. (2.6)) diminue lorsque la température augmente (Tableau 2.5). Avec des densités comprises entre 1,8 g/cm³ et 2 g/cm³, l'eau liée est presque deux fois plus dense que l'eau pure. Les mêmes observations ont été faites par Singh *et al.* (Singh *et al.*, 2001 et 2006) sur la saucisse de poulet fumé et la viande de chèvre fraîche. Cette valeur élevée de la densité peut éventuellement être expliquée par la présence des fortes liaisons entre les molécules d'eau et les groupes hydrophile des protéines ; ces fortes liaisons ont pour répercussion une enthalpie

de vaporisation de l'eau liée nettement supérieure à l'enthalpie de vaporisation de l'eau pure (2401kJ/kg). Les distances intermoléculaires sont plus petites que celles de l'eau pure et par conséquent les forces intermoléculaires deviennent plus grandes, conduisant à des hautes valeurs de la densité (Singh *et al.*, 2001). L'augmentation de la température réduit les forces intermoléculaires, diminuant ainsi la densité de l'eau liée.

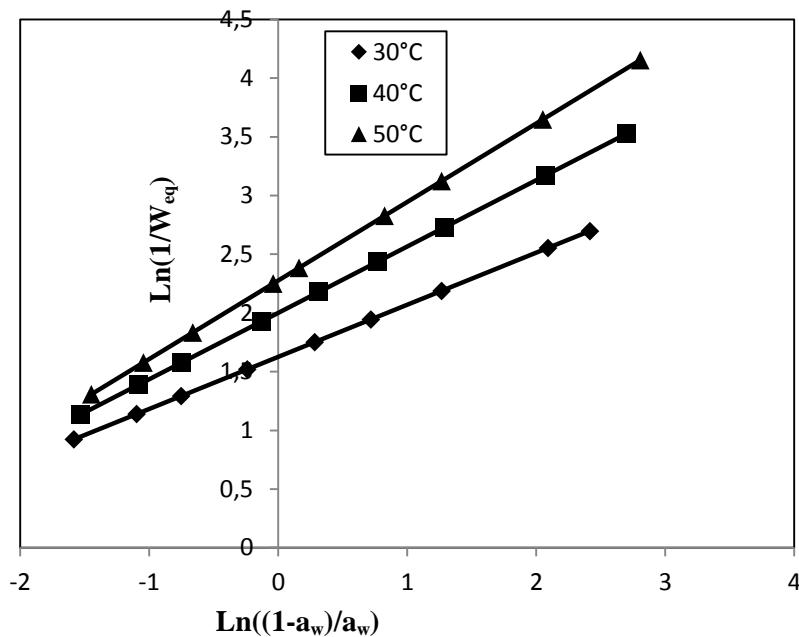


Fig. 2.14 Courbes linéaires de Caurie (Caurie, 1981) à différentes températures.

Tableau 2.5: Propriétés de l'eau liée dans la viande de bœuf pour différentes températures

Température (°C)	Teneur en eau de la monocouche W_0 (base sèche)	Pente de Caurie $2/N$	Nombre de monocouches adsorbées N	Densité de l'eau liée (g/cm ³)	% d'eau liée	Surface de sorption (m ² /g)
30	0,0908	0,443	4,51	2	40	123,11
40	0,0624	0,564	3,54	1,9	24	96,7
50	0,0532	0,668	2,99	1,8	16,4	81,64

2.2.1.6. Taille des pores de la viande de bœuf

La taille des pores de la viande de boeuf a été obtenue en utilisant les équations (2.7)-(2.9). La taille des pores varie de 4,03 Å à 12,64 Å en fonction de la teneur en eau d'équilibre et de la température de désorption. De façon générale, les pores s'élargissent avec l'augmentation de la teneur en eau d'équilibre et la température de sorption (Tableau 2.6). Pour les températures et teneur en eau d'équilibre de l'étude, la taille moyenne des pores de la viande de bœuf est inférieure à 13 Å. La viande peut donc être considérée comme un matériau

microporeux dans cette gamme de teneurs en eau et de température selon la classification de l'IUPAC (International Union of Pure Applied Chemistry). De façon, équivalente, Singh *et al.* (Singh *et al.*, 2006) ont étudié l'effet de la température sur la taille des pores de la viande de chèvre et ils ont obtenu des valeurs comprises entre 5,11 Å et 13,15 Å. Ils ont également observé que la taille des pores augmente avec l'augmentation de la température de sorption et la teneur en eau d'équilibre.

Tableau 2.6: Taille moyenne des pores (en Angströms) de la viande de bœuf à différentes températures

Teneur en eau d'équilibre (base sèche)	Température (°C)		
	30	40	50
0,05	4,03	4,43	4,75
0,1	5,06	6,03	6,63
0,15	6,28	7,29	7,92
0,2	7,23	8,25	8,89
0,25	8,01	9,05	9,71
0,3	8,69	9,75	10,41
0,35	9,31	10,38	11,04
0,4	9,87	10,95	11,61
0,45	10,41	11,49	12,14
0,5	10,91	11,66	12,64

2.2.2 Détermination expérimentale et modélisation des cinétiques de séchage

2.2.2.1 Influence des paramètres de l'air sur les cinétiques de séchage de la viande de bœuf

La figure 2.15 montre l'évolution de la teneur en eau W de la viande de bœuf en fonction du temps t, pour trois valeurs de température d'air (40 °C, 50 °C et 60 °C). Les essais ont été menés à une vitesse d'air de 0,33 m/s et une humidité relative de 25%. Il se dégage de cette courbe que la teneur en eau du produit à un instant donné du séchage diminue lorsque la température de l'air augmente. Ce qui se traduit également au niveau de la vitesse de séchage par une augmentation de celle-ci avec la température (Fig. 2.16). Deux phases de séchage ont par ailleurs été identifiées au cours du séchage (Fig. 2.16): une première phase courte, de vitesse de séchage constante appelée phase isenthalpe et une deuxième phase de vitesse de séchage décroissante. Ce résultat corrobore les résultats obtenus par certaines études menées sur les cinétiques de séchage de minces lamelles de viande de bœuf (Musonge *et al.*, 1993; Igène *et al.*, 1990). Les figures 2.15 et 2.16 mettent en évidence un impact significatif de la

température sur les cinétiques de séchage de la viande. Cela suggère que le phénomène de croutage est négligeable dans cette gamme de température.

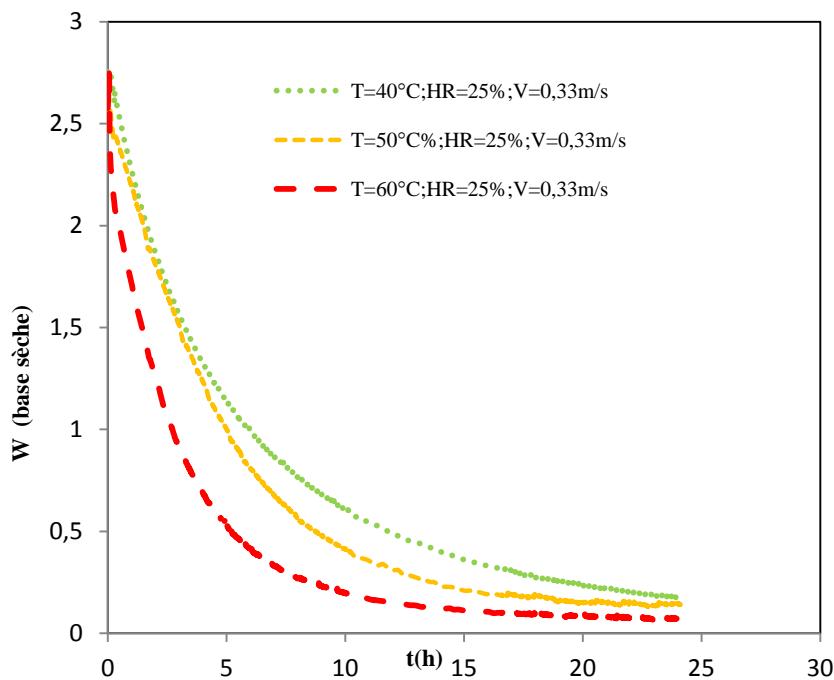


Fig. 2.15 Evolution de la teneur en eau expérimentale W de la viande de bœuf en fonction du temps t : influence de la température de l'air séchant.

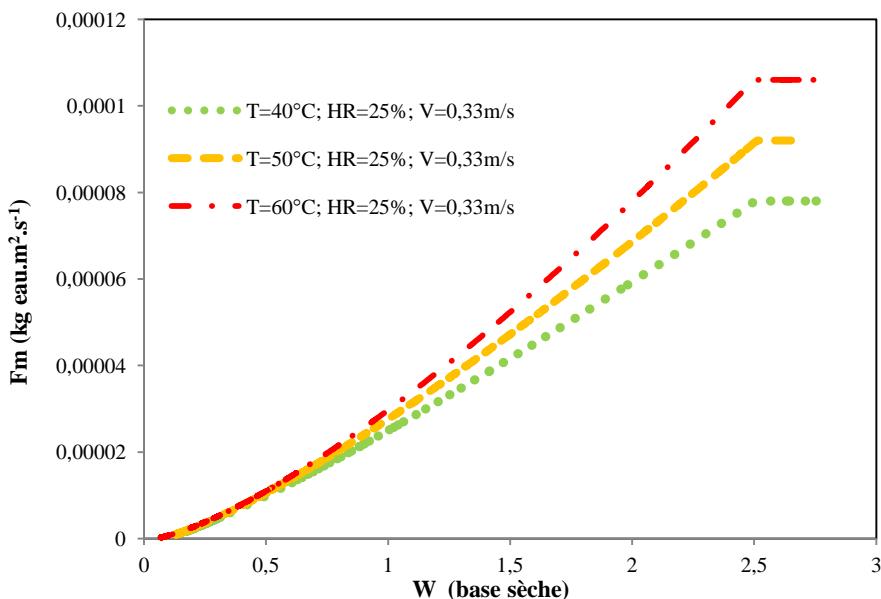


Fig. 2.16 Evolution du flux-masse F_m de séchage de la viande de bœuf en fonction de la teneur en eau W : influence de la température de l'air séchant.

La figure 2.17 montre l'évolution de la teneur en eau W de la viande de bœuf en fonction du temps t , pour trois valeurs de vitesse de l'air ($0,33 \text{ m/s}$; $0,66 \text{ m/s}$ et 1 m/s). Les essais ont été menés à une température de 50°C et une humidité relative de 25% . La teneur en eau du produit à un instant donné du séchage diminue faiblement lorsque la vitesse l'air augmente. Ce qui a pour conséquence une faible augmentation de la vitesse d'air de séchage lorsque la vitesse augmente (Fig. 2.18). Il se dégage des figures 2.17 et 2.18 que l'influence de la vitesse de l'air sur les cinétiques de séchage est relativement faible. Cela signifie que le processus de séchage est principalement régi par les résistances internes au transfert de masse dans cette gamme de paramètres de séchage. Ce résultat est en accord avec celui obtenu par Clemente *et al.*, (Clemente *et al.*, 2011) sur la viande de porc. On constate une diminution de la phase isenthalpe avec l'augmentation de la vitesse de l'air (Fig 2.18). Ce résultat expliquerait la divergence des résultats obtenus dans la littérature concernant l'existence d'une phase de vitesse de séchage constante au cours du séchage de la viande de boeuf. En effet, ceux qui ont menés des expériences de cinétiques à faible vitesse d'air (inférieure à 1m/s) ont pu observé cette phase (Musonge *et al.*, 1993; Igene *et al.*, 1990) contrairement à ceux qui ont mené les mêmes expériences mais à des vitesses d'air plus élevées (Kalilou *et al.*, 1998).

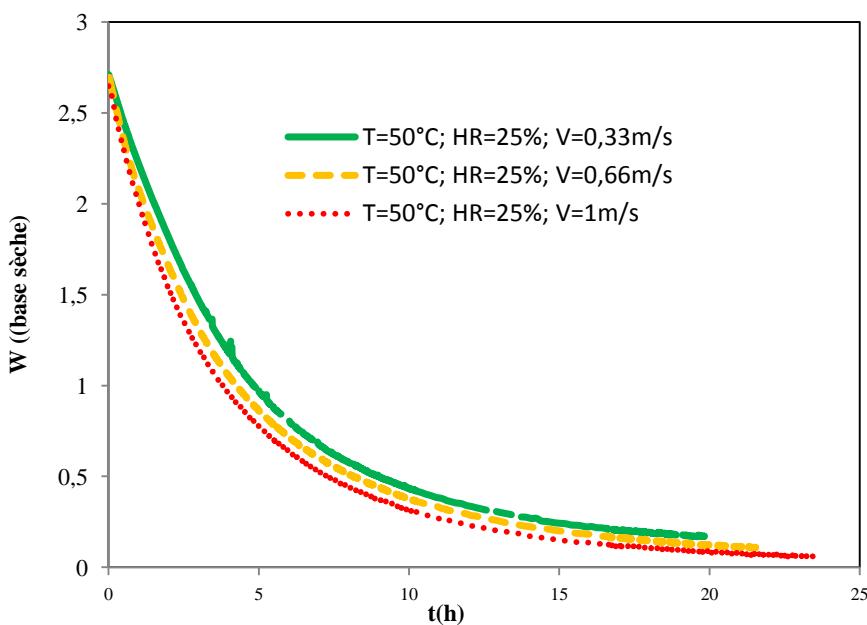


Fig. 2.17 Evolution de la teneur en eau expérimentale W en fonction du temps t à différentes vitesses d'air : influence de la vitesse de l'air séchant.

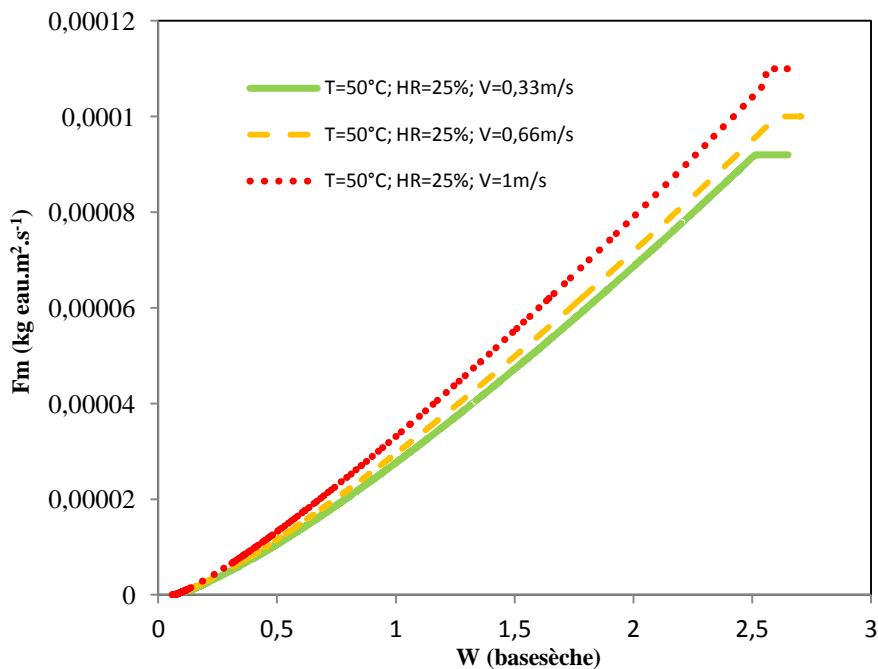


Fig. 2.18 Evolution du flux-masse F_m en fonction de la teneur en eau W : influence de la vitesse de l'air séchant

La figure 2.19 représente l'évolution de la teneur en eau W de la viande de bœuf en fonction du temps t pour trois valeurs d'humidité relatives de l'air (25%; 50% et 65%) pour une valeur de température de 50 °C et une vitesse de l'air de 1 m/s. L'augmentation de l'humidité relative a pour effet de ralentir la vitesse de séchage (Fig. 2.20). On remarque aussi que la phase isenthalpe devient de plus en plus évidente au fur et à mesure que l'humidité de l'air augmente. On peut donc aussi dire que les résistances externes aux transferts de matières sont négligeables dans cette plage d'humidité relative. Contrairement aux résultats obtenus par certaines études qui ont observé une faible influence de l'humidité relative sur les cinétiques de séchage (Simal *et al.*, 2003), nous constatons, dans notre cas, que l'humidité a une influence non négligeable sur les cinétiques de séchage.

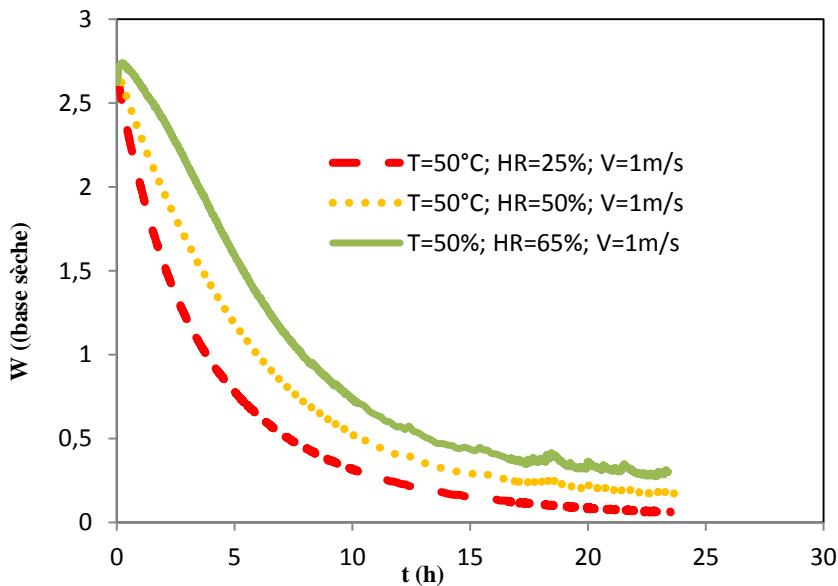


Fig. 2.19 Evolution de la teneur en eau expérimentale W en fonction du temps t à différentes humidités relatives.

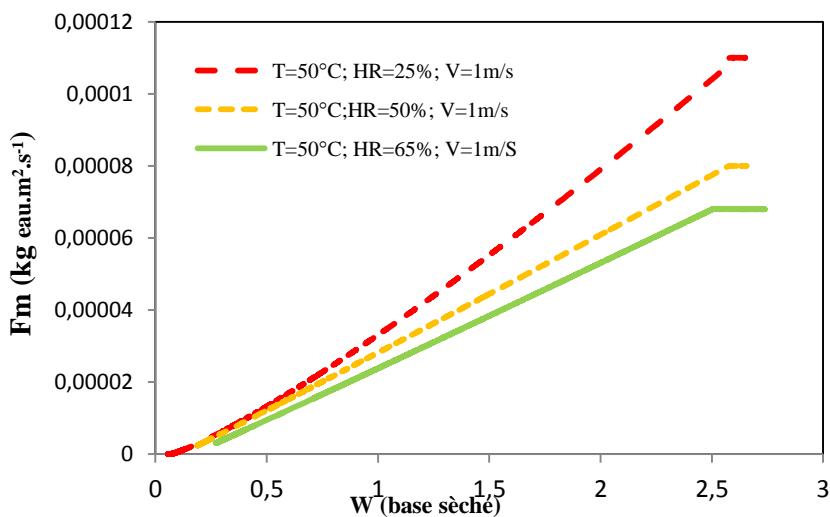


Fig. 2.20 Evolution du flux-masse F_m en fonction de la teneur en eau W : influence de l'humidité relative de l'air séchant.

2.2.2.2 Modélisation des cinétiques de séchage

2.2.2.2.1 Identification des paramètres intervenant dans les modèles de cinétiques utilisés

Les paramètres intervenant dans les différents modèles utilisés ont été déterminés par ajustement sur les valeurs expérimentales en utilisant la méthode décrite au paragraphe 2.1.2.2.5. La méthode de Courbe Caractéristique de Séchage (cf. paragraphe 1.7.2.3 du chapitre 1) s'est avérée inapplicable dans le cadre de cette étude compte tenu du fait qu'on n'a pas pu trouver une fonction unique $V_r=f(W_r)$ qui représente toutes les courbes de séchage pour toutes les conditions expérimentales. L'efficacité des autres modèles présentés au paragraphe

1.7.2 (cf. chapitre 1) a été estimée en utilisant les outils statistiques présentés au paragraphe 2.1.2.2.5, à savoir le RMSE, le χ^2 et l'efficacité EF. A titre d'illustration, le tableau 2.7 récapitule les paramètres des différents modèles ainsi que les valeurs du RMSE, du χ^2 et EF obtenus pour chacun des modèles, pour des températures d'air de 40°C, 50°C et 60°C et des humidités relatives et vitesses d'air fixées. Les résultats montrent que la méthode du flux masse isenthalpe, avec des valeurs de RMSE, χ^2 et EF comprises entre 3,04%-3,87%; 0,0005-0,0007 et 0,995-0,998 respectivement, est la plus précise pour la modélisation des isothermes de désorption de la viande dans cette plage de paramètres de séchage, suivi par le modèle Midilli *et al.*. Le modèle du flux masse isenthalpe s'est avéré plus efficace pour toutes les conditions expérimentales de cinétiques présentées au tableau 2.2. Il a donc été retenu pour prédire les cinétiques de séchage et une présentation complète de ce modèle est détaillée dans le paragraphe suivant.

Tableau 2.7: Paramètres et précisions des modèles de cinétiques utilisés (HR=25%, V=0,33m/s).

Modèle	T(°C)	Paramètres			RMSE	χ^2	EF
		Fmis*10 ⁴	β	W _{cri}			
Flux masse	40	0,78	1,17	2,5	0,081	3,04	0,0007
	50	0,92	1,25	2,5	0,067	3,87	0,0006
	60	1,06	1,35	2,45	0,038	3,85	0,0005
$D_x(\text{m}^2 \text{s}^{-1}) * 10^8$							
Modèle diffusif	40	6.70	-	-	-	18,60	0,0026
	50	8.58	-	-	-	14,14	0,0014
	60	9.49E	-	-	-	12,92	0,0135
Modèles semi-empiriques							
Logarithmique	a	b	k	h	n		
	40	0,739	0,006	0,13		17,88	0,005
	50	1,013	0,022	0,24		15,06	0,015
Newton	60	0,813	0,162	0,293		15,74	0,002
	40				0,145	14,64	0,0026
	50				0,173	23,95	0,0014
Page	60				0,2	12,95	0,0045
	40	-	-	0,249	-	0,814	0,0001
	50	-	-	0,310	-	0,791	0,0015
Henderson et papis	60	-	-	0,596	-	0,643	0,979
	40	0,799	-	0,132	-	-	0,967
	50	0,751	-	0,153	-	-	0,98
2 Termes	60	0,596	-	0,643	-	-	0,970
	40	18,54	-17,74	0,131	0,131	-	7,05
	50	19,10	-18,34	0,152	0,152	-	18,4
Exponentiel à 2 termes	60	20,03	-19,57	0,170	0,170	-	10,15
	40	-	-	0,146	-	-	21,86
	50	-	-	0,345	-	-	0,0025
Diffusion approximation	60	-	-	0,687	-	-	0,972
	40	5,459	0,146	0,999	-	-	14,636
	50	6,301	0,173	0,999	-	-	0,0025
Wang et Sing	60	1,276	0,374	1,614	-	-	0,980
	40	-0,091	0,002	-	-	-	14,625
	50	-0,095	0,002	-	-	-	0,0003
Verma <i>et al.</i>	60	-0,114	0,003	-	-	-	0,984
	40	18,81	-	0,146	0,146	-	38,13
	50	18,98	-	0,172	0,172	-	0,0144
Midilli <i>et al.</i>	60	23,04	-	0,259	0,259	-	0,784
	40	1,090	-0,0001	0,296	-	0,7580	0,0007
	50	1,024	0,0008	0,220	-	0,9789	0,996
	60	0,2449	0,1376	-0,198	-	6,893	0,0009
					-	4,950	0,994
					-	5,72	0,0008

2.2.2.2.2 Identification des paramètres expérimentaux du modèle du flux masse isenthalpe

Les paramètres expérimentaux du flux masse isenthalpe (F_{mis}) et la teneur en critique, (W_{cri}) ont été déterminés graphiquement des courbes expérimentales des flux masses (Fig. 2.16, 2.18 et 2.20). La connaissance des valeurs du flux masse isenthalpe (identifié à partir des phases isenthalpes des cinétiques de séchage obtenues expérimentalement), de la chaleur latente de vaporisation, des températures sèche et humide de l'air et des paramètres thermophysiques de l'air permettent de déduire les valeurs de coefficients de convection expérimentaux (h_{exp}) à partir de l'équation 1.51 (dans laquelle $\varphi=0$ car séchage purement convectif) (cf. paragraphe 1.7.2.4 du chapitre 1). La masse sèche (m_s) est mesurée après un étuvage à 105°C pendant 48 heures et la surface sèche est déterminée par la méthode décrite au paragraphe 2.1.2.2.3 à partir de plusieurs images de viande sèche.

Tableau 2.8: Paramètres expérimentaux du modèle du flux masse

Essai	T(°C)	HR (%)	V (m/s)	W_{eq} (kge/kg ms)	m_s/S_c (kg.m ⁻²)	W_{cri} (kge/kgms)	F_{mis} (kg/m ² /s ⁻¹)*10 ⁴	T _{zh} (°C)	h_{exp} (Wm ⁻² °C ⁻¹)	β
1	40	25	0,33	0,081	0,75	2,5	0,78	23,62	11,94	1,17
2	50	25	0,33	0,067	1,99	2,5	0,92	30,38	11,74	1,25
3	60	25	0,33	0,038	1,78	2,45	1,06	37,14	11,55	1,35
4	50	25	0,66	0,067	1,88	2,6	1,1	30,38	14,09	1,22
5	50	25	1	0,067	2,21	2,62	1,2	30,38	15,43	1,19
6	50	50	1	0,108	1,5	2,57	0,8	38,82	17,14	1,02
7	50	65	1	0,157	1,47	2,5	0,68	42,9	24,14	1,02

2.2.2.2.2 Modèle des cinétiques de séchage de la viande de boeuf

Les valeurs du Reynolds, Prandtl et Nusselt ont été calculées à partir de leurs équations classiques. Ces trois grandeurs adimensionnelles ont été utilisées pour trouver une corrélation caractéristique des échanges convectifs entre le produit et l'air séchant (Eq. (2.27)) Pour valider ces modèles plusieurs cinétiques ont été effectuées dans une large gamme de paramètre de séchage.

$$N_u = 0,91 * (R_e^{0,68} + 285) * P_r^{5,7} \quad (2.27)$$

En remplaçant le Reynolds, Prandtl et Nusselt par leurs expressions on peut écrire l'équation du modèle du coefficient de convection en fonction des paramètres de l'air et des dimensions de la chambre de séchage (Eq. (2.28)).

$$h = 0,91 * \left(\left(\frac{\rho V_\infty D_h}{\mu} \right)^{0,68} + 285 \right) \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{5,7} * \frac{\lambda}{D_h} \quad (2.28)$$

où ρ , V_∞ , μ , C_p , λ désignent respectivement la masse volumique, la vitesse, la viscosité dynamique, la chaleur massique et la conductivité de l'air et D_h le diamètre hydraulique de la section de passage de l'air dans la veine de séchage.

L'équation (2.28) permet d'estimer le coefficient de convection avec une bonne précision ($r^2=0,97$). En remplaçant le coefficient de convection par son expression 2.28 dans les équations (1.50) et (1.51) (cf. paragraphe 1.7.2.4 du chapitre 1), on peut déduire l'expression du flux masse (Eq. (2.29)).

$$F_m = 0,91 * \left(\left(\frac{\rho V_\infty D_h}{\mu} \right)^{0,68} + 285 \right) \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{5,7} * \frac{\lambda}{D_h} (T_\infty - T_{\infty h}) * \frac{1}{L_v} \left(\frac{W - W_{eq}}{W_{cri} - W_{eq}} \right)^\beta \quad (2.29)$$

En explicitant le flux masse par son expression (2.13) on aboutit à l'équation différentielle (2.30) dont les variables sont la teneur en eau W et le temps t .

$$-\frac{\rho_s}{\alpha_s} \frac{dW}{dt} = 0,91 * \left(\left(\frac{\rho V_\infty D_h}{\mu} \right)^{0,68} + 285 \right) \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{5,7} * \frac{\lambda}{D_h} (T_\infty - T_{\infty h}) * \frac{1}{L_v} \left(\frac{W - W_{eq}}{W_{cri} - W_{eq}} \right)^\beta \quad (2.30)$$

La résolution de cette équation différentielle permet d'exprimer la cinétique $W = f(t)$ par l'équation (2.31) ci-dessous.

$$W(t) = (W_{cri} - W_{eq}) * \left((1 - \beta) \left[-0,91 * \left(\left(\frac{\rho V_\infty D_h}{\mu} \right)^{0,68} + 285 \right) \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{5,7} * \frac{\lambda}{D_h} (T_\infty - T_{\infty h}) * \frac{\alpha_s}{\rho_s} \frac{1}{L_v} * \frac{t}{(W_{cri} - W_{eq})} \right] + \left(\frac{W_0 - W_{eq}}{W_{cri} - W_{eq}} \right)^{1-\beta} \right)^{\frac{1}{1-\beta}} + W_{eq} \quad (2.31)$$

Cette équation est très importante car elle permet de prédire l'évolution de la teneur en eau au cours du séchage. On remarque d'après les figures 2.21 et 2.22 que le modèle obtenu permet de prédire les cinétiques de séchages avec une très bonne précision.

Le paramètre de β du modèle du flux masse isenthalpe a lui aussi été modélisé en utilisant une équation de forme puissance (Eq. (2.32)). Les valeurs de β obtenues à partir de cette équation se rapprochent avec une bonne précision des valeurs expérimentales (coefficient de corrélation de l'ordre de 0,99).

$$\beta = 0,2317 T^{0,353} * HR^{-0,18} * V^{-0,054} \quad (2.32)$$

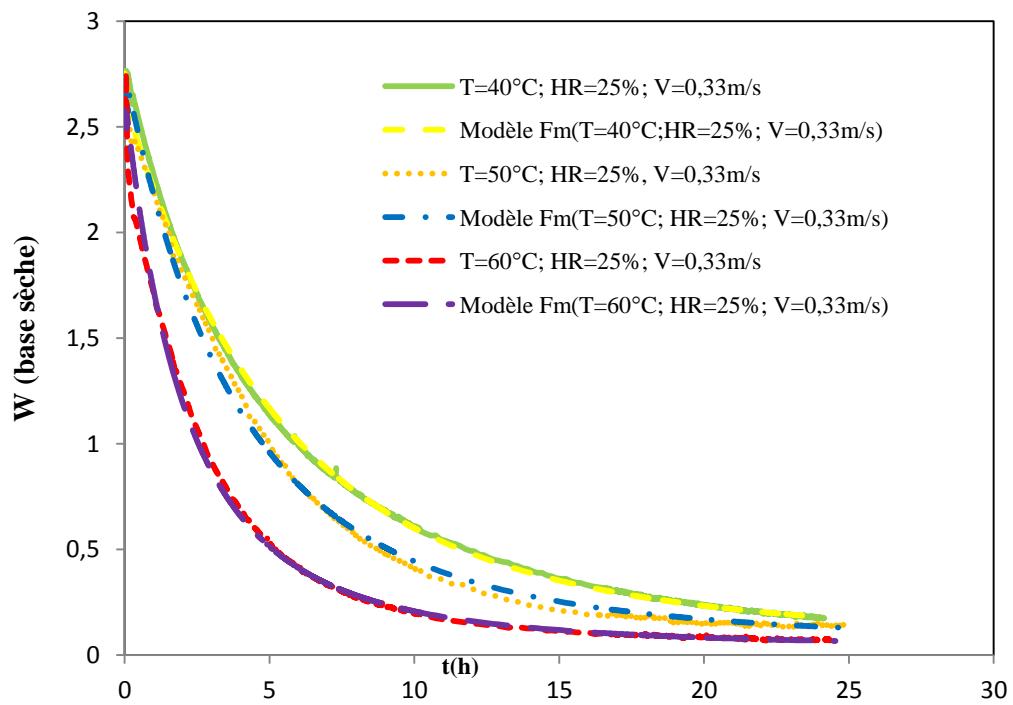


Fig. 2.21 Evolution des teneurs en eau expérimentales W_{exp} et modélisées par le flux masse W_{mod} en fonction du temps à différentes températures de séchage.

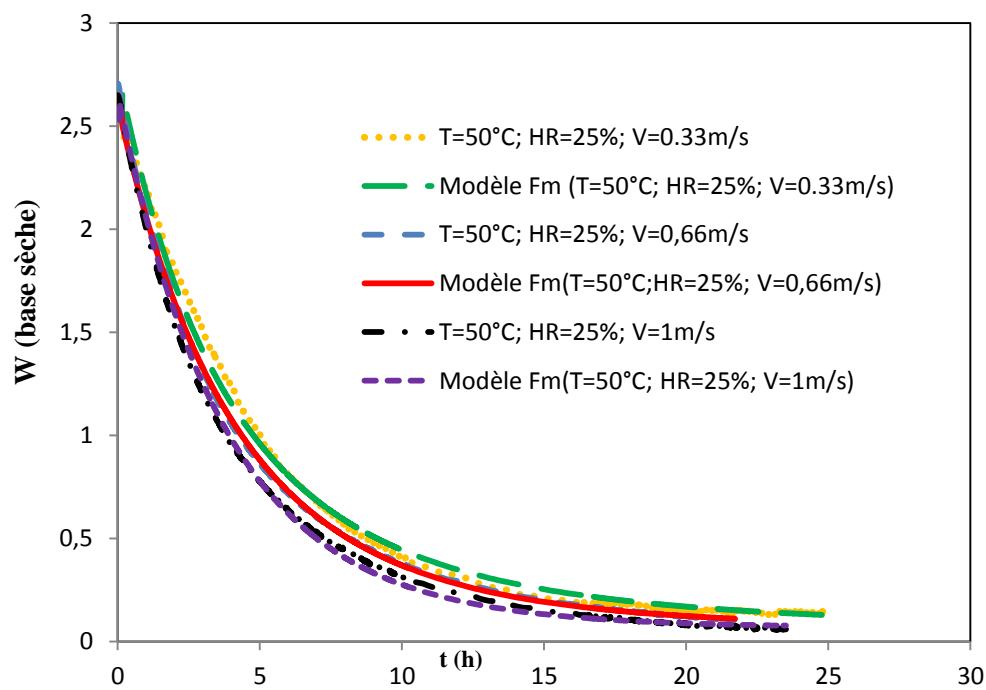


Fig. 2.22 Evolution des teneurs en eau expérimentales W_{exp} et modélisées par le flux masse W_{mod} en fonction du temps à différentes vitesses d'air de séchage.

CHAPITRE 3. CONCEPTION ET REALISATION DE SECHOIRS SOLAIRES

Le *Kilichi* est le produit carné séché le plus consommé dans les pays d'Afrique Centrale et de l'Ouest et il est de plus en plus demandé par les populations des régions éloignées de sa zone de production (Musonge *et al.*, 1994). Le séchage solaire occupe une place importante dans le procédé d'obtention du *Kilichi* et joue un grand rôle dans la qualité finale de ce produit. Le *Kilichi* est généralement séché à l'air libre, exposé aux intempéries, mouches et autres insectes, ce qui a pour conséquence une mauvaise qualité sanitaire du produit (Mbofung *et al.*, 2004 ; Jones *et al.*, 2001). Les conditions de séchage traditionnel de ce produit ne permettent pas d'avoir un produit conforme aux normes sanitaires, condition nécessaire à son exportation et à la vulgarisation de sa consommation.

L'enquête, menée auprès des producteurs du *Kilichi* au Cameroun (cf. paragraphe 1.4.2 du chapitre 1), et l'état de l'art sur les séchoirs solaires existants ont montré qu'il n'existe pas de séchoir solaire adapté à ce produit. A l'issue de cette enquête, les producteurs du *Kilichi* ont exprimé le besoin d'avoir un séchoir solaire facilement manipulable, robuste, moins cher et qui améliore les qualités organoleptiques du produit. Pour répondre à ce besoin, nous avons conçu et réalisé un séchoir solaire adapté au contexte local (social et environnemental) de production du *Kilichi*. Les potentiels utilisateurs de ce séchoir, à savoir les producteurs du *Kilichi*, ont été placés au centre de la conception afin de tenir compte de leurs besoins.

D'autre part, nous nous sommes intéressés à l'impact du rayonnement solaire sur la qualité du produit. Pour mener à bien cette étude, nous avons conçu et réalisé, à une échelle de laboratoire, un deuxième séchoir solaire. En effet, le séchoir solaire de *Kilichi*, adapté au contexte local, ne permet pas de réguler les paramètres de séchage (rayonnement solaire, température, vitesse de l'air et humidité relative) qui varient au cours du séchage, en fonction des heures de la journée. Le deuxième séchoir solaire de laboratoire que nous avons réalisé permettra de réguler ces paramètres. Ce séchoir solaire a été utilisé pour sécher des échantillons de viande à différentes intensités de rayonnement solaire afin d'étudier l'impact du rayonnement solaire sur la qualité du produit. Toutefois, le séchoir solaire de laboratoire n'est pas limité au séchage solaire de la viande. Il peut aussi être utilisé pour le séchage, convectif, séchage solaire ou pour une combinaison de ces deux procédés.

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche de conception du séchoir solaire adapté au contexte local ainsi que les principales étapes de conception du séchoir solaire de laboratoire.

3.1 Conception et réalisation du séchoir solaire de *Kilichi*

3.1.1 Analyse du besoin

L’analyse du besoin exprimé par les utilisateurs nous a permis d’identifier la fonction globale du système à concevoir ainsi que ses critères de qualification afin que les solutions retenues soient bien adaptées aux besoins des utilisateurs. Il ressort du besoin exprimé par les producteurs du *Kilichi* (cf. paragraphe 1.4.2 du chapitre 1) et de son analyse que le système le mieux adapté pour assurer la production et l’amélioration de la qualité du produit, est un séchoir solaire dont la fonction globale attendue est «**Sécher la viande par énergie solaire tout en préservant les qualités organoleptiques du produit**».

3.1.2 La fonction globale du séchoir solaire de *Kilichi*

3.1.2.1 Entités nécessaires pour satisfaire la fonction globale

La fonction globale du séchoir solaire de *Kilichi* est de «**sécher la viande**» en utilisant l’énergie solaire. Pour cela, il faut concevoir un système qui permettra de transformer l’énergie solaire en énergie thermique qui sera transmise au produit. La figure 3.1 récapitule les entités nécessaires pour la réalisation de la fonction globale. On retrouve les principales entités d’un séchoir solaire à savoir : un capteur, qui convertit l’énergie solaire en énergie thermique, une unité de séchage, où est posé le produit à sécher, des conduites pour canaliser la chaleur produite par le capteur solaire vers l’unité de séchage, et éventuellement une unité de commande qui permet de réguler les paramètres de séchage.

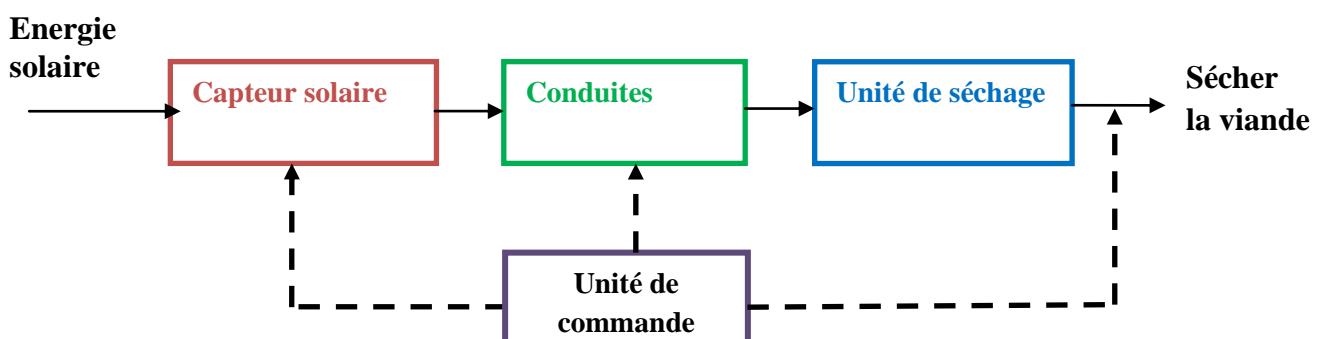


Fig. 3.1 Entités minimales du séchoir solaire séchoir solaire de *Kilichi*.

3.1.2.2 Critères d'appréciation de la fonction globale du séchoir solaire de *Kilichi*

Les critères d'appréciation de la fonction globale du séchoir solaire de *Kilichi* sont : sa «capacité de séchage», la «teneur en eau finale de la viande», la «durée de séchage» et la « température maximale de séchage ». Un niveau d'acceptation a été défini pour chacun de ces critères d'appréciation.

En effet, le séchoir solaire de *Kilichi* doit pouvoir contenir une quantité minimale de viande fraîche, pour satisfaire ses utilisateurs. Les enquêtes, menées auprès des producteurs du *Kilichi* de N'gaoundéré et de Yaoundé, ont permis d'obtenir une capacité de séchage, minimale acceptable par les utilisateurs qui est de 8kg de viande fraîche par jour. Notons que le séchage de la viande, jusqu'à sa teneur en eau finale souhaitée, doit se faire en une journée. La durée de séchage du produit ne doit donc pas être supérieure à la durée de l'ensoleillement de la localité. Dans notre cas, cette durée ne doit pas dépasser 12 heures de séchage, correspondant à la durée moyenne d'ensoleillement dans la ville de N'gaoundéré. Cette valeur a été obtenue expérimentalement, en faisant une moyenne annuelle sur quelques valeurs de durée d'ensoleillement journalier étalées sur toute l'année. Les résultats des calculs de la durée du jour, obtenus en utilisant l'équation (1.8) (cf. paragraphe 1.5.3.2 du chapitre 1) ont permis de confirmer cette durée d'ensoleillement. D'autre part, le produit séché avec le séchoir solaire de *Kilichi* doit avoir une teneur en eau proche de celle obtenue par séchage traditionnel. Un intervalle d'acceptabilité de la teneur en eau finale du produit a été obtenu en déterminant les teneurs en eau de 16 échantillons de viande séchée traditionnellement (première étape de séchage solaire), prélevés chez 8 producteurs de *Kilichi*. Les valeurs des teneurs en eau de ces 16 échantillons sont comprises entre 0,12 (base sèche) et 0,3 (base sèche). La température de séchage du produit est imposée par l'environnement. La valeur maximale de la température a été fixée à 100°C, qui est la température d'évaporation de l'eau à la pression atmosphérique.

3.1.3 Cahier de charge fonctionnel du séchoir solaire de *Kilichi*

Le cahier de charge fonctionnel a pour but d'expliquer les fonctions principales attendues par les utilisateurs et les fonctions de contraintes, en définissant des critères d'appréciations pour ces fonctions et des niveaux d'acceptation correspondant à ces critères d'appréciation. De façon générale, certains de ces critères sont définis en collaboration avec les utilisateurs et d'autres sont exclusivement émis par le concepteur (Scaravetti, 2004). Le tableau 3.1 récapitule le cahier de charge du séchoir solaire de *Kilichi*. Le niveau de flexibilité d'une fonction exprime le degré d'attente de l'utilisateur par rapport à la satisfaction ou non

de cette fonction. Nous avons retenu quatre niveaux de flexibilités : Impératif (F0), Fortement recommandé (F1), Recommandé (F2) et Souhaitable (F3).

Tableau 3.1: Cahier de charge fonctionnel du séchoir solaire local

Fonction	Critère d'évaluation	Niveaux d'acceptation	Flexibilité
(FP) Sécher la viande	Capacité de séchage	≥ 8 kg de viande fraîche	F1
	Teneur en eau finale de la viande	0,12 (base sèche)-0,3 (base sèche)	F0
	Durée de séchage	≤ 12 heures	F1
	Température maximale de séchage	100 °C	F2
(FC1) Contrôler la qualité de la viande au cours du séchage	Couleur	rouge clair	F2
	Rétrécissement	faible	F3
	Odeur	bonne	F0
(FC2) Se connecter au réseau électrique	Consommation électrique	≤ 500 Fcfa/jours	F2
(FC3) Etre adapté au contexte local	Coût d'acquisition	Maximum 200.000 Fcfa (300 Euros environ)	F2
	Maintenabilité	\leq niveau 2	F1
	Robustesse	≥ 2 ans	F1
(FC4) Résister à l'agressivité de l'environnement	MTBF	1mois	F2
(FC5) S'insérer dans son environnement	Hauteur et largeur du séchoir	- Hauteur <2m - Largeur<1m	F0
	Faciliter de déplacement	Déplaçable par une personne	F0

La première fonction de contrainte, « Contrôler la qualité de la viande au cours du séchage » (FC1), fait partie des conditions de séchage traditionnel. En effet, les producteurs du *Kilichi* ont pour habitude de suivre l'apparence de la viande au cours du séchage pour juger de la qualité de séchage, dont dépendent les qualités organoleptiques du produit final.

Ces critères sont : la couleur, l'odeur et le retrait surfacique du produit. Les caractéristiques d'une viande de *Kilichi*, considérée comme bien séchée (première étape de séchage) sont les suivantes : une couleur rouge clair (la moins foncée possible), un faible retrait de la surface des lamelles, et aucune mauvaise odeur.

La deuxième fonction de contrainte, «Se connecter au réseau électrique» (FC2) est relative à l'utilisation d'un ventilateur pour évacuer l'humidité vers l'extérieur du séchoir. Le critère d'appréciation de la fonction de contrainte FC2 est le coût de consommation électrique par jour (un cycle de séchage). La somme de 500 Fcfa (0,75 Euro) par jour a été acceptée par les utilisateurs comme seuil du coût de consommation électrique à ne pas dépasser.

Pour être accepté par les utilisateurs, le séchoir solaire de *Kilichi* doit «être adapté au contexte local» (FC3). Les critères d'appréciation de cette troisième fonction de contrainte sont : le coût d'acquisition du séchoir solaire, sa maintenabilité et sa robustesse. Le coût d'acquisition représente l'investissement initial que le client doit faire pour entrer en possession du séchoir. Les clients du séchoir solaire de *Kilichi* sont en générale des artisans à faible revenu. Il est donc nécessaire que le coût d'acquisition du séchoir soit faible afin de le rendre accessible à ces personnes. Le coût maximal d'acquisition du séchoir solaire a été fixé à 200.000 Fcfa (300 Euros), correspond à la capacité d'investissement d'un producteur moyen de *Kilichi*, d'après les résultats de l'enquête.

La maintenance du séchoir solaire doit être adaptée aux compétences techniques des utilisateurs. Les opérations de maintenance ne doivent pas dépasser le niveau 2 de maintenance, c'est-à-dire des simples diagnostics et des réparations par échange standard. Quant à la robustesse du séchoir, celle-ci sera appréciée par rapport à sa durée de vie. Une durée de vie de deux ans minimum a été jugée satisfaisante par les producteurs de *Kilichi*.

La fonction de contrainte «Résister à l'agressivité de l'environnement» (FC3) est liée à la MTBF (Moyen de Temps de Bon Fonctionnement), qui est un indicateur de la fiabilité du système. Le niveau de la MTBF a été estimé à 1 mois minimum par des spécialistes en Maintenance du département Génie Mécanique de l'Institut Universitaire de Technologie de N'gaoundéré, qui se sont inspirés des MTBF des équipements similaires.

Les critères d'appréciation de la fonction de contrainte «S'insérer dans son environnement» (FC4) sont : l'encombrement du séchoir et la facilité à le déplacer. En effet, le séchoir solaire est exposé en journée au soleil et est remis dans l'atelier le soir. Il faut donc que ses dimensions soient inférieures aux dimensions moyennes des portes des ateliers de *Kilichi* (1m de largeur et 2m de hauteur) et il doit occuper le moins d'espace possible. Le

séchoir doit aussi être facilement déplaçable par une personne car l'opération de séchage de *Kilichi* est généralement faite par une seule personne.

3.1.4 Organigramme Technique étendu (OTé) du séchoir solaire de *Kilichi* et modes d'agencement des unités du séchoir

La figure 3.2 présente l'Organigramme Technique de niveau 2 (OTé) du séchoir solaire local qui est composé d'une chambre de séchage (a), d'un capteur solaire (b) et éventuellement d'un dispositif de commande et d'une unité de stockage. Dans le cas du séchoir solaire de *Kilichi*, la fonction globale doit être réalisée le jour, ce qui exclut l'utilisation d'une unité de stockage. Le fonctionnement du séchoir est influencé par l'environnement météorologique, les caractéristiques du produit et la disponibilité de l'énergie électrique, qui sont présentés en pointillé sur l'Organigramme Technique (Fig. 3.2).

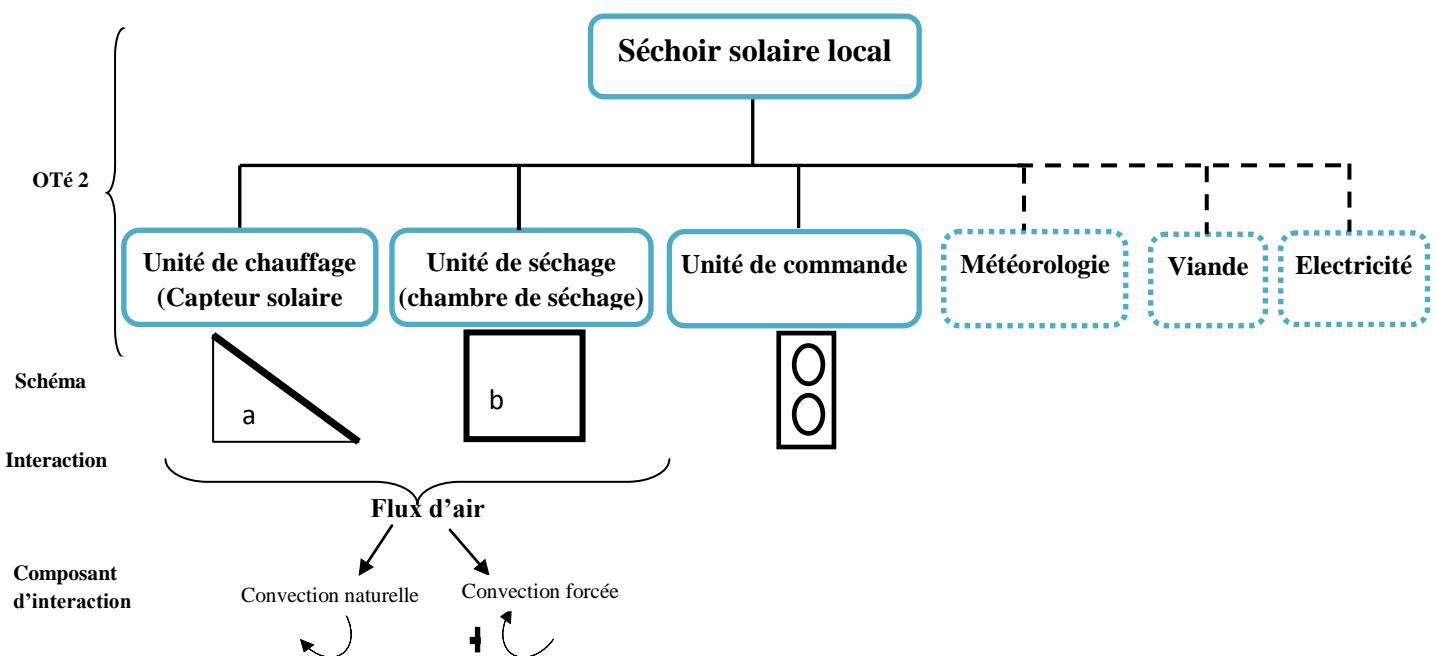


Fig. 3.2 Organigramme Technique (OTé) de niveau 2 du séchoir solaire de *Kilichi*.

Trois modes d'agencements des principales unités des séchoirs solaires (unité de chauffage, unité de séchage) ont été identifiés dans la littérature (Luna, 2008) : **l'agencement 1** où le capteur solaire est intégré à la chambre de séchage, **l'agencement 2** où le capteur est séparé ou semi-intégré à la chambre de séchage et **l'agencement 3** qui correspond aux séchoirs solaires qui disposent d'une unité de stockage d'énergie. L'agencement 1 correspond aux types de séchoirs solaires directs et l'agencement 2 au type de séchoirs solaires indirects (cf. paragraphe 1.5.4 du chapitre 1). Le séchoir solaire de *Kilichi* n'a pas d'unité de stockage

d'énergie et par conséquent le mode d'agencement 3 ne s'applique pas. Il reste donc à faire un choix entre le mode d'agencement 1 et le mode d'agencement 2 (Fig. 3.3).

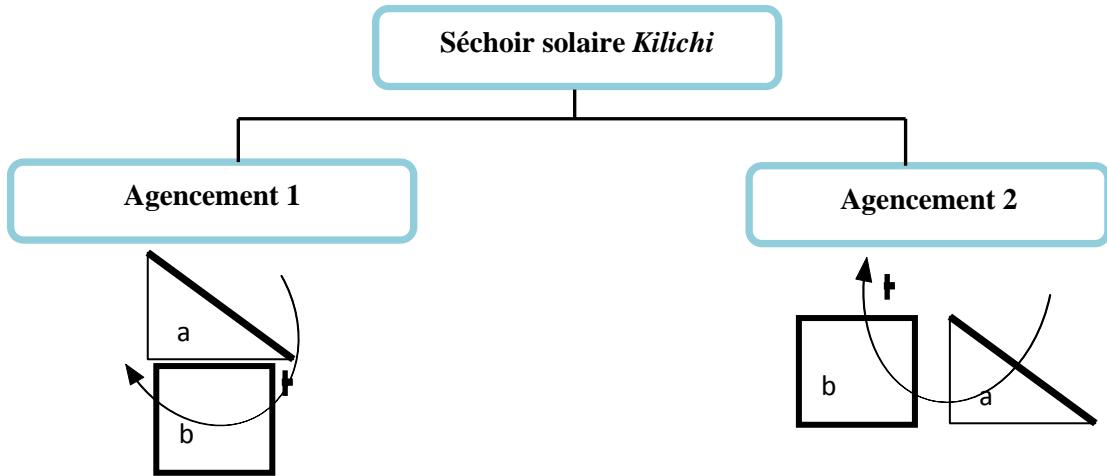


Fig. 3.3 Possibilités d'agencement du séchoir solaire de *Kilichi*.

Dans le mode d'agencement 1, l'unité de chauffage et l'unité de séchage font partie d'une même construction et le capteur solaire est toujours placé au dessus de la chambre de séchage (Luna, 2008). Pour optimiser le captage d'énergie en suivant le parcours soleil, certains auteurs proposent un capteur solaire qui enveloppe la chambre de séchage (Haque, 2002) (Fig. 3.4) et qui joue 2 rôles : il sert de couverture transparente de l'absorbeur et crée un effet de serre à l'intérieur du séchoir.

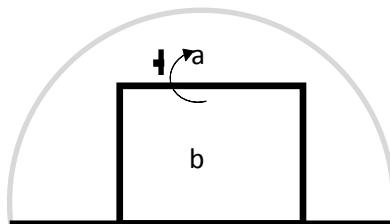


Fig. 3.4 Agencement 1 de type capteur enveloppant la chambre de séchage.

3.1.5 Choix du type de séchoir solaire

Le mode d'agencement 1 de type capteur enveloppant la chambre de séchage (Fig. 3.4) est le plus indiqué pour le séchoir solaire du *Kilichi*. En effet, ce mode d'agencement présente moins d'encombrement et permet un déplacement facile du séchoir (un seul bloc à déplacer). Pour la surface transparente du capteur solaire qui enveloppe la chambre de séchage, nous optons pour 3 parties inclinées suivant un angle qui sera calculé pour optimiser le captage du rayonnement solaire à certaines heures de la journée. L'absorbeur de l'unité de

chauffage sera incliné de telle sorte que les rayons solaires réfléchis soient orientés vers la chambre de séchage. Celle-ci sera composée de 3 claies superposées et équidistantes. Pour faciliter les échanges de chaleur et de matière entre les deux unités (capteur solaire et chambre de séchage) nous envisageons une convection forcée. Notons que la viande est un produit à haute teneur en eau (environ 75% (base humide)) et le risque de saturation de l'air est important. La convection naturelle pourrait ne pas être suffisante pour évacuer toute l'humidité, comme le montre les calculs de dimensionnement (Cf. Annexe 3.2). La solution de cheminée n'a pas été retenue pour réduire l'encombrement du séchoir. Un extracteur d'air sera donc utilisé pour renouveler l'air intérieur du séchoir. En définitif, le séchoir solaire de *Kilichi* sera un séchoir solaire direct, avec capteur enveloppant la chambre de séchage et à convection forcée. La figure 3.5 présente la forme définitive du séchoir solaire de *Kilichi*.

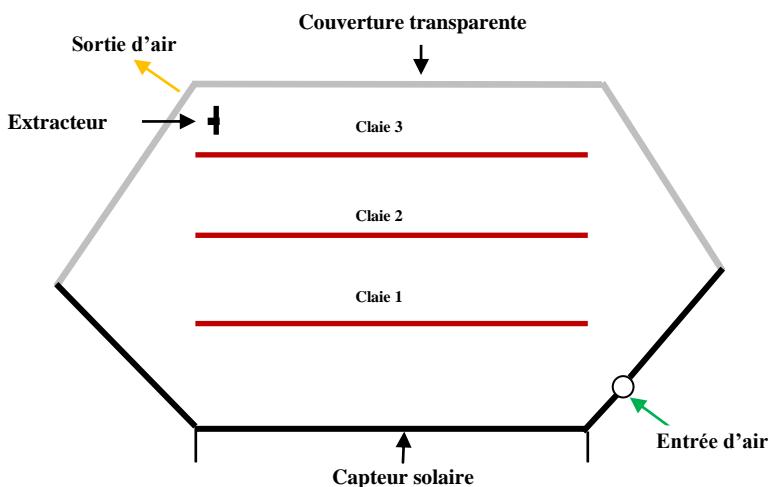


Fig. 3.5 Choix définitif du séchoir solaire de *Kilichi*: séchoir solaire à capteur intégré et convection forcée.

3.1.6 Flux d'interactions du séchoir solaire local

La figure 3.6 montre l'organigramme technique de niveau 3 (OTé 3) qui permet de voir les éléments qui constituent l'unité de chauffage et l'unité de séchage. Le capteur solaire sera donc composé d'une couverture transparente, d'un absorbeur et d'un isolant. La chambre de séchage comprend un extracteur d'air et des claies. Les flux de transferts d'énergie et de matière échangé entre les différents éléments du séchoir sont récapitulés sur la figure 3.7.

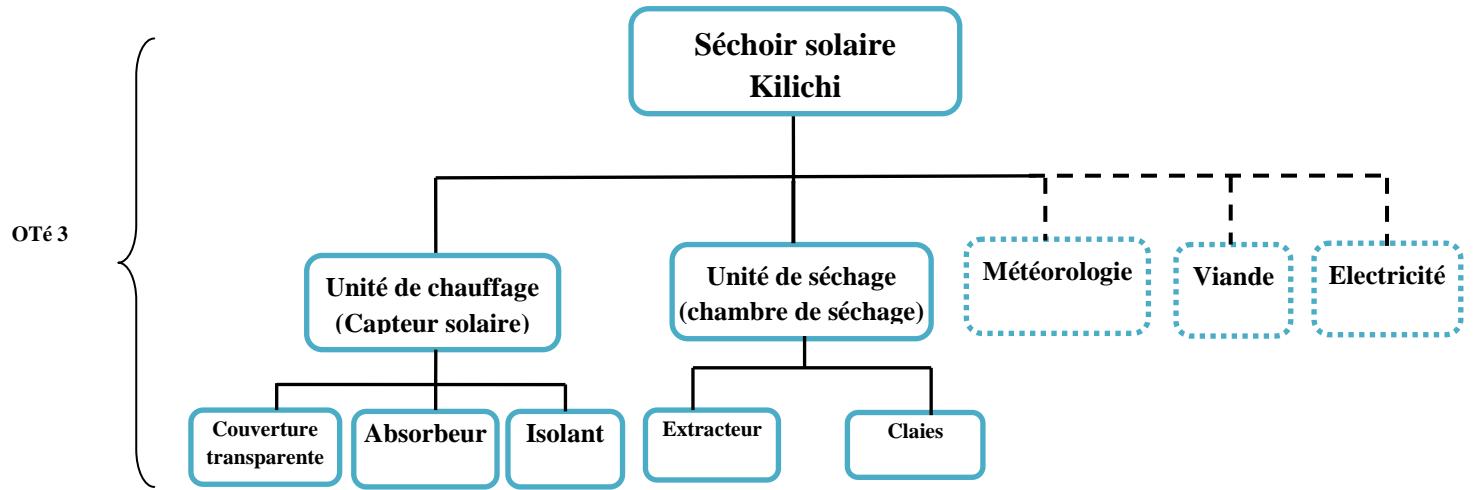


Fig. 3.6 Organigramme Technique (OTé) de niveau 3 du séchoir solaire de *Kilichi*.

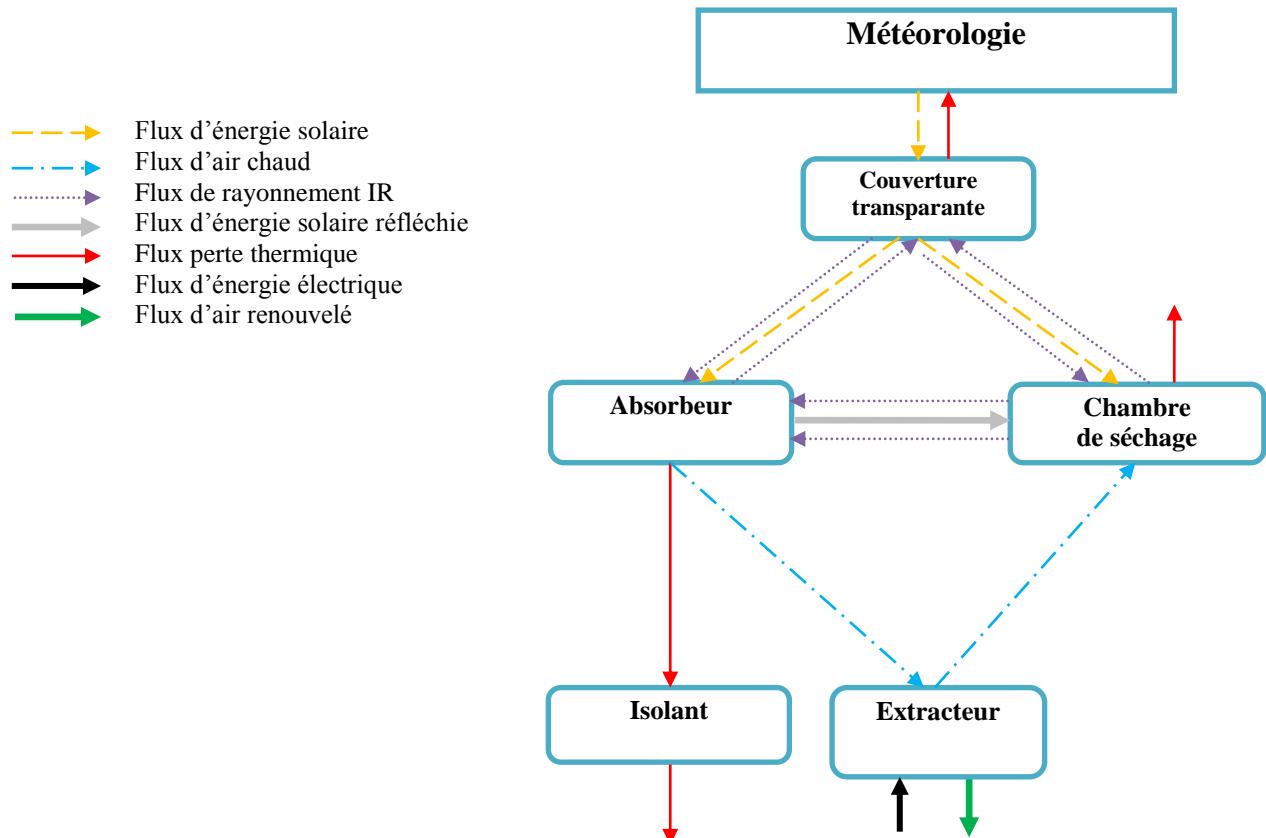


Fig. 3.7 Flux d'interactions dans le séchoir solaire local.

3.1.7 Choix des composants du séchoir solaire de *Kilichi*

Nous présenterons dans ce paragraphe la méthodologie utilisée pour faire les choix des composants du séchoir solaire de *Kilichi*. Les différentes solutions possibles pour chaque composant et les résultats de l'analyse de ces solutions sont dans l'Annexe 3.1. Les critères utilisés pour évaluer les différentes solutions techniques sont : le coût, la robustesse et la

disponibilité. Des coefficients de pondération, allant de 1 à 3, ont été attribués à chacun de ces critères en fonction de son importance pour les utilisateurs. A chaque niveau de critère, correspond une note, allant de 0 à 10 (Tableau 3.2), qui sera attribuée à une solution, en fonction de son appréciation par rapport au critère considéré. Pour chaque solution, nous calculons la somme pondérée des trois notes obtenues, pour les trois critères. La solution qui a la plus grande somme pondérée sera retenue. Il est important de noter que, ces critères d'évaluation ont été définis en collaboration avec les utilisateurs.

Tableau 3.2: Critères d'évaluation pour le choix des composants du séchoir solaire de *Kilichi*

Critère	Coefficient de pondération : 1- Important 2- Très important 3- Le plus important	Niveau	Note/10
Coût	3	Très élevé	2
		Elevé	5
		Moyen	8
		faible	10
Robustesse	2	Très robuste	10
		Robuste	8
		Moyennement robuste	5
		Pas du tout robuste	2
Disponibilité sur le marché	1	Disponible dans le marché local	10
		Disponible dans un rayon de 100 km environ	5
		Disponible dans un rayon de plus de 100 km	2

3.1.8 Les variables de la démarche de conception du séchoir

La conception d'un produit se traduit par l'écriture des interactions liant les variables du cahier de charge et les variables de conception. L'optimisation de ces interactions permet de déterminer le dimensionnement du procédé retenu afin de satisfaire le cahier de charge.

3.1.8.1 Les variables liées au cahier de charge du séchoir solaire de *Kilichi*

Les variables de cahier de charge du séchoir solaire du *Kilichi* sont :

- la masse de viande fraîche à sécher (kg)
- la teneur en eau initiale de la viande fraîche (W_0)
- la teneur en eau initiale de la viande fraîche (W_f)
- la durée de séchage (d)
- La température de séchage (T_s).

Ces différentes variables ont été utilisées pour estimer la quantité d'énergie nécessaire, la surface de captage de cette énergie, la surface des claies et le débit de renouvellement de d'air du séchoir (cf. Annexe 3.2).

3.1.8.2 Les variables de conception

Les variables de conception traduisent essentiellement les caractéristiques géométriques des composants de l'unité de chauffage et ceux de la chambre de séchage qui, d'une part permettront d'optimiser le flux d'énergie fournie par le capteur et les paramètres de l'air de séchage (Température et vitesse de l'air), et d'autre part d'avoir une surface de séchage en adéquation avec la cadence de production du produit. Ces caractéristiques géométriques obtenues doivent également satisfaire la fonction de contrainte liée à l'encombrement.

3.1.8.2.1 Les variables de conception de l'unité de chauffage

La figure 3.8 présente les variables de conceptions de l'unité de chauffage et qui sont relatives aux dimensions et angles d'inclinaison de la couverture transparente, de l'absorbeur et de l'isolant. Les variables de conception des trois vitres de la couverture transparente sont les plus déterminantes pour le séchoir. En effet la forme et les dimensions de l'absorbeur et de l'isolant seront imposées par celles de la couverture transparente afin d'avoir un capteur solaire qui enveloppe la chambre de séchage.

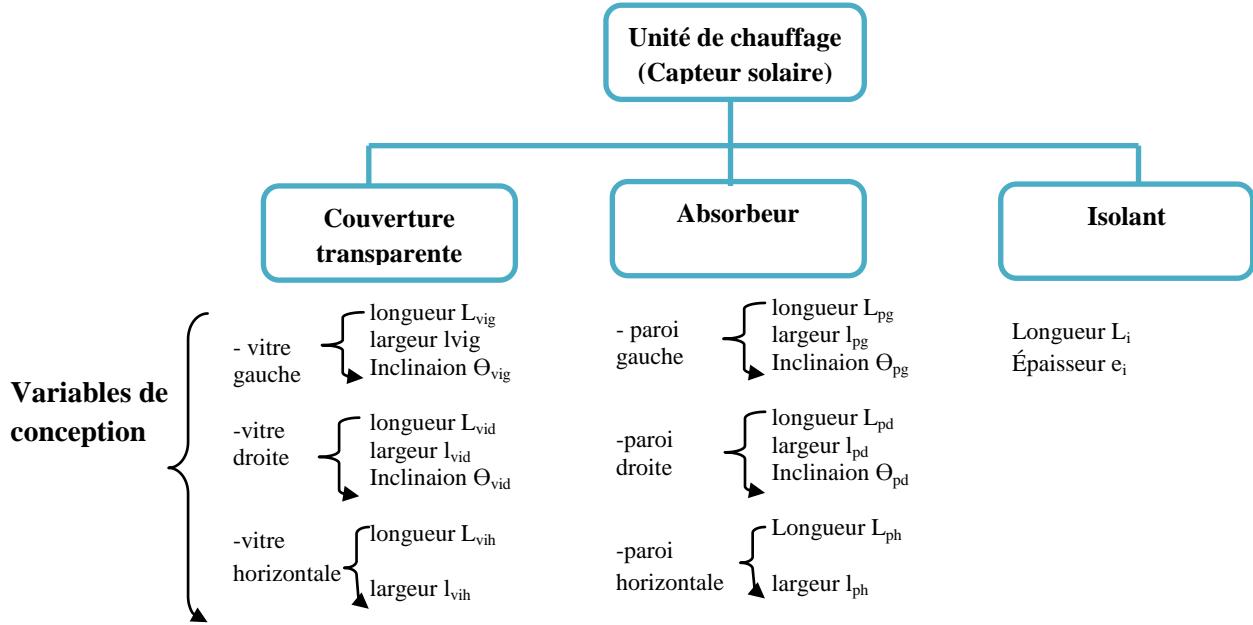


Fig. 3.8 Variables de conception de l’unité de chauffage.

Pour déterminer les dimensions des vitres, on calcule d’abord la surface totale de la couverture transparente, qui est la surface permettant d’avoir la quantité d’énergie nécessaire pour le séchage (cf. Annexe 3.2). Une fois la surface totale connue, on repartit cette surface sur les trois vitres en tenant compte de l’encombrement et de la fonction de contrainte FC4, qui limite la largeur du séchoir à 1m, afin qu’il puisse rentrer dans un atelier de *Kilichi*. Les angles d’inclinaison des vitres (vitre droite, vitre horizontale et vitre gauche), sont calculés de façon à avoir un flux de rayonnement solaire qui arrive perpendiculairement sur l’une des surfaces à certaines heures choisies, de la journée.

En ce qui concerne l’absorbeur et l’isolant, leurs formes et leurs dimensions sont imposés par celles de la surface transparente. Les figures 3.9 et 3.10 illustrent les variables de conception de la couverture transparente ainsi que la forme de l’absorbeur et isolant.

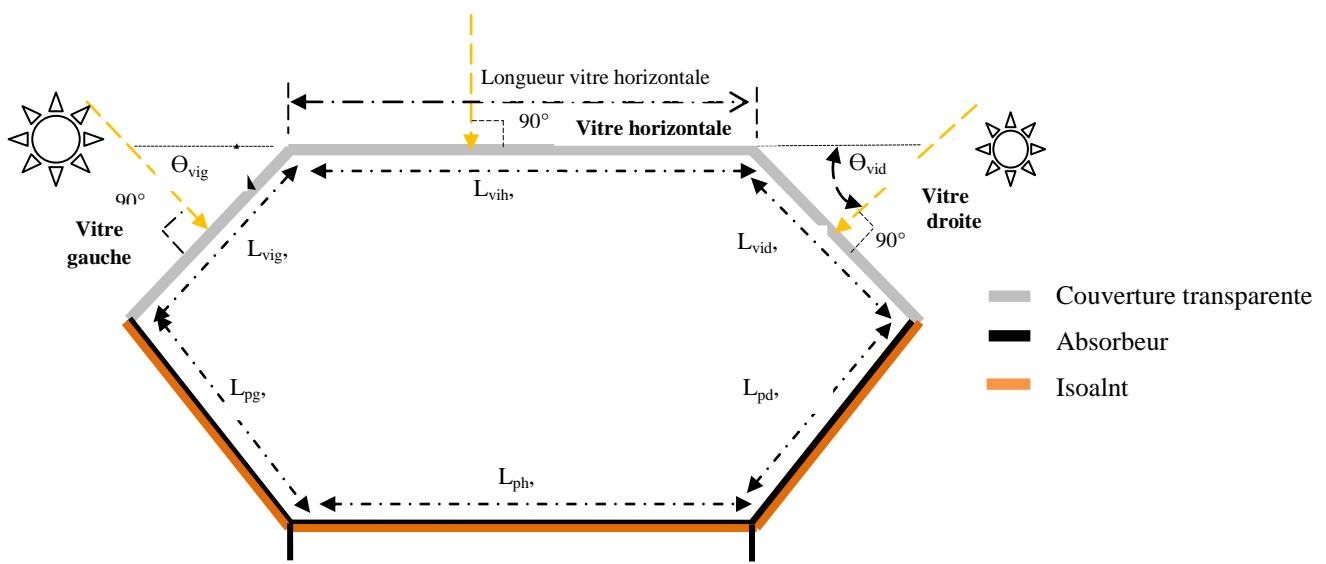


Fig. 3.9 Schéma d'illustration de la variable de conception « angles d'inclinaison » de la variable de la couverture transparente du capteur.

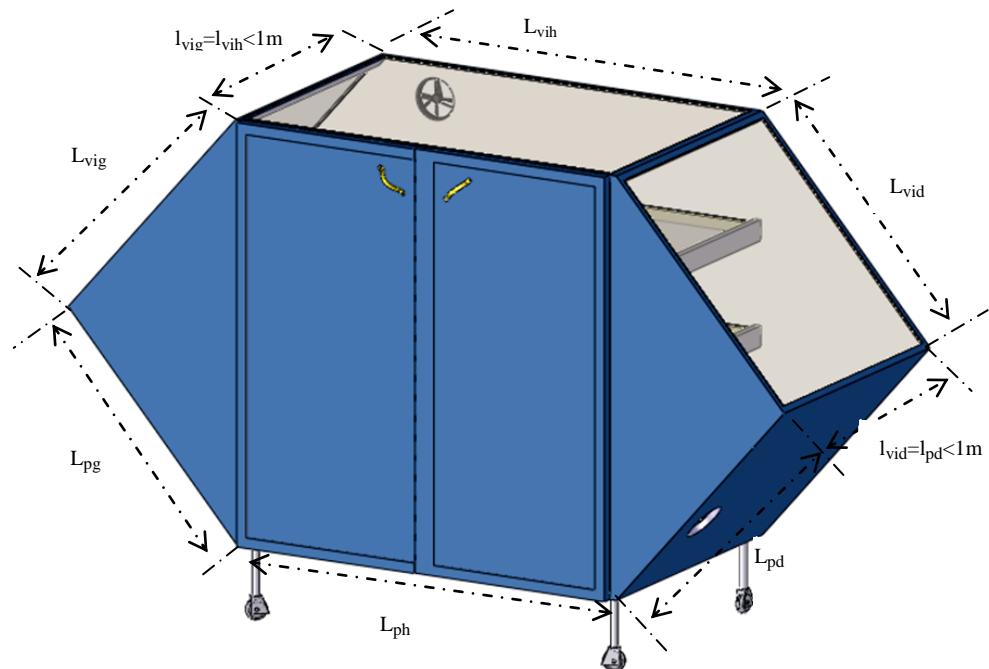


Fig.3.10 Schéma du séchoir : variables de conception de l'unité de chauffage.

3.1.8.2.2 Variables de conception de la chambre de séchage

La figure 3.11 présente les variables de conception de la chambre de séchage qui sont : les dimensions des claies, les distances entre ces claies et la vitesse d'extraction de l'air.

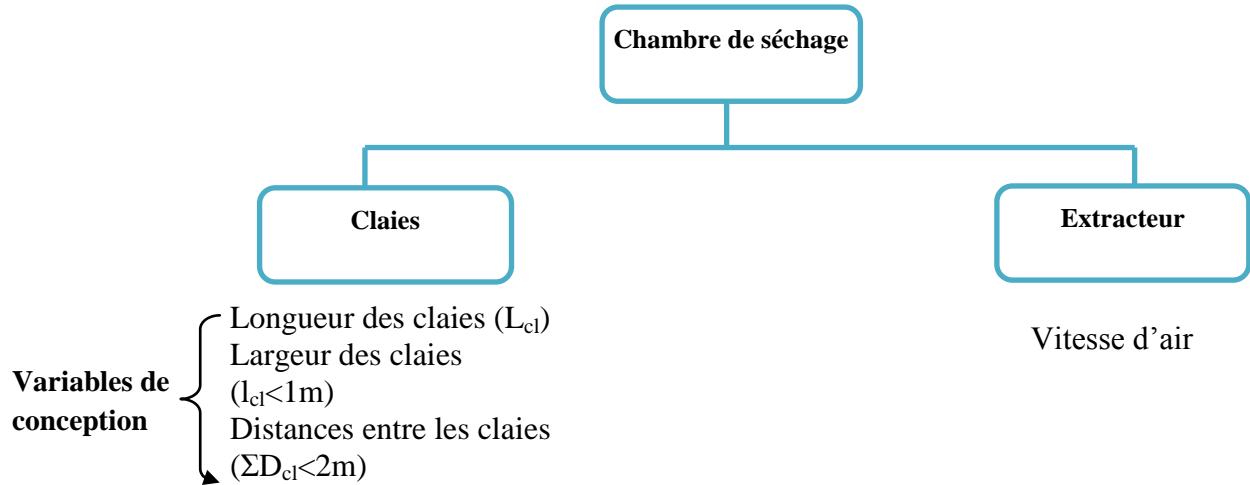


Fig. 3.11 Variables de conception de l'unité de séchage.

Les dimensions de la chambre de séchage seront imposées par la surface des claies et par la fonction de contrainte (FC4) qui limite la largeur et la hauteur du séchoir. La surface totale des claies sera dimensionnée pour contenir 8 kg de viande fraîche de 3 mm d'épaisseur. Les 3 claies auront les mêmes dimensions et leur largeur doit être inférieure à 1m ($l_{cl} < 1m$) (Fig. 3.12). La distance entre les claies sera déterminée pour avoir le même volume de contrôle VC au-dessus de chaque claie (Fig. 3.13). La somme des distances entre les claies doit être inférieure à 2m (FC4). La vitesse d'extraction de l'air a été déterminée par dimensionnement (cf. Annexe 3.2).

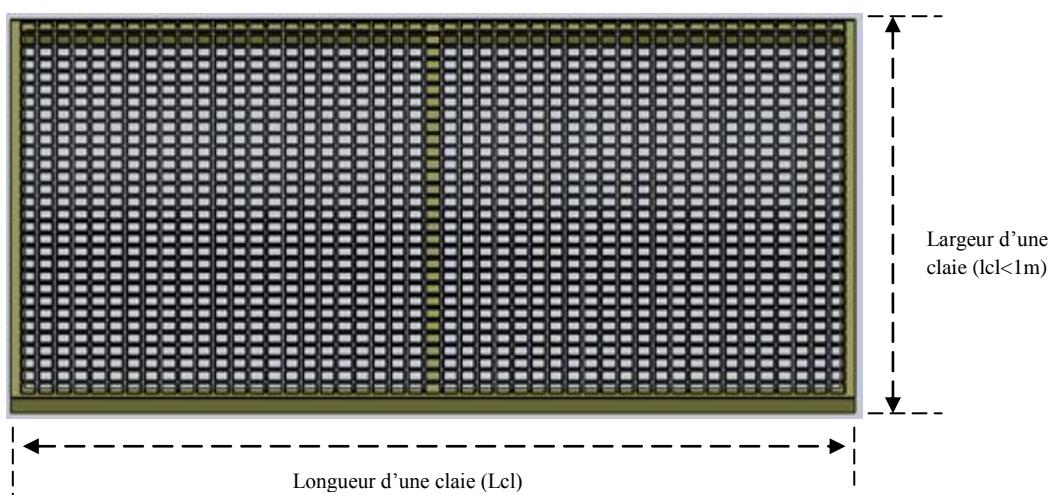


Fig. 3.12 Schéma d'une claie: variables de conception « longueur » et « largeur » d'une claie.

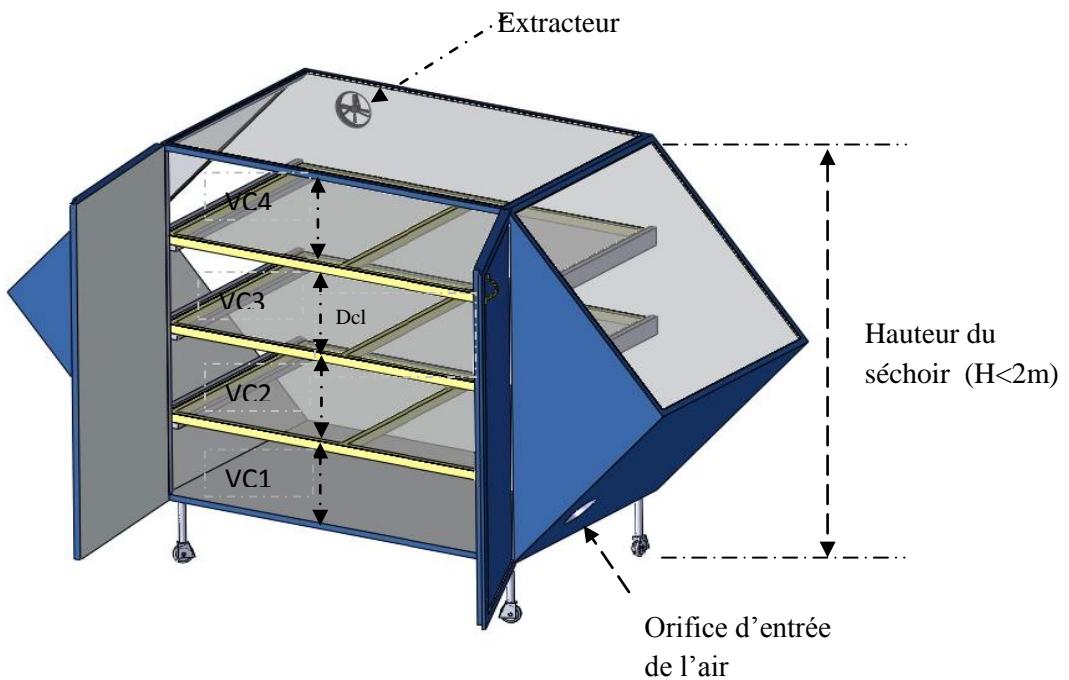


Fig.3.13 Schéma du séchoir : variable de conception de la chambre de séchage.

3.1.9 Fonctionnement du séchoir solaire de *Kilichi*

Le rayonnement solaire arrive sur les vitres qui transmettent une partie de ce rayonnement à l'intérieur du séchoir. Les vitres ont également pour rôle de protéger les produits contre les intempéries et permettent de contrôler le produit au cours du séchage. Lorsque le séchoir est orienté dans la direction du Est-Ouest la vitre à gauche (c'est-à-dire celle qui est à la gauche lorsqu'on est face à la porte du séchoir), optimisera le captage du rayonnement solaire en début de journée, la vitre horizontale, laissera passer le maximum de rayonnement lorsque le soleil sera au Zenith et la vitre à droite prendra le relais au début du coucher du soleil. Une partie des rayons solaires transmis par les vitres arrive directement dans la chambre de séchage où les produits sont exposés sur des claies et l'autre partie arrive sur l'absorbeur. Ce dernier, réfléchit une partie du rayonnement solaire sur les produits et absorbe l'autre partie qui sera transformée en chaleur. Du fait de la différence de température entre les différentes surfaces du séchoir, celles-ci échangent des flux de rayonnements infrarouges qui restent piégé à l'intérieur du séchoir par effet de serre, contribuant ainsi à l'élévation de la température dans le séchoir. L'air rentre dans le séchoir par l'orifice situé en dessous de la chambre de séchage (cf. Fig 3.13) et est forcé par l'extracteur vers la sortie en passant au dessus des claies.

3.1.10 Dimensionnement du séchoir solaire de *Kilichi*

Dans ce paragraphe, nous ne présentons que la méthode et le résultat de dimensionnement des angles d'inclinaison. Les dimensionnements de la surface du capteur et de la vitesse de renouvellement de l'air sont en Annexe 3.2.

Rappelons que la couverture transparente est constituée de trois surfaces vitrées inclinées pour laisser passer les rayonnements solaires perpendiculairement à leurs surfaces à certaines heures. Ces angles d'inclinaison sont déterminés de telle sorte que la vitre gauche (vig), la vitre horizontale (vih) et la vitre droite (vid) laissent passer les rayons perpendiculairement à leurs surfaces à 10h, 13h et 16h, respectivement (Fig. 3.15). Pour cela nous avons pris en compte les coordonnées géographiques de la localité et une date de référence pour capter le maximum d'ensoleillement. Les coordonnées géographiques sont ceux de la ville de N'Gaoundéré (Latitude 7,19°N et Longitude 13,35°E) où le séchoir sera réalisé et expérimenté. La journée de référence choisie pour effectuer les calculs est celle de 15 Août soit le 227^{ème} jour de l'année. Cette date a été choisie dans la saison pluvieuse qui correspond à la période la plus défavorable de l'année en termes d'ensoleillement. Les angles d'inclinaison des capteurs, aux horaires choisis (10h, 13h et 16h) doivent correspondre à la hauteur du soleil (*h*) qui est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. En effet, connaissant la hauteur du soleil à chaque heure de la journée, il suffit d'orienter les vitres perpendiculairement à cette direction pour optimiser le captage du rayonnement solaire. L'application des formules (1.2), (1.3), (1.4) (1.5) et (1.6) (cf. paragraphe 1.5.3 du chapitre 1) a permis d'obtenir la hauteur du soleil en fonction des heures, pour la journée du 15 Août (Fig. 3.14). On peut déduire de la figure 3.14 les hauteurs du soleil correspondant aux heures de 10h, 13h et 16h qui sont : 45°, 82° et 45°, respectivement. Pour des raisons d'ordre pratique, la hauteur du soleil correspondant à un angle de 82° a été arrondie à 90°. Les vitres doivent donc être orientées de manière à faire un angle de 90° avec la hauteur du soleil. Pour cela la vitre gauche (vig) doit faire une de 45° par rapport au plan horizontal et les vitres horizontale (vih) et droite (vid) seront inclinées par rapport à l'horizontale de 0° et 45°, respectivement.

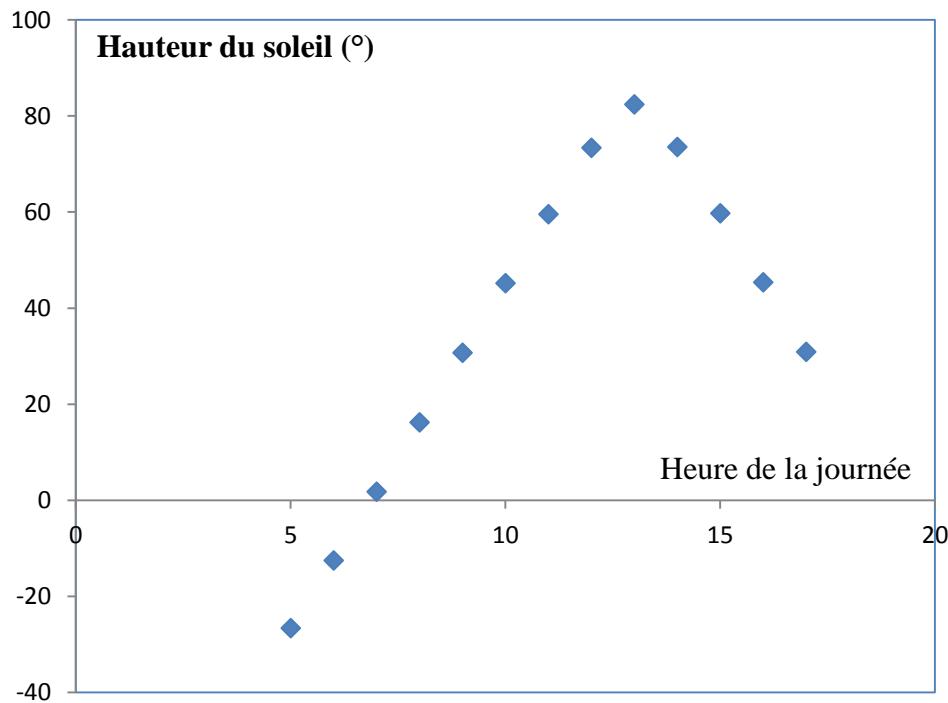


Fig. 3.14 Evolution de la hauteur du soleil en fonction des heures de la journée.

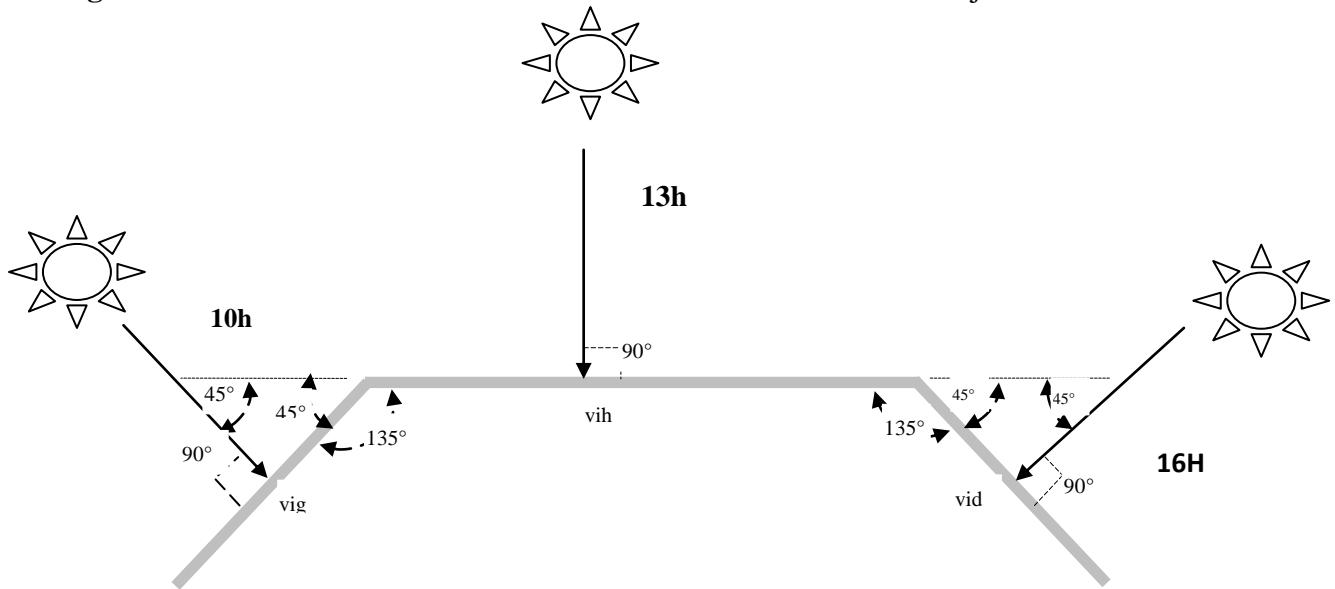


Fig. 3.15 Inclinaison des vitres du séchoir solaire de Kilichi.

L'éclairement solaire global reçu (densité de flux) par chacune des vitres a été calculé en utilisant les formules des équations (1.14), (1.15), (1.16), (1.18), (1.19) et (1.21) présentées au paragraphe 1.5.3.3 du chapitre 1. La figure 3.16 présente une simulation de l'éclairement solaire reçu par les vitres (vitre gauche, vitre horizontale et vitre droite) en fonction des heures de la journée Il se dégage de cette figure qu'entre 06h et 10h, l'éclairement global de la vitre gauche est supérieur à celui des deux autres vitres et entre 10h

et 13h c'est la vitre horizontale qui est plus éclairée. De 13h à 18h on aura un éclairement plus important sur la vitre droite. Ce résultat valide bien les angles d'inclinaison obtenus.

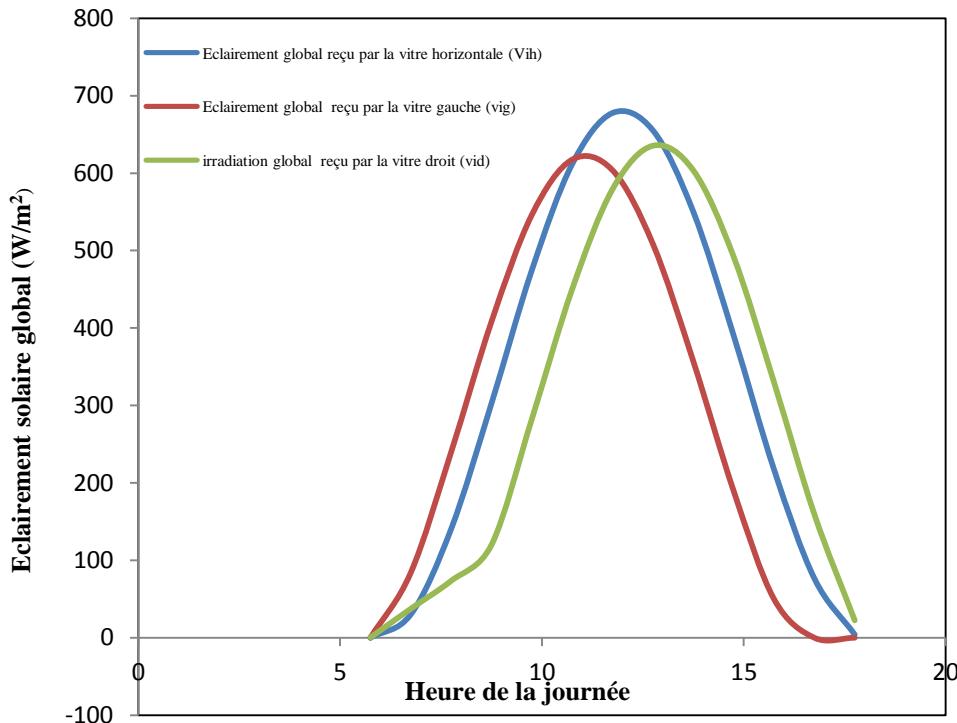


Fig. 3.16 Simulation de l'évolution de l'éclairement solaire global sur les trois vitres du séchoir solaire de Kilichi pour la journée du 27 Août dans la localité de N'gaoundéré.

3.1.11 Dimensions du séchoir solaire de *Kilichi*

La figure 3.17 présente une vue arrière du séchoir qui met en évidence sa hauteur (1400mm), les longueurs et les angles d'inclinaison des trois vitres, ainsi que les longueurs et les angles d'inclinaison de l'absorbeur. Le séchoir a une longueur de 2230 mm (Fig. 3.18) et une largeur de 800 mm (Fig. 3.19). La longueur des claires est de 1200mm et la distance entre deux claires est de 270mm. Les vitres droite et gauche font un angle de 135° avec la vitre horizontale et un angle de 90° avec les parois gauche et droite respectivement (Fig. 3.18). Ces deux dernières forment chacune un angle de 135° avec la paroi horizontale. Le ventilateur d'extraction et l'orifice d'admission de l'air ont un diamètre de 120 mm chacun (Fig. 3.17 et 3.19).

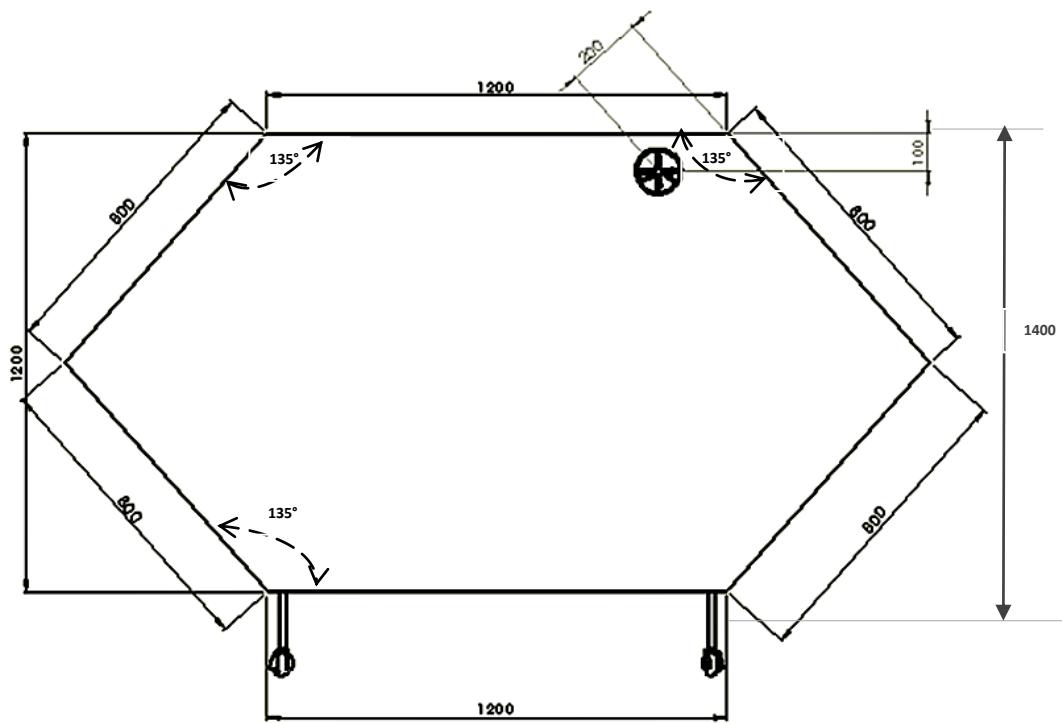


Fig. 3.17 Vue arrière du séchoir solaire de *Kilichi*.

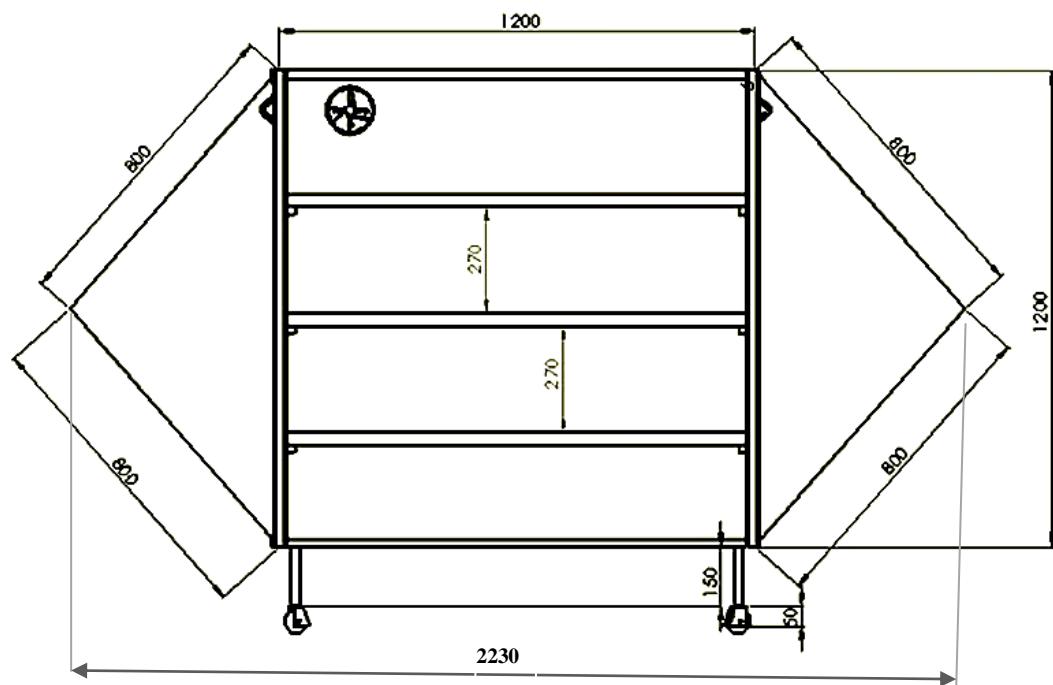


Fig. 3.18 Vue de face du séchoir solaire de *Kilichi*.

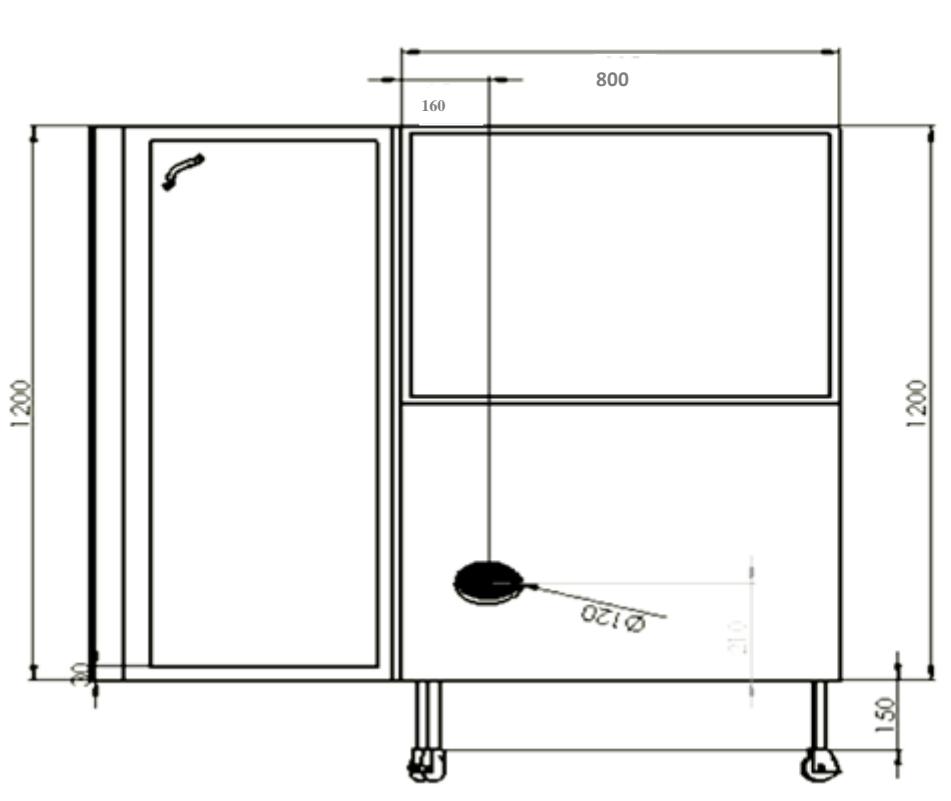


Fig. 3.19 Vue de droite du séchoir solaire de *Kilichi*.

3.1.12 Réalisation du séchoir solaire de *Kilichi*

Le séchoir a été réalisé à l'Ecole Nationale Supérieure des sciences Agro-industrielles (ENSAI) de N'Gaoundéré en collaboration avec l'atelier mécanique de cette école. La réalisation a été faite conformément au cahier de charge dont les principales contraintes liées à la réalisation du séchoir sont l'utilisation des matériaux locaux et la minimisation du coût. Les différents procédés de réalisation du séchoir solaire sont récapitulés en Annexe 3.3. Le coût total du séchoir s'est élevé à 150.000 FCFA (250 Euros).

Nous présentons ci-dessous quelques photos du séchoir réalisé (Fig. 3.20 à 3.22). La figure 3.20 montre une vue de face du séchoir où l'on peut observer la forme du séchoir telle que prévue par la conception. Des roulettes sont montées pour faciliter le déplacement du séchoir. La figure 3.21 met en évidence les 3 claies et sur cette même photo on peut voir que l'intérieur du séchoir est complètement couvert en tôle aluminium poli pour jouer le rôle de capteur/réflecteur des rayonnements solaires. La figure 3.22 montre une vue de gauche du séchoir qui permet de voir l'inclinaison de la vitre de gauche.



Fig. 3.20 Photo de la vue de face du séchoir solaire de *Kilichi*



Fig. 3.21 Photo de la vue intérieure du séchoir solaire de *Kilichi*.



Fig. 3.22 Photo de la vue de gauche du séchoir solaire de *Kilichi*.

3.2 Conception et réalisation du séchoir solaire de laboratoire

3.2.1 Expression et analyse du besoin du séchoir solaire de laboratoire

Le besoin exprimé est celui d'un système qui permettra de reproduire, à l'échelle du laboratoire, le séchage solaire et/ou convectif, en régulant les paramètres de séchage à l'entrée du séchoir. Dans le cadre de cette étude, ce séchoir est utilisé pour le séchage solaire de la viande de bœuf afin d'évaluer l'impact du rayonnement solaire sur la qualité du produit. Le système qui permet de satisfaire un tel besoin est donc un séchoir solaire dont la fonction globale est de «**Simuler le séchage solaire et/ou convectif dans des conditions contrôlées**».

3.2.2 Cahier de charge du séchoir de laboratoire

Le cahier de charge du séchoir solaire de laboratoire a été établi pour avoir des conditions de séchage proches de celles rencontrées dans les séchoirs solaires. Ce cahier de charge ne prend pas en compte les caractéristiques de séchage d'un produit particulier, car le séchoir solaire de laboratoire doit être en mesure de fournir une large gamme de conditions de séchage, permettant ainsi de sécher divers produits. La fonction principale du séchoir ainsi que les fonctions de contraintes à réaliser sont récapitulées dans le tableau 3.3. Les niveaux de flexibilités (F0, F1, F3 et F4) sont les mêmes que ceux du cahier de charge du séchoir solaire de *Kilichi* (cf. paragraphe 3.1.3).

Tableau 3.3: Cahier de charge du séchoir solaire laboratoire

Fonction	Critère d'appréciation	Niveau d'acceptation	Flexibilité
Fonction principale (FP) : Simuler les conditions de séchage solaire et/ou convectif	Longueurs d'ondes du rayonnement	250nm-1000nm	F0
	Intensité de rayonnement solaire global	200 W/m ² -750 W/m ²	F0
	Durée de rayonnement	7h-12 h	F2
	Température de l'air	Tamb-100°C	F1
	Vitesse de l'air	0,1-2m/s	F1
	Humidité relative de l'air	10%-90%	F1
Fonction de contrainte (FC1) : Contrôler et commander les paramètres de séchage	Précision de la régulation	Rayonnement: :<±10 W/m ² Température:<±1°C Vitesse air: :<±0,1m/s Humidité relative : ±10%	F2
Fonction de contrainte (FC2) : Acquérir et gérer les informations du procédé	Intervalle de temps de mesure des paramètres du procédé	<30s	F3
	Système d'acquisition	Interface utilisateur conviviale	F3

-La fonction principale (FP): Simuler les conditions de séchage solaire et/ou convectif

Le séchoir de laboratoire a pour fonction principale de «Simuler les conditions de séchage solaire et/ou convectif». Les critères appréciation sont de deux types : Les critères d'appréciation liés au séchage solaire (longueurs d'ondes du spectre de rayonnement solaire, intensité et durée du rayonnement du rayonnement solaire) et les critères d'appréciation relatifs au séchage convectif (température, vitesse et humidité relative de l'air). Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire, simulé par le séchoir, doivent être proches du spectre du rayonnement solaire reçu sur la terre, à savoir des longueurs d'ondes de rayons Ultra-violets (250nm-400nm), Visibles (400nm-700nm) et Infrarouges (700nm-3000nm). L'intensité du rayonnement solaire émis par le séchoir doit être comprise entre 250W/m² et 1000W/m², correspondant à l'intervalle de l'intensité du rayonnement solaire reçu au niveau de la mer. Le

rayonnement émis par le séchoir doit être constant durant tout le processus de séchage. Une durée maximale de 12h a été fixée pour être proche de la durée d'ensoleillement dans les pays tropicaux. Ce séchoir doit couvrir une large gamme de paramètres de séchage convectif avec des valeurs de température, de vitesse de l'air et d'humidité relative comprises, respectivement, dans les intervalles Tamb-100°C, 0,1m/s-2m/s et 10%-90%.

-La fonction de contrainte (FC1): Contrôler et commander les paramètres de séchage

Le séchoir doit permettre à l'opérateur de contrôler et de commander les paramètres de séchage (FC1). Une valeur de consigne peut être fixée, pour chaque paramètre de séchage, et sa valeur maintenue constante autour de cette consigne pendant toute la durée du séchage. L'écart maximal souhaité entre la consigne et la mesure (précision de la régulation) est de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ pour la température, $\pm 10\%$ pour l'humidité relative, $\pm 0,1\text{m/s}$ pour la vitesse de l'air et $\pm 10\text{W/m}^2$ pour le rayonnement solaire.

-La fonction de contrainte (FC2) : Acquérir et gérer les informations du procédé de séchage

L'opérateur doit avoir des informations sur l'évolution du séchage et pour cela le séchoir doit lui permettre d'acquérir et de gérer les informations du procédé de séchage (FC2). Un intervalle temps de 30s au maximum a été fixé pour la mesure et l'enregistrement automatique des paramètres de séchage. La mise en marche et l'arrêt du séchoir ainsi que le réglage des paramètres de séchage peuvent aussi être faits par le système qui assure la fonction de contrainte FC2

3.2.3 Organigramme Technique étendu (OTé) du séchoir solaire de laboratoire

La figure 3.23 présente l'organigramme technique de niveau 3 (OTé 3), du séchoir solaire de laboratoire. Ce séchoir est constitué de six unités:

- **L'unité de rayonnement solaire**, composée des lampes solaires et du mécanisme de variation de la hauteur des lampes. Les lampes solaires permettent de convertir l'énergie électrique en rayonnement solaire et le mécanisme de variation de la hauteur des lampes permet de varier l'intensité de rayonnement arrivant sur le produit en variant la distance entre les lampes et le produit.
- **L'unité de séchage** comprend une vitre transparente pour transmettre le rayonnement solaire émis par les lampes, une claie de séchage sur laquelle est posé le produit et une balance qui permet de mesurer la masse du produit au cours du séchage.

- **L'unité de chauffage** est constituée des résistances chauffantes pour augmenter la température de l'air du séchoir.
- **L'unité de contrôle d'hygrométrie** est composée d'un déshumidificateur pour diminuer l'hygrométrie de l'air et d'un humidificateur pour l'augmenter en cas de besoin.
- **L'unité aéraulique** est composée de la conduite d'air et du ventilateur pour varier la vitesse de l'air.
- **L'unité de mesures et de commande** comprend les différents capteurs (de températures, humidité relative et vitesse de l'air), les régulateurs et l'ordinateur d'acquisition et de pilotage du procédé.

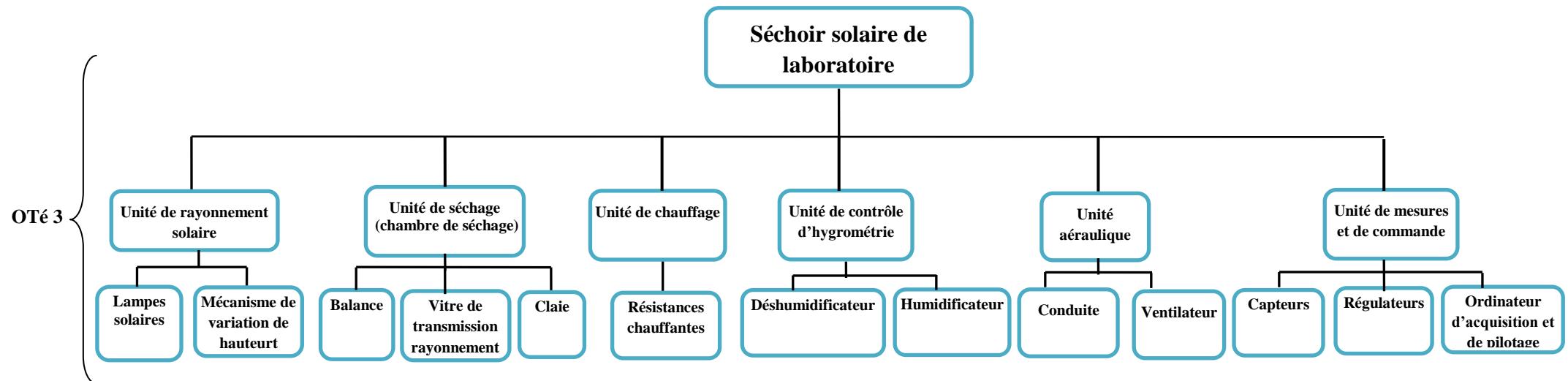


Fig. 3.23 Organigramme technique (OTé) de niveau 3 du séchoir solaire de laboratoire.

3.2.4 Présentation des solutions techniques retenues

3.2.4.1 Solutions techniques pour l'unité de rayonnement solaire

Pour convertir l'énergie électrique en rayonnement solaire, nous allons utiliser deux lampes solaires de puissance 500W/m^2 chacune (rayonnement global) et dont le spectre de rayonnement (Ultra-violets, Visibles et Infrarouges) est similaire à celui du soleil. Les lampes seront refroidies par l'air extérieur grâce à des boîtiers à ailettes. Un mécanisme coulissant, sur lequel seront montés les boîtiers des lampes, permettra de varier la distance entre les surfaces des lampes et celle du produit, faisant varier ainsi le facteur de forme lampes-produit (Fig. 3.24). Un couvercle opaque sera placé autour des lampes pour empêcher les « fuites » du rayonnement, émis par les lampes, vers l'extérieur du séchoir.

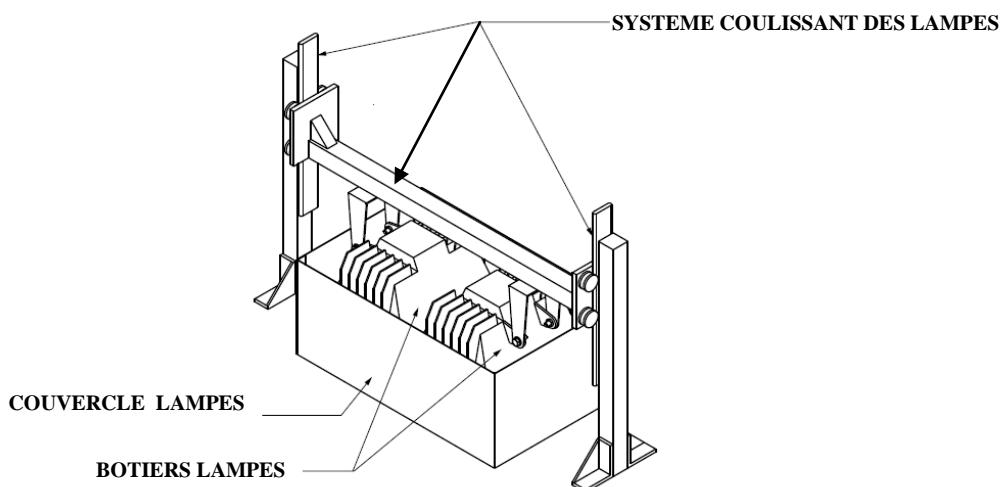


Fig. 3.24 Vue profil de l'unité de rayonnement solaire.

3.2.4.2 Solution technique pour l'unité de séchage

Pour une bonne transmission du flux de rayonnement solaire au produit, une vitre en quartz, de 4 mm d'épaisseur, et ayant un coefficient de transmission des rayonnements solaires de 90%, est placée au dessus de la chambre de séchage entre les lampes et le produit (Fig. 3.25). Une grille métallique de 20 cm de longueur et 10 cm servira de claire de séchage pour le produit et une balance numérique d'une précision de 0,001g et de masse maximale 5kg sera utilisée pour mesurer en continu la masse du produit au cours du séchage. La chambre de séchage est isolée de l'extérieur avec du polystyrène expansé de 3 cm d'épaisseur.

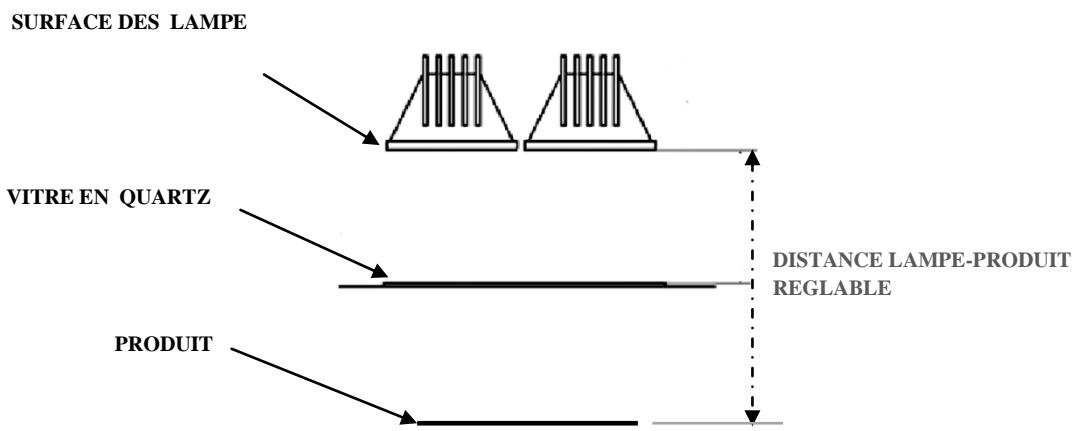


Fig. 3.25 Schéma de la position du produit par rapport aux lampes.

3.2.4.3 Solution technique pour l'unité de chauffage de l'air

L'air dans le séchoir est chauffé grâce à deux résistances électriques, d'une puissance de 1kW chacune, placées en quinconces (Fig. 3.26) dans la conduite d'air, à l'entrée de la chambre de séchage.

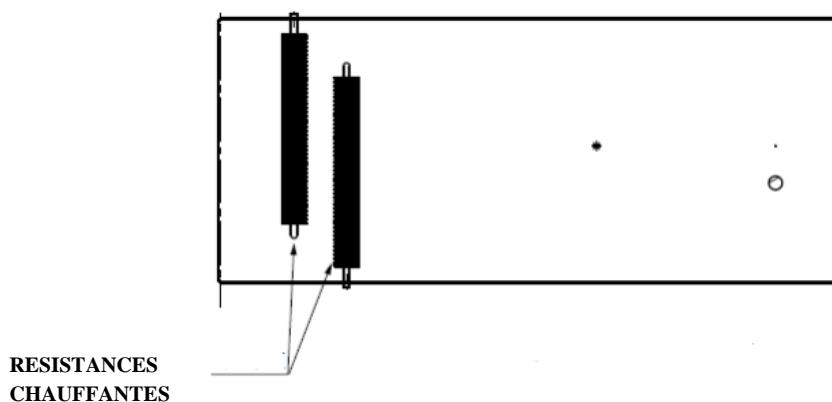


Fig. 3.26 Position des résistances chauffantes dans la conduite d'air.

3.2.4.4 Solution technique pour l'unité de contrôle de l'hygrométrie

Un groupe frigorifique est utilisé pour déshumidifier l'air par condensation de l'eau contenue dans l'air sur la surface de l'évaporateur qui est placé dans la conduite (Fig. 3.27). Pour humidifier l'air, on injecte la vapeur d'eau, produite par un générateur de vapeur électrique, dans le séchoir par un orifice dans la conduite d'air (Fig. 3.27).

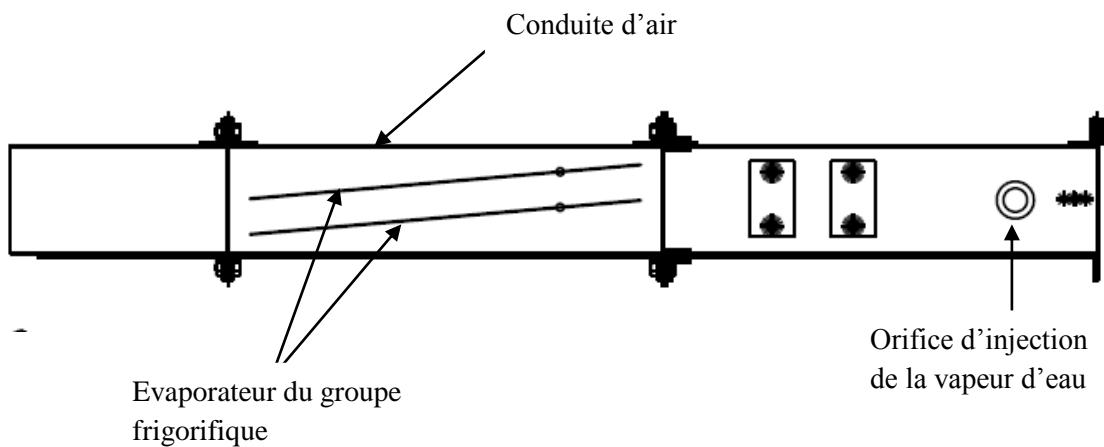


Fig. 3.27 Position des évaporateurs de déshumidification et de l'orifice d'injection de la vapeur d'eau dans la conduite d'air.

3.2.4.5 Solutions techniques pour l'unité aéraulique

Pour avoir une bonne répartition de l'air dans le séchoir, nous avons choisi une conduite d'air de section rectangulaire (Fig. 3.28). Cette conduite est en acier inoxydable de type alimentaire (1mm d'épaisseur), dont l'utilisation est recommandée pour les procédés agro-alimentaires. Un ventilateur tangentiel, de section de soufflage égale à celle de la conduite, est utilisé pour souffler l'air, de façon homogène dans toute la section de la conduite. La vitesse d'air varie entre 0,1m/s et 2m/s, pour être proche des vitesses d'air rencontrées dans les séchoirs solaires.

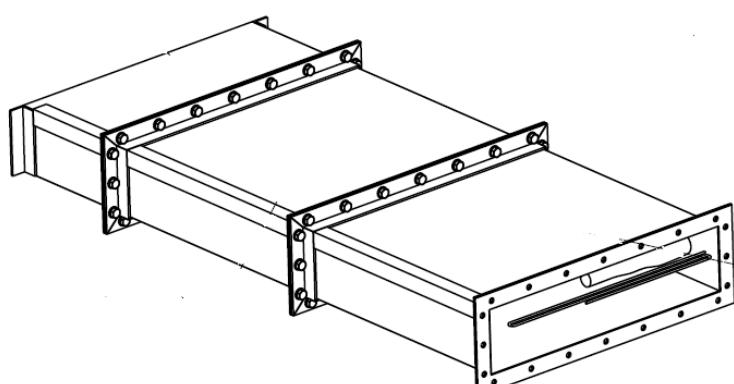


Fig. 3.28 Forme de la conduite d'air du séchoir solaire de laboratoire.

3.2.4.6 Solutions techniques pour l'unité de mesures et de commande

Les capteurs

Le flux de rayonnement solaire sera mesuré par un Pyranomètre stélaire de type FLA628S dont la plage de mesure de rayonnement solaire global est comprise entre 0 W/m^2 et 1500 W/m^2 , pour un spectre de rayonnement compris entre 300 nm et 3000 nm, et une précision de mesure de $\pm 0,1 \text{ W/m}^2$ (cf. Annexe 3.4). Le pyranomètre n'est pas installé dans le séchoir mais il est utilisé en début de séchage pour mesurer le rayonnement solaire émis par les lampes qui reste constant pendant toute la durée de séchage. Des thermocouples de type K (NiCr-Ni) sont utilisés pour mesurer des températures de l'air comprises dans l'intervalle 40 - 1100 °C avec une précision de ± 1 °C. La vitesse de l'air est mesurée par un thermo-anémomètre à fil chaud dont la plage de mesure de vitesses est comprise dans l'intervalle 0,08-2 m/s, avec une précision de 0,02m/s. Un hygromètre à capteur capacitif permet de mesurer les humidités relatives comprises dans l'intervalle 0%-98% avec une précision de $\pm 1\%$.

Les régulateurs

La température et l'humidité de l'air sont régulées par des régulateurs numériques de type PID auto adaptatif. Le réglage de la vitesse de l'air est effectué, en début de séchage, par un potentiomètre; car le risque de perturbation de la vitesse au cours du séchage est faible. Les lampes solaires choisies permettent d'obtenir un rayonnement solaire stable pendant le séchage, comme on le verra au chapitre 5.

L'ordinateur d'aquisition des données et de pilotage du procédé

Compte tenu du nombre de données à traiter (mesure des paramètres de séchage par pas de temps de quelques secondes, durant tout le processus de séchage), il faut un ordinateur qui a une bonne vitesse d'exécution et une bonne capacité mémoire pour gérer ces données. Nous avons choisi ordinateur portable de 4 Go de RAM et 500 Go de capacité de mémoire. Un programme Labview sous environnement windows 7, réalisé au séchoir, permet de piloter automatiquement le procédé via une interface utilisateur. Le programme Labview permet également de visualiser l'évolution des paramètres du procédé en temps réel (Fig. 3.29).

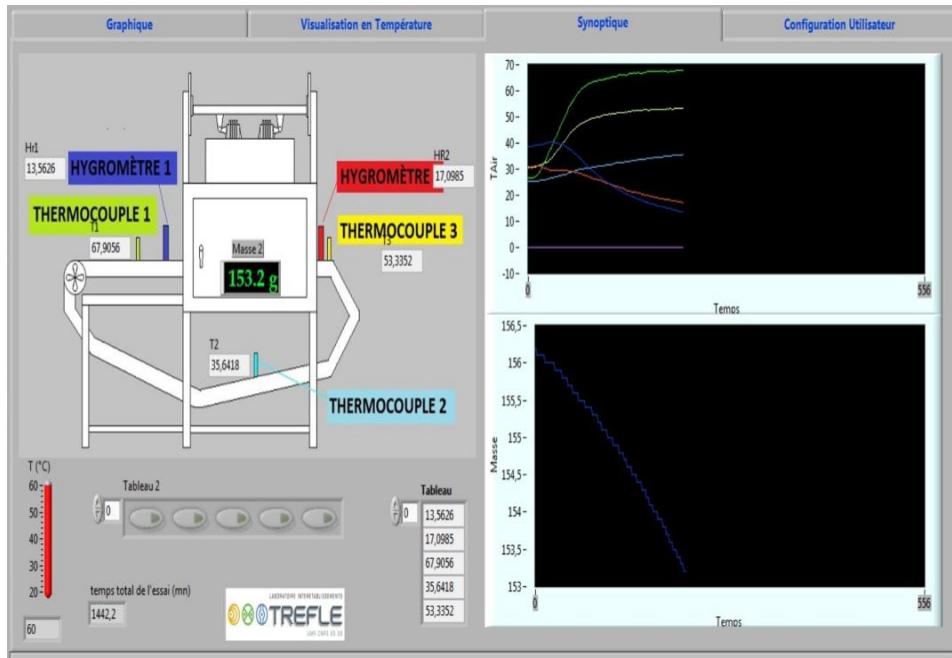


Fig. 3.29 Exemple d'une interface graphique du programme Labview du séchoir solaire de laboratoire

3.2.5. Schémas du séchoir solaire de laboratoire

Les schémas du séchoir solaire local ont été effectués avec le logiciel CATIA version P3 V5R21. La figure 3.30 montre une vue de profil du séchoir qui présente la forme générale du séchoir et met en évidence l'unité des lampes solaires, la chambre de séchage, le ventilateur et la position des capteurs (thermocouples et hygromètre) à l'entrée de la chambre de séchage. La vue arrière du séchoir (Fig. 3.31) montre les deux compresseurs du groupe frigorifique, prévu pour assurer la déshumidification de l'air, et l'unité de mesures et de commande qui comprend tous les composants électriques. L'unité aéraulique du séchoir est présentée sur la figure 3.32 où on peut également voir les positions des capteurs (thermocouples et hygromètres) de sortie de la chambre de séchage, et du ventilateur tangentiel. On peut voir sur la même figure la position de la vitre transparente par rapport à la conduite d'air.

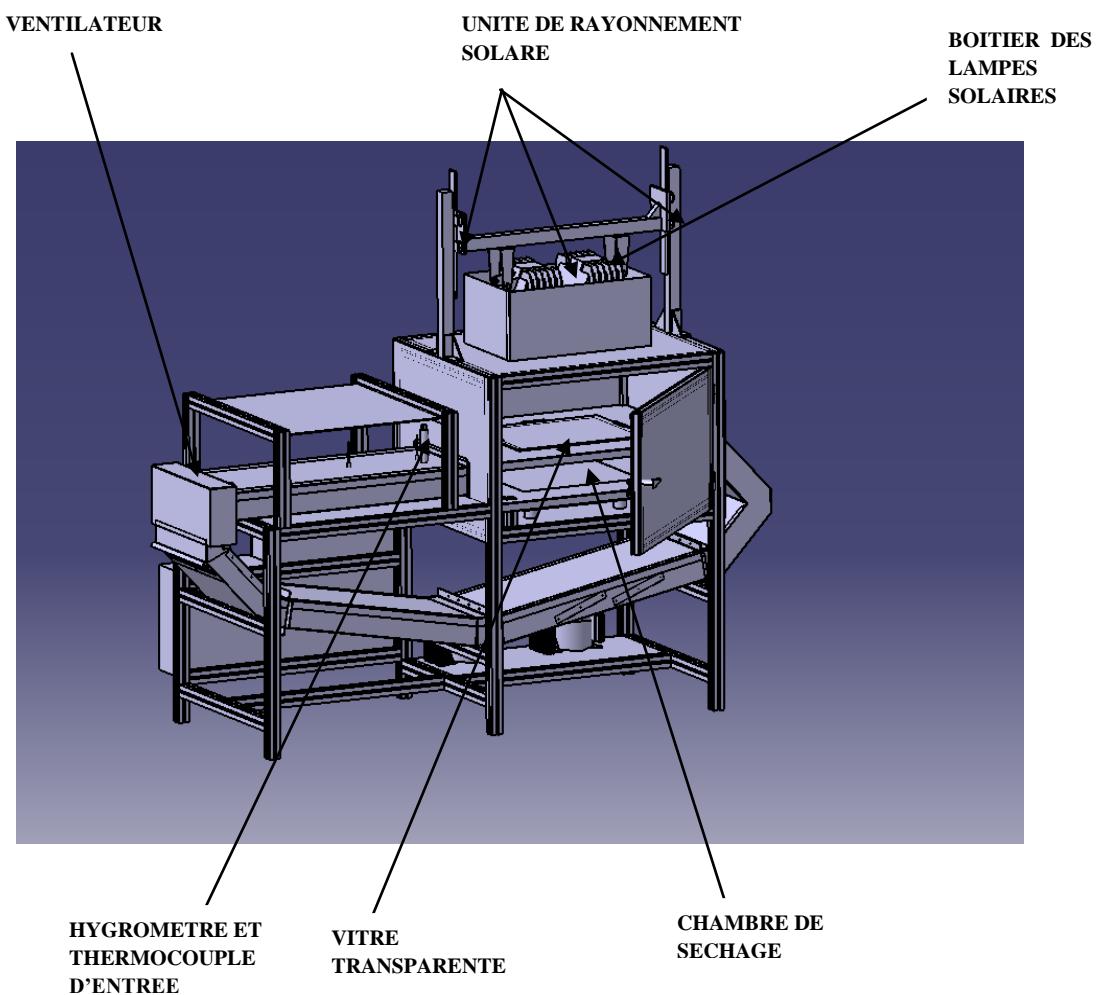


Fig. 3.30 Schéma du séchoir solaire de laboratoire: Vue de profil.

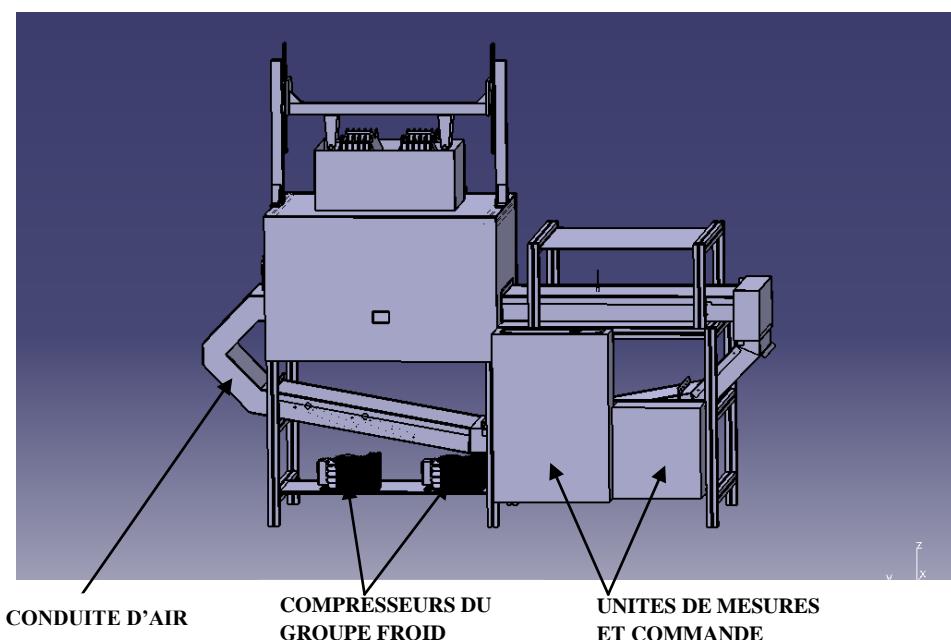


Fig. 3.31 Schéma du séchoir solaire de laboratoire: Vue arrière.

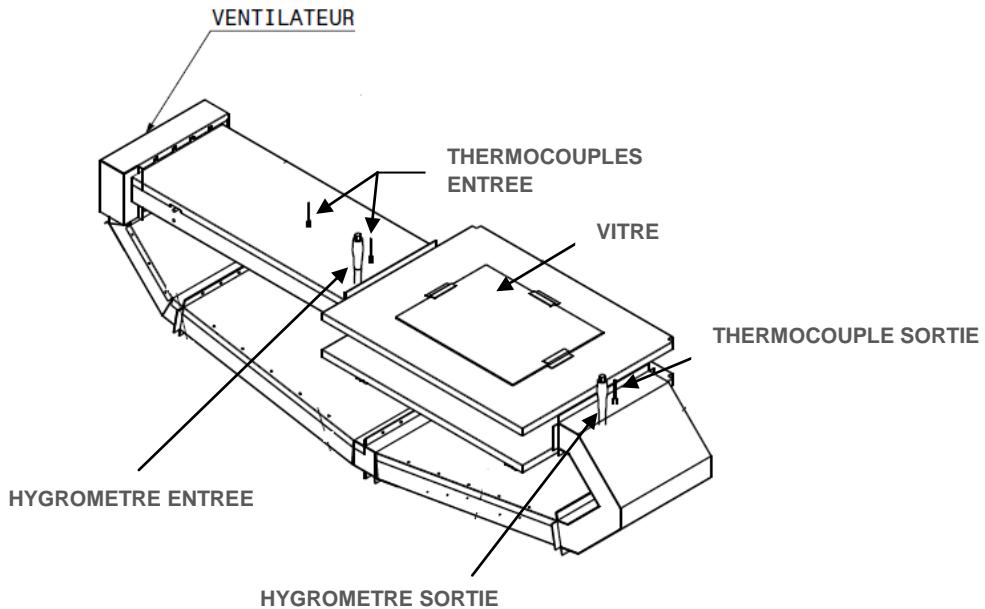


Fig. 3.32 Schéma de l'unité aéraulique du séchoir solaire de laboratoire.

Les figures 3.33, 3.34 et 3.35 donnent les principales dimensions du séchoir. Le séchoir solaire de laboratoire a donc une hauteur de 1970 mm, une longueur de 2471 mm et une largeur de 850 mm. Les dimensions de la chambre de séchage sont les suivantes : 1000 mm de longueur, 800 mm de largeur (Fig.3.32) et 200 mm de hauteur. La vitre transparente, placée dans la chambre de séchage, a une longueur de 520 mm et une largeur 313 mm (Fig. 3.35).

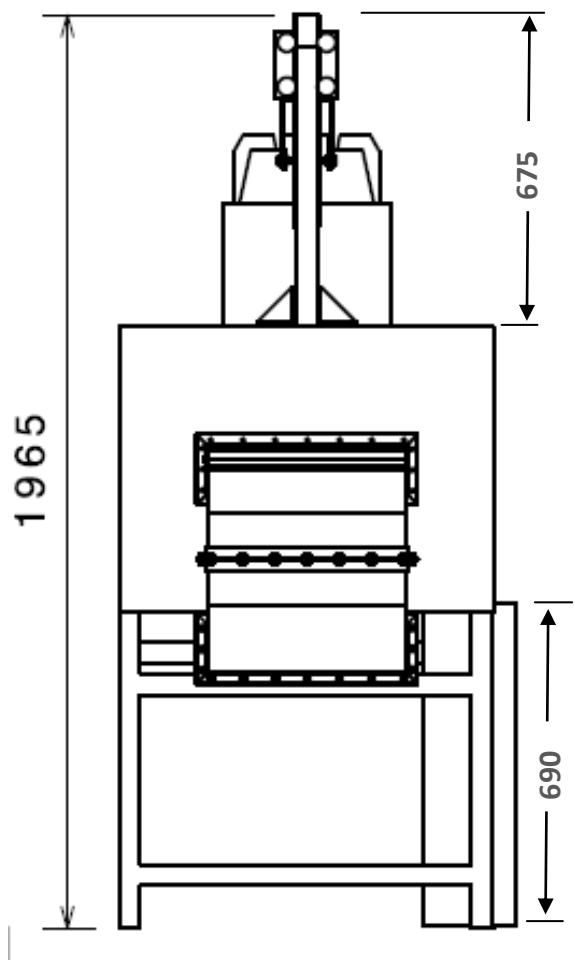


Fig. 3.33 Vue de droite du séchoir solaire de laboratoire.

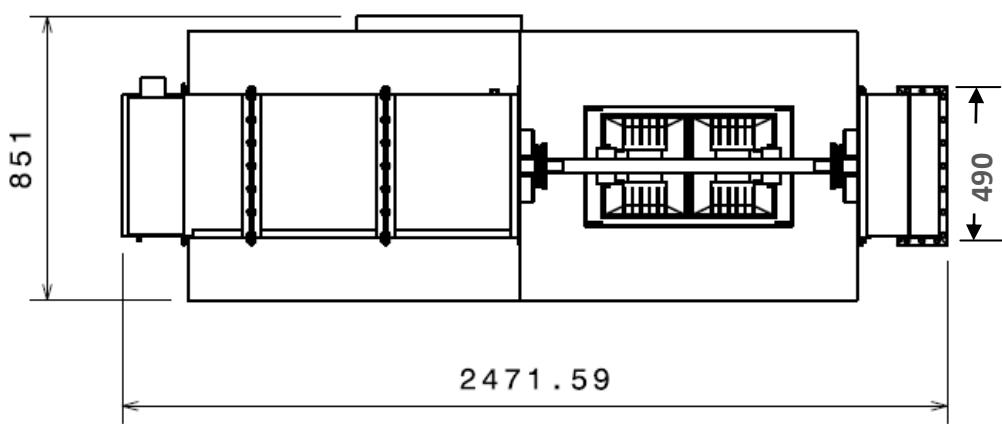


Fig. 3.34 Vue de dessus du séchoir solaire de laboratoire.

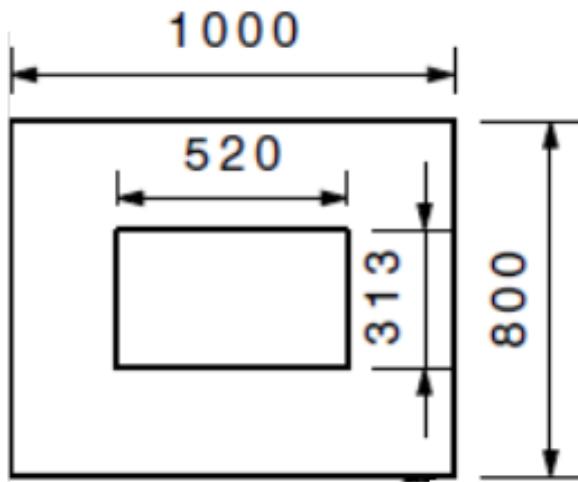


Fig. 3.35 Vue de dessus de la chambre de séchage du séchoir de laboratoire.

3.3.5 Réalisation du séchoir de laboratoire

Le séchoir solaire de laboratoire a été réalisé dans l'atelier de fabrication mécanique de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSA), centre de Bordeaux. Les procédés mécaniques utilisés pour la fabrication du séchoir sont récapitulés en Annexe 3.5. La vitre et le boîtier des lampes ont été commandés et livrés selon les dimensions souhaitées. Il est important de noter que le déshumidificateur, prévu dans la conception n'a pas encore été installé.

Les figures 3.36 et 3.37 montrent les images des montages des résistances chauffantes et du ventilateur tangentiel dans la conduite d'air, respectivement. La conduite d'air est constituée de cinq éléments assemblés par vissage (Fig. 3.38).



Fig. 3.37 Fixation des résistances chauffantes dans la conduite d'air



Fig. 3.36 Introduction du ventilateur tangentiel dans la conduite d'air

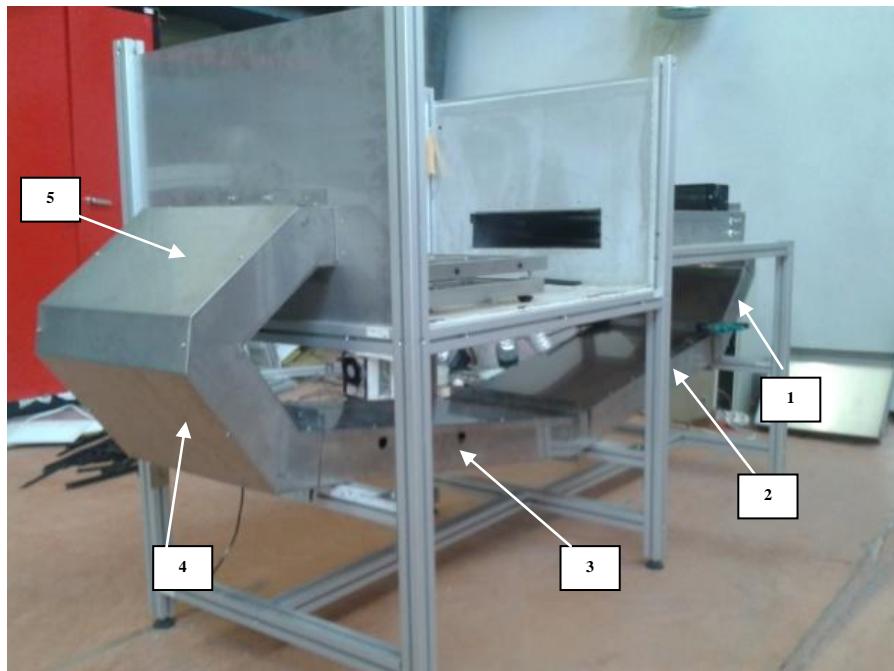


Fig. 3.38 Assemblage de la conduite d'air du séchoir solaire de laboratoire

Les photos du séchoir entièrement réalisé sont présentées sur les figures 3.39, 3.40 et 3.41. La figure 3.39 montre une photo de la face avant du séchoir, ouvert et en cours de fonctionnement (lampes solaires allumées). Cette photo permet de voir la claire de séchage dans l'unité de séchage ainsi que les bornes de sortie des résistances chauffantes. La figure 3.40 présente la photo de la vue de profil de la face- avant du séchoir, sur laquelle on peut voir l'hygromètre et le thermocouple situé à l'entrée de la chambre de séchage, l'ordinateur de pilotage de procédé et le coffret du ventilateur tangentiel. L'hygromètre et le thermocouple de température d'air à la chambre de séchage, l'isolant en polystyrène de la chambre de séchage, ainsi que l'armoire électrique de commande sont indiqués la figure 3.41, qui présente une photo de la vue de profil de la face-arrière du séchoir.

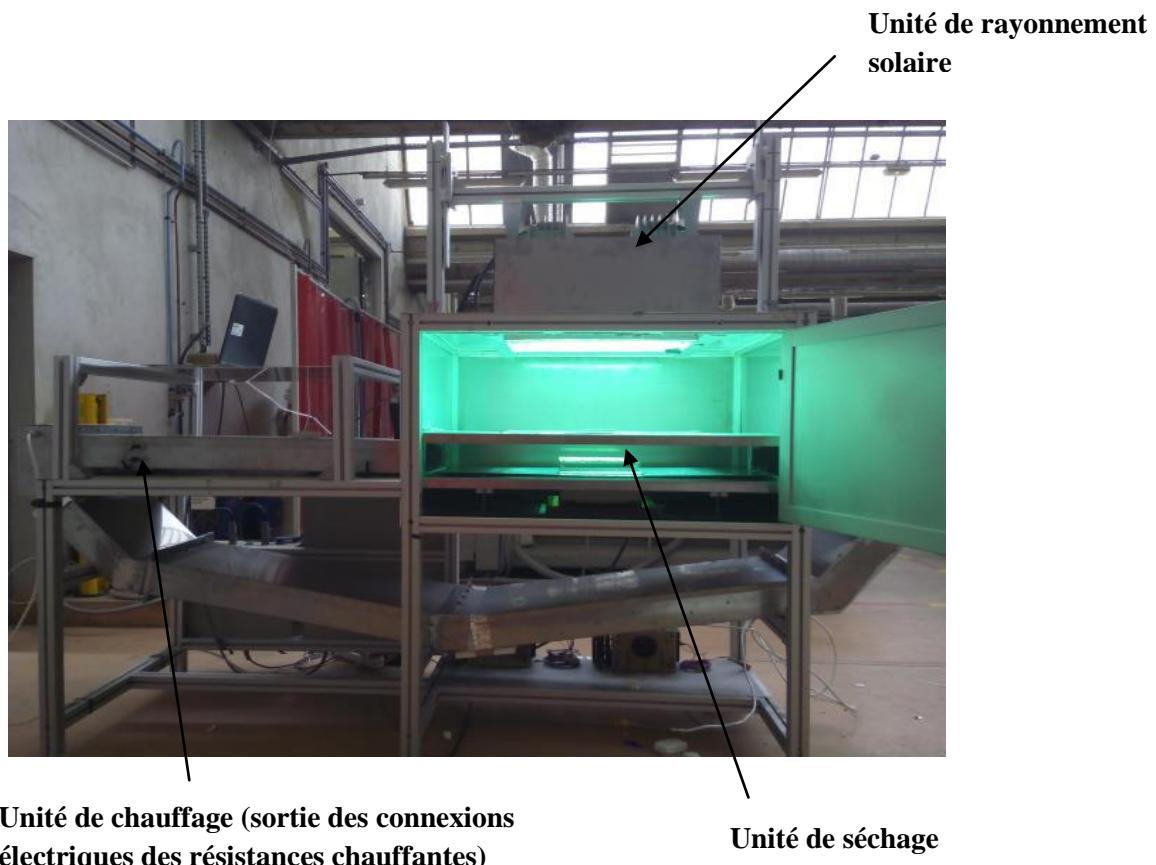


Fig. 3.39 Vue de face-avant du séchoir solaire de laboratoire

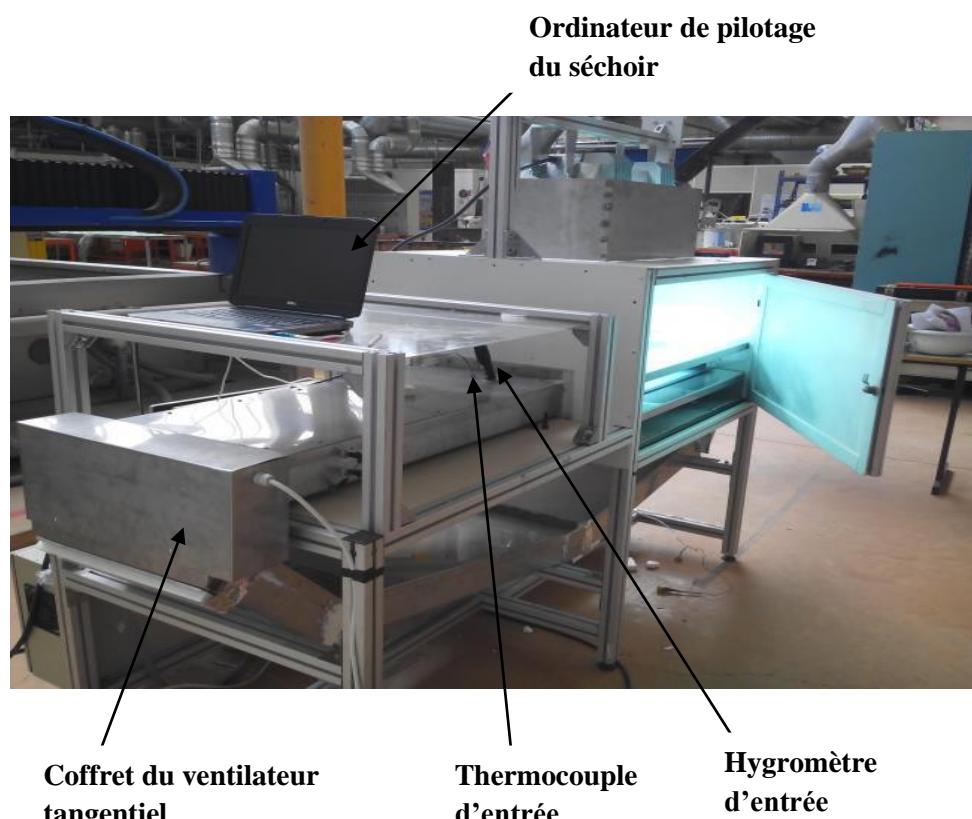


Fig. 3.40 Photo de profil de la face-avant du séchoir solaire de laboratoire



Hygromètre de sortie

Thermocouple de sortie (fil vert)

Isolant polystyrène

Armoire électrique de commande

Fig. 3.41 Vue de profil de la face-arrière du séchoir solaire de laboratoire

CHAPITRE 4. MISE EN PLACE ET VALIDATION EXPERIMENTALE D'UN MODELE DE SECHAGE SOLAIRE DE VIANDE DE BOEUF ADAPTE AU SECHOIR SOLAIRE DE KILICHI

La modélisation du séchage d'un produit est une étape importante pour une bonne compréhension du comportement de ce produit au cours de sa déshydratation. Elle consiste en une mise en équations mathématiques des phénomènes de transferts de chaleur et de matière qui se déroulent pendant le processus de séchage. Le modèle obtenu peut être utilisé pour optimiser l'opération de séchage afin d'améliorer la qualité du produit, la durée de séchage, la consommation d'énergie ou le coût de séchage. La modélisation de séchage d'un produit peut être abordée à deux échelles, comme suit: une modélisation à l'échelle du produit qui porte sur une description, à l'échelle du produit, des processus internes au produit à travers l'étude des isothermes de désorption et des cinétiques de séchage, et une modélisation à l'échelle du procédé qui tient compte des interactions entre le produit et son environnement (séchoir et milieu extérieur). La modélisation à l'échelle du produit permet de déterminer les caractéristiques hygroscopiques du produit et la réponse de celui-ci à une sollicitation thermique extérieure, qui sont utilisées dans la modélisation à l'échelle du procédé.

La modélisation d'un procédé de séchage solaire amène à faire intervenir les conditions météorologiques dans le modèle. En effet celles-ci varient pendant le procédé de séchage et dépendent de la localité géographique et des saisons. On utilise généralement des modèles empiriques pour déterminer l'ensoleillement dans une localité et une date données (cf. paragraphe 1.5.3 du chapitre 1). En plus des caractéristiques hygroscopiques du produit et des conditions météorologiques, le modèle à l'échelle du procédé prend en compte le comportement thermique du séchoir. La figure 4.1 présente le schéma de principe de la modélisation à l'échelle du procédé.

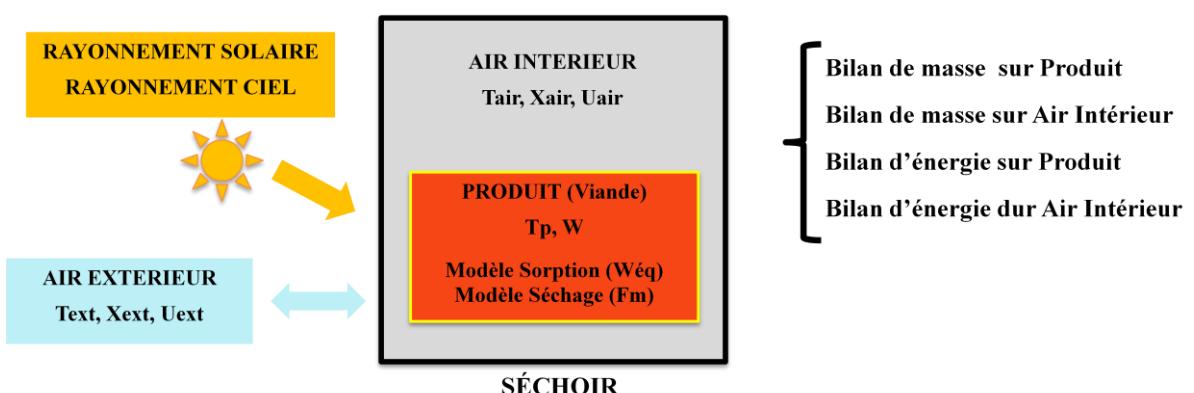


Fig. 4.1 Schéma de principe de la modélisation à l'échelle procédé.

Dans ce chapitre nous présentons une modélisation du séchage solaire de la viande de bœuf adapté au séchoir solaire de *Kilichi* (mis en place au Cameroun) et la validation de celle-ci dans un contexte de pays tropical. Nous présentons également la démarche de modélisation de la vitesse de l'air ainsi que la modélisation des flux de chaleur dans ce séchoir.

4.1 Modélisation du séchage solaire de la viande de bœuf adapté au séchoir solaire de *Kilichi*

4.1.1 Hypothèses de la modélisation

Les hypothèses de modélisation du séchage solaire de la viande de bœuf adapté au séchoir de *Kilichi* sont les suivantes :

- ❖ L'air interne au séchoir est transparent du point de vue radiatif
- ❖ Les champs de température des parois du séchoir et surfaces du produit sont uniformes
- ❖ Le flux solaire diffus est isotrope
- ❖ Les parois vitrées du séchoir sont opaques vis-à-vis du rayonnement IR
- ❖ Les produits (viande) sont opaques aux rayonnements solaires
- ❖ Les réflexions multiples à l'intérieur du séchoir sont négligées
- ❖ Le flux de rayonnement direct arrivant sur les parois vitrées du séchoir, est transmis, par hypothèse simplificatrice, de manière unidirectionnelle, perpendiculairement aux surfaces vitrées traversées.
- ❖ Le flux de rayonnement diffus est arrivant sur les parois vitrées du séchoir, est échangé avec toutes les surfaces réceptrices, par hypothèse simplificatrices, de façon diffuse entre ces surfaces vitrées et les surfaces réceptrices dans le séchoir.
- ❖ Le flux de rayonnement réfléchi est, par hypothèse simplificatrice, est réémis de façon diffuse.

4.1.2 Surfaces d'échanges et volume de contrôle du séchoir solaire de *Kilichi*

Le séchoir a été décomposé en 20 surfaces et quatre volumes de contrôle de séchage (cf. Fig. 4.2 et 4.3).

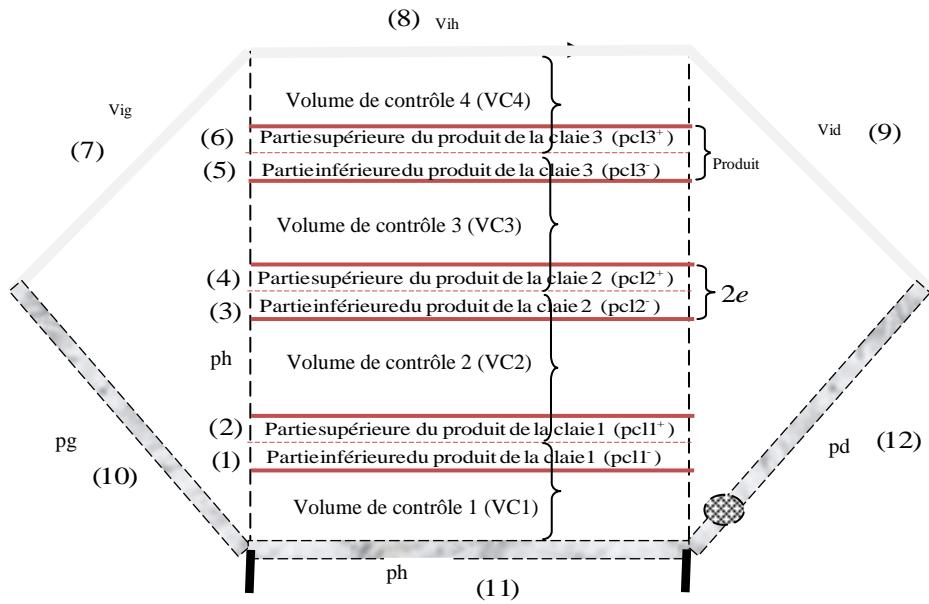


Fig. 4.2 Vue de face intérieure du séchoir solaire de *Kilichi*: décomposition des surfaces du séchoir.

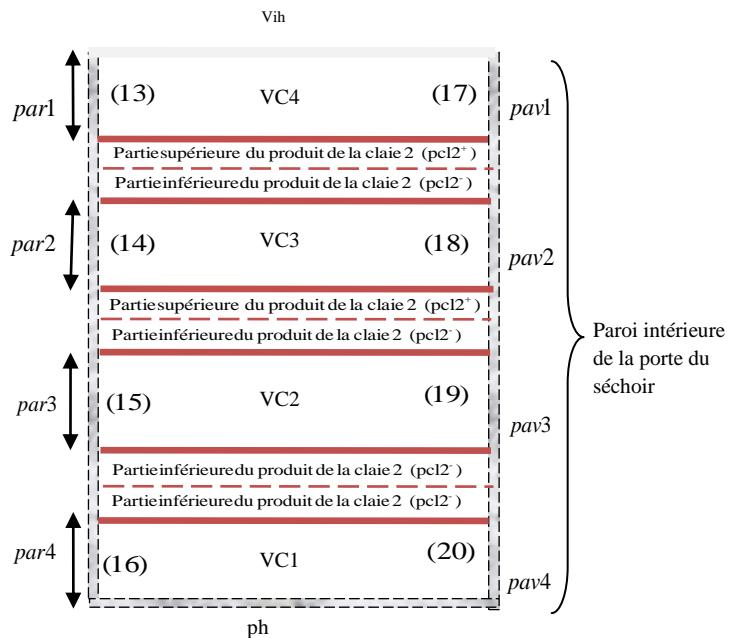


Fig. 4.3 Vue de gauche du séchoir de *Kilichi*: décomposition des parois verticales.

Chacune des claires est constituée d'un encadrement venant rigidifier une grille-support du produit. Ainsi, chacune des faces du produit est soumise à des échanges massiques avec son environnement. Chacune des deux faces de chaque produit se trouvent en lien avec un volume de contrôle spécifique de séchage, ayant ses propres paramètres de séchage et apports d'énergie. Pour mieux modéliser les échanges de chaleur et de matière, nous avons donc divisé l'épaisseur du produit en deux parties égales de même surface et d'épaisseur moitié de l'épaisseur du produit. La partie supérieure sera désignée par le signe «+» et la partie

inférieure par le signe «-». Les deux parties sont considérées comme deux produits séparés dans le séchoir. Chacune des deux parties du produit appartient au volume de contrôle de séchage avec lequel il échange.

Les 20 surfaces du séchoir salaire de *Kilichi* sont les suivantes :

- 6 surfaces de produits à raison de 2 surfaces par claire (produit sur la face supérieure et produit sur la face inférieure de la claire) (Fig.4.2)
- 3 parois vitrées (la vitre gauche (vig), la vitre horizontale (vih) et la vitre droite (vid)) (Fig (4.2)).
- 2 parois inclinées : parois gauche (pd) et parois droite (pd).
- 1 paroi opaque horizontale (ph)
- 4 parois opaques verticales arrière (par1, par2, par3, par4) constituant la partie verticale du séchoir parallèle à la porte du séchoir (Fig. 4.3).
- 4 parois opaques verticales opaques avant (pav1, pav2, pav3, pav4) constituant la porte du séchoir (Fig. 4.3).

4.1.3 Bilan masse dans le séchoir solaire de *Kilichi*

Les échanges de matière entre l'air et les produits se déroulent dans les quatre volumes de contrôle du séchoir. Les bilans de masse sur les produits et sur l'air intérieur du séchoir seront donc effectués sur chaque volume de contrôle; de façon cohérente, le flux de matière total échangé par un produit ou un air sera égal à la somme des flux de matière qu'il a échangés dans les deux volumes de contrôle où il se trouve.

4.1.3.1 Bilan de masse sur les produits

4.1.3.1.1 Equations de bilan

Chaque produit se trouve dans deux volumes de contrôle de séchage que nous nommerons VC dans la suite. Le bilan masse sur un produit est exprimé par les flux masse sur ces deux interfaces. En effet, la partie inférieure du produit (p^-) se trouve dans le VC situé en dessous de la claire, qu'on désignera par VCI (Volume de Contrôle Inférieur), et sa partie supérieure (p^+) se trouve dans le volume de contrôle situé au dessus de la claire que nous désignerons par VCS (Volume de Contrôle Supérieur) (Fig. 4.4). Le VCI de la claire contient le volume occupé par l'air qui circule en dessous de la claire (V_{∞}^-), et le volume de la moitié inférieure du produit sur la claire ($1/2V_p$). Le VCS contient le volume occupé par l'air qui circule au dessus de la claire (V_{∞}^+), et le volume de la moitié supérieure du produit sur la claire ($1/2V_p$). La figure 4.4 illustre les échanges de matière entre le produit et l'air.

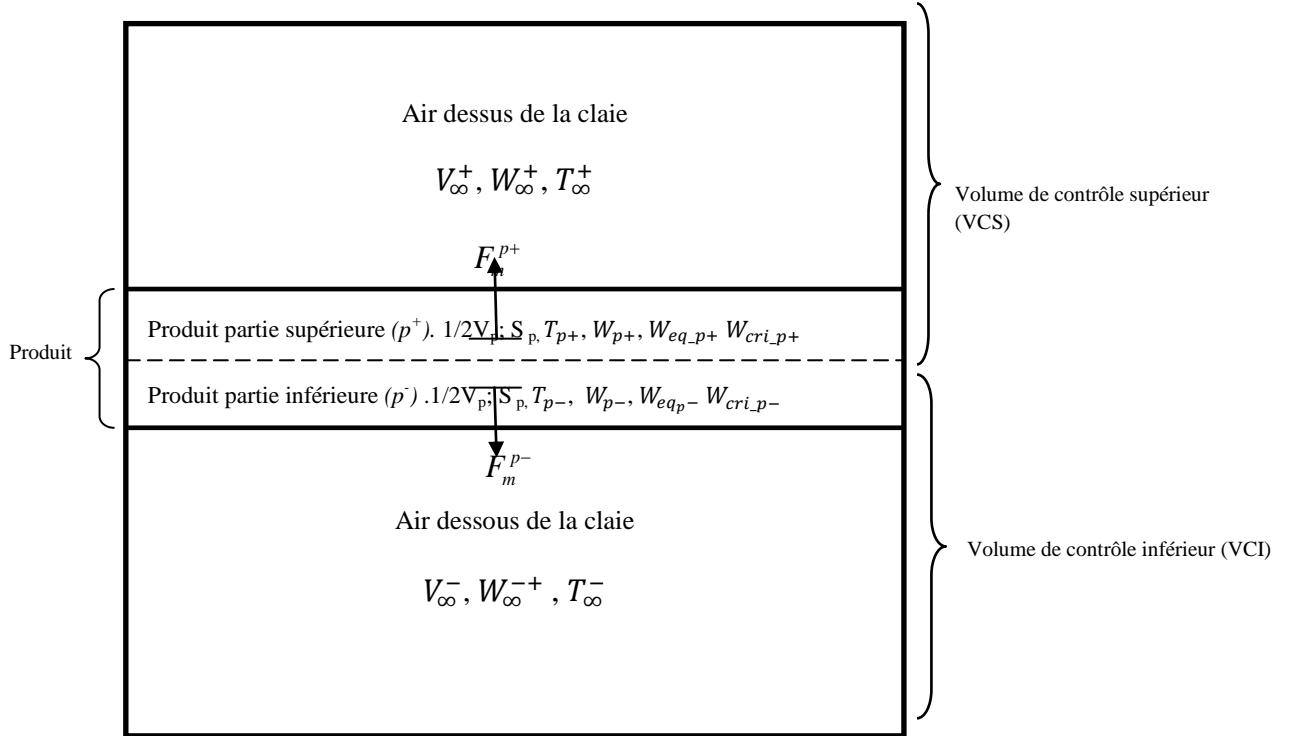


Fig. 4.4 Schématisation des échanges de matière entre le produit et l'air.

Le flux de masse à l'interface produit/air sur la partie supérieure de la claie (F_m^{p+}) est exprimé par l'équation 4.1 et le flux de masse à l'interface produit /air sur la partie inférieure du produit (F_m^{p-}) est donné par l'équation 4.2. Le bilan de masse sur le produit s'exprime en fonction de la somme des deux flux échangés sur ses deux interfaces (Eq. (4.3)).

$$-\frac{\rho_s^a}{\alpha_s} \frac{dW_{p-}}{dt} = F_m^p \quad (4.1)$$

$$\text{où } \frac{dW_p}{dt} = \frac{dW_{p-}}{dt} + \frac{dW_{p+}}{dt} \quad (4.2)$$

$$\text{et } F_m^p = F_m^{p-} + F_m^{p+} \quad (4.3)$$

Dans la relation 4.1, ρ_s^a désigne la masse volumique apparente du produit sec qui est égale au rapport entre la masse sèche m_s et le volume sec V_s (Eq. (4.4)).

$$\rho_s^a = \frac{m_s}{V_s} \quad (4.4)$$

α_s désigne la compacité du produit qui quantifie la surface d'échange dans le volume dans lequel on caractérise les transferts et qui s'exprime comme suit:

$$\alpha_s = \frac{2S_s}{V_s} \quad (4.5)$$

où S_s et V_s désignent la surface sèche et le volume sec du produit. Le coefficient 2 vient du fait qu'on prend en compte la moitié du volume du produit dans chaque volume d'échange.

Dans l'équation 4.2, W_{p-} et W_{p+} désignent les teneurs en eau de la moitié inférieure et de la moitié supérieure du produit, respectivement.

En remplaçant la masse volumique apparente du produit ρ_s^a et la compacité du produit par leurs expressions des équations (4.4) et (4.5), le bilan de masse (Eq. (4.1)) sur un produit s'exprime par:

$$-\frac{m_s}{2S_s} \frac{dW_p}{dt} = F_m^p \quad (4.6)$$

4.1.3.1.2 Rappel de l'expression du flux masse expérimental

Les études expérimentales des cinétiques de séchage de la viande de bœuf présentées dans le paragraphe 2.2.2.1 du chapitre 1, ont montré l'existence d'une phase isenthalpe; ceci a permis de décrire les cinétiques par un modèle de type flux masse isenthalpe (cf. chapitre 2, paragraphe 2.2.2.2.2). Ce modèle est utilisé par la suite pour exprimer l'évolution du flux masse à l'échelle du procédé. Pour ce faire, les échanges convectifs, mais également tous les autres types d'échanges de chaleur sont pris en compte pour calculer la valeur de ce flux masse isenthalpe à chaque instant de transformation du produit dans le séchoir. Ainsi, l'expression du flux masse sur une claire du séchoir est la suivante :

$$F_m^{p-} = F_{mis}^{p-} \left(\frac{W_{p-} - W_{eq_p-}}{W_{cri} - W_{eq_p-}} \right)^{\beta_{p-}} \quad (4.7)$$

$$F_m^{p+} = F_{mis}^{p+} \left(\frac{W_{p+} - W_{eq_p+}}{W_{cri} - W_{eq_p+}} \right)^{\beta_{p+}} \quad (4.8)$$

Dans ces expressions W_{eq_p-} et W_{eq_p+} sont les teneurs en d'équilibre sur la face inférieure et supérieure du produit ; elles sont déterminées par le modèle GAB des isothermes de désorption obtenus (cf. Eq. (1.26) paragraphe 1.6.2 du chapitre 1, et Eqs. (2.24) à (2.26) paragraphe 2.2.1.3 du chapitre 2). La teneur en eau critiques (W_{cri}) a été déterminée expérimentalement et une moyenne de 2.5 (base sèche) a été obtenu (cf. paragraphe 2.2.2.2.1 du chapitre 2). Le paramètre de forme a été modélisé (cf. équation 2.32, paragraphe 2.2.2.2.2 du chapitre 2) et ce modèle permet de calculer les valeurs des paramètres de forme des cinétiques des produits (β_{p+} et β_{p-}).

4.1.3.1.3 Modélisation des flux-masse isenthalpe

Comme indiqué ci-dessus, les flux masse isenthalpes à l'échelle du procédé sur les deux faces du produit sont quant à eux exprimés en fonction de l'ensemble des flux de chaleur reçus par les produits.

$$F_{mis}^{p+} = \frac{1}{\Delta H_V} [h_\infty^{p+} (T_\infty - T_{p+}) + \varphi_{rsd_p+} + \varphi_{rsdiff_p+} + \varphi_{rir_p+}] \quad (4.9)$$

$$F_{mis}^{p-} = \frac{1}{\Delta H_V} [h_\infty^{p-} (T_\infty - T_{p-}) + \varphi_{rsr_p-} + \varphi_{rir_p-}] \quad (4.10)$$

Dans les équations précédentes,

- h_∞^{p-} et h_∞^{p+} désignent les coefficients de convection entre le produit et l'air dans les volumes de contrôle VCI et VCS, respectivement.

- T_∞^- et T_∞^+ sont les températures des airs dans les volumes de contrôle VCI et VCS respectivement.

- T_{p-} et T_{p+} représentent les températures des produits p⁻ et p⁺ respectivement.

- φ_{rsd_p-} et φ_{rsd_p+} désignent les flux de rayonnement solaire direct reçus par les produits p⁻ et p⁺, respectivement.

- φ_{rsdif_p-} et φ_{rsdif_p+} désignent les flux de rayonnement solaire diffus reçus par les produits p⁻ et p⁺.

- φ_{rsr_p-} et φ_{rsr_p+} sont les flux de rayonnement solaires réfléchis sur les produits p⁻ et p⁺, respectivement.

- φ_{rir_p-} et φ_{rir_p+} désignent les flux de rayonnement infrarouges échangés par les produits p⁻ et p⁺, respectivement.

Les expressions de ces différents flux sont données dans la suite de ce chapitre dans la section portant sur la modélisation des échanges de chaleur dans le séchoir (cf. section 4.1.6).

Les bilans de masse des produits des trois claires sont récapitulés dans le tableau A.4.1 en Annexe 4.1.

4.1.3.2 Bilan masse sur l'air intérieur du séchoir

L'air et les produits contenus dans un VC échangent de la matière au cours du séchage. On distingue deux situations : la situation où l'air est dans un VC où il échange de la matière avec un seul produit (moitié supérieure ou moitié inférieure du produit) (Fig. 4.5) et la situation où l'air est dans un VC où il échange avec deux produits (moitié supérieure d'un produit et moitié inférieure d'un autre produit) (Fig.4.6). La première situation correspond au VC 1 et au VC 4 et la deuxième situation correspond au VC 2 et au VC 3 (cf. Fig. 4.2).

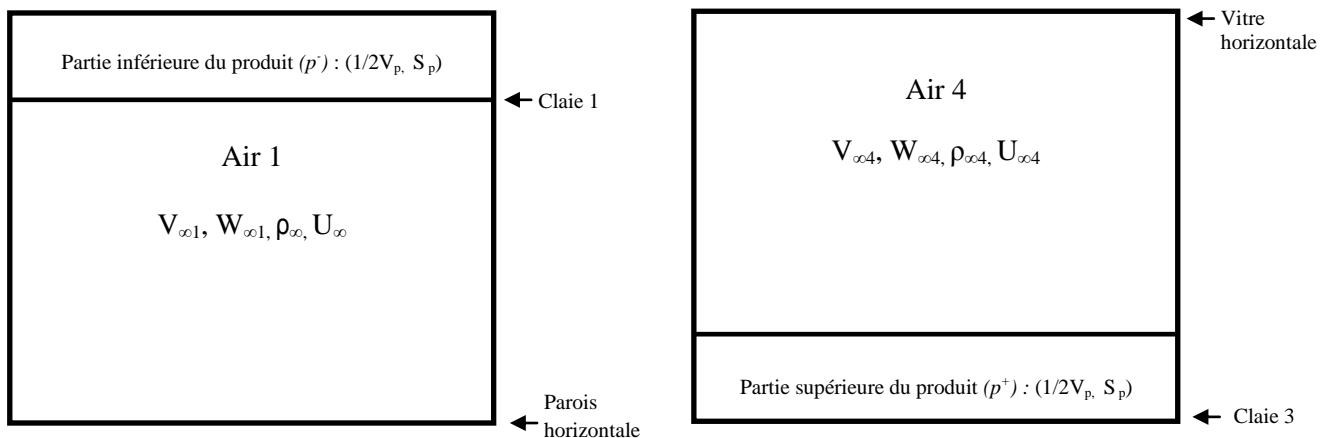


Fig. 4.5 VC où l'air échange avec 1 produit : (a) cas du VC 1 ; (b) cas du VC 4.

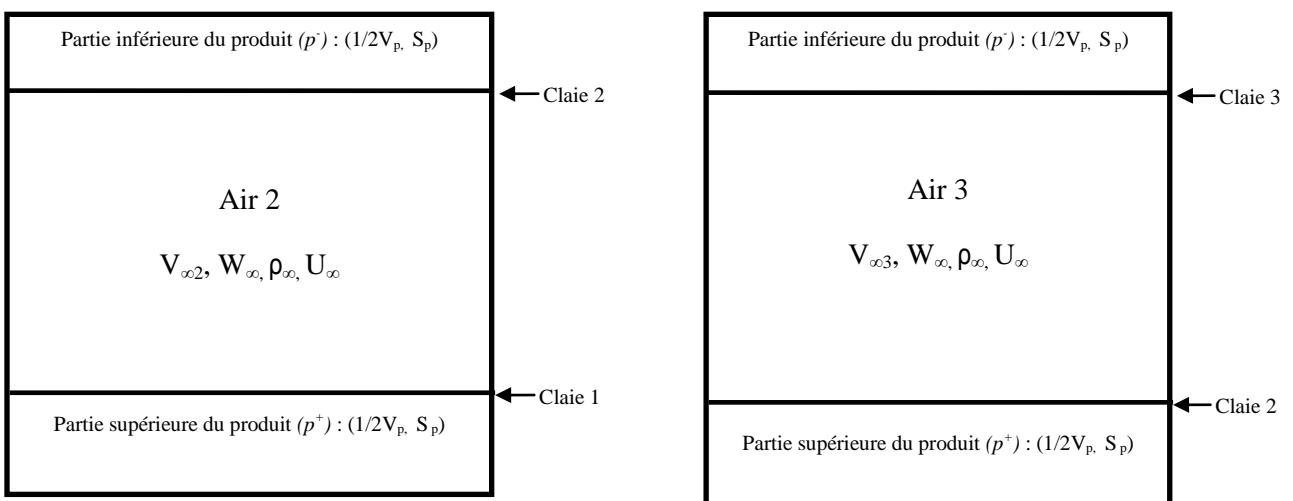


Fig. 4.6 VC où l'air échange avec 2 produits : (a) cas du VC 2 et (b) cas du VC 3.

Le bilan massique sur l'air est donné par la relation 4.11 ci-dessous :

$$\left(\frac{\varepsilon_{\infty i}}{1 - \varepsilon_{\infty i}} \right) \rho_{\infty i} \alpha_{si} \left(\frac{dW_{\infty i}}{dt} + U_{\infty i} \frac{dW_{\infty i}}{ds} \right) = F_m^{\infty i} \quad (4.11)$$

où l'indice i peut prendre les valeurs de 1 à 4 pour désigner l'air 1, 2, 3 ou 4 ou le VC 1, 2, 3 ou 4. $\varepsilon_{\infty i}$ et α_{si} désignent respectivement la porosité volumique de l'air i et la compacité du produit dans le VC i , et sont exprimés par les équations 4.12 et 4.13. $\rho_{\infty i}$, $W_{\infty i}$ et $U_{\infty i}$ désignent respectivement la masse volumique, la teneur en eau et la vitesse de l'air i , respectivement. La variable t désigne le temps et la variable s le trajet linéaire de l'air.

$$\varepsilon_{\infty i} = \begin{cases} \frac{V_{\infty i}}{V_{\infty i} + \frac{1}{2}V_p} & \text{si } i = 1,4 \\ \frac{V_{\infty i}}{V_{\infty i} + V_p} & \text{si } i = 2,3 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\alpha_{si} = \begin{cases} \frac{S_p}{\frac{1}{2}V_p} & \text{si } i = 1,4 \\ \frac{S_p}{V_p} & \text{si } i = 2,3 \end{cases} \quad (4.13)$$

Dans les équations précédentes, S_p , V_p et $V_{\infty i}$ désignent respectivement la surface du produit, le volume du produit et le volume de l'air i dans le volume de contrôle VC.

4.1.4 Bilan d'énergie dans le séchoir solaire de *Kilichi*

Le bilan d'énergie est effectué dans trois types de sous-domaines du séchoir: les produits, l'air intérieur et les parois. On distingue six types de transferts de chaleurs dans le séchoir solaire de *Kilichi* à savoir :

- Le rayonnement solaire direct (φ_{rsd})
- Le rayonnement solaire diffus (φ_{rsdif})
- Le rayonnement solaire réfléchi (φ_{rsr})
- Le rayonnement infrarouge (φ_{rir})
- La convection (φ_{cv})
- La chaleur latente de vaporisation ($\Delta H_v.Fm$)

4.1.4.1 Bilan d'énergie sur les produits

Le bilan d'énergie sur un produit prend en compte l'accumulation thermique du produit, les apports d'énergie au produit (rayonnements solaires directs (φ_{rsd}) et diffus (φ_{rsdif}), convection (φ_{cv}), rayonnement infrarouge (φ_{rir})) et la perte d'énergie liée à la vaporisation de l'eau ($\Delta H_v F_m$). Tout comme pour le bilan de masse, le produit sera divisé en deux parties égales. La face inférieure du produit ne reçoit pas les rayonnements solaires direct et diffus car ceux-ci sont entièrement absorbés par la face supérieure du produit qui est considéré opaque aux rayonnements solaires. Cependant elle reçoit le rayonnement solaire réfléchi par les parois du séchoir (φ_{rsr}). La figure 4.7 ci-dessous illustre le bilan d'énergie sur le produit.

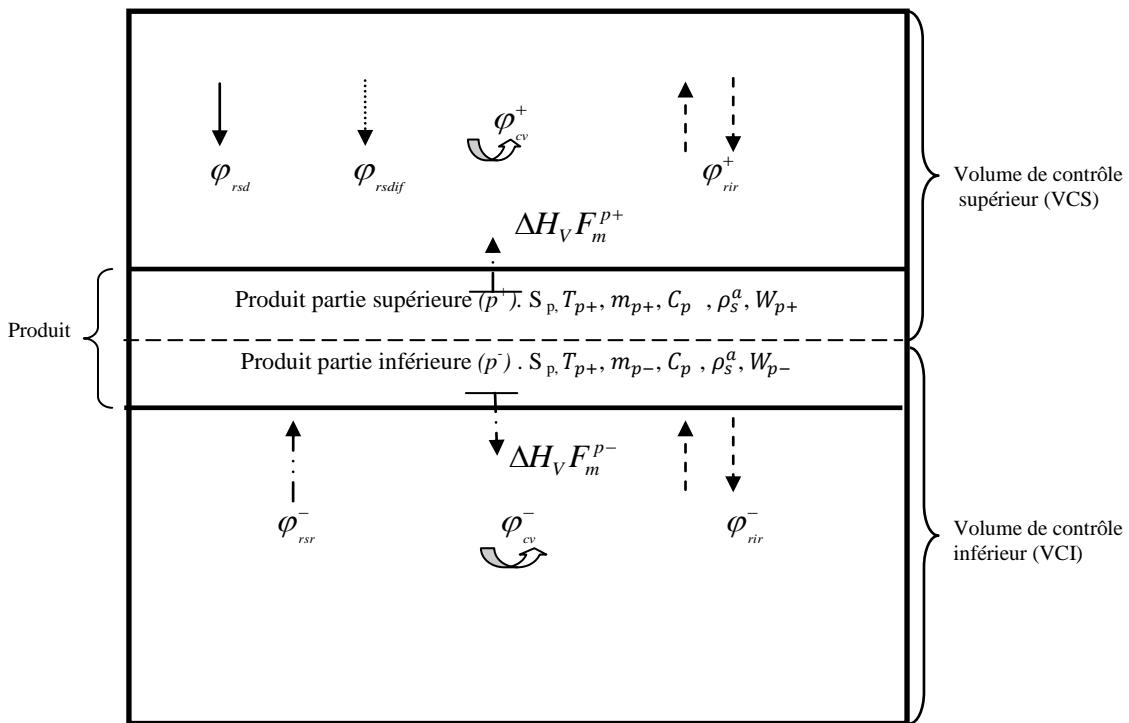


Fig. 4.7 Bilan d'énergie sur un produit : représentation schématique.

Nous distinguons ci-dessus les parties supérieures et inférieures du produit considéré, par l'écriture d'énergie.

-Bilan d'énergie sur la partie supérieure d'un produit

Le bilan d'énergie sur la partie supérieure du produit est exprimé par l'équation 4.14.

$$\frac{d(m_{p^+} C_p T_{p^+})}{dt} = (\varphi_{rsd} + \varphi_{rsdif} + \varphi_{rir}^+ + \varphi_{cv}^+ - \Delta H_v F_m^{p^+}) S_p \quad (4.14)$$

où m_{p+} , C_p , T_{p+} désignent la masse, la chaleur massique et la température de la face supérieure du produit. Dans l'équation précédente, d'après la loi d'additivité calorifique, on peut écrire :

$$\begin{aligned} m_{p+}C_p &= m_{sp+}C_{ps} + m_{ep+}C_{pe} \\ &= m_{sp+}(C_{ps} + W_{p+}C_{pe}) \end{aligned} \quad (4.15)$$

où $m_{sp+} = \rho_s^a V_s$ et m_{p+} , m_{sp+} , m_{ep+} et W_{p+} désignent la masse, la masse sèche, la masse d'eau et la teneur en eau de la face supérieure du produit. ρ_s^a , C_p , C_{ps} , C_{pe} , V_s désignent la masse volumique apparente du produit sec (anhydre), la chaleur massique du produit, la chaleur massique du produit sec, la chaleur massique de l'eau et le volume du produit sec, respectivement.

L'équation 4.14 peut donc s'écrire sous la forme :

$$\frac{d[\rho_s^a V_s (C_{ps} + W_{p+} C_{pe}) T_{p+}]}{dt} = (\varphi_{rsd} + \varphi_{rsdif} + \varphi_{rir}^+ + \varphi_{cv}^+ - \Delta H_v F_m^{p+}) S_p \quad (4.16)$$

En supposant que la surface du produit ne varie pas au cours du séchage, on peut alors remplacer la surface du produit S_p par la surface sèche du produit S_s , ce qui permet d'introduire la compacité du produit sec α_s à partir de l'équation 4.5 présentée précédemment. L'équation 4.16 peut donc s'exprimer sous la forme de l'équation 4.17 ci dessous.

$$\frac{d\left[\frac{\rho_s^a}{\alpha_s} (C_{ps} + W_{p+} C_{pe}) T_{p+}\right]}{dt} = \frac{1}{2} (\varphi_{rsd} + \varphi_{rsdif} + \varphi_{rir}^+ + \varphi_{cv}^+ - \Delta H_v F_m^{p+}) \quad (4.17)$$

En posant $C_{ps}^* = C_{ps} + W_p C_{pe}$ la chaleur massique du produit par unité de masse sèche et en remplaçant le flux masse F_m^{p+} par son expression de l'équation 4.1, l'équation bilan d'énergie sur la face supérieure du produit s'écrit finalement:

$$\frac{\rho_s^a}{\alpha_s} \left[\frac{d}{dt} (C_{ps}^* T_{p+}) - \frac{\Delta H_v}{2} \frac{dW_{p+}}{dt} \right] = \frac{1}{2} (\varphi_{rsd} + \varphi_{rsdif} + \varphi_{rir}^+ + \varphi_{cv}^+) \quad (4.18)$$

-Bilan d'énergie sur la partie inférieure d'un produit

Rappelons que la face inférieure du produit ne reçoit pas directement les rayonnements solaire directe et diffus mais plutôt sous la forme refléchie par les parois du séchoir (voir Fig. 4.8). Ainsi, le bilan d'énergie sur la partie inférieure peut s'écrire :

$$\frac{\rho_s^a}{\alpha_s} \left[\frac{d}{dt} \left(C_{ps}^* T_{p-} \right) - \frac{\Delta H_v}{2} \frac{dW_{p-}}{dt} \right] = \frac{1}{2} (\varphi_{rsr} + \varphi_{rir}^- + \varphi_{cv}^-)$$

(4.19)

où T_p et W_{p-} désignent la température et le teneur en eau de la partie inférieure du produit.

Les bilans d'énergies sur tous les produits du séchoir sont donnés dans le tableau A.4.2 en Annexe 4.2

4.1.4.2 Bilan d'énergie sur l'air humide du séchoir

Le bilan d'énergie sur l'air s'écrit :

$$\frac{d(m_\infty H_{\infty(T_\infty)})}{dt} + U_\infty \frac{d(m_\infty H_{\infty(T_\infty)})}{ds} = -\varphi_\infty S_p + H_{v(T)} F_m^\infty S_P \quad (4.20)$$

où φ_∞ désigne la densité de flux total de chaleur échangé entre l'air et son environnement et $H_{v(T)} F_m^\infty$ correspond au flux d'énergie associé au flux de masse de vapeur généré par le ou les produits en contact avec l'air humide.

$$\text{et } H_{\infty(T_\infty)} = \frac{C_{pas} T_\infty + W_\infty (\Delta H_v + C_{pv} T_{\infty 1})}{1 + W_\infty} \quad (4.21)$$

$$H_{v(T)} = C_{pv} (T - T_{\infty 1}) + \Delta H_v \quad (4.22)$$

En utilisant la relation $m_\infty = \rho_\infty V_\infty$ on obtient :

$$\frac{V_\infty}{S_p} \frac{d(\rho_\infty H_{\infty(T_\infty)})}{dt} + U_\infty \frac{d(\rho_\infty H_{\infty(T_\infty)})}{ds} = -\varphi_\infty + H_{v(T)} F_m^\infty \quad (4.23)$$

En introduisant la compacité α_s et la porosité ε_∞ définis dans les équations (4.12) et (4.13), on obtient l'expression ci-dessous pour tous les volumes de contrôle :

$$\frac{\varepsilon_\infty}{1 - \varepsilon_\infty} \frac{1}{\alpha_s} \left(\frac{d\rho_\infty H_{\infty(T_\infty)}}{dt} + U_\infty \frac{d\rho_\infty H_{\infty(T_\infty)}}{ds} \right) = -\varphi_\infty + H_{v(T)} F_m^\infty \quad (4.24)$$

En tenant compte du fait que $\rho_\infty = \rho_{as} (1 + W_\infty)$, et en négligeant la variation de la masse volumique de l'air sec en fonction de la température, l'équation (4.24) associée aux définitions (4.21) et (4.22) amènent à :

$$\frac{\varepsilon_\infty}{1 - \varepsilon_\infty} \frac{\rho_{as}}{\alpha_s} \frac{d}{dt} ((C_{pas} + W_\infty C_{pv}) T_\infty + W_\infty \Delta H_v) = -\varphi_\infty + H_{v(T)} F_m^\infty \quad (4.25)$$

L'équation (4.25) peut alors être simplifiée en considérant les approximations raisonnables suivantes :

- ΔH_v ne varie pas dans le volume de contrôle
- la chaleur massique de l'air humide par kg d'air sec est définie comme suit :

$$C_{p\infty}^* = C_{pas} + W_\infty C_{pv}$$

Il vient alors :

$$\frac{\varepsilon_\infty}{1-\varepsilon_\infty} \frac{\rho_{as}}{\alpha_s} \left(C_{p\infty}^* \left(\frac{d(T_\infty)}{dt} + U_\infty \frac{d(T_\infty)}{ds} \right) + \Delta H_v \left(\frac{dW_\infty}{dt} + U_\infty \frac{dW_\infty}{ds} \right) \right) = -\varphi_\infty + (C_{pv}(T - T_\infty) + \Delta H_v) F_m^\infty \quad (4.26)$$

En remplaçant F_m^∞ , par son expression présente dans le bilan de masse sur l'air (Eq. (4.11)), l'équation 4.26 devient :

$$\frac{\varepsilon_\infty}{1-\varepsilon_\infty} \frac{\rho_{as}}{\alpha_s} \left(C_{p\infty}^* \left(\frac{d(T_\infty)}{dt} + U_\infty \frac{d(T_\infty)}{ds} \right) \right) = -\varphi_\infty + C_{pv}(T - T_\infty) F_m^\infty \quad (4.27)$$

En général, le terme de chaleur sensible $C_{pv}(T - T_\infty)F_m^\infty$ sur la quantité d'eau évaporée est négligeable par rapport aux échanges thermiques convectifs et radiatifs. En effet, le flux masse est de l'ordre $10^{-4} \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ et le C_{pv} de l'ordre de $10^3 \text{jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ alors que l'ordre de grandeur des coefficients d'échanges convecto-radiatifs est supérieur à l'unité. Ainsi :

$$\frac{\varepsilon_\infty}{1-\varepsilon_\infty} \frac{\rho_{as}}{\alpha_s} \left(C_{p\infty}^* \left(\frac{d(T_\infty)}{dt} + U_\infty \frac{d(T_\infty)}{ds} \right) \right) = -\varphi_\infty \quad (4.28)$$

Les bilans d'énergie de l'air dans les 4 VC sont récapitulés dans le Tableau A 4.3 en Annexe 4.3.

4.1.4.3 Bilan d'énergie sur les parois du séchoir solaire de Kilichi

Nous avons regroupé dans le sous-domaine «parois du séchoir» toutes les vitres, la paroi horizontale, les parois inclinées et les parois verticales arrière et avant du séchoir (voir paragraphe 4.1.2). La figure 4.8 illustre le bilan d'énergie sur quelques éléments du sous-domaine parois (vitres, paroi horizontale et parois inclinées). Dans cette figure, φ_{rsd} et φ_{rsdif} désignent les flux de rayonnements solaires direct et diffus respectivement, φ_{cv} et φ_{ir} désignent les densités de flux d'échange de chaleur par convection et par rayonnement infrarouge respectivement. Les indices *vig*, *vih*, *vid*, *pg*, *ph* et *pd* désignent la paroi du séchoir sur laquelle les densités de flux correspondant sont échangées. Les expressions explicites de ces flux sont données dans la section 4.1.6 de ce chapitre.

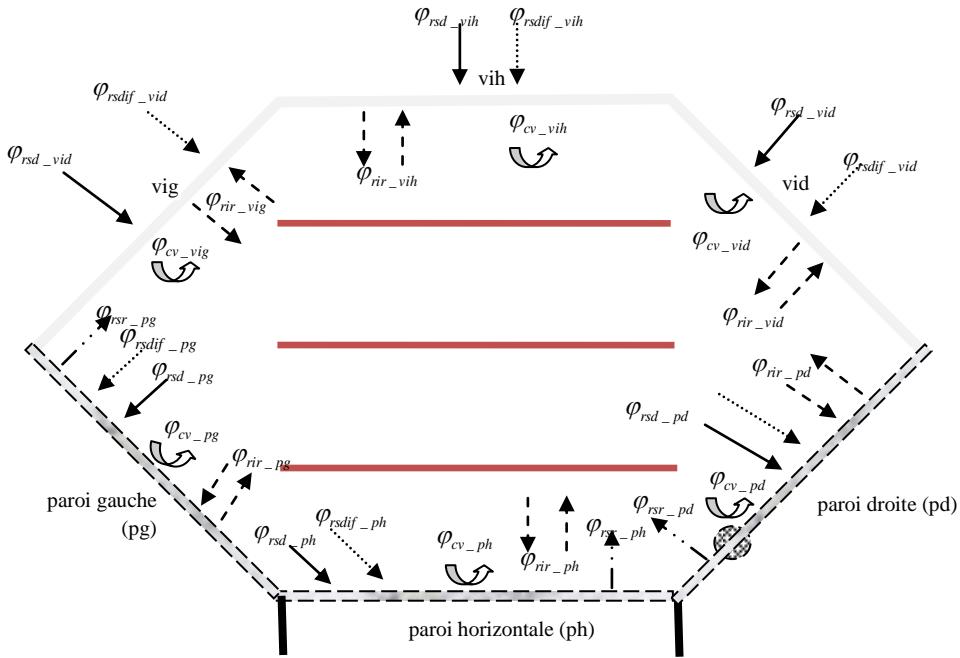


Fig. 4.8 Bilan d'énergie sur les vitres et parois du séchoir de *Kilichi*: → rayonnement solaire direct,→ rayonnement solaire diffus - - → rayonnement solaire infrarouge, ↗ convection, —→ rayonnement solaire réfléchi.

Le bilan d'énergie sur une paroi prend en compte tous les échanges d'énergie entre cette paroi et son environnement ainsi que l'énergie que celle-ci a accumulé. L'équation 4.29 donne le bilan d'énergie sur la vitre horizontale du séchoir. Les équations des bilans sur toutes les parois sont données en Annexes A.4.4.

$$m_{vih} C_{pvi} \frac{dT_{vih}}{dt} = (\varphi_{rsd_vih} + \varphi_{rsdif_vih} + \varphi_{cv_vih} + \varphi_{rir_vih}) S_{vih} \quad (4.29)$$

où m_{vih} , C_{pvi} , T_{vih} et S_{vih} désignent la masse, la chaleur massique, la température et la surface de la vitre horizontale.

4.1.5 Modélisation de la vitesse de l'air dans le séchoir

4.1.5.1 Trajets de l'air et zones de pertes de charge

La vitesse de l'air a été modélisée afin de déterminer sa valeur dans chaque volume de contrôle. Pour cela, le séchoir a été assimilé à un réseau aéraulique dans lequel il y a conservation de débit (pas de fuite d'air durant le trajet). L'air rentre dans le séchoir par l'orifice d'admission et le traverse en passant par les quatres VC pour en sortir par l'orifice d'extraction (Fig. 4.9). Un extracteur d'air est placé sur l'orifice d'échappement pour permettre l'évacuation de l'air chargé d'humidité. Au cours de son parcours entre l'admission

et l'échappement, l'air se subdivise en quatre branches correspondant à quatre trajets suivis par l'air: le trajet parcouru par l'air du VC1 (∞_1), le trajet parcouru par l'air du VC2 (∞_2), le trajet parcouru par l'air du VC3 (∞_3) et le trajet parcouru par l'air du VC4 (∞_4). A l'admission les quatre airs sont réunis, puis se séparent successivement au fil de leurs parcours pour donner naissance aux quatres airs des VC et se réunissent au niveau de l'orifice d'échappement avant de sortir du séchoir.

La figure 4.9 illustre les différents trajets de l'air dans le séchoir ainsi que les différentes zones de pertes de charge singulières (ξ) et régulières (λ). Les premiers chiffres d'indice (1, 2, 3, 4) désigne le trajet et le deuxième chiffre est une numérotation d'ordre pour distinguer les pertes de charge sur un même trajet. Par exemple ξ_{11} désigne la première perte de charge singulière sur le trajet 1 et $\xi_{(21,31,41)}$ désigne la première commune aux trajets 2,3 et 4, entre le point de séparation des 4 trajets d'air et le point supposé à partir duquel les branches 2,3 et 4 se séparent. (Fig 4.9, (a)).

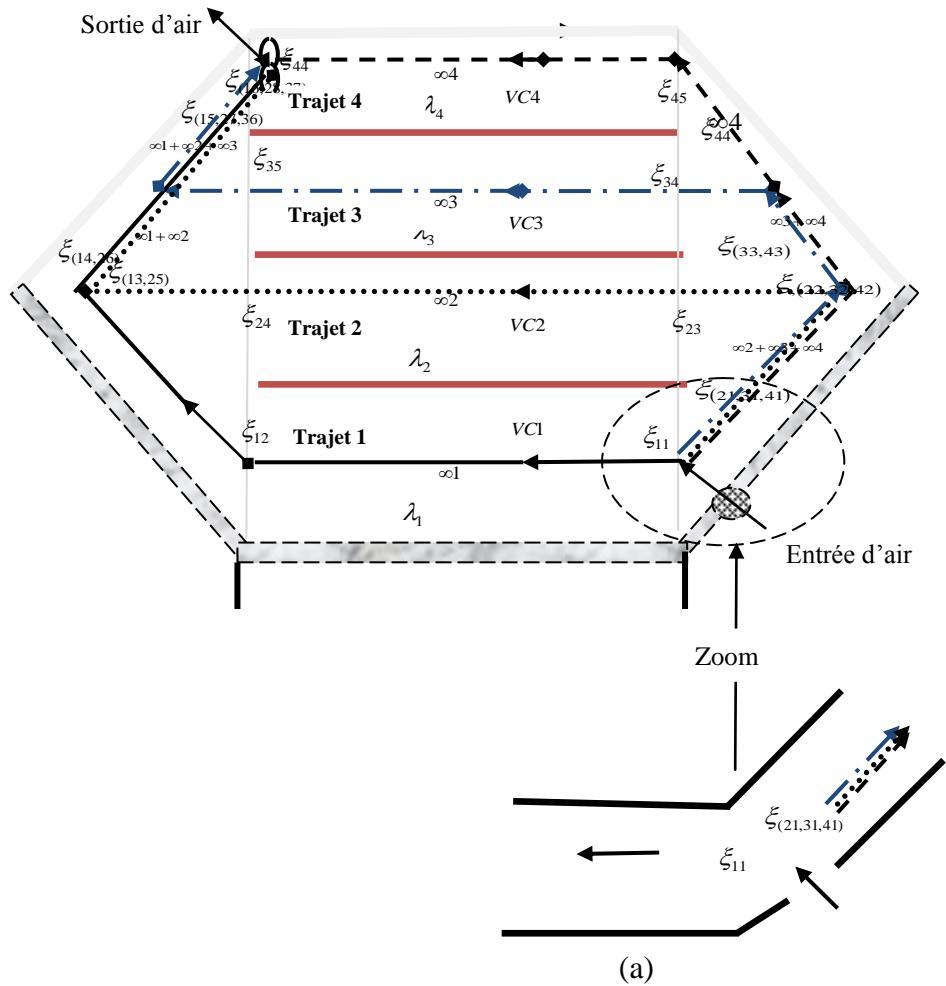


Fig. 4.9 Schéma de circulation de l'air dans le séchoir et débits d'air dans le séchoir : — trajet air 1, Trajet air 2, — · — trajet air 3, - - - - trajet air 4. (a) zone de perte de charge de type séparation de courants.

Pour calculer les pertes de charges, nous avons identifié dans la littérature les typologies géométriques équivalentes à nos différentes zones de pertes de charge afin d'utiliser les formules empiriques des coefficients de pertes de charge correspondant à ce type de configuration. La figure 4.9 (a) illustre un exemple de typologie d'une zone de perte charge assimilée à une séparation des courants de type section d'entrée inférieure à la somme des sections des sorties. Les différentes typologies géométriques équivalentes aux zones de pertes de charges ainsi que les valeurs des coefficients de pertes de charge utilisées pour les déterminer sont listées en Annexe A.4.5.

Les pertes de charges singulières et régulières sont exprimées par les équations classiques (4.30) et (4.31) respectivement.

$$\Delta P_s = \xi \frac{U_\infty^2}{2g} \quad (4.30)$$

$$\Delta P_r = \frac{\lambda L}{D_H} \frac{U_\infty^2}{2g} \quad (4.31)$$

où ξ désigne le coefficient des pertes de charges singulières, U_∞ la vitesse moyenne de l'air sur un trajet, L la longueur de la conduite, D_H le diamètre hydraulique et λ le coefficient de frottement.

Les pertes de charges sur les différents trajets sont exprimées par les relations (4.32) à (4.35). Les équations (4.36) et (4.37) traduisent les hypothèses de conservation de débit et d'égalité des pertes de charge.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_1 = \frac{\xi_{11}(U_{\infty 1})^2}{2g} + \frac{\lambda L_{ph}}{D_{H_{VC1}}} \frac{(U_{\infty 1})^2}{2g} + \frac{\xi_{12}(U_{\infty 1})^2}{2g} + \frac{\xi_{13}(U_{\infty 1})^2}{2g} + \frac{\xi_{14}(U_{\infty 1})^2}{2g} + \frac{\xi_{15}(U_{\infty 1})^2}{2g} + \frac{\xi_{16}(U_{\infty 1})^2}{2g} \end{array} \right. \quad (4.32)$$

$$\left. \Delta P_2 = \frac{\xi_{21}(U_{\infty 2})^2}{2g} + \frac{\xi_{22}(U_{\infty 2})^2}{2g} + \frac{\xi_{23}(U_{\infty 2})^2}{2g} + \frac{\lambda L_{cl1}}{D_{H_{VC2}}} \frac{(U_{\infty 2})^2}{2g} + \frac{\xi_{24}(U_{\infty 2})^2}{2g} + \frac{\xi_{25}(U_{\infty 2})^2}{2g} + \frac{\xi_{26}(U_{\infty 2})^2}{2g} + \frac{\xi_{27}(U_{\infty 2})^2}{2g} + \frac{\xi_{28}(U_{\infty 2})^2}{2g} \right. \quad (4.33)$$

$$\left. \Delta P_3 = \frac{\xi_{31}(U_{\infty 3})^2}{2g} + \frac{\xi_{32}(U_{\infty 3})^2}{2g} + \frac{\xi_{33}(U_{\infty 3})^2}{2g} + \frac{\xi_{34}(U_{\infty 3})^2}{2g} + \frac{\lambda L_{cl3}}{D_{H_{VC3}}} \frac{(U_{\infty 3})^2}{2g} + \frac{\xi_{35}(U_{\infty 3})^2}{2g} + \frac{\xi_{36}(U_{\infty 3})^2}{2g} + \frac{\xi_{37}(U_{\infty 3})^2}{2g} \right. \quad (4.34)$$

$$\left. \Delta P_4 = \frac{\xi_{41}(U_{\infty 4})^2}{2g} + \frac{\xi_{42}(U_{\infty 4})^2}{2g} + \frac{\xi_{43}(U_{\infty 4})^2}{2g} + \frac{\xi_{44}(U_{\infty 4})^2}{2g} + \frac{\lambda L_{vih}}{D_{H_{VC4}}} \frac{(U_{\infty 4})^2}{2g} + \frac{\xi_{45}(U_{\infty 4})^2}{2g} + \frac{\xi_{46}(U_{\infty 4})^2}{2g} \right. \quad (4.35)$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 \quad (4.36)$$

$$q_e = q_{\infty 1} + q_{\infty 2} + q_{\infty 3} + q_{\infty 4} \quad (4.37)$$

Dans les équations (4.32) à (4.35) les inconnus sont les vitesses moyennes sur les quatre trajets du séchoir. Ce système d'équation peut être résolu, pour un débit d'entrée d'air donné, de manière itérative jusqu'à ce que les solutions obtenues satisfassent les contraintes

des équations 4.36 et 4.37. Nous avons utilisé le solveur Excel pour résoudre ce système pour un débit d'air à l'entrée de $0,022\text{m}^3/\text{s}$, correspondant à une vitesse d'entrée de 2m/s et un orifice circulaire d'entrée de l'air de rayon $0,06\text{m}$; la solution du système d'équations (4.32)-(4.37) est alors :

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = 6,9 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

$$U_{\infty 1} = 0,53\text{m/s}; U_{\infty 2} = 0,33\text{m/s}; U_{\infty 3} = 0,27\text{m/s}; U_{\infty 4} = 0,85\text{m/s}.$$

4.1.6 Modélisation des flux de chaleur dans le séchoir solaire

Le comportement thermique du séchoir n'est pas le même selon qu'il s'agisse des transferts de chaleur par rayonnement solaire direct, diffus ou réfléchis, ou par rayonnement infrarouge ou par convection. Pour une meilleure compréhension du comportement global du séchoir vis-à-vis des différents modes de transfert nous allons procéder, dans cette partie, à la modélisation du comportement thermique du séchoir.

4.1.6.1 Modélisation du rayonnement solaire direct dans le séchoir

Le séchoir sera orienté dans la direction Est-Ouest. Ce qui fait un angle γ de (-90°) pour la direction de l'Est et (90°) avec la direction de l'Ouest (cf. paragraphe 1.5.3.3 chapitre 1). Le rayonnement solaire direct reçu par une vitre est transmis perpendiculairement à sa surface (cf. hypothèse paragraphe 4.1.1). Les produits à l'intérieur du séchoir reçoivent ce flux transmis proportionnellement à la surface d'échange entre la vitre et les produits. La géométrie du séchoir permet d'estimer cette surface d'échange, en tenant compte des zones d'ombre portées par la superposition des claies et qui empêchent les flux transmis par les vitres d'arriver sur une partie de la surface du produit. La figure 4.10 illustre la modélisation du rayonnement solaire direct dans le séchoir.

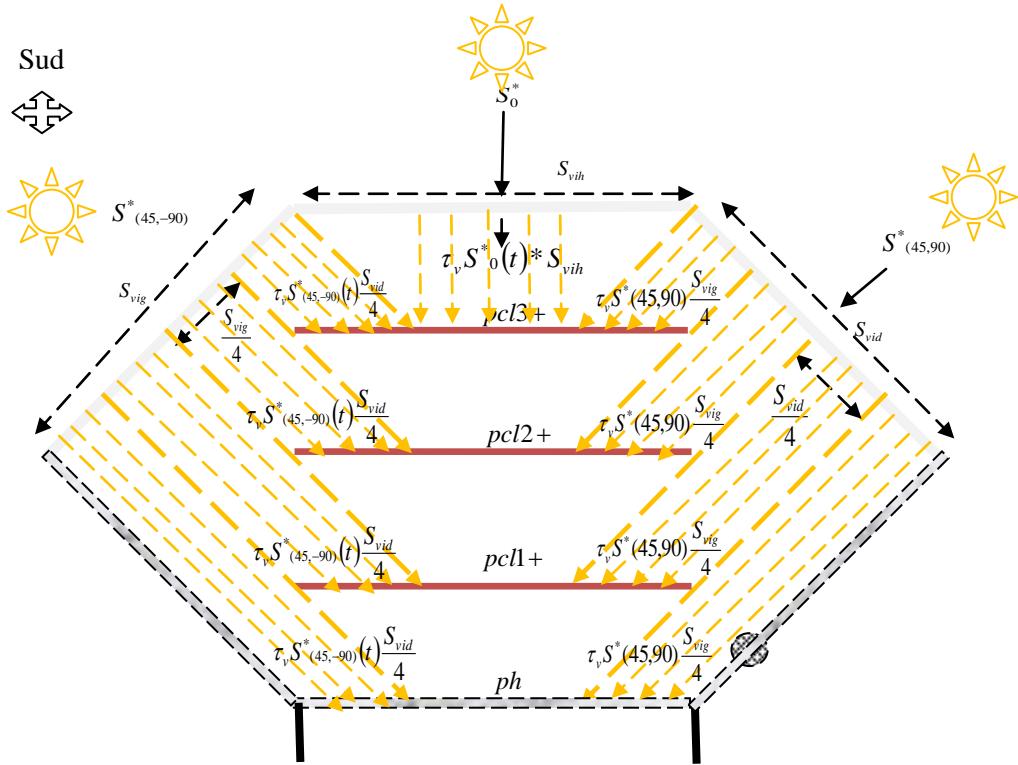


Fig.4.10 Modélisation du rayonnement solaire direct dans le séchoir solaire de *Kilichi* —→ rayonnement solaire direct.

Dans cette figure, $S^*_{(45,-90)}$, $S^*_{(45,90)}$, S^*_0 désignent les flux de rayonnements solaires directs reçus par les vitres gauche, droite et horizontale, respectivement; S , τ_v désignent la surface et le coefficient de transmission, respectivement. Les produits sont désignés par pcl1, pcl2 et pcl3 et les parties supérieure et inférieure du produit sont indiquées par les signes «+» et «-», respectivement. Les indices *vig*, *vid* et *vih* désignent les vitres gauche, droite et horizontale, respectivement.

4.1.6.1.1 Rayonnement solaire direct reçu par les vitres du séchoir

Les vitres gauche (*vig*), droite (*vid*) et horizontale (*vih*) sont inclinées respectivement de 45° , 45° et 0° par rapport à l'horizontale (rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre) et de -90° , 90° et 0° par rapport à la direction du Sud. Les rayonnements solaires directs qu'elles reçoivent au cours de la journée sont donnés par les équations (4.37), (4.38) (4.39), respectivement.

$$S^*_{(45,-90)}(t) = \frac{S^*(t)}{\sin(h)} [\cos(h)\sin(45)\cos(a - 90^\circ) + \sin(h)\cos(45)] \quad (4.37)$$

$$S^*_{(45,90)}(t) = \frac{S^*(t)}{\sin(h)} [\cos(h)\sin(45)\cos(a+90) + \sin(h)\cos(45)] \quad (4.38)$$

$$S^*_0(t) = \frac{S^*(t)}{\sin(h)} [\cos(h)\sin(0)\cos(a+\gamma) + \sin(h)\cos(0)] \quad (4.39)$$

où $S^*(t)$ désigne l'éclairement direct reçu par une surface horizontale (Eq. (1.22) au chapitre 1) et h la hauteur horaire du soleil (Eq. (1.6) au chapitre 1), a l'azimut (Eq. (1.7) au chapitre 1).

4.1.6.1.2 Rayonnement solaire direct reçu par les vitres du séchoir

Chaque produit reçoit, sur sa partie supérieure, les rayonnements solaires directs transmis par les vitres. Les faces inférieures des produits ne peuvent en recevoir car elles sont «cachées» du rayonnement solaire par l'autre moitié de la face supérieure.

Le produit $pcl3^+$ reçoit donc directement le rayonnement solaire transmis par les trois vitres (cf. Fig. 4.10). Il échange avec toute la surface de la vitre horizontale et, indépendamment du temps par hypothèse de modélisation, avec le quart des surfaces des vitres droite et gauche. Le flux de rayonnement solaire direct absorbé par ce produit est donné par la relation ci-dessous:

$$\varphi_{rsd_pcl3^+} S_{cl3} = \tau_v \alpha_{pr} \left(S^*_{(45,-90)}(t) * \frac{S_{vig}}{4} + S^*_0(t) * S_{vih} + S^*_{(45,90)}(t) * \frac{S_{vid}}{4} \right) \quad (4.40)$$

où τ_v désigne le coefficient de transmission de la vitre, α_{pr} le coefficient d'absorption du produit, S_{vig} la surface de la vitre gauche et S_{vid} la surface de vitre droite. Les produits $pcl1^+$ et $pcl2^+$ ne reçoivent que les rayonnements solaires directs transmis par les vitres car le rayonnement solaire transmis par la vitre horizontale est entièrement absorbé par le produit $pcl3^+$ qui est placé au dessus. Le flux de rayonnement solaire direct absorbé par les produits $pcl1^+$ et $pcl2^+$ est donné par l'équation (4.41).

$$\varphi_{rsd_pcl1^+} S_{cl1} = \varphi_{rsd_pcl2^+} S_{cl2} = \tau_v \alpha_{pr} \left(S^*_{(45,-90)}(t) * \frac{S_{vig}}{4} + S^*_{(45,90)}(t) * \frac{S_{vid}}{4} \right) \quad (4.41)$$

4.1.6.1.3 Rayonnement solaire direct transmis aux parois

La paroi horizontale se comporte, vis-à-vis du rayonnement direct transmis par les vitres, comme les produits $pcl1^+$ et $pcl2^+$. En effet, elle reçoit le quart du rayonnement transmis par chacune des vitres gauche et droite.

$$\varphi_{rsdr_ph} S_{ph} = \tau_v \alpha_{pr} \left(S^*_{(45,-90)}(t) * \frac{S_{vig}}{4} + S^*_{(45,90)}(t) * \frac{S_{vid}}{4} \right) \quad (4.42)$$

La paroi droite, inclinée de 45°, ne reçoit aucun rayonnement direct. En effet le flux de rayonnement provenant de la vitre droite est parallèle à cette paroi, le flux de la vitre gauche est absorbé par les produits et le flux de la vitre horizontale est absorbé par le produit pcl3+. La paroi gauche ne reçoit pas de rayonnement direct pour les mêmes raisons que celles évoquées pour la paroi droite.

Les parois avant (pav) (côté porte) et arrière (par) font un angle de 90° avec l'horizontale. Les rayons solaires arrivent sur les surfaces extérieures mais les parties intérieures qui nous intéressent ne reçoivent pas directement les rayons solaires.

4.1.6.2 Modélisation du rayonnement solaire diffus dans le séchoir

Les trois vitres du séchoir reçoivent chacune du rayonnement solaire diffus provenant des particules en suspension dans l'atmosphère. Ce flux dépendra uniquement de l'inclinaison de la vitre par rapport à l'horizontale. Ensuite ces vitres transmettent ce rayonnement aux surfaces intérieures du séchoir. Chaque surface reçoit un flux de rayonnement solaire diffus qui est proportionnel à la surface d'échange avec la vitre et au facteur de forme entre les deux surfaces.

4.1.6.2.1 Flux solaire diffus reçu par les vitres et les produits

La figure 4.11 illustre le comportement du séchoir vis-à-vis du rayonnement solaire diffus et le tableau 4.1 récapitule les équations de flux de rayonnement solaire diffus reçu par les 3 vitres du séchoir et les 3 faces supérieures des produits. $D_{45}^*(t)$, $D_0^*(t)$ désignent les flux de rayonnement solaires directs reçus par les vitres gauche et droite et la vitre horizontale, respectivement ; $F_{i,j}$ désigne le facteur de forme entre les surfaces i et j . Ces derniers dépendent des formes géométriques, des dimensions et des configurations des surfaces et sont calculés à partir des formules classiques de la littérature. Les valeurs des facteurs de formes entre les surfaces du séchoir et leurs formes géométriques sont données en Annexe 4.6. La vitre gauche et la vitre droite peuvent transmettre le rayonnement diffus qu'elles ont reçu proportionnellement à leur portion de surface d'échanges qu'elles ont avec les produits, portions qui dépendent de la position de chaque produit dans le séchoir. En effet du fait de la superposition des claies, comme indiqué précédemment, nous avons construit un modèle qui décompose les vitres gauche et droite en quatre parties correspondant aux surfaces d'échanges (cf. Fig. 4.11):

- vig1, vig2, vid1 et vid2 représentent la moitié des surfaces des vitres gauche et droite et échangent avec les produits des claies 1 (pcl1) et 3 (pcl3).

- vid3 et vig3 représentent les trois quart de surfaces des vitres gauche et droite et échangent avec les produits de la claire 2 (pcl2).

-vig4 et vid4 représentent le quart des surfaces des vitres gauche et droite respectivement et échangent entre avec la paroi opaque horizontale.

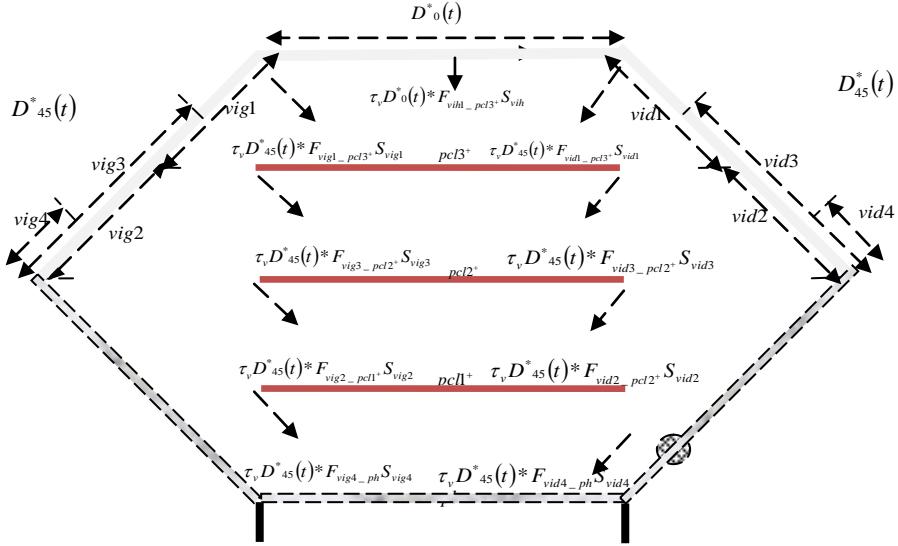


Fig. 4.11 Modélisation du rayonnement solaire diffus dans le séchoir solaire de *Kilichi*.

Tableau 4.1: Equations des flux de rayonnements solaire diffus reçus par les vitres et absorbés par les produits

Elément	Equation	N°
Vitre gauche et droite	$D^*_{45}(t) = \frac{D^*(t)}{2} [1 + \cos(45)]$	(4.43)
Vitre horizontale	$D^*_0(t) = D^*(t)$	(4.44)
Produit de la face supérieure de la claire 1	$\varphi_{rsdf_pcl1^+} S_{cl1} = \tau_v \alpha_{pr} (D^*_{45}(t) * F_{vig2_pcl1^+} * S_{vig2} + D^*_{45}(t) * F_{vid2_pcl1^+} * S_{vid2})$	(4.45)
Produit de la face supérieure de la claire 2	$\varphi_{rsdf_pcl2^+} S_{cl2} = \tau_v \alpha_{pr} (D^*_{45}(t) * F_{vig3_pcl2^+} * S_{vig3} + D^*_{45}(t) * F_{vid3_pcl2^+} * S_{vid3})$	(4.46)
Produit de la face supérieure de la claire 3	$\varphi_{rsdf_pcl3^+} S_{cl3} = \tau_v \alpha_{pr} (D^*_{45}(t) * F_{vig1_pcl3^+} * S_{vig1} + D^*_{45}(t) * F_{vid1_pcl3^+} * S_{vid1} + D^*_0(t) * F_{vih_pcl3^+} * S_{vih})$	(4.47)

Dans le tableau 4.1, $\varphi_{rsdf_pcl1^+}$, $\varphi_{rsdf_pcl2^+}$, $\varphi_{rsdf_pcl3^+}$ désignent les flux de rayonnement solaire diffus absorbés par les produits des faces supérieures des claires 1, 2 et 3, respectivement, τ_v désigne le coefficient de transmission de la vitre et α_{pr} le coefficient d'absorption du produit.

Notons ici que, les parois opaques intérieures du séchoir reçoivent également le rayonnement solaire diffus. Les équations, ainsi que le schéma de modélisation du rayonnement solaire diffus reçu par ces parois, sont présentés en Annexe 4.7

4.1.6.2.2 Modélisation du rayonnement solaire réfléchi dans le séchoir solaire

Par hypothèse simplificatrices de modélisation il n'y a pas de réflexions multiples au sein du séchoir. En d'autre terme les rayons réfléchis arrivent sur les faces inférieures des produits (pcl-) et sont totalement absorbés par ceux-ci (produits assimilés à des corps noirs pour les flux réfléchis par les parois opaques du séchoir). Les flux réfléchis sont supposés unidirectionnels et perpendiculaires aux surfaces réflectrices ; nous ne prenons donc en compte que les flux réfléchis par les parois intérieures du séchoir, en aluminium poli ; d'autre part la décomposition des surfaces d'échanges entre les surfaces émettrice et réceptrice a été faite de la même façon que celles du rayonnement solaire diffus (cf. Fig.4.11). La figure 4.12 illustre la modélisation du rayonnement solaire réfléchi dans le séchoir et le tableau 4.2 récapitule les équations des flux de rayonnement réfléchis absorbés par les produits. φ_{rsr_i} désigne le flux de rayonnement solaire réfléchi par la paroi i , τ_v le coefficient de transmission de la vitre, ρ_p le facteur de réflexion de la paroi, S_i la surface réflectrice i , et F_{i-j} le facteur de forme de forme entre les surface i et j .

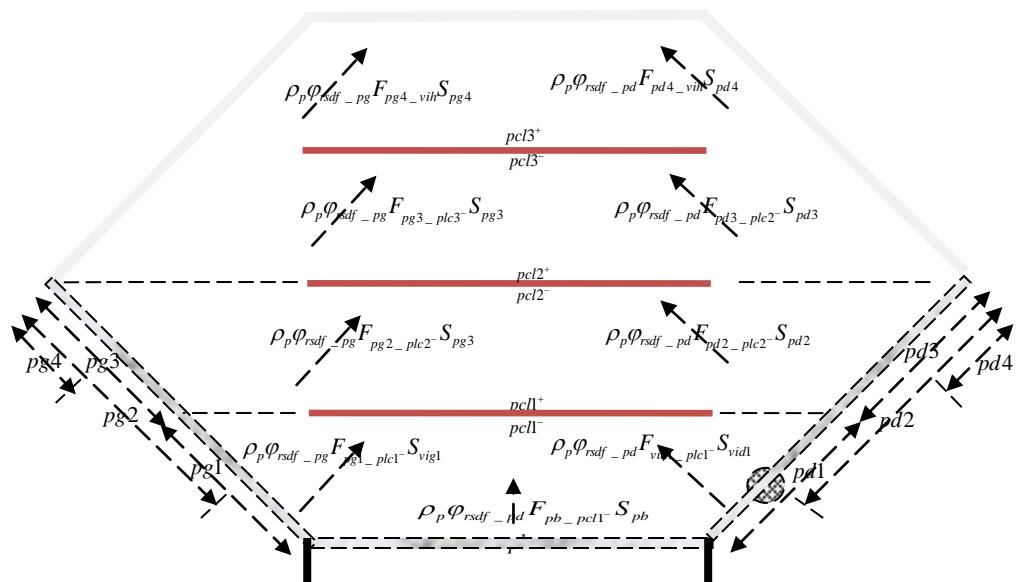


Fig. 4.12 Modélisation du comportement du rayonnement réfléchi dans le séchoir solaire de Kilichi.

Tableau 4.2: Equations de flux de rayonnement solaire réfléchi reçu par les vitres et les produits

Elément	Equation	N°
Produit de la face inférieure de la claiere 1	$\varphi_{rsr_pcl1^-} S_p = \rho_p \varphi_{rsdf_pb} F_{ph_pcl1^-} S_{pb} + \rho_p \varphi_{rsdf_pg} F_{pg1_pcl1^-} S_{pg1} + \rho_p \varphi_{rsdf_pd} F_{pd1_pcl1^-} S_{pd1}$	(4.48)
Produit de la face inférieure de la claiere 2	$\varphi_{rsr_pcl2^-} S_p = \varphi_{rsr_pcl2^-} S_{cl3^-} = \rho_p \varphi_{rsdf_pg} F_{pg3_pcl2^-} S_{pg3} + \rho_p \varphi_{rsdf_pd} F_{pd3_pcl2^-} S_{pd3}$	(4.49)
Produit de la face inférieure de la claiere 3	$\varphi_{rsr_pcl3^-} S_p = \rho_p \varphi_{rsdf_pg} F_{pg2_pcl2^-} S_{pg2} + \rho_p \varphi_{rsdf_pd} F_{pd2_pcl2^-} S_{pd2}$	(4.50)

4.1.6.2.3 Modélisation du rayonnement infrarouge dans le séchoir solaire

Du fait de la différence de température entre les différentes surfaces du séchoir, celles-ci émettent et reçoivent des rayonnements infrarouges avec leur environnement. Le flux par rayonnement infrarouge est exprimé en fonction des radiosités des surfaces qui échangent entre-elles et des facteurs de forme entre celles-ci.

Considérons 2 surfaces i, j qui échangent un flux de rayonnement infrarouge ; alors le flux infrarouge émis par la surface i vers la surface j est donné par :

$$\varphi_{nir,i_j} = \frac{S_i \sigma (T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} + \frac{1}{F_{i_j}} + \frac{S_i}{S_j} * \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j}} \quad (4.51)$$

Les figures 4.13 (a) et (b) illustrent la modélisation du flux rayonnement infrarouge échangés entre les produits et les surfaces qui les entourent dans le séchoir. Les décompositions des surfaces d'échanges des vitres et parois gauche droite utilisées ici ont été présentés dans la figure 4.11 (échanges de rayonnement solaire diffus). Elles sont rappelées sur la figue 4.13 (a). Les parois avant (*pav*) et arrière (*par*) ont été divisées en 4 surfaces d'échanges égales chacune (Fig.4.13 (b)).

En guise d'exemple (cf. Fig. 4.13 (a)), le produit de la face inférieure de la claiere 1 (*pcl1-*) échange des rayonnements infrarouges avec toute la surface de la paroi horizontale du séchoir (*ph*), une partie des parois gauche (*pg1*), droite (*pd1*), avant (*pav 4*) et arrière (*par4*). Le flux total échangé par ce produit est donc la somme des flux qu'il a échangé avec ces surfaces. Le tableau 4.3 présente les équations des flux infrarouges échangés entre les produits avec leur environnement. Les flux échangés par les autres surfaces du séchoir sont présentés en Annexe 4.8.

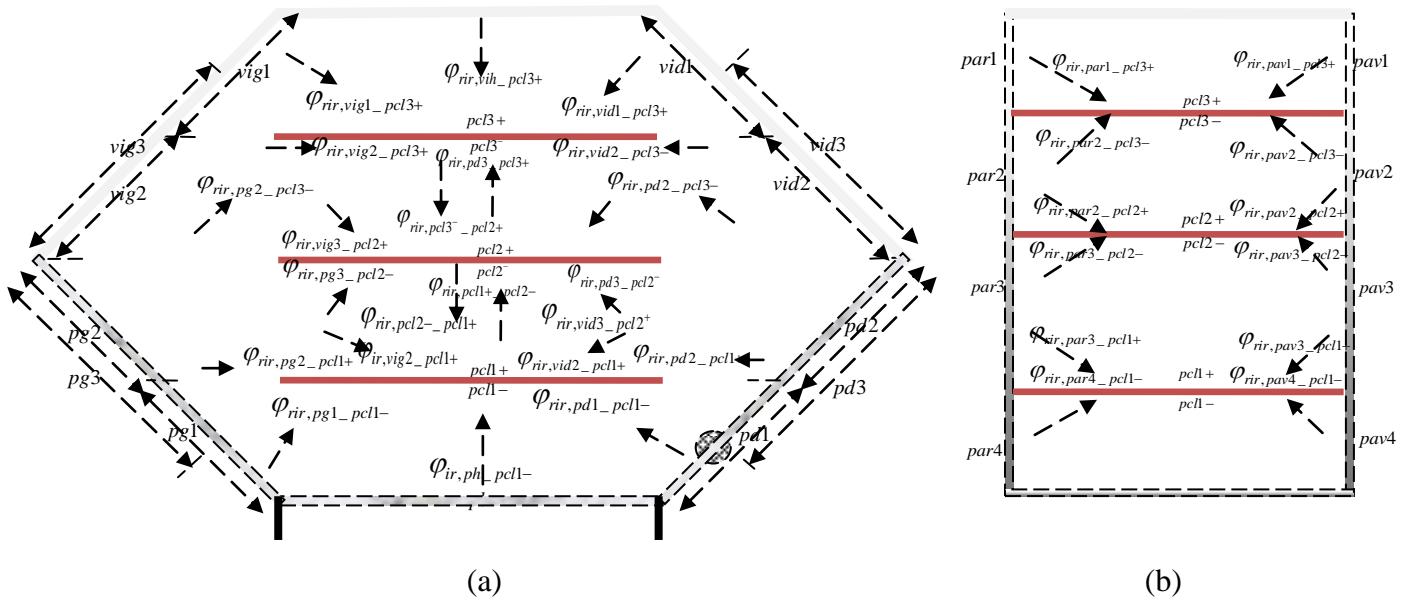


Fig. 4.13 Modélisation du rayonnement infrarouge dans le séchoir solaire local.

Tableau 4.3: Equations des flux de rayonnements infrarouges échangés par les produits

Elément	Equation	N°
Produit de la face inférieure de la claire 1	$\varphi_{rir_pcl1-} = \varphi_{ir,ph_pcl1-} + \varphi_{ir,pg1_pcl1-} + \varphi_{ir,pd1_pcl1-} + \varphi_{ir,pav4_pcl1-} + \varphi_{ir,par4_pcl1-}$	(4.52)
Produit de la face supérieure de la claire 1	$\varphi_{rir_pcl1+} = \varphi_{ir,pcl2-_pcl1+} + \varphi_{ir,pg2_pcl1+} + \varphi_{ir,pd2_pcl1+} + \varphi_{ir,pav3_pcl1+} + \varphi_{ir,par3_pcl1+} + \varphi_{ir,vid2_pcl1+} + \varphi_{ir,vig2_pcl1+}$	(4.53)
Produit de la face inférieure de la claire 2	$\varphi_{rir_pcl2-} = \varphi_{ir,pcl1+_pcl2-} + \varphi_{ir,pg3_pcl2-} + \varphi_{ir,pd3_pcl2-} + \varphi_{ir,pav3_pcl2-} + \varphi_{ir,par3_pcl2-}$	(4.54)
Produit de la face supérieure de la claire 2	$\varphi_{rir_pcl2+} = \varphi_{ir,pcl3-_pcl2+} + \varphi_{ir,pg3_pcl2+} + \varphi_{ir,pd3_pcl2+} + \varphi_{ir,pav2_pcl2+} + \varphi_{ir,par2_pcl2+} + \varphi_{ir,vid3_pcl2+} + \varphi_{ir,vig3_pcl2+}$	(4.55)
Produit de la face inférieure de la claire 3	$\varphi_{rir_pcl3-} = \varphi_{ir,pcl2+_pcl3-} + \varphi_{ir,pg2_pcl3-} + \varphi_{ir,pd2_pcl3-} + \varphi_{ir,pav2_pcl3-} + \varphi_{ir,par2_pcl3-} + \varphi_{ir,vid1_pcl3-} + \varphi_{ir,vih1_pcl3-}$	(4.56)
Produit de la face supérieure de la claire 3	$\varphi_{rir_pcl3+} = \varphi_{ir,pav1_pcl3+} + \varphi_{ir,par1_pcl3+} + \varphi_{ir,vid1_pcl3+} + \varphi_{ir,vig1_pcl3+} + \varphi_{ir,vih1_pcl3+}$	(4.57)

4.1.6.2.4 Modélisation des échanges de chaleurs par convection dans le séchoir solaire

Pendant son parcours, l'air échange par convection avec les surfaces du séchoir (produits, parois et vitres). La figure 4.14 illustre la modélisation des échanges convectifs dans le séchoir. $h_{\infty i}^j$ désigne le coefficient de convection entre l'air i et la surface j et s désigne la position de l'air sur le trajet dont l'origine est l'entrée de l'air dans le séchoir sur chacun

des quatre trajets de cet air dans le séchoir (cf. Fig.4.9). Les coefficients de convection sont obtenus à partir du modèle obtenu au chapitre 2 (cf. Eq. (2.28), paragraphe 2.2.2.2.2 du chapitre 2).

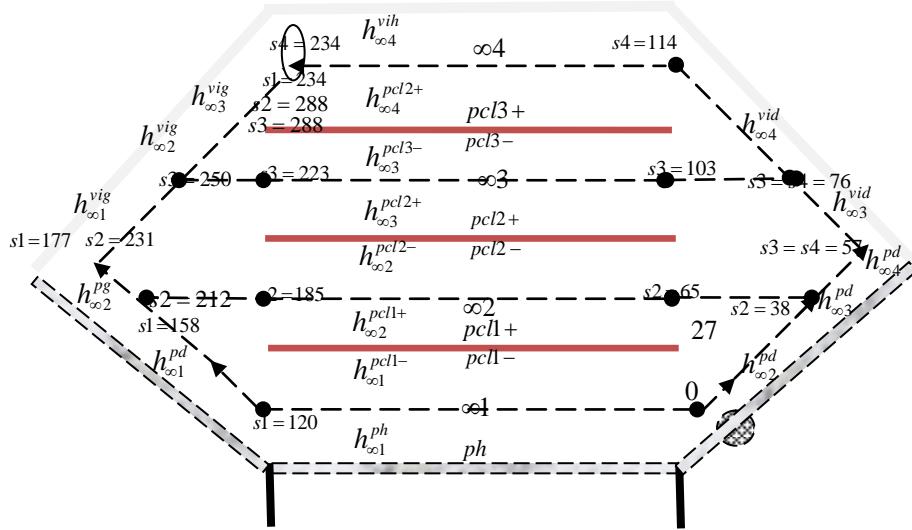


Fig. 4.14 Modélisation des échanges convectifs dans le séchoir solaire local.

- *Echanges de chaleur par convection sur le trajet 1*

L'air 1 échange par convection avec la paroi horizontale (*ph*), le produit (*pcl1-*), la paroi gauche (*pg*) et la vitre gauche (*vig*). Soit *ds* la longueur de la surface d'échange et *l* la largeur du séchoir (800mm), on peut exprimer le flux par convection échangé entre l'air 1 et les surfaces avec lesquels il rentre en contact comme suit:

$$\varphi_{cv_oo1} = \begin{cases} h_{oo1}^{ph}(T_{ph} - T_{oo1}) * ds_1 * l & si \quad s_1 \in [0;120]cm \\ h_{oo1}^{pg}(T_{pg} - T_{oo1}) * ds_1 * l & si \quad s_1 \in [120;177]cm \\ h_{oo1}^{vig}(T_{vig} - T_{oo1}) * ds_1 * l & si \quad s_1 \in [177;234]cm \end{cases} \quad (4.58)$$

$$si \quad s_1 \in [0;120]cm \quad (4.58)$$

$$si \quad s_1 \in [120;177]cm \quad (4.59)$$

$$si \quad s_1 \in [177;234]cm \quad (4.60)$$

- *Echange de chaleur par convection sur le trajet 2*

L'air 2 échange par convection avec la paroi droite (*pd*), les produits *pcl1* et *pcl2*, la paroi gauche (*pg*) et la vitre gauche (*vig*) sur une longueur de trajet 2.

$$\varphi_{cv_oo2} = \begin{cases} h_{oo2}^{pd}(T_{pcl1+} - T_{oo2}) * ds_2 * l & si \quad s_2 \in [0;38]cm \\ h_{oo1}^{pcl1+}(T_{pcl1+} - T_{oo2}) * ds_2 * l & si \quad s_2 \in [38;65]cm \\ h_{oo2}^{pg}(T_{pg} - T_{oo2}) * ds_2 * l & si \quad s_2 \in [65;185]cm \\ h_{oo2}^{vig}(T_{vigg} - T_{oo2}) * ds_2 * l & si \quad s_2 \in [185;231]cm \\ h_{oo2}^{vig}(T_{vigg} - T_{oo2}) * ds_2 * l & si \quad s_2 \in [231;288]cm \end{cases} \quad (4.61)$$

$$si \quad s_2 \in [0;38]cm \quad (4.61)$$

$$si \quad s_2 \in [38;65]cm \quad (4.62)$$

$$si \quad s_2 \in [65;185]cm \quad (4.63)$$

$$si \quad s_2 \in [185;231]cm \quad (4.64)$$

-Echange de chaleur par convection sur le trajet 3

L'air 3 échange avec la paroi droite (pd), la vitre droite (vid), les produits $pcl2+$, et $pcl3^-$ et la vitre gauche sur une longueur de trajet 3.

$$\varphi_{cv_{-\infty 3}} = \begin{cases} h_{\infty 3}^{pd}(T_{pd} - T_{\infty 3}) * ds_3 * l & si \quad s_3 \in [0; 57]cm \\ h_{\infty 3}^{vid}(T_{vid} - T_{\infty 3}) * ds_3 * l & si \quad s_3 \in [57; 76]cm \\ h_{\infty 3}^{pcl2+}(T_{pcl2+} - T_{\infty 3}) * ds_3 * l = h_{\infty 3}^{pcl3-}(T_{pcl3-} - T_{\infty 3}) * ds_3 * l & si \quad s_3 \in [103; 223]cm \\ h_{\infty 3}^{vig}(T_{vig} - T_{\infty 3}) * ds_3 * l & si \quad s_3 \in [250; 288]cm \end{cases}$$

-Echange de chaleur par convection sur le trajet 4

L'air 4 échange par convection avec la paroi droite (*pd*), la vitre droite (*vid*), le produit *pcl3+ds4* et la vitre horizontale (*vih*) sur une longueur de trajet 4.

$$\varphi_{cv_{-\infty 4}} = \begin{cases} h_{\infty 4}^{pd} (T_{pd} - T_{\infty 4})^* ds_4 * l & si \quad s_4 \in [0; 57[cm \\ h_{\infty 4}^{vid} (T_{vid} - T_{\infty 4})^* ds_4 * l & si \quad s_4 \in [57; 114] cm \\ h_{\infty 4}^{pcl3^+} (T_{pcl3^+} - T_{\infty 4})^* ds_4 * l = h_{\infty 4}^{vih} (T_{vih} - T_{\infty 4})^* ds_4 * l & si \quad s_4 \in [114; 234[cm \end{cases} \quad (4.69) \quad (4.70) \quad (4.71)$$

4.1.7 Méthode de résolution des équations du modèle

Nous avons écrit un code numérique sous Matlab pour résoudre les équations du modèle en utilisant la méthode numérique de résolution des équations différentielles de Runge Kutta d'ordre 4. La figure 4.16 récapitule la structure du programme Matlab de résolution des équations du modèle.

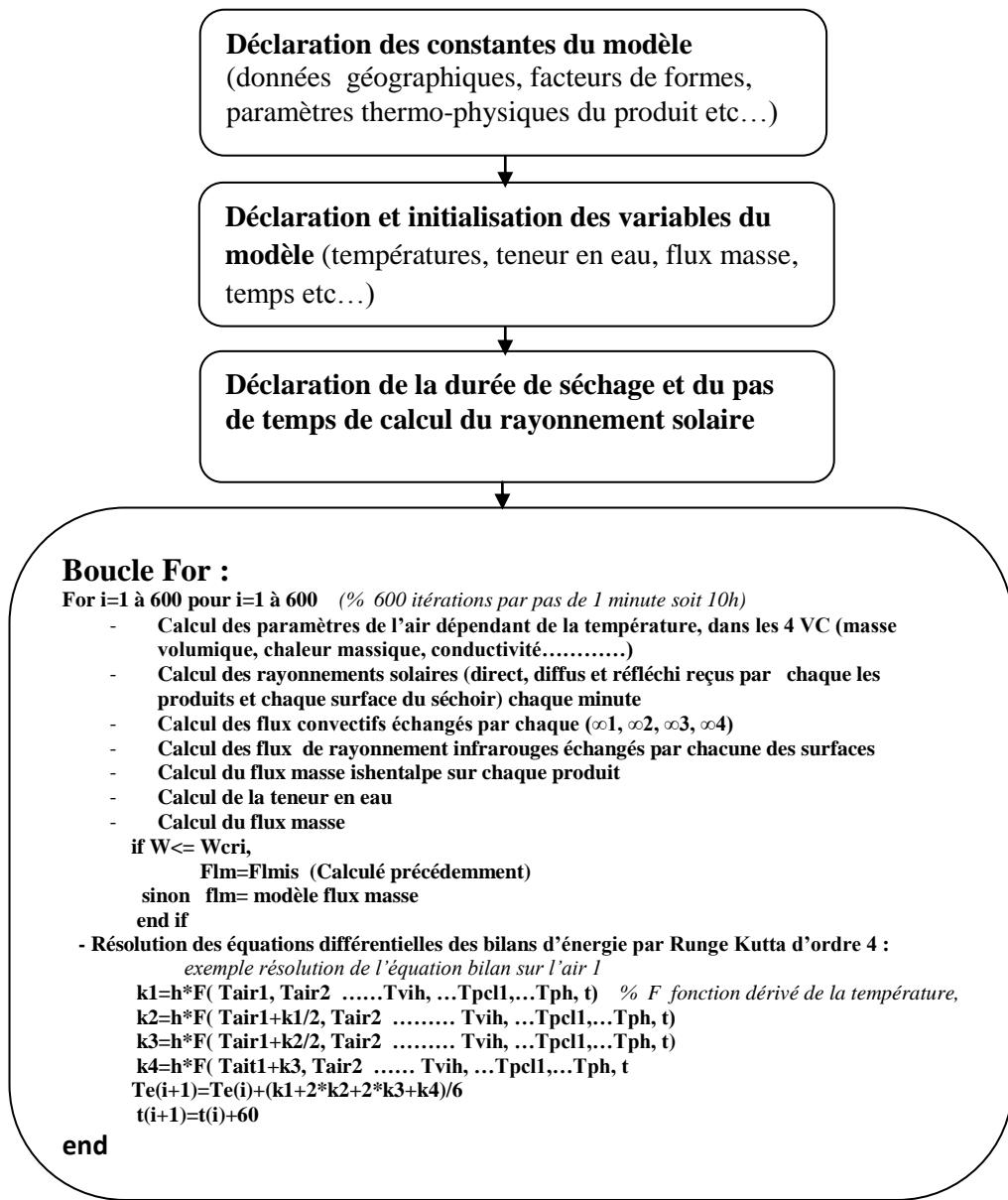


Fig. 4.15 Structure du programme de résolution du modèle.

4.2 Mise en place d'essais sur le séchoir de *Kilichi* et validation expérimentale

4.2.1 Localité et période des essais

Les essais de validation ont été menés dans la ville de N'Gaoundéré au Nord Cameroun dont les coordonnées géographiques sont : latitude 7,19° N et longitude 13, 35° E. La ville de N'gaoundéré est la capitale régionale de l'Adamaoua, qui concentre 40% du cheptel bovin Camerounais.

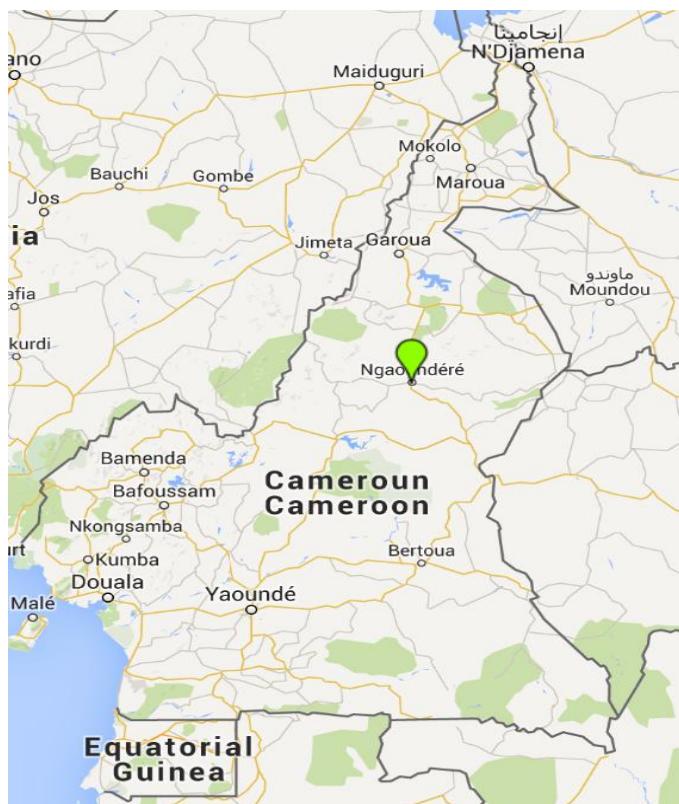


Fig. 4.16 Localisation de la ville de N'gaoundéré sur la carte du Cameroun (www.maps.google.com).

Les essais ont été effectués pendant trois périodes, choisis dans l'année pour étudier le comportement du séchoir pendant les principales saisons climatiques de la localité d'études.

- la période allant du 11 au 16 Décembre 2012 pour la saison sèche et froide.
- la période allant du 10 au 20 Août 2014 pour la saison pluvieuse.
- la période allant du 20 au 27 Avril 2014 pour la saison sèche et chaude.

4.2.2 Matériel et méthodes

4.2.2.1 Préparation des échantillons

La viande utilisée est achetée à un boucher de la ville de N'Gaoundéré au Cameroun et provient des carcasses fraîchement abattues. Le bœuf utilisé est de l'espèce Goudali de l'Admaoua (cf. Fig 1.3, paragraphe 1.1.3 du chapitre 1) et la partie de l'animal utilisée est le round de tranche de la cuisse arrière (Cf. Fig 2.2 paragraphe 2.1.1.2 du chapitre 2). Un producteur de *Kilichi* a été sollicité pour la préparation des échantillons afin de respecter la technique traditionnelle de découpe : la viande est d'abord débarrassée des tendons et graisses, puis découpée en lanière de 3 mm d'épaisseur, 15 cm de largeur et 35 cm de longueur, pour une masse moyenne de 170g par lanière de viande.

4.2.2.2 Protocole expérimental

Deux méthodes ont été utilisées simultanément pour le séchage solaire de la viande afin de faire une comparaison: la méthode traditionnelle (séchage à l'air libre) et la méthode par le séchoir solaire de *Kilichi*. Pour la méthode traditionnelle, la viande est posée sur une natte de même type que celle utilisée par les producteurs du *Kilichi* (Fig. 4.17). Les deux opérations de séchage, à l'air libre et dans séchoir, sont réalisées simultanément et en même lieu, et durent en moyenne 10h (entre 8h et 18h). La figure 4.18 résume le protocole expérimental de séchage de la viande par les deux méthodes utilisées.



Fig. 4.17 Séchage du Kilichi par la méthode traditionnelle : produit étalé sur une natte , à l'air libre.

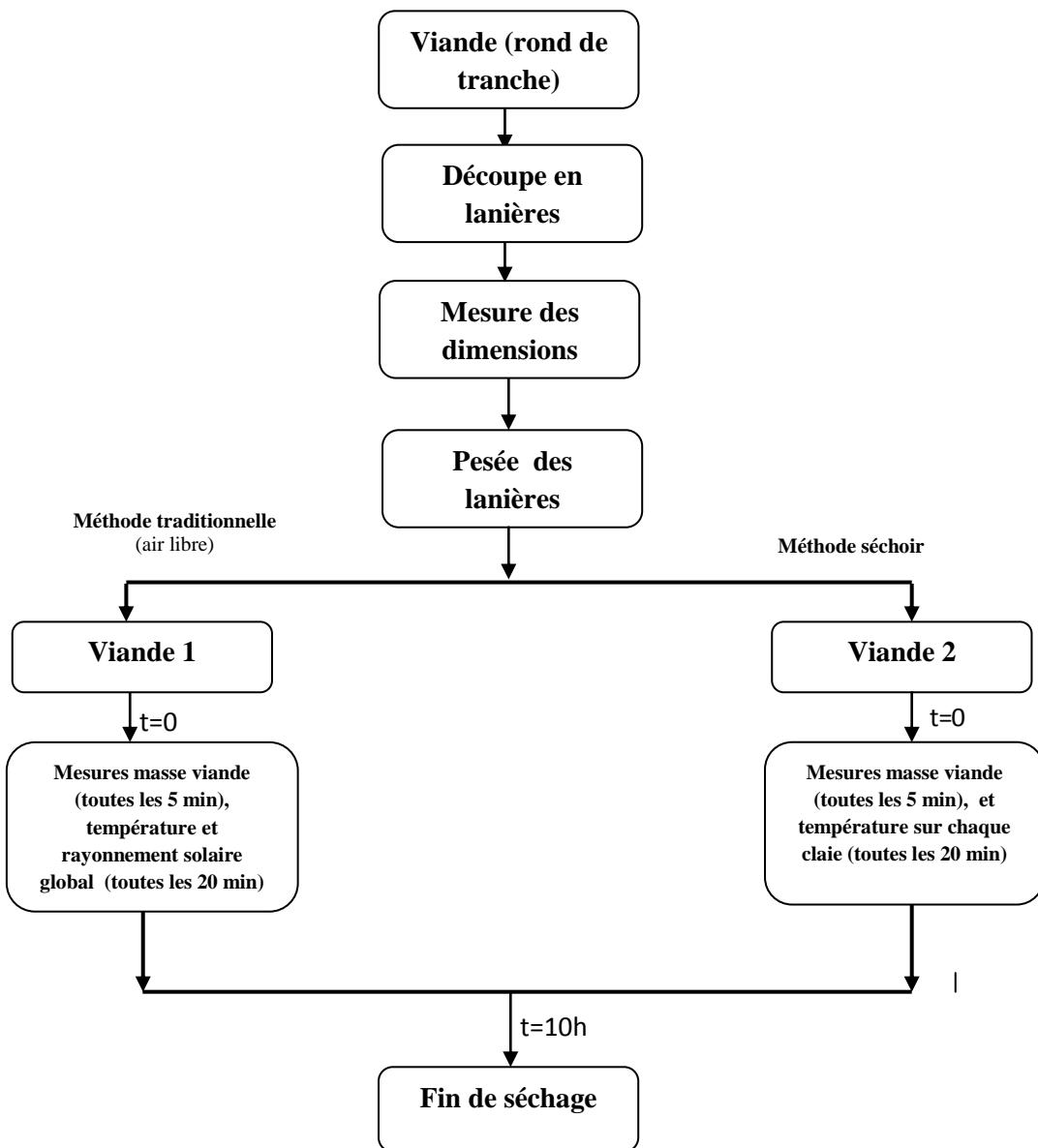


Fig. 4.18 Protocole expérimental des essais de séchage de la viande.

4.2.2.3. Méthodes de mesures des paramètres de séchage

* Mesure des paramètres de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir

La température ambiante et les températures dans le séchoir sont mesurées, toutes les 20min, par des thermocouples de type K qui peuvent mesurer jusqu'à 1100°C avec une précision de 0,1°C. La vitesse de l'air est mesurée par un anémomètre à fil chaud qui a une plage de mesure de 0,2-2 m/s et une précision de 0,02 m/s. Ces appareils de mesures sont placés à 13 cm au dessus de chaque claire et au centre de celle-ci à travers des orifices prévus à cet effet dans la paroi avant du séchoir (Fig.4.19 et 4.20).

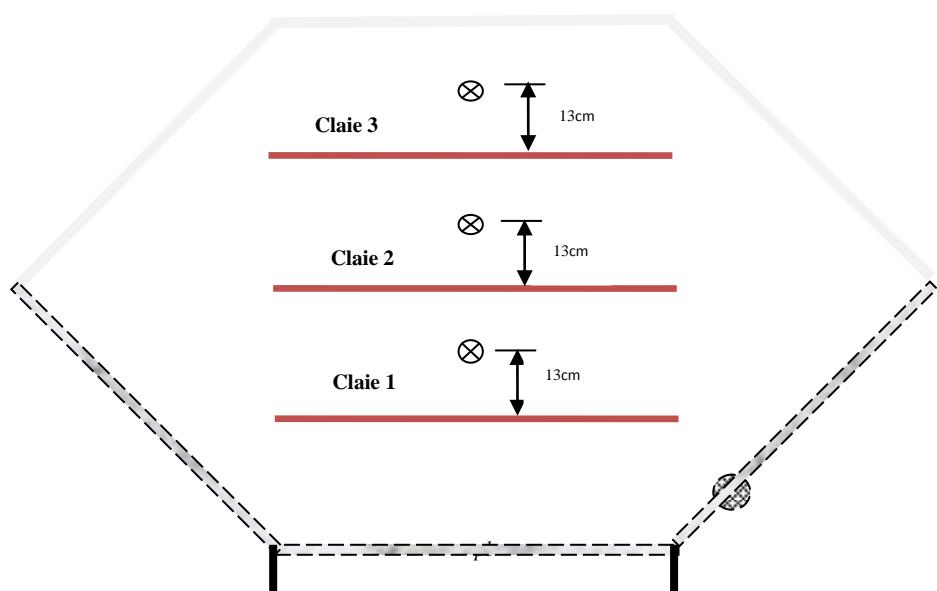


Fig.4.19 Position des appareils de mesures dans le séchoir.⊗ Appareil de mesures.



Fig. 4.20 Mesure des paramètres de l'air intérieur du séchoir.

*Mesure de la masse des produits

La masse des produits est mesurée en continu par trois balances placées au dessus de chaque claire et sur lesquelles sont posés les échantillons dont on suit l'évolution de la masse au cours du séchage (Fig. 4.21). Les masses des échantillons sont relevées toutes les cinq

minutes pendant la première heure de séchage et toutes les 20 minutes entre la première heure et la fin du séchage.



Fig. 4.21 Mesure de masse du produit dans le séchoir.

*Mesure de rayonnement solaire

La densité de flux de rayonnement solaire global (éclairement global) au cours du séchage est mesurée, toutes les 20 minutes, par un Pyranomètre stellaire, placé à proximité du séchoir (Fig.4.22). La plage de mesure du Pyranomètre est comprise dans l'intervalle 0-1500W/m² et sa précision est de 0,1W/m².



Fig. 4.22 Mesure du rayonnement solaire global.

4.2.3 Résultats des essais de validation

4.2.3.1 Rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur le site des essais

Le comportement du séchoir vis-à-vis du rayonnement solaire global, diffus et direct a été modélisé (voir paragraphe 4.1.6.1 et 4.1.6.1 de ce chapitre). En ce qui concerne les essais de validation menés sur le site de N'gaoundéré, nous n'avions que la possibilité de mesurer la densité de flux de rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale. Ainsi, les figures 4.23, 4.24 et 4.25 présentent, en ligne continues, l'évolution des densités de flux de rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur une surface horizontale en fonction des heures de la journée, respectivement pour les journées du 18 Août 2014 , 22 Avril 2014 et 12 Décembre 2012 ; est représenté par des cercles le flux solaire global mesuré. Ces flux solaires évoluent de manière croissante jusqu'à une valeur maximale, aux environ de 12h, avant de décroître. Il se dégage de ces trois figures que les valeurs du flux de rayonnement solaire global obtenues par modélisation (Eqs.1.14 à 1.17 et Eqs.1.22 et 1.23) sont proches des valeurs des densités de flux de rayonnement solaire global mesurées sur le site. Notons que les plus grandes valeurs de densité des flux de rayonnement ont été mesurées pendant les essais conduits au mois d'Avril, avec des valeurs maximales pouvant dépasser 900W/m^2 (Fig. 4.24). De manière générale, les valeurs des densités de flux de rayonnement solaire direct, obtenus par le modèle, sont plus élevées que celles des densités de flux de rayonnement solaire diffus (Figs. 4.23, 4.24 et 4.25).

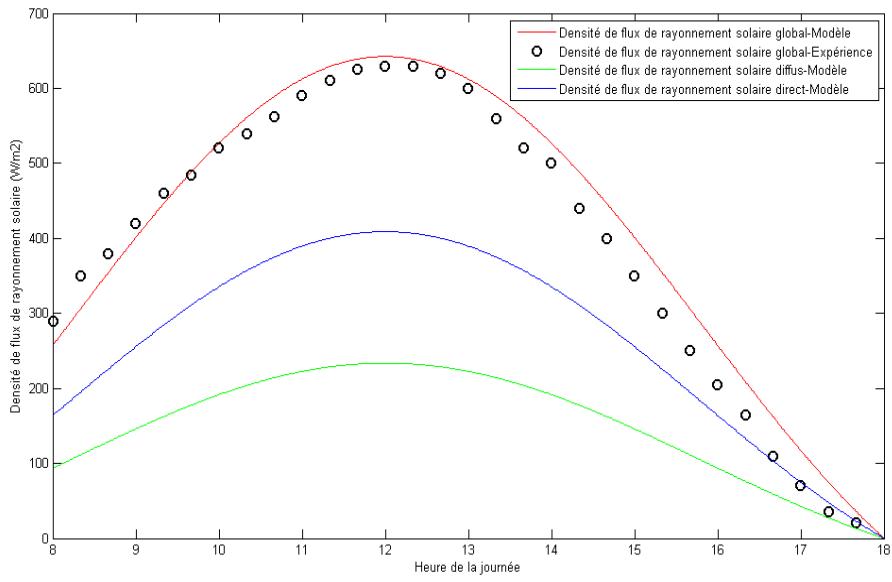


Fig. 4.23 Densité de flux de rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur une surface horizontale : valeurs modélisées ; flux global : valeurs expérimentales. Journée du 18 Août 2014.

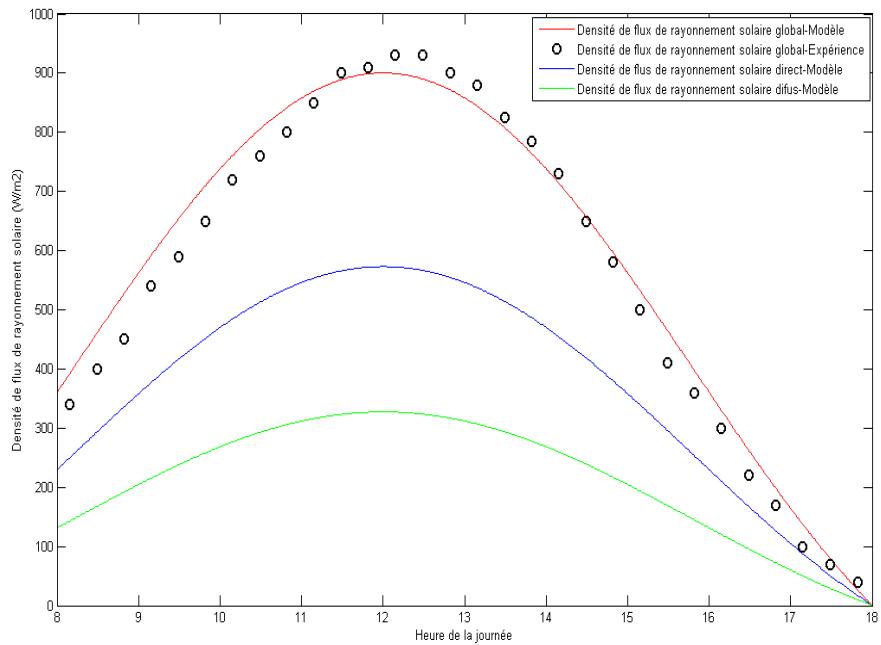


Fig. 4.24 Densité de flux de rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur une surface horizontale : valeurs modélisées ; flux global : valeurs expérimentales. Journée du 22 Avril 2014.

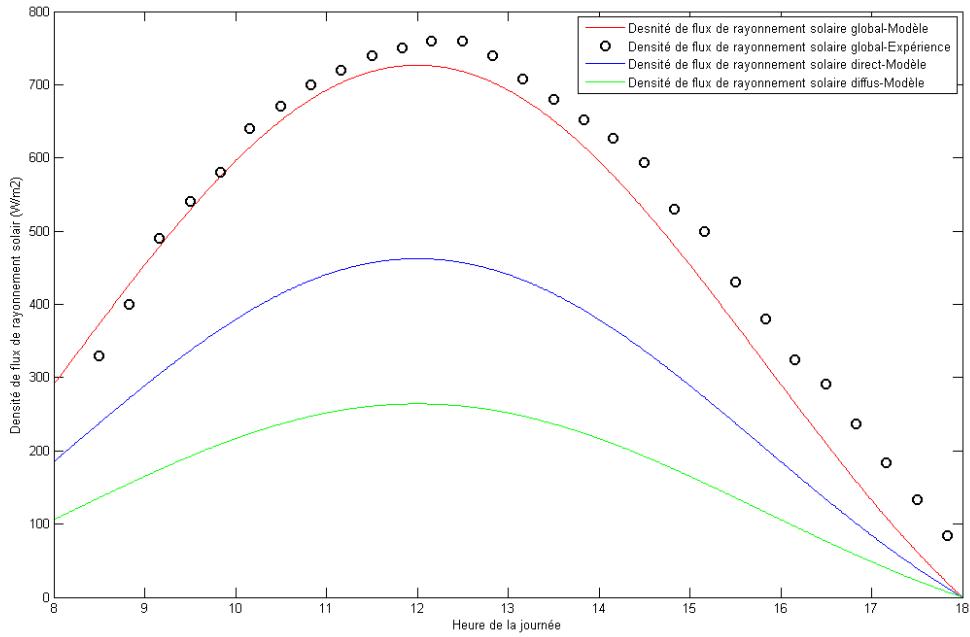


Fig.4.25 Densité de flux de rayonnement solaire direct, diffus et global reçus sur une surface horizontale : valeurs modélisées ; flux global : valeurs expérimentales. Journée du 12 Décembre 2012.

4.2.3.2 Evolution des températures à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir

Les figures 4.26, 4.27 et 4.28 présentent l'évolution temporelle, des valeurs expérimentales et modélisées, de la température ambiante et des températures au dessus des 3 claies du séchoir, en fonction des heures de la journée, respectivement pour les essais du 18 Août 2014, 22 Avril 2014 et 12 Décembre 2012. Nous pouvons constater une bonne adéquation entre les valeurs expérimentales et les valeurs modélisées. La température ambiante (air extérieur) et les températures à l'intérieur du séchoir évoluent de manière croissante pour atteindre une valeur maximale, avant de décroître. Les températures à l'intérieur du séchoir sont nettement supérieures à la température ambiante, avec des gains en température, par rapport à la température ambiante, pouvant atteindre 30 °C (Fig. 4.27). Les températures à l'intérieur du séchoir ne sont pas uniformes. En effet, la température de l'air au dessus de la clai 3 (cf. Fig 4.19) est la plus élevée des trois températures mesurées dans le séchoir, suivie par la clai 2. L'écart de température entre les températures des airs au dessus de deux claies successives du séchoir peut atteindre 5 °C à certaines heures de la journée. Cette différence s'explique par les ombrages portés par la clai supérieure (clai 3) et la clai 2.

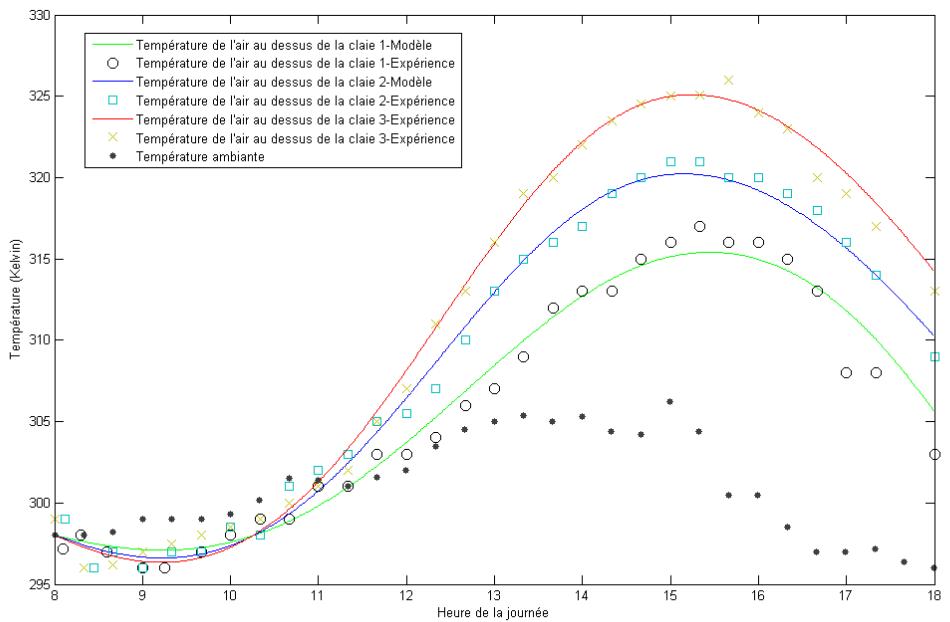


Fig. 4.26 Evolution de la température ambiante et des températures des airs au dessus des claires du séchoir : Valeur expérimentales et valeurs modélisées pour la journée du 18 Août 2014.

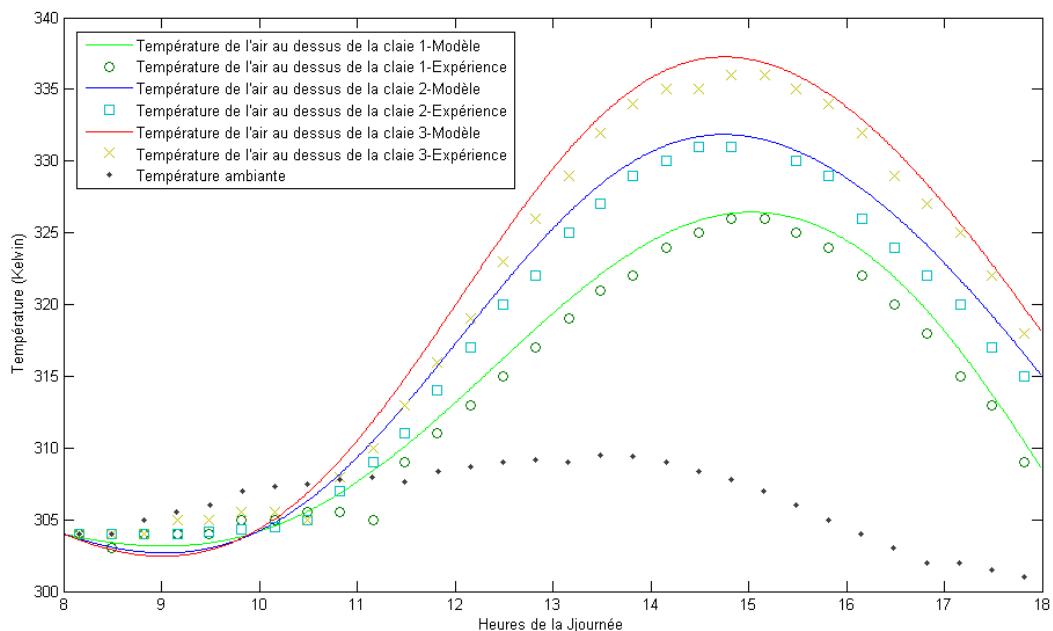


Fig. 4.27 Evolution de la température ambiante et des températures des airs au dessus des claires du séchoir : Valeur expérimentales et valeurs modélisées pour la journée du 22 Avril 2014.

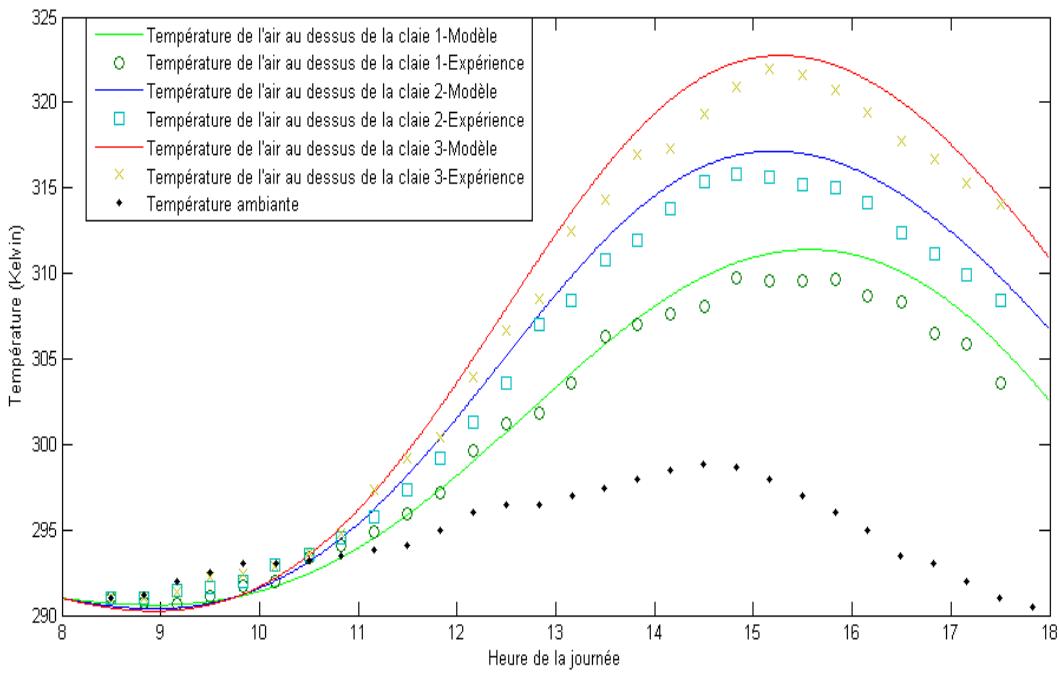


Fig. 4.28 Evolution de la température ambiante et des températures des airs au dessus des claires du séchoir : Valeur expérimentales et valeurs modélisées pour la journée du 12 Décembre 2012.

Le bon accord entre les valeurs modélisées et valeurs mesurées de températures d'air, paramètres sensibles aux échanges, conforte globalement l'aptitude du modèle à décrire les transferts de chaleur.

4.2.3.3 Cinétiques de séchage de la viande par la méthode traditionnelle et avec le séchoir : valeurs expérimentales et modélisées.

Les figures 4.29, 4.30 et 4.31 présentent l'évolution temporelle des teneurs en eau de la viande, expérimentales et modélisées, dans le séchoir et à l'air libre (séchage traditionnel), respectivement pour les journées du 18 Août 2014, 22 avril 2014 et 12 Décembre 2012. On constate que le modèle décrit bien les valeurs expérimentales. Il se dégage de ses figures qu'à un instant donné de séchage, la teneur en eau de la viande séchée par la méthode traditionnelle (à l'air libre) est supérieure à celle de la viande avec le séchoir de *Kilichi*. La viande dans le séchoir se déhydrate donc plus rapidement que la viande à l'air libre. Notons que les teneurs en eau finales (base sèche) des produits séchés à l'air libre sont comprises entre 0,3 et 0,4 (Fig. 4.29, 4.30 et 4.31), et celles des produits séchés dans le séchoir ont des teneurs en eau (base sèche) comprises entre 0,12 et 0,28 (Fig. 4.29, 4.30 et 4.31); la différence entre les teneurs en eau finales de la viande séchée à l'air libre et celles séchées dans le séchoir est d'au moins 10% (base sèche) (Fig. 4.29, 4.30 et 4.31). Ce résultat montre que le séchoir respecte le cahier de charge (teneur en eau base sèche finale comprise entre 0,12 et 0,3) qui a été élaboré

dans sa phase de conception (cf. paragraphe 3.1.3 du chapitre 3). Il est important de rappeler que pour obtenir une teneur en eau finale de viande inférieure à 0,3 (base sèche), les producteurs de *Kilichi* sont obligés d'exposer le produit au soleil pendant 2 jours, voire 3 jours (cf. paragraphe 1.4.1 du chapitre 1).

On peut également remarquer sur ces figures une différence de teneur en eau entre les produits séchés dans le séchoir : en effet, la viande posée sur la claie 3 sèche plus rapidement que les viandes sur les claies 1 et 2. La différence entre les teneurs en eau finales de la viande sur la claie 1 et celle sur la claie 3 peut atteindre 10% (base sèche) (Fig.4.29), ce qui pourrait représenter une différence non négligeable en terme de stabilité du produit et de quantité d'énergie nécessaire pour extraire cette quantité d'eau. Par exemple, sur la figure 4.29 (c'est à dire en Août, lorsque les apports solaires sont moindres), la teneur en eau finale du produit placé sur la claie 1 est de 0.28 (base sèche) et la teneur en eau finale du produit placé sur la claie 3 est de 0,17 (base sèche). D'après les résultats de l'étude sur les isothermes de désorption (cf. paragraphe 2.2.1.1 du chapitre 2), le produit de la claie 3 sont stables sur le plan microbiologique (teneur en eau inférieure à 0,25 (base sèche)) et ceux de la claie 1 ne le sont pas. Par conséquent, bien que les teneurs en eau des produits paraissent proches, cette différence peut s'avérer significative pour la stabilité finale du produit et il peut être nécessaire d'utiliser le séchoir plus qu'une journée pour atteindre le seuil de stabilité du produit ($W=0,25$).

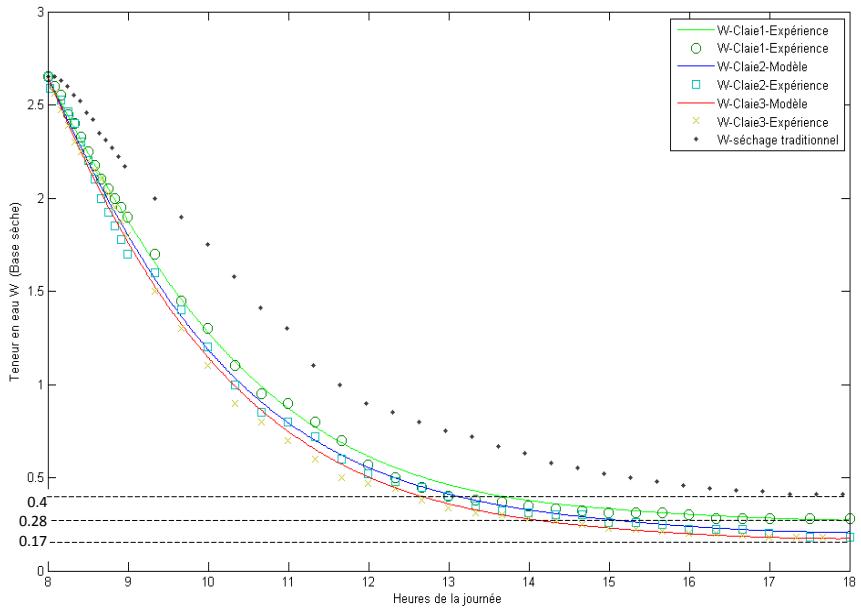


Fig. 4.29 Evolution de la teneur en eau W en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre (séchage traditionnel): valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 18 Août 2014.

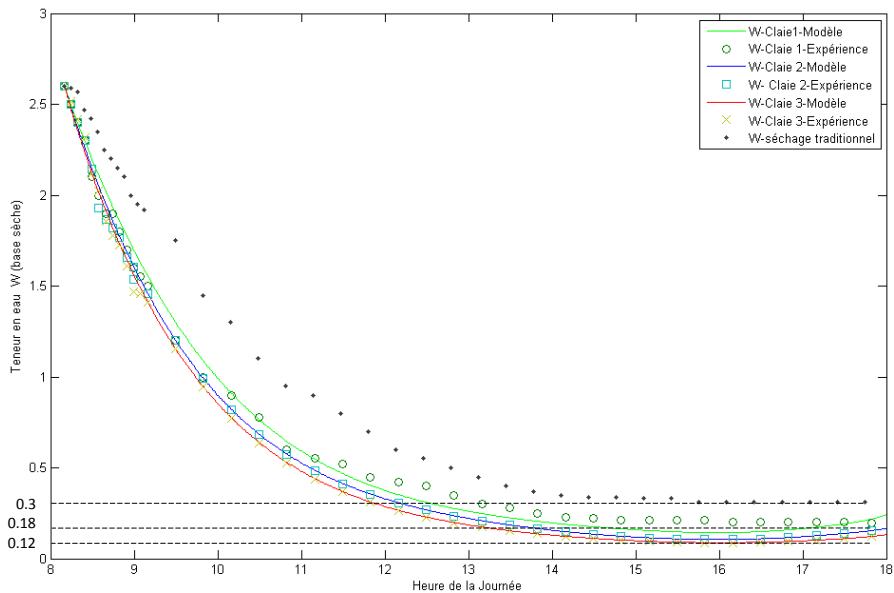


Fig. 4.30 Evolution de la teneur en eau W en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre (séchage traditionnel): valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 22 Avril 2014.

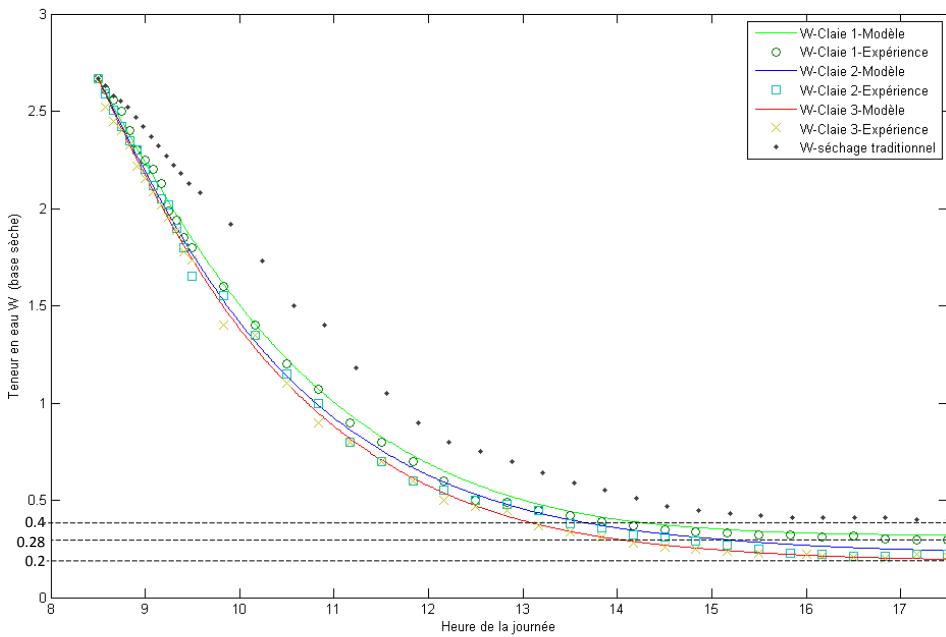


Fig. 4.31 Evolution de la teneur en eau W en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre (séchage traditionnel) : valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 12 Décembre 2012.

Les courbes de l'évolution des flux masse, expérimentaux et modélisés, de la viande au cours du séchage dans le séchoir et à l'air libre (séchage traditionnel) sont présentées sur les figures 4.32, 4.33 et 4.34, respectivement pour les trois journées du 18 Août 2014, 22 avril 2014 et 12 Décembre 2012. Deux phases de séchage ont été identifiées: Une courte phase de vitesse de séchage constante et une phase de vitesse de séchage décroissante. Les valeurs de teneurs en eau critiques W_{cri} (teneur en eau de transition entre les deux phases), identifiées, sont d'environ 2.5 (base sèche). Cette valeur est proche de celle obtenue avec le séchage convectif de la viande de bœuf (cf. Tableau 2.7, paragraphe 2.2.2.2 du chapitre 2). D'autre part, on constate une différence entre les vitesses de séchage de la viande à l'air libre et celles de la viande séchée avec le séchoir. Cette différence est plus significative en début de séchage et elle décroît au fil du temps pour s'annuler vers la fin du séchage. Les mêmes observations ont été faites pour les vitesses de séchage dans le séchoir où on constate que la vitesse de séchage sur la claire 3 est plus élevée que celles des produits sur les claires 2 et 1. Les vitesses de séchage constantes (phase constante de séchage) de la viande à l'air libre sont comprises entre $0.7 \cdot 10^{-4} \text{ kg eau.m}^2.\text{s}^{-1}$ et $0.85 \cdot 10^{-4} \text{ kg eau.m}^2.\text{s}^{-1}$ alors que celles dans le séchoir sont dans l'intervalle $0.8 \cdot 10^{-4} - 1.18 \cdot 10^{-4} \text{ kg eau.m}^2.\text{s}^{-1}$. Une comparaison avec les cinétiques de séchage convectif étudié précédemment (cf. paragraphe 2.2.2.1 du chapitre 2) permet de constater que les vitesses de séchage dans le séchoir sont proches de celles d'un séchage

convectif effectué à différentes vitesse d'air (0.33m/s, 0.66m/s et 1m/s) pour une valeur de température constante de 50°C et une humidité relative constante de 25% (Fig. 2.18 paragraphe 2.2.2.1 du chapitre 2).

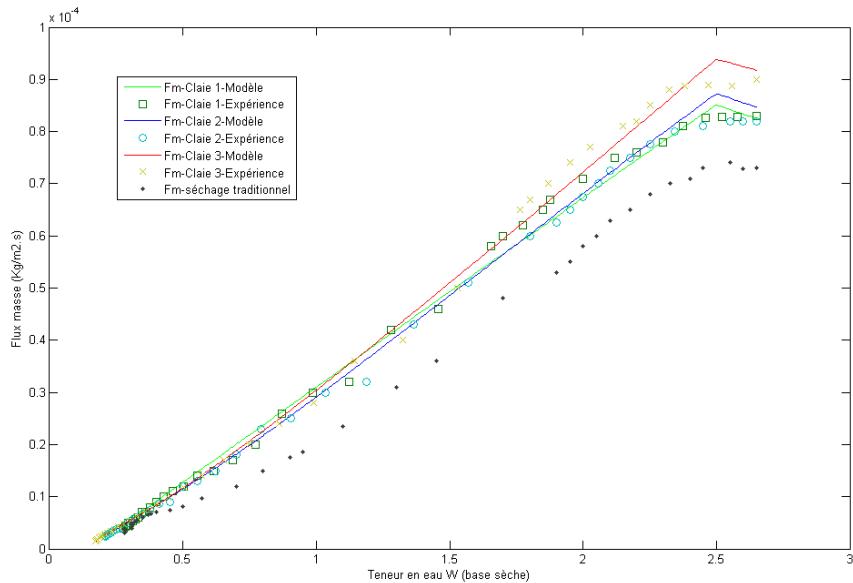


Fig. 4.32 Evolution du flux masse F_m en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre: valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 18 Août 2014.

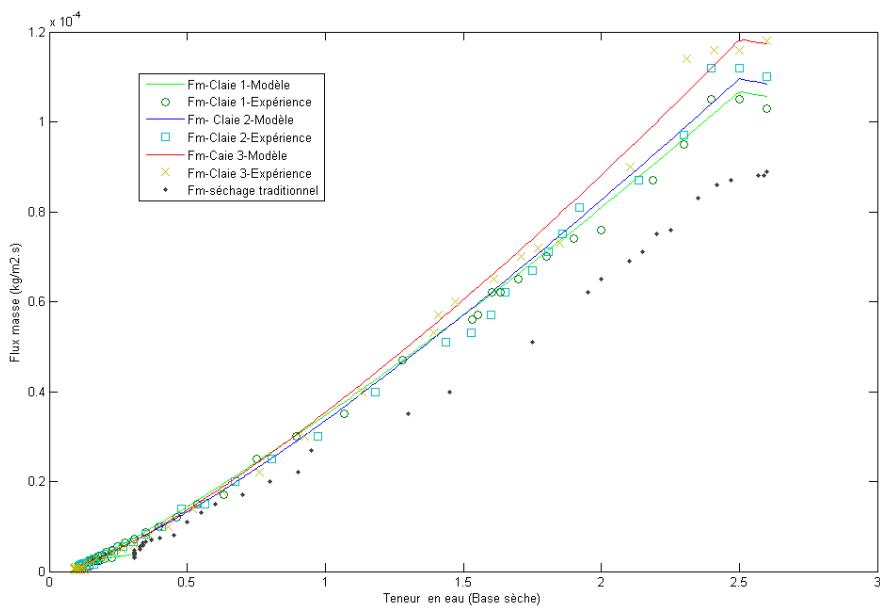


Fig. 4.33 Evolution du flux masse F_m en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre : valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 22 Avril 2014.

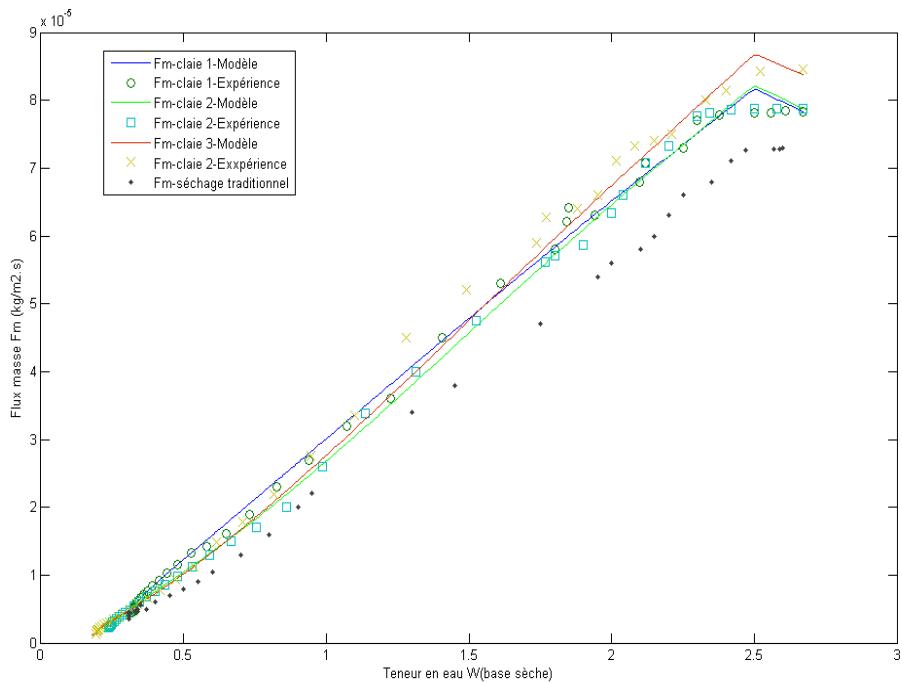


Fig. 4.34 Evolution du flux masse Fm en fonction des heures de la journée, dans le séchoir et à l'air libre : valeurs expérimentales et modélisées pour la journée du 12 Décembre 2012.

En conclusion, nous pouvons affirmer que le modèle mis en place est apte à décrire les transferts, et le séchage du produit dans le séchoir solaire de *Kilichi*. Il permet ainsi de prévoir si, selon les conditions météorologiques et l'épaisseur des lanières de viande, une journée est suffisante ou non à l'obtention d'un produit stable avec le séchoir. L'utilisation du séchoir amène quoi qu'il en soit un gain de temps supérieur à 50%, tout en protégeant les produits des insectes et autres pollutions potentielles.

CHAPITRE 5. IMPACT DU SECHAGE SOLAIRE SUR LES QUALITES MICROBIOLOGIQUE ET BIOCHIMIQUE DE LA VIANDE DE BŒUF.

La sécurité alimentaire a toujours été au premier plan des préoccupations de la société au cours des dernières années, et il existe des indications que ce défi se poursuivra dans l'avenir. En effet, d'après l'Organisation Mondiale de la Santé, les maladies d'origine alimentaire sont une cause importante de morbidité. Des millions de personnes tombent malades et un grand nombre d'entre elles décèdent après avoir consommé des aliments improches à la consommation (OMS, 2015). La viande, qui est l'un des aliments les plus consommés dans le monde à cause de ses qualités nutritionnelles et organoleptiques, pourrait poser des problèmes de santé si les normes de qualité sanitaire ne sont pas respectées. C'est ce qui arrive malheureusement dans des nombreux Pays En Développement où les normes hygiéniques ne sont pas toujours respectées pour des raisons liées à la pauvreté et au manque de contrôle sanitaire par les autorités locales. Ceci constitue un sérieux problème pour les populations de ces pays qui connaissent déjà une carence en consommation de viande (FAO, 2015) et un problème d'accès aux soins de santé.

Le séchage solaire, qui est le mode de conservation de viande le plus utilisé par les populations des Pays En Développement, se fait souvent dans des conditions qui constituent de facteurs risques pour la qualité finale du produit. Plusieurs études menées sur les procédés d'obtentions des produits traditionnels ont démontrés que le séchage solaire est une étape sensible et incontournable pour assurer la qualité finale du produit (Mbofung *et al.*, 2004; Jones *et al.*, 2001). L'impact positif du rayonnement solaire sur les qualités microbiologique et organoleptique a été prouvé par plusieurs auteurs (Nortje' *et al.*, 2006 ; Aymerich *et al.*, 2008; Kanatt *et al.*, 2005; Brewer, 2009). Des études ont également démontré l'action destructrice des rayons Ultra-Violets sur les microorganismes présents dans les produits carnés (Gailunas *et al.*, 2008, Stermer *et al.*, 1987). D'autres travaux ont montré l'impact du rayonnement solaire sur les propriétés biochimiques de la viande et en particulier l'oxydation des lipides qui est liée aux nature, proportion et degré de saturation des acides gras et à la composition des phospholipides dans les membranes cellulaires (Ahn *et al.*, 2000).

Dans ce chapitre nous avons déterminé l'impact du rayonnement solaire sur les qualités microbiologique et biochimique. Les études microbiologiques ont porté sur la détermination de la Flore Mésophile Aérobie Totale, des levures et moisissures ainsi que les coliformes, dans la viande fraîche, la viande séchée dans le séchoir de laboratoire et la viande séchée traditionnellement (air libre). Sur le plan biochimique nous avons évalué l'impact du rayonnement solaire sur la teneur en lipides de la viande avant et après séchage ainsi que le

taux d'oxydation de ces lipides. La première partie de ce chapitre sera consacrée à la caractérisation du séchoir solaire laboratoire conçu et réalisé pour étudier l'impact du rayonnement solaire sur les qualités microbiologique et biochimique du produit. Il est important de noter que les analyses microbiologiques et biochimiques ont été effectuées en collaboration avec le groupe de recherche des Colloïdes et Lipides pour l'Industrie et la Nutrition (CLIP'IN) de l'Institut de Chimie et Biologie des Membranes et des Nano-objets (CBMN), de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie, de Biologie et de Physique (ENSCBP) de Bordeaux.

5.1 Caractérisation du séchoir solaire de laboratoire

La caractérisation du séchoir solaire a pour but de mieux effectuer les calibrages nécessaires qui permettront d'avoir une maîtrise des conditions de séchage qui seront appliquées au produit. C'est une étape nécessaire dans la mesure où elle permet de quantifier le rayonnement solaire reçu par le produit afin d'étudier son impact sur les qualités microbiologiques et biochimiques du produit.

Le séchoir solaire de laboratoire, conçu et réalisé au chapitre 3 (Fig. 5.1), permet de simuler différentes intensités de rayonnement comprenant les longueurs d'ondes Ultra-violets, Visibles et Infrarouges. Il permet également de contrôler certains paramètres de l'air de séchage (température, vitesse) pour simuler différentes conditions de séchage. Dans ce paragraphe, nous étudierons l'évolution du rayonnement solaire dans le séchoir et sa composition spectrale. L'évolution de la température et de l'humidité relative seront également présentées.

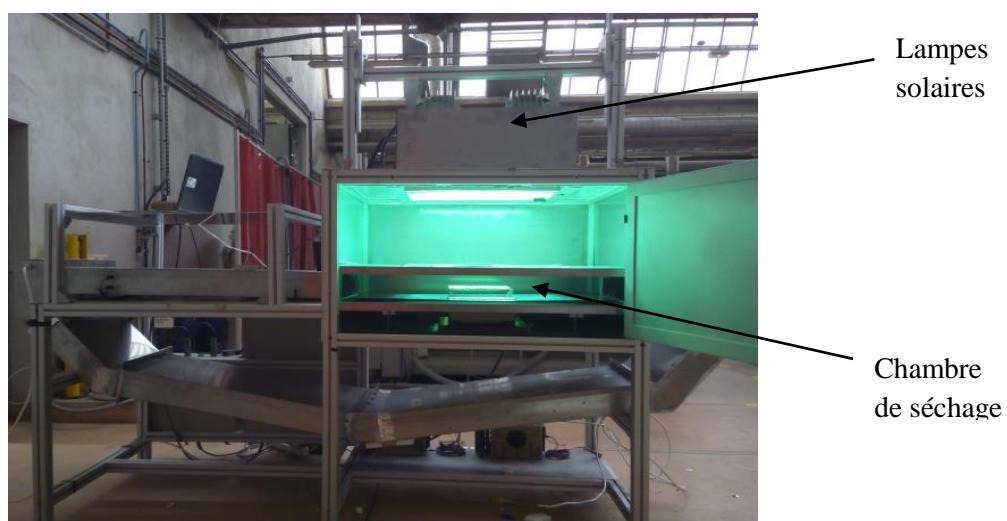


Fig. 5.1 Photo du séchoir solaire de laboratoire.

5.1.1 Composition spectrale et évolution du rayonnement dans le séchoir solaire

Les lampes solaires (SOL 500 du fabricant Honle UV Technology) du séchoir émettent des rayonnements de longueurs d'ondes comprises dans l'intervalle 260nm-1000nm (Fig. 5.2), ce qui correspond à tout le spectre de rayonnements Ultra-Violets et Visibles du soleil et à une partie du spectre du rayonnement InfraRouge. Le spectre du rayonnement Ultra-Violet des lampes est compris entre 260nm-400nm (Fig. 5.3) et représente environ 10% du spectre total d'émission des lampes d'après les résultats des essais fournis par le constructeur.

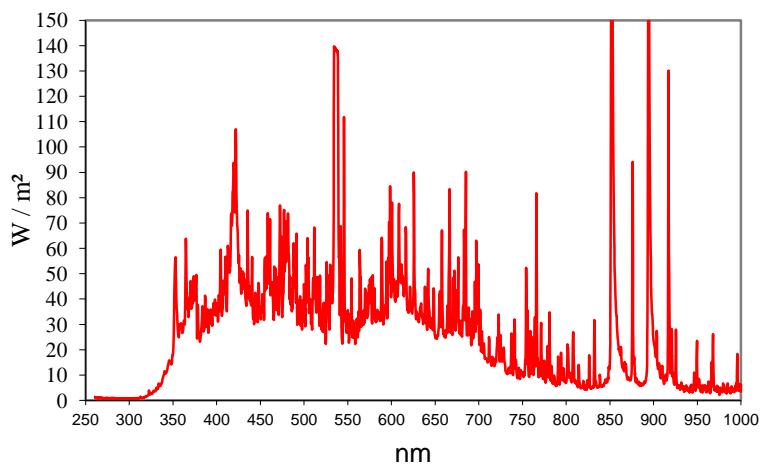


Fig. 5.2 Spectre du rayonnement des lampes solaires du séchoir de laboratoire (Hoenle UV-Technology, 2015).

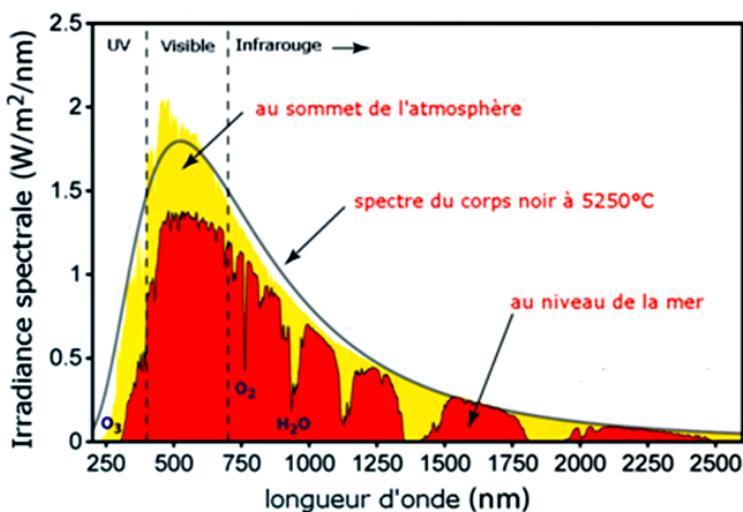


Fig. 5.3 Spectre du rayonnement du soleil (Wikipedia, 2015).

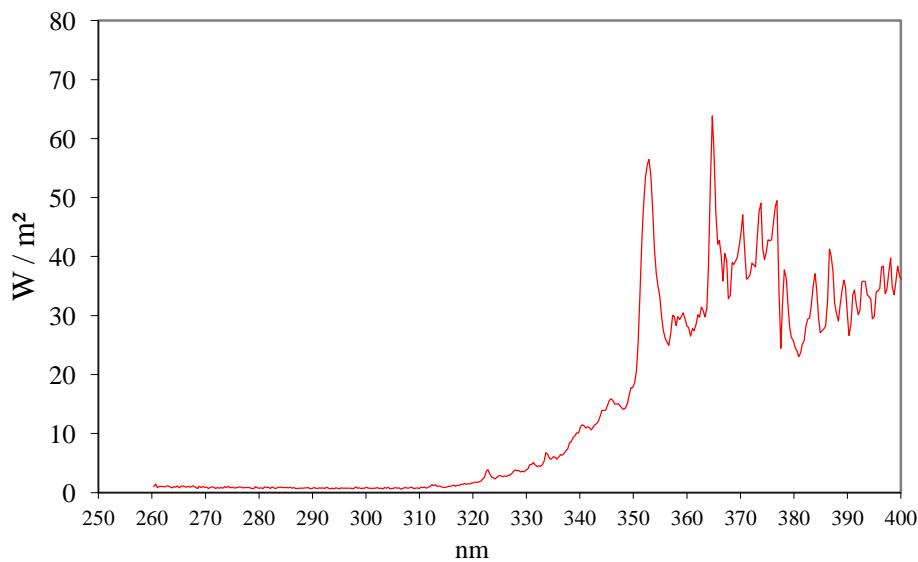


Fig. 5.4 Spectre du rayonnement Ultra-Violet des lampes du séchoir de laboratoire (Hoenle UV-Technology, 2015).

5.1.2 Calibrage du rayonnement dans le séchoir

Le rayonnement solaire global dans le séchoir est mesuré par un pyranomètre qui mesure des densités de flux de rayonnement solaire compris entre 0 W/m² et 1500 W/m² pour un spectre compris entre 300 nm et 3000 nm (cf. Annexe 3.4). Le rayonnement solaire reçu par le produit dépend de la distance entre les lampes et le produit ; les essais de calibration du rayonnement dans le séchoir nous ont amené à retenir trois positions de lampes (Fig. 5.5) ; ces positions permettront de balayer discrètement une plage d'intensité de rayonnement solaire qui se rapproche de celle de l'irradiation du soleil dans les pays tropicaux (360W/m²-700W/m²). On peut également varier l'intensité du rayonnement en jouant sur le nombre de lampes allumées (une ou deux lampes).

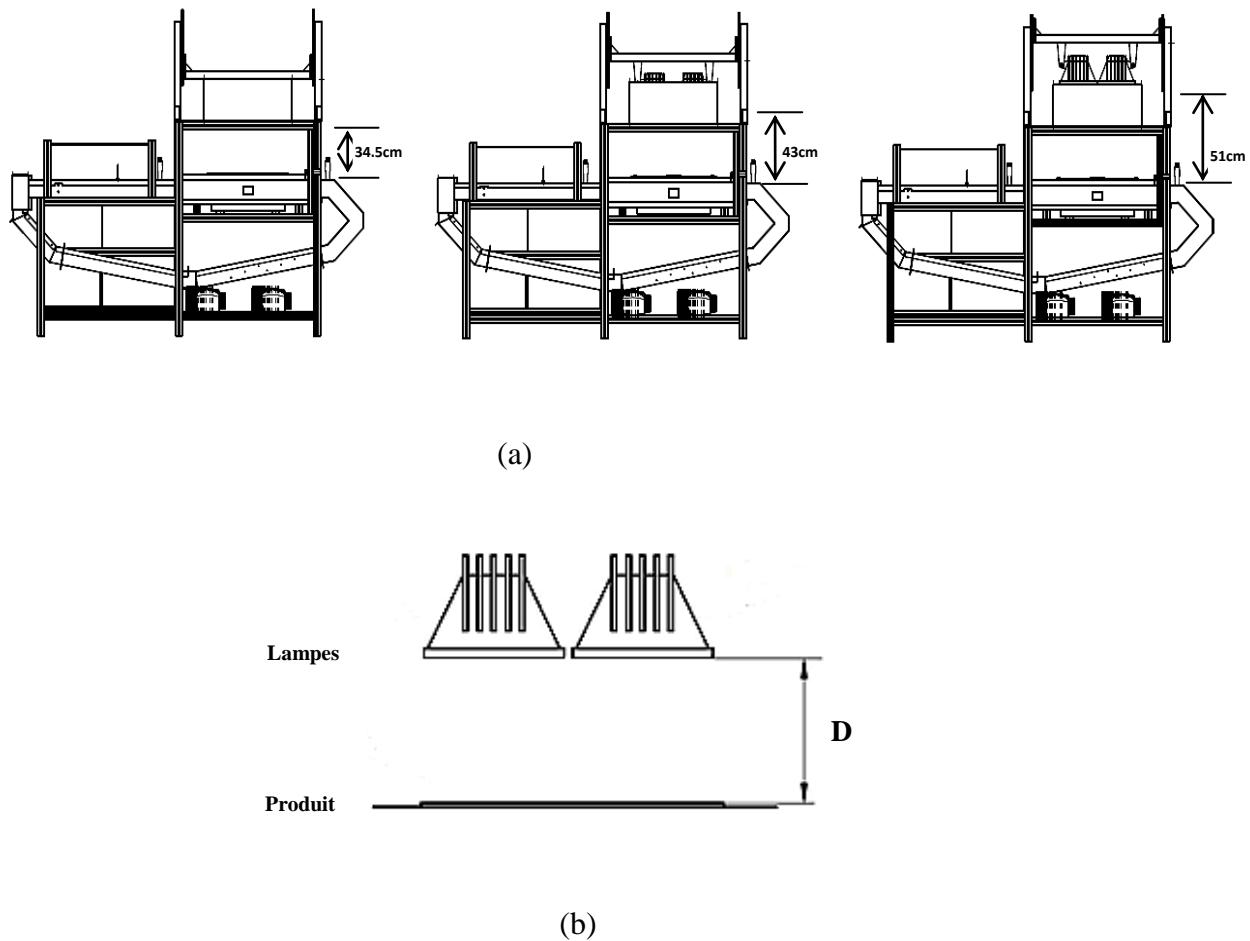


Fig. 5.5 (a) Différentes positions de lampes solaires ; (b) Distance lampe-produit D.

La figure 5.6 présente l'évolution de l'intensité du rayonnement solaire reçu par le produit en fonction de la distance entre les lampes et le produit lorsque les deux lampes solaires sont allumées. On constate une diminution de l'intensité du rayonnement en fonction de la distance entre les lampes et le produit.

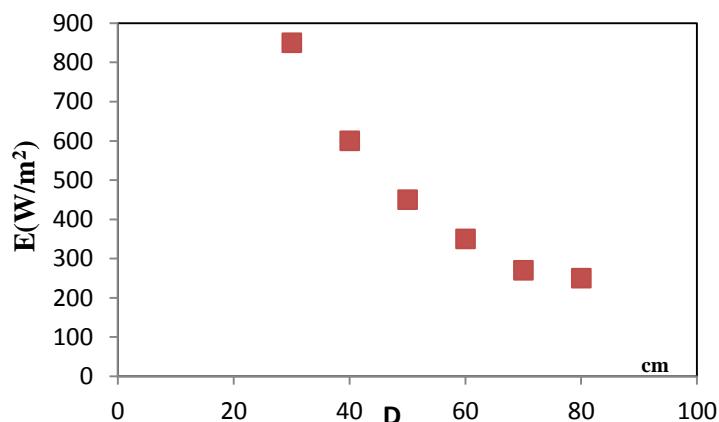


Fig. 5.6 Intensité du rayonnement solaire reçu par le produit en fonction de la distance lampes-produit D.

Les essais de calibration de l'intensité du rayonnement solaire sur les trois positions des lampes précédemment définies (Fig. 5.5) ont permis de définir une plage d'intensité de rayonnement solaire comprise entre 360 W/m^2 et 700 W/m^2 . Il est important de rappeler que la vitre en quartz placée entre les lampes et le produit (cf. Fig. 3.25, paragraphe 3.2.4.2 du chapitre 3) a un coefficient de transmission de 90% pour des longueurs d'ondes comprises entre 300 nm et 2000 nm (cf. Annexe 5.1) et par conséquent elle laisse passer pratiquement tout le rayonnement qu'elle reçoit. Nous avons mesuré l'intensité du rayonnement solaire reçu par le produit, avec et sans vitre (pour une distance lampe-produit de 51 cm et une lampe allumée), et nous avons constaté que ce facteur de transmission est plus proche de 95%.

5.1.3 Mesure et évolution de la température et de l'humidité relative dans le séchoir

La température dans le séchoir est mesurée par trois thermocouples de type K, placés dans la conduite (Fig. 5.7), avec une précision de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. La régulation de température est faite sur la mesure du thermocouple 2 placé à l'entrée de la chambre de séchage.



Fig. 5.7 Position des thermocouples et hygromètres dans le séchoir de laboratoire.

La figure 5.8 représente l'évolution, en fonction de temps, des températures mesurées par les trois thermocouples pour une température de consigne de 50°C . On constate une montée très rapide de la température de l'air qui, une fois la consigne atteinte, se stabilise pendant tout le processus de séchage. On remarque également que la régulation de la température est très précise car la température mesurée est toujours très proche de celle de la consigne.

L'influence de la puissance de rayonnement solaire sur la température de l'air de séchage a également été étudiée. La figure 5.8 montre l'évolution des températures pour deux

valeurs d'intensité de rayonnement (360W/m^2 et 700W/m^2) ; il apparaît que l'intensité de rayonnement n'influence pas la température de l'air. En effet la température de l'air qui traverse la chambre de séchage (irradiée par les lampes) est la même pour les deux intensités de rayonnement. On peut donc conclure que l'air, vecteur d'énergie convective dans le séchoir, est à l'échelle de celui-ci quasi-transparent aux rayonnements émis par les lampes.

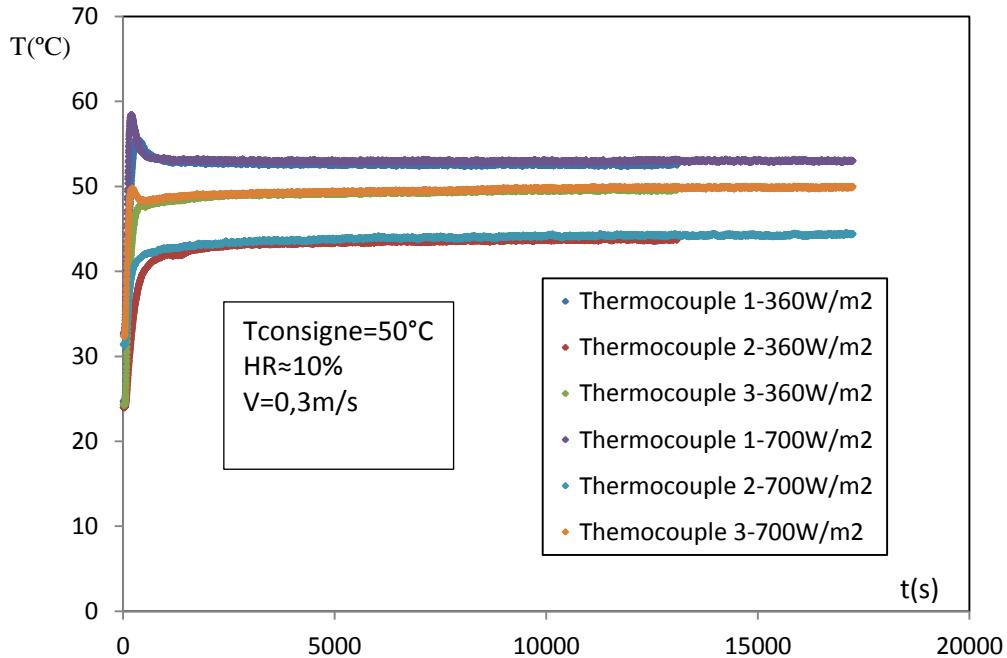


Fig. 5.8 Evolution de la température dans le séchoir en fonction du temps pour deux valeurs d'intensité de rayonnement solaire.

L'humidité relative dans le séchoir est mesurée, avec une précision de $\pm 2\%$, par deux hygromètres capacitifs placés à l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage (Fig. 5.7). La figure 5.9 montre l'évolution de l'humidité relative de l'air à l'entrée (HR1) et à la sortie du séchoir (HR2); nous rappelons ici l'absence de régulation de l'humidité. L'humidité relative dans le séchoir connaît d'abord une chute du fait de l'élévation de la température de l'air (50°C dans ce cas), puis se stabilise bien qu'elle ne soit pas régulée. Notons ici qu'une partie importante de l'air du séchoir est recyclée. On constate également que l'air se charge en humidité lorsqu'il traverse la chambre de séchage du fait de la déshydratation du produit. De même on constate que le niveau d'humidité relative de l'air dans le séchoir augmente avec l'intensité du rayonnement Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'augmentation de l'intensité de rayonnement conduit à une augmentation de la quantité d'eau extraite du produit et par conséquent une humidification plus importante de l'air du séchoir. Toutefois, on

remarque qu'on a pratiquement le même écart entre l'humidité de l'air à l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage quelque soit l'intensité de rayonnement.

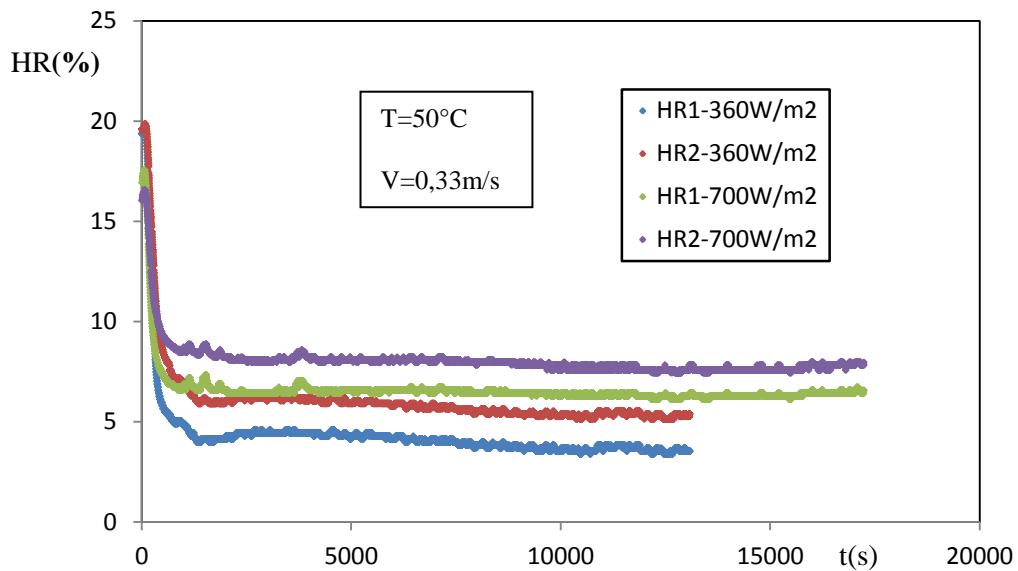


Fig. 5.9 Evolution de l'humidité relative dans le séchoir en fonction du temps pour deux valeurs d'intensités de rayonnement solaire.

5.2 Séchage solaire des échantillons de viande de bœuf

Les échantillons de viande sont ici séchés afin de procéder à des analyses microbiologiques et biochimiques, amenant à évaluer l'impact du rayonnement solaire sur la qualité de la viande. Nous présenterons dans ce paragraphe la préparation des échantillons ainsi que les cinétiques de séchage solaire de ces échantillons.

5.2.1 Préparation des échantillons

La viande est achetée chez un boucher de la ville de Bordeaux et la partie du bœuf utilisée est le rond de tranche de la cuisse arrière, qui est la même partie de l'animal utilisée au Cameroun pour les isothermes de désorption, les cinétiques de séchage et la validation du modèle (cf. Fig. 2.2, paragraphe 2.1.1.2.1 du chapitre 2). Le rond de tranche entier (Fig. 5.10-a), directement sortie de la bête, est emballé dans du film plastique et du papier aluminium avant d'être transporté au laboratoire. Un échantillon de viande fraîche est directement prélevé sur place, chez le boucher, et conservé dans une boîte de pétris stérilisée (Fig. 5.10-b) pour les analyses microbiologiques et biochimiques. Une fois au laboratoire, la viande est découpée en lanières fines de 3 mm d'épaisseur, en prenant toutes les dispositions pour éviter des éventuelles contaminations post-mortem (port de gants, nettoyage de toutes les surfaces avec de l'éthanol,...) (Fig. 5.11).



(a)



(b)

Fig. 5.10 Viande fraîche utilisée : (a) round de tranche entier ; (b) échantillon frais conditionné pour les analyses microbiologiques et biochimiques.



Fig. 5.11 Découpe de la viande en lanière de 3 mm d'épaisseur.

5.2.2 Procédure expérimentale et cinétiques de séchage solaire

Nous avons considérés quatre paramètres de séchage à savoir la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air et l'intensité de rayonnement solaire. Quatre expériences de séchage ont été effectuées (Tableau 5.1) et chacune d'entre-elles étant répétées trois fois. Ces 4 conditions de séchage ont été choisies pour couvrir les conditions de séchage réelles rencontrées lors des essais menées au Cameroun, sur le séchoir solaire de *Kilichi*, tout en limitant le nombre d'essais microbiologiques et biochimiques. Une fois la viande préparée et les conditions de séchage préréglées, on place la viande dans la chambre de séchage sur une grille posée au dessus de la balance (Fig. 5.12), parallèlement à l'écoulement de l'air. La masse du produit est mesurée par une balance électronique ayant une précision de $\pm 0,001$ g et est enregistrée automatiquement toutes les 2 secondes. La durée de séchage est comprise entre 6 et 7 heures en fonction des conditions de séchage. La teneur en eau du produit est déterminée selon la méthode décrite au paragraphe 2.1.2.2.2 du chapitre 2.

Tableau 5.1: Conditions expérimentales de séchage solaire de la viande de bœuf

Essais	Température de l'air (°C)	Rayonnement (W/m ²)	Humidité relative de l'air (%)	Vitesse de l'air (m/s)
1	40	360	10%-15%	0,3
2	40	700	10%-15%	0,3
3	60	360	10%-15%	0,3
4	60	700	10%-15%	0,3



Fig. 5.12 Viande en cours de séchage dans le séchoir solaire de laboratoire.

5.2.3 Cinétiques de séchage solaire des échantillons de viande de bœuf

La figure 5.13 présente l'évolution de la teneur en eau W des échantillons de viande de bœuf en fonction du temps t pour deux valeurs d'intensités de rayonnement (360 W/m^2 et 700 W/m^2). Les essais ont été effectués à une température de 60°C , une vitesse d'air de $0,33 \text{ m/s}$ et une humidité relative comprise entre 10% et 15% . Il se dégage de cette figure qu'en début de séchage, les évolutions des teneurs en eau sont identiques pour les deux valeurs d'intensités de rayonnement, puis les teneurs en eau des échantillons séchés à 700 W/m^2 deviennent inférieures à celles à 360 W/m^2 . Le comportement identique des cinétiques à 360 W/m^2 et à 700 W/m^2 en début de séchage pourrait s'expliquer par la présence d'une phase isenthalpe (Fig. 5.14) pendant laquelle les échanges surfaciques par convection sont dominants par rapport à la contribution du rayonnement. Nous notons également le faible impact de l'intensité de rayonnement solaire sur la cinétique de séchage comparé à celui de la température comme on le verra par la suite.

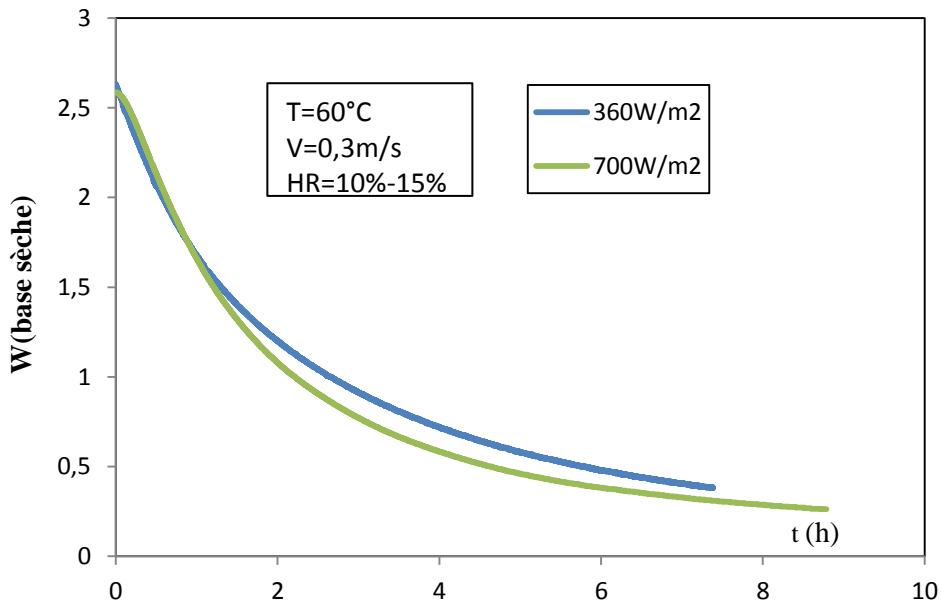


Fig. 5.13 Evolution de la teneur en eau W de la viande en fonction du temps t pour deux valeurs d'intensités de rayonnement solaire (360 W/m^2 et 700 W/m^2).

La figure 5.14 montre l'évolution du flux masse F_m en fonction de la teneur en eau W pour deux valeurs d'intensités de rayonnement (360 W/m^2 et 700 W/m^2). Trois phases de séchage ont été identifiées: une phase de mise en température (phase 0), une phase de vitesse constante (phase 1) et une phase de ralentissement (phase 2). Pendant les phases de mise en température et de vitesse constante, les vitesses de séchage sont identiques pour les deux valeurs d'intensités de rayonnement (360 W/m^2 et 700 W/m^2). L'analyse des cinétiques de vitesse de séchage confirme le faible impact du rayonnement sur la vitesse de séchage.

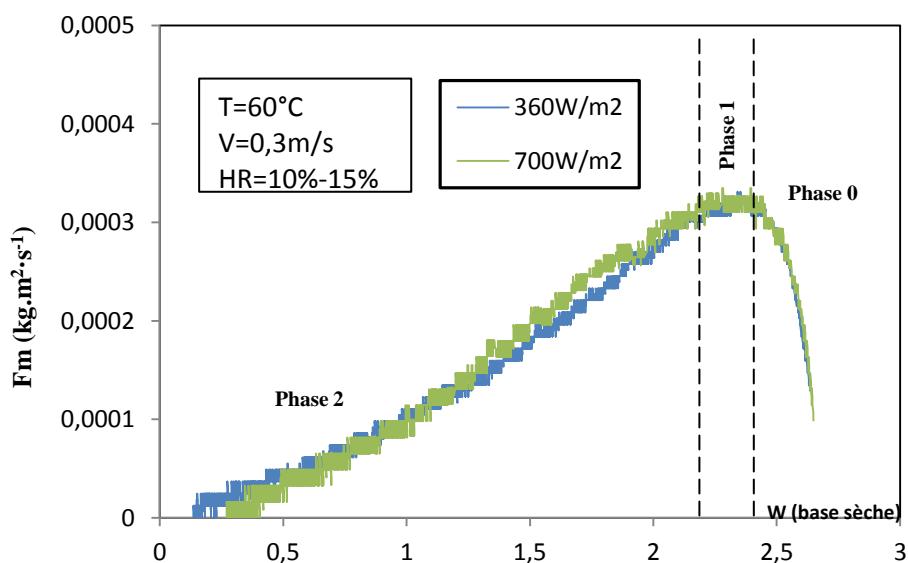


Fig. 5.14 Evolution du flux masse F_m en fonction de la teneur en eau W pour deux valeurs d'intensités de rayonnement solaire (360 W/m^2 et 700 W/m^2).

La figure 5.15 représente l'évolution de la teneur en eau W de la viande en fonction du temps (t) pour deux valeurs de températures ($T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les essais ont été menés pour une intensité de rayonnement de 700 W/m^2 , une vitesse d'air de $0,33\text{ m/s}$ et une humidité relative de l'air comprise entre 10% et 15% . On remarque qu'à tout instant, les teneurs en eau des échantillons séchés à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sont inférieures à celles des échantillons à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; ces résultats confirment ceux obtenus précédemment sur les cinétiques du séchage convectif de la viande (cf. paragraphe 2.2.2.1 du chapitre 2) et suggèrent que le phénomène de croûtage n'influence pas massivement le séchage dans cette plage de températures.

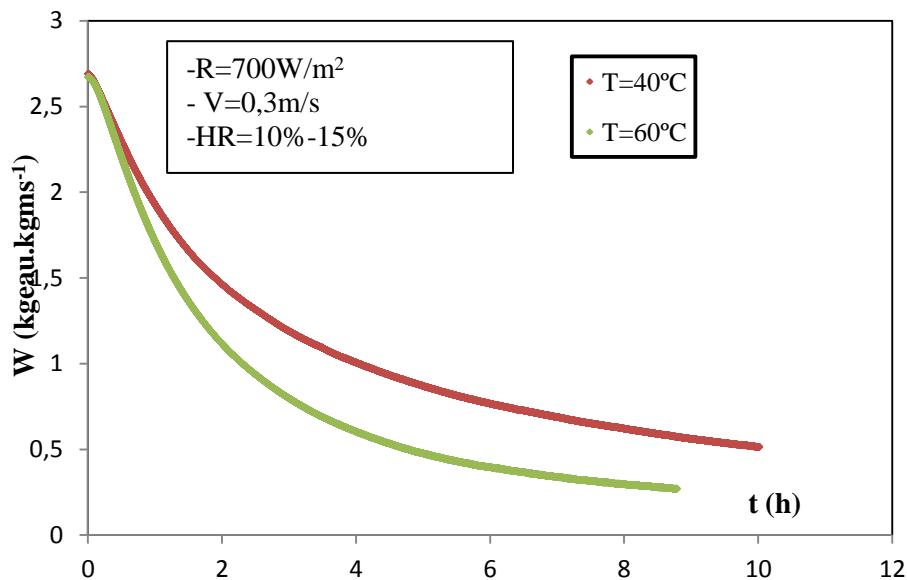


Fig. 5.15 Evolution de la teneur en eau W de la viande en fonction du temps t pour deux valeurs de température ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $60\text{ }^{\circ}\text{C}$).

La figure 5.16 montre l'évolution du flux masse F_m en fonction de la teneur en eau W pour deux valeurs de températures ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Trois phases ont été également identifiées et on constate logiquement que la phase de mise en température du produit à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ est plus longue que celle à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; d'autre part, la teneur en eau critique (W_{cri}) de transition (entre les phases 1 et 2) à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ est, logiquement aussi, légèrement inférieure à celle à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

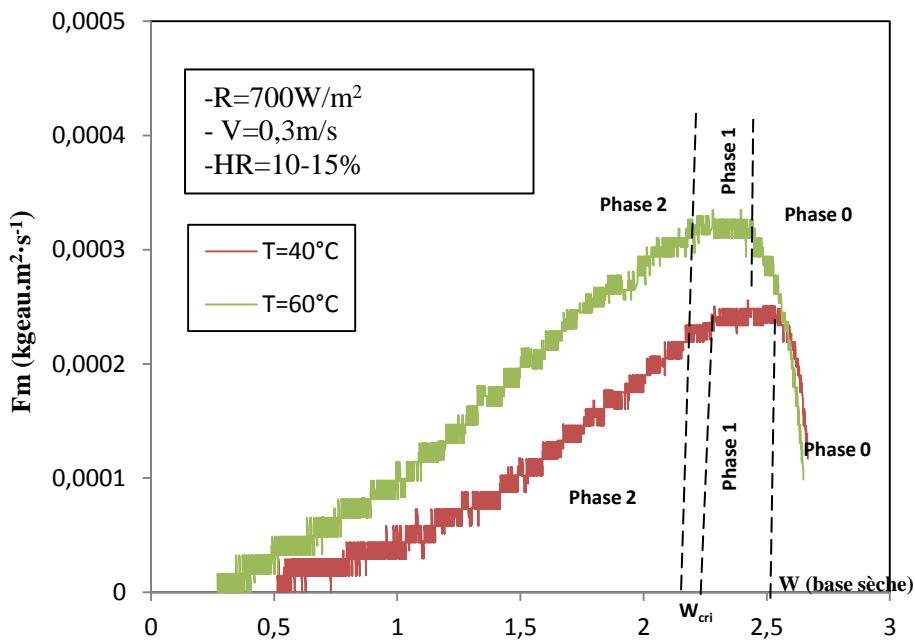


Fig. 5.16 Evolution du flux masse F_m en fonction de la teneur en eau W pour deux valeurs de températures (40°C et 60°C).

Notons ici que le retrait surfacique de la viande au cours du séchage solaire a été déterminé en suivant l'évolution de la surface des échantillons de viande fraîche (5 cm de longueur, 5 cm de largeur et 3 mm d'épaisseur) toutes les 30 minutes (Fig. 5.17). Les échantillons ont été retirés du séchoir et leurs dimensions (Longueur et largeur) ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse 1/50^{ème}, puis remis dans le séchoir. Les essais de séchage visant à appréhender ce retrait ont été effectués indépendamment des 4 essais (répétés 3 fois) présentés dans le Tableau 5.1.

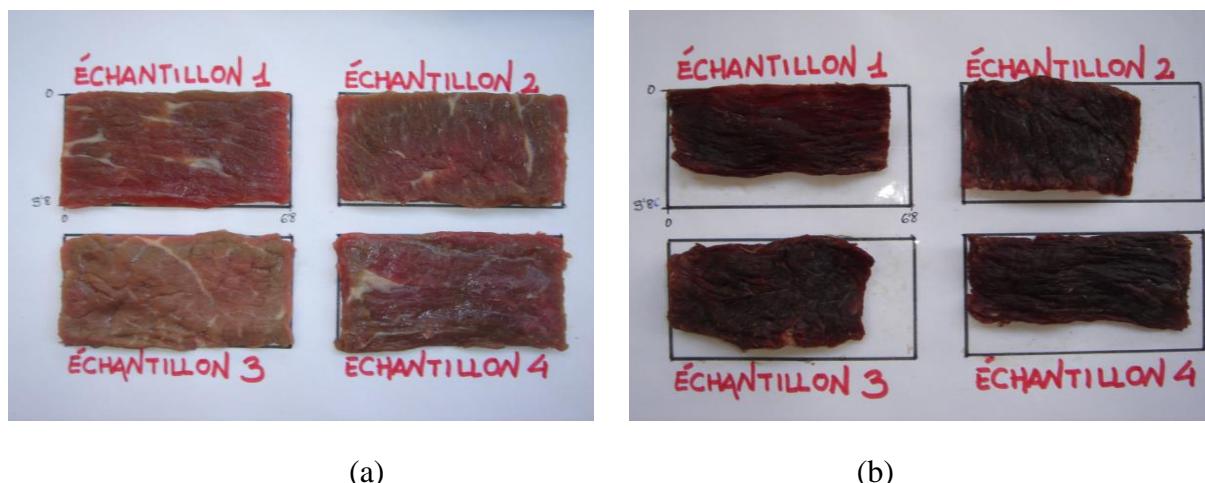


Fig. 5.17 Echantillons de viande de bœuf utilisés pour le suivi de retrait (a) avant séchage, (b) après séchage.

La figure 5.18 montre l'évolution de la surface relative du produit S/S_0 en fonction de la teneur en eau W pour quatre échantillons de viande (Fig. 5.17) séchés à 40°C , 360 W/m^2 ,

10%-15% et 0,3m/s, respectivement pour la température, le rayonnement, l'humidité relative et la vitesse de l'air. L'évolution de la surface relative des échantillons connaît deux phases : une première phase constante mais courte, qui correspond à la phase de vitesse de séchage constante (phase isenthalpe) pendant laquelle on évacue de l'eau libre, et une deuxième phase au cours de laquelle la surface relative décroît de façon linéaire. A la fin du séchage les surfaces relatives ont une valeur d'environ 0,65, ce qui correspond à un retrait de la surface du produit d'environ 35%. Nous avons noté également que les retraits ne se font pas de la même manière pour tous les échantillons d'où les différentes formes des surfaces des échantillons (Fig. 5.17-b). Toutefois les aires des surfaces des échantillons sont quasiment les mêmes (Fig. 5.18).

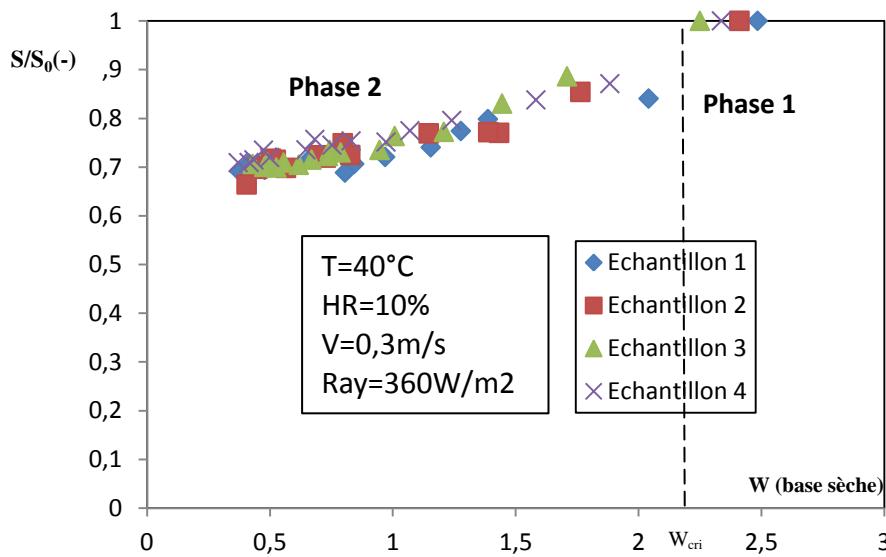


Fig. 5.18 Evolution de la surface relative de quatre échantillons de viande séchés dans les mêmes conditions.

L'impact de rayonnement sur le retrait du produit a été étudié pour deux valeurs d'intensités de rayonnement, à savoir 360 W/m^2 et 700 W/m^2 (Fig.5.19). Il ressort que le rayonnement a un impact significatif sur le retrait de la viande. En effet, pour une même teneur en eau du produit, la surface relative de la viande séchée à 700 W/m^2 est inférieure à celle de échantillons sechés à 360 W/m^2 . Toutefois on peut remarquer qu'au début de séchage, correspondant à la phase isenthalpe, les deux courbes sont quasiment identiques, le phénomène de retrait n'intervient pas encore à ce stade de séchage.

De la même manière, l'impact de la température d'air a été appréhendé. La figure 5.20 montre l'évolution du retrait de la viande de bœuf en fonction de la teneur en eau W pour deux valeurs de températures (40°C et 60°C). Les surfaces relatives des échantillons séchés à 60°C et celle des échantillons séchés à 40°C ne varient pas pendant la première phase de

séchage jusqu'à la teneur en eau critique, puis elle décroît de façon linéaire jusqu'à la fin du séchage (Fig. 5.20). Les échantillons séchés à 60 °C connaissent un retrait plus important que ceux séchés à 40° C, mais cette différence semble moins significative que celle observée pour l'impact du rayonnement (cf. Fig. 5.19).

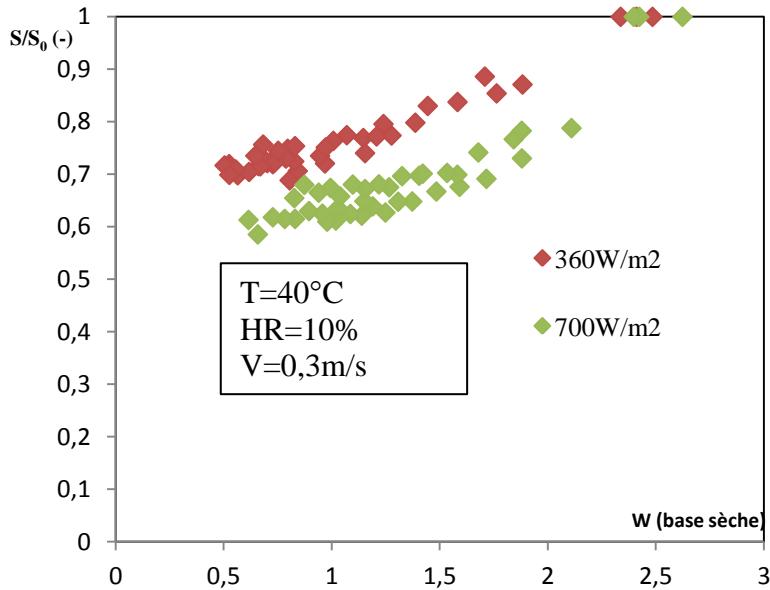


Fig. 5.19 Evolution de la surface relative de la viande de bœuf pour deux valeurs d'intensités de rayonnement (360W/m^2 et 700W/m^2).

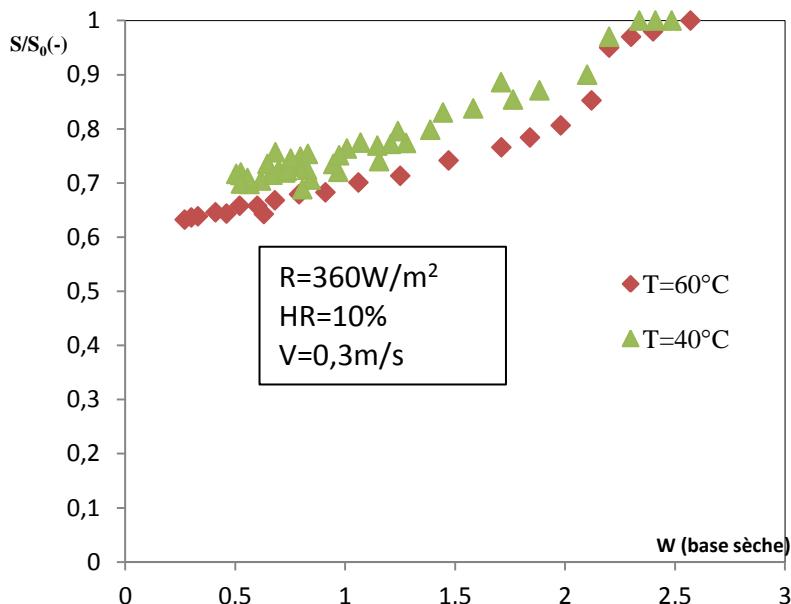


Fig. 5.20 Evolution de la surface relative de la viande de bœuf pour deux valeurs de températures ($40\text{ }^\circ\text{C}$ et $60\text{ }^\circ\text{C}$).

De façon globale, on peut donc affirmer que l'augmentation de l'apport de chaleur en surface du matériau, que cet apport soit convectif ou radiatif, induit une augmentation du stress du produit (contrainte surfacique), favorisant ainsi son retrait.

5.3 Analyses microbiologiques et biochimiques

5.3.1 Matériel et méthodes des analyses microbiologiques et biochimiques

5.3.1.1 Procédure expérimentale d'analyses microbiologiques

Pour les analyses microbiologiques, les échantillons séchés dans trois conditions de séchage (essais 1, 3 et 4 ; cf. Tableau 5.1), correspondant à deux valeurs de température (40°C et 60 °C) et deux valeurs d'intensité de rayonnement solaire (360 W/m² et 700 W/m²), ont été analysés afin d'évaluer l'impact du séchage solaire la qualité microbiologique de ce produit. Le nombre de microorganismes survivants aux différentes conditions de séchage a été estimé par la technique d'ensemencement sur des milieux gélosés ou liquides sélectifs contenant des substances empêchant le développement de microorganismes indésirables.

5.3.1.1.1 Méthode de préparation des échantillons pour les analyses microbiologiques

- Conditionnement des échantillons

Après séchage, les échantillons sont conditionnés dans des récipients stériles, contenant un produit absorbant l'humidité pour éviter la réhydratation (Fig. 5.21), avant leur transport au laboratoire de microbiologie.



Fig. 5.21 Conditionnement des échantillons séchés pour leurs transports entre leur lieu de séchage et leur lieu d'analyse.

- Préparation de la suspension mère

Pour procéder aux analyses microbiologiques des produits solides, il est généralement nécessaire de préparer une solution dite suspension mère du produit, qui sera par la suite

diluée pour ensemencer les milieux utilisés pour le dénombrement des microorganismes. La méthode utilisée pour la préparation de cette suspension mère, consiste à prélever, dans un environnement stérile, une masse m de l'échantillon dans une éprouvette graduée, à laquelle on ajoute de l'eau physiologique (0,9% de masse/volume de NaCl) stérile. La masse de l'eau physiologique ajoutée est égale à 9 fois la masse de l'échantillon. Le contenu de l'éprouvette est par la suite transféré dans des poches spéciales pour être homogénéisé à l'aide d'un Stomacher (broyeur) pendant 2 min (Fig. 5.22).



Fig. 5.22 Préparation de la suspension mère : Mélange échantillon-eau physiologique

- Dilution de la suspension mère

La méthode de dilution utilisée est celle de la dilution décimale qui consiste à ajouter 9 volumes de diluant pour un volume du produit. On procède ainsi à des dilutions successives, en partant de la dilution précédente, pour obtenir différentes séries de dilutions (10^{-1} (première dilution), 10^{-2} (deuxième dilution), etc.). Dans le cadre de cette étude nous avons procédé à des dilutions successives, avec de l'eau physiologique, jusqu'à la série 10^{-7} . Les différentes séries de dilutions ainsi obtenues ont été utilisées pour ensemencer les milieux de culture des microorganismes.

5. 3.1.1.2 Méthode d'ensemencement et de dénombrement des microorganismes

5.3.1.2.2.1 Ensemencement et dénombrement de la Flore Mésophile Aérobie Totale (FMAT)

La Flore Mésophile Aérobie Totale (FMAT) est un indicateur microbiologique qui permet d'évaluer la charge microbienne totale présente dans un aliment. La FMAT correspond à un bon nombre de microbes qui se développent à la température ambiante (entre 20°C et 40°C) parmi lesquels *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria spp.*, *Listeria*

monocytogene et *Salmonelle spp* dont la présence dans la viande est contrôlée par les normes sanitaires (cf. paragraphe 1.2.4 du chapitre 1). Le milieu PCA (Plate Count Agar) a été utilisé pour le dénombrement de la FMAT. Ce milieu a été préparé selon les instructions du fournisseur, stérilisé, puis versé dans des boites de Pétri pour former une gélose (après refroidissement). La gélose ainsi obtenue sera ensemencée par les dilutions successives préparées précédemment et servira de milieu de culture pour la FMAT. L'incubation se fait à 37°C dans une étuve thermostatée, et la lecture des résultats est effectuée toutes les 24h pendant 72h. Les résultats obtenus après 72h ont été utilisés pour quantifier la FMAT, car ils sont généralement plus fiables que ceux obtenus après 24h ou 48h. Le dénombrement de la flore se fait à l'œil nu en comptant le nombre de colonies observables sur les boites de pétris (Fig.5.23). Le nombre de colonies dans les boites de pétris est inversement proportionnel à la dilution, c'est-à-dire que les boites de pétris qui ont été ensemencées par des faibles dilutions compteront moins de colonies que celles qui ont été ensemencées par des dilutions plus élevées. Lorsque le nombre de colonie dans une boîte, correspondant à une dilution, est très important, on passe à la dilution suivante et on procède ainsi jusqu'à la dilution permettant d'avoir un nombre de colonies que l'on peu aisément compter. Le calcul du nombre d'Unités Formant Colonies (UFC) par mL est effectué en utilisant la formule 5.1 ci-dessous. Connaissant la masse (base sèche) de départ de l'échantillon utilisé pour la préparation de la suspension mère, on établit un niveau de concentration en matière sèche du produit, pour chaque dilution ; ce qui permet d'exprimer le nombre d'UFC par gramme de matière sèche.



Fig. 5.23 Formation de colonies de la FMAT dans le milieu PCA

$$N = \frac{\varepsilon C}{V(n_1 + 0,1n_2)d} \quad (5.1)$$

Avec :

- εC , la somme des colonies comptées sur les boîtes retenues de deux dilutions successives dont au moins une contient au minimum 15 colonies ;
- V , le volume de l'inoculum appliqué à chaque boîte en mL ;
- d , la dilution correspondant à la première dilution comptée (dilution la plus faible) ;
- n_1 , le nombre de boîtes retenues à la première dilution ;
- n_2 , est le nombre de boîtes retenues à la seconde dilution.

5.3.1.1.2.2 Ensemencement et dénombrement des levures et moisissures

La viande est un milieu propice au développement des levures et moisissures, du fait de sa grande activité de l'eau. Le séchage permet de diminuer cette activité de l'eau, rendant ainsi le milieu peu favorable au développement des levures et moisissures. Quand le séchage n'est pas suffisant, les levures et moisissures peuvent continuer à se développer. Nous nous sommes intéressés à la détermination des levures et moisissures dans la viande, avant et après séchage afin d'évaluer l'impact du séchage en général et celui du rayonnement solaire en particulier sur ces microorganismes.

La gélose Sabouraud au chloramphénicol a été utilisée pour isoler les levures et les moisissures. Cette gélose a été préparée suivant la même méthode utilisée pour la gélose PCA (cf. paragraphe 5.3.1.1.2.1). Le milieu sabouraud, ensemencé par les dilutions successives de la suspension mère, est incubé à 25°C pendant 72h, avec des lectures des résultats intermédiaires toutes les 24h. Le nombre d'Unité Formant Colonies (UFC) est déterminé suivant la même méthode utilisée pour le dénombrement de la FMAT (cf. paragraphe 5.3.1.1.2.1).

5.3.1.1.2.3 Ensemencement et dénombrement des coliformes

Les coliformes sont recherchés dans les aliments parce qu'ils sont des bons indicateurs de la qualité d'hygiène liée à la manipulation de ces aliments. Ce sont des bactéries présentes dans le tube digestif de l'homme et des animaux. Les coliformes fécaux, ou thermotolérants, sont un sous-groupe des coliformes totaux. L'espèce la plus fréquemment associée aux coliformes fécaux est l'*Escherichia coli* (*E. coli*) qui est un microorganisme très pathogène.

Le milieu bouillon lactosé, bilé au vert brillant plus cloche, permet d'identifier les coliformes. La présence simultanée de bile de bœuf bactériologique (agent sélectif, inhibiteur

des bactéries non intestinales) et de vert brillant (agent sélectif, inhibiteur des bactéries Gram positif) provoque l'inhibition de la presque totalité des microorganismes Gram positif et des bactéries Gram négatif autres que les coliformes. La teneur en vert brillant est spécialement déterminée afin d'empêcher la croissance des anaérobies fermentant le lactose à 44°C, ce qui évite l'obtention de résultats faussement positifs. La cloche de Durhman permet le recueil des gaz, conséquence de la fermentation du lactose, signalant la présence d'un coliforme (si le milieu a été agité correctement pour que les bactéries soient bien réparties, y compris sous la cloche). Les tubes, contenant le milieu bouillon lactosé, sontensemencés par 1 mL d'inoculum (suspension mère) et de ses dilutions décimales successives, puis incubés à 30°C pour les coliformes totaux et à 44°C pour les coliformes fécaux ou thermotolérants. La durée de l'incubation était de 48h. La lecture des résultats est basée sur la fermentation du lactose qui indique la présence de coliformes. Ceci se traduit par l'apparition de gaz dans les cloches de Duhran (volume minimum égal au 1/10^{ème} du volume de la cloche) en moins de 48 heures.

5.3.1.2 Procédure expérimentale d'analyses biochimiques

5.3.1.2.1 Dosage des lipides totaux : méthode de Folch

Les lipides totaux de la viande fraîche et séchée sont extraits selon la méthode de Folch (Folch *et al.*, 1957). La méthode de Folch utilise un mélange chloroforme/méthanol (2 volumes de chloroforme pour 1 volume de méthanol (2/1; v/v)) à raison de 20 volumes par gramme de produit. Les différents solvants utilisés (chloroforme et méthanol) sont de qualité analytique (c'est-à-dire une pureté comprise entre 95% et 99%) et proviennent des fournisseurs Fischer Scientific et Xilab. Au terme d'une heure d'agitation, on ajoute 0,2 volume de chlorure de potassium (KCl) (0,8% dans l'eau) pour un volume du mélange d'extraction (chloroforme/méthanol) afin de permettre la séparation des phases hydroalcoolique et chloroformique. Le mélange est mis sous agitation pendant 5 min avant d'être centrifugé. La phase chloroformique est récupérée et lavée trois fois avec une solution dite de Folch (Chloroforme/méthanol/KCl à 0,8% (3/48/47; v/v/v)). La phase chloroformique finale est "éclaircie" par ajout de méthanol puis filtrée sur papier pasteur (porosité: 20 µm, diamètre des filtres: 150 mm) en utilisant un mélange chloroforme/méthanol (2/1; v/v). Le filtrat est séché sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif, mis en solution dans du chloroforme, filtré sur un filtre en microfibres de verre (rétenzione particule > 1 µm, diamètre des filtres : 70 mm) afin d'éliminer toute trace d'eau, puis évaporé sous courant d'azote.

L'extrait sec est remis en solution dans un mélange chloroforme/méthanol (2/1; v/v) et conservé à - 20°C jusqu'aux analyses.

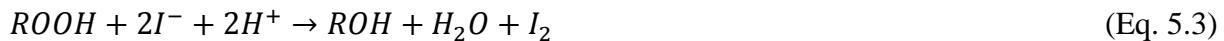
La proportion des lipides totaux contenus dans l'échantillon est donnée par :

$$\text{Taux de lipides totaux} = \frac{\text{masse lipides extraite}}{\text{masse de l'échantillon}} \times 100 \quad (\text{Eq. 5.2})$$

5.3.1.2.2 Détermination de l'indice de peroxyde

Par définition, l'indice de peroxyde est la «quantité de produit présent dans l'échantillon, exprimée en milliéquivalents d'oxygène actif par kilogramme de produit, oxydant l'iodure de potassium». Le mode opératoire appliqué est issu d'un protocole normalisé aux huiles et graisses d'origines animales et végétales. Il consiste en un traitement d'une prise d'essai en solution dans de l'acide acétique (99-100%) et du chloroforme (stabilisé avec 0,75% d'éthanol) par une solution d'iodure de potassium. L'iode libéré est titré par une solution titrée de thiosulfate de sodium.

Après ajout de la solution d'iodure de potassium dans le milieu réactionnel, la réaction suivante se produit :



Lors du titrage, la solution de thiosulfate de sodium réagit avec l'iode formé, selon la réaction:



L'indice de peroxyde est alors calculé selon la formule suivante :

$$IP = \frac{V \times T}{m} \times 10^3 \quad (\text{Eq. 5.5})$$

où :

- L'indice de peroxyde IP est exprimé en milli équivalents d'oxygène actif par kg
- V : Volume de la solution titrée de thiosulfate de sodium utilisée pour l'essai (en mL)
- T : Normalité de la solution titrée de thiosulfate de sodium (en mol/L)
- m : masse de la prise d'essai (en g)

Plus précisément, 2 g d'échantillon sont dissous dans 10 mL chloroforme, 15 mL d'acide acétique et 1 mL d'une solution aqueuse d'iodure de potassium saturée. Tous les réactifs ont été préalablement privés d'oxygène par barbotage d'un courant d'azote pur et sec. Le mélange a été agité pendant 1 minute puis laissé pendant 5 minutes à l'abri de la lumière et à température

ambiante. La réaction était arrêtée par l'ajout de 75 mL d'eau distillée. L'iode libéré a été titré par une solution de thiosulfate de sodium 0,01 N, en utilisant l'Iotech comme indicateur coloré. Parallèlement, un essai à blanc a été réalisé dans les mêmes conditions afin de s'assurer de la pureté des réactifs. Dans la mesure où les masses de lipides extraits des différents échantillons de viande sont faibles (inférieures à 2 g), les lipides sont dissous, dans des proportions connues, dans une huile (le myglyol) d'indice de peroxyde connu. Une régression linéaire permet de calculer l'indice de peroxyde des lipides extraits de la viande.

5.3.2 Résultats des analyses microbiologiques et biochimiques

5.3.2.1 Résultats et discussion des analyses microbiologiques

Le tableau 5.2, présente les résultats des analyses microbiologiques sur les échantillons de viande fraîche et séchée à différentes conditions de séchage (cf. Tableau 5.1). Les analyses effectuées n'ont pas détecté la présence des coliformes (totaux et thermotolérants) dans la viande fraîche, tout comme dans la viande séchée.

Tableau 5.2: Résultats des analyses microbiologiques effectuées sur les viandes fraîche et séchée

Viande	T (°C)	Rayonnement (W/m ²)	UFC/g (masse sèche) Flore Mésophile Aérobio totale (FMAT)	Levures et Moisissures/g de matière sèche	% de	% de réduction des
					réduction de la FMAT	levures et moisissures
fraîche	-	-	2,4x10 ⁴	7,76x10 ²	-	-
séchée	40	360	7,45x10 ³	1,4x10 ³	69	Augmentation
	60	360	5,84x10 ³	3,72x10 ²	76	52
	60	700	2,34x10 ³	2,05x10 ²	90	73

Il ressort de ces résultats que le nombre de colonies de la FMAT, dans la viande fraîche, est de $2,4 \times 10^4$ UFC/g. Cette valeur est inférieure à 10^{17} et il n'y a pas de présence de coliformes ; par conséquent cette viande ne présente pas de risque sanitaire d'après la Food Standard Agency (Agence de contrôle de qualité des produits alimentaires du Royaume-Uni). Après séchage, le nombre de colonies de la FMAT dans la viande est compris entre $2,34 \times 10^3$ UFC/g et $7,45 \times 10^3$ UFC/g, en fonction des conditions de séchage. Les conditions de séchage appliquées permettent donc d'avoir un taux de réduction de la FMAT compris entre 69% et

90%. La réduction la plus significative a été obtenue pour un séchage à la température de 60°C et l'intensité de rayonnement solaire de 700W/m², correspondant aux valeurs les plus élevées de la température et de l'intensité de rayonnement, des conditions expérimentales de l'étude (cf. Tableau 5.1). Une augmentation de l'intensité de rayonnement solaire de 360W/m² à 700W/m² a permis d'obtenir une augmentation du taux de mortalité de la FMAT de 15%, pour une température de séchage constante de 60°C (cf. Tableau 5.2). L'augmentation de la température de séchage de 40°C à 60°C permet d'augmenter le taux de mortalité de la FMAT de 7%, pour une intensité de rayonnement constante de 360W/m². Ce résultat montre que l'impact du rayonnement solaire sur la mortalité de la FMAT est plus significatif que celui de la température.

En ce qui concerne les levures et moisissures, on a constaté une augmentation sensible de ces microorganismes sur les échantillons séchés à 40°C et 360W/m². Cette augmentation pourrait s'expliquer par une contamination pendant ou après séchage de la viande (milieu extérieur, manipulation humaine etc....), ou par l'insuffisance des conditions de séchage appliquée à la viande (40°C et 360W/m²) à ralentir le développement des levures et moisissure au cours du séchage. Une augmentation de l'intensité de rayonnement solaire de 360W/m² à 700W/m², augmente le taux de destruction des levures et moisissures d'environ 20%. On peut donc dire que l'augmentation du rayonnement solaire, au cours du séchage, conduit à une diminution des levures et moisissures dans la viande.

D'autre part, nous avons analysé sur le plan microbiologique, des échantillons de viande séchée au soleil au Cameroun, en vue de la production du *Kilichi*, et des échantillons de *Kilichi* (produit final), fabriqué à partir de cette même viande séchée (cf. paragraphe 1.3.3 du chapitre 1) ; ceci afin de déterminer la Flore Mésophile Aérobie Totale, les levures et moisissures, et les coliformes. Le tableau 5.3 présente les résultats de ces analyses.

Tableau 5.3 : Résultats des analyses microbiologiques sur la viande séchée au soleil et le *Kilichi*.

Viande	UFC/g (masse sèche)	Levures et Moisissures/g de matière sèche	Coliformes totaux	Coliformes thermotolérants
Flore Mésophile				
Aérobiose totale (FMAT)				
Séchée au soleil	$3,3 \times 10^5$	$9,76 \times 10^4$	+++ (très nombreux)	+++ (très nombreux)
<i>Kilichi</i> (produit final)	$4,7 \times 10^4$	0	+++ (très nombreux)	+++ (très nombreux)

D'après les résultats des analyses microbiologiques (Tableau 5.3) le nombre de colonies de la FMAT est de $3,3 \times 10^5$ UFC/g dans la viande séchée au soleil et $4,7 \times 10^4$ UFC/g dans le *Kilichi*. La FMAT dans le *Kilichi* est donc inférieure à celle dans la viande séchée au soleil. Ceci s'expliquerait par l'action des traitements que cette viande a subis après séchage (épices, rôtissage au feu etc...) en vue de l'obtention du *Kilichi* (cf. paragraphe 1.3.3 du chapitre 1) qui auraient eu pour effet de détruire certains microorganismes. De manière générale, la viande séchée au Cameroun contient des quantités de FMAT plus élevées que celles obtenues pour les échantillons de viande séchés dans le séchoir de laboratoire, en France. La FMAT dans la viande séchée au soleil au Cameroun est au moins 40 fois plus élevée que celle dans la viande séchée au laboratoire. Cette différence pourrait s'expliquer par les conditions de séchage traditionnel (à l'air libre) du *Kilichi* qui exposent la viande à des risques de contamination plus importants (poussières, mouches, insectes...) (cf. paragraphe 1.4.1 du chapitre 1).

D'après les résultats des analyses microbiologiques, le *Kilichi* ne contient pas de levures et moisissures alors que la viande séchée au soleil contient une quantité de $9,76 \times 10^4$ (base sèche). Les traitements post séchage subis par la viande pourraient expliquer cette différence. Par ailleurs, la quantité de levures et moisissures dans la viande séchée au Cameroun est nettement supérieure (au moins 70 fois supérieure) à celle de la viande séchée au laboratoire. Cette différence pourrait s'expliquer par les conditions de séchage évoquées précédemment ou par le développement des levures et moisissures entre le prélèvement des échantillons au Cameroun et leurs analyses en France à Bordeaux (environ 2 mois). Cette dernière hypothèse suggère que le produit séché n'a pas atteint le niveau de stabilité

microbiologique (activité de l'eau <0,65), permettant d'empêcher le développement des microorganismes.

D'autre part, les analyses ont révélé une quantité importante de coliformes totaux et fécaux dans la viande séchée et dans le *Kilichi*. Ces microorganismes étant des indicateurs des conditions hygiéniques de manipulation des aliments, on pourrait justifier leur présence importante dans la viande séchée au Cameroun comme une conséquence des mauvaises conditions hygiéniques à divers niveaux du processus d'obtention de ces produits (abatage, transport, séchage ou manipulations ultérieures).

En définitive, les analyses microbiologiques ont montré que le séchage démunie significativement la plupart des microorganismes pathogènes présents dans la viande, améliorant ainsi sa qualité sanitaire. L'impact du rayonnement solaire sur la destruction des microorganismes est plus significatif que celui de la température de l'air de séchage. De manière générale, la qualité de la viande séchée au laboratoire a une meilleure qualité sur le plan microbiologique, que la viande séchée de manière traditionnelle au Cameroun. Cette étude confirme que les conditions de séchage et de manipulation de la viande jouent un grand rôle dans sa qualité finale. Cependant des analyses microbiologiques supplémentaires, à d'autres températures comprises entre 40°C et 60°C et intensités de rayonnement comprises entre 360W/m² et 700W/m², sont nécessaires pour confirmer ces résultats.

5.3.2.2 Résultats et discussion des analyses biochimiques

Les analyses biochimiques ont porté sur la détermination de la teneur en lipides totaux des viandes fraîches et séchée et le taux d'oxydation de ces lipides. Les conditions de séchage des échantillons de viande sont les mêmes que ceux des analyses microbiologiques (essais 1,3 et 4; cf. Tableau 5.1). La figure 5.24 présente les teneurs en lipides totaux des viandes fraîche et séchée. Nous pouvons constater, par comparaison à la viande fraîche, que les conditions de séchage n'ont aucun effet significatif sur la teneur en lipides totaux (base sèche) de la viande. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où, les teneurs en matières grasses résultent de plusieurs prélèvements effectués en différents points des échantillons, de manière à s'affranchir d'un éventuel problème d'hétérogénéité de la matrice alimentaire.

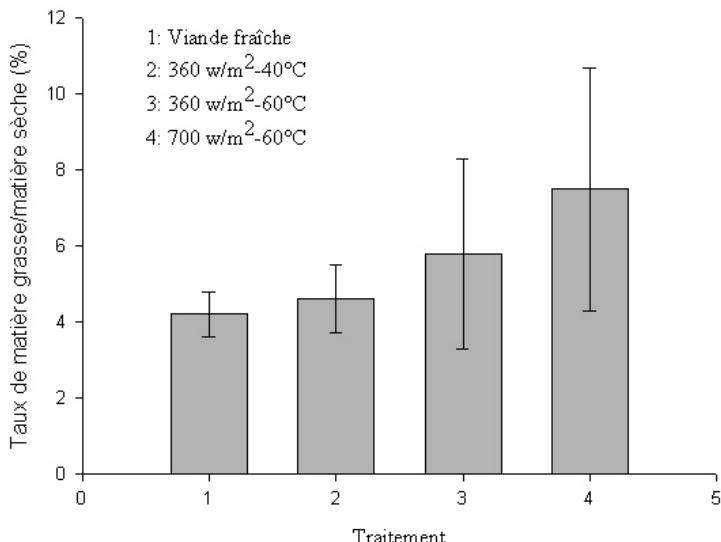


Fig .5.24 Evolution de la teneur en lipides totaux des viandes fraîche et séchée.

L'indice de peroxyde (IP) est une mesure classique réalisée en agroalimentaire pour estimer la présence de produits primaires d'oxydation. Comme indiqué dans la partie matériel et méthodes, ne disposant pas de quantité de lipides suffisantes, nous avons effectué plusieurs dilutions dans du myglyol (indice de peroxyde = 0). Les figures 5.25, 5.26 et 5.26 présente les courbes de l'évolution des indices de peroxydes en fonction du pourcentage de dilution des lipides totaux, extraits de la viande, dans le myglyol, pour les viandes fraîche et séchée. Ces courbes montrent que l'indice de peroxyde croît de manière linéaire avec l'augmentation du pourcentage de dilution des lipides, ce qui permet de déterminer l'indice de peroxyde de la totalité de lipides extraits de la viande, en extrapolant le pourcentage de dilution à 100%. Les indices de peroxyde des viandes fraîche et séchée sont récapitulés dans le tableau 5.4.

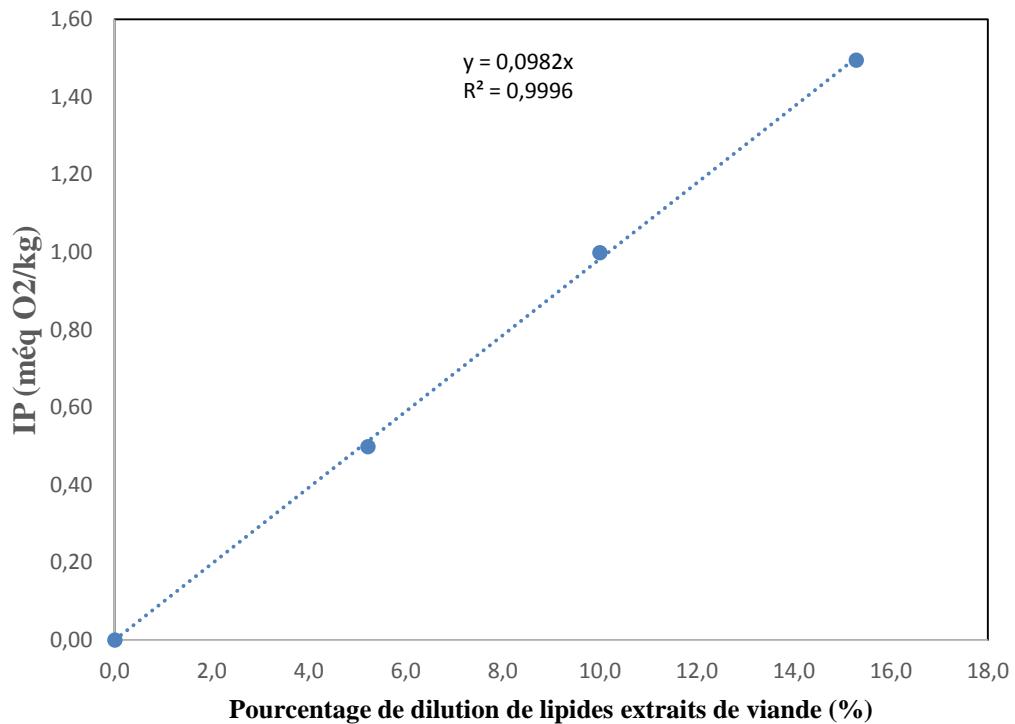


Fig. 5.25. Evolution de l'indice de peroxyde IP en fonction du pourcentage de dilution des lipides taotaux dans le myoglyol: Viande fraîche.

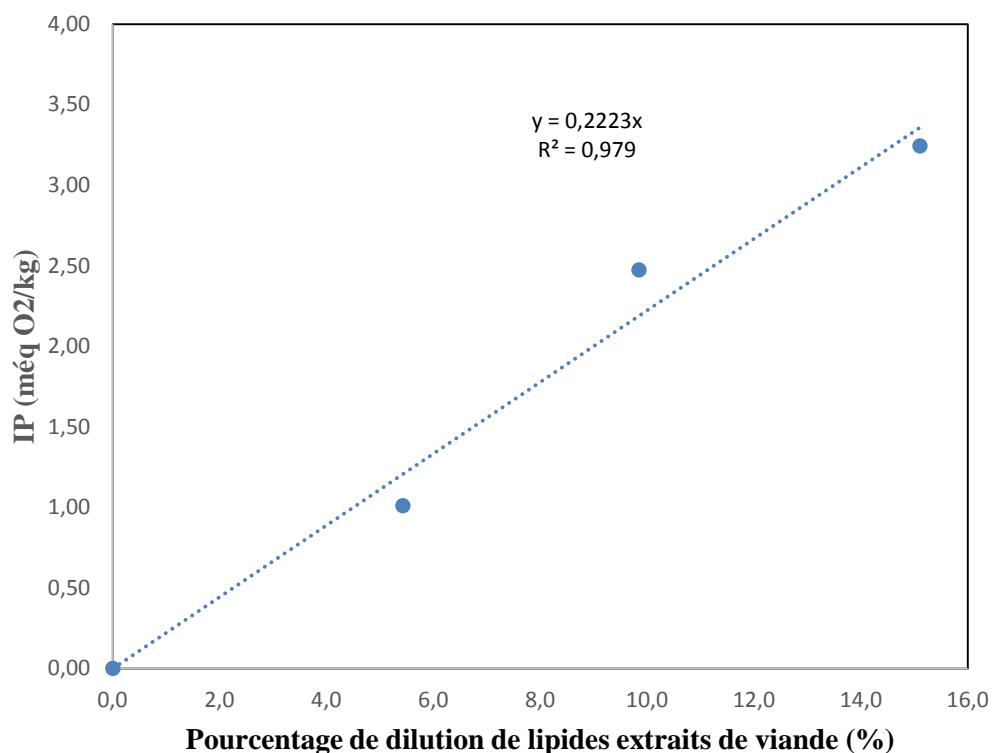


Fig. 5.26. Evolution de l'indice de peroxyde IP en fonction du pourcentage de dilution des lipides taotaux dans le myoglyol : Viande séchée à 40°C et 360 W/m²

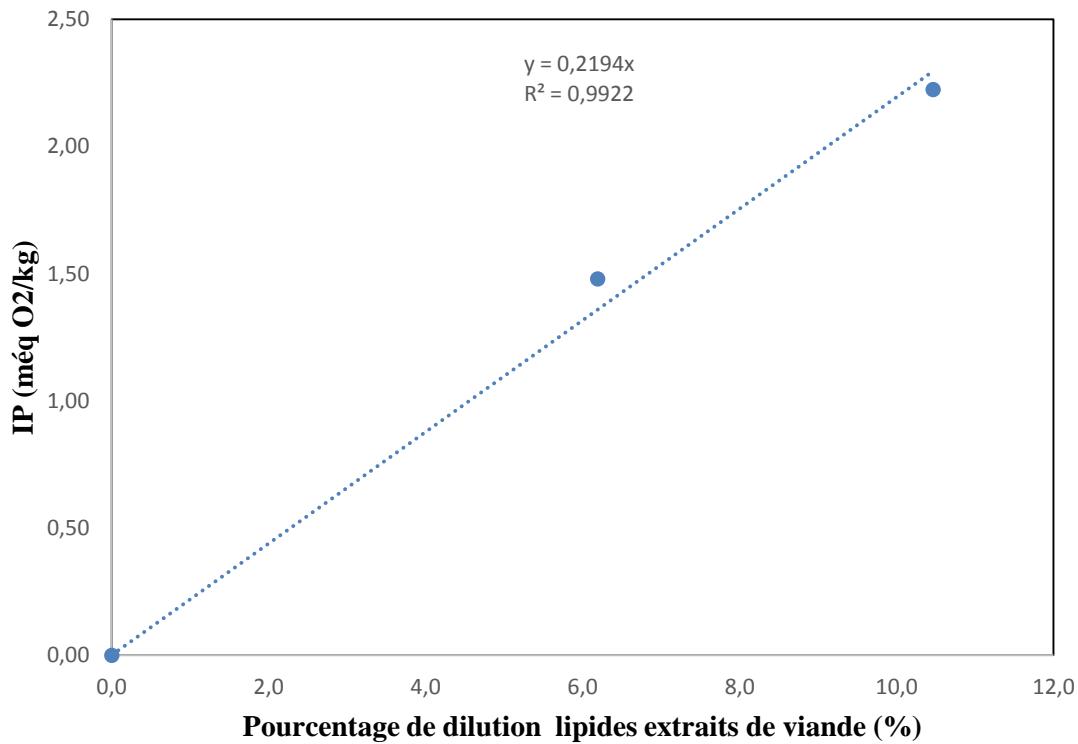


Fig. 5.27. évolution de l'indice de peroxyde IP en fonction du pourcentage de dilution des lipides taotaux dans le myoglyol : Viande séchée à 60°C et 360 W/m².

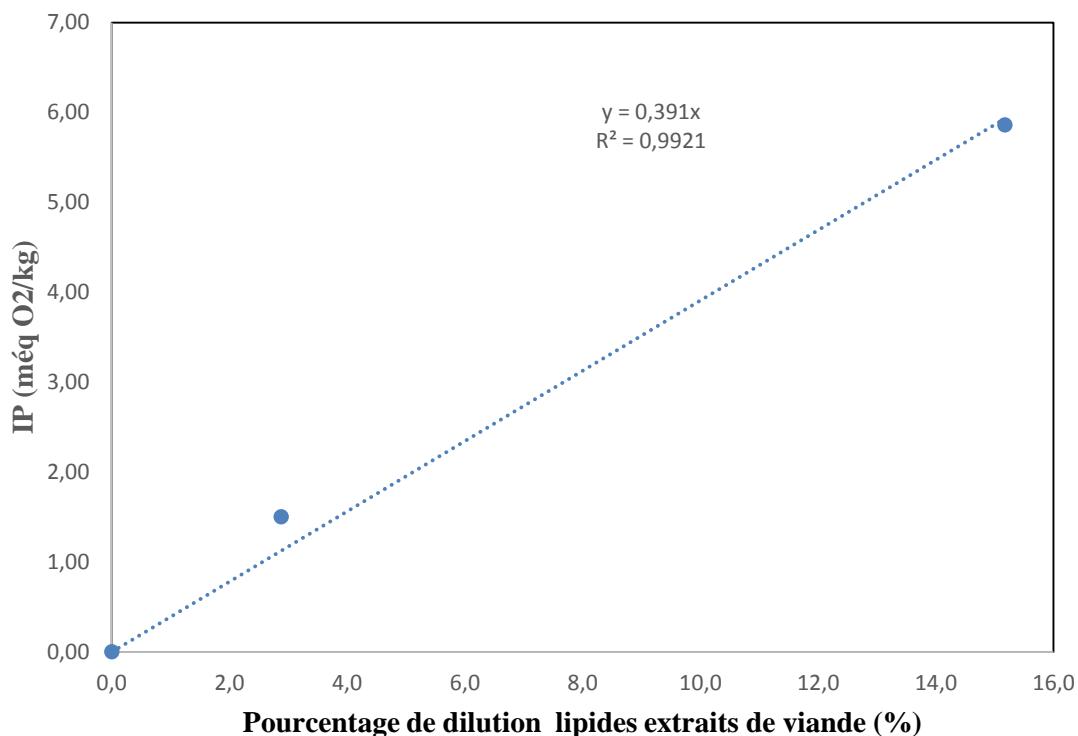


Fig. 5.28. Evolution de l'indice de peroxyde IP en fonction du pourcentage de dilution des lipides taotaux dans le myoglyol : Viande séchée à 60°C et 700 W/m².

Tableau 5.4: Indice de peroxyde des viandes fraîche et séchée.

Viande	T(°C)	Rayonnement (W/m ²)	Indice Peroxyde O ₂ /kg	de (méq d'oxydation après séchage
Fraîche	-	-	9,82	
	40	360	22,23	125%
Séchée	60	360	21,94	123%
	60	700	39,10	298%

L'analyse de l'indice de peroxyde montre que les traitements utilisés induisent une forte oxydation des lipides (125% pour 360 W/m² contre 298% pour 700 W/m² par rapport à la viande fraîche) (Tableau 5.4). L'augmentation de la température de 40°C à 60°C ne semble avoir aucune conséquence sur l'oxydation des lipides alors qu'une augmentation de l'intensité de rayonnement de 360W/m² à 700 W/m², augmente l'oxydation des lipides de 44% (Tableau 5.4). L'effet du rayonnement solaire sur l'oxydation des lipides est donc plus significatif que celui de la température.

Le muscle de bœuf est généralement constitué d'acides gras saturés (palmitique 16:0: environ 25%, stéarique 18:0 environ 13%) et insaturés (oléique 18:1 environ 36% et linoléique 18:2 environ 2%). Ce sont ces derniers qui peuvent s'oxyder. L'oxydation est la conséquence de l'application des rayons UV qui sont connus pour leur effet pro-oxydant sur les lipides. Il serait intéressant d'effectuer des analyses sensorielles afin de déterminer l'influence de ce traitement sur les caractéristiques organoleptiques du produit après séchage. En effet, les produits primaires d'oxydation conduisent à des produits secondaires (type aldéhydes, cétones acides ...) qui peuvent modifier des caractéristiques organoleptiques des produits alimentaires en développant un goût « rance ».

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif global de cette thèse était de proposer une meilleure compréhension du comportement de la viande de bœuf au cours du séchage solaire dans un contexte de pays tropicaux. Notre démarche a consisté, dans un premier temps, à décrire les phénomènes internes au produit, à travers l'étude expérimentale et la modélisation des isothermes de désorption et cinétiques de séchages de la viande de bœuf; puis de passer à l'échelle du procédé par la mise en place et la validation d'un modèle de séchage solaire de la viande de bœuf, adapté à un séchoir solaire, conçu et réalisé pour le séchage des produits carnés dans un contexte tropical (séchoir solaire de *Kilichi*). L'impact du séchage solaire sur la qualité du produit a été pris en compte à travers des analyses microbiologiques et biochimiques effectuées sur des échantillons de viande de bœuf séchés, à l'échelle du laboratoire, dans un séchoir solaire conçu et réalisé pour avoir une bonne maîtrise des paramètres de séchage solaire.

A l'échelle du produit, les isothermes de désorption de la viande de bœuf et les cinétiques de séchage ont été déterminées et modélisées à des paramètres d'air de séchage proches de ceux rencontrées dans les procédés de séchage solaire des pays tropicaux. L'étude des isothermes de désorption a permis d'identifier une zone de stabilité microbiologique pour la viande de bœuf, qui correspond à des teneurs en eau minimales comprises entre de 0,25 (base sèche) et 0,15 (base sèche). Le modèle GAB a donné une bonne précision pour la description des valeurs expérimentales des isothermes de désorption de la viande, et a été retenu pour la modélisation de ces isothermes. Les valeurs expérimentales et celles obtenues par le modèle GAB ont été utilisées pour calculer la chaleur isostérique de désorption de la viande de bœuf. La quantité d'énergie nécessaire pour déshydrater un kg de viande de bœuf jusqu'à la zone de stabilité du produit; est de 25% supérieure à la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure. Les propriétés de l'eau liée ont été déterminées et l'influence de la température sur ces propriétés a également été identifiée. La densité de l'eau liée obtenue est quasiment le double de celle de l'eau libre, et les tailles des pores de viande de bœuf séchée classe celle-ci dans la catégorie des matériaux microporeux. L'augmentation de la température de séchage a conduit à une diminution de la densité de l'eau liée et à une augmentation de la taille des pores de la viande de bœuf. Les cinétiques de séchage de la viande de bœuf ont montré un impact significatif de la température de l'air sur ces cinétiques, comparée aux autres paramètres de séchage (vitesse de l'air et humidité relative). Deux phases de séchages ont été identifiées: une phase constante de séchage et une phase de

ralentissement; ce qui a permis de modéliser les cinétiques de séchage par la méthode du flux-masse isenthalpe. L'expression mathématique du modèle obtenu a permis de décrire les valeurs expérimentales avec une précision meilleure que celles des modèles les plus couramment utilisés pour modéliser les cinétiques de séchage.

A l'échelle du procédé, une modélisation du séchage solaire de la viande bœuf adaptée au séchoir solaire de *Kilichi* a été effectuée et validée dans un contexte tropical (N'Gaoundéré, Cameroun). Le séchoir solaire de *Kilichi*, utilisé pour la modélisation, a été conçu en prenant en compte les besoins exprimés par les producteurs de ce produit carné, les caractéristiques intrinsèques du produit et les dimensions socio-économiques et climatiques du contexte local. Ce qui a permis de réaliser un séchoir solaire direct avec capteur intégré dans la chambre de séchage, qui répond aux attentes des utilisateurs en termes de quantité de produits séchés (8 kg de viande fraîche par jour), de qualité de séchage du produit (teneur en eau finale, durée de séchage et apparence du produit), de coût d'acquisition, de coût d'exploitation et d'encombrement. La modélisation de séchage solaire de la viande de bœuf proposée prend en compte les interactions entre l'environnement météorologique, les caractéristiques intrinsèques du produit et le comportement thermique du séchoir. Une modélisation de la vitesse de l'air dans le séchoir solaire a permis de déterminer la vitesse de l'air dans chaque volume de contrôle du séchoir. Des bilans de masse et d'énergie ont été effectués sur le produit et sur l'air, dans chacun des quatre volumes de contrôle de séchage. La modélisation du comportement du séchoir solaire vis-à-vis de rayonnement solaire a été effectuée en prenant en compte les ombrages portés par les produits supérieurs, et la géométrie du séchoir. Un code numérique a été écrit sous Matlab pour résoudre le modèle en utilisant la méthode de résolution numérique de Runge Kutta d'ordre 4.

Les essais de validation du modèle ont été effectués à N'Gaoundéré (Cameroun) pendant trois périodes, choisies pour couvrir les principales saisons climatiques de la localité. La méthode traditionnelle de séchage de la viande du *Kilichi* (séchage à l'air libre) et la méthode par le séchoir solaire réalisé ont été utilisées simultanément et en même lieu, pour comparer les cinétiques de séchage de la viande de bœuf obtenues par les deux méthodes. Ces essais ont permis de montrer que le séchoir solaire permet d'obtenir un gain significatif en temps (au moins 50%) tout en protégeant les produits contre les intempéries et les insectes. Les résultats de ces essais ont permis également de valider le modèle de séchage de la viande de bœuf mis en place, et ceci pour les trois périodes d'essais.

Pour étudier l'impact du séchage solaire les qualités microbiologiques et biochimiques de la viande, nous avons conçu et réalisé un séchoir solaire de laboratoire qui permet de

soumettre la viande à différentes conditions de séchage solaire, réglables par l'opérateur en fonction de ses besoins. Les analyses microbiologiques ont portés sur la présence la Flore Mésophile Aérobie Totale, des levures et moisissures et des coliformes dans la viande fraîche et la viande séchée au laboratoire. Les mêmes analyses ont été faites sur des échantillons de viande séchées traditionnellement au Cameroun et sur le *Kilichi* (produit final). Il s'est dégagé de cette étude que, de manière générale, le séchage solaire réduit significativement les microorganismes présents dans la viande (jusqu'à 90% pour la FMAT et 70% pour les levures et moisissures), avec un impact plus significatif du rayonnement solaire, comparé à la température. La viande séchée au laboratoire est d'une qualité meilleure, sur le plan microbiologique, que la viande séchée de manière traditionnelle au Cameroun du fait des conditions de séchage et de manipulation de cette dernière. Les analyses biochimiques ont permis de déterminer les teneurs en lipides des viandes fraîche et séchée au laboratoire, ainsi que le niveau d'oxydation de ces lipides. Ces analyses ont montré que le séchage n'a pas un impact significatif sur la teneur en lipide de la viande, mais induit une forte oxydation des lipides, avec des taux d'oxydation compris entre 125% et 298%. Cette oxydation serait essentiellement due à l'impact au rayonnement solaire compte tenu du fait que la température n'a pas montré d'influence sur l'oxydation des lipides.

Les travaux de cette thèse ont permis de mieux comprendre le comportement de la viande au cours du séchage, à l'échelle du produit et à l'échelle du procédé. Le modèle de séchage solaire de la viande bœuf mis en place et la validation de celui-ci dans un contexte tropical, en utilisant un séchoir solaire adapté à ce contexte, sera utile pour la conception des séchoirs solaires des produits carnés, en particulier dans les pays tropicaux. Les analyses microbiologiques ont permis d'évaluer l'impact du séchage solaire, en particulier le rayonnement solaire, sur la qualité de la viande, et de faire un lien entre la qualité du produit et les paramètres de pilotage du procédé.

En perspectives, Nous envisageons d'approfondir les analyses microbiologiques et biochimiques en explorant une large gamme des paramètres de séchages de la viande. Des analyses plus ciblées, sur certains microorganismes pathogènes comme les *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria spp.*, *Listeria monocytogene* et *Salmonelle spp.*, sont nécessaires pour une comparaison avec les exigences des normes sanitaires. Il est également important d'étudier l'impact du séchage solaire sur les principales propriétés nutritionnelles et organoleptiques de la viande. Les résultats de ces différentes études microbiologiques, biochimiques et organoleptiques, permettront de définir les paramètres optimaux de séchage

solaire de la viande de bœuf. Ces paramètres optimaux seront utilisés pour la qualification des séchoirs solaires.

NOMENCLATURE

Symbole	désignation	Unité
A	Surface de sorption	$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
a	Azimut	$^\circ$
a, b, C, K, C', K'	Paramètres des modèles BET et GAB	(-)
a_w	Activité de l'eau	(-)
C	Densité de l'eau liée	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
C_P	Chaleur massique	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$
d	Durée du jour, Durée de séchage	h
D	Irradiation solaire diffuse journalière	$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$
D*	Densité de flux solaire diffus	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
D_H	Diamètre hydraulique	m
ds	Longueur de la surface d'échange	m
e	épaisseur	mm
EF	Efficacité du modèle	(-)
ET	Equation du temps	$^\circ$
F	Facteur de forme	(-)
F_m	Flux masse	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
F_{mis}	Flux masse isenthalpe	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
G	Irradiation solaire globale journalière	$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$
G*	Densité de flux solaire global	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
h	Coefficient de convection, hauteur du soleil	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}, {}^\circ$
H	enthalpie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
H_L	Chaleur de condensation de l'eau	(J/kg)
H_m	Chaleur de sorption totale de la monocouche	(J/kg)
HR	Humidité relative	%
l	Longitude, largeur	$^\circ, \text{ m}$
L	Latitude, Longueur	$^\circ, \text{ m}$
l_{ref}	Longitude de référence	$^\circ$
m_{eq}	Masse d'équilibre	kg
m_s	Masse sèche	kg
m_t	Masse à un instant t	kg
N	Numéro du jour, Nombre de monocouches adsorbées, Nombre de constantes du modèle de cinétique	(-)
n	Nombre de point expérimentaux des isothermes et cinétiques.	(-)
N_U	Nusselt	(-)
P	Pourcentage de déviation	%
Pr	Prandtl	(-)
q	Débit massique d'air	$\text{Kg air} \cdot \text{h}^{-1}$
Q_s	Chaleur isostérique de désorption	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Q_{sn}	Chaleur isostérique nette de sorption	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
R	Constante des gaz parfait, Résidus	$8,314 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, (-)$
r_c	Rayon critique	m

Symbole	désignation	Unité
Re	Reynolds	(-)
RMSE	Root Mean Square Error	(-)
S	Irradiation solaire direct journalière , Somme des erreurs quadratiques, Surface	$\text{kWh.m}^{-2}\text{j}^{-1}$, (-), m^2
S^*	Densité de flux solaire global	W.m^{-2}
t	Temps, Epaisseur de la monocouche	(s, h), mm
$T_{\infty h}$	Température humide de l'air	$^{\circ}\text{C}$, K
TCF	Temps civil de fuseau horaire	h
TL	Temps légal	h
TS	Temps solaire	h
Ts	Température de séchage	$^{\circ}\text{C}$
U	Vitesse de l'air	m.s^{-1}
V	Vitesse de l'air, Volume	m.s^{-1} , m^3
VC	Volume de contrôle	(-)
VCI	Volume de contrôle inférieur	
VCS	Volume de contrôle supérieur	
V_M	Volume molaire de l'adsorbant	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$
V_r	Vitesse de séchage réduite	(-)
W	Teneur en eau	kg eau/kg matière sèche
W_0	Teneur en eau de la monocouche	kg eau/kg matière sèche
W_{cri}	Teneur en eau critique	kg eau/kg matière sèche
W_{eq}	Teneur en eau d'équilibre	kg eau/kg matière sèche
W_r	Teneur en eau réduite	(-)
α	compacité, Coefficient d'absorption,	m^{-1} , (-)
δ	déclinaison	$^{\circ}$
ΔP	Pertes de charges	Pa
ε	Porosité volumique, émissivité	(-),(-)
λ	Conductivité thermique, Coefficient pertes de charge régulière,	$\text{W.m}^{-1}.^{\circ}\text{C}^{-1}$, (-)
ξ	Coefficient de pertes de charges singulières	(-)
ρ	Masse volumique, Facteur de réflexion	kg.m^{-3} , (-)
σ	Constante de Stephan-Boltzmann, Tension superficielle de surface	$\text{W.m}^{-2}.K^{-4}$, Nm^{-1}
τ	Coefficient de transmission	(-)
φ	Flux de chaleur	W.m^{-2}
ω	Angle horaire	$^{\circ}$
ΔH	Enthalpie molaire partiel de sorption	j.mol^{-1}
ΔH_v	Chaleur latente de vaporisation	(J/kg)
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
χ^2	Chi-2	(-)

Indices

Symbole	Désignation
s	Produit sec
p	Produit
exp	Expérience
mod	Modèle
moy	moyenne
ext	extérieur
vih	Vitre horizontale
vig	Vitre gauche
vid	Vitre droite
ph	Paroi horizontale
Pg	Paroi gauche
Pd	Paroi droite
i	Isolant
cl	claire
p	produit
+	Partie supérieure du produit
-	Partie inférieure du produit
par	Paroi arrière
pav	Paroi avant
rsd	Rayonnement solaire direct
rsdif	Rayonnement solaire diffus
rir	Rayonnement infrarouge
cv	convection
as	Air sec
v	vapeur
vi	vitre
1	Air du trajet 1
2	Air du trajet 2
3	Air du trajet 3
4	Air du trajet 4
pcl _i	Produits de la claire i

Exposants

Symbole	Désignation
a	air
p	produit
+	Partie supérieure du produit
-	Partie inférieure du produit

BIBIOGRAPHIE

- Aboul-Enein, S, El-Sebaii, A.A., Ramadan, M.R.I., & El-Gorary, H.G. (2000). Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying application. *Renewable Energy*, 21, 505-521.
- Ahn, D. U., Jo, C., Du, T., Olson, D. G., & Nam, K. C. (2000). Quality characteristics of pork patties irradiated and stored in different packaging and storage conditions. *Meat Science*, 56 (2), 203–209.
- Aktas, N., & Gürses, A. (2005). Moisture adsorption properties and adsorption isosteric heat of dehydrated slices of pastirma (Turkish dry meat product). *Meat Science*, 71, 571-576.
- Allen, R. (1997). Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2, 56-67.
- Al-muhtaseb, A.H., Mc Minn, W.A.M., & Magee, T.R.A. (2002). Moisture Sorption Isotherm characteristic of food products. A review. *Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE*, Vol 80, Part C, 118-128.
- Anderson, R. B. (1946). Modification of the B.E.T. equation. *Journal of American Chemical Society*, 68, 686-691.
- AOAC (1997). Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Attwell, E. (2003). Biltong wakes up. *South African Food Review*, 30, 11-13.
- Aymerich, T., Picouet, P.A., & Monfort, J.M.(2008). Decontamination technologies for meat products. *Meat Science*, 78,114–129.
- Badescu, V. (1999). Correlations to estimate monthly mean daily solar global irradiation: application to Romania. *Energy*,24, 883-893.
- Baini, R., & Langrish, T.A.G. (2007). Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering* 79,330-343.
- Banque Mondiale (2015). Indicateur de développement dans le monde. Afrique Subsaharienne-Cameroun. www.banquemondiale.org. Consulté le 20 Mars 2015.
- 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.
- Besharat, F., Dehghan, A.A., & Faghih, A.R. (2013). Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, 798-821.
- Bigstock blog. (2014). Biltong photo. www.Bigstockphoto.com. Consulté le 12 Décembre 2014.
- Bizot, H., & Multon, J.L. (1978). Méthode de référence pour la mesure de l'activité de l'eau dans les produits alimentaires. *Annales de Technologie Agricole*, 27 (2), 441-449.
- Black, J.N. (1956). The distribution of solar radiation over the earth's surface. *Archiv fur Meteorologie, Geophysik, und Bioklimatologie Serie A Meteorologie und Geophysik*,7, 165-189.
- Blog A moveable kitchen. (2014). Kilichi au soleil. www.amoveablekitchen.blogspot.fr. Consulté le 10 Décembre 2014.
- Blog Sophie au Niger. (2015). Le vendeur de Kilichi. www.sophieauniger.eklablog.com. Consulté le 10 Janvier 2015.
- Brewer, M.S. (2009). Irradiation effects on meat flavor: A review. *Meat Science*, 81, 1–14.
- Briggs, G.M. (1985). Muscle food and human health. *Food Technology*, 39, 34-38.
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a theory of the Van der Walls adsorption of gases. *Journal of American Chemical Society*, 62, 1723-1732.
- Brunauer, S., Emmet, P.H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60, 309-319.
- Bureau Central des Recensements et des Etudes des Populations (BUCREP). (2005). Rapport de présentation du 3ème recensement général de la population et de l'habitat.
- Caurie, M. (1981). Derivation of Full Range Moisture Sorption Isotherms. In: L. B. Rockland and G.F. Stewart (Ed.) .*Water Activity: Influences on Food Quality* (pp. 63-87). New York :Academic Press.

- Chan, W., Brown, J., & Church, S. (1995). Meat, poultry and game. Supplement to McCance and Widdowson's the composition of foods. London: MAFF.
- Cheftel, J. C., & Cheftel, H. (1977). Introduction a la Biochimie et a la Technologie des Aliments vol. 1. Collection Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, 371 pp.
- Cheftel, J.C., Cup, J.L., & Lorient, D. (1985). Protéines alimentaires. Biochimie- propriétés fonctionnelles-valeurs-nutritionnelle-modifications chimiques techniques et documentation .Lavoisier, Paris (France),165-192.
- Chirife, J., & Iglesias, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1. A review. *Journal of Food Technology*, 13,159-174.
- Chirife, J., & Iglesias, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1. A review, *J Food Technology*, 13:159-174.
- Clemente, G., Bon, J., Benedito, J., & Mulet, A.(2009). Desorption isotherms and isosteric heat of desorption of previously frozen raw pork meat. *Meat Science*, 82, 413-418.
- Clemente, G., Bon, J., Sanjuán, & Mulet, A. (2011). Drying modelling of defrosted pork meat under forced convection conditions. *Meat Science*, 88, 374-378.
- Clemente, G., Bon, J., Sanjuán, N., & Mulet, A. (2011). Drying modelling of defrosted pork meat under forced convection conditions. *Meat Science*, 88, 374–378.
- Collares-Pereira, M., & Rabl, A. (1979). The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insulation values. *Solar Energy*, 22, (2), 155-164.
- Comaposada, J., Gou, P., & Pakowski, Z. (2000). Arnaud, J. Desorption isotherms for pork meat at different NaCl contents and temperatures. *Drying Technology*, 18, 723-746.
- Commission Regulation (EC) No2073/2005 (2005).On microbiological criteria for foodstuffs. Official Journal of the European Union, 22-12-2005.
- 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*, vol.55, pp.139-146.
- de Boer, J. H. (1953). The dynamical character of adsorption. Oxford: Clarendon Press. Guggenheim, E. A. (1966). Application of statistical mechanics. Oxford: Clarendon Press.
- Delafolie, G. (1991). Analyse de la valeur, Hachette Technique. Paris.
- Delgado, A. E., & Sun, D. W. (2002a). Desorption isotherms for cooked and cured beef and pork. *Journal of Food Engineering*, 51, 163-170.
- Delgado, A. E., & Sun, D. W. (2002b). Desorption isotherms and glass transition temperature for chicken meat. *Journal of Food Engineering*, 55, 1-8.
- Desmorieux, H., & Moyne, C. (1992). Analysis of dryer performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept, *Drying* 92, Elsevier, Amsterdam, pp.834-843.
- Desmorieux, H., & Moyne, C. (1992). Analysis of dryer performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept, *Drying* 92, Elsevier, Amsterdam, 834-843.
- Diarra, M. M. (2007). Cours de « Technologie des produits d'origine animale », pour les étudiants de la première année IZ de l'IPR/IFRA annexe de Bamako, 45 pages.
- Dilip, J. (2005). Modelling the system performance of multi-tray crop drying using and inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage. *Journal of Food Engineering*,71 (2005) 44-54.
- Doymaz, I. (2012). Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices. *Energy Conversion and Management*, 56, Pages 199–205.
- Duras, N. H., & Hiver, H. L. (1993). Adsorption of water on cereal-bread type dietary fibers. *Journal of Food Engineering*, 20, 17-43.
- Dzimba, F. E. J.M., Faria, J. A. F., & Walter, E. H. M. (2007). Testing the sensory acceptability of biltong formulated with different spices. *African Journal of Agricultural Research*, 2, 574-577.
- Ekechukwu, O.V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology *Energy Conversion & Management*, 40, 615-655.
- Farag, K.W., Lyng, J.G, Morgan, D.J., & Cronin, D.A. (2008) Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blends over a temperature range of -18 to +10°C *Meat Science* 79, 740-747.

- Farid, B. C., & Farid, C. (2010). A rapid and novel approach for predicting water sorption isotherms and isosteric heats of different meat types. *Meat Science*, 86, 921-925.
- Florand, P. (1995). Transformation des produits alimentaires et traitements poste récolte. Rapport de mission SAT-1 du Niger sur la formulation d'un programme de PME agroalimentaire, FAO, Rome, 75p.
- Folch, J., LEES, M., & Sloanes-Stanley, G.H. (1957). A simple method for isolation and purification of total lipids from animal tissues. *Journal of Biology and Chemistry*, 226, 497-509.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (1994). Agro-industries in FAO. Consultancy report.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2009). Livestock in the balance Part 1. The state of food and agriculture report, 24-25.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2015). Agriculture mondiale: horizon 2015/2030. Rapport abrégé. Archives de documents de la FAO. www.faostat3.fao.org. Consulté le 15 Mars 2015.
- FranceAgriMer. 2014. Les filières animales terrestres et aquatiques. Bilan 2013 et perspectives 2014.
- Gailunas, K. M., Matak, K. E., Boyer, R. R., Alvarado, C. Z., & Williams, R. C., & Sumner, S. S. (2008). Use of UV light for the inactivation of *Listeria monocytogenes* and lactic acid bacteria species in recirculated chill brines. *Journal of Food Protection*, 71, 629-633.
- Gal, S. (1983). The need for, and practical applications of sorption data. In R. Jowitt, F. Escher, B. Hallstrom, W. H. F. Th. Meffert, E. L. Spiess, & G. Vos (Eds.). *Physical properties of foods* (pp.13-25). London: Applied Science Publishers.
- Garcia, F.A., Mizubuti, I., Kanashiro, M.Y, & Shimokomaki, M. (2001). Intermediate moisture meat product: biological evaluation of charqui meat protein quality. *Food Chemistry*, 75, 405-409
- Gikuru, M., & Njoroge S. (2006). Performance of a solar dryer with limited sun tracking capability. *Journal of Food Engineering*, 74,247-252.
- Girard, J. P. (1988). Technologie de la viande et des produits carnés, Technique et documentation. Lavoisier, 280 pages.
- Gormley, F.J., Little, C.L., Grant, K.A., de Pinna, E., & McLauchlin, J. (2010). The microbiological safety of ready-to-eat specialty meats from markets and specialty food shops: A UK wide study with a focus on *Salmonella* and *Listeria monocytogenes*. *Food Microbiology*, 243-249.
- Gou, P., Comaposada, J., & Arnau, J. (2004). Moisture diffusivity in the lean tissue of drycured ham at different process times. *Meat Science*, 67(2), 203-209.
- Hakan, O.M., & Can E. (2006). Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums *Energy Conversion and Management*, 47,2337-2348
- Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. *Journal of Chemistry and Physics*, 16, 931-937.
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1982). Estimating potential evapo transpiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108 (IR3), 223-230.
- Harkins, W.D., & Jura, G. (1944,). Journal of the American Chemical society. In: Chirife J. and Iglesias H.A (1978). Equations for Fitting Water Sorption Isotherms of Food. Part 1- A. *Journal of Food Technology*, 13, 159-174.
- Hay, J.E. (1979). Study of short wave radiation on non-horizontal surfaces. *Solar Energy*, 23, 301-307.
- Health Protection Agency (HPA). (2005 a). Enumeration of *Staphylococcus aureus*. National Standard Method: F12 Issue 1.4.
- Health Protection Agency (HPA). (2005 b). Enumeration of *Escherichia coli*. National Standard Method: F20 Issue 1.4.
- Heinz, S., & Hautzinger, P. (2007). Meat processing technology for small-to medium scale producers. FAO Regional Office for Asia and the Pacific (RAP), Banking.
- Henderson, S. M (1952). Agricultural Engineering, In: Chirife J. and Iglesias H.A. (1978). Equations for Fitting Water Sorption Isotherms of Food: Part 1- A. *Journal of Food Technology*, 13: 159-174.
- Henderson, S.M & Pabis, S. (1961). Grain drying theory. I. Temperature effects on drying coefficient. *J Agric Eng Res*;6,169-74.
- Henderson, S.M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans ASAE*;17, 1167-1172.
- Herman R.J.& Albers, H.F.(1986).Meat and meal products in nutrition Proceedings of 32nd European Meeting of meat research workers. Ghent, Belgium, 24-29.

- Hussein, F. H., & Hosahalli, S. R. (2011). Measurement and targeting of thermophysical properties of carrot and meat based alginate particles for thermal processing applications. *Journal of Food Engineering*, 107 117-126.
- Igbeka, J. C., & Blaisdell, J. L. (1982). Moisture isotherms of a processed meat product-Bologna. *Journal of Food Technology*, 17, 37-46.
- Igene, J. O., Farouk, M. M., & Akanbi, T. C. (1990). Preliminary studies on the traditional processing of kilishi. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 50, 89-98.
- Image J. (2013). Logiciel libre Version 1.43. www.imagej.nih.gov. Consulté le 20 Mars 2013.
- Institut National de la Statistique (INS). (2013). Annuaire Statistique du Cameroun. Chapitre 4 : caractéristique de la population, page 82.
- Institut de Recherche Agronomique pour le Développement (IRAD). (2014). Carte Agro-Ecologique du Cameroun. www.iradcameroun.org. Consulté le 12 Février 2014.
- Idel'cik, I.E. (1986). Mémento des pertes de charges. Eyrolles, Paris, 3ème édition, 504 p.
- Jain, P.C. (1986). Global irradiation estimation for Italian locations. *Solar and Wind Technology*, 3(4), 323-328.
- Jannot, Y. (2006). Du séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation thermophysique des solides. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR). Université de bordeaux 1.
- Jannot, Y., Talla, A., Ngahnou, J., & Puigall, J.R. (2004). Modeling of banana convective drying by Drying Characteristic Curv (DCC) Method. *Drying Technology*, 22, (8), 1949-1968.
- Jones, M.J, Tanya V.N, Mbafung, C.M.F, Fonken D.N, & Silverside D.E. (2001). A microbiological and nutritional evaluation of the West African dried meat product, Kilishi. *J. Food Technol. Afr.* 6(4): 126-129.
- Kabil, E., Aktaş, N., & Balcı, E. (2012). Effect of sodium chloride, sodium nitrite and temperature on desorption isotherms of previously frozen beef. *Meat Science*, 90, 932-938.
- Kalilou, S. & Zakhia, N. (1997) Fabrication artisanale du kilishi au Niger: optimisation du procédé et amélioration de la qualité du produit. In Séchage des produits à haute teneur en eau en Afrique Francophone, 21-24 avril 1997, CTA/ABAC GERES/TPA, Ouagadougou, Burkina Faso, 12 pp.
- Kalilou, S., Colligan, A., & Zakhia, N. (1998). Optimizing the traditional processing of beef into kilishi. *Meat Science*, 50, 21-32.
- Kanatt, S.R., Chander, R., & Sharma, A. (2005). Effect of radiation processing on the quality of chilled meat products. *Meat Science*, 69, 269–275.
- Kapsalis, J. G. (1981). Moisture sorption hysteresis. In L. B. Rockland & G. F. Stewart (Eds.), Water activity: influences on food quality , 143-178. New York: Academic Press.
- Karekezi, S. & Ranja, T. (1997). Renewable energy technologies in Africa. Longhouse publishing services, Cumbria, U.K.
- Karim, M.A.,& Hawlader, M.N.A. (2005). Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.48, pp.4914-4925.
- Karunakar, B., Mishra, S.K., & Bandyopadhyay, S. (1998). Specific heat and thermal conductivity of shrimp meat. *Journal of Food Engineering* 37, 345-351.
- Khatib, T., Mohamed, A., & Sopian, K. (2012). A review of solar energy modeling techniques *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 2864-2869.
- Kherrou, S., Bekkouche, S.M.A., & Serir, L. (2008) Comportement thermique d'un séchoir solaire direct type serre dans la région de Ghardaïa Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger 167-176
- Klucher, T.M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23, 111-114.
- Kreider, S. F., & Kreith, F. (1981). Solar energy handbook. New York, USA. McGrawHill Book Co.
- Labuza, T. P., Kaanane, A., & Chen, J. Y. (1985). Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science*, 50, 385-391.
- Laurent, C. (1981). Conservation des Produits d'origine Animale en Pays Chauds. ACCT, Paris, 157 pages.

- Laurent, C. (1981). Conservation des Produits d'origine Animale en Pays Chauds. ACCT, Paris, 157 pages.
- Lewis, G. (1992). An empirical relation for estimating global irradiation for Tennes- see. USA Energy Conversion and Management, 33(12), 1097-1099.
- Liu B, & Jordan R. (1979). The interrelationship and catechistic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Sol Energy, 22,87-90.
- Liu, B.Y.H, Jordan, R.C. (1961). Daily insulation on surfaces tilted towards the equator. ASRHAE Journal, 3, 53-69.
- Lomauro, C. J., Bakshi, A. S., & Labuza, T. P. (1985). Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I. Fruit, vegetable and meat products, Lebensm-Wiss-Technol, 18: 111-117.
- Luna-Sanchez, D. (2008). Modélisation et conception préliminaire d'un séchoir solaire pour bois de pin avec stockage d'énergie. N°: 2008 ENAM 0017.
- Mahlbouer, W., Esper, A., & Muller, J. (1993). Solar energy agriculture.ISES solar world congress, August, Budapest, 23-27.
- Marcotte, M., Taherian, A.R., & Karimi, Y. (2008). Thermophysical properties of processed meat and poultry products. Journal of Food Engineering, 88, 315-322
- Mbawala A., Daoudou B., & Ngassoum, M.B. (2010). Qualité microbiologique du kilishi (produit carné séché) produit dans la ville de Ngaoundéré (Cameroun). TROPICULTURA, 2010, 28, 3, 153-160.
- Mbofung, C. M. F. (1993). The effect of a traditional African method of meat processing on the availability of iron and other minerals from the finished product (kilishi) following in vitro enzymolysis. In Bioavailability 93, Nutritional, Chemical and Food Processing Implications of Nutrient Availability, ed. U. Schlemmer, Karlsruhe, 2, 169-174.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. Drying Technology;20,1503-1513.
- Ministère de l'Elevage des Pêches et Industries Animales (MINEPIA). (2011). Document de stratégie du sous-secteur de l'élevage des pêches et des industries animales.
- Ministère de l'Elevage des Pêches et Industries Animales (MINEPIA). (2009). Schéma directeur pour le développement des filières de l'élevage au Cameroun. Vol. 1
- Mohapatra, D., & Rao, P.S. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. Journal of Food Engineering;66,513-518.
- Mohsenin, N.N. (1980). Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- Motarjemi, Y. (1988). A study of some physical properties of water in foodstuffs. Ph.D. Lund University, Sweden, 204p.
- Mujumdar, A.S., & Menon, A. (1995). Drying of solids. Principles classification and selection of dryer. Handbook of industrial drying, 2nd edition, chapter 1, pp.1-45 in A.S Mujumdar (Ed) Marcel Dekker, New York.
- Mujumdar, A.S., (2000). Guide pratique du séchage industriel Application, principes, équipements et nouveau développement. Sakamon Devahastin, Montréal Exegex Corporation, Quebec.
- Mulet, A., Garcia-Reverter, J., Sanjuan, R., & Bon, J. (1999). Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms. Journal of Food Science, 64, 64-68.
- Multon B. (1998). L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique. Revue 3E.I n°13, septembre 98, pp.29-38.
- Musonge, P., & Njolai, E.N. (1994).Drying and infusion during the traditional Processing of Kilichi. J.Sci.Food. Agric, 50,89-98.
- Nadeau, J.P., Puiggali J.R. (1995). Séchage: des processus physiques aux procédés industriels. Lavoisier, Paris 366pp.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). Atmospheric science data center. Surface meteorology and Solar Energy. www.eosweb.larc.nasa.gov.
- Ndayo, W.M., Kemajou, C., Cunin, P., Martin, PMV., & Groupe d'étude Salubrité des réseaux des Instituts Pasteur. (2000). Qualité hygiénique des Sandwichs vendus sur la voie publique au Cameroun.Bull Lias Doc OCEAC, 33, 37-41.
- Ndih, A.C. (2002). Suivi de la croissance de quelques microorganismes en fonction des différents modes de stockage du Kilichi. Mémoire de DEA, Université de Ngaoundéré 60pp.

- Nortjé, K., Buys, E.M., & Minnar, A. (2005). Effect of γ -irradiation on the sensory quality of moist beef biltong. *Meat Science*, 71, 603-611.
- Nortje', K., Buys, E.M., & Minnaar, A. (2006). Use of γ -irradiation to reduce high levels of *Staphylococcus aureus* on casein-whey protein coated moist beef biltong. *Food Microbiology*, 23, 729–737.
- Ockerman, H.W. (1985). Quality control of post-mortem muscle tissue. Ohio: Department of Animal Science, The Ohio State University and The Ohio Agricultural Research and Development Center.
- Organisation Mondiale de la Santé Animale (OMSA). (2007). Code sanitaire pour les animaux terrestres.
- Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of Chemical Industries*, 65, 419–426.
- Ouali, A. (1990). La maturation des viandes. Facteurs biologiques et technologiques de variation. Viandes et produits carnés, vol. 11, 290 pages.
- Page, G. (1949). Factor influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer. Master Thesis. Purdue University.
- Petit, T., Caro, Y., Petit, A.S., Santchurn, S.J., & Collignan, A. (2014). Physicochemical and microbiological characteristics of biltong, a traditional salted dried meat of South Africa. *Meat Science* 96 1313-1317.
- Prescott, J. A. (1940). Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of Australia*, 46, 114-118.
- Rabl, A. (1985). Active solar collectors and their applications. Oxford University Press, New York, USA.
- Radford, R. D., Herbert, C., & Lovett, D. A. (1976). Chilling of meat- A mathematical model for heat and mass transfer. In Proceedings of the Comm. C2 Meeting, IIR Bull. 323–330.
- Rapusas, R.S., & Driscoll RH. 1995. The thin layer drying characteristics of white onion slices. *Drying Technology*,13, 1905-1931.
- Rizvi, S. S. H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.), *Engineering Properties of Foods*, 133-214. New York: Marcel Dekker.
- Scaravetti, D. (2004). Formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire, mémoire du Doctorat ENSAM 2004.
- Shanmagaam, V., & Natarajan, E., (2005). Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable energy*, 31, 1239-1251.
- Sharaf-Eldeen, Y.I., Blaisdell, J.L., & Hamdy, M.Y. (1980). A model for ear corn drying. *Trans ASAE*;23:1261–5. 1271.
- Sharma, A., Chen, C.R., & Nguyen, V.L. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13,1185–1210.
- Shimokomaki, M., Franco, B. D. G. M., & Carvalho, Jr., B. C. (1987) Charque e produtos afins: tecnologia e conservacao. UMA Revisao, Bol. SBCTA, Campinas 21 (1) 25-35.
- Shimokomaki, M., Franco, B. D. G. M., Biscontini, T. M., Pinto, M. F., Terra, N. N., & Zorn, T. M. T. (1998). Charqui meats are hurdle technology meat products. *Food Reviews International*, 14(4), 339-349.
- Shmalko, M.E., Morawicki, R.O., & Ramallo, L.A. (1996). Simultaneous determination of specific heat and thermal conductivity using the finite-difference method. *Journal of Food Engineering* 31, 531-540.
- Simal, S., Femenia, A., García-Pascual, P., & Rosselló, C. (2003). Simulation of the drying curves of a meat-based product: effect of the external resistance to mass transfer. *Journal of Food Engineering*, 58(2), 193-199.
- Simal, S., Femenia, A., García-Pascual, P., & Rosselló, C. (2003). Simulation of the drying curves of a meat-based product: effect of the external resistance to mass transfer. *Journal of Food Engineering*, 58(2), 193-199.
- Simata, I.N. (2003). Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryer. *Renewable Energy*, 28, 435-453.
- Singh, R. R. B., Rao, K. H., Anjaneyulu, A. S. R., & Patil, G. R. (2001). Moisture sorption properties of smoked chicken sausages from spent hen meat. *Food Research International*, 34, 143-148.

- Singh, R. R. B., Rao, K. H., Anjaneyulu, A. S. R.; & Patil, G. R.(2006). Water desorption characteristics of raw goat meat: Effect of temperature. *Journal of Food Engineering*, 75, 228-236.
- Staravaganza blog. (2015). Original Jerky Method of preserving meat. www.stravaganzastravaganza.blogspot.fr. Consulté le 11 février 2015.
- Stermer, R. A., Lasatel-Smith, M., & Brasington, C. F. (1987). Ultra violet radiation-An effective bactericide for fresh meat. *Journal of Food Protection*, 50, 108–111.
- Strumillo, C., & Kudra, T. (1986). Drying: principles, applications and design. In R. Hughes (Ed.), *Topics in chemical engineering*, Vol. 3, 3-36. New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Strydom P.E., & Zondagh B. (2014). Ethnic meat products. Biltong: A Major South African Ethnic Meat Product. *Encyclopedia of Meat Sciences* (Second Edition), Pages 515-517.
- Swartman,. R.K., Ogunlade, O. (1967). Solar radiation estimates from common parameters. *Solar Energy*, 11, 170-172.
- Talla, A., Jannot, Y., Nkeng, G., & Puiggali, J.-R. (2005). Desorption isotherms of tropical foodstuff. Application to banana, mango and pineapple. *Drying Technology*, 23, 1477-1498.
- Timmermann, E.O., Chirife, J., & Iglesias, H.A. (2001). Water sorption isotherms of food and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal of Food Engineering*, 48, 19-31.
- Timoumi, S., & Zagrouba, F. (2005). Water sorption and dehydration kinetics of Tunisian rosemary leaves, *Desalination*, vol.185, n°1-3, pp.517-521.
- Toğrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Modelling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*, vol.58, pp.23-32.
- Torres, E., Pearson, A. M., Gray, J. I., Ku, P. K., & Shimokomaki, M. (1989). Lipid oxidation in charqui (salted and dried beef). *Food Chemistry*, 32, 257-268.
- Torres, S.S., & Allier González, A.L. (2015). Linear and Nonlinear Drying Behavior in Tuberous Crop Slices. *Drying Technology*, 33 (5), 559-569.
- Trujillo, F. J., Wiangkaew, C., & Pham, Q. T. (2007). Drying modelling and water diffusivity in beef meat. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 74-85.
- Trujillo, F.T., Pei, C.Y., & Tuan Pham, Q. (2003). Moisture sorption isotherm of fresh lean beef and external beef fat. *Journal of Food Engineering*, 60, 357-366.
- Unklesbay, N., Unklesbay, K., & Clarke, A.D. (1999). Thermal properties of restructured beef snack sticks throughout smokehouse processing *Food Science and Technology* 32, 527-534.
- Van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems, *Water Activity: Influences on Food Quality*, Rockland, L.B.&Stewart, G. F. (ed) (Academic Press, NewYork,USA), pp147-177.
- Van den Heever, L. W. (1970). Some public health aspects of biltong. *Journal of the South African Veterinary Medical Association*, 41, 263-272.
- Van der Riet, W. B. (1982). Biltong, a South African dried meat product. *Fleischwirtschaft*, 62, 1000-1001.
- Van't Land, C.M., & Dekker, M.(1991). *Industrial Drying Equipment: Selection and Application*, New York.
- Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B., & Wratten, F.T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Trans ASAE*, 28, 296-301.
- Wang, C.Y., & Singh, R.P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *ASAE Paper 78-3001*. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI.
- Wikipédia: encyclopédie en ligne. (2015). Composition du rayonnement solaire. www.Wikipedia.org. consulté le 15 Février 2015.
- Wolf, W., Spiess, W. E. L., & Jung, G. (1985). Standardization of isotherm measurements (COST-Project 90 and 90 bis). In D.Simatos & J. L. Multon (Eds.), *Properties of water in foods* (pp. 661-677). Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- Wolf, W., Spiess, W. E. L., Jung, G. (1985). Standardization of isotherm measurements (COST-Project 90 and 90 bis). In D.Simatos & J. L. Multon (Eds.), *Properties of water in foods* (pp. 661-677). Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- Yorukoglu, M., & Celik, A.N. (2006). A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 47, 2441-2450.

Zhang, L., Lyng, J.G., Brunton, N., Morgan, D., & McKenna, B.. Dielectric and thermophysical properties of meat batters over a temperature range of 5-85. Meat Science, 68, 173-184.

ANNEXES

ANNEXE 1.1

FORMULAIRE D'ENQUETES AUPRES DES PRODUCTEURS DE KILICHI

Date :	
Ville	
Adresse :	
Nom du producteur enquêté	
Nom de l'enquêteur	

Question	Réponse
Depuis quand produisez vous du <i>Kilichi</i> ?	
Êtes-vous scolarisé ? Si oui jusqu'à quelle niveau d'études ?	
Travaillez vous seul ou avec d'autres personnes	
Combien de kg de viande fraîche utilisez- vous par jour ?	
Votre production de <i>Kilichi</i> a-t-elle tendance à augmenter ou à démunier depuis ces 5 dernières années ?	
Décrivez nous comment vous produisez le <i>Kilichi</i> ?	
Combien de temps dure la première étape de séchage au soleil ?	
Protégez-vous la viande contre les intempéries pendant le séchage ? pourquoi ?	
Procédez-vous à un deuxième séchage au soleil après enrobage? pourquoi ?	
Etes vous satisfaits de la durée et de la qualité du séchage ?	
Comment appréciez-vous le niveau de séchage de la viande ?	
Quels sont les critères d'une viande de <i>Kilichi</i> bien séché ?	
Avez-vous déjà utilisé un séchoir solaire pour sécher la viande ? Pourquoi ?	
Pensez-vous qu'un séchoir solaire peut être utilisé pour sécher le <i>Kilichi</i> ?	
Pensez-vous que l'utilisation d'un séchoir solaire peut améliorer la qualité du <i>Kilichi</i>	
Que voulez vous qu'un séchoir solaire améliore ou préserve dans la méthode traditionnelle de production du <i>Kilichi</i> ?	
Voulez-vous utiliser un séchoir solaire pour sécher la viande ? pourquoi ?	
Combien pouvez-vous investir pour acheter un séchoir solaire ?	
Quel est la durée de vie minimale que le séchoir doit avoir pour qu'il soit rentable pour vous ?	
Quelles sont les contraintes que pourrait vous causer l'utilisation d'un séchoir ?	
Avez-vous accès à l'énergie électrique ?	
Si le séchoir doit consommer de l'électricité, quel est le coût de consommation maximale que vous pouvez payer ?	
A combien estimez vous votre marge bénéficiaire journalière ?	

ANNEXE 3.1

Tableau A.3.1 Choix des composants du séchoir solaire de *Kilichi*

Composant	Solutions	Note			Somme pondérée	Choix
		Coût Coef=3	Robustesse Coef=2	Disponibilité Coef=1		
Couverture transparente	Plastique transparent	10	2	10	42	
	Vitre ordinaire	8	5	10	44	
	Vitre à fort coefficient transmission	2	5	2	10	
	Plexiglas	5	8	5	36	
Absorbeur/réflecteur	Métal peint en noir	5	10	5	40	
	Pierre noire	10	2	10	42	
	Feuille de tôle aluminium	8	8	10	50	
	Papier Alluminium	10	2	10	44	
Isolant	Laine de verre	5	8	5	36	
	Polystyrène	10	2	10	42	
	Fibres de coton	8	5	10	44	
Extracteur	Type mural	5	8	10	41	
	Type hélicoïdal	5	8	5	36	
Claie	Toile métallique	8	8	10	10	
	Toile plastique	8	5	10	44	
	Nattes traditionnelles (matériau végétal)	10	2	10	42	

ANNEXE 3.2

A 3.2.1 Estimation de l'énergie nécessaire pour le séchage

La teneur en eau finale du produit séché doit être comprise 0,12 (base sèche) et 0,3 (base sèche), d'après le cahier de charge ; ce qui fait une moyenne d'environ 0,2 (base sèche). Les résultats de l'étude des isothermes de désorption de la viande de bœuf ont montré que pour atteindre cette teneur en eau il faut fournir au minimum une quantité d'énergie égale à 3000Kj/kg (voir paragraphe 2.2.1.4 du chapitre 2). La quantité d'énergie requise (Q_T) pour sécher 8kg de viande de bœuf est donc de 24000 kJ, ce qui correspond à 6,66 kWh. Cette énergie doit être fournie au produit par le soleil en une journée. Notons que l'irradiation solaire globale journalière considérée pour le dimensionnement est de 4,66 kWh/m²/jour, correspondant à la plus petite valeur de la moyenne mensuelle de l'éclairement solaire global journalier disponible dans la ville de N'gaoundéré. Il faut donc déterminer la surface de vitrage qui permettra d'avoir la quantité d'énergie nécessaire.

A 3.2.2 Détermination des surfaces du vitrage et des claires.

La surface de vitrage nécessaire pour laisser la quantité d'énergie nécessaire est donnée par l'expression (A.3.2.1) et est égale à 2,2 m². Cette surface a été repartie entre les trois vitres du séchoir en tenant compte de l'encombrement.

$$S_V = \frac{Q_T}{n * \tau_v * G} \quad (\text{A.3.2.1})$$

Où τ_v désigne le coefficient de transmission de la vitre et G l'irradiation solaire globale journalière (kWh/m²/jour) et n le nombre de jours de séchage. Le taux de transmission τ_v est celui d'un vitrage ordinaire d'épaisseur disponible sur le marché local et il est de l'ordre 0,63 (<http://www.construireavecsaint-gobain.fr>). Le séchage doit se faire en une journée et donc $n=1$ et la valeur de l'irradiation globale journalière prise est celle de la moyenne mensuelle du mois d'Août (4,66 kWh/m²/jour)

La surface des claires a été calculée en tenant compte de la densité surfacique d'entreposage, c'est-à-dire de la surface occupée par un kg de viande de 3mm d'épaisseur (épaisseur moyenne du *Kilichi*). Cette densité surfacique a été déterminée expérimentalement en étalant des lanières de viande de bœuf d'une épaisseur de 3mm sur une surface de 1m² et nous avons obtenu une valeur moyenne de 4,25kg/m². Pour sécher 8 kg de produit frais tel que le stipule le cahier de charge, il nous faut une surface minimale de claires d'environ

1.88m². Afin de rendre l'encombrement du séchoir afin qu'il puisse passer par une porte classique de 1m de largeur, la surface totale a été repartie sur trois claies de 0,8m de longueur et 0,8m de largeur chacune.

A 3.2.3 Estimation du débit minimale de renouvellement d'air dans le séchoir

Le débit minimal de renouvellement d'air correspond au débit en dessous duquel l'air du séchoir rentre en équilibre hygroscopique avec le produit et ne pourra plus le sécher, avec un risque de condensation de l'eau contenue dans l'air. Pour déterminer ce débit, il faut connaître la quantité d'eau totale à enlever du produit (Q_e), la durée de séchage (T_s), la teneur en eau absolue de l'air à l'entrée du séchoir (X_e) et la teneur en eau absolue de saturation de l'air (X_{sat}).

Le cahier de charge donne la quantité de produit frais à séchée (Q_{pf}) et les teneurs en eau initiale et finale du produit. Les moyennes de température et d'humidité relative du mois d'Août obtenues à partir des données météorologiques de la NASA (NASA, 2014) ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques de l'air à l'entrée du séchoir à partir du diagramme de l'air humide.

Soient Q_{pf} (kg) la quantité de produit frais, W_0 (kg eau/kg matière sèche) la teneur en eau initiale du produit et W_f (kg eau/kg matière sèche) sa teneur en eau finale à la fin du séchage alors la quantité de produit séché Q_{ps} (kg) peut être déterminée par l'équation (A.3.2.2).

$$Q_{ps} = Q_{pf} \frac{(W_f + 1)}{(W_0 + 1)} \quad (\text{A.3.2.2})$$

Connaissant les quantités des produits frais et séchés, on peut en déduire la quantité d'eau à extraire Q_e (kg) par simple différences des deux quantités (Eq. (A.3.2.3)).

$$Q_e = Q_{pf} - Q_{ps} \quad (\text{A.3.2.3})$$

La quantité d'eau à extraire est une donnée essentielle pour la connaissance du débit d'air minimal nécessaire. Le débit masse d'air minimal d'air sec \dot{Q}_{mas} est donné par l'équation A.3.2.4.

$$\dot{Q}_{mas} = \frac{Q_e}{(X_{sat} - X_e)d} \quad (\text{kgas/h}) \quad (\text{A.3.2.4})$$

Où X_{sat} désigne la teneur en eau absolue de l'air d'entrée à la saturation, X_e la teneur absolue de l'air d'entrée et T_S la durée de séchage.

Le débit d'air humide minimal à l'entrée du séchoir sera donc déduit par l'expression ci-dessous (Eq. (A.3.2.5)).

$$\dot{Q}_{\text{mah}} = (1 + X_e) \dot{Q}_{\text{mas}} \quad (\text{kg air/h}) \quad (\text{A.3.2.5})$$

Le débit volumique d'air humide minimal nécessaire \dot{Q}_{vah} sera donc donné par l'équation A.3.2.6:

$$\dot{Q}_{\text{vah}} = \frac{\dot{Q}_{\text{mah}}}{\rho_{\text{ah}}} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (\text{A.3.2.6})$$

Pour une section de passage de l'air S donnée, on peut déterminer la vitesse minimale de renouvellement de l'air à partir de l'équation A.3.2.7.

$$V_{\text{air}} = \frac{\dot{Q}_{\text{vah}}}{S} \quad (\text{m/s}) \quad (\text{A.3.2.7})$$

Où S désigne la section de passage de l'air qui est obtenue en fixant une valeur pour le diamètre de l'orifice de passage de l'air.

A partir des données de dimensionnement et des équations A.3.2.2 à A.3.2.7 nous avons obtenu une vitesse d'air de 2 m/s environ.

Tableau 3.4 Données de dimensionnement

Données de dimensionnement	Valeur
Teneur en eau moyenne initiale W_0	3 kg eau/kg matière sèche
Teneur en eau moyenne après séchage	0,2 kg eau/kg matière sèche
Diamètre de l'orifice de renouvellement	0,12 m
Quantité de viande fraîche par cycle Q_{pf}	8 kg
Durée maximale de séchage d	12 h
Température moyenne de l'ambiance	22°C
Humidité relative moyenne de l'ambiance	80%
Teneur en eau de l'air d'entrée	0,013 kg eau/kg d'air sec
Teneur en eau de saturation de l'air d'entrée	0,017 kg eau/kg d'air sec
Masse volumique de l'air	1,17 kg/m³

ANNEXE 3.3

Tableau A.3.3 Procédé de réalisation du séchoir solaire local

Composant	Solution technique	Mode de réalisation
Surface transparente	Vitre de 4mm d'épaisseur	Découpage et collage sur les cornières
Absorbeur /reflecteur	Tôle aluminium poli d'épaisseur 0,35mm	Découpage et rivetage sur du contre-plaqué
Isolant	Fibres de coton	Placement en sandwich entre le contre-plaqué et la tôle aluminium
Claies	Cadre en bois et toile alimentaire métallique de 1mm de diamètre de mailles	Menuiserie (Sciage, rabotage du bois), Découpage et pointage de la toile alimentaire sur le cadre
Extracteur	Ventilateurs monophasé mural	Câblage électrique et vissage sur la paroi
Ossature	Cornière de 20mm	Sciage, perçage, meulage et soudure
	Contreplaqué de 20mm	Menuiserie (Sciage, rabotage du bois),

ANNEXE 3.4

MÉTÉOROLOGIE

Pyranomètre stellaire type FLA628S

- ▶ Pyranomètre stellaire selon Dirmhirn pour l'acquisition du rayonnement global, céleste et du rayonnement de réflexion à ondes courtes.
- ▶ Indépendant de la température ambiante par mesure de température différentielle.
- ▶ Coupole en verre poli de précision, faisant écran aux incidences environnementales externes.
- ▶ Réglage du niveau par 3 vis de réglage et niveau à bulle intégré.
- ▶ Livré avec rapport d'étalonnage d'usine.

Modèle (avec certificat de contrôle constructeur)

Pyranomètre stellaire avec câble longueur 2 m
et connecteur ALMEMO® et valeur
d'étalonnage programmée

Référence : FLA628S

Caractéristiques techniques:

Plage de mesure :	0 à 1500 W/m ²
Résolution :	0.1 W/m ²
Spectre :	0.3 à 3 μm
Sortie :	env. 15 μV/Wm ⁻²
Impédance :	env. 35 Ω
Plage d'utilisation :	-40 à +60°C
Précision :	effet cosinus + effet azimut + incidence de la température
Effet cosinus :	< 3 % de la mes. (inclinaison 0 à 80°)
Inclinaison effet azimut :	< 3 % de la mes.
Incidence de la température :	< 1% de la mes. (-20 à +40°C)
Température nominale :	22°C ±2°C
Linéarité :	<0.5% (0.5 à 1 330 W/m ²)
Stabilité :	<1 % de la plage de mesure par an
Temps de réponse :	25 s (t95)
Dimensions :	Ø 160 mm, hauteur 75 mm, Cercle des perçages : Ø 134 mm Perçages : Ø 8 mm
Masse :	1 kg

Accessoires:

Bande d'ombre avec piétement

Référence : ZB9628SB

ANNEXE 3.5

Tableau A.3.5 Procédés de réalisation du séchoir solaire de laboratoire

Elément	Matériaux	Mode de réalisation	Type de Machine	Assemblage
Ossature	Profilé aluminium de section carrée	Sillage	Scie à ruban automatique	Equerre fermé et vissage avec des vis à six pans creux
		perçage	Perceuse « Chignole ».	
Conduite d'air		Découpage section droite	Cisaille guillotine	Vissage sur l'ossature avec vis à tôle inox
		Découpage section non droite	Machine à jet d'eau	
		Pliage	Plieuse	
		Perçage	Perceuse automatique 2 axes	
Chambre de séchage	Tôle acier inoxydable de 1mm d'épaisseur	Découpage	Cisaille guillotine	-Collage de l'isolant polyuréthane sur tôle acier inox -Vissage sur l'ossature avec vis à tôle inox
		Pliage	Plieuse	
		Perçage	Perceuse automatique 2 axes	
	Isolant Polystyrène	Découpage	Cutter	
Système coulissant des lampes solaires	Profilé aluminium coulissant de section carrée	Sillage	Scie à ruban automatique	-vissage de 8 roulettes sur les plaques d'acier (4 par plaque -Bridge des plaques sur la partie le profilé aluminium horizontal - Vissage sur les boîtiers des lampes -Bridge de deux profilés aluminium coulissant verticaux sur l'assiette -emmanchement des rails des roues sur les profilés coulissants verticaux

ANNEXE 4.1

Tableau A.4.1 Bilan de masse des produits

Claie	Bilan de masse	Légende
1	$F_m^{pcl1} - \frac{m_{s_pcl1}}{2S_{s_pcl1}} \left(\frac{dW_{pcl1-}}{dt} + \frac{dW_{pcl1+}}{dt} \right)$	m_{s_pcl1} =masse sèche produit de la claie 1 S_{s_pcl1} =surface sèche du produit de la claie 1 W_{pcl1-} =Teneur en eau de la moitié inférieure du produit de la claie 1 W_{pcl1+} =Teneur en eau de la moitié supérieure du produit de la claie 1
2	$F_m^{pcl1} - \frac{m_{s_pcl2}}{2S_{s_pcl2}} \left(\frac{dW_{pcl2-}}{dt} + \frac{dW_{pcl2+}}{dt} \right)$	m_{s_pcl2} =masse sèche produit de la claie 2 S_{s_pcl2} =surface sèche du produit de la claie 2 W_{pcl2-} =Teneur en eau de la moitié inférieure du produit de la claie 2 W_{pcl2+} =Teneur en eau de la moitié supérieure du produit de la claie 2
3	$F_m^{pcl1} - \frac{m_{s_pcl3}}{2S_{s_pcl3}} \left(\frac{dW_{pcl3-}}{dt} + \frac{dW_{pcl3+}}{dt} \right)$	m_{s_pcl3} =masse sèche produit de la claie 3 S_{s_pcl3} =surface sèche du produit de la claie 3 W_{pcl3-} =Teneur en eau de la moitié inférieure du produit de la claie 3 W_{pcl3+} =Teneur en eau de la moitié supérieure du produit de la claie 3

ANNEXE 4.2

Tableau A.4.2. Bilan d'énergie sur les produits

Produit	Bilan d'énergie	Légende
$pcl1+$	$\frac{\rho_s^a}{\alpha_{s2}} \left[\frac{d}{dt} (C_{ps}^* T_{pcl1+}) + \Delta H_V \frac{dW_{pcl1+}}{dt} \right] = \frac{1}{2} \left(\varphi_{rsd_pcl1+} + \varphi_{rsdif_pcl1+} + \varphi_{rir_pcl1+} + \varphi_{cv_oo1} \right)$	<p>$pcl1+$= partie supérieure du produit de la clai 1 α_{s2}= compacité du produit dans le VC2 T_{pcl1+}=température du produit $pcl1+$ W_{pcl1+}=teneur en eau du produit $pcl1+$ φ_{rsd_pcl1+}= flux de rayonnement solaire direct reçu par plc1+ φ_{rsdif_pcl1+}= flux de rayonnement solaire diffus reçu par plc1+ φ_{rir_pcl1+}= flux de rayonnement infrarouge échangé par plc1+ φ_{cv_oo1} flux par convection échangé entre l'air 2 et $pcl1+$</p>
$pcl1-$	$\frac{\rho_s^a}{\alpha_{s1}} \left[\frac{d}{dt} (C_{ps}^* T_{pcl1-}) + \Delta H_V \frac{dW_{pcl1-}}{dt} \right] = \frac{1}{2} (\varphi_{rss_pcl1-} + \varphi_{rir_pcl1-} + \varphi_{cv_oo1})$	<p>$pcl1-$= partie inférieure du produit de la clai 1 α_{s1}= compacité du produit dans le VC1 T_{pcl1-}=température du produit $pcl1-$ W_{pcl1-}=teneur en eau du produit $pcl1-$ φ_{rss_pcl1-}= flux de rayonnement solaire réfléchi reçu par plc1- φ_{rir_pcl1-}= flux de rayonnement infrarouge échangé par plc1- φ_{cv_oo1} flux par convection échangé entre l'air 1 et $pcl1-$</p>
$Pcl2+$	$\frac{\rho_s^a}{\alpha_{s3}} \left[\frac{d}{dt} (C_{ps}^* T_{pcl2+}) + \Delta H_V \frac{dW_{pcl2+}}{dt} \right] = \frac{1}{2} \left(\varphi_{rsd_pcl2+} + \varphi_{rsdif_pcl2+} + \varphi_{rir_pcl2+} + \varphi_{cv_oo3} \right)$	<p>$Pcl2+$= partie supérieure du produit de la clai 2 α_{s3}= compacité du produit dans le VC3 T_{pcl2+}=température du produit $pcl2+$ W_{pcl2+}=teneur en eau du produit $pcl2+$ φ_{rsd_pcl2+}= flux de rayonnement solaire direct reçu par plc2+ φ_{rsdif_pcl2+}= flux de rayonnement solaire diffus reçu par plc1+ φ_{rir_pcl2+}= flux de rayonnement infrarouge échangé par plc2+</p>

Produit	Bilan d'énergie	Légende
		$\varphi_{cv_ \infty 3}$ flux par convection échangé entre l'air 3 et $pcl3+$
$Pcl2-$	$\frac{\rho_s^a}{\alpha_{s2}} \left[\frac{d}{dt} (C_{ps}^* T_{pcl2-}) + \Delta H_V \frac{dW_{pcl2-}}{dt} \right] = \frac{1}{2} (\varphi_{rss_pcl2-} + \varphi_{rir_pcl2-} + \varphi_{cv_ \infty 2})$	$Pcl2- =$ partie inférieure du produit de la claire 1 $T_{pcl2-} =$ température du produit $pcl2-$ $W_{pcl2-} =$ teneur en eau du produit $pcl2-$ $\varphi_{rss_pcl2-} =$ flux de rayonnement solaire réfléchi reçu par $pcl2-$ $\varphi_{rir_pcl2-} =$ flux de rayonnement infrarouge échangé par $pcl2-$ $\varphi_{cv_ \infty 2}$ flux par convection échangé entre l'air 2 et $pcl2-$
$Pcl3+$	$\frac{\rho_s^a}{\alpha_{s4}} \left[\frac{d}{dt} (C_{ps}^* T_{pcl3+}) + \Delta H_V \frac{dW_{pcl3+}}{dt} \right] = \frac{1}{2} (\varphi_{rsd_pcl3+} + \varphi_{rsdif_pcl3+} + \varphi_{rir_pcl3+} + \varphi_{cv_ \infty 4})$	$Pcl3+ =$ partie supérieure du produit de la claire 2 $\alpha_{s4} =$ compacité du produit dans le VC4 $T_{pcl3+} =$ température du produit $pcl3+$ $W_{pcl3+} =$ teneur en eau du produit $pcl3+$ $\varphi_{rsd_pcl3+} =$ flux de rayonnement solaire direct reçu par $pcl3+$ $\varphi_{rsdif_pcl3+} =$ flux de rayonnement solaire diffus reçu par $pcl3+$ $\varphi_{rir_pcl3+} =$ flux de rayonnement infrarouge échangé par $pcl3+$ $\varphi_{cv_ \infty 4}$ flux par convection échangé entre l'air 4 et $pcl3+$
$Pcl3-$	$\frac{\rho_s^a}{\alpha_{s2}} \left[\frac{d}{dt} (C_{ps}^* T_{pcl3-}) + \Delta H_V \frac{dW_{pcl3-}}{dt} \right] = \frac{1}{2} (\varphi_{rss_pcl3-} + \varphi_{rir_pcl3-} + \varphi_{cv_ \infty 3})$	$Pcl3- =$ partie inférieure du produit de la claire 3 $T_{pcl3-} =$ température du produit $pcl3-$ $W_{pcl3-} =$ teneur en eau du produit $pcl3-$ $\varphi_{rss_pcl3-} =$ flux de rayonnement solaire réfléchi reçu par $pcl3-$ $\varphi_{rir_pcl3-} =$ flux de rayonnement infrarouge échangé par $pcl3-$ $\varphi_{cv_ \infty 3}$ flux par convection échangé entre l'air 3 et $pcl3-$

ANNEXE 4.3

Tableau A.4.3. Bilan d'énergie sur l'air dans les 4 VC

VC	Bilan d'énergie	Légende
1	$\frac{\varepsilon_{\infty 1}}{1-\varepsilon_{\infty 1}} \frac{\rho_{as}}{\alpha_{s1}} \left(C_{p\infty}^* \left(\frac{d(T_{\infty 1})}{dt} + U_{\infty 1} \frac{d(T_{\infty 1})}{ds} \right) \right) = -\varphi_{cv_{\infty 1}}$	$\varepsilon_{\infty 1}$ = porosité volumique de l'air du VC1 ρ_{as} = masse volumique de l'air sec α_{s1} = compacité du produit dans le VC1. $C_{p\infty}^*$ chaleur massique de l'air humide par kilo d'air sec $T_{\infty 1}$ =Température de l'air du VC1 $U_{\infty 1}$ = Vitesse moyenne de l'air 1 $\varphi_{cv_{\infty 1}}$ flux par convection échangé par l'air 1
2	$\frac{\varepsilon_{\infty 2}}{1-\varepsilon_{\infty 2}} \frac{\rho_{as}}{\alpha_{s2}} \left(C_{p\infty}^* \left(\frac{d(T_{\infty 2})}{dt} + U_{\infty 1} \frac{d(T_{\infty 2})}{ds} \right) \right) = -\varphi_{cv_{\infty 2}}$	$\varepsilon_{\infty 2}$ = porosité volumique de l'air du VC2 ρ_{as} = masse volumique de l'air sec α_{s2} = compacité du produit dans le VC2 $C_{p\infty}^*$ chaleur massique de l'air humide par kilo d'air sec $T_{\infty 2}$ =Température de l'air du VC2 $U_{\infty 2}$ = Vitesse moyenne de l'air 2 $\varphi_{cv_{\infty 2}}$ flux par convection échangé par l'air 2
3	$\frac{\varepsilon_{\infty 3}}{1-\varepsilon_{\infty 3}} \frac{\rho_{as}}{\alpha_{s1}} \left(C_{p\infty}^* \left(\frac{d(T_{\infty 3})}{dt} + U_{\infty 1} \frac{d(T_{\infty 3})}{ds} \right) \right) = -\varphi_{cv_{\infty 3}}$	$\varepsilon_{\infty 3}$ = porosité volumique de l'air du VC3 ρ_{as} = masse volumique de l'air sec α_{s3} = compacité du produit dans le VC3 $C_{p\infty}^*$ chaleur massique de l'air humide par kilo d'air sec $T_{\infty 3}$ =Température de l'air du VC3 $U_{\infty 3}$ = Vitesse moyenne de l'air 3 $\varphi_{cv_{\infty 3}}$ flux par convection échangé par l'air 3

VC	Bilan d'énergie	Légende
4	$\frac{\varepsilon_{\infty_3}}{1-\varepsilon_{\infty_3}} \frac{\rho_{as}}{\alpha_{s1}} \left(C^*_{p\infty} \left(\frac{d(T_{\infty 13})}{dt} + U_{\infty 1} \frac{d(T_{\infty 3})}{ds} \right) \right) = -\varphi_{cv_ \infty 3}$	<p>$\varepsilon_{\infty 4}$= porosité volumique de l'air du VC4</p> <p>ρ_{as}= masse volumique de l'air sec</p> <p>α_{s4}= compacité du produit dans le VC4</p> <p>$C^*_{p\infty}$ chaleur massique de l'air humide par kilo d'air sec</p> <p>$T_{\infty 4}$=Température de l'air du VC4</p> <p>$U_{\infty 4}$= Vitesse moyenne de l'air 4</p> <p>$\varphi_{cv_ \infty 4}$ flux par convection échangé par l'air du VC4</p>

ANNEXE 4.4

Tableau A.4.4. Bilan d'énergie sur les vitres et parois du séchoir local

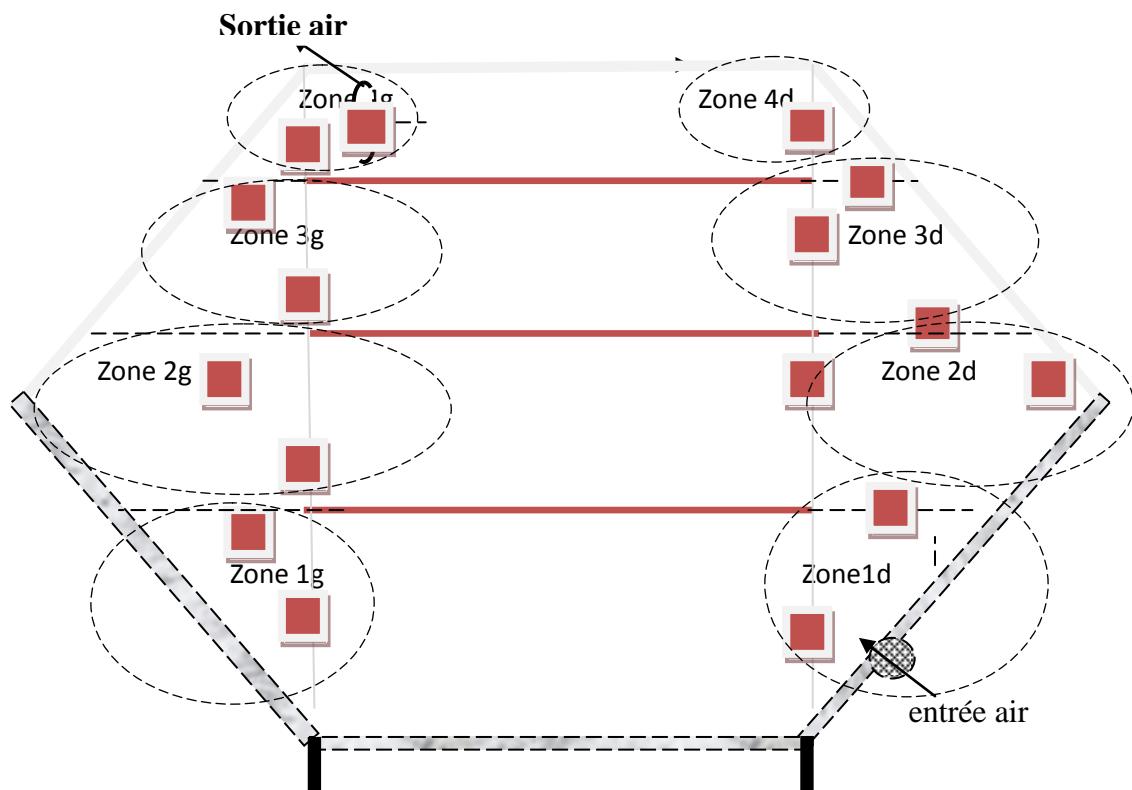
Elément	Bilan d'énergie	Légende
Vitre horizontale (<i>vih</i>)	$m_{vih} C_{pvi} \frac{dT_{vih}}{dt} = (\varphi_{rsd_vih} + \varphi_{rsdif_vih} + \varphi_{cv_oo4} + \varphi_{rir_vih}) S_{vih}$	m_{vih} = masse de <i>vih</i> C_{pvi} = chaleur massique de la vitre T_{vih} =température de <i>vih</i> φ_{rsd_vih} = flux de rayonnement solaire direct reçu par <i>vih</i> φ_{rsdf_vih} = flux de rayonnement solaire diffus reçu par <i>vih</i> φ_{cv_oo4} flux par convection échangé entre l'air 4 et <i>vih</i> φ_{rir_vih} = flux de rayonnement infrarouge échangé par <i>vih</i> S_{vih} =Surface de <i>vih</i>
Vitre gauche (<i>vig</i>)	$m_{vig} C_{pvi} \frac{dT_{vig}}{dt} = (\varphi_{rsd_vig} + \varphi_{rsdif_vig} + \varphi_{cv_oo1} + \varphi_{cv_oo2} + \varphi_{rir_vig}) S_{vig}$	M_{vig} = masse de <i>vig</i> T_{vig} =température de <i>vig</i> φ_{rsd_vig} = flux de rayonnement solaire direct reçu par <i>vig</i> φ_{rsdf_vig} = flux de rayonnement solaire diffus reçu par <i>vig</i> φ_{cv_oo1} flux par convection échangé entre l'air 1 et <i>vig</i> φ_{cv_oo2} flux par convection échangé entre l'air 2 et <i>vig</i> φ_{rir_vig} = flux de rayonnement infrarouge échangé par <i>vig</i> S_{vig} =Surface de <i>vig</i>
Vitre gauche (<i>vid</i>)	$m_{vid} C_{pvi} \frac{dT_{vid}}{dt} = (\varphi_{rsd_vid} + \varphi_{rsdif_vid} + \varphi_{cv_oo3} + \varphi_{cv_oo3} + \varphi_{rir_vid}) S_{vid}$	M_{vid} = masse de <i>vid</i> T_{vid} =température de <i>vid</i> φ_{rsd_vid} = flux de rayonnement solaire direct reçu par <i>vid</i> φ_{rsdf_vid} = flux de rayonnement solaire diffus reçu par <i>vid</i> φ_{cv_oo3} flux par convection échangé entre l'air 1 et <i>vid</i> φ_{cv_oo4} flux par convection échangé entre l'air 2 et <i>vid</i> φ_{rir_vid} = flux de rayonnement infrarouge échangé par <i>vid</i> S_{vid} =Surface de <i>vid</i>

Elément	Bilan d'énergie	Légende
Paroi droite (pd)	$m_{pd}C_p \frac{dT_{pd}}{dt} = \left(\varphi_{rsdif_pd} + \varphi_{cv_\infty 2} + \varphi_{cv_\infty 3} + \varphi_{cv_\infty 4} + \varphi_{rirpd} \right) S_{pd}$	M_{pd} = masse de pd C_p = chaleur massique des parois T_{pd} =température de pd φ_{rsdf_pd} = flux de rayonnement solaire diffus reçu par pd $\varphi_{cv_\infty 2}$ flux par convection échangé entre l'air 2 et pd $\varphi_{cv_\infty 3}$ flux par convection échangé entre l'air 3 et pd $\varphi_{cv_\infty 4}$ flux par convection échangé entre l'air 3 et pd φ_{rir_pd} = flux de rayonnement infrarouge échangé par pd S_{pd} =Surface de pd
Paroi droite (pg)	$m_{pg}C_p \frac{dT_{pg}}{dt} = \left(\varphi_{rsdif_pd} + \varphi_{cv_\infty 1} + \varphi_{cv_\infty 2} + \varphi_{rirpd} \right) S_{pg}$	M_{pg} = masse de pg T_{pg} =température de pg φ_{rsdf_pg} = flux de rayonnement solaire diffus reçu par pd $\varphi_{cv_\infty 1}$ flux par convection échangé entre l'air 1 et pg $\varphi_{cv_\infty 2}$ flux par convection échangé entre l'air 2 et pg φ_{rir_pg} = flux de rayonnement infrarouge échangé par pg S_{pg} =Surface de pg
Paroi horizontale (ph)	$m_{ph}C_p \frac{dT_{ph}}{dt} = \left(\varphi_{rsd_ph} + \varphi_{rsdif_ph} + \varphi_{cv_\infty 1} + \varphi_{rirph} \right) S_{ph}$	M_{ph} = masse de ph T_{ph} =température de ph φ_{rsd_ph} = flux de rayonnement solaire direct reçu par ph φ_{rsdf_ph} = flux de rayonnement solaire diffus reçu par ph $\varphi_{cv_\infty 1}$ =flux par convection échangé entre l'air 1 et ph φ_{rir_ph} = flux de rayonnement infrarouge échangé par ph S_{ph} =Surface de ph

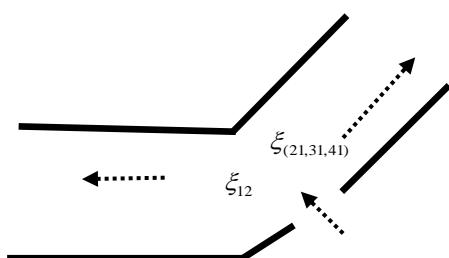
Elément	Bilan d'énergie	Légende
Parois avant (<i>pav</i>)	$m_{pav}C_p \frac{dT_{pav}}{dt} = (\varphi_{rsdif_pav} + \varphi_{rirpav})S_{pav}$	M_{pav} = masse de <i>pav</i> T_{pav} =température de <i>pav</i> φ_{rsdf_pav} = flux de rayonnement solaire diffus reçu par <i>pav</i> φ_{rir_pav} = flux de rayonnement infrarouge échangé par <i>pav</i> S_{pav} =Surface de <i>pav</i>
Parois arrière (<i>par</i>)	$m_{par}C_p \frac{dT_{par}}{dt} = (\varphi_{rsdif_par} + \varphi_{rirpar})S_{par}$	M_{par} = masse de <i>par</i> T_{par} =température de <i>par</i> φ_{rsdf_par} = flux de rayonnement solaire diffus reçu par <i>par</i> φ_{rir_par} = flux de rayonnement infrarouge échangé par <i>par</i> S_{par} =Surface de <i>par</i>

ANNEXE 4.5

Zones des pertes de charges dans le séchoir et coefficients des pertes de charge



-Détermination coefficients de pertes de charge dans la zone 1d



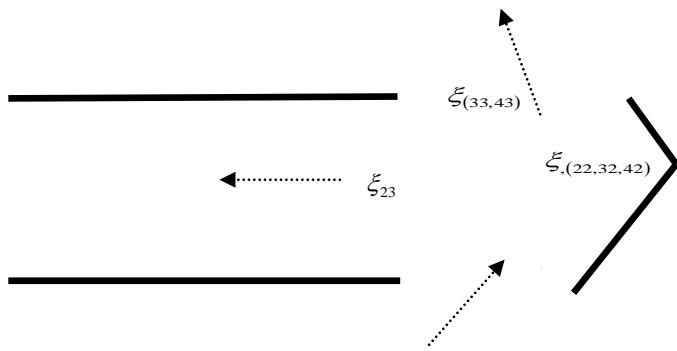
Typologie géométrique: séparation des courants. Assimilée au type section d'entrée d'air inférieure à la somme des deux sections de sortie.

Les 2 bifurcations font un angle de 45° avec l'entrée de l'air. En plus les sections de séparation sont pratiquement les mêmes. Donc les coefficients de pertes de charges dans les 2 bifurcations sont pratiquement les mêmes.

Les coefficients de pertes de charges sont déterminés à partir des abaques (Idel'cik,1986) et pour cette zone 1d les pertes de charges dans les deux bifurcations donnent :

$$\xi_{12} = \xi_{(21,31,41)} = 0,46$$

-Détermination coefficients de pertes de charge dans la zone 2d

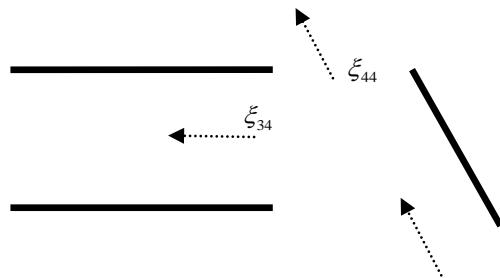


Typologie géométrique: Coude 90°+ bifurcation (séparation de courant) de type section d'entrée inférieure à la somme des deux sections de sortie

Avant de se séparer en 2 parties, l'air de la paroi de droite fait un angle de 90° sur un coude brusque à section droite. En tenant compte des sections d'entrées et de sortie de l'air on détermine sur un l'abaque de cette typologie géométrique les coefficients de pertes de charge les coefficients de pertes de charge, ce qui permet d'obtenir :

$$\xi_{23} = 0,52 ; \xi_{(22,32,42)} = 1,7 ; \xi_{(33,43)} = 0,2$$

-Détermination coefficients de pertes de charge dans la zone 3d

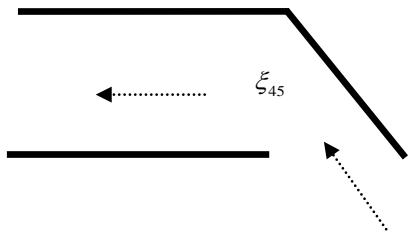


Typologie géométrique : bifurcation (séparation de courants) de type section d'entrée inférieure à la somme des deux sections de sortie

La bifurcation fait un angle de 45° et les 2 sections de sortie de l'air sont égales. En supposant que le débit d'entrée se sépare en deux parties égales, les vitesses de la bifurcation et du trajet rectiligne sont égales. On obtient, à partir de l'abaque de ce type de branchement les coefficients de pertes de charge ci-dessous :

$$\xi_{34} \approx \xi_{44} = 0,58$$

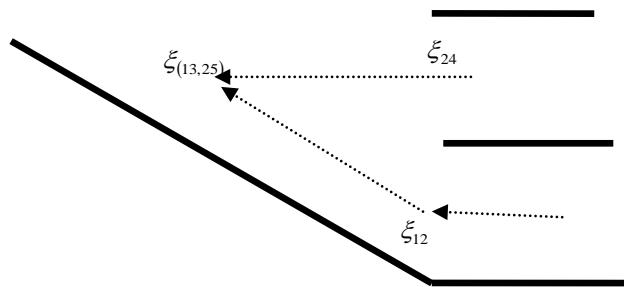
-Détermination coefficients de pertes de charge dans la zone 4d



Typologie géométrique : Coude brusque incliné de 45° de type section d'entrée égale à la section de sortie

$$\xi_{45} = 0,72$$

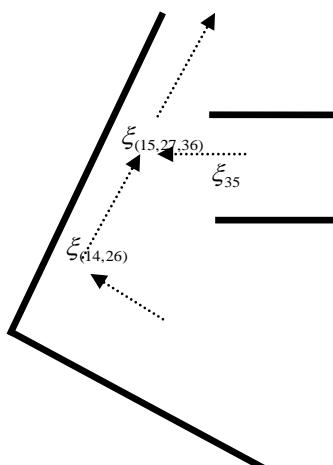
-Détermination coefficients de pertes de charge dans la zone 1g



Typologie géométrique : coude 45° +réunion de courants

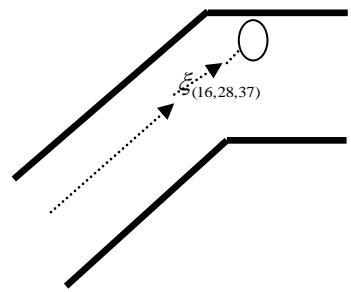
$$\xi_{24} = 0,3 ; \xi_{12} = 0,72 ; \xi_{(13,25)} = 1,54 ;$$

-Détermination coefficients de pertes de charge dans la zone 2g



Typologie géométrique : Coude brusque 90° + Réunion de courants

$$\xi_{(14,26)} = 1,7 ; \xi_{35} = 0,26 ; \xi_{(15,27,36)} = 0,3$$

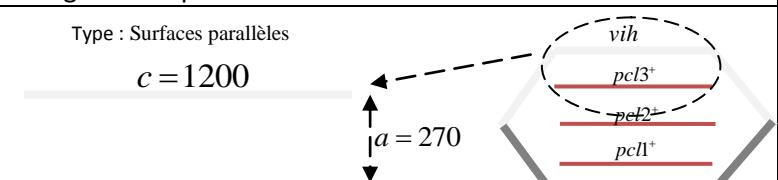
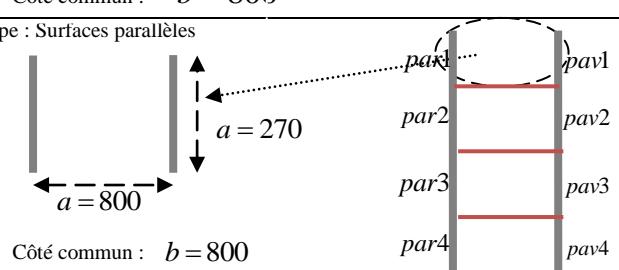
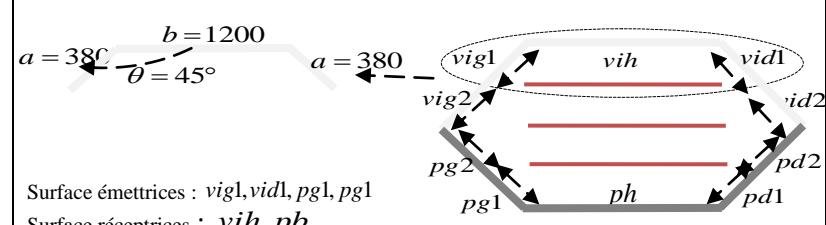
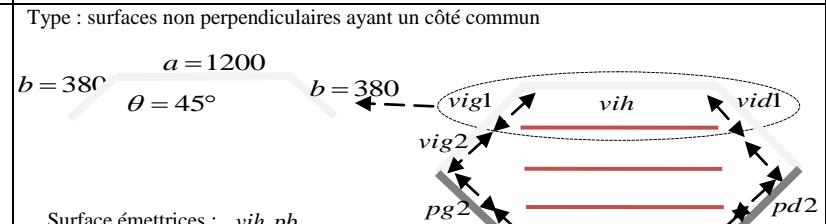
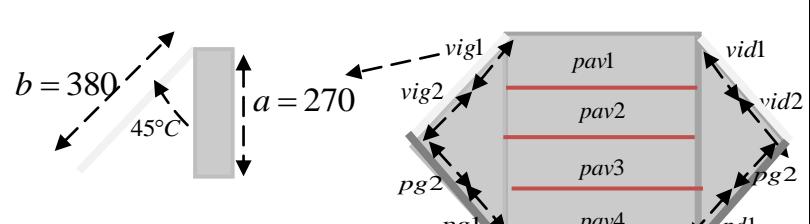


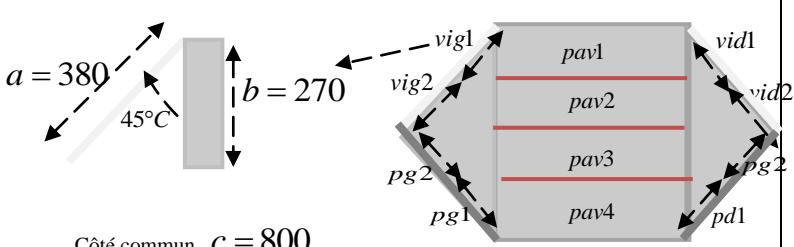
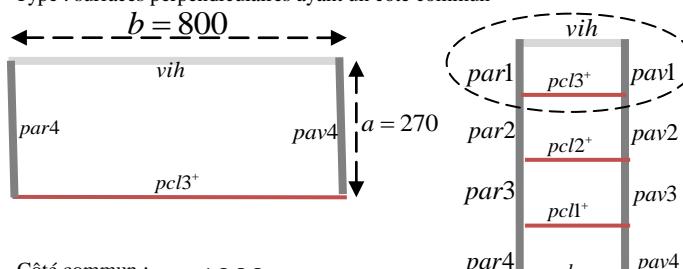
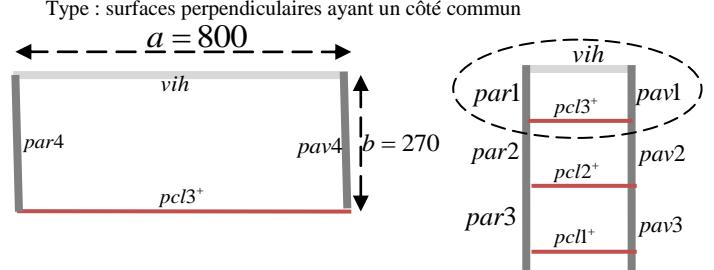
Typologie géométrique : Coude 45°

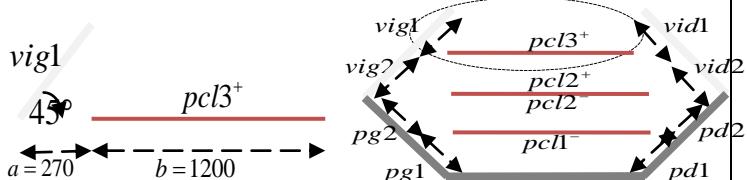
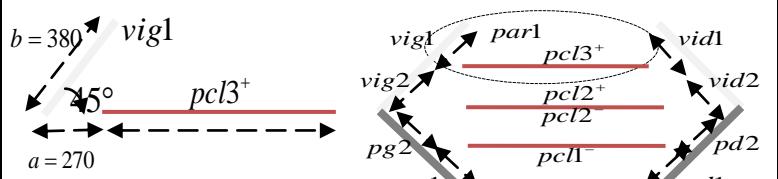
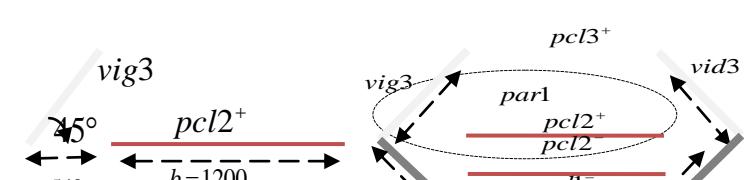
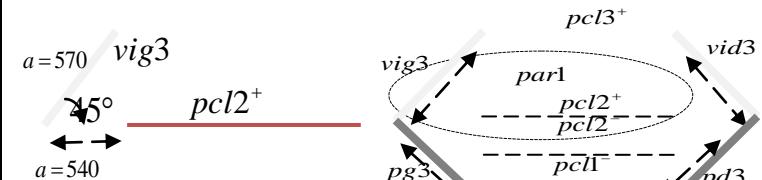
$$\xi_{(16,28,37)} = 0.72$$

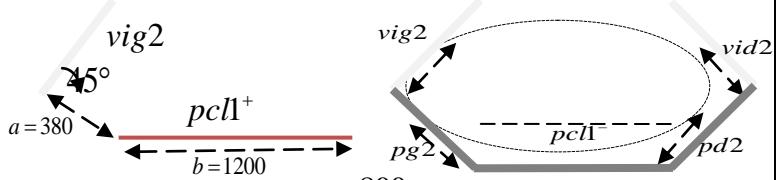
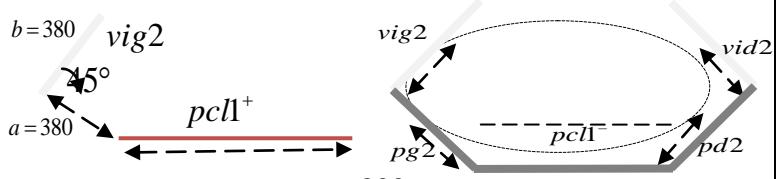
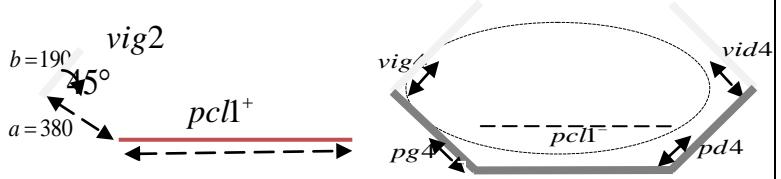
ANNEXE 4.6

FACTEURS DE FORME DANS LE SECHOIR

Facteur de forme	Forme géométrique	valeur
$F_{vih_pcl3^+} = F_{vih_pcl3^+}$ $F_{pcl1^+ _ pcl2^-} = F_{pcl2^- _ pcl}$ $F_{pcl2^+ _ pcl3^-} = F_{pcl3^- _ pcl2^+}$ $F_{pcl1- _ ph} = F_{ph- _ pcl1-}$	<p>Type : Surfaces parallèles</p>  <p>Côté commun : $b = 800$</p>	0.472
$F_{pav1_par1} = F_{par1-pav1}$ $F_{pav2_par2} = F_{par2-pav2}$ $F_{pav3_par3} = F_{par3-pav3}$ $F_{pav4_par4} = F_{par4-pav4}$	<p>Type : Surfaces parallèles</p>  <p>Côté commun : $b = 800$</p>	0.149
$F_{vig1_vih} = F_{vid1_vih}$ $F_{pg1_ph} = F_{pd1_ph}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires ayant un côté commun</p>  <p>Surface émettrices : vig1, vid1, pg1, pg1 Surface réceptrices : vih, pb</p>	0.803
$F_{vih_vig1} = F_{vih_vid1}$ $F_{pb_pg1} = F_{pb_pd1}$ $F_{ph_pg1} = F_{ph_pd1}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires ayant un côté commun</p>  <p>Surface émettrices : vih, pb Surface réceptrices : vig1, vid1, pg1, pg1</p>	0.25
$F_{pav1_vig1} = F_{par1-vig1}$ $F_{pav2_vig2} = F_{par2-vig2}$ $F_{pav1_vid1} = F_{par1-vid1}$ $F_{pav2_vid2} = F_{par2-vid2}$ $F_{pav4_pg1} = F_{par4-pg1}$ $F_{pav3_pg2} = F_{par3-pg2}$ $F_{pav4_pd1} = F_{par4-pd1}$ $F_{pav3_pd2} = F_{par3-pd2}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires ayant un côté commun</p>  <p>Côté commun $c = 800$</p> <p>Surface émettrices : pav1, pav2, pav3, pav4, par1, par2, par3, par4 Surface réceptrices : vig1, vig2, vid1, vid2, pg1, pg2, pd1, pd2</p>	0.7

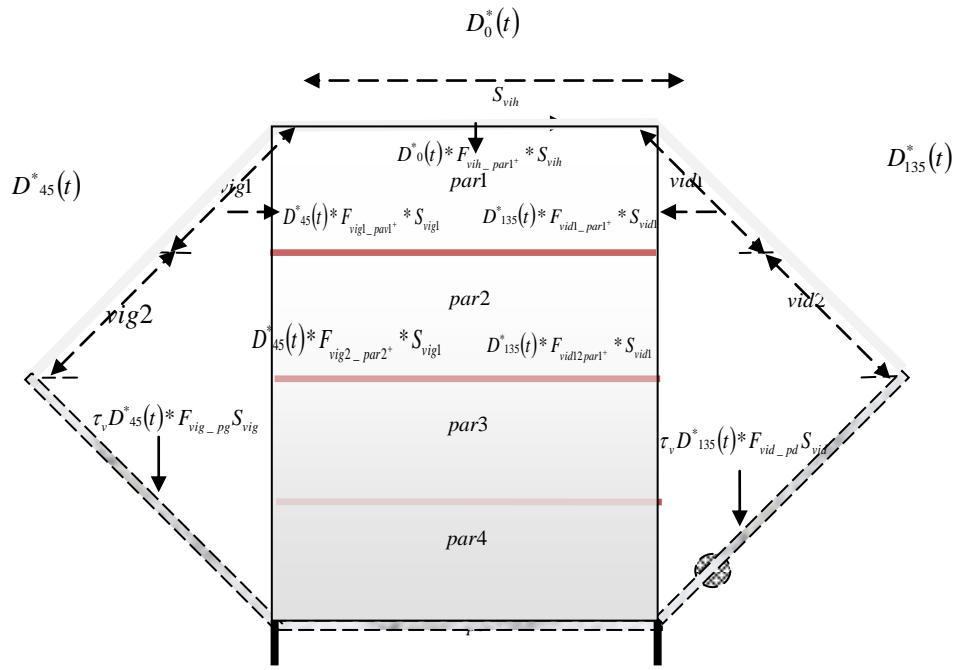
Facteur de forme	Forme géométrique	valeur
$F_{vigi_pav1} = F_{vigi_par1}$ $F_{vigi2_pav2} = F_{vigi2_par2}$ $F_{vid1_pav1} = F_{vid1_par1}$ $F_{vid2_pav2} = F_{vid2_par2}$ $F_{pg1_pav4} = F_{pg1_par4}$ $F_{pg2_pav3} = F_{pg2_par3}$ $F_{pd1_pav4} = F_{pd1_par4}$ $F_{pd2_pav3} = F_{pd2_par3}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires ayant un côté commun</p>  <p>Côté commun $c = 800$</p> <p>Surface émettrices : $vigi, vig2, vid1, vid2, pg1, pg2, pd1, pd2$ Surface réceptrices : $pav1, pav2, pav3, pav4, par1, par2, par3, par4$</p>	0.5
$F_{pav1_vih} = F_{pav1_pcl3^+}$ $F_{pav2_pcl3^-} = F_{pav2_pcl2^+}$ $F_{pav3_pcl2^-} = F_{pav3_pcl1^+}$ $F_{pav4_pcl1^-} = F_{pav4_pb}$ $F_{par1_vih} = F_{par1_pcl3^+}$ $F_{par3_pcl3^-} = F_{par3_pcl2^+}$ $F_{par2_pcl2^-} = F_{par2_pcl1^+}$ $F_{par1_pcl1^-} = F_{par1_ph}$	<p>Type : surfaces perpendiculaires ayant un côté commun</p>  <p>Côté commun : $c = 1200$</p> <p>Surface émettrice : $pav1, pav2, pav3, pav4, par1, par2, par3, pav4$ Surface réceptrice : $vih, pcl3^+, pcl2^+, pcl1^+, pb$</p>	0.35
$F_{vih_pav1} = F_{pcl3^+_pav1}$ $F_{pcl3^-_pav2} = F_{pcl2^+_pav2}$ $F_{pcl2^-_pav3} = F_{pcl1^+_pav3}$ $F_{pcl1^-_pav4} = F_{pb_pav4}$ $F_{vih_par1} = F_{pcl3^+_par1}$ $F_{pcl3^-_par2} = F_{pcl2^+_par2}$ $F_{pcl2^-_par3} = F_{pcl1^+_par3}$ $F_{pcl1^-_par4} = F_{pb_par4}$	<p>Type : surfaces perpendiculaires ayant un côté commun</p>  <p>Côté commun : $c = 1200$</p> <p>Surface émettrice : $vih, pcl3^+, pcl2^+, pcl1^+, pb$ Surface réceptrice : $pav1, pav2, pav3, pav4, par1, par2, par3, pav4$</p>	0.29

Facteur de forme	Forme géométrique	valeur
$F_{vigi_pcl3^+} = F_{vid1_pcl3^+}$ $F_{pg1_pcl1^-} = F_{pd1_pcl1^-}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires et n'ayant un côté commun</p>  <p>Longueur d'échange commune : $c = 800$</p> <p>Surface réceptrice: $pcl3^+, pcl1^-$ Surface émettrice : $vigi, vid1, pg1, pd1$</p>	0.312
$F_{pcl3^+_vigi} = F_{pcl3^+_vid1}$ $F_{Pgl_pcl1^+} = F_{Pd1_pcl1^+}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires et n'ayant un côté commun</p>  <p>Longueur d'échange commune : $c = 800$</p> <p>Surface réceptrice : $vigi, vid1, pg1, pd1$ Surface émettrice : $pcl3^+, pcl1^-$</p>	0.495
$F_{vigi_pcl2^+} = F_{vid3_pcl2^+}$ $F_{pg3_pcl2^-} = F_{pg3_pcl2^-}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires et n'ayant un côté commun</p>  <p>Longueur d'échange commune : $c = 800$</p> <p>Surface émettrice : $vigi, vid3, pg3, pd3$ Surface réceptrice : $pcl2^-, pcl2^+$</p>	0.29
$F_{pcl2^+_vigi3} = F_{pcl2^+_vid3}$ $F_{pcl2^-_pg3} = F_{pcl2^-_pg3}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires et n'ayant un côté commun</p>  <p>Longueur d'échange commune : $c = 800$</p> <p>Surface émettrice : $pcl2^-, pcl2^+$ Surface réceptrice : $vigi3, vid3, pg3, pd3$</p>	0.312

$F_{pcl2^+ \text{ } vig2} = F_{pcl2^+ \text{ } vid2}$ $F_{pcl2^- \text{ } pg2} = F_{pcl2^- \text{ } pg2}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires et n'ayant un côté commun</p>  <p>Longueur d'échange commune : $c = 800$ Surface émettrice : $vig2, vid2, pg2, pd2$</p> <p>Surface réceptrice $ncl2^-, ncl2^+$</p>	0.055
$F_{vig2 \text{ } pcl2^+} = F_{vid2 \text{ } pcl2^+}$ $F_{pg2 \text{ } pcl2^-} = F_{pg2 \text{ } pcl2^-}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires et n'ayant un côté commun</p>  <p>Longueur d'échange commune : $c = 800$ Surface émettrice : $pcl2^-, pcl2^+$</p> <p>Surface réceptrice $vi2^-, vi2^+, no2^-, nd2$</p>	0.205
$F_{vig2 \text{ } pcl2^+} = F_{vid2 \text{ } pcl2^+}$ $F_{pg2 \text{ } pcl2^-} = F_{pg2 \text{ } pcl2^-}$	<p>Type : surfaces non perpendiculaires et n'ayant un côté commun</p>  <p>Longueur d'échange commune : $c = 800$ Surface émettrice : $pcl2^-, pcl2^+$</p> <p>Surface réceptrice $vi2^-, vi2^+, no2^-, nd2$</p>	0.0139

ANNEXE 4.7

FLUX SOLAIRE DIFFUS TRANSMIS AUX PAROIS DU SÉCHOIR



- La paroi pb reçoit des rayonnements diffus des vitres gauche ($vig4$) et droite ($vid4$)

$$\varphi_{rsdf_pb} S_{cl1} = \tau_v \alpha_{pr} (D^*_{45}(t) * F_{vih_pb} * S_{vih} + D^*_{135}(t) * F_{vidl_pb} * S_{vidl})$$

- La paroi gauche échange avec toute la surface de la vitre gauche et reçoit de celle-ci un flux diffus qui est égal à :

$$\varphi_{rsdf_pg} S_{pg} = \tau_v \alpha_{pr} D^*_{45}(t) * F_{vih_pg} * S_{vih}$$

- La paroi droite échange avec toute la surface de la vitre droite et reçoit un flux diffus qui est égal à :

$$\varphi_{rsdf_pd} S_{pd} = \tau_v \alpha_{pr} D^*_{135}(t) * F_{vidl_pd} * S_{vidl}$$

- La paroi avant reçoit des rayonnements diffus des trois vitres ($vih, vig1, vig2$) sur la surface de sa sous paroi 1($pav1$). Sa sous paroi 2($pav2$) échange seulement avec les vitres $vig2$ et $vig3$

Le flux diffus total absorbé par la paroi avant est :

$$\varphi_{rsdf_pav1} S_{pav1} = \tau_v \alpha_p D^*_{45}(t) * F_{vih_pav1} * S_{vih} + \tau_v \alpha_p D^*_{135}(t) * S_{vidl} * F_{vidl_pav1} + \tau_v \alpha_p D^*_{0}(t) * F_{vih_pav1} * S_{vih}$$

$$\varphi_{rsdf_pav2} S_{pav2} = \tau_v \alpha_p D^*_{45}(t) * S_{vih} * F_{vih_pav2} + \tau_v \alpha_p D^*_{135}(t) * S_{vidl} * F_{vidl_pav2}$$

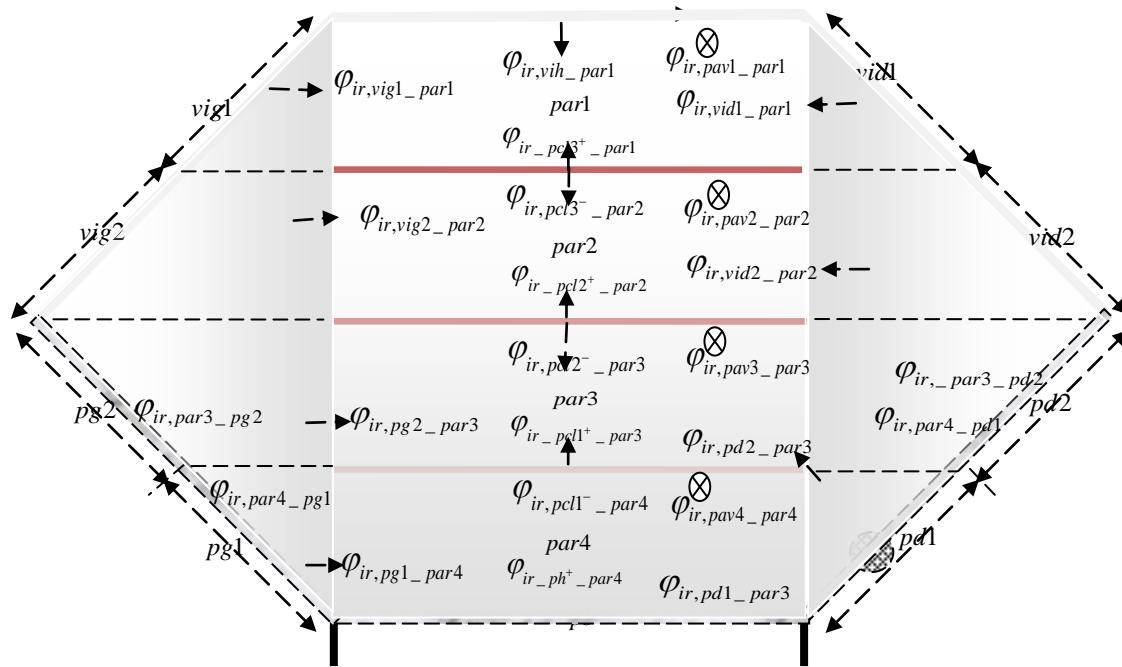
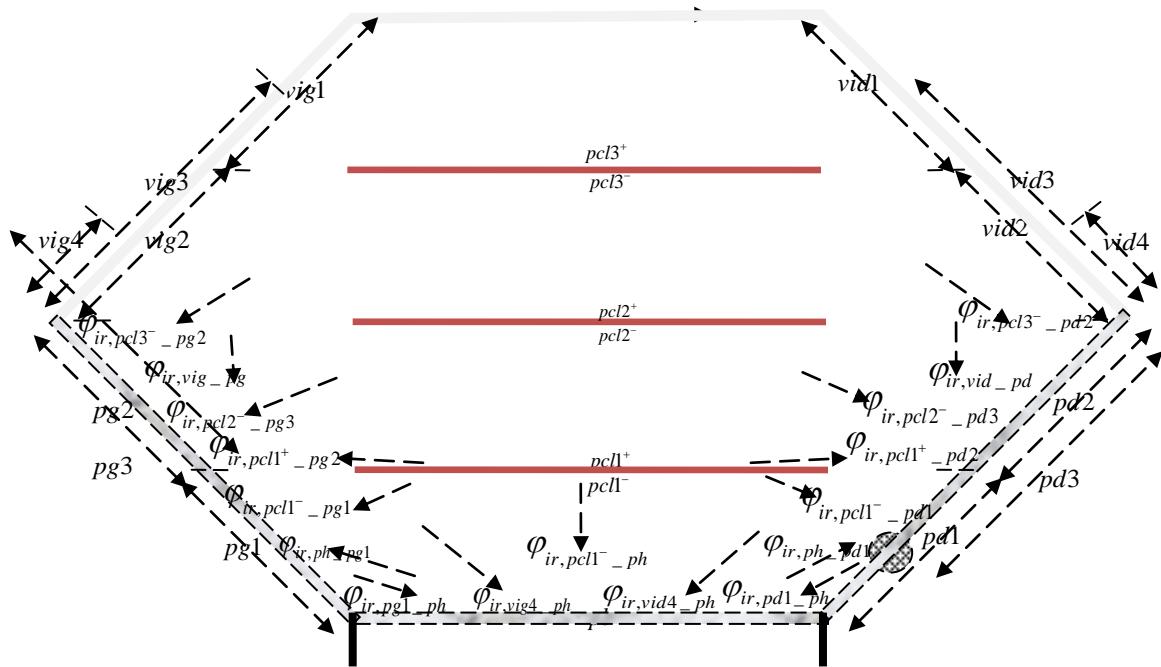
- La paroi arrière reçoit parallèle et de même dimension que la paroi avant reçoit la même quantité de flux diffus qui s'exprime par :

$$\varphi_{rsdf_par1} S_{par1} = \tau_v \alpha_p D^*_{45}(t) * F_{vih_par1} * S_{vih} + \tau_v \alpha_p D^*_{135}(t) * S_{vidl} * F_{vidl_par1} + \tau_v \alpha_p D^*_{0}(t) * F_{vih_par1} * S_{vih}$$

$$\varphi_{rsdf_par2} S_{par2} = \tau_v \alpha_p D^*_{45}(t) * S_{vih} * F_{vih_par2} + \tau_v \alpha_p D^*_{135}(t) * S_{vidl} * F_{vidl_par2}$$

ANNEXE 4.8

FLUX INFRAROUGES ECHANGES PAR LES PAROIS ET LES VITRES DU SECHOIR



- La paroi *pb* échange des rayonnements infrarouges avec le produit *pcl1⁻*, et les parois *pg1*, *par4*, *pav4*, *par2*.

$$\varphi_{ir_ph} = \varphi_{ir,pcl1^-_ph} + \varphi_{ir,pg1_ph} + \varphi_{ir,pd1_ph} + \varphi_{ir,par4_pb} + \varphi_{ir,pav4_ph}$$

- La paroi gauche pg échange des rayonnements infrarouges avec les produits $pcl1^-, pcl2^-, pcl3^-, pcl1^+$, les parois $ph, par3, par4, pav1, pav2, pav3, pav4$ et la vitre vig .

$$\varphi_{ir_pg} = \varphi_{ir,pcl1^-_pg4} + \varphi_{ir,pcl2^-_pg3} + \varphi_{ir,pcl3^-_pg2} + \varphi_{ir,pcl1^+_pb2} + \varphi_{ir,ph_pg1} + \varphi_{ir,par3_pg3} + \varphi_{ir,par4_pg1} + \varphi_{ir,pav3_pg3} + \varphi_{ir,pav4_pg1} + \varphi_{ir,vig_pg}$$

- La paroi droite échange pd des rayonnements infrarouges avec les produits $pcl1^-, pcl2^-, pcl3^-, pcl1^+$, les parois $ph, par3, par4, pav1, pav2, pav3, pav4$ et la vitre vid.

$$\varphi_{ir_pg} = \varphi_{ir,pcl1^-_pd4} + \varphi_{ir,pcl2^-_pd3} + \varphi_{ir,pcl3^-_pd2} + \varphi_{ir,pcl1^+_pd2} + \varphi_{ir,ph_pd1} + \varphi_{ir,par3_pd3} + \varphi_{ir,par4_pd1} + \varphi_{ir,pav3_pd3} + \varphi_{ir,pav4_pd1} + \varphi_{ir,vig_pd}$$

- La paroi arrière $par1$ échange des rayonnements infrarouges avec le produit $pcl3^+$, la paroi $pav1$ et les vitres $vih, vig1$ et $vid1$.

$$\varphi_{ir_par1} = \varphi_{ir,pcl3^+_par1} + \varphi_{ir,pav4_par1} + \varphi_{ir,vih_par1} + \varphi_{ir,vig1_par1} + \varphi_{ir,vid1_par1}$$

- La paroi arrière $par2$ échange des rayonnements infrarouges avec le produit $pcl3^-, pcl2^+$ la paroi $pav2$ et les vitres, $vig2$ et $vid2$.

$$\varphi_{ir_par2} = \varphi_{ir,pcl3^-_par2} + \varphi_{ir,pcl2^+_par2} + \varphi_{ir,pav2_par2} + \varphi_{ir,vig2_par2} + \varphi_{ir,vid2_par2}$$

- La paroi arrière $par3$ échange des rayonnements infrarouges avec le produit $pcl2^-, pcl1^+$ et les parois $pg2, pd2, pav3$.et les vitres, $vig2$ et $vid2$.

$$\varphi_{ir_par3} = \varphi_{ir,pcl2^-_par3} + \varphi_{ir,pcl1^+_par3} + \varphi_{ir,pg2_par3} + \varphi_{ir,pd2_par3} + \varphi_{ir,pav3_par3}$$

- La paroi arrière $par4$ échange des rayonnements infrarouges avec le produit $pcl1^-$, et les parois $ph, pg1, pd1$ et $pav4$.

$$\varphi_{ir_par4} = \varphi_{ir,pcl1^-_par4} + \varphi_{ir,ph_par4} + \varphi_{ir,pg1_par4} + \varphi_{ir,pd1_par4} + \varphi_{ir,pav4_par4}$$

- La paroi avant $pav1$ échange des rayonnements infrarouges avec le produit $pcl3^+$, la paroi $pav1$ et les vitres $vih1, vig1$ et $vid1$.

$$\varphi_{ir_pav1} = \varphi_{ir,pcl3^+_pav1} + \varphi_{ir,par1_pav1} + \varphi_{ir,vih_pav1} + \varphi_{ir,vig1_pav1} + \varphi_{ir,vid1_pav1}$$

- La paroi avant $pav2$ échange des rayonnements infrarouges avec les produits $pcl3^-, pcl2^+$, la parois $par2$ et les vitres $vig2$ et $vid2$.

$$\varphi_{ir_pav2} = \varphi_{ir,pcl3^-_pav2} + \varphi_{ir,pcl2^+_pav2} + \varphi_{ir,par2_pav2} + \varphi_{ir,vig2_pav2} + \varphi_{ir,vid2_pav2}$$

- La paroi avant $pav3$ échange des rayonnements infrarouges avec les produits $pcl2^-, pcl1^+$ et les parois $pg2, pd2$ et $par3$.

$$\varphi_{ir_pav3} = \varphi_{ir,pcl2^-_pav3} + \varphi_{ir,pcl1^+_pav3} + \varphi_{ir,pg2_pav3} + \varphi_{ir,pd2_pav3} + \varphi_{ir,par3_pav3}$$

- La paroi arrière *pav4* échange des rayonnements infrarouges avec le produit $pcl1^-$, les parois *ph*, *pg1*, *pd1* et *par4*.

$$\varphi_{ir_pav4} = \varphi_{ir,pcl1^-_pav4} + \varphi_{ir,ph_pav4} + \varphi_{ir,pg1_pav4} + \varphi_{ir,pd1_pav4} + \varphi_{ir,par4_pav4}$$

- Flux par rayonnement infrarouge échangé par les vitres

A partit des flux par rayonnement infrarouges échangés par les produits et les parois on déduit par réciprocité les flux d'échanges des vitres.

- La vitre *vih* échange des rayonnements infrarouges avec le produit $pcl3^+$, les parois *pav1*, *par1*, *pg4*, *pd4* et les vitres *vig1* et *vid1*.

$$\varphi_{ir_vih} = \varphi_{ir,pcl3^+_vih} + \varphi_{ir,pav1_vih} + \varphi_{ir,par1_vih} + \varphi_{ir,vig1_vih} + \varphi_{ir,vid1_vih} + \varphi_{ir,pg4_vih} + \varphi_{ir,pd4_vih}$$

- La vitre *vig* échange des rayonnements infrarouges avec les produits $pcl3^+$, $pcl3^-$, $pcl2^+$, $pcl1^+$, les parois *pg*, *par1*, *par2*, *par3*, *par4*, *pav1*, *pav2* et les vitres *vih* et *vid*.

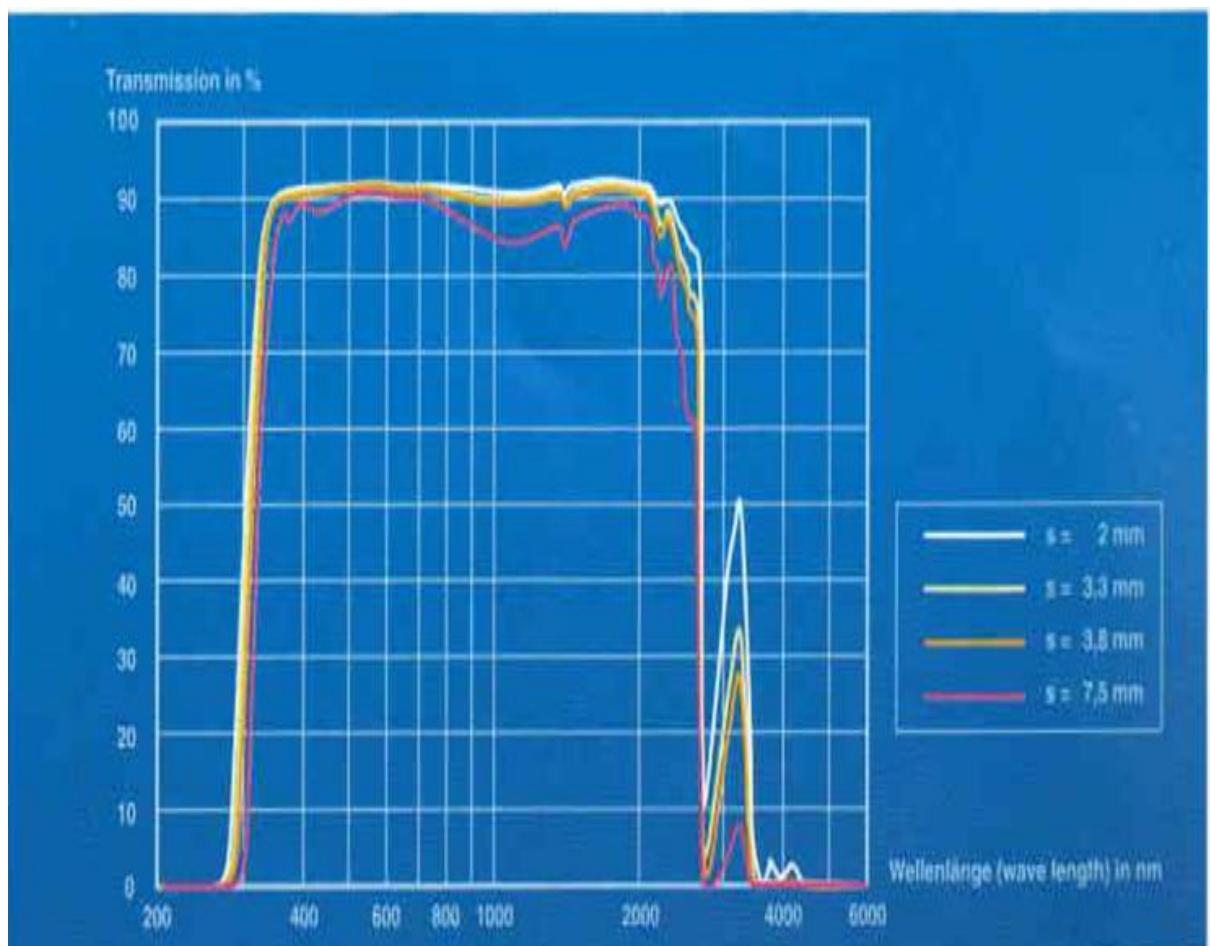
$$\begin{aligned} \varphi_{ir_vig} = & \varphi_{ir,pcl3^+_vig1} + \varphi_{ir,pcl3^-_vig2} + \varphi_{ir,pcl2^+_vig3} + \varphi_{ir,pcl1^+_vig2} + \varphi_{ir,pg_vig} + \varphi_{ir,par1_vig1} + \varphi_{ir,par2_vig3} \\ & + \varphi_{ir,pav1_vig1} + \varphi_{ir,pav2_vig3} + \varphi_{ir,pav3_vig2} + \varphi_{ir,pav4_vig4} + \varphi_{ir,vih_vig2} + \varphi_{ir,vid1_vig1} \end{aligned}$$

- La vitre *vid* échange des rayonnements infrarouges avec les produits $pcl3^+$, $pcl3^-$, $pcl2^+$, $pcl1^+$, les parois *pd*, *par1*, *par2*, *par3*, *par4*, *pav1*, *pav2* et les vitres *vih* et *vig1*.

$$\begin{aligned} \varphi_{ir_vid} = & \varphi_{ir,pcl3^+_vid1} + \varphi_{ir,pcl3^-_vid2} + \varphi_{ir,pcl2^+_vid3} + \varphi_{ir,pcl1^+_vid2} + \varphi_{ir,pd_vid} + \varphi_{ir,par1_vid1} + \varphi_{ir,par2_vid3} \\ & + \varphi_{ir,pav1_vid1} + \varphi_{ir,pav2_vid3} + \varphi_{ir,pav3_vid2} + \varphi_{ir,pav4_vid4} + \varphi_{ir,vih_vid2} + \varphi_{ir,vig1_vid1} \end{aligned}$$

ANNEXE 5.1

Coefficient de transmission de la vitre ne quartz



CONTRIBUTION AU SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS CARNES: MODELISATION ET REALISATION D'UN SECHOIR ADAPTE AUX PAYS TROPICAUX.

RÉSUMÉ : La conservation de la viande dans les pays tropicaux est difficile à cause du caractère périssable de ce produit, des conditions climatiques favorables à sa dégradation et de l'accès limité à l'énergie électrique. La présente étude porte sur l'amélioration du séchage solaire des produits carnés dans les pays tropicaux d'Afrique. Deux voies d'amélioration sont suivies : la qualité du produit et le procédé de séchage. La qualité du produit est évaluée suivant trois critères: la stabilité du produit, la qualité organoleptique et les qualités microbiologiques et biochimiques. Une zone de stabilité de la viande est déterminée à travers l'étude des isothermes de désorption. Les cinétiques de séchage, sont obtenues et modélisées par une fonction flux masse qui permet de prédire le comportement hygroscopique de la viande au cours de sa déshydratation. Un séchoir solaire adapté au contexte de pays tropicaux, et qui prend en compte les besoins des utilisateurs en termes de qualité du produit séché, de coût et d'encombrement, est réalisé. Un modèle de séchage adapté à ce séchoir est développé et validé dans un contexte de pays tropical. Les qualités organoleptiques du produit sont prises en compte dans la phase de conception du séchoir solaire en considérant des critères de qualité organoleptique du *Kilichi*, qui est le produit carné séché le plus rencontré dans les pays d'Afrique Subsaharienne. Pour étudier l'impact du rayonnement solaire sur les qualités microbiologiques, un deuxième séchoir solaire est conçu et réalisé à l'échelle du laboratoire pour simuler, de façon contrôlable, les conditions de séchage rencontrées dans le séchoir solaire adapté au contexte tropical. Les analyses microbiologiques, effectuées sur des échantillons de viandes fraîche et séchée, dans des conditions rencontrées dans les pays tropicaux, montrent que le séchage solaire permet de réduire considérablement (de 70% à 90%) les microorganismes présents dans la viande. Par ailleurs, l'impact du rayonnement solaire sur la destruction des microorganismes est plus significatif que celui de la température de séchage. Les analyses biochimiques mettent en évidence que le séchage induit à une forte oxydation des lipides mais n'a pas d'impact sur la teneur en lipide de la viande.

Mots clés : séchage solaire, viande, pays tropicaux, modélisation, qualité microbiologique, qualité biochimique.

CONTRIBUTION TO SOLAR DRYING OF MEAT PRODUCTS: MODELLING AND MANUFACTURING OF A SOLAR DRYER SUITABLE FOR TROPICAL COUNTRIES.

ABSTRACT: Meat preservation is difficult in tropical countries because of the perishable nature of this product, the favorable climate conditions to its degradation and the limited access to the electricity. This study deals with the improvement of meat solar drying in African tropical countries. Two ways of improvement are followed: the quality of the product and the drying process. Quality of the product is evaluated according to three criteria: the product stability, the organoleptic quality and the microbiological and biochemical qualities. A stability zone of meat is determined through the study of desorption isotherms. Drying kinetics are obtained and modeled by a mass flow function that predicts the hygroscopic behavior of the meat during dehydration. A solar drier adapted to the tropical context, and which takes into account the needs of users in terms of quality of the dried product and cost is manufactured. A drying model, adapted to the solar drier, is developed and validated in the context of tropical countries. The organoleptic qualities of the product are considered during the solar dryer design phase, based on the organoleptic quality criteria of Kilichi, which is the dried meat product most encountered in Sub-Saharan African countries. To study the impact of solar radiation on microbiological qualities, a second solar dryer is designed and manufactured in laboratory scale to simulate, in a controllable way, the drying conditions encountered in the solar drier adapted to the tropical context. Microbiological analyzes, carried out on samples of fresh and dried meats, under conditions encountered in tropical countries, indicate that the solar drying reduces considerably (from 70% to 90%) microorganisms in meat. Furthermore, the impact of the solar radiation on the destruction of microorganisms is more significant than the drying temperature. Biochemical analyzes show that drying induces to high lipid oxidation but has no impact on the lipid content of the meat.

Keywords: solar drying, meat, tropical countries, modeling, microbiological quality, biochemical quality.