

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB
BLIDA

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTORAT Es Sciences

Spécialité : Physique Energétique

Présentée par

Braham Chaouch Wafa

**Etude de la cinétique de séchage de la viande
cameline par séchoir solaire de la région
d'Adrar**

Devant le jury composé de :

D. SEMMAR	Professeur	Université de Blida 1	Président
B. BOUMEDDANE	Professeur	Université de Blida 1	Examineur
S.HANINI	Professeur	Université de Medéa	Examineur
R. KHARCHI	MR (A)	CDER	Examineur
A.KHELLAF	Professeur	CDER	Directeur de thèse
A.HAMID	Professeur	Université de Blida 1	Co- Directeur de thèse

Remerciements

Je clame ma profonde reconnaissance à ma mère et à mon père qui m'ont toujours réservé un soutien inconditionnel en toutes circonstances,

à mes enfants qui se sont engagé, en dépit de leur jeunes âges, à porter le fardeau avec maman,

à Yacine, mon frère, mon fils et mon meilleur ami,

à Houda Ouali qui ne rate aucune occasion pour me soutenir,

à Fouzia Ouali qui continue à être présente même à des milliers de kilomètres de moi,

à Hakim Braham Chaouch, à Besma Anane, à Nabila Chinoune et à Mohamed Amrouni pour leur soutien indéfectible, leur amitié et leur bonté,

à la méritoire Naima Amari, pour sa présence, pour son courage qui m'inspire à chaque instant,

à Monsieur Khellaf Abdallah, pour son accompagnement sans faille,

A Monsieur Hamid Abdelkader pour son encadrement de mon travail et son inestimable orientation,

à Slimani Mohamed-El-Amine pour son précieux et généreux apport,

aux membres de l'équipe de Séchage de l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar pour tous les efforts consentis au service du présent travail

aux honorables membres du jury qui ont généreusement offert de leur temps et de leur intérêt pour bien vouloir évaluer mon travail.

Résumé

La viande, produit particulièrement périssable, nécessite des moyens de conservation adéquats pour préserver sa stabilité microbiologique et organoleptique. Dans le Sahara algérien, la population pratique le séchage solaire de la viande caméline car les moyens de conservation par le froid font défaut mais aussi, pour la recherche du gout particulier du traditionnel Keddid. L'objectif de cette thèse est de proposer une conception particulière d'un séchoir solaire mixte (direct et indirect) à convection forcée, destiné au séchage de la viande caméline et intégré d'un système de conservation d'énergie sensible par un lit de galets, Il s'agit d'évaluer l'effet du stockage d'énergie sensible sur le rendement du capteur solaire associé au système, d'étudier les performances thermiques de ce dernier et les rendements de séchage lorsqu'il est utilisé pour la viande caméline, étudier la cinétique de séchage de ce produit et d'en établir la qualité microbiologique et physico-chimique à la fin du séchage. Les isothermes de désorption de la viande a été menée à l'aide de la méthode des sels saturés. Les courbes obtenues ont été ensuite modélisées par des modèles empiriques et semi-empiriques. La chaleur isostérique associée à la désorption a été calculée par l'application de l'équation de Clausius–Clapeyron aux données expérimentales des isothermes.

Mots clefs : Séchage solaire; Convection forcée; stockage de chaleur; viande de chameau; Environnement saharien; qualité de la viande, isothermes de désorption; chaleur isostérique

Abstract

Meat, a particularly perishable product, requires adequate conservation means to preserve its microbiological and organoleptic stability. In the Algerian Sahara, the population practices the solar drying of camelina meat because the means of preservation by cold are lacking but also, for the search for the particular taste of traditional Keddid. The objective of this thesis is to propose a particular design of a mixed solar dryer (direct and indirect) with forced convection, intended for the drying of camelina meat and integrated with a sensitive energy conservation system by a bed of pebbles. This involves evaluating the effect of sensitive energy storage on the performance of the solar collector associated with the system, studying the thermal performance of this system and the drying efficiency when it is used for meat camelina, study the drying kinetics of this product and establish its microbiological and physicochemical quality at the end of drying. Meat desorption isotherms were carried out using the saturated salt method. The curves obtained were modeled by empirical and semi-empirical models. The isosteric heat associated with desorption was calculated by applying the Clausius – Clapeyron equation to experimental isotherms data.

Keywords: Solar drying; Forced convection; heat storage; camel meat; Saharan environment; meat quality, desorption isotherms; isosteric heat

ملخص

تتطلب اللحوم ، وهي منتج قابل للتلف بشكل خاص ، وسائل حفظ كافية للحفاظ على استقرارها الميكروبيولوجي والحسي. في الصحراء الجزائرية ، يمارس السكان التجفيف الشمسي للحم الإبل لأن وسائل الحفظ بالبرودة غير متوفرة ولكن أيضًا للبحث عن المذاق الخاص للقييد التقليدي. الهدف من هذه الرسالة هو اقتراح تصميم خاص لمجفف شمسي مختلط (مباشر وغير مباشر) مع الحمل الحراري القسري ، مخصص لتجفيف لحم الإبل ومتكامل مع نظام حساس للحفاظ على الطاقة بواسطة طبقة من الحصى. يتضمن ذلك تقييم تأثير تخزين الطاقة الحساسة على أداء المجمع الشمسي المرتبط بالنظام، ودراسة الأداء الحراري لهذا النظام وكفاءة التجفيف عند استخدامه لحوم الإبل ، ودراسة حركية التجفيف لهذا المنتج وإثباته. الجودة الميكروبيولوجية والفيزيائية الكيمائية في نهاية التجفيف. تم إجراء متساوي الحرارة لامتناس اللحوم باستخدام طريقة الملح المشبع. تم تصميم المنحنيات التي تم الحصول عليها من خلال النماذج التجريبية وشبه التجريبية. تم حساب الحرارة المتوازنة المرتبطة بالامتصاص عن طريق تطبيق معادلة كلاوزيوس وكلايرون على بيانات متساوي الحرارة التجريبية.

الكلمات الرئيسية: التجفيف الشمسي. الحمل القسري، تخزين الحرارة لحم الإبل، البيئة الصحراوية ؛ جودة اللحوم ، الامتزاز في درجة حرارة ثابتة ؛ حرارة ايزوستيرية

Liste des figures

Fig I. 1. Les différentes phases du séchage	10
Fig I.2. La classification des séchoirs solaires	11
Fig. 1.3. Séchoir solaire direct passif	12
Fig.1.4. Séchoir solaire direct type cabine : détail de la cabine	13
Fig.I.5. Séchoir solaire direct à cabine	14
Fig. I.6: Séchoir solaire direct de type escalier	14
Fig.I.7. Séchoir serre avec mur nord opaque	15
Fig.I. 8. Schéma d'un séchoir solaire type tunnel en convection naturelle	15
Fig I. 9. Schéma descriptif d'un séchoir solaire indirect	18
Fig.I.10. Séchoir solaire indirect à convection forcée	17
Fig I.11. Séchoir d'armoire à absorbeur inverse	18
Fig . I.12. Séchoir solaire mixte en convection forcée	18
Fig.I.13. Séchoir solaire de type serre en mode mixte.	19
Fig. I.14. Séchoir solaire Hybride avec chauffeur électrique.	20
Fig.I.15. Vue schématique et photo d'un séchoir solaire hybride avec four à biomasse	20
Fig. I. 16. Unité de séchage solaire avec appoint de chaleur électrique	21
Fig. I.17. Coupe transversale du capteur PV/T à air	22
Fig. I.18: Banc d'essai du séchoir solaire PV/T.	23
Fig I.19. Séchoir solaire indirect à convection forcée avec stockage d'énergie sensible par lit de gravier	24
Fig.I.20: Séchoir solaire à desséchant intégré	25
Fig. I.21. Séchoir solaire avec stockage d'énergie	26
Fig.I.22: Séchoir solaire avec un stockage thermique sous PCM	27
Fig I. 23. Situation géographique de la Wilaya d'Adrar sur la carte de l'Algérie	35
Fig.I.24. Agriculture à Adrar. (a) Culture extensive par les pivots, (b) Système des Fouggaras	36
Fig.I. 24. Aspect de la viande avant et après séchage traditionnel	40
Fig.II.1. schémas descriptif du séchoir	43
Fig.II.2. schémas descriptif du séchoir expérimental	44
Fig.II.3. Le corps du capteur solaire	45
Fig.II.4. La chambre de séchage indirect	46
Fig.II.5. La jonction entre le capteur solaire et la chambre de séchage indirect	46
Fig.II.6. La chambre de séchage direct	47
Fig.II.7. La cavité de stockage des galets placée sous le capteur solaire	48
Fig.II.8. Le plenum de stockage : (a) vue externe, (b) : vue interne avec les galets contenus	49
Fig.III.1. Pyranomètre KippZonnen CM11	52
Fig.III.2. Acquisition de données Fluke 2638 A	52
Fig.III.3. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 24 octobre 2016	55
Fig.III.4. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 27 octobre 2016	55

Fig.III.5. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 30 octobre 2016	56
Fig.III.6. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 01 novembre 2016	56
Fig.III.7. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 02 novembre 2016	57
Fig.III.8. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 03 novembre 2016	57
Fig.III.9. Evolution du rendement thermique instantané du capteur solaire sans galets et avec 40 kg de galets	59
Figure III.10. Evolution des températures du capteur solaire	60
Figure III.11. La différence entre température de l'air caloporteur à l'entrée T_{ci} et à la sortie du capteur solaire T_{co}	60
Fig III.11. La température de la chambre de séchage indirect.	61
Fig. III.13. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations stockage chambre directe pour le 07 novembre 2016	62
Fig. III.14. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations stockage chambre directe pour le 08 novembre 2016	63
Fig. III.15. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations stockage chambre directe pour le 09 novembre 2016.	63
Fig. III.16. Evolution du rendement thermique instantané pour 0 kg, 5 kg et 10 kg de galets du plénum	64
Fig. III.17. Evolution des températures de fonctionnement de la chambre de séchage direct avec 5kg de galets au plénum	66
Fig. III.18. Evolution de la différence entre la température ambiante T_{am} et la température de l'air asséchant T_{Drm} au milieu de la chambre de séchage direct	66
Figure IV.1. Hygromètre Opus 208 pour la mesure des humidités relatives	69
Figure IV.2. Anémomètre Testo 425	69
Figure IV.3. Balance de précision OHAUS Pioneer	70
Fig.IV.4. : Températures et des irradiances solaires (a) Mois de novembre,(b) Mois de juillet	73
Fig. IV.5. Températures de fonctionnement de la chambre de séchage indirect lors des expériences de séchage: a) expérience de Novembre, b) expérience de Juillet	75
Fig.IV.6. Températures de fonctionnement de la chambre de séchage direct lors des expériences de séchage:(a) expérience de Novembre,(b) expérience de Juillet	76
Fig. (IV.7). Sonde de l'appareil de mesure de l'humidité de l'air dans la chambre de séchage indirect	78
Fig. IV.8. Evolution de l'humidité relative à l'entrée h_e et à la sortie h_s de la chambre de séchage indirect: (a) expérience de juillet, (b) expérience de novembre	79
Fig.IV.9. Viande cameline découpées et placée sur les claies	80
Fig.IV.10. La viande cameline chargée dans le séchoir : (a). Chambre de séchage indirect, (b). Chambre de séchage direct	81
Fig. IV.11. Claie contenant viande à sécher à ciel ouvert	82
Fig. IV.12. Evolution de la teneur en eau à base sèche dans la chambre de séchage indirect pour chaque claie et de leur moyenne AVG: a) Expérience de juillet. B) Expérience de novembre	83
Fig. IV.13. Evolution de la teneur en eau à base sèche dans la chambre de séchage direct a) Expérience de juillet, b) Expérience de novembre.	84

Fig. IV.14. Lissage de la courbe d'évolution de la teneur en eau réduite pour différentes expériences	89
Fig. IV.15. Evolution du rendement de séchage: (a) chambre de séchage indirect à l'expérience de juillet, (b) chambre de séchage indirect à l'expérience de novembre	90
Figure V.1 : Isotherme de sorption illustration de l'hystérésis	96
Figure V.2. Courbe de sorption générale d'après MULTON	96
Fig.V.3. Les bocalx des solutions saline contenant les échantillons de viande et placés dans l'étuve	100
Fig .V.4. Isotherme de désorption de la viande caméline	102
Fig.V.5. La chaleur isostérique de désorption de la viande caméline approchée par une exponentielle décroissante	104
Fig.VI.1. Analyses microbiologiques : (a). Dilution décimale de la viande séchée et de la viande fraîche, (b). coulage des milieux de culture dans les boites de pétris	107
Fig.VI.2. Mesure de l'activité de l'eau avec l' a_w mètre	109

Sommaire

Introduction	01
Chapitre I. Synthèse bibliographique	
I.1. Problématique du séchage	05
I.1.1. Définition du séchage	05
I.1.2. Différents modes de séchage	05
I.2. Généralités sur les mécanismes de séchage	06
I.2.1. Migration de l'eau à l'intérieur d'un produit	06
I.2.2. Théories descriptives du phénomène de séchage	07
I.2.2.1. Théorie de la diffusion du liquide	07
I.2.2.2. Théorie capillaire	07
I.2.2.3. Théorie de Krischer - Berger - Pei.	08
I.2.3. Les différentes phases du séchage	08
a. Phase 0 ou phase de mise en température du produit	08
b. Phase I ou phase de séchage à allure constante	09
c. Phase II ou phase de séchage à allure décroissante	09
I.3. Le séchage solaire	10
I.3.1. Présentation des différents types de séchoirs solaires	11
I.3.1.1. Séchoir solaire direct	12
a. Séchoir solaire direct type armoire	13
b. Séchoirs solaires type Serre	14
I.3.1.2. Séchoir solaire indirect	16
I.3.1.3. Séchoir solaire en mode mixte (direct et indirect)	18
I.3.1.4. Séchoir solaire hybride	19
I.3.1.5. Séchage solaire avec un capteur hybride photovoltaïque /thermique	21
I.3.1.6. Séchage solaire avec stockage thermique	23
a. Stockage thermique à chaleur sensible	24
b. Stockage à chaleur latente (matériau PCM)	26
I.3.2. Etude comparative des différents types de séchoirs solaires	27
I.3.3. Paramètres généraux du séchage	28
I.3.3.1. Caractéristiques physiques d'un séchoir	29
I.3.3.2. Performance thermique	30
a. Temps de séchage - taux de séchage	30
b. Température de l'air asséchant et humidité relative	30
c. Débit d'air	31
d. Rendement du séchoir	31
I.3.3.3. Qualité du produit séché	32
I.3.3.4. Paramètres économiques : coût du séchoir et période d'amortissement	34
I.4. Mise en situation	34
I.4.1. Situation géographique et contexte socio-économique et météorologique	34
a. Le relief	35
b. Le climat	36
I.4.2. Elevage et production de la viande en Algérie	37

I.4.3. Production de la viande caméline en Algérie	37
I.4.5. La consommation de la viande dans la Wilaya d'Adrar	38
I.4.6. Tradition de séchage de la viande caméline à Adrar	39
I.5. Présentation de la viande	41
I.5.1. Définition de la viande	41
I.5.2. Composition chimique de la viande	41
I.5.3. Propriétés nutritionnelles de la viande	41
I.5.4. Valeur nutritionnelle de la viande cameline	42
Chapitre II. Dispositif expérimental	43
II.1. Conception et réalisation du séchoir	43
II.2. Eléments constitutifs du séchoir solaire	44
II.2. 1. Le capteur solaire	44
II.2. 2. La chambre de séchage indirect	45
II.2.3. La chambre de séchage direct	47
II.2.4. Le système de stockage d'énergie sensible par galets	48
a. La cavité	48
b. Le plenum	49
II.2.5. La ventilation	49
II.2.6. Propriétés thermique des matériaux de construction du séchoir	50
	51
Chapitre III. Etude de l'effet du stockage sur le rendement instantané du capteur solaire et sur la chambre de séchage direct	
III.1. Instrumentation	51
III.2. Procédure d'expérimentation	53
III.3. Données et analyse des performances	53
III.4. Résultats et discussion	53
III.4.1. Effet sur capteur	54
a. Le rendement instantané du capteur	54
b. Températures opératoires	60
III.4.2. Effet sur la chambre de séchage direct	62
a. Le rendement instantané de la chambre de séchage direct	64
b. Les températures opératoires	65
Chapitre IV. Le séchage direct et indirect de la viande caméline (en couche minces) en saison chaude et en saison froide	
IV.1. Procédure	68
IV.2. Données et analyse des performances	70
a. Teneur en eau	70
b. Teneur en eau réduite	70
IV.3. Formulation mathématique	71
IV.3.1. Modélisation mathématique de la cinétique de séchage	71
IV.3.2. Formulation mathématique du rendement de séchage	72
IV.4. Résultats	73
IV.4.1. Conditions météorologiques et température de fonctionnement	73
IV.4.2. Températures de fonctionnement	74
IV.4.3. Degréhygrométrie	78
IV.4.4. Cinétique de séchage	80
a. Construction de la courbe cinétique de séchage	80

b. La modélisation mathématique de la cinétique de séchage solaire	86
IV.4.5. Le rendement de séchage	89

Chapitre V. Isothermes de sorption

V.1. Généralités sur les phénomènes de sorption	94
V.1.1. Activité de l'eau	94
V.1.2. La teneur en eau	95
V.1.3. L'isotherme de sorption	95
V.1.3.1. Définition et construction des isothermes de sorption	95
V.1.3.2. Modélisation mathématique des isothermes de désorption	97
V.1.4. La chaleur isostérique de désorption	98
V.1.4.1. Calcul de la chaleur isostérique	99
V.1.4.2. Modélisation mathématique de la chaleur isostérique	99
V.2. Détermination expérimentale des isothermes de désorption	99
V.2.1. Matériel et méthode	99
V.2.1.1. L'équipement	99
V.2.1.2. La préparation des échantillons	100
V.2.1.2. La méthode	100
V.4. Résultats	101
V.4.1. Isothermes de désorption	101
V.4.1.1. Réalisation des isothermes	101
V.4.1.2. Modélisation des isothermes	102
V.4.2. La chaleur isostérique de désorption	104
V.4.2.1. Le calcul de la chaleur isostérique de désorption	104
V.4.2.2. La modélisation mathématique de la chaleur isostérique de désorption	105

Chapitre VI : Suivi de la qualité microbiologique et physico-chimique de la viande caméline de l'état frais et à l'état séché avec et sans salage préalable

VI.1. Matériel et méthodes	106
VI.1.1. Analyse microbiologique	106
VI.1.2. Analyse physico-chimique	108
VI.1.2.1. Détermination de la teneur en eau	108
VI.1.2.2. Détermination de la teneur en cendres	108
VI.1.2.3. Détermination de l'activité de l'eau	108
VI.1.2.4. Détermination de la teneur en protéine	109
VI.2. Résultat	109
VI.2.1. La qualité microbiologique	109
VI.2.2. La qualité physico-chimique	110
VII. Conclusion	112
Perspectives	114
Nomenclature	117
Publication	116
Bibliographie	117
Annexe	124

Introduction

Introduction

Abondantes, inépuisables et non polluantes, les énergies renouvelables sont évidemment une alternative de choix aux énergies fossiles. La conversion photovoltaïque est le modèle plus vulgarisé parmi les modes d'exploitation de l'énergie solaire. La conversion de l'énergie solaire en énergie thermique est la plus simple et la méthode la plus largement acceptée [1]. En effet, les procédés de la conversion thermique de grandes possibilités et sont facile à mettre en œuvre et accessibles pour la plupart sur un plan technologique ou économique. Citons parmi ces applications la cuisson, le chauffage et le séchage; ce dernier étant ancestralement pratiqué jusqu'à l'échelle familiale tel que le séchage des produits du potager domestique ou des viandes et des poissons puisque la réfrigération n'existait pas. Le séchage est le premier moyen de conservation des aliments utilisés par les hommes et continue à l'être dans certaine régions même si de nouvelles méthodes existent [2]. Le séchage solaire continue à être la méthode de conservation des produits agricoles dans la plupart des pays tropicaux et subtropicaux[3]. Les produits carnés en particulier tels que le Biltong en Afrique du Sud le Charquien Amérique du Sud et le Kilichien Afrique Centrale et de l'Ouest et le Keddid dans les pays du Maghreb.

Le séchage solaire serait une voie toute aussi privilégiée pour divers industries qui consomment un taux important de l'énergie mondiale et ce, dans divers domaines tels que la papeterie, le bois, la pharmaceutique et plus particulièrement en industrie alimentaire où le recours au séchage solaire présente une multitude d'avantages. Le séchage a pour but de réduire leur teneur en eau ce qui inhibe la décomposition du produit causée par la croissance et la reproduction de micro-organismes et minimise bon nombre de réactions de détérioration.

La méthode de séchage traditionnelle qui consiste à exposer les denrées alimentaires à l'air libre étalés sur les nattes ou les toits des maisons, présente de nombreux inconvénients.

Les produits sont ainsi à la merci des rongeurs, des oiseaux, des insectes, de la pluie, des tempêtes ...etc. et la lenteur du processus de séchage dans ce cas favorise le développement des micro-organismes qui altèrent la qualité nutritionnelle et les propriétés sensorielles finales du produit séché et déstabilisent sa conservation. Les pertes après récolte (pendant le séchage puis pendant le stockage sont considérables atteignant à titre d'exemple, jusqu'à 40 à 60 % pour le poisson au Sénégal et 10 à 50 % pour les céréales tropicales [4]. Différentes recherches ont été menées au cours des dernières décennies pour développer des séchoirs

solaires adaptés visant à pallier aux inconvénients suscités en assurant une meilleure maîtrise des aspects du séchage solaire.

La disposition des composants du système et le mode d'utilisation de la chaleur solaire classent les séchoirs solaires en modes direct, indirect et mixte. Les séchoirs solaires sont classés passifs en cas de circulation naturelle de l'air, forcés si ce dernier est contrôlé par l'utilisation d'un ventilateur faisant circuler l'air à travers le séchoir. L'un des principaux objectifs de la conception du séchoir consiste à transmettre à l'air une quantité maximale d'énergie thermique, favorisant l'élimination d'un maximum d'humidité jusqu'à atteindre le taux final souhaité. Beaucoup d'effort de recherche ont été consentis pour l'amélioration des performances des séchoirs solaires en développant la technologie de conception des composants de ces derniers, tels que les capteurs PVT, en utilisant différents modes de circulation de l'air, en faisant appel à des sources de chauffage et en exploitant les systèmes de stockage de chaleur.

Outre le fait que le stockage d'énergie joue un rôle important dans la conservation de l'énergie, il améliore également les performances et la fiabilité d'un large éventail de systèmes énergétiques. L'énergie thermique peut être stockée sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente (PCM) ou d'énergie chimique. Les matériaux d'accumulation de chaleur sensible sont moins chers et leur conductivité thermique est généralement supérieure à celle des matériaux à changement de phase (PCM). Dans ce contexte thermique, l'utilisation des galets est très répandue, ils sont non toxiques et ininflammable, peu coûteux et agissant à la fois comme surface de transfert de chaleur et moyen de stockage.

Dans le cas des produits à base de viande, le séchage solaire est pratiqué comme moyen de conservation dans des zones peu ou mal desservies en réseau électrique, mais pour leur apporter de nouvelles propriétés organoleptiques très appréciées par certains consommateurs. En Algérie, la consommation de viande séchée, appelée «El Keddar», est une grande tradition culinaire.

Dans les régions sahariennes du pays, un goût particulier est développé pour la viande de chameau et à ses dérivés ; elles seraient même plus prisées que d'autres espèces ; ce qui appuie [5] dans son affirmation que la viande de chameau, dans certaines régions du monde, est plus consommée que la viande de bœuf ou de mouton. D'autre part, les produits carnés sont très périssables, entre autres, à cause de leur charge microbienne importante; un séchage solaire satisfaisant doit préserver leur qualité sanitaire, physico-chimique et organoleptique et permettre leur stockage sur une période prolongée. La grande teneur en eau de la viande

caméline qui est autour de viande de 80%[6]en font un milieu particulièrement favorable à la prolifération de l'aérobie totale des germes mésophiles, son séchage solaire en devient encore plus délicat. Un prétraitement des produits à base de viande par salage avant séchage agit comme un antimicrobien et protège de la dégradation microbologique. La viande de chameau, qui constitue une bonne source de protéines en contient environ 20 à 23%, perd une partie de cette teneur par dégradation chimique à cause de ce salage[7].

L'étude de la relation entre la teneur en eau à l'équilibre et l'humidité relative à l'équilibre ERH par la construction des isothermes de sorption du produit permet de décrire le processus de séchage, son effet sur l'activité de l'eau et d'adopter les meilleures conditions à la conservation du produit durant la période de stockage. Cependant, à notre connaissance, il n'existe jusqu'à présent aucune recherche menée dans ce sens sur la viande de chameau.

L'activité de l'eau dans un produit équivaut à l'humidité relative de l'air en équilibre avec le produit. De nombreux chercheurs ont développé plusieurs équations communément utilisées pour décrire les isothermes de sorption en testant la représentativité de différents modèles pour chaque isotherme et en comparant la précision de ces modèles. Le groupe de projet européen COST 90 sur les propriétés physiques des aliments et l'American Society of Agricultural Engineers ont recommandé certaines de ces équations comme étant des équations standard pour les isothermes alimentaires[8]. D'autre part, la sorption est toujours accompagnée d'une absorption ou d'une libération de chaleur. Les isothermes obtenues à différentes températures sont couramment utilisés pour déterminer la chaleur de désorption isostérique par l'application de l'équation de Clausius-Clapeyron. Au niveau où la chaleur nette de sorption isostérique se rapproche de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, la teneur en humidité du matériau correspondante est généralement considérée comme une indication de la quantité «d'eau liée» existant dans le produit.

Dans ce travail, nous présentons d'abord la conception et la réalisation d'un séchoir direct et indirect. La circulation de l'air de séchage est forcée par la ventilation et son chauffage est renforcé par un lit de galets pour le stockage de la chaleur sensible. Le corps du séchoir est constitué d'une chambre de séchage direct superposée à une autre chambre de séchage indirect dont l'air en circulation passe par un capteur solaire. Cet assemblage vertical permet d'optimiser l'espace de séchage en fonction des quantités à sécher et d'exploiter les avantages de chaque mode de séchage (direct et indirect) en fonction des objectifs à atteindre en terme de qualité. Ensuite, nous exposons les résultats des tests menés sur l'effet de la chaleur de stockage sensible sur les performances des capteurs solaires. Des expériences de séchage ont

été menées à deux saisons différentes de l'année afin de comparer les performances du système et le comportement de la chair de chameau au séchage dans différentes conditions climatiques. Le comportement cinétique du séchage de la viande de chamelle est également suivi et modélisé mathématiquement. Les évolutions des rendements de séchage des chambres de séchage directes et indirectes ont été indiquées. Les isothermes de désorption de la viande cameline ont été construites aux températures de 40 ° C, 50°C et 60 ° C. Cela permet de caractériser les conditions de séchage et de stockage de la viande caméline dans le contexte saharien marqué par son climat chaud. On a déterminé l'effet de la température sur les isothermes de désorption du produit, analysé six équations communément utilisés pour la modélisation de ces isothermes, disponibles dans la littérature. Le choix du modèle mathématique le plus approprié se fait sur la base de critères de convergence statistique. On a procédé ensuite au calcul et à l'ajustement par un modèle mathématique de la chaleur de désorption isostérique nette de l'eau à partir des données expérimentales. Les résultats de l'analyse microbiologique et physico-chimique de la qualité de la viande de chameau séchée en mode direct et indirect et en plein soleil sont présentés et analysés.

Ce mémoire de thèse est organisé en cinq chapitres: le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui présente l'état de l'art sur le séchage solaire, les modes de transfert de l'eau dans la matière, et une mise en situation du contexte géographique, culturel et économique de l'étude. Le deuxième chapitre porte sur la description du dispositif expérimental et les démarches de sa réalisation ainsi que les matériaux utilisés pour sa construction. Le troisième chapitre décrit l'étude de l'effet du stockage sur le rendement instantané du capteur solaire et sur la chambre de séchage direct. Le quatrième chapitre concerne les rendements et les cinétiques du séchage direct et indirect de la viande caméline (en couche minces) en saison chaude et en saison froide. Le cinquième chapitre présente la méthode de construction des isothermes de sorption de la viande caméline et les résultats obtenus. Le sixième et dernier chapitre décrit le suivi de la qualité microbiologique et physico-chimique de la viande caméline de l'état frais et à l'état séché avec et sans salage préalable

Recherche
Bibliographique

Sur l'étendue de ce chapitre, une synthèse bibliographique est présentée sur la question du séchage, de ses modes et des innovations apportées à ses techniques par les travaux de recherches. Une mise en situation géographique et culturelle par rapport au contexte saharien permet d'illustrer les habitudes de consommation et de séchage de la viande caméline dans la région d'Adrar.

I.1. PROBLEMATIQUE DU SECHAGE

I.1.1. Définition du séchage

Le séchage, est une opération qui vise à extraire l'eau d'un produit et de réduire par conséquence sa teneur en eau. Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant ayant comme objectif de retirer une phase liquide d'une phase solide, par utilisation de l'énergie thermique. Le liquide qui est généralement de l'eau est libéré par le processus de vaporisation. 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[9].

I.1.2. Différents modes de séchage

Selon [10], le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur représente le critère de classification de l'opération de séchage qui peut se faire de plusieurs façons .

Ainsi, on distingue:

- dans le séchage par conduction, l'apport de chaleur se fait par des surfaces chauffées en contact avec le produit à sécher, le supportant ou le confinant. Il est très utilisé pour les produits très fins (papeterie, textiles) et les solides très humides.
- le séchage convectif, où la chaleur est fournie par un flux d'air ou de gaz chauffé dirigé sur le produit, il s'en suit un échange de chaleur et de matière entre le produit et son milieu environnant. Il représente plus de 85% des séchoirs industriels[10] et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.
- le séchage par infrarouge opère sur le produit par irradiation assurant un transfert de chaleur efficace qui réduit le temps et le cout énergétique du processus.

Il permet un chauffage rapide des produits en couches minces ; le pouvoir de pénétration des IR dans le produit est surfacique, la chaleur absorbée diffusant ensuite dans le produit

par conduction. Cette limite de pénétration peut être consolidée par l'association d'autres modes de séchage tels que les micro-ondes ou les modes de séchage convectifs ou par conduction. Il est très appliqué dans l'industrie des vernis, des peintures et des pellicules photographiques[9].

- Le séchage par micro-ondes agit sur la propriété diélectrique de l'eau contenue dans le matériau. Les micro-ondes pénètrent le produit à sécher et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Ce mode de séchage est utilisé dans le domaine des industries d'encre, de peinture, des adhésifs et au séchage sous vide des produits pharmaceutiques.
- la lyophilisation où le séchage se fait sur des produits préalablement congelés (à basse température, en dessous du point triple de l'eau) par sublimation donc faisant passer l'eau contenue directement de l'état solide à l'état vapeur). Des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur se chargent d'évacuer la vapeur d'eau des chambres de séchage. Ce procédé de séchage est plus utilisé dans les domaines biotechnologiques, pharmaceutiques et sur les aliments lorsque la conservation de leur saveur est une priorité recherchée.
- Le séchage solaire qui se base sur l'énergie fournie le rayonnement solaire pour réchauffer le produit à sécher. Le rendement thermique du système de séchage solaire peut être consolidé par l'utilisation de capteurs solaires ou par le recours à des concentrateurs du rayonnement solaire. L'industrie de l'agro-alimentaire est un domaine où le séchage solaire connaît un grand essor.

I.2. GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉCANISMES DE SÉCHAGE

Deux mécanismes physiques fondamentaux gèrent un processus de séchage d'un produit au cours duquel sa teneur en eau est amenée à une valeur minimale : le transfert de chaleur et le transfert de masse. Le transfert de chaleur permet le changement de phase de l'eau contenue dans le produit; le transfert de masse véhicule l'humidité en phase liquide et/ou vapeur de l'intérieur du produit vers l'écoulement d'air chargé de l'évacuer [11]. Ce transfert est possible lorsqu'il s'établit une différence entre la pression partielle de l'eau contenue dans le matériau et l'environnement.

I.2.1. Migration de l'eau à l'intérieur d'un produit

La structure et la composition chimique définissent le mécanisme de transfert de chaleur et de masse dans un matériau. Les produits à sécher sont des milieux poreux, les vides plus ou

moins interconnectés qui constituent une partie de leurs volumes servent de réservoir pour la phase fluide contenue.

Lors d'une opération de séchage, on observe les étapes suivantes [12] : Les forces capillaires sont à l'origine de l'écoulement de l'eau : l'eau contenue dans les pores est remplacée par des poches d'air qui apparaissent graduellement.

b. Ensuite, l'eau liquide se retire à la périphérie des pores et migre soit par glissement le long des parois capillaires, soit par évaporation et condensation successives.

c. Enfin, l'eau liquide s'évapore entièrement à l'exception du liquide absorbé. L'humidité diffuse alors sous forme de vapeur d'eau.

I.2.2. Théories descriptives du phénomène de séchage[13]

Les travaux qui se sont succédé proposent des théories et des modèles pour expliquer et modéliser le phénomène de transfert de masse et de chaleur lors du séchage. Nous faisons, dans ce qui suit, état des plus marquantes conceptualisations de ces résultats.

I.2.2.1. Théorie de la diffusion du liquide

C'est Lewis qui en construit les bases en 1923 lorsqu'il décrit le séchage comme le couplage d'un phénomène d'évaporation à la surface du produit et d'une diffusion de l'humidité de l'intérieur du solide vers sa surface.

En 1929, Sherwood suppose que le mouvement de l'humidité à l'intérieur du solide est gouverné par la loi de Fick, puis une évaporation s'opère à la surface grâce à un apport énergétique extérieur le tout suivant deux phases successives, la première à allure constante, la seconde à vitesse décroissante.

En 1960, Bird décrit le principe de la diffusion comme étant un mouvement du composant à concentration supérieure vers celui à concentration moindre lorsqu'ils sont présents dans le même fluide.

Cette théorie applicable pour le séchage des aliments et des grains, est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques en les réduisant à un simple gradient de concentrations occultant l'effet d'autres paramètres tels que la température ou le coefficient de diffusion.

I.2.2.2. Théorie capillaire

Elle est analysée et pour la première fois en 1937 par Buckingham, qui introduit le concept de la « capillarité potentielle ». La capillarité est le phénomène d'interaction qui se produit aux

interfaces entre deux liquides non miscibles, entre un liquide et l'air ou entre un liquide et une surface. Elle est due aux forces de tension superficielle entre les différentes phases en présence. Il est admis dans le domaine de la recherche sur les aliments que la capillarité est l'un des mécanismes fondamentaux du séchage. [14] imputent aux forces capillaires l'explication exclusive de l'écoulement de l'eau dans le cas du séchage d'un solide granulaire et qu'il est totalement indépendante de la concentration.

I.2.2.3. Théories de Krischer - Berger - Pei.

Krischer de sa part, en décrivant en détail les trois phases du séchage a démontré que durant le processus de séchage, le transfert de l'humidité à l'état liquide est dû aux forces capillaires et en a déduit que la première phase du séchage est contrôlée par la capillarité. A l'état de vapeur, selon lui, le transfert obéit au gradient de pression de la vapeur.

Berger et Pei consolident la théorie de Krischer par l'affirmation que le transfert du liquide est dû simultanément aux forces capillaires et au gradient de concentration. Ce modèle est appliqué à des matières biologiques et à des variétés d'aliments.

I.2.3. Les différentes phases du séchage

La vitesse de séchage en fonction du temps appelée cinétique de séchage ainsi que la teneur en eau du produit en fonction du temps permettent de faire une excellente description du processus de séchage. A travers la construction de ces deux courbes, on peut faire ressortir l'évolution du processus de séchage d'un produit. C'est notamment grâce aux travaux de [15], [16] et de [17] qu'il a été mis en évidence que ce processus se divise sur trois phases tel qu'il est décrit ci-dessous. La figure I-1 illustre ces trois phases du processus de séchage.

a. Phase 0 ou phase de mise en température du produit

Lors de cette phase transitoire (figure I-1), l'échange de chaleur et de matière se fait à la surface entre produit et flux d'air asséchant dont l'apport de chaleur sensible sert, d'une part, à élever la température du produit (mise en température) et d'autre part à évaporer l'eau qu'il contient. Cette phase n'est observable que pour les produits de grande taille où lorsque le gradient de température entre le produit et l'air asséchant est important.

L'échange de chaleur lors de cette phase obéit à l'équation (I.1.)

$$Q = S_{ech} \cdot h_c \cdot (T_a - T_{sp}) \quad (I.1.)$$

Avec

- Q : Energie apportée par l'air chaud (J)
- h_c : Coefficient d'échange convectif entre l'air et le produit ($W.m^{-2} K^{-1}$)
- S_{ech} : Surface d'échange air-produit (m^2)
- T_a : Température de l'air asséchant (K)
- T_{sp} : Température à la surface du produit (K)

b. Phase I ou phase de séchage à allure constante

On reconnaît cette phase à une décroissance linéaire de la teneur en eau (figure I-1) durant laquelle la surface du produit est saturée en eau grâce à la vitesse de diffusion de l'eau dans les pores du produit. L'activité de l'eau du produit en surface est toujours égale à un. Toute l'énergie apportée par l'air est transmise au produit uniquement sous forme de chaleur latente égale à la chaleur nécessaire pour l'évaporation de l'eau. La température à la surface du produit est constante et la vitesse de séchage est maximale. La vitesse de séchage dépend uniquement des conditions externes telles que l'humidité, vitesse et température de l'air asséchant[18].

La phase I est souvent caractérisée par l'égalité suivante :

$$Q_m L_v = S_{ech} h_c (T_a - T_h) \quad (I.2)$$

Avec

- Q_m : Quantité d'eau enlevée par l'air ($kg.s^{-1}$)
- L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$)
- T_h : Température humide (K)

c. Phase II ou phase de séchage à allure décroissante

Pendant cette période de séchage, la migration de l'eau à la surface devient difficile et trop lente pour saturer la pellicule de gaz entourant celui-ci. À partir d'une certaine teneur en eau du produit appelé teneur en eau critique X_{cri} (figure I-1.(c)). L'activité de l'eau à la surface du produit va commencer à diminuer et par conséquent la vitesse de séchage[12].Le flux de chaleur n'est plus consommé totalement pour la vaporisation de l'eau, c'est-à-dire que la chaleur apportée par l'air n'est plus compensée totalement par le transfert d'eau. Il s'en suit que la température du produit augmente vers la température de l'air.

Lors de cette phase, un nombre de phénomènes interviennent dans le processus de séchage, notamment l'épaisseur du produit, la diffusivité de l'eau dans le produit, la résistance mécanique des parois cellulaires intacts et le phénomène de croustage [19]. A la fin de cette phase le produit est en équilibre avec l'air et la vitesse de séchage est nulle.

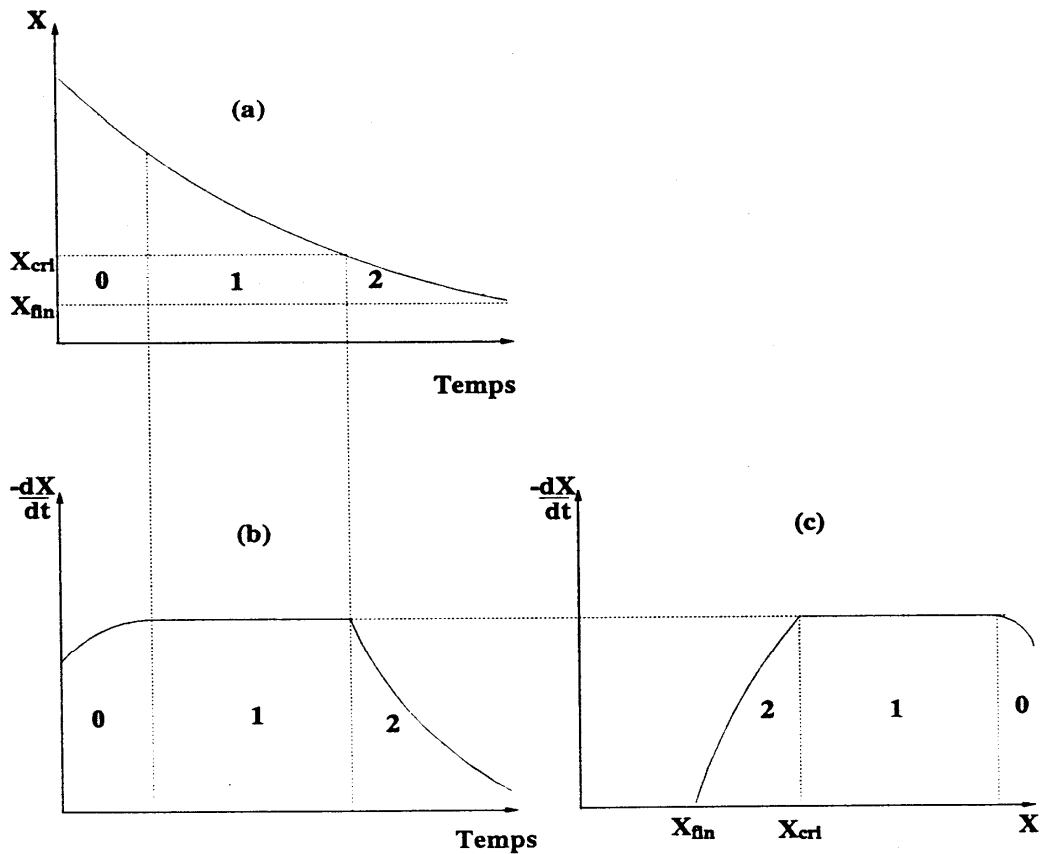


Figure I. 1. Les différentes phases du séchage

I.3. Le séchage solaire

Tous les modes de séchage (sus cités au paragraphe I.1.2.), 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 voie de développement. Le séchage solaire, par la simplicité de son principe, la gratuité du rayonnement solaire qui est constituée sa ressource énergétique principale est le mode le plus adapté pour ces pays, d'autant plus que la plupart d'entre eux, possèdent un potentiel énergétique solaire assez important[20].

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 agroalimentaires 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 développé 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.

I.3.1. Présentation des différents types de séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont classés en fonction du mode de circulation de l'air, comme passifs dans le cas de la circulation naturelle de l'air ou séchoirs actifs dans le cas de la circulation forcée par l'utilisation de ventilateurs. Dans chacune de ces catégories, les séchoirs solaires sont identifiés en fonction de la façon dont l'énergie de l'irradiation solaire atteint la chambre de séchage.

Ils sont également classés en fonction de la construction de la section de séchage. La figure (I.2.) indique la classification des séchoirs solaires et leurs modes de fonctionnement.

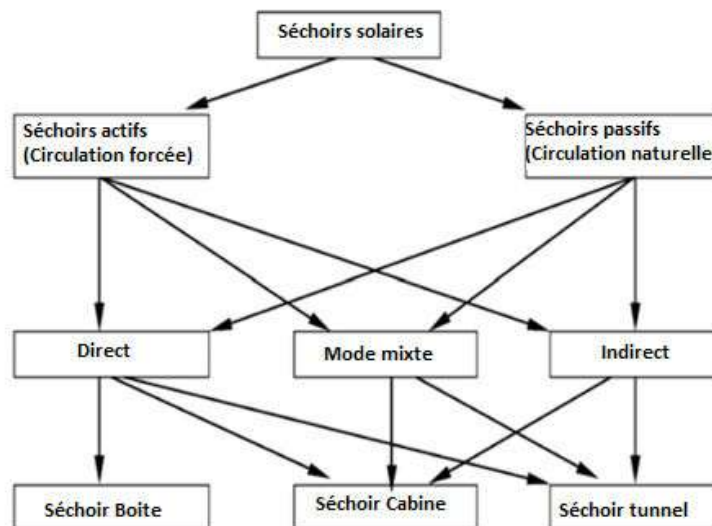


Fig I.2.La classification des séchoirs solaires

I.3.1.1. Séchoir solaire direct

Il s'agit d'un type de séchoir simple dans lequel le produit à sécher est placé dans une enceinte à couvercle transparent. La chaleur est générée par l'absorption du rayonnement solaire sur le produit lui-même et sur la surface interne de la chambre de séchage. Lorsque le rayonnement solaire atteint la couverture vitrée, l'air asséchant se réchauffe et circule soit naturellement ou par une pression du vent à l'aide d'une source externe (ventilateur, souffleur, etc.) ou une combinaison des deux. Une partie du rayonnement solaire reçu sera absorbée par le produit dont la température augmente, sa teneur en eau se réduira par évaporation. Le modèle étudié par Sharma illustre ce type de séchoirs (Fig.I.3).

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 .

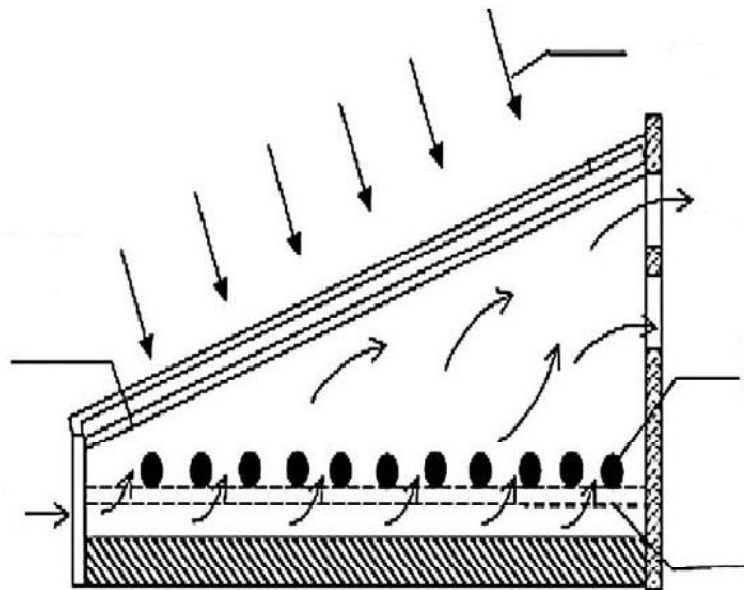


Fig. 1.3. Séchoir solaire direct passif[21].

Ce sont des appareils simples et rustiques. Cependant, cette technique apporte des solutions aux inconvénients du séchage direct à ciel ouvert pratiqué dans les zones rurales et ce en terme de qualité sanitaire du produit en le préservant des phénomènes naturels (vents, poussières et insectes) et en terme de temps de séchage. La mise en œuvre du séchage solaire en mode direct par convection naturelle reste limitée car il n'y a pas ou peu de contrôle du taux de

séchage, celui-ci n'est pas uniforme, la capacité de séchage est faible et le rendement reste médiocre [4].

a. Séchoir solaire direct type armoire

[106] (fig.I.4) a étudié un séchoir direct type armoire, d'armoire modifiée avec système de circulation naturelle. Muni d'une couverture transparente en plastique, les parois de la chambre ont été coupées dans du contreplaqué teint en noir pour un volume total de 3.84 m³. 12 trous laissent passer l'air conduit par un tuyau placé en bas de la chambre.

[22] (Fig.I.5) a réalisé un séchoir direct et expérimenté pour le séchage de racines de Manioc, de banane et de tranches de mangue. Le modèle dont le design est assez simple et le cout minimisé peut être réalisé par les fermiers à partir de matériaux locaux.

[23] a réalisé un séchoir solaire direct en forme d'escalier métallique dont la base et les côtés sont recouverts de tôles métalliques galvanisées à double paroi avec cavité remplie de matière non dégradable pour l'isolation thermique (Fig.I.6). Une feuille de polycarbonate incassable est utilisée à la place du verre, elle recouvre la surface supérieure pour laisser le soleil et le piéger ensuite à l'intérieur de l'enceinte de séchage. Une cheminée de 0,1 ml de longueur et 0,1 mm de diamètre est située à l'extrémité supérieure de la sécheuse pour faciliter l'écoulement de l'air. Les dimensions du séchoir permettent une charge de 20 kg de fruits et légumes étalée sur trois étages.

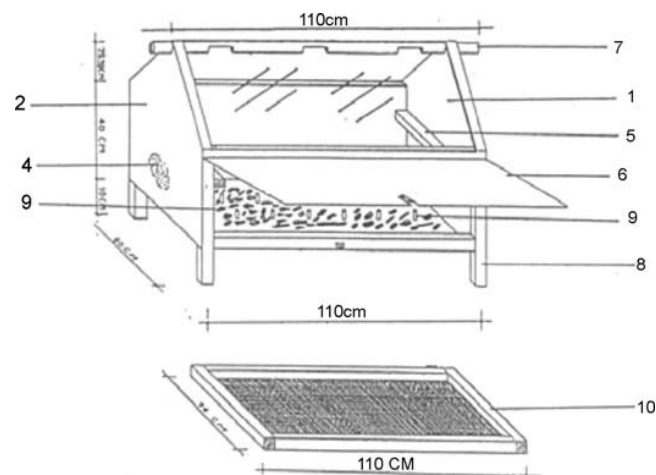


Fig.1.4.Séchoir solaire direct type cabine : détail de la cabine [106]

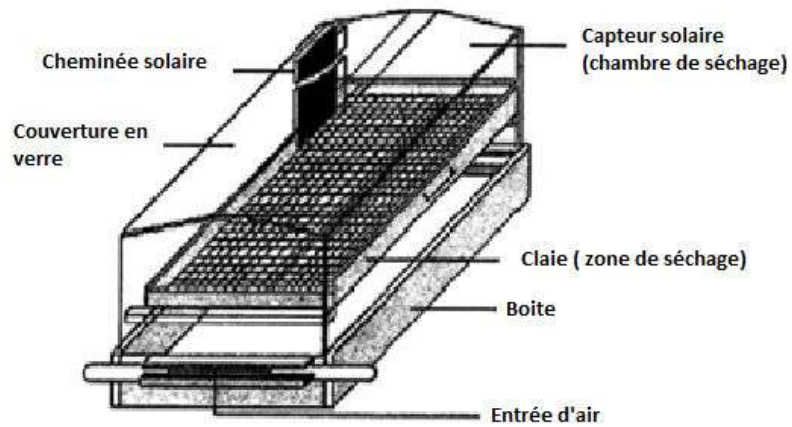


Fig.I.5. Séchoir solaire direct à cabine[107]

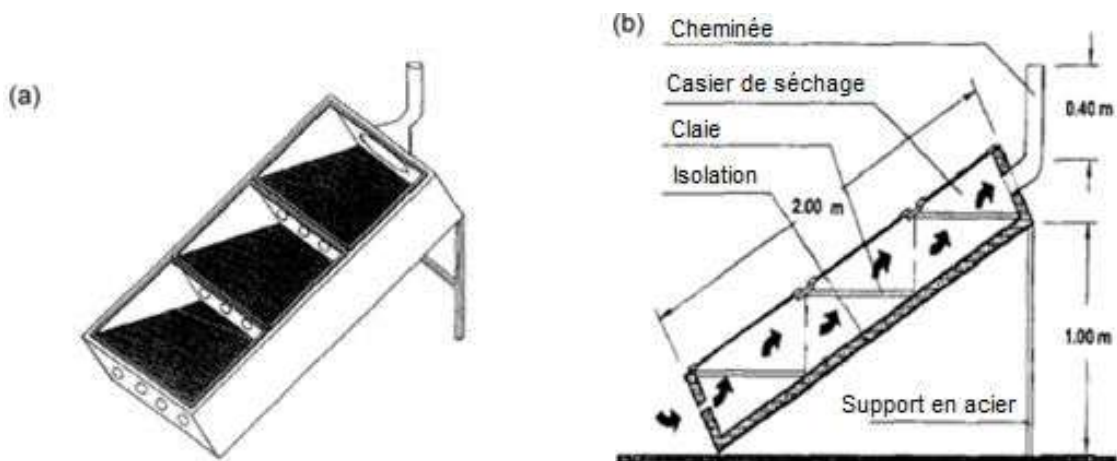


Fig. I.6: Séchoir solaire direct de type escalier: (a) vue générale (b) vue en coupe.[23] .

b. Séchoirs solaires type Serre

Le principe de base d'un séchoir solaire direct type serre se base sur le principe de l'effet de serre qui permet le passage des petites longueurs d'ondes du rayonnement solaire à travers une surface transparente d'une enceinte et y piège les grandes longueurs d'onde.

[24] ont développé un séchoir solaire serre actif avec un mur nord opaque et l'ont testé sous deux conditions, la première avec une plaque en PVC couvrant le sol en béton, la seconde avec un sol en béton non couvert. La vue schématique du séchoir est indiquée à la figure I.7. Les essais se sont faits sous convections forcée par un ventilateur alimenté par des modules

solaires. Les températures les plus élevées et la meilleure réduction de teneur en eau du produit ont été obtenues dans le cas du béton couvert.

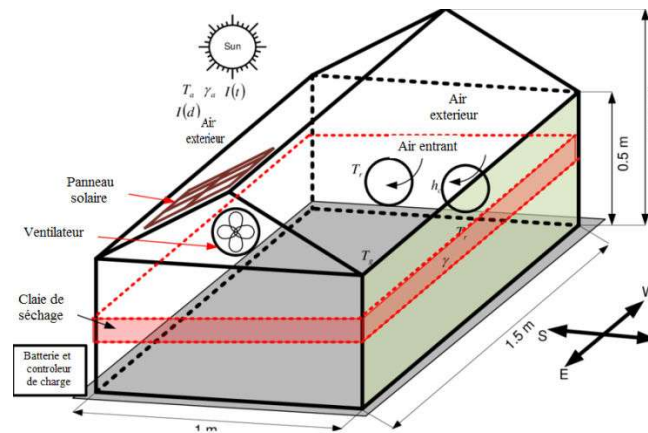


Fig.I.7. Séchoir serre avec mur nord opaque. [24]

N.S. Rathore a construit un séchoir solaire serre tunnel à circulation (walk-in) avec un mur de protection thermique au nord tel illustré sur la figure. I .8. L'objectif étant d'évaluer les performances du système destiné à sécher le raisin. L'étude montre que les raisins non traités chimiquement ont pris sept jours pour sécher et atteindre une teneur de 16% (base humide). Le gradient de température à l'intérieur du tunnel de séchage était d'environ 10 à 28 °C par temps clair, ce qui suffit amplement à faire sécher les produits agricoles. Le séchage en tunnel présente une énorme capacité de séchage.

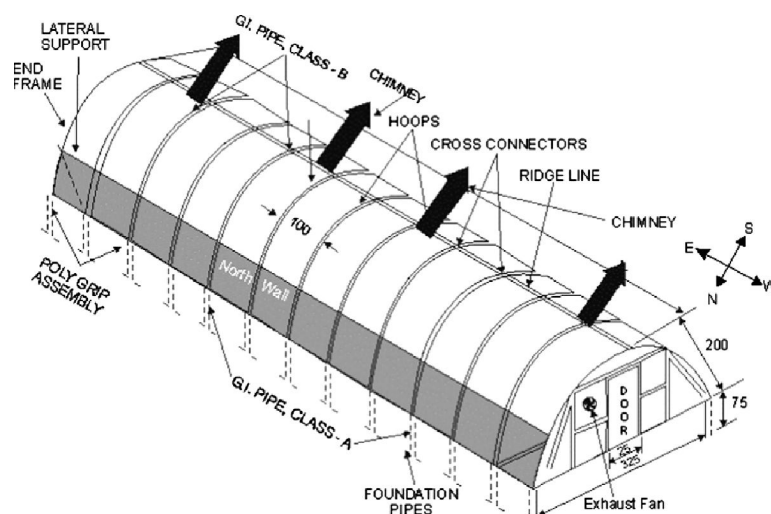


Fig.I. 8. Schéma d'un séchoir solaire type tunnel en convection naturelle[25].

I.3.1.2. Séchoir solaire indirect

Les séchoirs solaires actifs indirects ont un capteur solaire séparé et une unité de séchage (Fig.1.9). Ils sont généralement constitués de quatre composants: un capteur solaire, une unité de séchage, un ventilateur et des conduits pour la circulation de l'air [26].

Dans ce type de séchage, les produits ne sont pas directement exposés au soleil ; le rayonnement solaire est utilisé pour chauffer l'air asséchant, le produit à sécher est mis sur le parcours de cet air. Ainsi, la teneur en eau du produit diminue par convection et diffusion. Il apporte une solution aux inconvénients du séchage solaire direct qui réduit la valeur nutritive du produit séché en altérant certains de ses composants. L'air s'échauffe en passant par un capteur solaire constitué d'une surface vitrée située au dessus et d'une surface absorbante, généralement, puis conduit de façon naturelle ou forcée dans la chambre de séchage pour sécher le produit. Dans le cas de la convection forcée, le séchoir est muni d'un système de mise en circulation de l'air (séchoir actif). Le capteur solaire est orienté plein sud et son angle d'inclinaison est fixé en considération de la latitude du lieu, dans le but de maximiser la captation du rayonnement solaire.

Dans ces séchoirs, les produits sont exposés sur des grilles, des plateaux perforés ou des dalles de béton de telle sorte que la circulation de l'air par convection naturelle ne soit pas entravée. Cette forme de séchage convient pour des petites quantités (10-20 kg), pour des produits granulaires, par exemple, destinés à l'usage de fermiers [27].

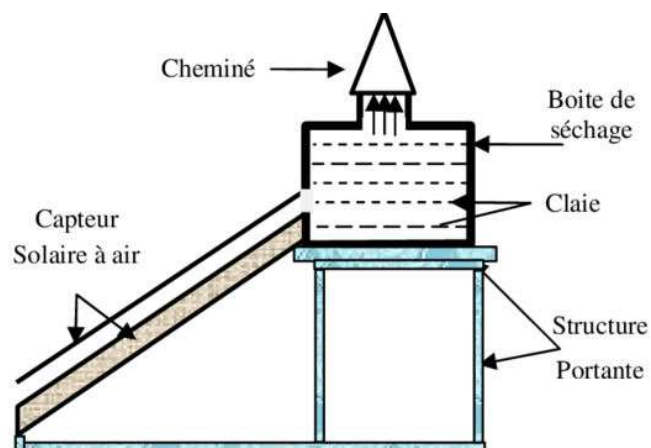


Figure I. 9. Schéma descriptif d'un séchoir solaire indirect

Certains travaux de recherche se sont concentré sur les matériaux de constructions des séchoirs pour en améliorer l'efficacité. [28]ont développé un modèle mathématique pour un séchage en couche minces de la fraise, utilisant un séchoir solaire direct en convection (Fig.

I.10). Le séchoir était composé d'une chambre de séchage et d'un capteur solaire avec une feuille d'aluminium noire ondulée, l'ondulation sert à absorber le maximum possible du rayonnement solaire. La dissipation de la chaleur par convection a été minimisée en plaçant une vitre plate transparente de 4 mm d'épaisseur couvrant le dessus de la feuille ondulée. L'air ambiant est aspiré par un ventilateur (convection forcée) et chauffé dans le capteur solaire.

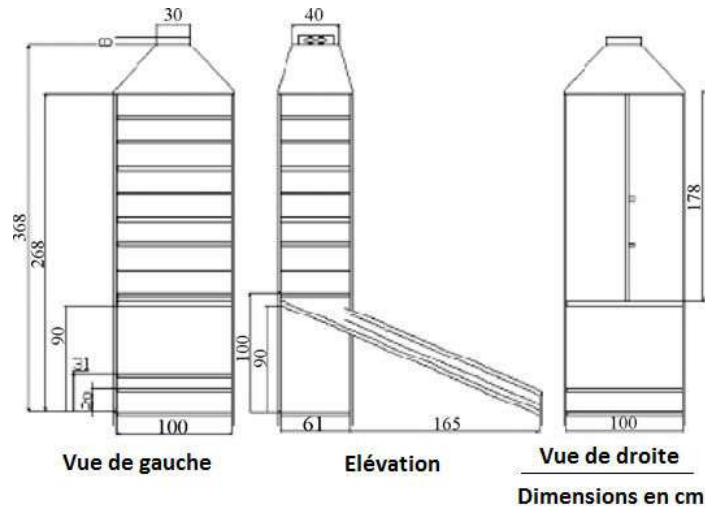


Fig.I.10. Séchoir solaire indirect à convection forcée. [28].

Pour accroître le préchauffage de l'air, certains auteurs ont choisi de développer des capteurs de structures différentes de celle du capteur plan classique. [29] ont développé et analysé un capteur solaire « renversé » : un réflecteur cylindrique capte le rayonnement solaire et le renvoie en direction de l'absorbeur (Fig.I.11). L'ensemble de l'unité est appelée un séchoir d'armoire à absorbeur inverse (RACD). Cet absorbeur chauffe l'air avant que celui-ci ne traverse les claies du séchoir.

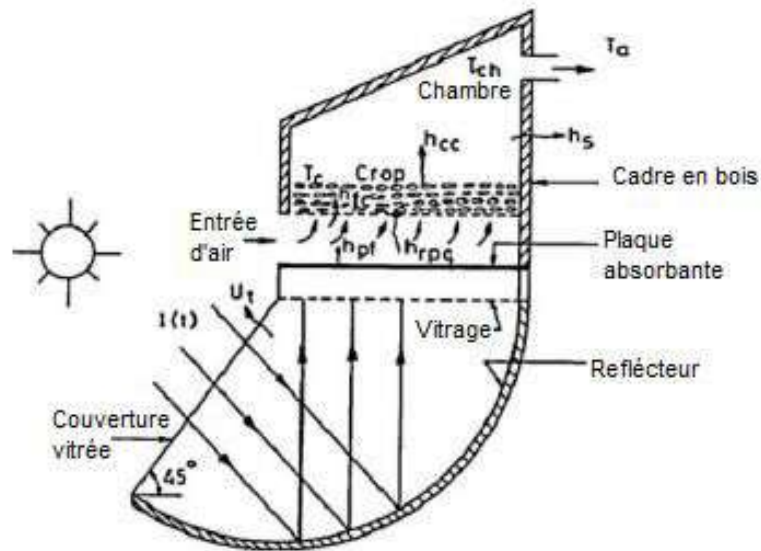


Fig I.11. Séchoir d'armoire à absorbeur inverse[30]

I.3.1.3. Séchoir solaire en mode mixte (direct et indirect)

Les séchoirs solaires mixtes associent les principes des séchoirs directs et indirects. 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 ce faire, les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont couvertes par parois transparentes (verre ou film plastique).

[31] ont développé un séchoir solaire mixte fonctionnant en mode forcé avec des matériaux peu coûteux (Fig.I.12.).En plus d'un capteur solaire associé à la chambre de séchage, le verre Plexiglas a été utilisé comme surface de vitrage pour couvrir le dessus et les côtés.

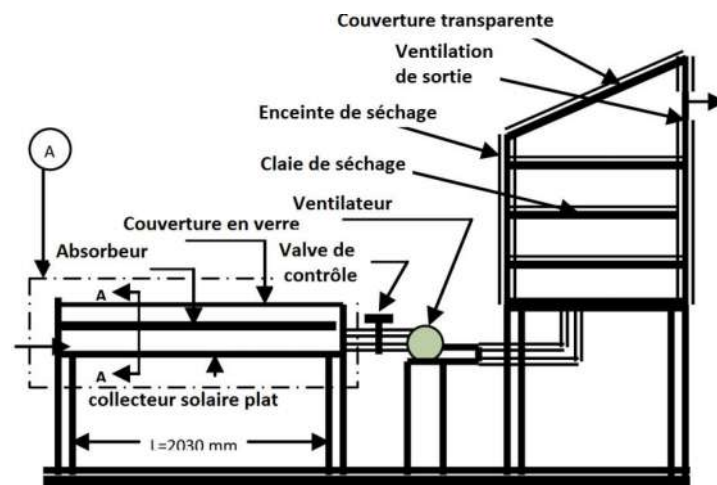


Fig . I.12. Séchoir solaire mixte en convection forcée [31].

La vitesse de séchage du séchoir pour les raisins a été de 0,24 kg /jour alors que celui du plein air est de 0,1 g / jour. Le séchoir solaire apporte un gain considérable en temps de séchage comparativement au séchage à ciel ouvert (séchage en plein air). L'humidité à retirer du raisin est de 0,7 kg. Le rendement de séchage du séchoir est de 31,0%par jour.

[32]ont construit d'un séchoir solaire mixte de type serre en convection forcée utilisé pour sécher le poivron rouge et le raisin 'Sultana'. Sa performance a fait l'objet d'une analyse expérimentale. Le séchoir se compose d'un capteur solaire plan et d'une serre en forme de chapelle (Fig.I.13.). Le système a réduit pratiquement le temps de séchage du poivron rouge et du raisin respectivement de 7 et 17 h par rapport à un séchage à air libre.



Fig.I.13.Séchoir solaire de type serre en mode mixte. [32]

I.3.1.4. Séchoir solaire hybride

Dans un séchoir solaire hybride, l'énergie solaire peut être utilisée en mode simple ou combiné ou avec une source d'énergie conventionnelle ou supplémentaire telle que l'électricité (Fig.I.14), la biomasse... etc. Il combine à la fois les actions du chauffage direct de l'air par rayonnement solaire au préchauffage de l'air à l'aide d'une source d'énergie auxiliaire.

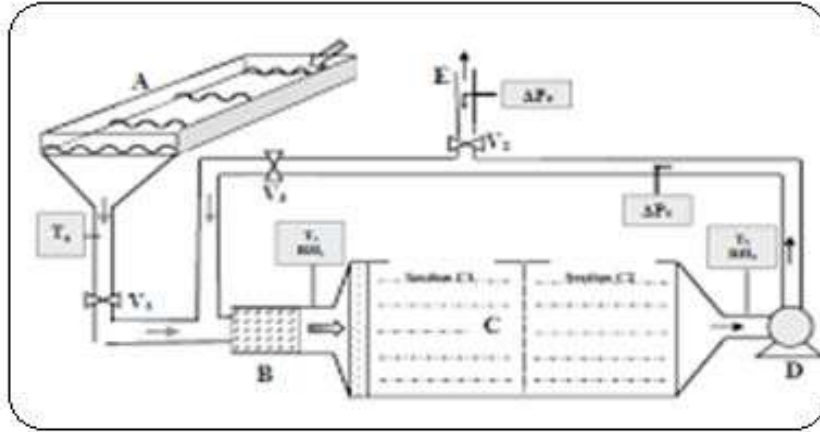


Fig. I.14. Séchoir solaire Hybride avec chauffeur électrique. A. capteur solaire, B. Chauffeur électrique, C. enceinte de séchage, D. Ventilateur, E. sortie d'air.

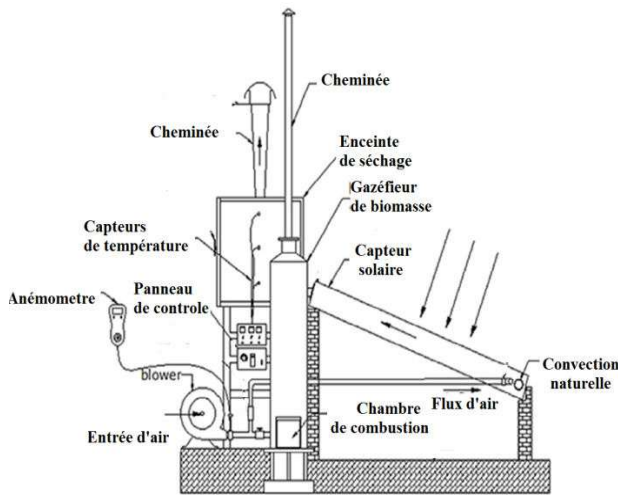


Fig.I.15. Vue schématique et photo d'un séchoir solaire hybride avec four à biomasse[33].

S. Dhanushkodi et son équipe de recherche ont expérimenté le comportement et le rendement d'un séchoir hybride à biomasse solaire sur la noix de cajou (Fig.I.15). Le séchoir est composé d'un capteur solaire, d'une chambre de séchage, d'un four à biomasse pour un chauffage d'appoint et d'un ventilateur avec une unité de contrôle de la vitesse variable. Les résultats obtenus sur 40 kg de noix de cajou montrent que les températures de séchages atteintes varient entre 50 et 70 °C selon que l'on soit en mode convection forcé ou naturel. Dans le premier cas, la teneur en eau de 3% recherchée est atteinte en 7 heures avec un rendement de séchage égal à 5.08 % , dans le second cas, il a fallu 9 heures pour la même teneur en eau recherchée avec un rendement de séchage égal à 3.17 %.

[34] ont conçu une unité de séchage solaire à convection forcée dans laquelle une résistance électrique est combinée à un accumulateur de chaleur qui apporte un appoint de chauffage à l'air asséchant durant les heures de non ensoleillement (**Fig .I.16**). L'air sortant de la chambre de séchage est recyclé à travers le capteur solaire par le biais de conduites afin d'augmenter le rendement global de séchage.

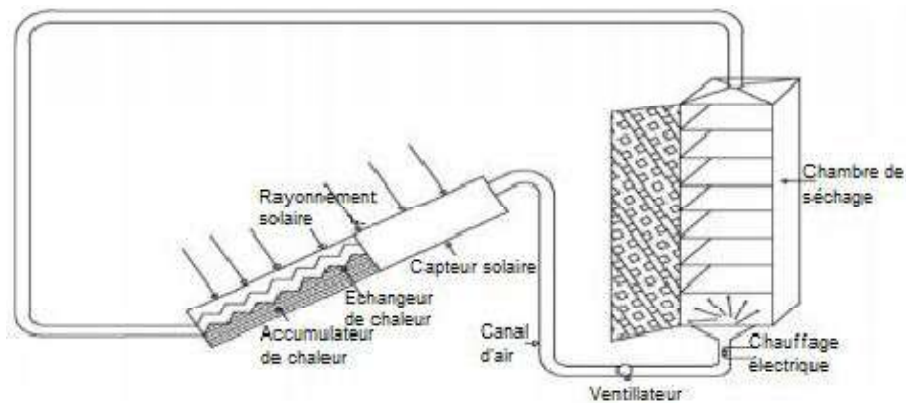


Fig. I. 16. Unité de séchage solaire avec appoint de chaleur électrique [34].

I.3.1.5. Séchage solaire avec un capteur hybride photovoltaïque/thermique

Le capteur solaire PV / T est un système hybride qui utilise la technologie solaire photovoltaïque et le chauffage solaire. Lorsqu'un système photovoltaïque est irradié à l'énergie solaire, la température de la cellule augmente. L'élévation de la différence entre la température ambiante et la température de la cellule pénalise le rendement électrique du module PV. On peut améliorer le rendement électrique, en régulant la température des panneaux. En effet, l'excès de chaleur est évacué en passant un fluide de refroidissement qui extrait la chaleur (air ou eau) sous le module ; cela permet de créer un équilibre optimisant de la sorte l'efficacité PV et le rendement thermique. Cette méthode intégrée, où l'énergie électrique et thermique sont générées simultanément est le principe de base des capteurs PV/T.

Un capteur solaire hybride PV/T est composé d'un module PV pour la conversion électrique intégré dans un capteur solaire plan à air ou à eau qui utilise la chaleur récupérée sur le module PV. Les modules PV standards sont constitués d'un assemblage de cellules photovoltaïques en matériau semi-conducteurs ayant comme inconvénient la dégradation des performances avec la température.

Au cours des années 1980, beaucoup de travaux de recherche sur la combinaison photovoltaïque/thermique ont été lancés. Diverses conceptions éventuelles du capteur PV/T

ont été étudiées afin de démontrer leur meilleure performance. Les facteurs qui ont influencé l'efficacité d'un capteur PV/T à air ont été considérés, tels que le facteur d'emballage de cellule photovoltaïque, l'irradiation solaire, le rayonnement infrarouge et la capacité de fluide à absorber la chaleur de la cellule photovoltaïque. Une combinaison prenant en compte le capteur PV/T à plaque plane (Fig.I.17) a été étudiée en utilisant une simulation numérique [35]. La conduite d'air illustrée sur la figure représente le canal d'écoulement du fluide caloporteur.

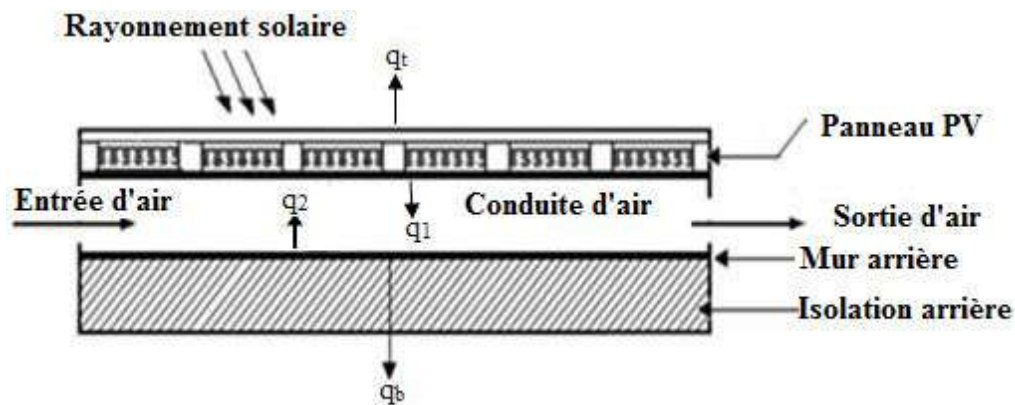


Figure. I.17. Coupe transversale du capteur PV/T à air [35].

[36] a réalisé et expérimenté un séchoir solaire hybride PV/T dans le milieu saharien (Fig.I.18). L'étude expérimentale de la cinétique de séchage de la tomate en plein air et dans l'enceinte du séchoir solaire indirect a permis de mettre en évidence la performance du séchoir solaire indirect muni de capteur hybride PV/T. Les données expérimentales de la cinétique de séchage relevées de ce prototype ont été ajustées par la suite avec plusieurs modèles de lissage relevés de la littérature existante. Les performances de ce système ont été démontrées par la réduction de la durée de séchage et la ventilation forcée assurée par le module PV a permis de conserver la qualité du produit séché (produit non brûlé avec une bonne couleur).

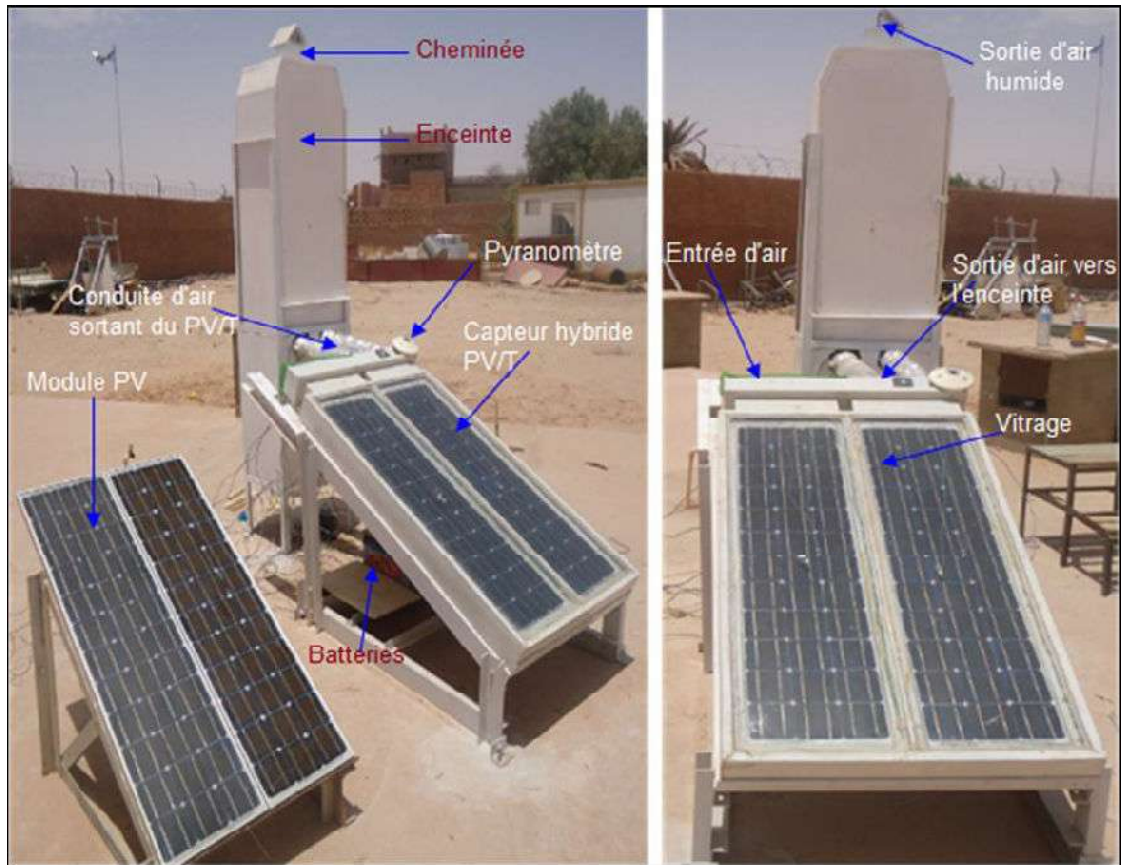


Figure. I.18: Banc d'essai du séchoir solaire PV/T. [36]

I.3.1.6. Séchage solaire avec stockage thermique

La chaleur fournie par un capteur solaire à l'air caloporteur est tributaire du rayonnement solaire et de sa variation en cours de la journée. Après le coucher du soleil, le système devient non fonctionnel. Pourtant, de nombreux produits agricoles (fruits, aliments et légumes) nécessitent plusieurs jours de séchage continu à une température stable et modérée pour atteindre la teneur en eau désirée. Dans ce cas de figure, le recours à un stockage thermique dans une unité de stockage associé au capteur solaire est une alternative qui permet de fournir la chaleur requise durant les moments de passage de nuages ou en fin de journée. Le stockage thermique ajuste les inadéquations temporelles entre la charge et la source d'énergie intermittente ou variable, améliorant ainsi l'opérabilité et l'utilité du système. Le rayonnement solaire ne peut pas être stocké tel quel, donc tout d'abord une conversion d'énergie et, en fonction de cette conversion, un périphérique de stockage sont nécessaires. L'énergie solaire peut être stockée sous forme thermique, électrique, chimique, et par des moyens mécaniques.

a. Stockage thermique à chaleur sensible

Dans le stockage de la chaleur sensible (SHS), l'énergie thermique est stockée par l'augmentation de la température d'un solide ou d'un liquide, en utilisant la capacité calorifique et le changement de température du matériau au cours du processus de sa charge et de sa décharge thermique.

[37] ont développé un séchoir solaire indirect à convection forcée avec un lit de stockage de chaleur sensible (Gravier) incorporé au capteur solaire, pour le séchage du chili (figure I.19). Ils ont conclu que le séchoir intégré avec un accumulateur de chaleur du matériau lui permet de maintenir une température de l'air constante à l'intérieur de la sécheuse. L'inclusion du matériel de stockage de chaleur a augmenté le temps de fonctionnalité du système de séchage d'environ 4 heures par jour. Ils ont estimé l'efficacité thermique de l'énergie solaire du séchoir à environ 21% et le taux d'extraction spécifique de l'humidité d'environ 0,87 kg / kWh.

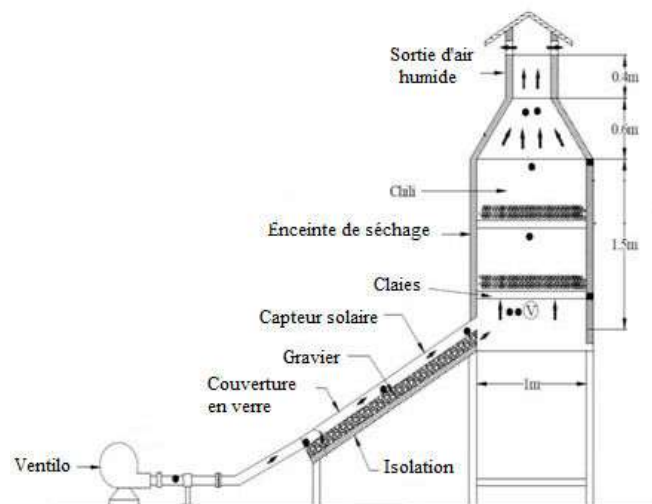


Fig I.19.Séchoir solaire indirect à convection forcée avec stockage d'énergie sensible par lit de gravier [38].

[39] ont étudié la performance d'un séchoir solaire indirect à convection forcée avec un desséchant intégré au capteur solaire (Fig.I.20 (a, b)) pour le séchage de petits pois verts et de tranches d'ananas, le séchoir fonctionne avec et sans miroir réfléchissant en deux modes: un pendant les heures ensoleillées et un autre durant les heures d'absence d'ensoleillement. L'unité de dessiccation a été conçue pour contenir 75 kg de déshydratant solide à base de CaCl_2 composé en 60% de bentonite, 10% de chlorure de calcium, 20% de vermiculite et 10% de ciment. Durant les périodes non-ensoleillées, le séchoir fonctionne en faisant circuler l'air asséchant à l'intérieur de la chambre de séchage à travers le lit de dessiccation à l'aide d'un

ventilateur réversible. L'introduction d'un miroir réfléchissant sur le lit desséchant augmente le potentiel de séchage de 20%. En outre, l'efficacité de prélèvement, le taux de séchage et le rendement de séchage moyen du séchoir étaient relativement plus élevés, par rapport au séchage solaire et au séchage par desséchant intégré.

Un séchage uniforme dans toutes les claies a été obtenu avec une bonne qualité en termes de couleur et de maintien microbiologique, par rapport au séchage solaire. Le goût de l'ananas séché est satisfaisant. Le matériau desséchant est stable même après une opération continue de plus d'une année. Le séchoir peut être utilisé pour sécher divers produits agricoles. Il peut réduire le temps de séchage et améliorer la qualité du produit séché.

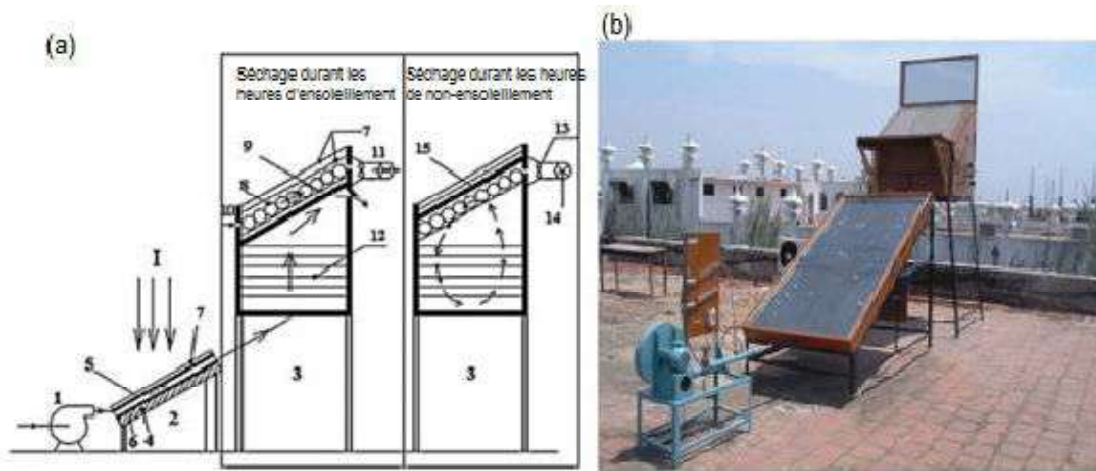


Fig.I.20:Séchoir solaire à desséchant intégré (a) Schématisation : [1. Ventilateur, 2. Capteur solaire, 3. Chambre de séchage, 4. Isolation, 5. Plaque absorbante, 6. Plaque inférieure, 7. Couverture transparente, 8. Lit desséchant, 9. Contreplaqué, 10. Entrée d'air, 11. Conduit pour la sortie d'air, 12. Claies de séchage, 13. Ventilateur réversible, 14. Soupape, 15. Contreplaqué]. (b) Image de la configuration expérimentale [38]

En utilisant une méthode d'analyse basée sur la conception du produit, [13] ont travaillé sur des modèles existants de séchoirs en bois. Ils ont apportés des améliorations à leurs éléments constitutifs après les avoir soumis à l'étude, en mettant l'accent sur l'évolution des tendances dans les systèmes technologiques et à la suite de cette analyse, certaines adaptations futures ont été suggérées par Luna et al. La figure (I.21) représente la configuration du séchoir solaire où le stockage de l'énergie sensible se fait dans un ballon de stockage de l'eau.

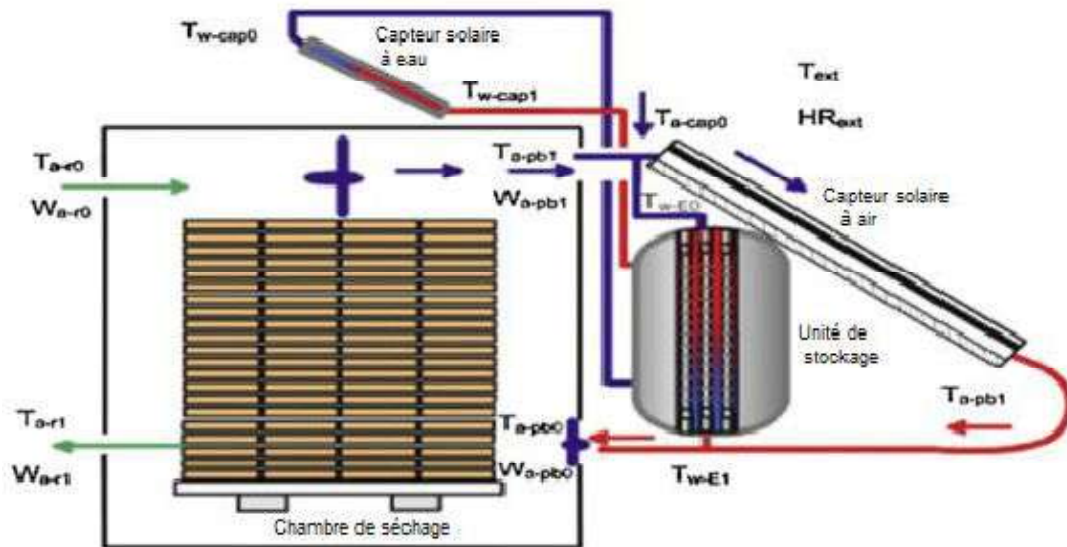


Fig. I.21. Séchoir solaire avec stockage d'énergie[40]

b. Stockage à chaleur latente (matériau PCM)

Le stockage de chaleur latente (LHS) est l'absorption ou le dégagement de chaleur lorsqu'un matériau de stockage subit un changement de phase de solide à liquide ou de liquide à gaz ou bien vice versa, à une température plus ou moins constante. L'effet du stockage de la chaleur latente offre deux avantages principaux: (i) il permet de stocker de grandes quantités de chaleur avec seulement de petits changements de température et donc d'avoir une densité de stockage élevée. (ii) Parce que le changement de phase à température constante prend un certain temps, il devient possible d'atténuer les variations de température lors de l'opération de séchage[41].

[42]a utilisé un PCM comme élément de stockage thermique dans la construction d'un séchoir solaire indirect. Le capteur ondulé à double passe utilisé est composé de trois panneaux d'une superficie globale de 6 m² (Fig. I.22). L'air s'écoule entre la plaque absorbante en aluminium ondulé en V et la surface inférieure séparés l'un de l'autre par une distance de 15 cm. Un verre trempé a été placé bien au-dessus de l'absorbeur.

Le réservoir de stockage d'énergie thermique est constitué d'une tôle galvanisée en fer isolée avec de la laine de verre recouverte d'un revêtement en aluminium pour protéger l'isolation. Des capsules sphériques, en polyéthylène haute densité, remplies d'un PCM (HS 58) sont placées à l'intérieur du réservoir de stockage.

Les auteurs ont conclu que le rendement du capteur augmente lorsque le débit massique de l'air augmente. Cette augmentation peut être liée à la réduction des pertes thermiques associées à la diminution de la température moyenne du capteur. Le choix du PCM avec une température de changement de phase appropriée est important. C'est un facteur clé pour éviter la dégradation des produits alimentaires. Le choix du réservoir de stockage, de la taille des balles de PCM et du débit massique de 200 kg/h ont permis d'obtenir un taux d'échange de chaleur presque uniforme avec une consommation d'énergie supplémentaire minimale[42].

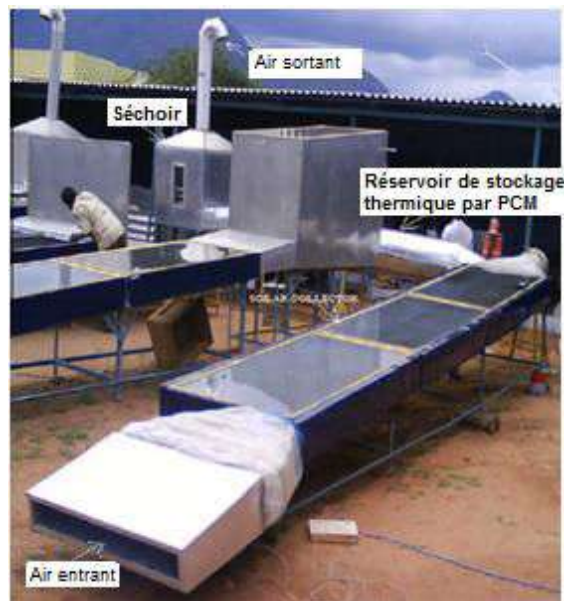


Fig.I.22:Séchoir solaire avec un stockage thermique sous PCM[42].

I.3.2. Etude comparative des différents types de séchoirs solaires

Plusieurs 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 [43]. On déduit de ces travaux que les séchoirs solaires à convection naturelle sont faciles à fabriquer, à bon prix et autonomes en termes de consommation d'énergie, mais ont un faible rendement comparés aux séchoirs solaires forcés[44]. Le séchoir indirect à convection forcée, bien que plus coûteux et plus complexe à construire offre un contrôle adéquat du taux de séchage grâce au contrôle du débit d'air; il garantit une meilleure qualité du produit pour les longues durées de séchage car ils ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire, de plus, il réduit le temps de séchage; cependant, ce type de séchoirs consomme plus d'énergie entraînant au final un coût supplémentaire[45].Le séchage indirect appliqué au séchage du raisin avec la combinaison de système de stockage offre une bonne

qualité finale du grain et diminue considérablement le temps de séchage. Le matériau de stockage de chaleur sensible utilisé dans le réchauffeur d'air solaire est du sable. Les températures de l'air de séchage à l'entrée de la chambre de séchage sont dans la plage de $45,5^{\circ}$ – $55,5^{\circ}$ C. Le temps nécessaire pour sécher 10 kg de raisins traités chimiquement placés dans trois plateaux différents à la teneur en eau requise est de 26, 28 et 30 h [46].

Diverses techniques sont introduites sur la conception du séchoir solaire indirect, notamment sur les capteurs solaires ; des unités de stockage de chaleur sont intégrées, des matériaux desséchants, des cellules PV ou un chauffage d'appoint. Certains mettent en œuvre un système de recirculation de l'air asséchant. La combinaison optimisée de ces techniques permettra d'augmenter et maintenir l'efficacité du séchoir solaire et de la maintenir son fonctionnement en dehors des heures claires de la journée. Il faudra cependant travailler à minimiser le coût global du séchoir final.

[43] a mené une étude de comparaison et d'optimisation entre un séchoir solaire à convection naturelle en mode mixte et un séchoir indirect. Il en déduit les coûts de constructions selon les dimensions du séchoir imposées par un coût de séchage minimal.

L'optimisation appliquée au séchage du maïs adonné, pour une même largeur du capteur solaire, une longueur de capteur de 1,8 m courte pour le séchoir solaire à mode mixte et de 3,34 m pour le séchoir à mode indirect pour capacité en grains (90 kg). Le coût de séchage, le coût annuel et le coût initial du séchoir à mode mixte sont inférieurs à ceux du mode indirect, bien que la quantité de grain sec obtenue à partir du mode mixte pour toute l'année soit inférieure à celle du mode indirect; les coûts de séchage sont respectivement de 12,76 et 16,05 US \$ / tonne pour les séchoirs en mode mixte et en mode indirect.

I.3.3. Paramètres généraux du séchage

Des procédures de tests standards pour l'évaluation des performances thermiques ont été adoptées et proposées, sur la base de différents travaux de recherche entrepris par le Bureau National des Standards, (NBS, USA), La Société Américaine de Chauffage, Ingénieurs de la Réfrigération et du Conditionnement d'Air (ASHRAE) et Bundesverband pour l'Energie Solaire, ou encore L'Association Fédérale pour l'Energie Solaire, (BSE, Germany) test procédures. Il est parfois compliqué et coûteux de suivre à la lettre ces standards à cause des réalités du terrain expérimental en terme de moyens. La performance thermique du séchoir est un des éléments décisifs dans la construction d'un séchoir solaire. Selon Nonhebel (1971) l'évaluation des performances du séchoir solaire prend en compte différents paramètres. Le

choix du séchoir représente un compromis entre le coût financier du séchoir, la qualité du produit, les considérations de sécurité et la facilité d'installation.

Dans l'évaluation des séchoirs solaires, les paramètres généralement mesurés et rapportés pourraient être classés comme suit [47].

- ✓ **Caractéristiques physiques du séchoir :**
- ✓ **Performance thermique :**
- ✓ **Qualité du produit séché :**
- ✓ **Paramètres économiques**

I.3.3.1. Caractéristiques physiques d'un séchoir

Les caractéristiques physiques sont des paramètres majeurs dans l'évaluation d'un séchoir solaire. Ils se rapportent au type, au poids, aux dimensions et aux matériaux de construction. Il arrive que le ciment et le mortier soient utilisés comme matériaux de construction bien que le bois et les métaux soient les plus courants[48]. Des absorbeurs constitués de panneaux d'aluminium ou en acier galvanisé ou en acier sont utilisés dans la construction des capteurs solaires et peints en noir non réfléchissant (finition mat). On utilise également des tôles ondulées(par exemple, des tôles de toiture). Les plaques absorbantes recouvertes de matière sélective pour le rayonnement sont utilisées lorsque la température demandée dépasse les 40 °C [49].

Les claies destinées à supporter le produit à sécher sont faites dans l'acier inoxydable, galvanisé ou le treillis en nylon. La taille physique d'un séchoir indique directement la capacité de séchage du séchoir, elle fait référence au poids du produit frais en kilogramme chargé en un seul lot. Le débit d'un séchoir est la vitesse à laquelle le produit humide passe de sa teneur en eau initiale à la teneur en eau finale recherchée à la fin du processus de séchage, généralement exprimée en kg de produit frais par jour[26].

Les produits frais sont disposés en une seule couche sur la claie de séchage, cela pour un maximum d'efficacité. La surface de la claie à laquelle se réfère indirectement la capacité de séchage doit être optimisée. Dans le cas des séchoirs de type armoire, qui ont plus d'un plateau, le nombre de couches sera un paramètre supplémentaire qui doit être indiqué. Le nombre de plateaux dépendra des conditions de séchage de l'air, du débit et de la nature du produit à sécher. La surface du capteur et de la taille de la chambre de séchage sont des

facteurs déterminants pour la capacité du séchoir. La densité de chargement dépend de la nature de produit, de sa teneur en eau initiale et du débit d'air, et peut être évaluée en se basant sur les règles suivantes [50]:

- charge moyenne du séchoir: 4 kg de produits frais par mètre carré de surface de plateau,
- taille du capteur solaire: $0,75 \times$ la surface totale du plateau,
- débit d'air: 0,75 m³/min par mètre carré de surface du plateau.

I.3.3.2. Performance thermique

a. Temps de séchage - taux de séchage

Le temps de séchage, donné en heures ou en jours, est le paramètre le plus déterminant dans l'évaluation d'un séchoir. Il s'étend du moment de la charge du séchoir en produit frais jusqu'à atteindre la teneur minimale requise en eau. La période du temps où le rayonnement solaire n'est pas disponible est habituellement incluse dans le temps de séchage solaire. La représentation graphique de la teneur en eau en fonction du temps de séchage indique le taux de séchage du produit. Dans les grands séchoirs, il est important de vérifier l'uniformité du séchage en analysant les taux de séchage des échantillons des produits placés à différents endroits sur les différentes claies. Les temps de séchage peuvent être considérablement réduits en réduisant les dimensions du produit à sécher (par exemple, mettre une banane en tranche) afin d'augmenter la surface d'échange convectif produit-air. Certains prétraitements influent sur le temps de séchage tels que l'ajout d'une petite quantité de sulfite en poudre sur un légume découpé en tranche qui permet d'augmenter la température de séchage, réduisant ainsi le temps de séchage [51]. Le prétraitement chimique des produits favorise la perméabilité à l'eau de la peau du produit à sécher ce qui augmente sensiblement le taux de séchage [52].

b. Température de l'air asséchant et humidité relative

Lorsque la température de l'air asséchant augmente, le taux de séchage augmente aussi de deux manières. D'une part, cela augmente la capacité de l'air à se charger en humidité, d'autre part, l'air chaud augmente la température du produit et du coup, sa pression de vapeur. Cela entraîne l'humidité à la surface du produit plus rapidement [50]. Cependant, l'utilisation de séchoirs à haute température est généralement limitée par la sensibilité thermique de la plupart des fruits et légumes. Si la température est trop élevée au début du processus de séchage, une

coquille dure (couche sèche) peut se développer à la surface de produit (connu sous le nom de durcissement de cas) et qui piège par la suite l'humidité à l'intérieur de produit [53].

Les températures trop élevées à la fin de la période de séchage peuvent provoquer une brûlure des aliments. Une température élevée de l'air de séchage pourrait également entraîner une perte de chaleur plus élevée du capteur et de l'armoire de séchage par conduction et par rayonnement, ce qui entraînerait une réduction globale du rendement du système.

L'importance de l'humidité relative de l'air de séchage est tout aussi cruciale pour le processus de séchage. On peut contrôler la capacité de l'air à contenir l'humidité en le déshumidifiant ou en le chauffant avant son entrée dans la chambre de séchage. L'échauffement de l'air augmente ainsi sa capacité d'évaporation de l'eau contenue dans le produit. Si l'air de sortie de la chambre de séchage a toujours un potentiel de séchage considérable, on peut mélanger une fraction de cet air (chaud et humide) avec de l'air frais et le faire recirculer dans le séchoir ; cela aidera à récupérer une partie de l'énergie thermique de l'air de sortie. Le rendement thermique du système va être optimisé[54].

c. Débit d'air

Au fur et à mesure que le débit d'air augmente, les échanges thermiques par convection entre l'air et la plaque noire du capteur diminuent. Le rendement de séchage peut être sanctionné par des débits d'air élevés car l'air n'a pas un temps de contact suffisant avec le produit pour se charger de l'humidité évaporé du produit augmenter sa teneur en humidité. Le débit d'air optimal pour les séchoirs solaires a été rapporté à environ 0,75 m³/min par mètre carré de surface de plateau [50]. Il résulte d'un écoulement d'air insuffisant une évacuation lente de l'humidité contenue dans le produit, et une augmentation des températures. Cependant, la résistance interne liée au mouvement de l'humidité dans les produits agricoles est beaucoup plus grande que la résistance de transfert de masse sur la surface du produit lorsque le débit d'air atteint un certain niveau au-delà duquel il n'a pas d'effet significatif sur le taux de séchage [55].

Un débit plus élevé peut être utilisé au début du séchage et un débit plus faible lorsque le séchage rentre dans la «période de chute».

d. Rendement du séchoir

Le rendement du système de séchage est représenté par le rendement du séchoir, le rendement du capteur solaire, le taux d'extraction de l'humidité spécifique et le rendement du

prélèvement. Le rendement d'un capteur est une mesure directe de la performance du capteur dans un séchoir solaire. Il est défini comme suit:

$$\mu_c = \frac{Q_u}{Q_G} \quad (I.3)$$

Où Q_u et Q_G sont respectivement la puissance thermique utile produite par le capteur sur la puissance du rayonnement solaire incident. Les séchoirs agricoles utilisant des capteurs à plaque plane et un débit d'air en convection naturelle ont généralement un rendement thermique quotidien allant de 40 à 60% [50].

Le rendement du système de séchage indique la performance thermique globale de ce système, y compris le rendement du capteur et le rendement du séchoir (ou de la chambre de séchage). Le rendement d'un système de séchoir solaire est une mesure qui indique comment l'énergie d'entrée (rayonnement solaire) du système est effectivement utilisée lors du séchage d'un produit donné[56].

Pour les séchoirs solaires à convection forcée, le rendement de séchage est calculé par l'équation I.2.

$$\mu_S = \frac{Q_{ev}}{Q_G + p_v} \quad (I.4)$$

Où Q_{ev} est la puissance d'évaporation et p_v la puissance de ventilation. Si la convection est naturelle, p_v s'annule.

I.3.3.3. Qualité du produit séché

Les propriétés physiques d'un produit concernent la taille, la forme, la couleur et la texture. Le séchage affecte généralement ces propriétés sus citées. Lors du séchage, peuvent apparaître des modifications biochimiques et enzymatiques du contenu cellulaire. Ces modifications sont principalement de type oxydation et hydrolyse [12].

Certaines de ces modifications ne sont pas toujours indésirables, elles peuvent être recherchées, tel qu'un changement de gout particulier, une acidité accrue, d'autres peuvent dévaloriser le produit séché tel qu'une couleur finale ternie, un goût acerbe intolérable, une plasticité ou une texture désagréable, une forme finale inesthétique....etc.

La température de l'air de séchage, la conception du séchoir, le débit d'air et d'autres paramètres influent directement sur ces paramètres. L'évaluation de la qualité du produit séché comprend généralement l'évaluation des paramètres sensoriels et nutritionnels et la capacité de réhydratation[55].

•Paramètres sensoriels : La qualité sensorielle est évaluée par la réception des différents sens de perception des facteurs qui fixent le choix de la consommation de la nourriture.

L'apparence liée à la couleur, la taille, la forme, l'uniformité et l'absence de défauts, est importante dans l'évaluation visuelle de la qualité des produits. Le sens du goût est limité à doux, aigre, salé et amer. La saveur implique les sens du goût, de l'odorat et de la sensation relative à la texture, la plasticité, la consistance.

- Attributs nutritionnels : Ceux-ci comprennent des paramètres chimiques tels que la teneur en cendres et en sucre, l'acide ascorbique ou la vitamine C, la teneur en bêta-carotène et la teneur en acidité [57]. Ces attributs sont à mesurer avant et après le séchage. Une teneur plus élevée en cendres indique une contamination par la poussière; une teneur de sucre total (réduction et non-réduction) inférieure indique une faible qualité en raison de températures élevées de séchage; une vitamine C inférieure indique la perte de nutriments due à des températures élevées de séchage et à des périodes de séchage plus longues; une acidité plus élevée indique une détérioration de la qualité due à la fermentation.
- Capacité de réhydratation : Certains fruits et légumes secs sont consommés après réhydratation. Lorsque de l'eau est réincorporée, le produit retrouve sa saveur, son arôme, sa texture et son apparence originale. Toutefois, la perte d'eau n'est pas parfaitement réversible, le produit n'atteindra jamais son niveau original de teneur en eau. Sa capacité à retrouver son humidité perdue est appelée capacité de réhydratation [58]. Plus il se rapproche de ses niveaux originaux d'humidité, plus il aura sa texture et son apparence. Les endommagements tissulaires dans le produit pendant le processus de séchage sont connus pour affecter la capacité de réhydratation du produit séché. L'endommagement des tissus peut se produire pendant les prétraitements, la manipulation ou le séchage subséquent, en raison des changements dans la structure et la composition du tissu du produit[59].

I.3.3.4. Paramètres économiques : coût du séchoir et période d'amortissement

L'incidence financière est le pivot de concurrence entre les séchoirs solaires. Une analyse financière s'intéresse au coût du séchoir (coût fixe), le coût du séchage (charges d'exploitation) et la période d'amortissement. Les séchoirs solaires sont souvent intensifs en capital (nécessitent un investissement financier initial important). Ils ne peuvent être viables que si le coût annuel de l'investissement supplémentaire (sur le séchoir solaire) peut être compensé par des économies sur le coût du carburant ou sur le coût de l'équipement [108]. L'utilisateur ou le constructeur de séchoir, cherche une bonne optimisation du coût, d'efficacité énergétique, de qualité et de prix du produit final [109].

I.4. Mise en situation

Pour bien situer l'impact de notre travail, nous allons, dans ce qui suit, passer en revue les données relatives au contexte socio-économique, géographique et météorologique de la région où les expérimentations ont été mises en œuvre.

I.4.1. Situation géographique et contexte socio-économique et météorologique

Située à 1500 km d'Alger, à l'extrême sud du pays (Fig.I.23), Adrar est une commune et chef lieu de la wilaya du même nom, située au Sud-ouest du pays. La wilaya d'Adrar s'étend sur une superficie considérable de 427 968 km². Avec une population estimée à 432.193 habitants avec une densité de 0,89 habitant /km².



Figure I. 23. Situation géographique de la Wilaya d'Adrar sur la carte de l'Algérie

a. Le relief

La wilaya d'Adrar est composée de 04 grandes régions géographiques historiques (Andi, 2013)

- ✓ le Gourara: la région de Timimoun
- ✓ le Touat: la région d'Adrar,
- ✓ le Tidikelt: la région d'Aoulef,
- ✓ le Tanezrouft : la région de Bordj Badji Mokhtar.

Toutes ces régions sont administrativement divisées en 11 Daïras regroupant 28 communes et 294 ksar. Le Touat, le Gourara et le Tidikelt couvrent un cinquième du Sahara algérien et près d'un sixième du territoire national, soit 436 272 km². Cette zone du Sud-ouest du Sahara algérien s'étale jusqu'aux confins de l'Erg Oriental à l'est, couvre en grande partie l'Erg Occidental au nord et s'ouvre sur un immense reg au sud, le Tanezrouft [111].

Adrar est une Wilaya à vocation agricole, au regard des disponibilités hydriques que recèle son sous sol, elle est caractérisée par son système d'irrigation traditionnelle «FOUGGARA»(Fig.I.24),.Ce système est millénaire, et il continue à être le principal moyen d'approvisionnement en eau pour la culture des Ksours dans la région. Des systèmes

d'irrigation plus modernes sont exploités pour alimenter en eau l'exploitation extensive que connaît la Wilaya (les pivots d'agriculture).



(a)



(b)

Fig.I.24. Agriculture à Adrar. (a) Culture extensive par les pivots, (b) Système des Fouggaras

b. Le climat [112]

Deux climats prédominent à Adrar: Présaharien de Timimoune jusqu'à l'ouest de Béchar. Saharien, de Timimoune vers Timiaouine au sud. Les températures diurnes enregistrent des écarts importants. Elles passent selon les saisons de 45° C à (l'ombre) durant l'été, à 0°C en hiver. La stratégie de développement de la wilaya est basée sur le secteur agricole. On relève aussi le gradient important de la température entre le jour et la nuit, où la chute de température nocturne s'explique par deux principaux facteurs : la capacité calorifique du sable et les nuages. , Il faut parler aussi des écarts pendant le jour et la nuit, particulièrement en hiver.

En effet, le sable est composé de silicates qui conservent particulièrement mal la chaleur accumulée dans la journée. Sitôt le soleil disparu, la dissipation thermique s'opère très vite, la chute de température est alors très sensible surtout en hivers. En d'autres termes, plus le désert est sableux, plus il perd rapidement l'énergie accumulée dans la journée. Par ailleurs, les nuits au Sahara sont claires au cours de toute l'année et l'absence de vapeur d'eau dans l'air (climat saharien sec) inhibe considérablement la formation de nuages. Sans cette barrière naturelle, tout le rayonnement infrarouge émis par le sol est donc directement envoyé vers l'espace.

I.4.2.Elevage et production de la viande en Algérie [113]

La production algérienne de viande rouge a atteint 544 000 tonnes en 2017, pour une valeur de 596 Mds DZD (4,3 Mds EUR), selon une déclaration du ministère algérien de l'Agriculture. La production de viande ovine s'est élevée à 325 000 tonnes, la production de viande caprine a atteint 42 000 tonnes, tandis que celle de viande bovine était de 125 000 tonnes. Au cours de la même année, la production algérienne de viande de chameau a atteint 10.000 tonnes et celle de viande de cheval 14,1 tonnes.

L'Algérie annonce un nombre total de 28,4 M de moutons, elle compte par ailleurs 1,9 M de bovins et 5 millions de chèvres. La consommation moyenne de viande rouge par habitant est de 14,4 kg par an.

I.4.3.Production de la viande caméline en Algérie

Selon des données relatives à l'an 2018, le camelin est présent sur le territoire national sur trois grandes aires de distribution[114] :

- ✓ dans le Sud-est avec 62 432 têtes, soit plus de 44 % de l'effectif total,
- ✓ dans l'Extrême-Sud avec 46 050 têtes, représentant 33,13 % de l'effectif national,
- ✓ dans le Sud-ouest qui compte 30 390 têtes, représentant 21,87 % de l'effectif total.

La direction des services agricoles de la wilaya d'Arar nous a fourni des statistiques plus récentes et spécifiques aux différentes Daïras de la localité. Il s'agit, tel indiqué au tableau I.1, du cheptel et produit d'élevage du camelin pour les années 2017/2018.

Tableau I.1. Effectif cheptel et produit d'élevage du camelin à travers les Daïras de la région d'Adrar pour l'an2017/2018.

Nom de la Daira	Effectif camelin (tête)
Adrar	695
Fenoughil	0
Zaouiet Kounta	49
Reggane	447
Aoulef	1462
Tsabit	115
Timimoun	1344
Tinerkouk	3820
Aougrout	1175
Charouine	5.669
BordjBadjiMokhtar	41.826
Total	56.602

Le nombre de têtes représentant le cheptel du camelin d'élevage dans la région d'Adrar pour l'année 2017/2018 diffère d'une Daïra à une autre relativement au nombre d'habitants. Le nombre total de 56.602 têtes est considérable, reflétant l'importance de cet élevage dans les habitudes de la région.

I.4.5. La consommation de la viande dans la Wilaya d'Adrar

Dans la wilaya d'Adrar, le dromadaire adulte reste la catégorie la plus abattue durant toutes les périodes de l'année. Au mois sacré du Ramadhan, une demande plus particulière se fait pour le chamelon. Selon la réglementation algérienne, la chamelle n'est abattue que si elle est improductive ou réformée. Mais en réalité, on a remarqué dans les boucheries de grandes quantités de viandes des jeunes ce qui explique la présence de l'abattage clandestin, particulièrement pour cette catégorie d'âge[115]. Les statistiques officielles recueillies toujours auprès des services de la Direction des services agricoles de la Wilaya d'Adrar nous donnent les chiffres relatifs à l'abattage des bovins, ovins, caprins et camelins en termes de poids. Ces derniers sont indiqués dans le tableau I.2. Comparativement aux autres races, les chiffres relatifs aux camelins représentent respectivement 23.45 %, 1.77 et 16.6 % de plus

que les bovins, les ovins, et les caprins. Cela démontre que la viande caméline est la qualité de viande favorite dans la consommation de la population de la région.

Tableau.I.2.Statistiques d’abattage 2018

Mois	Bovins	Ovins	Caprins	Camelins
Janvier	8.760	106.651	10.387	146.392
Fevrier	5.650	106.031	90.90	153.391
Mars	5.090	109.658	7.851	145.740
Avril	7.280	11.0997	7.233	177.031
Mai	8.160	98.250	8.122	195.433
Juin	8.410	79.771	11.551	184.420
Juillet	3.160	65.446	93.84	202.540
Aout	2.000	40.159	6.342	115.382
Septembre	4.280	61.740	11.937	119.623
Octobre	7.840	92.246	13.523	168.688
Novembre	7.960	98.289	10.246	152.630
Decembre	13.390	116.188	10.113	161.784
Total	81.980	108.5427	115.799	1.923.045

I.4.6. Tradition du séchage de la viande caméline à Adrar

Le séchage de la viande est une pratique ancestrale chez la population autochtone d’Adrar. Le processus consiste en l’étalage du produit à ciel ouvert sur un fil de séchage à linge et d’attendre les marques de séchage tels que le durcissement et le rétrécissement de la viande qui indiquent que la teneur en eau finale permet un stockage sécurisé. Les figures I.24 illustrent la méthode et les phases du séchage traditionnel tel pratiqué dans les ménages d’Adrar.

Cette méthode met le produit à la merci de la contamination par les poussières et les insectes, favorisant la détérioration microbienne. Nous avons chargé une ménagère autochtone de procéder au séchage d’une quantité de viande selon les procédés traditionnels, nous avons pris des photos des différentes étapes du processus.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.I. 24. Aspect de la viande avant et après séchage traditionnel

La figure I.24 (a, b, c, d) indique l'aspect de la viande avant et après séchage. Les poussières et les particules polluantes sont très apparentes sur le produit final de plus, l'état général relatif à la couleur et à l'aspect de la chair n'est pas très intéressant.

I.5. Présentation de la viande

I.5.1. Définition de la viande

Le mot viandes désigne toutes les parties comestibles d'un animal ; viandes fraîches désigne les viandes qui n'ont été soumises à aucun traitement modifiant de façon irréversible leurs caractéristiques organoleptiques et physico-chimiques. Elles comprennent les viandes réfrigérées ou congelées, les viandes hachées et les viandes séparées mécaniquement.

I.5.2. Composition chimique de la viande [2]

La détermination de la composition chimique de la viande met à la disposition du consommateur un certain nombre de paramètres relatifs à 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 [116, 117]. La viande possède un pH compris entre 5,5 et 5,9 (pour un muscle de bœuf) et 5,7 et 6,2 pour le porc, après 24h de ressuage[118]. Son activité de l'eau (a_w) est de 0,99 d'où sa grande sensibilité aux attaques microbiennes[120]. De ce fait, elle nécessite une stabilisation rapide en utilisant un moyen de conservation préservant au maximum ses propriétés nutritionnelles.

I.5.3. 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 [116]. 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[121, 122]. La plupart des muscles contiennent moins de 5% de lipides malgré sa forte teneur en acides gras saturés: 1g/100g de matière fraîche

I.5.4. Valeur nutritionnelle de la viande cameline

La viande cameline a fait l'objet de différents travaux de recherche pour valoriser sa valeur nutritive. Les résultats les plus intéressants concernent sa haute teneur en protéines, supérieure à celle des bovins, sa richesse en eau et la teneur des muscles en graisse plus faibles que chez les bovins vu que dans le cas du camelin, elles sont stockées et localisées sous la bosse. Chez les bovins, la teneur du muscle en lipide peut aller de jusqu'à 4 % , chez le dromadaire, elle est de l'ordre de 0.9 % jusqu'à 1.9 %[123, 124, 125]. En comparant la viande des dromadaires jeunes (moins de cinq ans) à celles des taurillons ,[123] affirme qu'elles ont la même teneur en protéines, alors que la viande des dromadaires ayant plus de cinq ans contient plus de protéines que la viande de taureaux et de vaches; tandis que la viande du dromadaire est plus riche en collagène (protéines du tissu conjonctif) que la viande du buffle. Cette teneur en protéine de la viande cameline est de l'ordre de 19 %[126].

Conclusion du premier chapitre

L'étude bibliographique menée nous a permis présenter les différents modes du séchage solaire, ses paramètres et ses mode de transfert de masse ; les types de séchoirs solaires à savoir, les séchoirs solaires directs et indirects, avec stockage d'énergie selon types, configurations et composants.

Chapitre II

Dispositif expérimental

Dans ce chapitre, une description détaillée sera faite du séchoir solaire réalisé, avec ses deux cabines de séchage direct et indirect et son système de stockage de la chaleur sensible par les galets. On passera en revue chacun de ses composants et des différents matériaux utilisés dans leur construction.

II.1. Conception et réalisation du séchoir

Le séchoir solaire sujet de notre étude a été conçu, réalisé et soumis à l'expérimentation au sein de l'Unité de Recherche sur les Energies Renouvelables dans l'environnement saharien d'Adrar (URER / MS d'Adrar) en Algérie. Ses schémas et photos sont reportés en Figure 1. Sur laquelle on peut clairement en voir les différents éléments.



(a)



(b)

Fig.II.1. schémas descriptif du séchoir expérimental: (a) vue de face (b) vue arrière

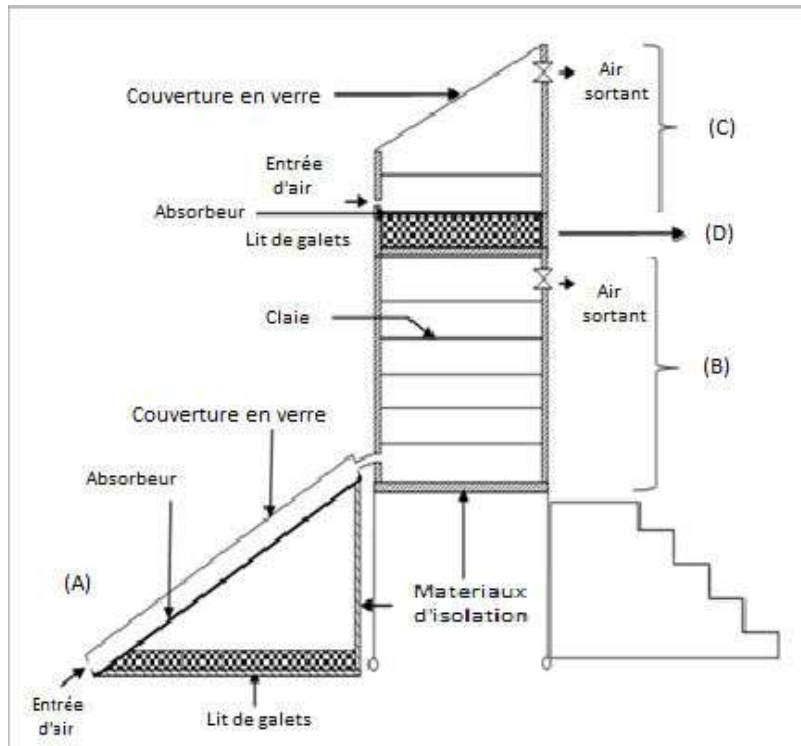


Fig.II.2. schémas descriptif du séchoir expérimental

Tel que le montre les figure II.1 et la figure II.2, le séchoir solaire comprend les éléments suivants :

II.2. Eléments constitutifs du séchoir solaire

II.2. 1. Le capteur solaire (Fig.II.2)

Le capteur solaire est placé à un angle d'inclinaison de 28° de la latitude du lieu. Le corps du capteur (Fig II.2. (a)) est composé d'un couvercle en verre et d'une plaque absorbante en métal de 5 millimètres d'épaisseur, couverte d'un revêtement noir afin de maximiser l'absorption du rayonnement solaire incident. Le couvercle en verre et la plaque absorbante sont associés par un cadre en aluminium; leur assemblage crée le conduit où l'air entrant circulant est chauffé par l'irradiation solaire incidente. Le conduit a une forme parallélépipédique de $95 \times 100 \times 4$ cm. La cote de la base du capteur solaire est perforée par des trous servant d'entrée pour l'air asséchant (Fig II.2. (b)), ils sont équidistants afin d'assurer une entrée et une circulation uniforme de l'air. Le système est orienté plein le sud afin de maximiser le rayonnement solaire incident sur le capteur solaire.



(a)



(b)

Fig.II.3. Le corps du capteur solaire : (a) : Vue de face du capteur, (b) : L'entrée de l'air au capteur

II.2. 2.La chambre de séchage indirect

La chambre de séchage indirect (Fig. II.4)est réalisée dans plusieurs matériaux associés. Elle est composée d'une double cloison en plaque de PVC d'une épaisseur de 5 mm, intercalées par une couche de polystyrène d'une épaisseur de 3cm. Tout au long de sa hauteur, à l'intérieur de la chambre, plusieurs claies sont placées, superposées, destinées à contenir la viande à sécher. Elles sont placées à une distance de 15 cm les unes des autres. Le volume global de la chambre de séchage indirect est égal à $(90 \times 60 \times 15) \text{ cm}^3$. Des trous d'un diamètre de 12 mm, équidistants, sont taillés à la base de la chambre ; reliés au capteur solaire par des conduites en plastiques, elles servent d'entrée à l'air de séchage. L'évacuation de cet air, une fois chargé d'humidité suite son passage sur le produit à sécher, est assuré par l'action d'un ventilateur placé à son sommet. reliée au capteur solaire par des conduites en plastiques enrobés dans de la laine de verre (Fig.II.5).



Fig.II.4. La chambre de séchage indirect



Fig.II.5. La jonction entre le capteur solaire et la chambre de séchage indirect

II.2.3. La chambre de séchage direct

Construite en double cloison plaques de PVC, avec une feuille intercalaire en polystyrène, la chambre de séchage directe est placée au-dessus de la chambre de séchage indirect et séparée de cette dernière par un plenum destiné à contenir un lit de galet intercalé entre les deux (Fig.II.6). La chambre de séchage direct de profil triangulaire, possède une face inclinée en verre pour assurer l'effet de serre. Sa base apparente au ciel à travers la vitre est une tôle recouverte de peinture noire afin de maximiser l'absorption de l'irradiation solaire. Son volume est égal à $[(50 * 50 * 50) / 2]$ cm³. Elle est munie d'une claie destinée à supporter le produit à sécher. L'air de séchage pénètre dans cette chambre à travers des trous équidistants dont le diamètre est de 15 mm. L'évacuation de cet air est assurée par un ventilateur placé en haut de la chambre.



(a)



(b)

Fig.II.6. La chambre de séchage direct/ (a) : Vue arrière, (b) : Vue de face

✓ Les claies

Destinées à supporter le produit à sécher, elles sont superposées à l'intérieur des chambres de séchage. Des baguettes en bois d'une section de 2x2 cm sont assemblés en carrés pour former le cadre des claies, sur les bords des quels on colle un tamis en plastique. Le choix de ces deux matières bois et plastiques est fait à cause de leurs propriétés physiques limitant les pertes thermiques. On peut les voir superposées à l'intérieur de la chambre de séchage indirecte sur la figure II.4.

II.2.4. Le système de stockage d'énergie sensible par galets

Le recours au stockage d'énergie sensible vise à maintenir l'efficacité du processus de séchage au-delà des heures d'ensoleillement mais aussi d'intensifier le rendement du système en période éclairée. Notre choix s'est porté sur les galets noirs pour leur disponibilité dans la nature d'Adrar n'impliquant aucune majoration du coût financier du système. Les galets utilisés ont été ramassés sur les bords de l'Oued de dans la région de Bouda, à 25 kilomètres à l'ouest de la ville d'Adrar. Le système a été consolidé par le lit de galets à deux niveaux : le premier placé dans une cavité adhérent à la surface inférieure du capteur solaire et le second dans un plenum situé entre les deux chambres de séchage.

a. La cavité

Le capteur solaire est placé au-dessus d'un corps boîte de section triangulaire qui sert de cavité pour contenir un lit de galets, il fait office d'espace de stockage de chaleur sensible destiné à fournir un complément thermique à l'air entrant dans la chambre de séchage indirect (Fig.II.7). Elle est composée, de l'extérieur vers l'intérieur, de plaques métalliques, d'une couche de polystyrène puis d'une couche de contreplaqué superposée sur les parois latérales et à la base du corps.



Fig.II.7. La cavité de stockage des galets placée sous le capteur solaire

b. Le plenum

Un plenum (Fig.II.8.) destiné à contenir une quantité de galets, est placé tel un tiroir entre la chambre de séchage indirect et la chambre de séchage direct. Il est coupé dans le PVC en double cloison (Fig.II.8(a)). Isolé thermiquement de l'ambiance externe et de la chambre de séchage indirect par du polystyrène entre les deux cloisons de résine de bois, il fournit l'énergie thermique sensible stockée dans les galets à la chambre directe (Fig.II.8 (b)).



(a)



(b)

Fig.II.8. Le plenum de stockage : (a) vue externe, (b) : vue interne avec les galets contenus

II.2.5. La ventilation

Un ventilateur centrifuge d'une puissance électrique de 6 W, fonctionnant sous une tension de 240 V, est placé en haut de chaque chambre. Le débit d'air de fonctionnement est fixé à une valeur de $120 \text{ m}^3 / \text{h}$ exploitable dans une plage de température de -10 à 70°C .

Le rôle du ventilateur est de forcer l'écoulement et l'évacuation de l'air de séchage chargé de l'humidité extraite du produit vers l'extérieur, donc en augmenter la vitesse. Cette augmentation doit être optimisée de sorte à ce que le temps de séjour de l'air entrant dans la conduite du capteur solaire permette un échange thermique par convection suffisant pour augmenter sa température à la sortie du capteur ; la vitesse de l'écoulement de l'air sur le produit doit permettre aussi une charge optimale de l'humidité évacuée par l'évaporation de l'eau contenue dans le produit. La stabilité du produit sur la claie face à la vitesse de l'écoulement de l'air ne doit pas être perturbée.

Le choix de la puissance du ventilateur lors de la conception de notre séchoir s'est basé sur le respect de ces paramètres. Le profil des températures obtenues et discutée plus loin dans le chapitre III. , les mesures de l'hygrométrie dans les chambres de séchage, la mesure des

vitesse d'écoulement de l'air ont confirmé que le choix de la puissance de ventilation du système a été judicieux.

II.2.6. Propriétés thermique des matériaux de construction du séchoir

La principale motivation lors de la conception d'un dispositif et le choix des matériaux qui le composent est d'allier entre l'efficacité du système réalisé et la minimisation du coût financier. Dans notre cas, nous avons opté, eu égard au fait que le séchoir solaire réalisé est destiné à l'activité agricole locale, pour des matériaux disponibles et dont les prix sur le marché sont abordables. Le corps des chambres de séchage a été réalisé en PVC dont le coût est relativement élevé par rapport au bois. Seulement, le bois ne possède pas les propriétés physiques requises pour résister à une exposition prolongée sous le soleil dans un contexte saharien. Pour le reste des composants, les aciers utilisés dans la conception du capteur, les couvertures en verre, les tiges en bois utilisées pour la conception des claies, le polystyrène pour l'isolation offrent tous l'avantage d'être ce qu'il y a de plus abordable sur le marché local. Les propriétés thermiques de ces matériaux sont indiquées au tableau II.1.

Tableau .II.1. Propriétés thermiques des matériaux de construction (Aide mémoire du thermicien, 1977).

Nom du matériau	Masse volumique (g/cm ³)	Capacité calorifique massique (Kj.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Conductivité thermique (W .m ⁻¹ .k ⁻¹)
Acier	7.8	0.481	54
Bois	1		0.38
Verre	2.49	0.83	1.16
PVC	1.35	1.06	0.168
Polystyrène	1.05	1.2	-40 à 70
Pierre	2.35	0.71	2.2

Conclusion

Le choix des matériaux, des composants a été dictés à beaucoup de moments par des impératifs financiers et par les limites imposées par la disponibilité de l'offre du marché. Nous avons retenus la configuration décrite ci-dessus dans une démarche d'optimisation des différents paramètres. La suite des travaux menés et décrit dans le prochain chapitre concernant l'effet du stockage sur le rendement du système confirme la pertinence et l'efficacité des choix décidés.

Chapitre III.

**Etude de l'effet du stockage sur le
rendement instantané du capteur solaire
Et sur la chambre de séchage direct**

Ce chapitre concerne les expérimentations menées sur le stockage de l'énergie thermique sensible par les galets dans le but d'augmenter la performance du système, par la prolongation du temps de séchage au delà des heures d'ensoleillement et par l'augmentation du rendement thermique du capteur. Un tel travail expérimental s'est avéré nécessaire pour déterminer avec précision la masse optimale du lit de galet à incorporer au système. Le stockage dans les galets nécessite un temps de charge de l'énergie thermique sensible par l'effet du rayonnement solaire, la quantité d'énergie déchargée et le temps de décharge doivent avantager le système et non pas entraver son fonctionnement ; pour cela, les masses de galets doivent être déterminées avec précisions.

III.1. Instrumentation

Les données météorologiques (température ambiante, rayonnement solaire) sont fournies par la station de mesures météorologiques de l'URER / MS d'Adrar. L'irradiation solaire est mesurée avec les pyranomètres KippZonen CM11. La répartition de la température à l'intérieur du séchoir solaire est mesurée par plusieurs thermocouples de type K placés à différents endroits du séchoir.

Pour le capteur solaire, des thermocouples ont placés à l'entrée, au milieu du canal de passage de l'air et à la sortie. On place aussi des thermocouples sur le verre, la plaque noire constituant le capteur solaire. Ce choix permet de collecter toutes les données nécessaires au suivi des comportements thermiques de chaque composant et du calcul du rendement thermique du capteur solaire.

Des thermocouples sont placés dans la cavité inférieure au capteur, et dans le plenum construit sous la chambre de séchage direct contenant les galets destinés au stockage de l'énergie sensible. Il s'agit d'enregistrer la température des galets et de l'air confiné à l'intérieur de cette cavité. Cet enregistrement permettrait éventuellement de caractériser le système.

Au niveau de la chambre de séchage indirect et direct, les thermocouples sont placés à l'entrée, à la sortie et au milieu pour mesurer la température de l'air de circulation. Des thermocouples son aussi destinées à mesurer la température du produit au niveau de chaque claie. Toutes ces données relatives aux températures sont nécessaires au suivi de la qualité du produit, au suivi de la cinétique de séchage, au calcul des rendements de séchage et au comportement thermique du produit et de chaque élément composant le système.

Les données sont enregistrées à intervalles de 10 minutes à l'aide d'une chaîne d'acquisition Fluke 2638A d'une précision de 0,0024%. Ces instruments sont indiqués sur fig. III.1, fig. III.2.



Fig.III.1. Pyranomètre KippZonnen CM11



Fig.III.2. Acquisition de données Fluke 2638 A

III.2. Procédure d'expérimentation

Toutes les expériences ont été conduites dans la ville d'Adrar. Les expériences relatives au stockage de chaleur sensible ont été réalisées en novembre 2016, celles du séchage de la viande de chameau en juillet et novembre 2017. Le processus d'expérimentation lié au système de séchage est divisé en deux étapes. La première étape vise à établir le lien entre la masse du lit de galets destinée à stocker l'énergie thermique et l'efficacité thermique du capteur solaire, la deuxième étape établit les performances du système chargé en viande caméline et l'évolution du processus.

Afin d'optimiser le stockage d'énergie par galets dans l'exploitation du système, il faut d'abord le caractériser suivant différentes masses de galets utilisées. On a fait varier ces masses dans les espaces de stockage du séchoir solaire sur différents jours.

III.3. Données et analyse des performances

Le rendement thermique du capteur η_c est une mesure courante de la performance du capteur dans un séchoir solaire. Il établit le rapport entre le gain en chaleur utile du capteur et l'irradiation solaire absorbée par sa surface.

$$\eta_c = \frac{C_{pa}m_a(T_{co} - T_{ci})}{A_s I_g} \quad (III. 1.)$$

C_{pa} : Capacité calorifique de l'air caloporteur (kJ/kg)

m_a : Masse de l'air caloporteur (kg)

T_{co} : Température de l'air caloporteur à l'entrée du capteur (kelvin)

T_{ci} : Température de l'air caloporteur à la sortie du capteur (kelvin)

III.4. Résultats et discussion

Pendant le temps de charge, le lit de galets absorbe de l'énergie thermique à travers l'absorbeur du capteur solaire; pendant la période de décharge, il dissipe la chaleur dans le flux d'air passant par le collecteur jusqu'à la chambre indirecte. Une masse trop importante des galets prendrait un temps de chargement trop long, ce qui pénaliserait le séchage solaire pendant la journée où l'efficacité du séchage est la plus importante. En contrepartie, une masse réduite n'améliorerait pas l'efficacité thermique du capteur solaire. Il faut déterminer la

masse idéale pour améliorer le temps de séchage et augmenter suffisamment la température de l'air asséchant durant le processus de séchage de la viande de chameau afin d'obtenir un produit de qualité sur les plans microbiologique et biochimique.

III.4.1. Effet sur le capteur

En premier, Nous allons exposer les effets du stockage sur le rendement instantané du capteur, sur les températures opératoires enregistrées à ce niveau, ensuite nous passerons à l'effet du stockage sur le rendement thermique de la chambre de séchage directe et les températures opératoires enregistrées sur celle-ci.

a. Le rendement instantané du capteur

Différentes masses de galets sont introduites dans la cavité qui est en dessous du capteur solaire. La masse est augmentée graduellement chaque jour. Sur la base du rendement thermique instantané résultant du capteur, on détermine la masse de galets idéale à utiliser pour augmenter le gain en rendement obtenu par stockage de l'énergie calorifique. Sur les figures qui suivent, les courbes de l'évolution de la température et de l'irradiation solaire pour chaque journée d'expérimentation témoignent de la qualité claire du ciel et indiquent que les températures sont dans la moyenne acceptable de la saison. (Figure III.1, Figure III.4, Figure III.5, Figure III.6, Figure III.7, Figure III.8), (a). Les dates des différentes expérimentations et les masses des galets pour chaque jour sont indiquées au tableau III.1.

Tableau III.1. Date et masses des galets

Numéro du test	Date	Masse des galets
1	24 octobre 2016	0 kg
2	27 octobre 2016	15 kg
3	30 octobre 2016	30 kg
4	01 novembre 2016	40kg
5	02 novembre 2016	45 kg
6	03 novembre 2016	50 kg

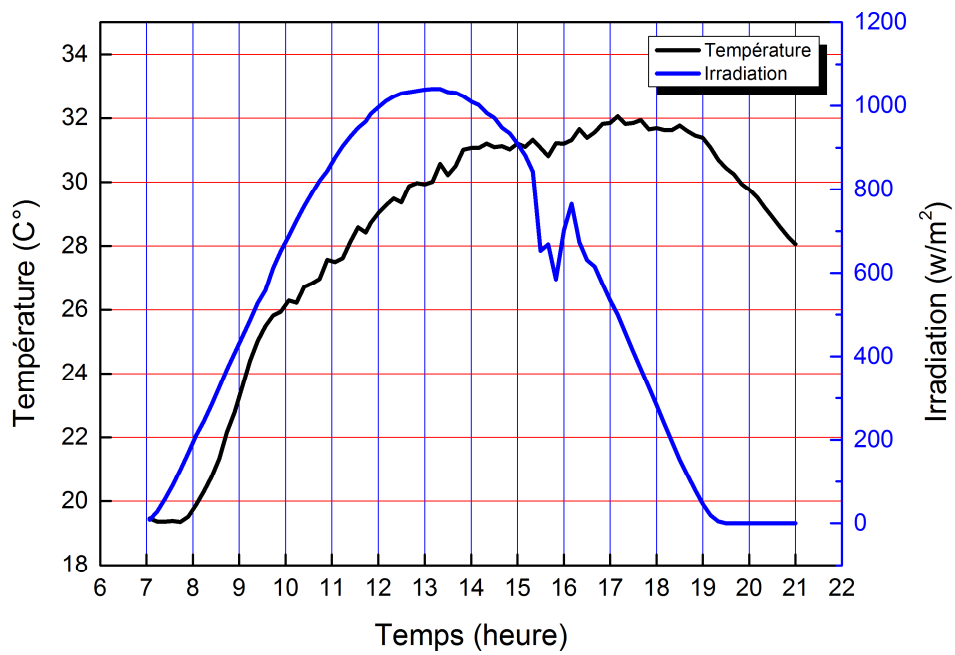


Figure III.3. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiations solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 24 octobre 2016

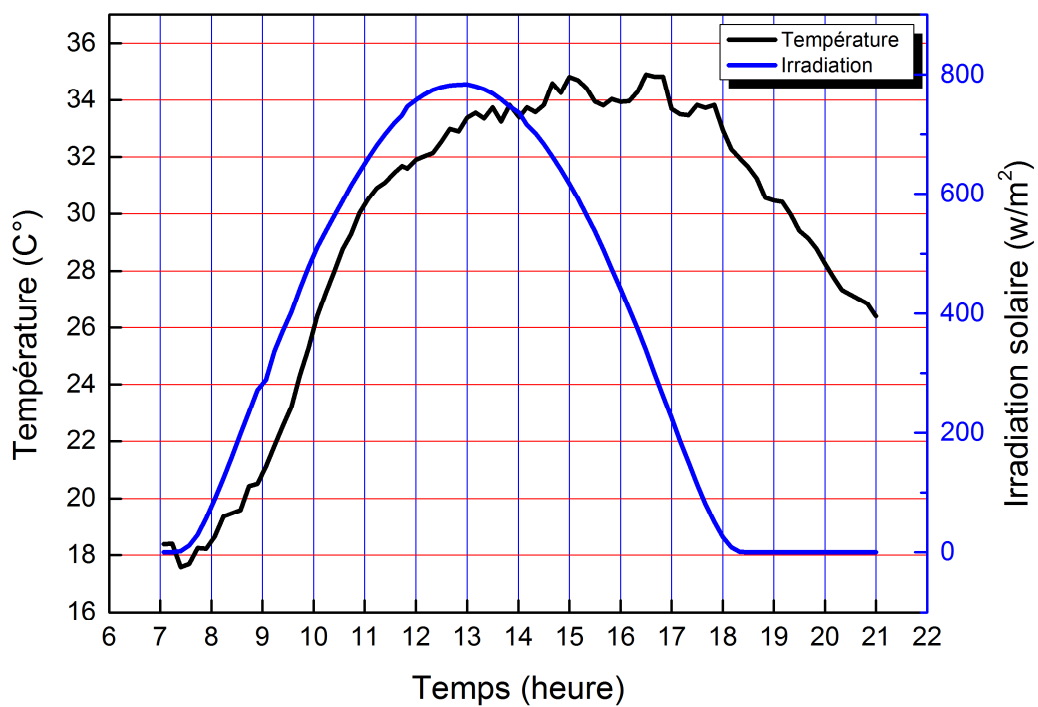


Figure III.4. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiations solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 27 octobre 2016

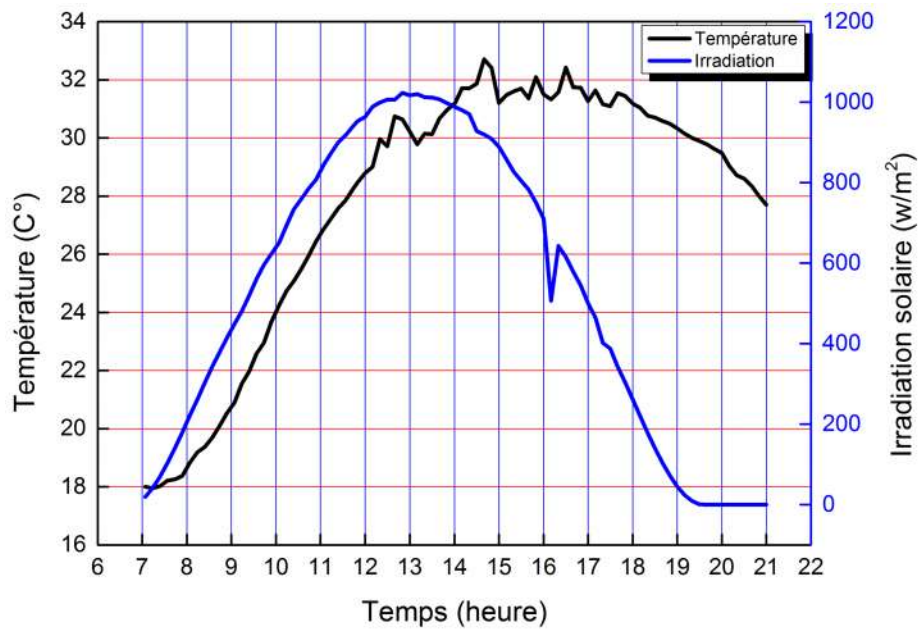


Figure III.5. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 30 octobre 2016

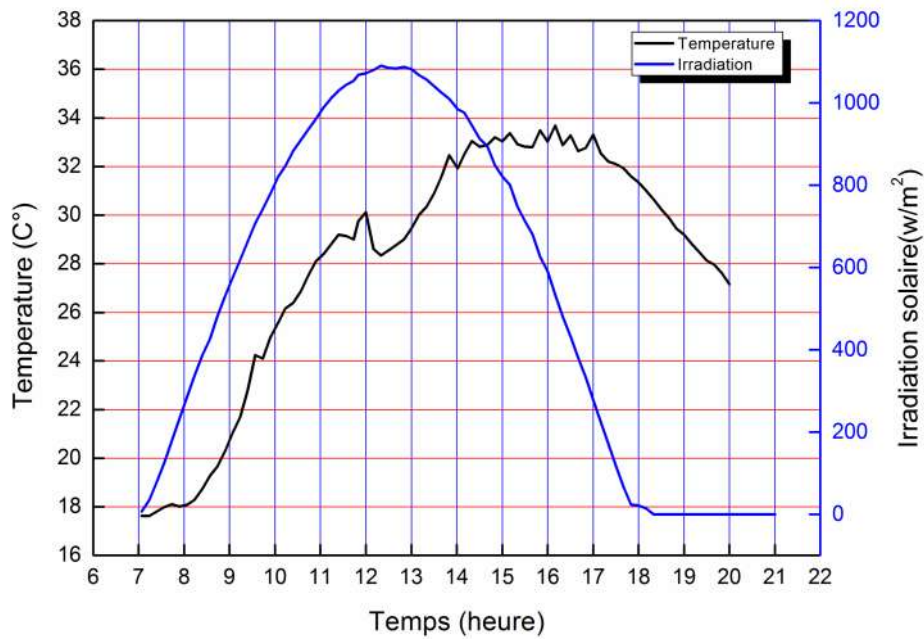


Figure III.6. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 01 novembre 2016

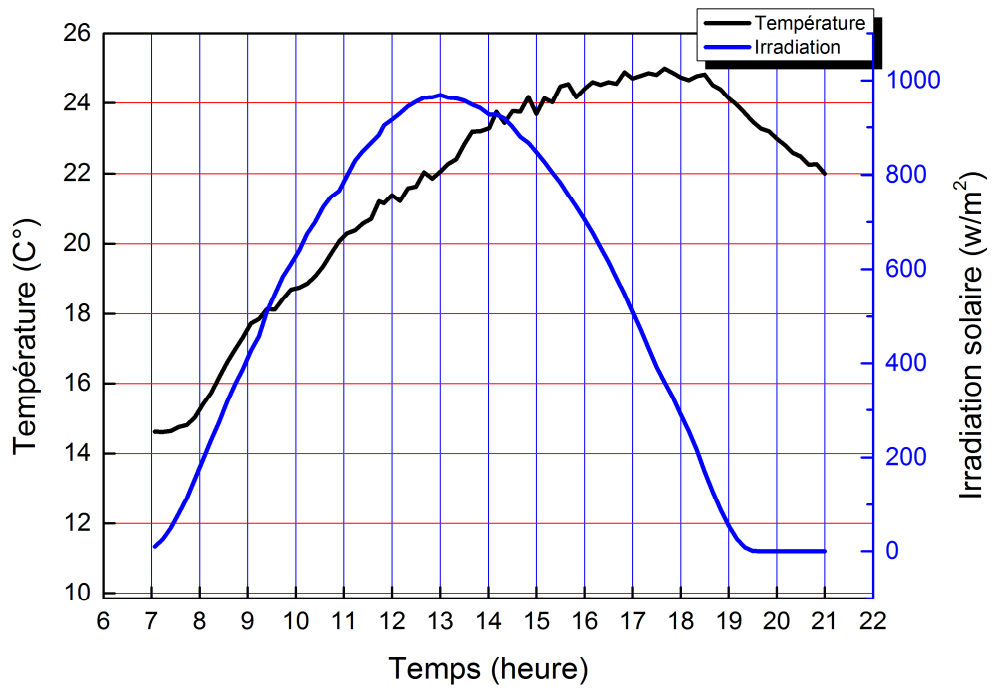


Figure III.7. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiations solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 02 novembre 2016

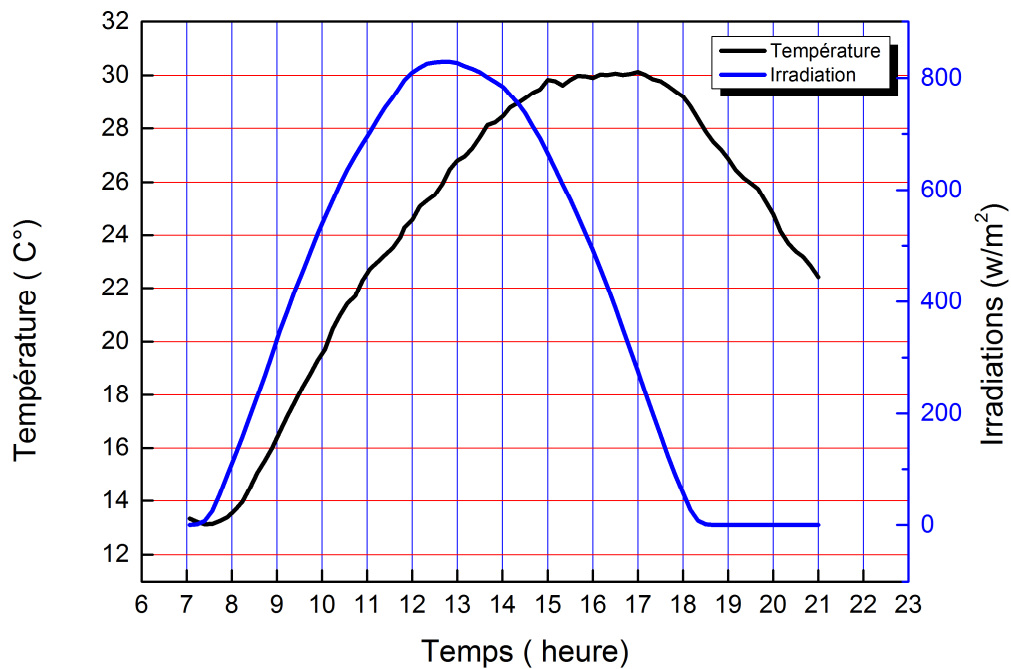


Figure III.8. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiations solaires lors des journées d'expérimentations du stockage pour le 03 novembre 2016

Le rendement thermique instantané du capteur solaire est calculé sur la base des données recueillies lors des différentes expériences. Pour estimer l'efficacité du système, on a procédé au calcul des moyennes des rendements thermiques (MRT %) calculées sur chaque période spécifique de la journée, spécifiques par rapport à l'intensité de l'irradiation solaire et aussi à la phase de l'échange thermique des galets entre charge et décharge (Tableau III.2.).

Tableau III. 2. Moyenne du rendement thermique (MRT) (%) du capteur solaire pour différentes masses de galets au cours de la journée.

Masse des galets (kg)	MRT (%) 7h00- 10h00	MRT (%) 10h00 – 16h00	MRT (%) 16h00- C.S	Temps d'efficacité du système après C.S (minute)
0	34,43	51,5	32,72	0
15	32,57	54,038	37,5	0
30	31,36	57,16	65,09	50
40	30,67	62,07	79,06	60
45	28,27	54,95	78,56	70
50	25,09	53,64	89,048	70

MRT : Moyenne du rendement thermique
C.S : coucher du soleil

Le tableau (III.2.) indique que sur la période allant de 7h00 à 10h00, MRT est inversement proportionnel à la masse des galets car le temps de charge thermique des cailloux augmente avec la masse. Entre 10h00 et 16h00, la période la plus ensoleillée de la journée, et de 0 kg jusqu'à la masse de 40 kg, MRT augmente en fonction de la masse. La masse de 40 kg de galets génère une efficacité maximale de 62,07% pour cette période de la journée; puis le MRT diminue jusqu'à 53,64% pour 50 kg de galets. Pour la période allant de 16h00 jusqu'au coucher du soleil (environ 18h10), MRT augmente proportionnellement à la masse de cailloux. Pendant cette période de fin de journée, la chaleur sensible stockée est efficacement diffusée dans le système. Après le coucher du soleil, à partir de la masse 30 kg, la différence de température entre l'entrée et la sortie du capteur solaire est maintenue durant 50 à 70 minutes malgré l'absence du rayonnement solaire.

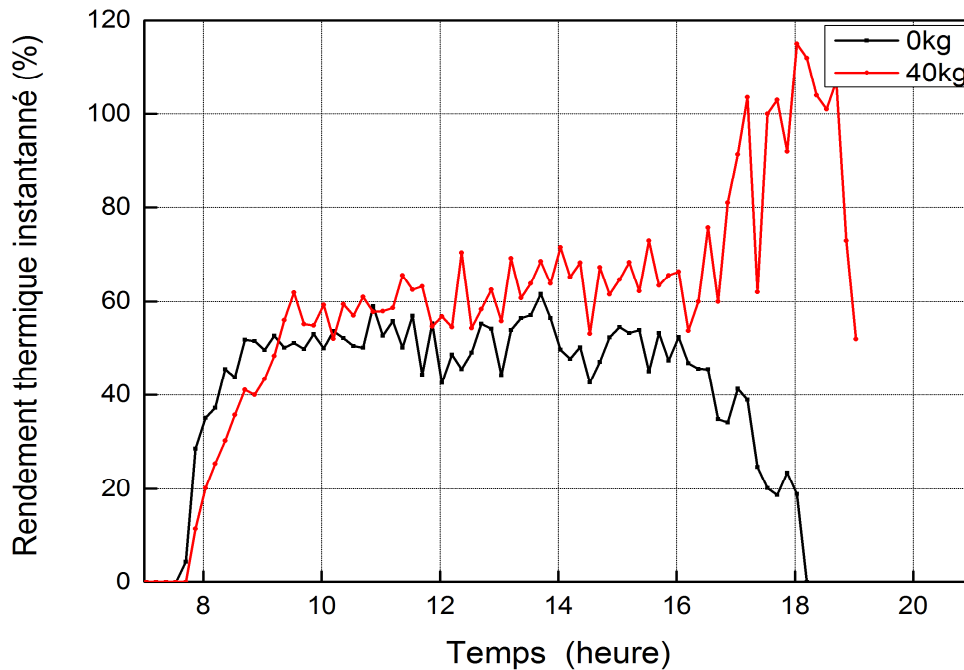


Fig.III.9. Evolution du rendement thermique instantané du capteur solaire sans galets et avec 40 kg de galets

Les rendements thermiques instantanés du capteur solaire résultants des expériences conduites avec 40 kg de galets dans la cavité de stockage présentent un gain qui varie entre 11% avant 10h00 et 28% entre 10h00 et jusqu'au coucher du soleil, par rapport aux expérimentations sans stockage de chaleur sensible (fig.III.9.). C'est dans le même ordre des résultats obtenus par El-Sebaï et al. (2007). Aux alentours du coucher du soleil, lorsque l'irradiation solaire diminue fortement, alors que la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie du capteur continue à être sensible, l'expression du rendement tel dans l'équation (III.1) où l'irradiation est au dénominateur et la différence de température au numérateur donne résultat à des rendements très importants supérieurs à 100 % car le rendement n'est plus tributaire de l'énergie d'entrée (irradiation solaire) mais il est maintenu en grande partie grâce au stockage de l'énergie sensible dans les galets. En comparant les moyennes des rendements thermiques instantanés du capteur solaire pour chaque masse de cailloux et le temps de performance du système après le coucher du soleil, on conclut que la masse idéale des galets de stockage sensible à utiliser pour le capteur solaire est égale à 40 kg. Cette masse sera maintenue pour toutes les expériences de séchage de la viande qui suivront.

b. Températures opératoires

Pour situer les performances du système avec 40 kg de galets de stockage, des thermocouples ont été placés à différents points du séchoir, tel qu'il a été indiqué au paragraphe (III.1). L'évolution des différentes températures de fonctionnement du séchoir enregistrées sont représentées sur les figures (III.10),(III.11) et (III.12)

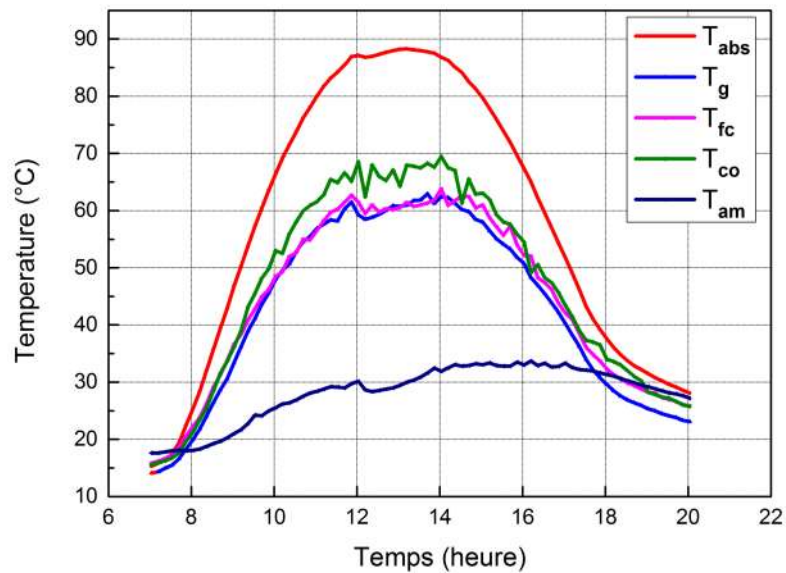


Figure III.10. Evolution des températures du capteur solaire

T_{abs} : Température de la plaque de l'absorbeur noir, T_g : Température de la couverture en verre, T_{fc} : Température de l'air au milieu du capteur, T_{co} : Température de sortie du capteur, T_{am} : Température ambiante

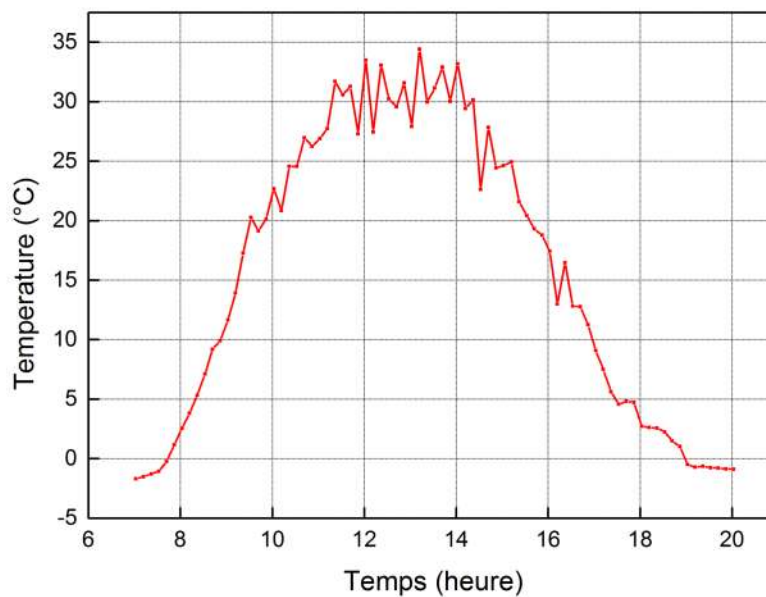


Figure III.11. La différence entre température de l'air caloporteur à l'entrée T_{ci} et à la sortie du capteur solaire T_{co}

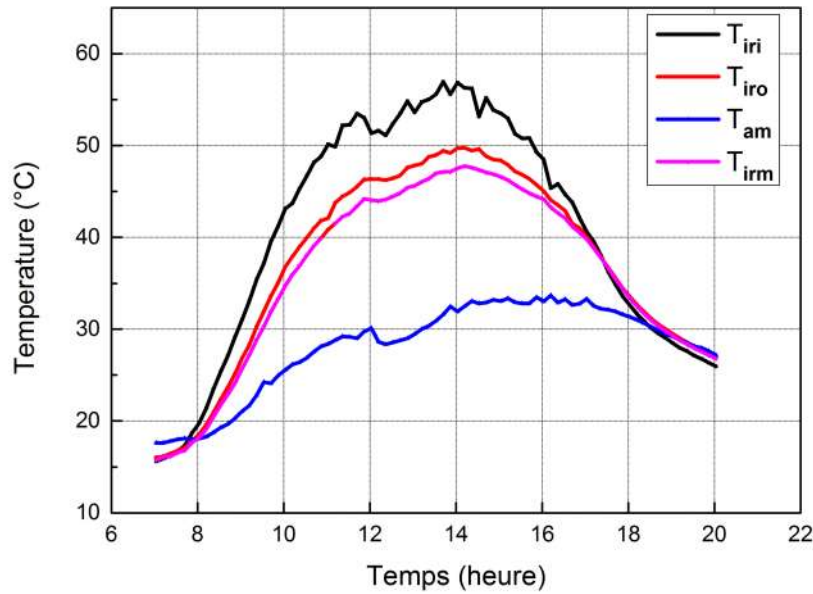


Fig III.12. La température de la chambre de séchage indirect. T_{iri} : à l'entrée de la chambre, T_{irm} : Température de l'air caloporteur au milieu de la chambre, T_{iro} : Température de l'air caloporteur à la sortie de la chambre, T_{am} : Température ambiante

La Fig. III.10. indique que la température de l'absorbeur T_{abs} enregistre la plus grande valeur de l'ordre de 90°C , suivie par la sortie du capteur T_{co} , qui autour de 14h00 enregistre la valeur de 70°C , puis la température de l'air au milieu du capteur solaire T_{fc} et celle de la vitre température T_g qui sont du même ordre de grandeur.

Sur la Fig. III.11., on voit que la différence entre la température de l'air à l'entrée du capteur T_{ci} et la température à la sortie du capteur T_{co} est égale à 22°C vers 10h00 et atteint un maximum de 34.46°C à 13h13 avec une moyenne de 27°C entre 10h00 et 16h00. La moyenne de cette différence pendant la période diurne est égale à 16°C . On relève aussi que la température de sortie du capteur continue à être supérieure à son entrée près d'une heure après le coucher du soleil ; donc le système demeure efficace pendant ce temps en dépit de l'absence du rayonnement solaire. Cette énergie thermique est puisée dans la décharge de l'énergie thermique sensible fournie par les galets qui est communiquée à l'air confiné sous la cavité par convection, cette énergie est transmise ensuite à la plaque de l'absorbeur noir qui à son tour la transmet à l'air caloporteur circulant dans le capteur entre l'absorbeur et la vitre et qui va entrer dans la chambre de séchage.

L'évolution des températures de l'air de circulation à l'entrée, au milieu, à la sortie de la chambre de séchage indirect et de la température ambiante sont respectivement représentées

par T_{iri} , T_{irm} , T_{iro} , T_{am} sur la figure (III.12), T_{iri} enregistre sa valeur maximale de $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 14h00 ; la moyenne de la différence entre T_{irm} et T_{am} de 10h00 à 16h00 est d'environ $13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entre 16h00 et 20h00, elle est d'environ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

III.4.2. Effet sur la chambre de séchage direct

La même procédure d'augmentation graduelle de la masse des galets a été conduite au niveau du plenum situé en dessous de la chambre de séchage direct, pour déterminer la masse idéale au stockage de la chaleur sensible sensée augmenter le rendement du séchage indirect.

Les journées du 07, 08 et 09 novembre 2016 ont été choisies pour conduire l'expérimentation. Les conditions climatiques relatives à ces journées sont respectivement décrites dans les figures III.13, figures III.14, figures III.15.

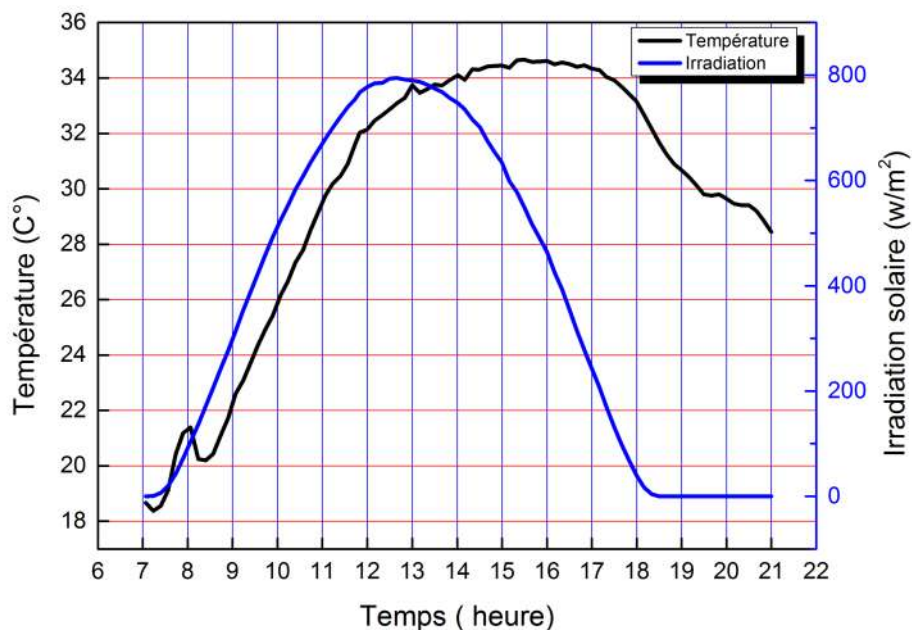


Fig. III.13. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations stockage chambre directe pour le 07 novembre 2016

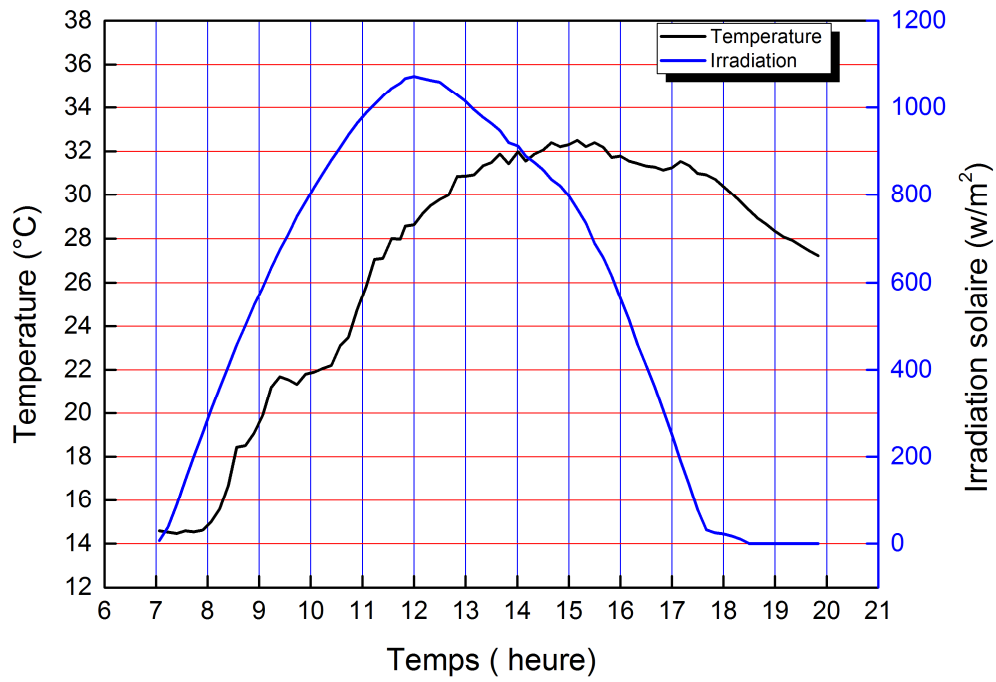


Fig. III.14. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations stockage chambre directe pour le 08 novembre 2016

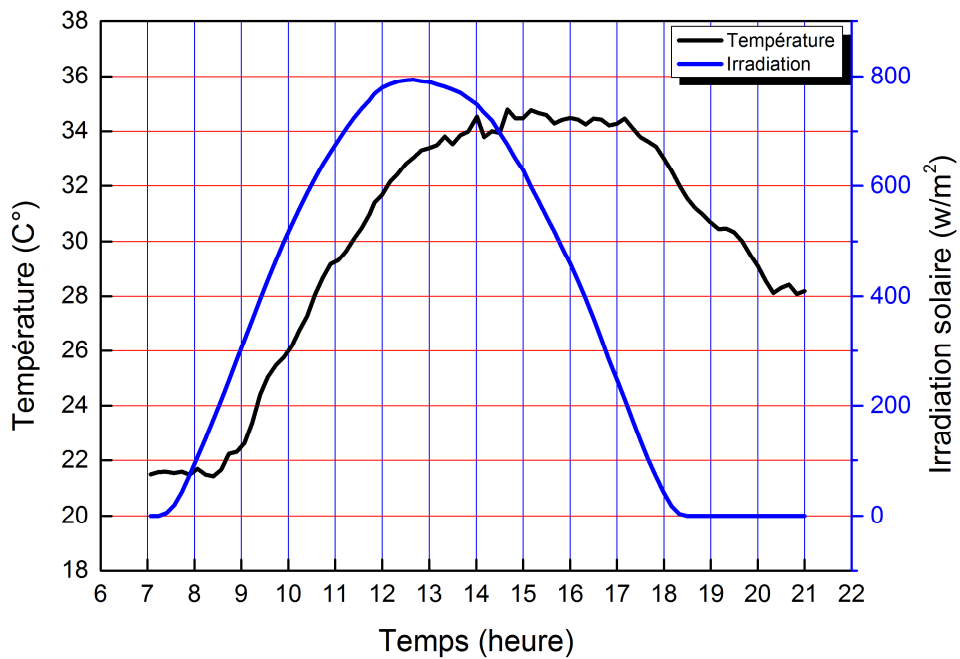


Fig. III.15. Evolution journalière des températures ambiantes et des irradiances solaires lors des journées d'expérimentations stockage chambre directe pour le 09 novembre 2016.

Les figures relatives aux trois journées d'expérimentation indiquent un ciel dégagé et des températures dans la moyenne habituelle de la saison.

a. Le rendement instantané de la chambre de séchage direct

Le tableau III.3. indique la moyenne du rendement thermique instantané de la chambre indirecte, calculée sur différentes périodes de la journée, pour différentes masses des galets.

Tableau III.3. Moyenne du rendement thermique MRT (%) de la chambre de séchage direct pour différentes masses de galets au cours de la journée

Masse des galets (kg)	MRT (%) 07h00-10h00	MRT (%) 10h00 – 16h00	MRT (%) 16h00-CS	Moyenne journalière(η_c)
0	26.34	44.75	36.97	38.14
5	25.03	57.02	69.23	49.94
10	20.72	39.18	71.4	39.23

MRT : Moyenne du rendement thermique
C.S : coucher du soleil

La figure (III.16.) décrit l'évolution du rendement thermique instantané au niveau de la chambre de séchage direct pour différentes masses du lit de galets de stockage. On peut relever sur cette figure l'avantage de la courbe relative à la masse de 5 kg sur la période allant de 10h00 et jusqu'à 16 heures, la période la plus ensoleillée et la plus importante du séchage en cours d'une journée.

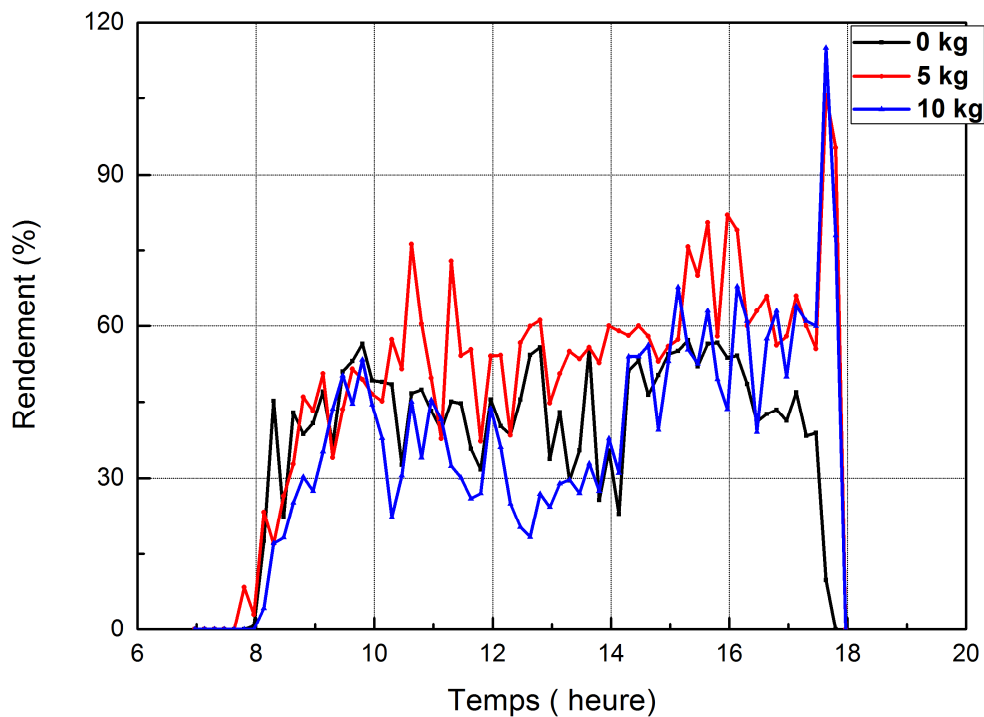


Fig. III.16. Evolution du rendement thermique instantané pour 0 kg, 5 kg et 10 kg de galets du plénum

Le tableau (III.3.) indique que pour la masse de 5 kg, MRT calculée sur toute la journée prend la valeur de 49,94% (pour les deux autres cas, elle est d'environ 39%) et la valeur de 57,02% entre 10h00 et 16h00 (La période la plus ensoleillée de la journée et la phase la plus importante du séchage).

Comme la masse de 5 kg est plutôt réduite, elle n'accumule pas de stockage de chaleur sensible important à décharger au système après l'absence du rayonnement solaire. Toutes les expériences ultérieures de séchage de la viande ont été menées avec une masse de 5 kg de galets placés dans le plénum sous la chambre de séchage direct, ce qui augmente de façon optimale les rendements thermiques avec une valeur d'environ 12% pendant la journée. Ce qui est en soi un gain considérable même si ça n'assure pas la permanence d'un rendement thermique après le coucher du soleil.

b. Les températures opératoires

La figure (III.17) représente les profils des températures au niveau des différents éléments de la chambre de séchage direct ainsi que la température ambiante.

La température la plus élevée dans ce cas est enregistrée au niveau de l'absorbeur T_{Dra} vers 13h11 avec un maximum de 65 °C. Entre les deux limites T_{am} et T_{Dra} sont affichées, par ordre croissant, la température à la sortie du séchoir T_{Dro} avec un maximum de 45 °C à 13h13, la température du verre T_{Drg} et la température de le flux d'air au milieu de la sécheuse directe T_{Drm} avec un maximum de 53,17 °C à 13h45.

La Figure. (III.18) représente la différence entre la température ambiante T_{am} et la température T_{Drm} du débit d'air au milieu de la chambre de séchage direct. Cette différence est de l'ordre de 15 °C à 10h00. Elle atteint un maximum égal à 19,5 °C vers 13h50 et enregistre une moyenne de 7 °C entre 16h00 et le coucher du soleil.

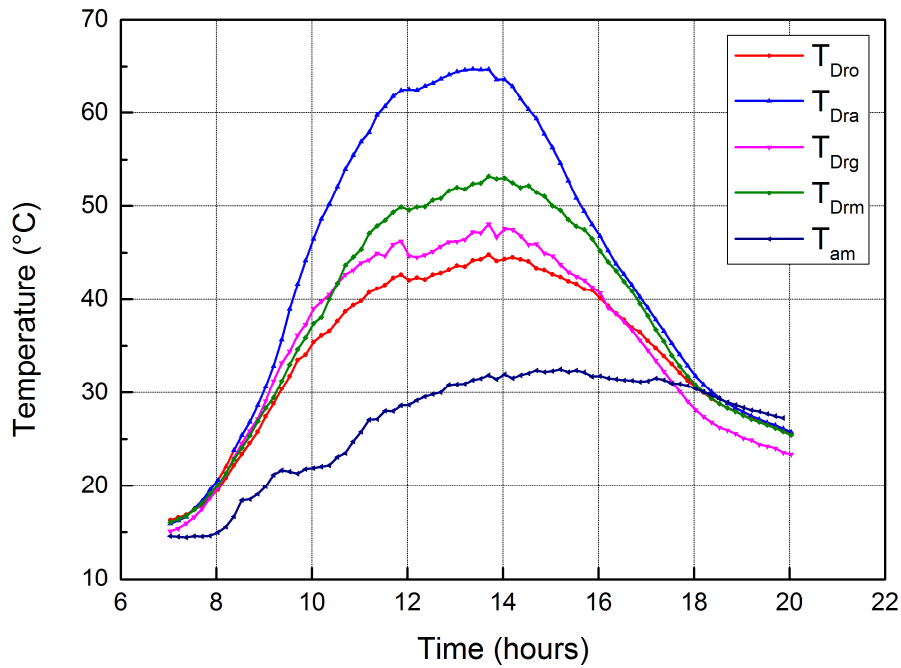


Fig. III.17. Evolution des températures de fonctionnement de la chambre de séchage direct avec 5kg de galets au plenum avec T_{Dra} : Température de l'absorbeur de la chambre de séchage direct, T_{am} : Température ambiante, T_{Drg} : Température de la couverture en verre, T_{Drm} : Température de l'air au milieu de la chambre de séchage direct, T_{Dro} : Température à la sortie de la chambre de séchage direct

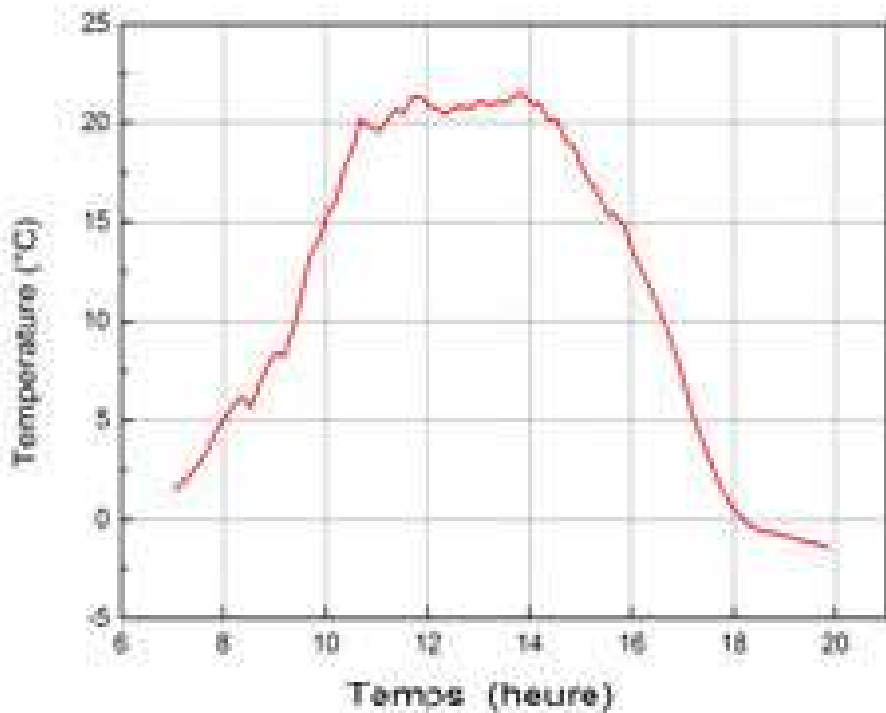


Fig. III.18. Evolution de la différence entre la température ambiante T_{am} et la température de l'air asséchant T_{Drm} au milieu de la chambre de séchage direct

L'ordre de croissance des profils des températures enregistrés concernant les éléments constitutifs du séchoir ou les paramètres externes tels que la température de l'air ambiant ou de l'air à la sortie et à l'entrée de la chambre sont en conformité avec les propriétés thermiques et physiques des différents éléments et avec les résultats attendus suite au parcours de l'air dans le système physique de la chambre direct et à l'apport du stockage de l'énergie sensible par les galets au niveau du plénum.

Conclusion

Le fonctionnement à vide du dispositif a permis de confirmer l'apport du stockage de l'énergie sensible par les lits de galets installés à deux niveaux du dispositifs a été prouvé expérimentalement dans ce qui a précédé. Les résultats obtenus ont dirigé le choix des masses de ces lits. L'étape suivante est de suivre l'efficacité du système lorsque qu'il est chargé en viande caméline à travers l'évaluation des rendements de séchage et des cinétiques de séchage. C'est le thème du chapitre suivant.

Chapitre IV

Le séchage direct et indirect de
la viande caméline (en couche
minces) en saison chaude et
en saison froide

L'analyse de la performance d'un séchoir passe par l'évaluation de son rendement de séchage en termes énergétiques et par la caractérisation du comportement hygroscopique d'un produit au cours du processus séchage. Le suivi du comportement hygroscopique permet d'établir les cinétiques de séchage et de les modéliser afin de pouvoir prédire son comportement au cours du séchage. Les modèles choisis pour simuler les vitesses de séchage moyennant le suivi des teneurs en eau jusqu'à atteinte d'une valeur dite teneur d'équilibre qui est la teneur en eau limite au delà de laquelle un produit ne se déshydrate plus dans un environnement donné, les plus couramment utilisés dans ce domaine. Le rendement thermique de séchage du système sera tributaire des conditions de fonctionnement reliées directement aux choix de conception mais aussi en grande partie au contexte météorologique du lieu. Nous commencerons par quelques définitions de base puis nous passerons en vue, avant toute chose, les conditions climatiques relatives aux rayonnements solaires et aux températures des jours d'expérimentations mises en œuvre avant de discuter les résultats obtenus concernant l'étude et le suivi des cinétiques de séchage et des performances énergétiques du séchoir.

IV.1. Procédure et instrumentation

Au cours de deux périodes différentes de l'année 2017, des tests de séchage de la viande de dromadaire ont été effectués dans le séchoir solaire dans ses deux chambres de séchage direct et indirect. La première expérience a débuté le 3 juillet 2017 et la seconde le 13 novembre 2017. Le séchage s'est poursuivi jusqu'à l'équilibre de la masse des échantillons après trois pesées consécutives. Une certaine quantité de viande de chameau a été séchée au soleil pour fournir un témoignage sur la qualité microbiologique et physico-chimique (figure IV.11). L'humidité relative de l'air à l'intérieur de la chambre de séchage est mesurée avec une sonde Opus 208 (fig.IV.1), celle des bocal contenant les sels utilisés dans la désorption est mesurée avec un appareil Testo 425. (fig.IV.2)

La balance utilisée pour la surveillance de la masse lors du processus de séchage dans le séchoir est du type VOYAGER OHAUS avec une précision de 0.1 g, celle utilisée pour la surveillance des masses dans l'étuve est du type PIONEER OHAUS avec une précision de 0,001g. (fig.IV.3)



Figure IV.1. Hygromètre Opus 208 pour la mesure des humidités relatives



Figure IV.2. Anémomètre Testo 425



Balance Précision OHAUS Pioneer



Figure IV.3. Balance de précision OHAUS Pioneer

IV.2. Données et analyse des performances

a. Teneur en eau

La teneur en eau initiale calculée à base sèche M_i est la masse de l'eau présente dans le produit par unité de masse de la matière sèche dans le produit ; elle est calculée par l'équation (IV.1). La teneur en eau instantanée M_t à un moment donné t à base sèche est calculée à l'aide de équations (IV.2). Avec W_0 masse initiale de l'échantillon, W_d masse de la matière sèche et W_t masse de l'échantillon à l'instant t .

$$M_i = \frac{(W_0 - W_d)}{W_d} \quad (\text{IV.1})$$

$$M_t = \frac{(W_t - W_d)}{W_d} \quad (\text{IV.2})$$

c. La teneur en eau réduite

La teneur en eau réduite M_R est calculée à partir de la teneur en eau initiale M_i , la teneur en eau instantanée M_t ainsi que la teneur en eau à l'équilibre M_e . Le calcul de M_R est donné par l'équation (IV.3)

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (IV.3)$$

IV.3. Formulation mathématique

IV.3.1. Modélisation mathématique de la cinétique de séchage

Etant donné la complexité des phénomènes intervenant lors du séchage d'un produit, plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes du séchage, Les équations de ces modèles expriment l'évolution de la teneur en eau réduite M_R en fonction du temps.

La teneur en eau initiale M_i , la teneur en eau instantanée M_t ainsi que la teneur en eau à l'équilibre M_e sont utilisées pour le calcul de la teneur en eau réduite M_R pour la quelle les auteurs proposent des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes de séchage.

Dans le processus de sélection des modèles mathématiques qui prédisent le mieux le comportement cinétique du séchage de la viande caméline, on a utilisé le coefficient de détermination R^2 , le paramètre réduit du Chi-carré χ^2 et l'erreur moyenne quadratique RMSE afin de déterminer la qualité du modèle d'ajustement mathématique. Plus les valeurs de R^2 sont grandes et celles de χ^2 et de RMSE petites plus le modèle est juste. La méthode de calcul de ces trois paramètres statistiques est indiquée dans les équations (IV.4), (IV.5) et (IV.6)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{Ri} - M_{Rpre,i})^2}{(M_R - \overline{M_R})^2} \quad (IV.4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{Rexp,i} - M_{Rpre,i})^2}{N - n} \quad (IV.5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{Rexp,i} - M_{Rpre,i})^2}{N}} \quad (IV.6)$$

Avec $M_{Rexp,i}$ i^{ème} valeur expérimentale de la teneur en eau réduite calculée avec l'équation, $M_{Rpre,i}$ i^{ème} valeur de la teneur en eau réduite obtenue par modélisation mathématique, $\overline{M_R}$ la

moyenne des mesures, N étant le nombre des observations et n nombre des constantes du modèles.

IV.3.2. Formulation mathématique du rendement de séchage

Le rendement de séchage par convection forcée représente le rapport de l'énergie la puissance d'évaporation de l'humidité du produit à l'énergie d'entrée (irradiation reçue par la surface du capteur solaire et la puissance P_f consommée par la pompe à air (ventilateur)). Il est calculé par la formule (IV. 7)

$$\eta_d = \frac{W_d \frac{dM_t}{dt} L}{A_s I_g + P_f} \quad (\text{IV. 7})$$

Avec :

W_d : La masse sèche du produit (kg),

$\frac{dM_t}{dt}$: La variation de la teneur en eau en fonction du temps exprimant la vitesse de séchage,

L : La chaleur latente d'évaporation de l'eau(J/kg) .

P_f : Puissance consommée par le ventilateur (w)

I_g : Irradiation solaire globale (w/m²)

A_s : Surface du capteur solaire

IV.4. Résultats

Les différents résultats vont être reportés selon les différents axes de l'expérimentation.

IV.4.1. Conditions météorologiques et température de fonctionnement

Les températures ambiantes et les irradiations solaires des journées d'expérimentations en juillet et novembre sont respectivement représentées aux figures IV.4. (a) et IV.1. (b).

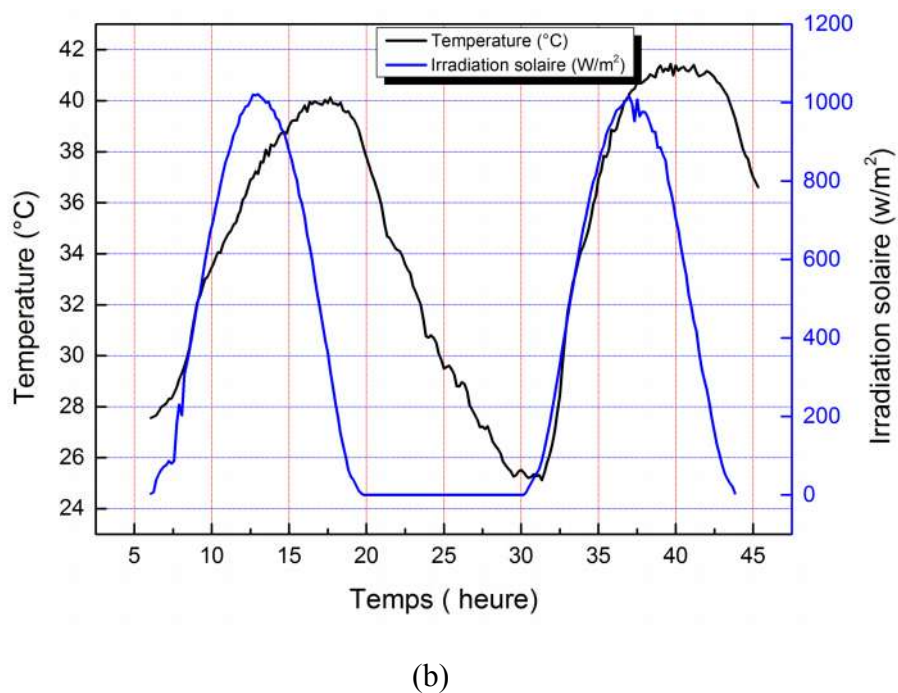
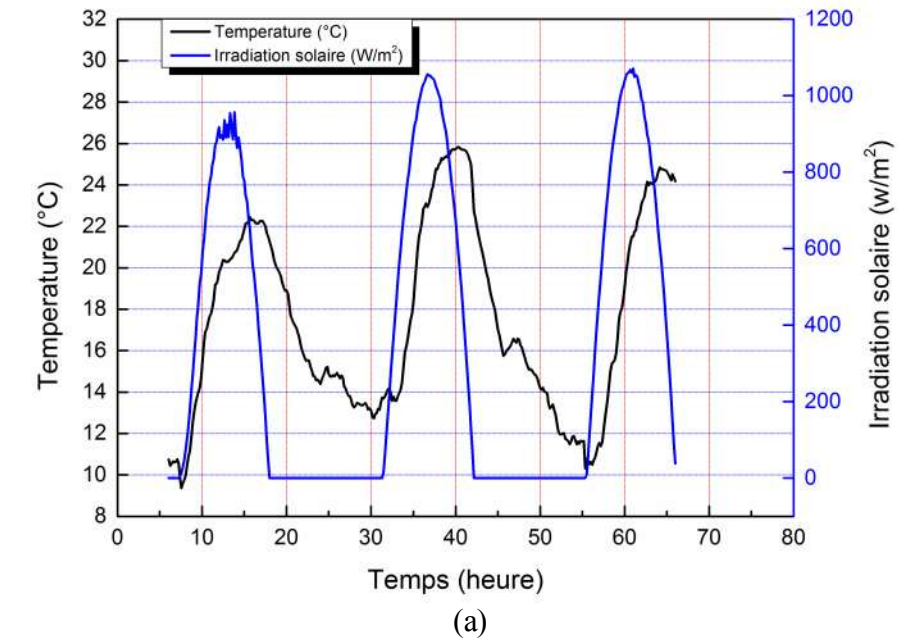
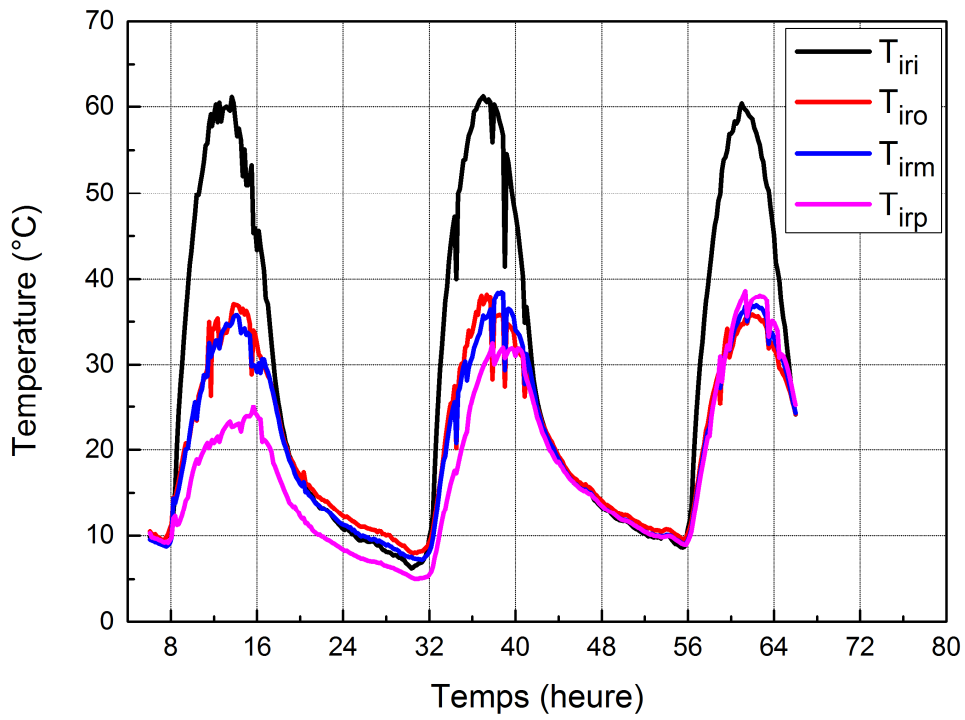


Fig.IV.4. : Températures et des irradiations solaires (a) Mois de novembre,(b) Mois de juillet

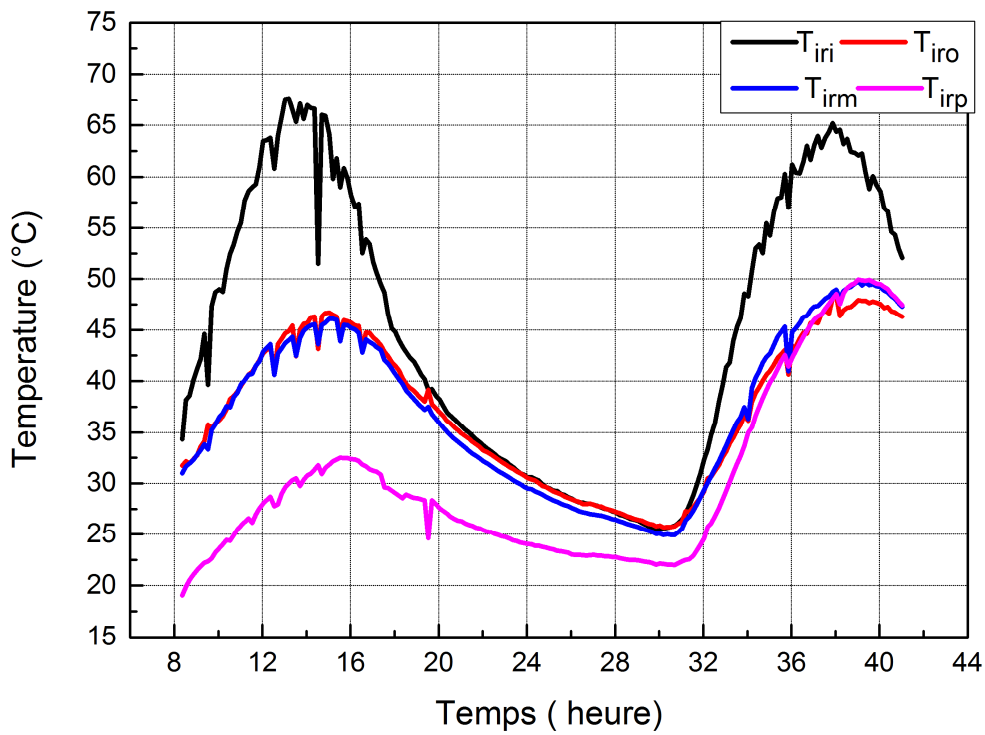
Sur la figure (IV.4.), les courbes de l'irradiation solaire globale incidentes sur un plan incliné sont lisses indiquant des journées au ciel clair sans nuages, avec des valeurs maximales supérieures à 1000 W/m^2 . Les températures sont dans la moyenne saisonnière propre au climat saharien variant entre 11°C à 26°C pour le mois de novembre et entre 25°C à 41°C pour le mois de juillet. Les maximums des températures et des irradiances solaires sont enregistrés autour du midi solaire.

IV.4.2. Températures de fonctionnement

L'évolution de la température au niveau des différents éléments de la chambre indirecte, lors des expériences de juillet 2017 et de novembre 2017, est respectivement représentée sur les figures IV.5. (a) et (b). Les mêmes données relatives à la chambre de séchage direct sont respectivement représentées aux figures IV.6. (a) et IV.6. (b).



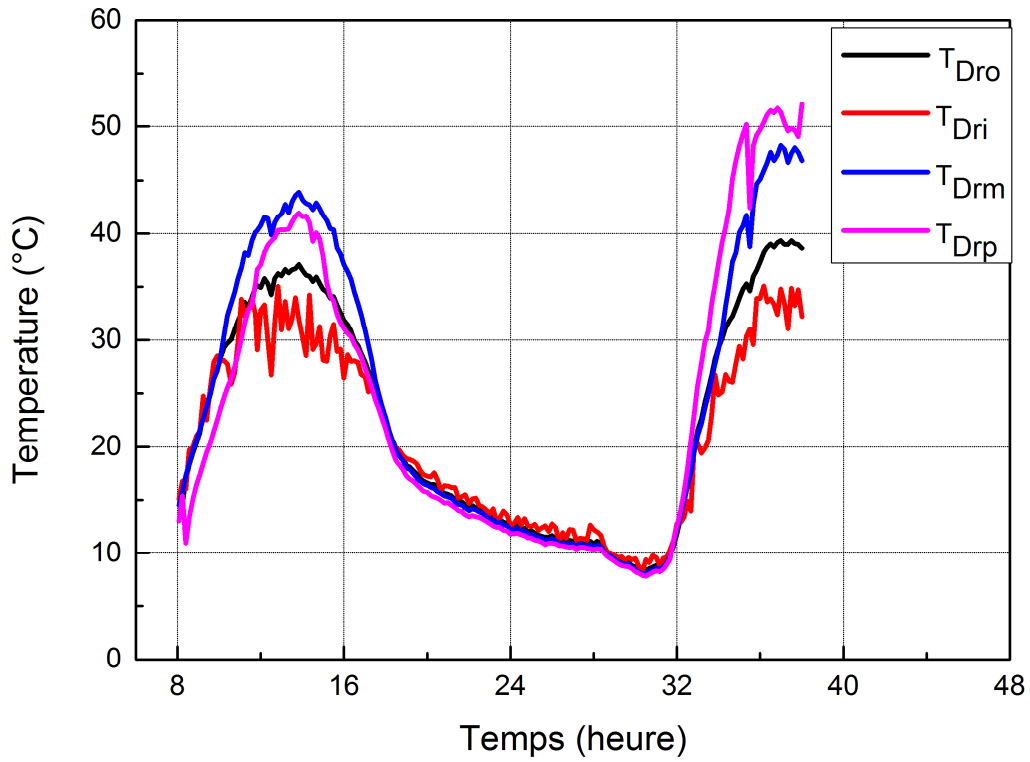
(a)



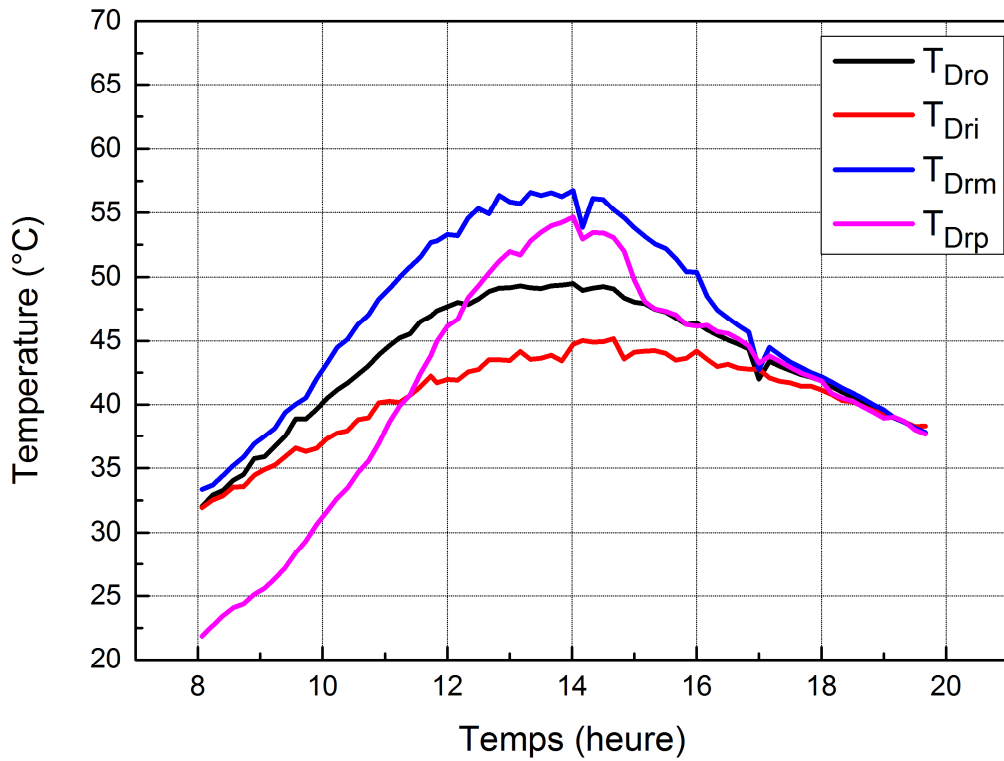
(b)

Fig. IV.5. Températures de fonctionnement de la chambre de séchage indirect lors des expériences de séchage: a) expérience de Novembre, b) expérience de Juillet

T_{iri} : Température de l'air à l'entrée de la chambre, T_{irm} : Température de l'air au milieu de la chambre T_{iro} :
Température de l'air à la sortie de la chambre T_{irp} : Température du produit à l'intérieur de la chambre



(a)



(b)

Fig.IV.6. Températures de fonctionnement de la chambre de séchage direct lors des expériences de séchage:(a) expérience de Novembre,(b) expérience de Juillet

T_{Dri} : Température de l'air à l'entrée, T_{Drp} : température du produit

T_{Drm} : Température de l'air au milieu, T_{Dro} : Température à la sortie de la chambre

Le processus de séchage dans la chambre de séchage indirect dure deux jours en juillet et trois en novembre. Sur les figures IV.5.(a) et IV.5.(b), les températures de l'air, respectivement en novembre et en juillet, sont indiquées depuis son entrée dans la chambre, puis au milieu et enfin à sa sortie, en prenant respectivement les températures décroissantes suivantes: T_{iri} , T_{irm} et T_{iro} . La température diminue dans la direction de cet axe de circulation de l'air en raison de l'humidité supplémentaire qui est chargée dans le flux d'air par l'eau évaporée sur son chemin à travers les claies chargées.

T_{iri} , la température d'entrée dans la chambre de séchage indirect, évolue avec les mêmes allures des profils journaliers en juillet et en novembre avec des maximums respectifs de 67 ° C et de 60 ° C. Les profils de température du produit T_{irp} ont augmenté d'un jour à l'autre du processus expérimental: la même quantité de chaleur est fournie par l'air de séchage (les profils T_{iri} sont du même ordre pour les différents jours d'expérimentation) au produit dont la masse diminue considérablement avec le temps, l'énergie interne de cette masse augmente générant l'augmentation de leur température. À la fin du processus de séchage, T_{irp} augmente pour atteindre T_{iri} (45°C et 35°C comme valeurs maximales en juillet et novembre respectivement), ce qui permet d'atteindre l'équilibre thermique de la fin du séchage.

Dans le milieu de la chambre de séchage direct, le flux d'air est chauffé par exposition directe aux rayons du soleil. C'est pourquoi la température en ce point T_{drm} augmente très rapidement par rapport à la température à l'entrée T_{dri} qui est toujours du même ordre que la température ambiante T_{am} (Fig.IV.6. (a) et (b)). Elle atteint ses valeurs maximales autour de 14:00 h. En novembre, T_{drm} atteint un maximum égal à 44 ° C le premier jour et à 48 ° C le deuxième jour, en juillet, il est égal à 57 ° C. La charge d'humidité supplémentaire à la sortie de la chambre, en raison du processus de séchage, fait diminuer la température T_{dro} enregistrée à la sortie de la chambre de séchage direct et ce, par rapport à l'entrée et au milieu de la chambre. Dans l'ensemble des expériences, la température du produit augmente en fonction du milieu de la chambre T_{drm} . Toutes les températures enregistrées en juillet sont supérieures à celles de novembre; cela est lié aux conditions météorologiques propres à chaque saison.

Dans des conditions normales, le séchoir direct enregistre des températures plus élevées que celle de l'indirect, le premier étant directement exposé à l'irradiation solaire.

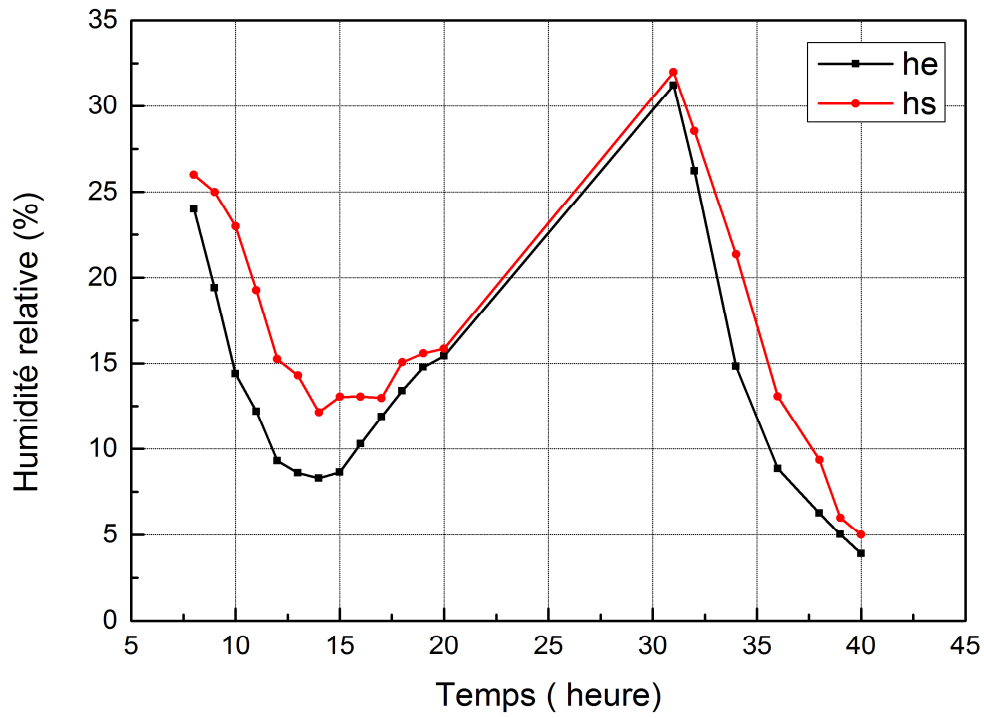
IV.4.3. Degré hygrométrique.

Au cours du processus de séchage, l'humidité de l'air (relative et absolue) varie en chaque point de la chambre de séchage. Avec les valeurs élevées de la température de l'air, l'humidité de ce dernier est réduite par l'effet de variation de sa densité. Les sondes de mesures de l'humidité sont visibles sur la figure (IV.7.) où l'on peut voir distinctement celle placée à la sortie de la chambre de séchage indirect.

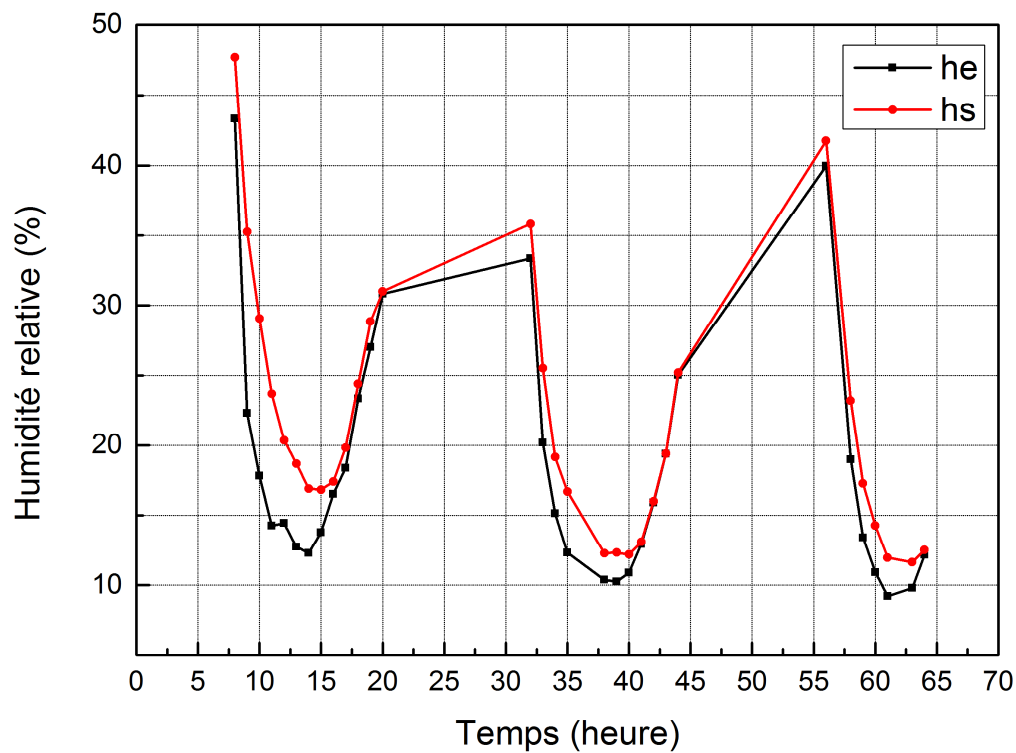


Fig. (IV.7.).Sonde de l'appareil de mesure de l'humidité de l'air dans la chambre de séchage indirect.

L'humidité relative enregistrée à l'entrée et à la sortie de la chambre indirecte pour les essais de juillet et de novembre est illustrée respectivement aux figures IV.8 (a) et (b).



(a)



(b)

Fig. IV.8. Evolution de l'humidité relative à l'entrée he et à la sortie hs de la chambre de séchage indirect:

(a) expérience de juillet, (b) expérience de novembre

Pendant la journée (Fig.8), l'écart de l'humidité entre l'air entrant et l'air sortant de l'enceinte de séchage indirect augmente avec le temps de séchage, en particulier pendant les heures de forte irradiation, lorsque les températures ambiantes sont maximales entraînant une diminution de l'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage (l'humidité de l'air est inversement proportionnelle à sa température, c'est-à-dire que plus la température de l'air augmente plus son humidité relative diminue). Le séchage entraîne une évaporation de l'eau contenue dans la viande, ce qui fait que l'air de séchage sort de la chambre de séchage avec une charge d'humidité supplémentaire. Entre 10h00 et 16h00, période de séchage maximal, les valeurs moyennes de la différence d'humidité entre l'entrée et la sortie de la chambre de séchage indirect sont égales à 7,45%, 2,73% et 3,6% respectivement aux trois jours de séchage en novembre. Cette différence est égale à 5,47% et 3,70% respectivement aux deux jours consécutifs du séchage en juillet. Après cette période, à l'approche du coucher du soleil, l'écart d'humidité diminue jusqu'à s'annuler en fin de journée en raison de l'absence de source de chaleur. La quantité d'eau évaporée au premier jour est plus importante qu'au second compte tenu de la diminution de la teneur en eau au fil du temps; avec l'évolution du processus de séchage, la forte teneur en eau initiale contenue dans le produit diminue en raison de l'évaporation et le produit a de moins en moins d'humidité à céder.

IV.4.4. Cinétique de séchage

a. Construction de la courbe cinétique de séchage

La teneur en eau est le paramètre physique qui indique la progression du processus de séchage et l'état de séchage de notre produit. Elle diminue en fonction du temps de séchage. Les résultats obtenus se sont basés sur le suivi de la masse de la viande de chameau découpé en steaks fins d'une épaisseur de 1 cm et équitablement répartie sur les différentes claies (Figure IV.9).



Fig.IV.9. Viande cameline découpées et placée sur les claies

Cinq claies sont placées dans la chambre de séchage indirect. Elles sont superposées à égale hauteur l'une de l'autre, parcourues verticalement par l'air de séchage qui arrive du capteur solaire, entrant par le bas de la chambre. Une claie est placée dans la chambre de séchage direct. Sur toutes les claies, on peut voir les thermocouples placés à l'intérieur de la matière afin d'enregistrer l'évolution de la température du produit (Fig.IV.10.).



(a)



(b)

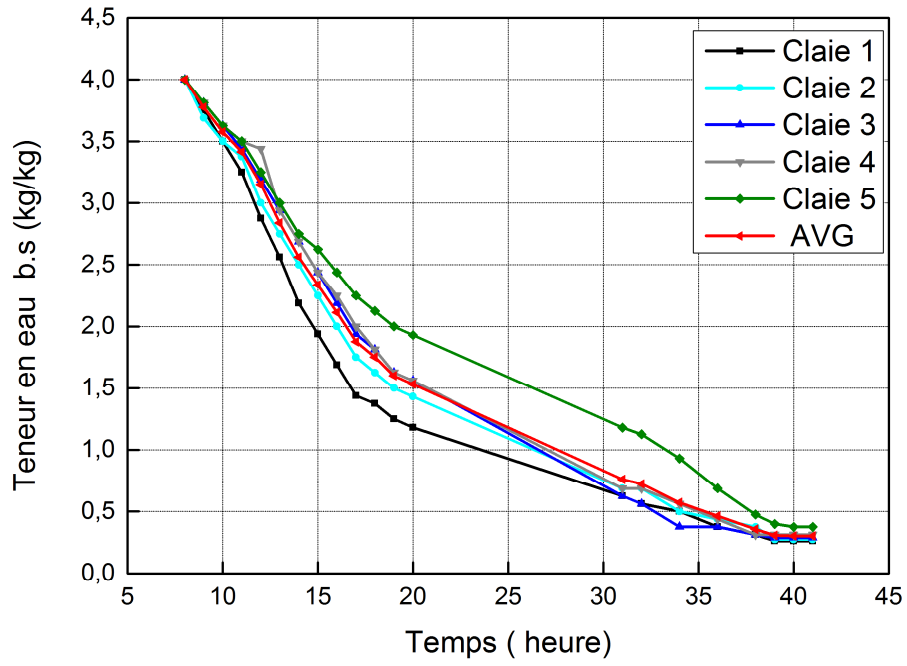
Fig.IV.10. La viande cameline chargée dans le séchoir : (a). Chambre de séchage indirect, (b).
Chambre de séchage direct

Une dernière claie est placée à ciel ouvert tel pratiqué dans le séchage traditionnel, pour pouvoir comparer la qualité microbiologique des différents modes de séchage (Fig. IV.11).

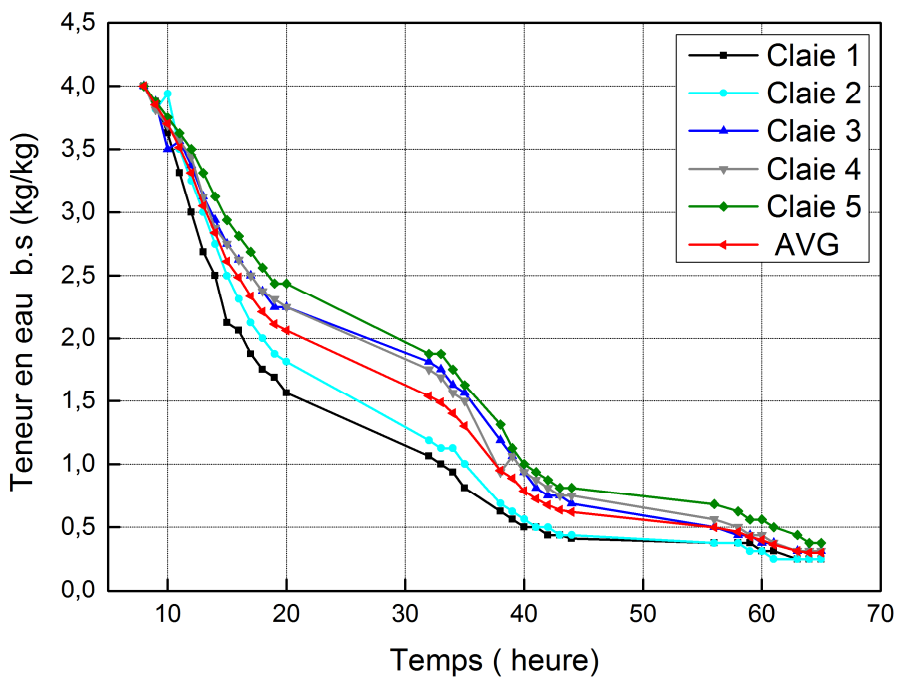


Fig. IV.11. Claie contenant viande à sécher à ciel ouvert

L'évolution de la teneur en eau à base sèche M_t pour chaque claie de la chambre de séchage indirect relative aux tests de juillet et novembre est respectivement présentée aux figures IV.12. (a) et (b). Ceux de la chambre de séchage direct sont respectivement représentés sur les figures IV.13. (a) et (b). Nous avons appelé AVG la moyenne de cette teneur calculée pour toutes les claies.

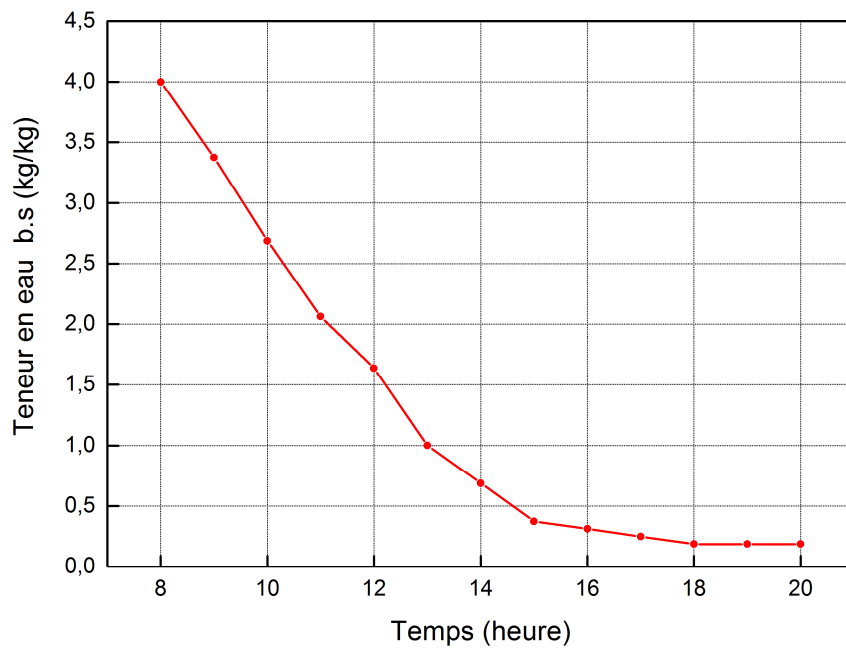


(a)

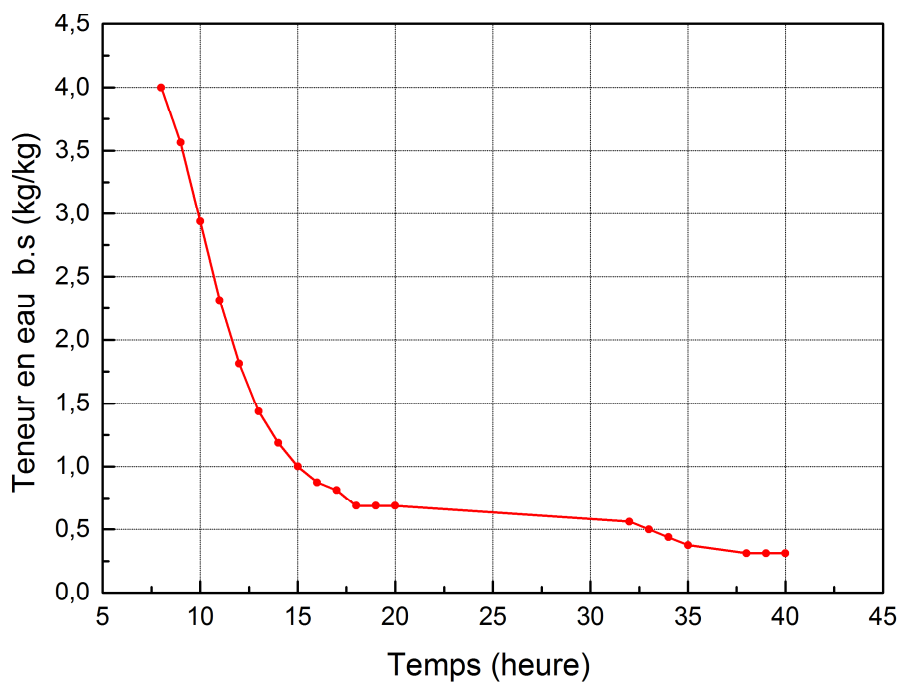


(b)

Fig. IV.12. Evolution de la teneur en eau à base sèche dans la chambre de séchage indirect pour chaque claie et de leur moyenne AVG: a) Expérience de juillet. b) Expérience de novembre.



(a)



(b)

Fig. IV.13. Evolution de la teneur en eau à base sèche dans la chambre de séchage direct

a) Expérience de juillet, b) Expérience de novembre.

Dans la chambre de séchage indirect, les plateaux sont numérotés par ordre croissant de bas (entrée du flux d'air) en haut (sortie du flux d'air). La teneur en eau à base sèche M_i diminue proportionnellement à la hauteur de placement de la claie le long de la chambre de séchage indirect: plus la claie est en bas, plus son séchage est rapide. Cette différence de vitesse de séchage est due au fait que plus l'air de séchage avance dans son cheminement à travers les étages de claies, plus il est chargé en vapeur d'eau et plus sa température diminue. Ceci est inversement lié à sa capacité à absorber une humidité supplémentaire. Pour tous les chiffres, la teneur en eau initiale à base sèche est de 4 kg d'eau / kg de matière sèche, ce qui représente environ 80% du poids total de la viande fraîche. En juillet (fig.IV.8. (a)), La moyennes AVG de la teneur en eau pour toutes les claies passe de 4 à 2 kg d'eau / kg de matière sèche en 8 heures; elle se stabilise après 31 heures pour une valeur de 0,3 kg d'eau / kg de matière sèche. En novembre (figure IV.8. (b)), l'AVG diminue de moitié en 12 heures et atteint la valeur d'équilibre de 0,3 kg d'eau / kg de matière sèche après 54 heures. Le temps de séchage indirect en novembre est le double de celui de juillet.

Dans la chambre de séchage direct, pour l'expérience de juillet (figure IV.9. (a)), M_i atteint la valeur de 2kg / kg en 3 heures et se stabilise pour la valeur de 0,18 kg / kg en 10 heures marquant la fin du séchage. Pour l'expérience de novembre (figure IV.9. (b)), M_i diminue de moitié après 4 heures. La teneur en humidité est égale à 0,5 kg / kg après 25 heures et se stabilise à la valeur de 0,3 kg / kg après 30 heures de séchage. En novembre, le temps du séchage direct est trois fois plus élevé qu'en juillet, cela est lié aux conditions météorologiques: En été, le rayonnement solaire étant plus intense, donc les températures plus élevées. Plus la saison est chaude, plus la température dans le séchoir est haute et plus la vitesse de séchage est importante. En Irak, Assad et al (2013) ont séché de la saucisse de chamelle dans un séchoir solaire indirect en novembre, où les conditions météorologiques sont assez similaires à celles d'Adrar au même mois. Le temps de séchage pour 6 kg de produit était de 7 jours, ce qui correspond à 1,6 jour / kg de viande. Pour notre installation, le séchage de 4 kg de viande de chameau fraîche a pris 54 heures, ce qui correspond à une moyenne de 13,5 heures / kg de viande. En juillet, cette période de séchage est sensiblement améliorée; c'est environ 7,75 heures / kg de viande fraîche de chameau.

a. La modélisation mathématique de la cinétique de séchage solaire

Pour prédire le comportement des produits à forte teneur en eau, certains auteurs préconisent l'utilisation des modèles semi-empiriques pour approcher leur cinétique de séchage [75]. Cela est dû au fait qu'ils subissent une contraction et une déformation très importantes au cours de leur séchage.

L'objectif d'une telle modélisation est de simuler une cinétique globale de séchage du matériau, tout en donnant des informations réalistes sur le champ interne de teneur en eau. La modélisation se fait sur la teneur en eau réduite M_R du produit. Dans notre cas, l'évolution de M_R pour la viande séchée dans la chambre de séchage indirect est déterminée pour AVG qui représente la moyenne des teneurs en humidité de toutes les claies de la chambre de séchage indirect, par l'équation (IV.3). La même procédure est adoptée pour l'évolution de la teneur en eau réduite dans la chambre de séchage direct. Les différentes valeurs de M_R de la viande obtenues par voie d'expérimentation dans les deux enceintes de séchage ont été ajustées à l'aide de plusieurs modèles mathématiques pris dans la littérature. Comme la cinétique de séchage présente des évolutions différentes selon les conditions climatiques bien différentes des saisons d'expérimentations (juillet et novembre), le modèle mathématique le plus approprié pour approcher la cinétique de séchage de chaque essai sera différent.

Les modèles semi-empiriques ne sont que des fonctions du temps (t). Nous présentons dans le tableau IV.1. les six modèles les plus utilisées dans la littérature. Le tableau IV.2. indique les valeurs des différents coefficients de justesse des modèles mathématiques utilisées pour approcher les valeurs expérimentales des teneurs en eau réduites pour la chambre de séchage indirect, pour les deux essais du mois de juillet et du mois de novembre

Tableau IV.1. Modèles mathématiques caractérisant le séchage solaire

Nom du Modèle	Expression du modèle	Référence
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Krokida et al. (2002); Kabganian et al.
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Chinnan, M.S., 1984
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	Yagcioglu, A., et al., 1999
Two terms	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$	Henderson, S.M., 1974
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Yaldiz and Ertekin (2001); Tulasidaset al. (1993); Midilli et al. (2002);
Midilli-Kucruk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., 2002

Tableau IV.2. Précision des modèles décrivant la cinétique de séchage pour la chambre de séchage indirect.

	Modèle	Coefficients				Précision du modèle		
		a	K1	b	K2 (n)	χ^2	R ²	RMSE
	Lewis		0.0973			0.0181	0.9909	0.0356
	Henderson and Pabis	2.411	0.0965	-	-	0.0177	0.9912	0.0323
	Page		0.0871		1.206	0.0109	0.9942	0.0266
Juillet	Midilli-Kucruk	2.199	0.0865	-0.0015	1	0.0109	0.9946	0.0261
	Logarithmic	2.242	0.0825	-0.07136	-	0.0107	0.9947	0.0260
	Two terms model	-26.15	0.0568	28.26	0.0586	0.0107	0.9947	0.0267
	Lewis		0.581			0.0471	0.9812	0.0437
	Henderson and Pabis	1.662	0.0594	-	-	0.0463	0.9849	0.0407
	Page		0.2524		0.6485	0.4011	0.9863	0.0395
Novembre	Midilli-Kucruk	3.479	0.3993	-0.00186	0.5145	0.0372	0.9879	0.0378
	Logarithmic	1.627	0.0551	-0.0264	-	0.0448	0.9854	0.0407
	Two terms model	1.541	0.0567	0.6616	0.2564	0.0446	0.9855	0.0414

Le tableau IV.3. indique les valeurs des différents coefficients de justesse des modèles mathématiques utilisées pour approcher les valeurs expérimentales des teneurs en eau réduites pour la chambre de séchage direct, pour les deux essais du mois de juillet et du mois de novembre.

Tableau IV.3.Précision des modèles décrivant la cinétique de séchage pour la chambre de séchage direct.

	Modèle	Coefficients				Précision du modèle		
		a	K1	b	K2 (n)	χ^2	R ²	RMSE
Juillet	Lewis		0.3412			0.0410	0.9762	0.0695
	Henderson and Pabis	13.92	0.3014	-	-	0.0375	0.9703	0.0646
	Page		0.2015		0.8941	0.0139	0.9904	0.0407
	Midilli-Kucruk	7.159	0.2189	-0.0091	1	0.0121	0.9904	0.0389
	Logarithmic	6.768	0.199	-0.2117	-	0.0111	0.9912	0.0373
	Two terms model	-4.255	0.0782	8.964	0.1214	0.0119	0.9906	0.0412
Novembre	Lewis		0.2251			0.0163	0.9817	0.0370
	Henderson and Pabis	7.295	0.2283	-	-	0.0188	0.9876	0.0354
	Page		0.248		1.1360	0.0095	0.9932	0.0302
	Midilli-Kucruk	2.805	0.0282	0.00143	1.673	0.0095	0.9937	0.0270
	Logarithmique	8.443	0.2479	0.03163	-	0.0139	0.9908	0.0315
	Two terms model	7.795	0.2361	0.00368	-0.0680	0.0131	0.9914	0.0317

Les meilleurs résultats ont été transcrits en gras. Il en ressort d'après les critères statistiques de justesse des modèles semi-empiriques utilisés que le modèle logarithmique permet la meilleure approche pour les essais du mois de juillet, pour le séchage direct et indirect au même titre. Le modèle de Midilli-Kucruk est le modèle qui décrit le mieux la cinétique de séchage durant les expérimentations du mois de novembre. On peut en déduire que l'effet des conditions climatiques sur les teneurs en eau en fonction du temps, c'est-à-dire sur la cinétique de séchage dans notre cas a plus d'impact que celui du mode de séchage. Voilà pourquoi le même modèle est représentatif pour les deux modes selon chaque période.

La figure (IV.10.) ci-dessous montre la courbe de l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps obtenue par expérimentations et le modèle mathématique choisi pour l'approcher.

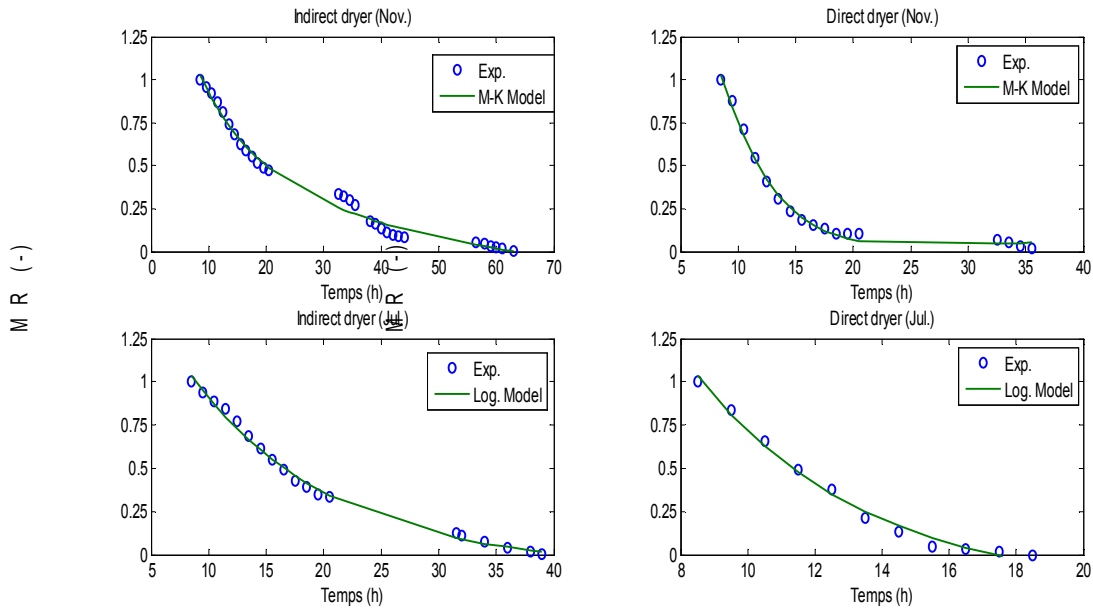
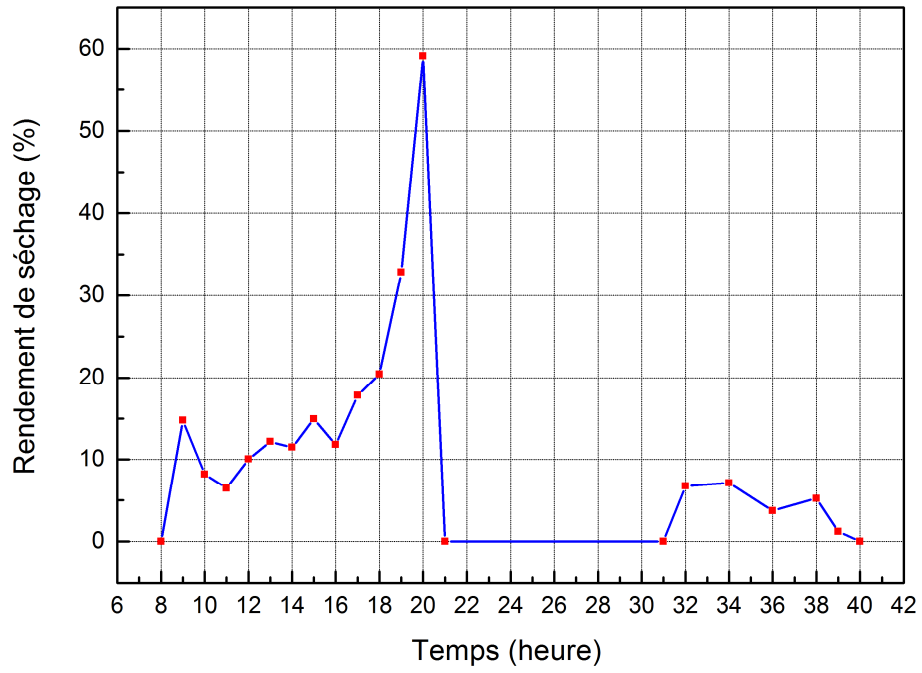


Fig. IV.14. Lissage de la courbe d'évolution de la teneur en eau réduite pour différentes expériences. Sur la figure IV.14, on trouve confirmation des résultats indiqués dans le Tableau (IV.2) et le tableau (IV.3) et que le modèle logarithmique approche de façon très appréciable les courbes de la teneur en eau réduite en juillet, pour le mois de novembre, le plus adapté pour les deux modes de séchage direct et indirect est le modèle de Midilli-Kucruk.

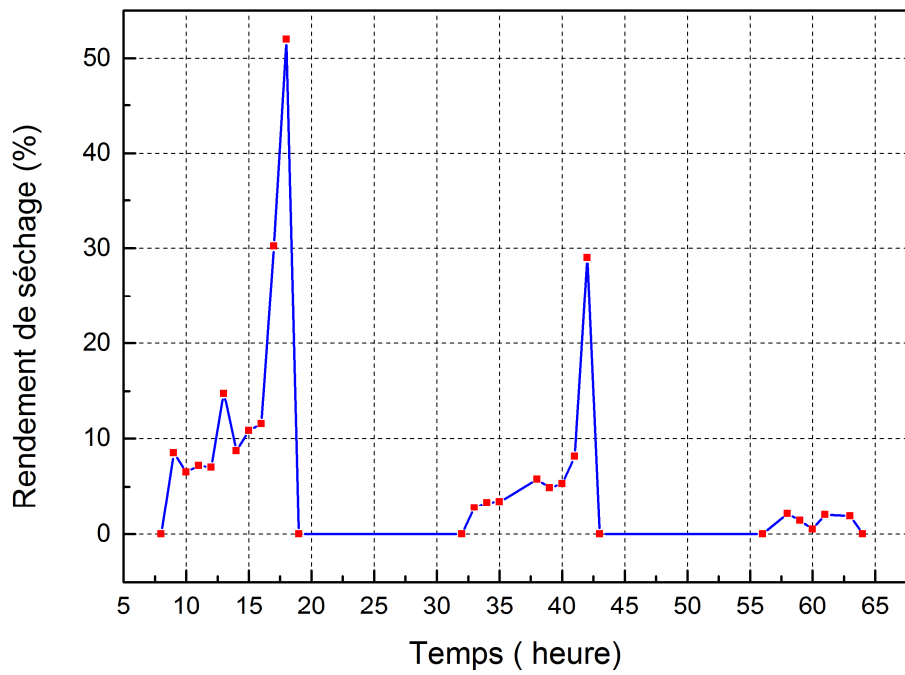
IV.4.5. Le rendement de séchage

La performance du système en termes de rendement énergétique a été estimée à travers l'évaluation du rendement de séchage de la chambre de séchage direct et celui de la chambre de séchage indirect à chaque heure de la journée, puis à travers la moyenne de ces valeurs calculées sur la journée.

Le rendement de séchage calculé à chaque heure de la journée, permet de suivre point par point les performances du système en fonction de la particularité de l'irradiation solaire et de la température de chaque période de la journée. La figure (IV.15 (a) et (b)) décrit l'évolution du rendement de l'enceinte de séchage indirecte respectivement pour l'expérience de juillet et de novembre. Les mêmes performances du séchoir direct en juillet et en novembre sont respectivement illustrées à la figure (IV.16 (a) et (b)).

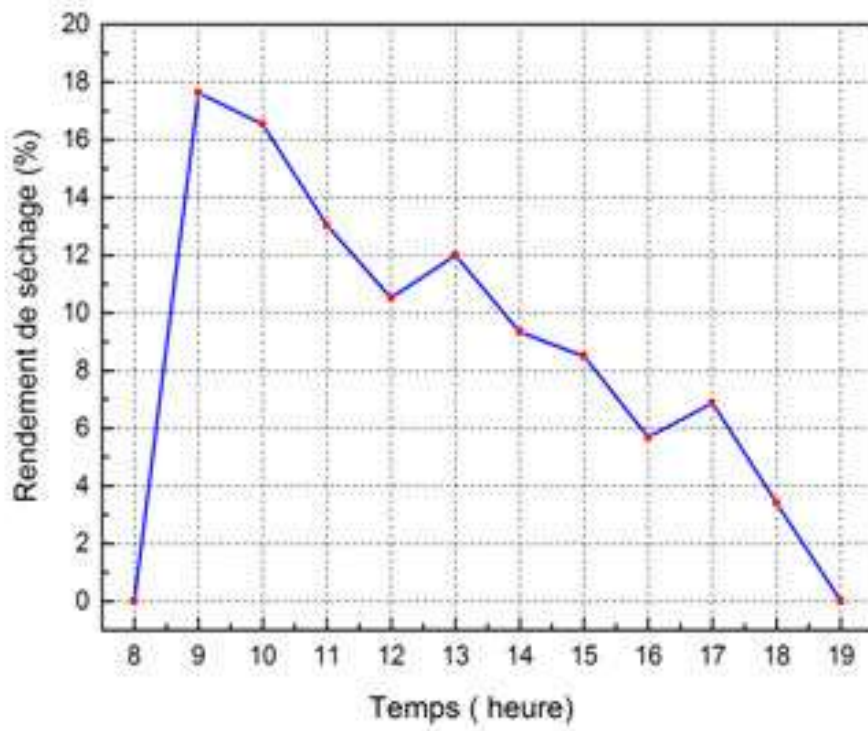


(a)

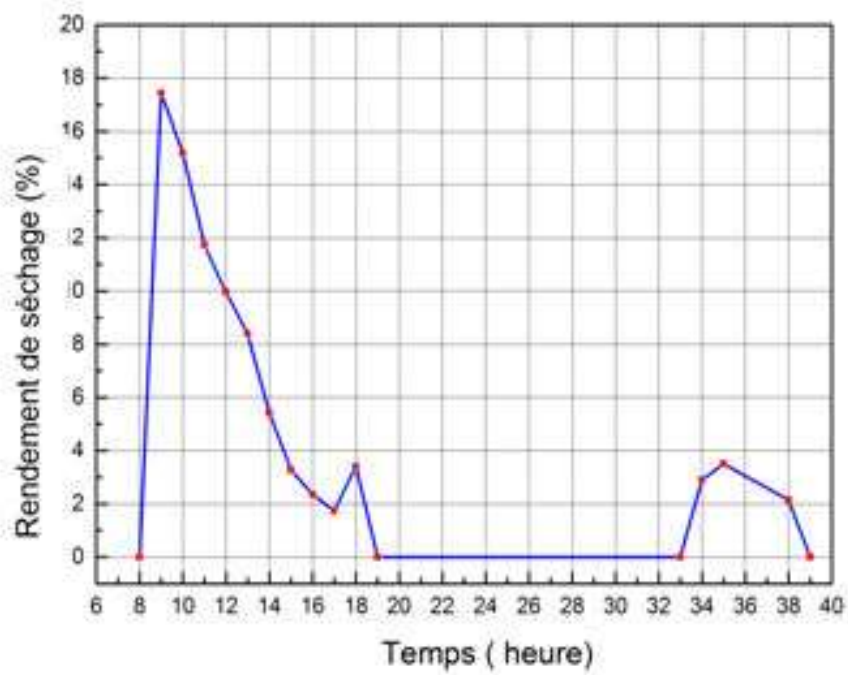


(b)

Fig. IV.15. Evolution du rendement de séchage: (a) chambre de séchage indirect à l'expérience de juillet, (b) chambre de séchage indirect à l'expérience de novembre



(a)



(b)

Fig. IV.16. Evolution du rendement de séchage: (a) chambre de séchage direct à l'expérience de juillet, (b) chambre de séchage directe pour novembre

En novembre, en rapport avec les températures, la durée du séchage est supérieure à celle de juillet; Cependant, pour chacune des chambres, les tendances d'évolution du rendement de séchage sont similaires dans les deux saisons d'expérimentation.

La moyenne journalière du rendement de séchage des chambres, calculée pour chaque expérience est exprimée dans le tableau IV.4.

Dans la chambre indirecte, l'efficacité du système augmente graduellement sur l'intervalle de temps compris entre le début du séchage et le coucher du soleil. Au premier jour, la moyenne du rendement de séchage calculée sur toute la journée est autour de 18,34% en juillet et de 15,72% en novembre (Tableau IV.4.) et Figure IV.15 (a) et (b). Ces valeurs diminuent graduellement au cours des jours suivants; jusqu'à la valeur de 1.6 % en novembre (troisième jour) et 4.81% en juillet (deuxième jour) : à mesure que la durée du temps s'écoule, la quantité d'eau résiduelle à extraire de la viande par séchage diminue également et avec, diminue le rendement du séchage. De plus, cette eau résiduelle dans les pores du produit est une eau de type liée, donc s'ajoute la complexité d'extraire l'eau à ce stade.

Au coucher du soleil, le rendement atteint des valeurs extrêmes (80%) car le séchage indirect se poursuit (en partie grâce aux performances du capteur solaire favorisé par le lit de galets) malgré la diminution du rayonnement solaire.

Tableau IV.4. La moyenne journalière du rendement de séchage relatif à chaque expérience

Jour d'expérimentation	La moyenne journalière du rendement du séchage indirect (%)		La moyenne journalière du rendement du séchage direct (%)	
	Juillet	Novembre	Juillet	Novembre
1^{er} jour	18.34	15.72	10.35	7.88
2^{ème} jour	4.81	7.84	-	2.84
3^{ème} jour	-	1.6	-	-

Pour la chambre de séchage direct, en juillet, le poids de la viande s'est stabilisé aux 10 premières heures du processus (Fig. IV.16. (a).) Avec une moyenne du rendement de séchage égale à 10,35%. En novembre (Fig. IV.16.(b)), le séchage est étalé sur deux jours avec une moyenne de 7,88% et 2,84% respectivement. En saison chaude, l'efficacité du processus de séchage est plus élevée: le temps de séchage est plus rapide, ce qui permet au système d'être plus efficace.

[76] a mis au point un séchoir solaire indirect à convection forcée intégré avec un milieu de stockage de chaleur sensible poreux; l'efficacité moyenne du séchoir était de 19%. La performance du séchage indirect que notre système a atteint en novembre est du même ordre de grandeur.

Conclusion

Le quatrième chapitre nous a renseignés sur les cinétiques de séchage et les rendements qui permettent de statuer sur l'efficacité du dispositif de séchage réalisé. Cependant, il est nécessaire à coté de cela, d'investir la relation fondamentale qui gère l'interaction entre l'activité de l'eau et la teneur en eau du mélange d'eau et de matière, à un certain point de température et de pression. Cela passe par la construction des isothermes de sorptions qui renseignent sur des éléments énergétiques et cinétiques supplémentaires aux éléments obtenus ci-dessus. C'est un moyen important qui permet de prévoir et d'évaluer la stabilité physique, chimique et microbiologique et les changements de qualité des aliments pendant la transformation, ainsi que pendant le stockage. Le travail mené dans cette perspective est entrepris dans le chapitre suivant.

Chapitre V.

ISOTHERMES DE SORPTION

La stabilité microbiologique et physico-chimique des produits dépend de leur activité d'eau a_w qui indique la disponibilité de l'eau dans un produit. L'activité de l'eau dans un aliment est équivalente à l'humidité relative de l'air lorsqu'il est en équilibre avec le produit. Un processus de séchage vise à diminuer la valeur de a_w pour mieux conserver le produit. La relation fondamentale qui décrit cette interaction entre l'eau contenue et un produit est la relation qui existe entre l'activité de l'eau et la teneur en eau du mélange d'eau et de matière, à un certain point de température et de pression[77]. Cette relation est appelée isotherme de sorption de l'eau. Elle est obtenue sur la base de la teneur d'eau de l'aliment à l'équilibre en fonction de l'humidité relative. C'est un moyen essentiel pour prévoir et évaluer la stabilité physique, chimique et microbiologique et les changements de qualité des aliments pendant la transformation, ainsi que pendant le stockage[78][79]. Ces courbes sont aussi d'un grand intérêt pour le processus de séchage, pour le stockage, l'emballage et le mélange du produit. 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[80]. La connaissance de cette quantité de chaleur totale est importante pour le dimensionnement des équipements de séchage et de stockage dans une moindre mesure[9]. Ce chapitre décrit la méthode d'obtention et la construction des courbes de désorption de la viande cameline à différentes températures. Des généralités de bases seront décrites sous formes de définitions en préambules à ce chapitre.

V.1. GÉNÉRALITÉS SUR LES PHÉNOMÈNES DE SORPTION

V.1.1. Activité de l'eau

L'activité de l'eau est définie comme l'indicateur de la disponibilité de l'eau dans un produit. Elle exprime le degré de liberté de l'eau retenue de différentes façons dans un produit hygroscopique. 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 micro-organismes 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 (V.1) :

$$a_w = \frac{p_v}{P_{vs}} = \frac{HR (\%)}{100} \quad (V.1)$$

p_v désigne la pression de vapeur contenue dans le produit [Pa]

P_{vs} désigne la pression de vapeur saturante de l'eau pure à la même température [Pa] .

HR : Humidité relative de l'air (%)

V.1.2. La teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau hygroscopique ou l'humidité absolue est définie par la masse d'eau contenue dans un produit exprimée en pourcentage de la masse sèche de ce produit. Cette valeur importante pour tous les produits vendus au poids est exprimée par l'équation (V.2.) :

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (V.2)$$

X_{eq} : Tenenur en eau d'équilibre (% ms)

M_h : masse humide (kg)

M_s : masse sèche (kg)

V.1.3. L'isotherme de sorption

V.1.3.1. Définition et construction des isothermes de sorption

La courbe représentant la teneur en eau d'un produit à une température donnée, en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre est appelée :

- Isotherme d'adsorption si elle est déterminée expérimentalement à partir d'un produit sec,
- Isotherme de désorption si elle est déterminée expérimentalement à partir d'un produit saturé en eau.

Ces courbes ne se superposent pas exactement suivant qu'il s'agit d'adsorption (gain d'eau par le produit) ou désorption (perte d'eau). L'expérience montre que ces courbes présentent une hystérésis dans la plupart des cas (figure II-1). En effet, pour une même humidité relative

de l'air, une différence apparaît entre la teneur en eau à l'équilibre d'un échantillon qui gagne l'humidité (sens de l'adsorption) et celle d'un autre qui en perd (sens de la désorption).

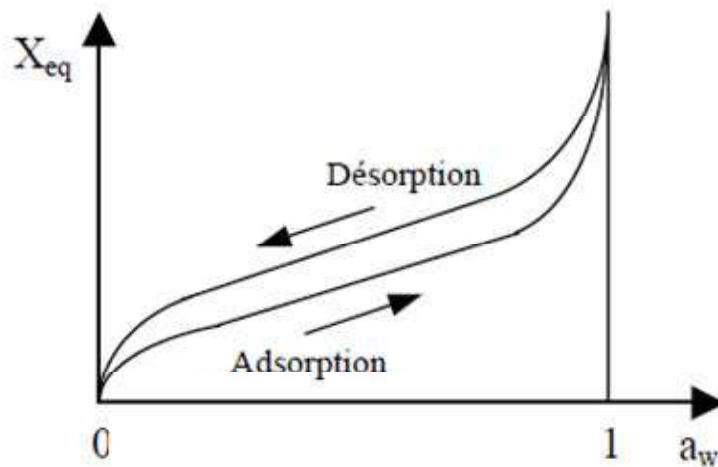


Figure V.1 : Isotherme de sorption illustration de l'hystérésis, Jannot, Y. (2006).

Ces courbes ont généralement des allures sigmoïdes et notamment pour les produits agro-alimentaires. Sur la figure II-2, on représente une isotherme typique des produits biologiques sur laquelle on distingue quatre zones[81] :

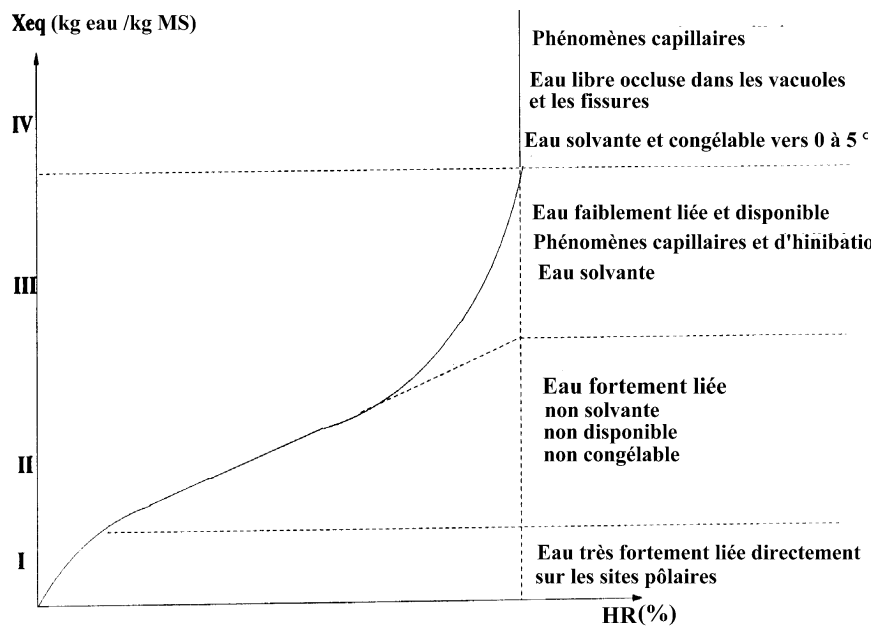


Figure V.2. Courbe de sorption générale d'après MULTON (1980)

- zone I aux basses humidités relatives : il y a fixation d'une première couche de molécules d'eau sur les groupements les plus hydrophiles. Ces molécules sont peu mobiles et par suite non disponibles aux réactions.
- zone II aux humidités relatives intermédiaires : il y a fixation de plusieurs couches de molécules d'eau tout en n'ayant que de l'eau liée. La déshydratation de cette eau dont la pression de vapeur est plus faible que si elle était pure, est plus difficile.
- zone III aux fortes humidités relatives : les molécules d'eau sont soumises à des liaisons faibles avec le substrat. L'eau est retenue par les forces capillaires. Puisque les activités de l'eau sont plus proches de l'unité, de l'eau libre apparaît dans le produit. Lors du séchage, cette eau se comporte comme si elle était pure.
- zone IV aux fortes humidités relatives où l'eau libre est présente dans les vacuoles et les fissures. L'eau est solvante et congelable aux environs de 0 à 5 °C.

Ces isothermes sont ensuite modélisées afin de pouvoir prédire le comportement du produit 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)

V.1.3.2. Modélisation mathématique des isothermes de désorption

De nombreux chercheurs ont développé plusieurs équations couramment utilisées pour décrire les isothermes de sorption [82] en testant la validité de différents modèles pour chaque isotherme et en comparant la précision de ces modèles.

L'isotherme de la viande caméline a été approchée par les modèles mathématiques couramment utilisés dans la littérature. Les modèles sont reportés dans le tableau V.1.

Tableau V.1. Modèles mathématiques utilisés pour décrire l'isotherme de désorption de la viande caméline

Nom du modèle	Equation	Référence
Henderson	$M_e = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{A} \right]^{1/B}$	(v.1) (Henderson,,1952)
Languir	$M_e = A \cdot \frac{C \cdot a_w}{1 + a_w}$	(v.2) (Werling, K. 1978)
Smith	$a_w = 1 - \exp\left(\frac{K - M_e}{n}\right)$	(v.3) (Aktas et al., 2005)
Oswin	$a_w = \left[1 + \left(\frac{A + B \cdot T}{M_e} \right)^c \right]^{-1}$	(v.4) (Oswin, C.R., 1946)
BET	$M_e = \frac{A \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot [1 + (C - 1) \cdot a_w]}$	(v.5) (Greg S et al., 1982)
GAB	$M_e = \frac{A \cdot B \cdot C a_w}{(1 - B \cdot a_w)(1 - B \cdot a_w + B \cdot C \cdot a_w)}$	(v.6) (Quirijins et al., 2004)

V.1.4. La chaleur isostérique de désorption

L'isotherme obtenue à différentes températures est communément et aisément utilisée pour déterminer la chaleur isostérique de désorption par l'application de l'équation de Clausius-Clapeyron [83]. La chaleur de désorption isostérique étant, par définition, l'énergie nécessaire pour éliminer les molécules d'eau de la matière du produit [9]. Elle est liée à un paramètre thermodynamique important, à savoir la chaleur de sorption isostérique nette, qui mesure l'énergie de liaison des forces entre les molécules de vapeur d'eau et le solide[84]. Au niveau où la chaleur de sorption isostérique nette s'approche de la chaleur latente de

vaporisation de l'eau, la teneur en eau du matériau correspondant est généralement considérée comme une indication de la quantité d'eau liée existant dans le produit [85].[86]. Labuza (1968) a montré que l'équation de Clausius-Clapeyron pouvait être appliquée pour prédire la valeur des isothermes a_w à n'importe quelle température si la chaleur de sorption correspondante était connue à teneur en eau constante.

V.1.4.1. Calcul de la chaleur isostérique

L'équation qui donne la chaleur isostérique nette est la suivante[86]:

$$Q_n^s = R \frac{T_{a1}T_{a2}}{T_{a1} - T_{a2}} \ln \left(\frac{a_{w2}}{a_{w1}} \right) \quad (V. 7)$$

La chaleur de sorption isostérique est calculée en ajoutant la chaleur latente de vaporisation pour eau pure L_v à la chaleur nette de sorption isostérique Q_n^s comme suit :

$$L_v = R(6887 - 5.31 \times T) \quad (V. 8)$$

V.1.4.2. Modélisation mathématique de la chaleur isostérique

Des modèles de régression non linéaire ont été utilisés pour ajuster les données expérimentales relatives aux isothermes de désorption et à la chaleur isostérique. La qualité des modèles adoptés a été évaluée avec le coefficient de corrélation R^2 . Plus la valeur de R^2 est élevée vers l'unité, meilleure est la qualité du modèle[87][88].

V.2. Détermination expérimentale des isothermes de désorption

V.2.1. Matériel et méthode

V.2.1.1. L'équipement

L'équipement expérimental utilisé est un four à température contrôlée modèle VACUCELL mmm (111 L de volume) dont la plage de température de l'air est de 200 ° C et une balance de précision du type de PIONEER OHAUS d'une de précision de 0,001 g. Une sonde de mesure des humidités Opus , des bocaux hermétiquement fermés de 11 cm de hauteur et 10 cm de diamètre contenant des solutions salines et destinées à offrir aux différents échantillons de viande différentes conditions d'humidité relative (Fig.V.3).



Fig.V.3. Les bocaux des solutions saline contenant les échantillons de viande et placés dans l'étuve

V.2.1.1.2.La préparation des échantillons

Les échantillons de viande sont découpés dans les biceps d'une carcasse d'un jeune chameau de 4 ans dont l'abattage a été effectué dans l'abattoir municipal du département d'Adrar au sud de l'Algérie. La viande a été coupée dans le sens des fibres en fines lanières et les échantillons ont été utilisés sans prétraitement.

V.2.1.3. La méthode

La teneur en eau à l'équilibre de désorption a été déterminée à 40, 50 et 60 ° C par la méthode gravimétrique statique recommandée, méthode standard pour l'obtention des données de désorption à l'équilibre[89],[90]. Dans cette méthode, les solutions salines saturées sont utilisées pour maintenir une humidité relative fixe à une température donnée. Les échantillons sont pesés chaque jour jusqu'à ce que trois mesures de masse consécutives donnent une différence inférieure à 0,001 g; la teneur en eau d'équilibre M_e est atteinte et l'expérience prend fin. Nous avons utilisé des solutions salines saturées couvrant un intervalle d'humidité relative compris entre 5% et 90%. Un bocal en verre est utilisé pour contenir chaque solution saline; il est rempli au quart de sa profondeur. Les bocaux sont placés dans le four thermostaté ajusté à une température fixe pendant 24 h de façon à amener les solutions salines à température stationnaire. Les échantillons sont suspendus dans des bocaux à 10 mm au-dessus de la surface du liquide pour les empêcher de se mouiller tel recommandé par [91]. La teneur en eau de chaque échantillon a été déterminée par séchage au four à 105 ° C[92]. Les valeurs d'humidité des solutions salines relatives à l'équilibre à différentes températures sont données dans le tableau V.2. La vérification des valeurs des humidités relatives dans les bocaux contenant des solutions saline a été effectuée à toutes les températures par une sonde Opus C

a également été effectuée en vérifiant la valeur d'activité de l'eau des sels standard à ces températures.

Tableau .V.2. Solutions salines saturées et les activités d'eau a_w utilisées dans la détermination des isothermes de désorption de la viande cameline à 40, 50 and 60°C.

Sel	Valeur de a_w		
	40°C	50°C	60°C
KOH	6.3	5.7	5.5
LiCl	11.2	11.2	11.0
KF	22.7	20.8	20.8
K ₂ CO ₃	42.3	45.6	45.0
NaCl	74.7	74.4	74.5
KCl	82.3	81.2	80.3
BaCl ₂	88.2	88.2	88.0
K ₂ SO ₄	96.4	95.8	95.7

V.4. Résultats

Les résultats relatifs à différents essais menés pour construire les isothermes de désorption, la modélisation de ces courbes ainsi que la méthode d'obtenir par ces résultats la chaleur isostérique correspondante et sa modélisation sont donnés dans ce qui suit.

V.4.1. Isothermes de désorption

V.4.1. 1. Réalisation des isothermes

La figure(V.3.) décrit les valeurs expérimentales des isothermes de désorption de la viande de chameau à différentes températures.

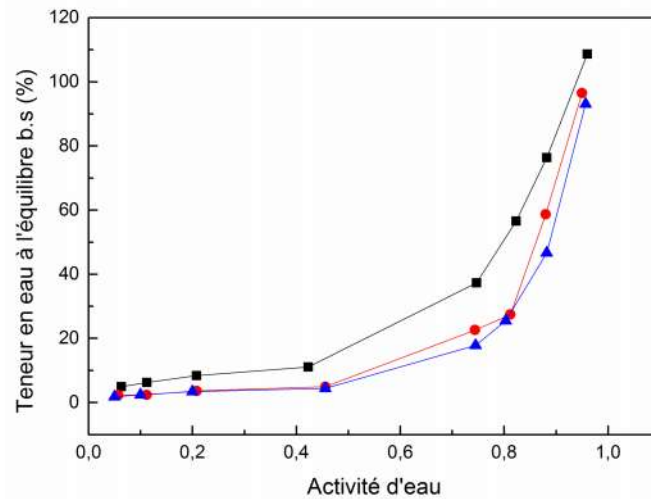


Fig .V.4. Isotherme de désorption de la viande caméline à 40 °C (■) , 50°C (●) , 60°C (▲)

Sur la figure V.4., sont représentées les valeurs des teneurs en eau mesurée à l'équilibre de la masse des échantillons de viande pour différentes valeurs d'activité d'eau a_w . On voit que les courbes de désorption de la viande caméline présentent la même tendance quelle que soit la température de désorption. Selon la classification BET, L'allure de la courbe isotherme obtenue et illustrée dans la figure V.4. suit un comportement de type III[9]. Ce type est observé sur la plupart des produits alimentaires. Les courbes montrent que la teneur en eau à l'équilibre augmente dans le même sens de l'augmentation de l'activité de l'eau et diminue avec la hausse de température. Cette diminution est d'autant plus évidente entre les isothermes de 40 ° C et 50 ° C pour toutes les valeurs d'activité de l'eau et devient plus appréciable entre les courbes de 50 ° C et 60 ° C pour les valeurs d'activité d'eau supérieures à 0,4. Cette relation inverse entre l'activité d'eau et la teneur en eau à l'équilibre est généralement observée pour les aliments riches en protéines[93]. Ce phénomène s'explique par le fait qu'à des températures élevées, les molécules sont dans un état d'excitation accrue, augmentant ainsi la distance qui les sépare et diminuant les forces d'attraction entre elles, ce qui entraîne une diminution du degré de sorption d'eau à une humidité relative donnée quand la température augmente[94].

V.4.1. 1.2. Modélisation des isothermes

La qualité des six modèles mathématiques utilisés pour s'approcher des données expérimentales de désorption de la viande caméline a été évaluée par le coefficient de corrélation R^2 calculé par l'équation (IV. 4) et dont les valeurs relatives à chaque modèle sont reportées dans le tableau (V.3) suivant les différents modèles.

Tableau V.3. Coefficient de corrélation R^2 des modèles de teneur en eau à l'équilibre pour la désorption de viande caméline

Temperature	Oswin	Bet	Gab	Smith	Henderson	Langumir
40 °C	0.9597	0.9631	0.9967	0.9185	0.9184	0.8298
50 °C	0.8197	0.8942	0.9960	0.8288	0.8039	0.5297
60 °C	0.9942	0.9748	0.9975	0.9305	0.9142	0.6536

D'après le tableau V.3. qui donne les valeurs du facteur de corrélation R^2 pour les différents modèles utilisés pour approcher les trois isothermes décrivant la désorption de la viande caméline, celui de GAB est celui qui décrit le mieux les résultats expérimentaux. Ceci est en accord avec la conclusion de certains auteurs selon laquelle le modèle GAB est le plus approprié pour la modélisation des isothermes de désorption des produits agroalimentaires [1].

Le tableau V.4. donne la valeur des paramètres du modèle GAB calculés à différentes températures. On y voit que le paramètre A du modèle Gab, qui désigne la teneur en eau de la monocouche d'adsorption, diminue quand la température augmente. Cela peut être justifié, tel que le propose [94], par le fait qu'à température élevée, certaines molécules d'eau sont activées à des niveaux d'énergie qui leur permettent de se séparer de leurs sites de sorption, diminuant ainsi la teneur en eau du produit.

Tableau V.4. Paramètres du modèle de Gab

Température (°C)	A	B	C
40	11,6747	1.028	0.1032
50	9,36327	0,96311	0,67586
60	7.65	0,91888	0,20249

V.5.2. La chaleur isostérique de désorption

V.5.2.1. Le calcul de la chaleur isostérique de désorption

L'évolution de la chaleur de désorption isostérique Q^s calculée par le modèle GAB en fonction de la teneur en eau est illustrée dans la figure V.4. : Q^s est compris entre 2438 et 3581 kJ / kg; sa valeur diminue lorsque la teneur en eau augmente, nous pouvons donc distinguer deux zones: pour des teneurs en eau supérieures à 40% à base sèche, l'énergie nécessaire pour éliminer cette eau n'est pas très élevée. En effet, le phénomène de sorption se produit initialement sur les sites disponibles les plus actifs donnant lieu à une interaction à haute énergie, ce qui peut expliquer qualitativement la diminution de la chaleur isostérique avec des quantités plus importantes d'eau échangées [95]. Une fois que ces sites sont occupés, la sorption se produit au niveau des sites les moins actifs, entraînant une diminution de la chaleur de sorption[96] .

Aux faibles valeurs d'humidité (inférieures à 40% dans la figure V.5.), l'augmentation rapide de la chaleur de sorption peut s'expliquer par l'existence de sites polaires très actifs à la surface desquels sont recouverts de molécules d'eau formant une couche mono moléculaire où l'eau est étroitement liée au matériau correspondant avec une énergie d'interaction élevée[97]. [77]. La chaleur isostérique de la désorption de l'eau de la viande tend donc progressivement à devenir asymptotique. Elle reste presque constante à l'approche de la chaleur de vaporisation de l'eau pure (2401 kJ / kg) à grande teneur en eau.

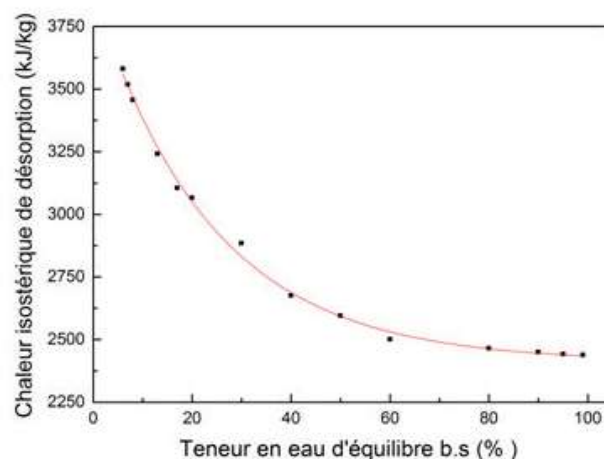


Fig.V.5.La chaleur isostérique de désorption de la viande caméline approchée par une exponentielle décroissante

V.5.2.2. La modélisation mathématique de la chaleur isostérique de désorption

Selon l'allure de la courbe de la chaleur isostérique de désorption décrite dans la figure V.5, la chaleur isostérique Q^s exprimée en fonction de la teneur en eau pour la désorption de viande caméline peut être approchée mathématiquement par une fonction de décroissance exponentielle de la teneur en eau. Le modèle d'ajustement que nous avons obtenu par est exprimé par l'équation (V.9):

$$Q^s = 1476,77 \exp\left(-M_e/23,86\right) + 2411,45(\text{KJ/Kg}) \quad (\text{V.9})$$

La valeur du coefficient de corrélation relatif à ce modèle mathématique de décroissance exponentielle est égal $R^2 = 0,9967$. Cette valeur très proche de 1 indique que le modèle choisit est un bon ajustement pour l'évolution de la chaleur isostérique de désorption pour la viande caméline.

Conclusion

Les taux finaux des protéines et des micro-organismes différent selon le mode de séchage et la saison, mais de façon générale, le dispositif réalisé permet d'obtenir un produit final de qualité micro-biologique et physico-chimique qui répond aux exigences sanitaires et de qualité. Les deux modes de séchage ont donné une qualité finale de la viande caméline séchée très satisfaisante contrairement au cas du séchage à ciel ouvert (séchage à l'air libre) où la qualité hygiénique et la qualité physico-chimique ont été fortement altérées.

Chapitre VI.

**Suivi de la qualité microbiologique et
physico-chimique de la viande
caméline de l'état frais et à l'état
séché avec et sans salage préalable**

Le séchage solaire influe sur la qualité microbiologique, physicochimique et organoleptique de la viande. L'exposition aux rayonnements solaire directs ou bien à un flux d'air chaud peut avoir de l'impact sur la qualité microbiologique et physico-chimique de la viande qui est un milieu particulièrement propice à la multiplication microbienne et donc à la dégradation. Notre souci premier était de vérifier que le processus de séchage préserve dans une marge acceptable la teneur en protéine de la viande, qui représente le composant nutritionnel le plus important et le plus recherché à travers la consommation de tout type de viande. Nous avons donc soumis la viande fraîche et séchée de l'expérience de novembre à différentes analyses dans le laboratoire de microbiologie de l'URER / MS d'Adrar afin de valider la qualité de la viande de chameau séchée. Nous avons soumis la viande séchée à ciel ouvert, selon la pratique traditionnelle aux mêmes analyses afin de déduire l'impact du séchage solaire de la viande dans le séchoir réalisé sur le produit final.

VI.1. Matériel et méthodes

Des échantillons de viande cameline ont été prélevés sur la quantité de viande fraîche avant séchage, d'autres échantillons ont été prélevés sur la viande séchée dans la chambre de séchage direct, indirect et à ciel ouvert.

VI.1. 1. Analyse microbiologique

Le but des analyses micro-biologiques est de rechercher un certain type de bactéries bien précises, indiquées par les normes de qualités imposées par la législation algérienne.

L'analyse bactériologique a porté sur l'appréciation de la contamination totale par le dénombrement de la flore mésophile aérobie totale, l'évaluation de la contamination d'origine fécale par le dénombrement des coliformes et la recherche des germes pathogènes qui sont indicateurs principaux de l'hygiène tels que la *Salmonella* Typhi et *Staphylococcus aureus*. Une portion de 10 g de chaque échantillon est aseptiquement découpée puis soigneusement broyée à l'aide du broyeur de stomacher. Des dilutions décimales sont réalisées jusqu'à l'arrivée à dilution de 10^{-4} à l'aide d'une solution de Ringer diluée au 1/4 et préalablement stérilisée.

Les analyses bactériologiques, et les milieux d'ensemencement et les conditions d'incubation sont présentés dans le tableau VI.1.[98]

Tableau VI.1. Milieux d'ensemencement et conditions d'incubation des différentes microflores analysées.

Microflores	Milieux d'ensemencement	Conditions d'incubation
Flore mésophile Aérobietotale	PCA	30C° / 72 h
Les coliformes totaux	VRBG	37C° / 72h
Les coliformes fécaux	VLBVB	44C° /24h
<i>Salmonellatyphi</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Pré enrichissement: l'eau peptone tamponné • Enrichissement: Bouillon sélénite cystéine Rapport vasiladise . • Isolement: Hektoén • Identification Galerie biochimique 	37C° /24h
<i>Staphylococcus aureus</i>	Giolitti cantoni	37C° /24h
<i>Clostridium perfringens</i> ,	Viande fois	37C° / 24h
Levures et moisissures	OGA	25C° / 5 jours



(a)



(b)

Fig.VI.1. Analyses microbiologiques : (a). Dilution décimale de la viande séchée et de la viande fraîche, (b). coulage des milieux de culture dans les boites de pétris

VI.1. 2. Analyse physico-chimique

VI.1. 2.1. Détermination de la teneur en eau :

La matière sèche des produits est déterminée par évaporation de leur humidité sans provoquer la volatilisation des substances constitutives du produit. Elle est obtenue par dessiccation à l'étuve à 105 °C jusqu'à obtention d'un poids constant [99].

La teneur en eau est calculée selon la formule suivante :

$$H\% = \frac{M_1 - M_2}{P} \cdot 100 \quad (\text{VI.1})$$

M₁ : la masse de capsule + matière fraîche avant étuvage (**g**) ;

M₂ : la masse de capsule + matière fraîche après étuvage (**g**) ;

P : la masse de prise d'essai (**g**).

VI.1. 2.2. Détermination de la teneur en cendres (NF , 1972)

La viande (5g) est calcinée à 550°C dans un four à moufle jusqu'à obtention d'une cendre blanchâtre de poids constant. Le pourcentage de la matière organique MO est donné par :

$$M_0 = \frac{M_1 - M_2}{P} \cdot 100 \quad (\text{VI.2})$$

M₀ % : Matière organique.

M₁ : la masse de la capsule + prise d'essai (**g**).

M₂ : la masse de la capsule + cendres (**g**)

P : la masse de la prise d'essai (**g**).

La teneur en cendres ***T_C*** est calculée comme suit:

$$T_C = 100 - M_0\% \quad (\text{VI.3})$$

VI.1. 2.3. Détermination de l'activité de l'eau

L'activité de l'eau est mesurée sur de petits échantillons de viande fraîche et sèche par l'appareil de mesure AW (water activity) Hygrolab.



Fig.VI.2.Mesure de l'activité de l'eau avec l' a_w mètre

Après broyage de la viande, on ajoute au moins deux ou trois fois son volume d'eau distillée dans un bécher ensuite on procède à un chauffage pendant 30 min avec agitation. On procède à la détermination du pH en prenant soin que l'électrode du pH mètre soit complètement immergée dans la solution [65].

VI.1. 2.4.Détermination de la teneur en protéine

La préservation de la protéine est le facteur le plus significatif pour juger la compatibilité du mode de séchage solaire avec la viande cameline. Le taux de ce composant dans les différents échantillons étudiés est déterminé par la méthode d'Aljedal décrite par [100].

VI.2. Résultat

VI.2. 1. La qualité microbiologique

Sur le tableau VI.3. , nous présentons les résultats de l'analyse microbiologique réalisée sur la viande de chameau lors du test de novembre. Au cours de ce mois, et à cause des températures basses comparées à juillet, les conditions sont plus favorables pour la dégradation microbienne.

Les résultats des analyses exprimés au tableau VI.3 montrent que la charge microbienne de la viande indirectement séchée a considérablement diminué. Dans la viande directement séchée, les CF et Y ont disparu (passant à 0%), alors qu'après le séchage à ciel ouvert, ces germes ont assez bien résisté et certains d'entre eux ont même augmenté en nombre (CF, SA et Y): température modérée, l'exposition à la poussière et aux infestations d'insectes sous un ciel ouvert justifie cette augmentation[101].

Tableau VI.2. Résultats des analyses microbiologiques de la viande caméline

Micro-organismes	Nombre				Normes
	V F	Séchage indirect	Séchage direct	Séchage à ciel ouvert	
GAMT	8.1×10^5	5.7×10^3	5.1×10^2	10^4	5×10^5
CT	5.7×10^2	0.5×10^2	00	3.2×10^2	-
CF	1.5×10^2	7.2×10	00	2×10^2	3×10^2
SA	4×10^2	0.5×10^2	1.2×10^2	1.8×10^3	10^2
S	00	00	00	00	00
Y	20	00	00	31	-

GAMT: Mesophilic germs total aerobia; *CT* : Total coliforms; *CF* : Fecal coliforms; *SA* : *Staphylococcus aureus* *Y* : Yeast; *S*: *Salmonella*.

Les résultats des analyses exprimés au tableau VI.2 montrent que la charge microbienne de la viande indirectement séchée a considérablement diminué. Dans la viande directement séchée, les CF et Y ont disparu (passant à 0%), alors qu'après le séchage à ciel ouvert, ces germes ont assez bien résisté et certains d'entre eux ont même augmenté en nombre (CF, SA et Y): température modérée, l'exposition à la poussière et aux infestations d'insectes sous un ciel ouvert justifie cette augmentation.[65].

L'augmentation significative de la température subie par la viande caméline lors de des séchages indirects et directs_ entraîne une mortalité (inhibition) significative des germes, ce qui favorise son hygiénisation et sa conservation, notamment par un séchage direct où l'impact positif du rayonnement solaire sur les facteurs microbiologique et organoleptique a été démontré par de nombreux auteurs. [102]; [103];[104], [105] ont démontré l'action destructive des rayons ultraviolets sur les microorganismes présents dans les produits carnés . On conclut du tableau ci-dessus que la qualité sanitaire de la viande caméline séchée dans l'installation réalisée et en référence aux normes imposées par la législation algérienne (Journal officiel n ° 35 de mai 1988) est satisfaisante et conforme aux exigences ne représentant aucun risque pour la santé du consommateur.

VI.2. 2. La qualité physico-chimique

Les résultats de l'analyse physico-chimique faite sur les échantillons de viande caméline selon son état et le mode de séchage appliqué sont indiqués au tableau VI.3.

Tableau VI.3. Résultats des analyses physico-chimiques de la viande caméline

	Viande fraîche	Séchage indirect	Séchage direct	Séchée à ciel ouvert
Teneur en protéines (%)	22	18.37	15.3	9.33
PH	5.47	5.95	5.73	5.87

Sur la viande fraîche, le taux de protéines est de 22%. Après séchage à ciel ouvert (séchage de la viande à l'air libre en contact direct avec l'ambiance externe), ce taux diminue jusqu'à 9,33%. La détérioration de la qualité microbiologique de la viande séchée à l'air libre provoque la chute de la protéine. Dans la chambre de séchage indirect, la teneur en protéines est de 18,37%. Le système de séchage solaire, avec ses deux modes, préserve de manière très satisfaisante la protéine de la viande ; même par séchage direct (15,3%) où la température de flux d'air asséchant est plus élevée que celle dans la chambre indirecte. Plus la température de séchage est importante, plus la détérioration de la protéine augmente. Le séchage solaire préserve le pH de l'acidité quel que soit son mode. Cette acidité assure une stabilité microbiologique élevée des métabolismes des microorganismes à température ambiante (environnement acide défavorable aux germes pathogènes). Ces résultats sont en accord avec d'autres résultats obtenus par [6]. En conclusion, le taux de protéines est mieux préservé en cas de séchage indirect, la qualité microbiologique finale est supérieure en cas de séchage direct. Cependant, les deux modes de séchage assurent une qualité finale très satisfaisante pour la viande caméline séchée.

Conclusion

Conclusion

Un séchoir solaire constitué d'une chambre destiné au séchage direct et une autre au séchage indirect, superposées, fonctionnant en convection forcée et renforcée par un système de stockage de chaleur sensible par des galets a été conçu et étudié pour le séchage de la viande caméline fraîche dans les conditions climatiques d'Adrar, une des wilayat du Sahara algérien. Les expériences de séchage ont été conduites au mois de juillet et au mois de novembre 2017.

Les conclusions suivantes ont été tirées:

Le stockage de chaleur sensible par lit de galets a amélioré de 11,8% le rendement thermique diurne de la chambre de séchage direct et de 28% pour le capteur solaire, et a maintenu l'efficacité de ce dernier pendant une heure après le coucher du soleil. Dans des conditions naturelles, les températures enregistrées dans séchoir direct sont plus élevées que celles dans le séchoir indirect. Dans la chambre de séchage indirect, la teneur en eau à base sèche initiale de la viande de chameau égale à 4 kg / kg a été réduite à 0,3 kg / kg en 31 heures le mois de juillet et à 54 heures en novembre. Dans la chambre de séchage direct, la teneur en eau s'est stabilisée à 0,18 après 10 heures de séchage, contre 0,3 kg / kg après 30 heures en novembre. Plus la température est élevée, plus le séchage est rapide. Pour les deux chambres, le modèle le plus approprié pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite pour la période de juillet est le modèle logarithmique. Pour le mois de novembre, le modèle Midilli-Kucruk donne la meilleure prédiction du processus. Le rendement moyen du séchage indirect sur une journée atteint 18,34% en juillet et 15,72% en novembre. Pour le séchage direct, il atteint la moyenne de 10,35% en juillet et de 7,88% en novembre. Les isothermes de désorption d'humidité pour la viande caméline ont été déterminées sur une plage de température allant de 40 à 60° C. Les isothermes de désorption obtenues appartiennent au type III. Parmi plusieurs modèles mathématiques utilisés, le modèle GAB a donné le meilleur ajustement de la désorption de la viande de chameau pour toute la plage

d'expérience relative à l'activité de l'eau et aux températures d'expérimentation. La teneur en eau à l'équilibre augmente avec l'activité de l'eau et diminue avec la température. La chaleur isostérique de désorption Q^s a été déterminée en utilisant la relation établie entre l'activité de l'eau et la température à une teneur en eau constante par l'équation de Clausius-Clapeyron. Sa valeur, comprise entre 2438 et 3581 kJ / kg, diminue lorsque l'activité de l'eau augmente. Un modèle de décroissance exponentielle avec des paramètres a été utilisé pour adapter l'évolution de la chaleur isostérique à l'activité de l'eau avec un coefficient de corrélation $R^2=0.9967$. Les analyses microbiologiques et physico-chimiques du suivi des expériences ont montré que le niveau de protéines était mieux préservé par le séchage indirect; la qualité microbiologique finale était supérieure avec le séchage direct. Cependant, les deux modes de séchage ont donné une qualité finale de la viande caméline séchée très satisfaisante contrairement au cas du séchage à ciel ouvert (séchage à l'air libre) où la qualité hygiénique et la qualité physico-chimique ont été fortement altérées.

Perspectives

Perspectives

Le travail mené par nos soins en terme de réalisation et de suivi du fonctionnement du séchoir solaire et à la lumière des résultats obtenus relatifs à différents aspects du fonctionnement, du rendement de séchage et aussi à la qualité du produits final, un large horizon s'est ouvert devant nous offrant beaucoup de perspectives et de voies. Ces voies viendraient donner plus d'envergure et d'efficacité au système réalisé et ce, sur plusieurs plan. Il est dans notre intention de prospector les alternatives sous citées :

1. Le système de stockage : Le matériau utilisé pour le stockage d'énergie sensible étant le galet, pourrait être remplacé par d'autre matériaux dont la capacité calorifique, le temps de charge et de recharge ainsi que le coût seraient plus avantageux, notamment l'eau, l'huile, des matériaux de changement de phase...etc,
2. L'intégration d'un système PVT a prouvé son efficacité dans les systèmes de séchoirs solaires, il est envisagé comme suite à ce travail de faire une expérimentation dans ce sens et d'en dégager l'efficacité.

Le système a prouvé son efficacité pour la préservation de la protéine contenue dans la viande caméline, nous envisageons de l'utiliser pour le séchage d'autres produits à

Nomenclature

A, B, C	Coefficients de modèles	<i>me</i>	Teneur en eau d'équilibre à base sèche (kg/kg)
<i>As</i>	surface du capteur(m ²)	<i>mf</i>	Teneur en eau finale à base sèche (kg/kg)
<i>AVG</i>	Moyenne de la teneur en eau dans la chambre de séchage direct (kg/kg)	<i>mi</i>	Teneur en eau initiale à base sèche (kg/kg)
<i>CF</i>	Coliformes fécaux	<i>mt</i>	Teneur en eau à base sèche à l'instant t (kg/kg)
Cp	Chaleur spécifique de l'air (J/kg °C)	<i>m_R</i>	Teneur en eau réduite
<i>CT</i>	coliformes totaux	<i>MRT</i>	moyenne journalière du rendement thermique
<i>Ig</i>	global Irradiation solaire globale (W/m ²)	<i>n</i>	<i>Coefficient de modèle</i>
<i>GAMT</i>	Germes Mesophilic total aerobia	<i>T</i>	Température (°C)
<i>L</i>	Chaleur latent de vaporisation de l'eau (J/kg)	<i>W</i>	Masse d'eau évaporée du produit (kg)
<i>ma</i>	débit massique de l'air(kg/s)	<i>W₀</i>	Masse initiale de l'échantillon (kg)
<i>Pf</i>	Puissance consommée par le ventilateur(W)	<i>Wd</i>	Masse de la matière sèche (kg)
<i>PH</i>	Acidité	<i>Wt</i>	Masse de l'échantillon à un instant t (kg)
<i>R²</i>	coefficient de corrélation	<i>χ²</i>	paramètre réduit du Chi-carré
<i>RMSE</i>	Erreur quadratique moyenne	<i>ηc</i>	Rendement thermique
<i>S</i>	Salmonella	<i>ηd</i>	Rendement de séchage en mode forcé
<i>SA</i>	Staphylococcus aureus		

Publication

Notre travail a été valorisé par une publication internationale intitulée « Experimental investigation of an active direct and indirect solar dryer with sensible heat storage for camel meat drying in Saharan environment ». Wafa Braham Chaouch, Abdellah Khellaf, Ahmed Mediani, Mohamed El Amine Slimani, Akil Loumanib, Abdelkader Hamid dans le journal Solar Energy, publié dans le journal Solar Energy, en date du novembre 2018, numéro 174 aux pages 328–341. Elle est présentée en Annexe I.

Bibliographie

- [1] H. Singh, R. P. Saini, and J. S. Saini, "A review on packed bed solar energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 1059–1069, 2010.
- [2] A. Tom, "Contribution au séchage solaire des produits carnés: Modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux.," Paris, ENSAM, 2015.
- [3] A. A. El-Sebaï, S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, and H. G. El-Gohary, "Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer," *Energy conversion and management*, vol. 43, no. 16, pp. 2251–2266, 2002.
- [4] D. Michel, "Séchoirs Solaires: Théorie et Pratique," *Les Séchoirs Solaires Théorie Prat*, 1985.
- [5] M. R. Shalash, "Provisional report," *International Foundation for Science*, vol. 6, p. 85, 1988.
- [6] A. A. Dawood and M. A. Alkanhal, "Nutrient composition of Najdi-camel meat," *Meat science*, vol. 39, no. 1, pp. 71–78, 1995.
- [7] W. B. Chaouch, A. Khellaf, A. Mediani, M. E. A. Slimani, A. Loumani, and A. Hamid, "Experimental investigation of an active direct and indirect solar dryer with sensible heat storage for camel meat drying in Saharan environment," *Solar Energy*, vol. 174, pp. 328–341, 2018.
- [8] M. M. I. Chowdhury, M. D. Huda, M. A. Hossain, and M. S. Hassan, "Moisture sorption isotherms for mungbean (*Vigna radiata* L)," *Journal of Food Engineering*, vol. 74, no. 4, pp. 462–467, 2006.
- [9] T. Ahmat, D. Bruneau, A. Kuitche, and A. W. Aregba, "Desorption isotherms for fresh beef: An experimental and modeling approach," *Meat science*, vol. 96, no. 4, pp. 1417–1424, 2014.
- [10] A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying, revised and expanded*, vol. 2. CRC Press, 1995.
- [11] M. Kouhila, A. Belghit, and B. C. Boutaleb, "Etude Expérimentale du Séchage Convectif de la SAUGE dans un Séchoir Solaire muni d'un Appoint Electrique," pp. 33–38, 2000.
- [12] M. Kouhila, "Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques de la région de Marrakech," 2001.
- [13] M. D. Fortes and K. Lüning, "Growth rates of North Sea macroalgae in relation to temperature, irradiance and photoperiod," *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, vol. 34, no. 1, pp. 15–29, 1980.
- [14] N. H. Ceaglske and O. A. Hougen, "Drying granular solids," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 29, no. 7, pp. 805–813, 1937.
- [15] T. K. Sherwood, "The drying of solids—I," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 21, no. 1, pp. 12–16, 1929.
- [16] H. Amir, G. Le Palec, and M. Dagenet, "Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud: couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 30, no. 6, pp. 1149–1158, 1987.
- [17] J.-J. Bimbenet, *Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires*. SEPAIC, 1978.
- [18] B. Touati, "Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*)," Lyon, INSA, 2008.
- [19] M. El Hisse, "Modélisation, identification et simulation d'un séchoir solaire agro-alimentaire," Perpignan, 1987.
- [20] W. Mühlbauer, A. Schmidt, and J. Fairley, "Simultaneous construction of an internal and external nose in an infant with arhinia.," *Plastic and reconstructive surgery*, vol. 91, no. 4, pp.

- 720–725, 1993.
- [21] P. Sharma, S. K. Tomar, P. Goswami, V. Sangwan, and R. Singh, “Antibiotic resistance among commercially available probiotics,” *Food Research International*, vol. 57, pp. 176–195, 2014.
- [22] P. Gbaha, H. Y. Andoh, J. K. Saraka, B. K. Koua, and S. Toure, “Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow,” *Renewable energy*, vol. 32, no. 11, pp. 1817–1829, 2007.
- [23] H. Hallak, J. Hillaal, F. Hilal, and R. Rahhal, “The staircase solar dryer: design and characteristics,” *Renewable Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 177–183, 1996.
- [24] O. Prakash and A. Kumar, “Performance evaluation of greenhouse dryer with opaque north wall,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 4, pp. 493–500, 2014.
- [25] A. S. Rathore, R. Bhambure, and V. Ghare, “Process analytical technology (PAT) for biopharmaceutical products,” *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 398, no. 1, pp. 137–154, 2010.
- [26] M. G. Green, “Solar Drying Technology for Food Preservation,” vol. 49, no. 0, 2001.
- [27] M. N. Öz\i\cs\ik, *Heat conduction*. John Wiley & Sons, 1980.
- [28] A. El-Beltagy, G. R. Gamea, and A. H. A. Essa, “Solar drying characteristics of strawberry,” *Journal of food engineering*, vol. 78, no. 2, pp. 456–464, 2007.
- [29] R. K. Goyal and G. N. Tiwari, “Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept,” *Solar energy*, vol. 60, no. 1, pp. 41–48, 1997.
- [30] R. K. Goyal and G. N. Tiwari, “Performance of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept,” *Energy conversion and Management*, vol. 40, no. 4, pp. 385–392, 1999.
- [31] C. B. Pardhi and J. L. Bhagoria, “Development and performance evaluation of mixed-mode solar dryer with forced convection,” *International journal of energy and environmental engineering*, vol. 4, no. 1, p. 23, 2013.
- [32] A. El Khadraoui, S. Bouadila, S. Kooli, A. Farhat, and A. Guizani, “Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM,” *Journal of cleaner production*, vol. 148, pp. 37–48, 2017.
- [33] S. Dhanushkodi, V. H. Wilson, K. Sudhakar, and others, “Design and performance evaluation of biomass dryer for cashewnut processing,” *Advances in Applied Science Research*, vol. 6, no. 8, pp. 101–111, 2015.
- [34] O. S. Komilov, S. K. Astanov, O. F. Safarov, M. Z. Sharipov, A. R. Faizullaev, and L. Tillaev, “Combined solar drying unit,” *Applied Solar Energy*, vol. 45, no. 4, pp. 262–265, 2009.
- [35] R. K. Koech, “Photovoltaic/Thermal (PV/T) System as Innovative Solution to Increase Solar Energy Conversion Efficiency,” 2013.
- [36] B. Benarba, L. Belabid, K. Righi, A. Khaldi, and A. Hamimed, *Author ’ s Accepted Manuscript*. Elsevier, 2015.
- [37] M. Mohanraj and P. Chandrasekar, “Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material,” in *Proceedings of the IASTED International Conference*, 2009, vol. 647, p. 29.
- [38] M. Mohanraj, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, “Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants—A review,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 3, no. 1, pp. 108–119, 2009.
- [39] V. Shanmugam and E. Natarajan, “Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 8–9,

- pp. 1543–1551, 2007.
- [40] D. Luna, J.-P. Nadeau, and Y. Jannot, “Solar timber kilns: State of the art and foreseeable developments,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1446–1455, 2009.
 - [41] L. M. Bal, S. Satya, and S. N. Naik, “Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 8, pp. 2298–2314, 2010.
 - [42] S. Esakkimuthu, A. Hakim, C. Palaniappan, M. Spinnler, J. Blumenberg, and R. Velraj, “Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications,” *Solar Energy*, vol. 88, pp. 144–153, 2013.
 - [43] I. N. Simate, “Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers,” *Renewable energy*, vol. 28, no. 3, pp. 435–453, 2003.
 - [44] M. A. Leon, S. Kumar, and S. C. Bhattacharya, “A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 4, pp. 367–393, 2002.
 - [45] P. C. Phadke, P. V Walke, and V. M. Kriplani, “A review on indirect solar dryers,” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 8, pp. 3360–3371, 2015.
 - [46] A. A. El-Sebaili and S. M. Shalaby, “Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint,” *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 109–116, 2013.
 - [47] A. Gauhar, L. M Augustus, and others, “Performance evaluation of a solar tunnel dryer for chilli drying,” 1998.
 - [48] O. V. Ekechukwu and B. Norton, “Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology,” *Energy conversion and management*, vol. 40, no. 6, pp. 615–655, 1999.
 - [49] B. Brenndorfer, L. Kennedy, C. O. O. Bateman, D. S. Trim, G. C. Mrema, and C. Wereko-Brobby, “Solar dryers-their role in post-harvesting processing,” *Commonwealth Science Council, Commonwealth Secretariat, London*, pp. 4–7, 1987.
 - [50] B. Tokar, *Earth for sale: Reclaiming ecology in the age of corporate greenwash*. South End Press, 1997.
 - [51] L. Jayaraman and C. Prives, “Activation of p53 sequence-specific DNA binding by short single strands of DNA requires the p53 C-terminus,” *Cell*, vol. 81, no. 7, pp. 1021–1029, 1995.
 - [52] J. F. E. C. on Brucellosis, *Joint FAO/WHO Expert Committee on Brucellosis: Sixth Report*, no. 740. World Health Organization, 1986.
 - [53] T. P. Hughes, “Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef,” *Science*, vol. 265, no. 5178, pp. 1547–1551, 1994.
 - [54] E. Leniger-Follert, D. W. Lübbers, and W. Wrabetz, “Regulation of local tissue Po₂ of the brain cortex at different arterial O₂ pressures,” *Pflügers Archiv*, vol. 359, no. 1–2, pp. 81–95, 1975.
 - [55] S. M. Henderson, “Progress in developing the thin layer drying equation,” *Transactions of the ASAE*, vol. 17, no. 6, pp. 1167–1168, 1974.
 - [56] G. A. Mastekbayeva, C. P. Mastekbayeva, M. A. Leon, and S. Kumar, “Experimental studies on a hybrid dryer,” 1999.
 - [57] Y. M. Gallali, Y. S. Abujnah, and F. K. Bannani, “Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying, III; chemical analysis and sensory

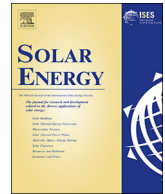
- evaluation data of the dried samples (grapes, figs, tomatoes and onions),” *Renewable Energy*, vol. 19, no. 1–2, pp. 203–212, 2000.
- [58] M. B. P. Amato *et al.*, “Effect of a protective-ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome,” *New England Journal of Medicine*, vol. 338, no. 6, pp. 347–354, 1998.
- [59] P. P. Lewicki, “Some remarks on rehydration of dried foods,” *Journal of Food Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 81–87, 1998.
- [60] S. Ons, M. Sterkel, L. Diambra, H. Urlaub, and R. Rivera-Pomar, “Neuropeptide precursor gene discovery in the Chagas disease vector *Rhodnius prolixus*,” *Insect molecular biology*, vol. 20, no. 1, pp. 29–44, 2011.
- [61] T. Idoui, N. Benhamada, and E. Leghouchi, “Microbial quality, physicochemical characteristics and fatty acid composition of a traditional butter produced from cows’ milk in East Algeria,” *Grasas y Aceites*, vol. 61, no. 3, pp. 232–236, 2010.
- [62] B. Andi-Pallawa and A. F. A. Alam, “A comparative analysis between English and Indonesian phonological systems,” *International Journal of English Language Education*, vol. 1, no. 3, pp. 103–129, 2013.
- [63] A. W. SA, “Agricultural Writers SA recognises contributors.”
- [64] A. Adamou, “L’élevage camelin en Algérie: quel type pour quel avenir?,” *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol. 19, no. 4, pp. 253–260, 2008.
- [65] A. Oulad Belkhir, A. Bouziane, A. Chehma, and B. Faye, “La filière viande cameline dans le Sahara septentrional algérien,” 2013.
- [66] S. Omsa, I. H. Abdullah, and H. Jamali, “Five competitive forces model and the implementation of Porter’s generic strategies to gain firm performances,” 2017.
- [67] J. C. Cheftel, “Amino acids, peptides, and proteins,” *Food chemistry*, 1985.
- [68] J. P. Girard, J. Bout, and D. Salort, “Lipides et qualité des tissus adipeux et musculaires de porc, facteurs de variation,” *Journées de la recherche porcine en France*, vol. 20, pp. 255–278, 1988.
- [69] A. O. Bolanle, A. S. Funmilola, and A. Adedayo, “Proximate analysis, mineral contents, amino acid composition, anti-nutrients and phytochemical screening of *Brachystegia eurycoma* harms and *Pipper guineense* schum and Thonn,” *Am. J. Food Nutr.*, vol. 2, no. 1, pp. 11–17, 2014.
- [70] B. Faye, J. P. Jouany, J.-P. Chacornac, and M. Ratovonahary, “L’élevage des grands camélidés. Analyse des initiatives réalisées en France,” 1995.
- [71] C. Craplet and T. D. M. Tome III, “La viande de bovins,” *Traité d’élevage moderne-De l’étable de l’éleveur à l’assiette du consommateur-Livre I. Vigot Frères Editeurs, France, 486p*, 1966.
- [72] E. L. H. M. D. OULD, B. Bouzgag, A. Bouras, and S. Moussaoui, “ETUDE COMPARATIVE DE QUELQUES CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES DE LA VIANDE DU DROMADAIRE CHEZ DES INDIVIDUS DU TYPE " SAHRAOUI" DIFFÉRENTS GES,” 2002.
- [73] S. A. EL KADI and A. A. FAHMI, “Cité par KAMOUN, M. 1988 in: Nutrition et croissance chez le dromadaire,” *Séminaire sur la Digestion, la Nutrition et l’Alimentation du Dromadaire*, vol. 27, pp. 159–161, 1985.
- [74] A. A. El-Sebaii, S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, and E. El-Bialy, “Year round performance of double pass solar air heater with packed bed,” *Energy Conversion and management*, vol. 48, no. 3, pp. 990–1003, 2007.

- [75] Y. Jannot, A. Kanmogne, A. Talla, and L. Monkam, “Experimental determination and modelling of water desorption isotherms of tropical woods: afzelia, ebony, iroko, moabi and obeche,” *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 64, no. 2, pp. 121–124, 2006.
- [76] S. Vijayan, T. V Arjunan, and A. Kumar, “Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer,” *Innovative food science & emerging technologies*, vol. 36, pp. 59–67, 2016.
- [77] E. J. Quirijns, A. J. B. Van Boxtel, W. K. P. van Loon, and G. Van Straten, “Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 85, no. 11, pp. 1805–1814, 2005.
- [78] D.-W. Sun and J. L. Woods, “The selection of sorption isotherm equations for wheat based on the fitting of available data,” *Journal of Stored Products Research*, vol. 30, no. 1, pp. 27–43, 1994.
- [79] M. Mohammed, H. Abd El-Aziz, N. Omran, S. Anwar, S. Awad, and M. El-Soda, “Rep-PCR characterization and biochemical selection of lactic acid bacteria isolated from the Delta area of Egypt,” *International Journal of Food Microbiology*, vol. 128, no. 3, pp. 417–423, 2009.
- [80] A. Talla, Y. Jannot, G. E. Nkeng, and J.-R. Puiggali, “Experimental determination and modeling of sorption isotherms of tropical fruits: banana, mango, and pineapple,” *Drying Technology*, vol. 23, no. 7, pp. 1477–1498, 2005.
- [81] M. Ait Darham, “Application de la technologie micro-onde dans le domaine du séchage des produits agro-alimentaires: cas des abricots.” 1999.
- [82] C. den Berg, “Development of BET-like models for sorption of water on foods, theory and relevance,” in *Properties of water in foods*, Springer, 1985, pp. 119–131.
- [83] A. Mulet, P. Garcia-Pascual, N. Sanjuán, and J. Garcia-Reverter, “Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*),” *Journal of Food Engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 75–81, 2002.
- [84] E. J. Quirijns, A. J. B. van Boxtel, W. K. P. van Loon, and G. van Straten, “An improved experimental and regression methodology for sorption isotherms,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 85, no. 2, pp. 175–185, 2005.
- [85] C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, E. Tsami, and D. Marinou-Kouris, “Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables,” *Journal of Food engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 55–74, 1993.
- [86] T. P. Labuza, A. Kaanane, and J. Y. Chen, “Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods,” *Journal of Food science*, vol. 50, no. 2, pp. 385–392, 1985.
- [87] E. K. Akpınar and Y. Bicer, “Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun,” *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 6, pp. 1367–1375, 2008.
- [88] I. Doymaz, “Sun drying of figs : an experimental study,” vol. 71, pp. 403–407, 2005.
- [89] W. E. L. Spiess and W. Wolf, “Critical evaluation of methods to determine moisture sorption isotherms,” in *Water activity: Theory and applications to food*, Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 215–233.
- [90] O. Corzo and A. Fuentes, “Moisture sorption isotherms and modeling for pre-cooked flours of pigeon pea (*Cajanus cajan* L millsp) and lima bean (*Canavalia ensiformis*),” *Journal of food Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 443–448, 2004.
- [91] F. J. Trujillo, P. C. Yeow, and Q. T. Pham, “Moisture sorption isotherm of fresh lean beef and external beef fat,” *Journal of food engineering*, vol. 60, no. 4, pp. 357–366, 2003.

- [92] M.G. Shehata, "Screening of isolated potential probiotic lactic acid bacteria for cholesterol lowering property and bile salt hydrolase activity," *Annals of Agricultural Sciences*, vol. 61, no. 1, pp. 65–75, Jun. 2016.
- [93] A. E. Delgado and D.-W. Sun, "Desorption isotherms and glass transition temperature for chicken meat," *Journal of Food Engineering*, vol. 55, no. 1, pp. 1–8, 2002.
- [94] M. Kouhila, N. Kechaou, M. Otmani, M. Fliyou, and S. Lahsasni, "Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan Eucalyptus globulus," *Drying Technology*, vol. 20, no. 10, pp. 2027–2039, 2002.
- [95] M. Kouhila, A. Belghit, M. Dagenet, and B. C. Boutaleb, "Experimental determination of the sorption isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia officinalis*) and verbena (*Lippia citriodora*)," *Journal of food engineering*, vol. 47, no. 4, pp. 281–287, 2001.
- [96] D. Wang, W. Liu, Y. Ren, L. De, D. Zhang, and Y. Yang, "Isolation and Identification of Lactic Acid Bacteria from Traditional Dairy Products in Baotou and Bayannur of Midwestern Inner Mongolia and q-PCR Analysis of Predominant Species," vol. 36, no. 4, pp. 499–507, 2016.
- [97] E. Tsami, "Net isosteric heat of sorption in dried fruits," *Journal of Food Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 327–335, 1991.
- [98] A. Benaissa, O. E. L. H.-K. A, and A. Adamou, "MODES .," vol. 5, pp. 69–75, 2015.
- [99] I. T. Kadim, O. Mahgoub, and M. Mbaga, "Potential of camel meat as a non-traditional high quality source of protein for human consumption," *Animal frontiers*, vol. 4, no. 4, pp. 13–17, 2014.
- [100] R. B. Bradstreet, "Kjeldahl method for organic nitrogen," *Analytical Chemistry*, vol. 26, no. 1, pp. 185–187, 1954.
- [101] M. Ould El Hadj, B. Bourasa, S. Moussaoui, and A. Bouras, "Étude comparative de quelques caractéristiques chimiques et," 2005.
- [102] J. Nortje and A. K. Gupta, "The role of tissue oxygen monitoring in patients with acute brain injury," *BJA: British Journal of Anaesthesia*, vol. 97, no. 1, pp. 95–106, 2006.
- [103] T. Aymerich, P. A. Picouet, and J. M. Monfort, "Decontamination technologies for meat products," *Meat science*, vol. 78, no. 1–2, pp. 114–129, 2008.
- [104] K. M. Gailunas, K. E. Matak, R. R. Boyer, C. Z. Alvarado, R. C. Williams, and S. S. Sumner, "Use of UV light for the inactivation of *Listeria monocytogenes* and lactic acid bacteria species in recirculated chill brines," *Journal of food protection*, vol. 71, no. 3, pp. 629–633, 2008.
- [105] B. E. Terzaghi and W. E. Sandine, "Improved medium for lactic streptococci and their bacteriophages.," *Applied microbiology*, vol. 29, no. 6, pp. 807–13, 1975.
- [106] Mursalim, Supratomo, Dewi YS, 2002. Drying of cashew nut in shell using solar dryer. *Science & Technology*;3(2):25-33.
- [107] Gbaha P, Andoh HY, Saraka JK, Koua BK, Toure S. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. *Renewable Energy* 2007;32:1817-29.
- [108] Jayaraman, Gupta Das. In: Mujumdar AS, 1995. Editor. Handbook of industrial drying. New York: Marcel Decker Inc. Journal Officiel de la Republique Algerienne, 1998, 27 mai, No 35.
- [110] www.ons.dz consulté le 19 mai 2020

- [111] TayebOtman and YaëlKouzmine, 2013. Bilan spatialisé de la mise en valeur agricole au Sahara algérien, Mythes, réalisations et impacts dans le Touat-Gourara-Tidikel 2013. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.25732>.) consulté en mai 2020.
- [112] Andi, 2013. (<http://www.andi.dz/PDF/monographies/Adrar.pdf>) consulté en mai 2020.
- [113] Euromeatnews,2018.Algerie-la-production-algerienne-de-viande-rouge. <https://www.businessfrance.fr/>
- [114] Adamou. A, 2008. L'élevage camelin en Algérie : Quel type pour quel avenir ? Sécheresse 2008 ; 19 (4) : 253-60.
- [115] OuladBelkhir.A, Bouzianne. A. Chehma A. et Faye B.2013. La filière viande cameline dans le Sahara septentrional algérien. Université Ouargla publications, 26-34 Revue des BioRessources Vol 3 N 2.
- [116] 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.
- [117] 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.
- [118] Laurent, C. (1981). Conservation des Produits d'origine Animale en Pays Chauds. ACCT, Paris, 157 pages.
- [119] 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.
- [120] Girard, J. P. (1988). Technologie de la viande et des produits carnés, Technique et documentation. Lavoisier, 280 pages.
- [121] Briggs, G.M. (1985). Muscle food and human health. Food Technology, 39, 34-38.
- [122] 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.
- [123] Nasr S., Elbayah G., et MoursyA. M.1965. Studies on camel meat.The effect of age and sex on the compenent of camel meat. J. Arab.Vet. Med. Ass., 25, (4), pp. 253-258.
- [124] Craplet C., 1966. La viande de bovins. Tome VIII, livre I. Ed. Vigot frères Editeurs, Paris, p.486
- [125] Ould el hadj.M, Bouzgag. B, Bouras. A, Moussaoui. S. 2002. Etude comparative de quelques caractéristiques chimiques et physico-chimiques de la viande du dromadaire chez des individus du type sahraoui à différents âges. Recherche Agronomique. Institut National de la Recherche Agronomique d'Algrie Revue semestrielle,2002, 10, 95-102
- [126] El kady S. A. et Fahmy A. A., 1984. Some physical and chiminal studies on buffalo and camel meatduring cold storage. 30 the EurMeet. Res. Worskers, Bristol, 3, pp. 160-1661.

Annexe I



Experimental investigation of an active direct and indirect solar dryer with sensible heat storage for camel meat drying in Saharan environment

Wafa Braham Chaouch^{a,b}, Abdellah Khellaf^c, Ahmed Mediani^b, Mohamed El Amine Slimani^{d,*}, Akil Loumani^b, Abdelkader Hamid^a

^a Département de Mécanique, Faculté de Technologie, Université Saad Dahleb, 09000 Blida, Algeria

^b Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER/MS), Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), 478 Adrar, Algeria

^c Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), 16340 Algiers, Algeria

^d Department of Energetic and Fluid Mechanics, Faculty of Physics, University of Science and Technology Houari Boumediene (USTHB), 16111 Algiers, Algeria

ARTICLE INFO

Keywords:

Solar drying
Forced convection
Heat storage
Camel meat
Saharan environment
Meat quality

ABSTRACT

An indirect and direct forced convection solar dryer integrated with pebble sensible heat storage medium was developed and investigated under Saharan prevailing weather conditions. The setup consists of a direct chamber superimposed to an indirect drying one. A first pebble bed is placed in a plenum, below the direct drying chamber, a second in a cavity below the solar collector. The sensible heat storage system maintained the thermal efficiency of the solar collector until one hour after sunset and enhanced it by 28%. The thermal efficiency of the direct chamber was enhanced by 11.8%. Experiments of drying camel meat without salting were carried out under the different climatic conditions of July and November months. The drying kinetic evolution was investigated under each experiment conditions. The drying is faster in July than in November. Several mathematical models were tested to describe the best, in terms of statistical parameters, the drying behavior of camel meat slices. Logarithmic model and Midilli-Kucruk model are respectively the most suitable for July and November experiments. The average of indirect drying efficiency over diurnal period reached 18.34% in July and 15.52% in November. The direct drying efficiency reached the average of 10.35% and 7.88% respectively in July and November. In order to preserve the protein rate of the dried camel meat, salting which inhibits decay, pretreatment usually reserved for meat products before drying has been suppressed. Microbiological and physicochemical monitoring has been carried out to ensure the final quality of the dried product. The results obtained, compared to an open sun-dried samples were satisfactory according to the norms imposed by the Algerian legislation.

1. Introduction

Abundant, inexhaustible, and nonpolluting, renewable energies are obviously an alternative of choice to fossil energies. Peoples of the tropics and semi-tropics use solar energy for thermal applications, such as cooking, heating, and drying (Bal et al., 2010). The purpose of drying products is to reduce their moisture content. The decay caused by growth and reproduction of microorganisms is inhibited by the removal of moisture which minimizes many of the moisture-mediated deteriorative reactions (Kamil sacilik, 2007). In developing countries, the popular, efficient and economical method used for drying and preserving agricultural food and many other products is the open sun drying (Kumar et al., 2016). This traditional method of drying has many disadvantages. It can cause not negligible losses during natural sun drying

because of various influences, such as rodents, birds, insects, rain, storms, and microorganisms (El-Sebaï et al., 2002). To overcome these inconveniences and ensure better control of solar drying aspects, different researches have been conducted over decades to develop solar dryers. The arrangement of the system components and mode of solar heat utilization categorizes the solar dryers as direct, indirect and mixed modes (Vijayan et al., 2016). Solar dryers are classified passive in the case of natural air circulation, forced if the latter is controlled by the use of a fan to pump air through the dryer. Prakash and Kumar (2013) reported in a review on recent researches that compared to natural circulation type solar dryers, forced convection (active solar dryers) are very effective and more controllable. This choice is all the more motivating as the electrical energy required to power the fan is low. Transmitting much thermal energy as possible to the air,

* Corresponding author. Fax: +213 021 24 73 44.

E-mail addresses: mslimani@usthb.dz, slimani_01@yahoo.fr (M.E.A. Slimani).

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.037>

Received 5 April 2018; Received in revised form 31 July 2018; Accepted 13 September 2018

0038-092X/© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Nomenclature			
AE	daily average of thermal efficiency	S	Salmonella
As	surface area of flat plate collector (m ²)	SA	Staphylococcus aureus
AVG	average of moisture content in indirect chamber	T	temperature (°C)
ATE	daily average of thermal efficiency	UC	under collector
CF	Fecal coliforms	W	weight of water evaporated from the product (kg)
CT	<i>Total coliforms</i>	W₀	initial weight of sample (kg)
I_g	global solar radiation (W/m ²)	W_d	weight of dry matter (kg)
GAMT	<i>Mesophilic germs total aerobia</i>	W_t	weight of sample at any time t (kg)
L	latent heat of vaporization of water (J/kg)	X_e	equilibrium moisture content on dry basis (kg/kg)
m_a	mass flow rate of air (kg/s)	X_f	final moisture content on dry basis (kg/kg)
P_f	power consumed by fan (W)	X_i	Initial moisture content on dry basis (kg/kg)
PH	Level of acidity	X_t	moisture content at any time on dry basis (kg/kg)
R²	correlation coefficient	X_R	moisture ratio
RMSE	root mean square error	χ²	reduced chi-square
		η_c	thermal efficiency of collector
		η_d	forced convective drying efficiency

facilitating maximum moisture removal for the desired final condition of the product is one of the major goals in the design and optimization of a solar air heater (Esakkimuthu et al., 2013). Several researchers worked on improving solar dryers performance by developing the dryer component design technology as PVT collectors (Slimani et al., 2015a, 2015b, 2016, 2017), using different modes of air circulation, resorting to auxiliary heating sources (electricity and fossil fuels), and exploiting heat storage systems. Added to the fact that energy storage plays an important role in conservation the energy, it also improves the performance and reliability of a wide range of energy systems (Mahmud et al., 2011). Thermal energy can be stored as sensible heat, latent heat (PCM) or chemical energy. Sensible heat storage materials are cheaper and their thermal conductivity is usually larger than phase change material's (PCM) (Zhao et al., 2011). Being non-toxic and non-flammable, inexpensive and acting as both a heat transfer surface and storage medium represent some of the advantages provided by the use of rocks for thermal (Harmeet et al., 2010).

In the case of meat products, one of the purposes of drying is to give them new organoleptic properties that are highly appreciated by some consumers. In Algeria, the consumption of dried meat called "El Keddidi", is widespread. In the Saharan areas of the country, where the solar drying under the open sky is very widespread because of the lack of adequate access to the electrical network, a special taste is reserved for camel meat and its derivatives. Camel meat in some areas is more consumed than other species such as beef and sheep (Shalash, 1998; Wilson, 1984). Meat products are very perishable, among other things, because of their important microbial load; satisfactory solar drying must preserve their sanitary quality, physico-chemical and organoleptic and allows their storage over an extended period. Camel meat, which is a favorable medium for the profiling of Mesophilic germs total aerobia (ElMalti, 2008), its solar drying becomes even more delicate. A pre-treatment of meat products by salting before drying acts as an antimicrobial and protects against microbiological degradation, Camel meat, which is a good source of protein containing about 20–23% (Kadim et al., 2008; Kilgour, 1986), loses much of this component by chemical degradation due to this salting (Chaouch, 2016).

The present work was aimed at generating a system that was supposed to combine three imperatives: to overcome the failures of the electrical network in the field of food preservation, to democratize the use of solar dryers for a safe and sanitary drying, and to guarantee the microbiological quality of the meat to be dried by faster drying thanks to an efficient and inexpensive energy storage system considering the very limited economic means of the local population.

In this paper, we present in first the design of a direct and indirect dryer. The circulation of the drying air in it is forced by ventilation and its heating is reinforced by a bed of pebbles for the sensible heat storage. The body of the dryer consists of a direct drying chamber

superimposed on another indirect drying chamber whose circulating air passes by a solar collector. This vertical assembly makes it possible to optimize the drying space with respect to the quantities to be dried and to exploit the advantages of each drying mode (direct and indirect) according to the quality objectives to be achieved. Then, we give the results of investigation experiments conducted about the effect of sensible storage heat on solar collector performances. Drying experiments were conducted on two different seasons of the year to compare the performance of the system and the drying behavior of camel meat under different climatic conditions. The kinetic behavior of meat camel drying is also subject to monitoring and mathematical modeling. The evolutions of drying efficiencies of both direct and indirect drying chambers were indicated. Finally, the results of microbiological and physicochemical of monitoring the quality of camel meat dried under direct, indirect mode and open sun are presented and discussed.

2. Materials and methods

2.1. Description of the setup

The solar dryer object of the experiment was designed, constructed and investigated experimentally within the Unit of Research on Renewable Energies in the Saharan Environment of Adrar (URER/MS d'Adrar) in Algeria. As shown in Fig. 1, the solar drier consists of the following elements.

The components of the setup are presented in details in Fig. 1. On the descriptive scheme (Fig. 1c), the solar collector (A) is placed at 28° tilt angle, the latitude of the place. It is composed of a glass cover and an absorber plate of metal of thickness 5 mm with black coating. The glass cover and the absorber plate are associated on an aluminum frame; it gives the duct where the inlet air is heated from the incident solar irradiation. The duct has a parallelepiped shape with 95 × 100 × 4 cm. Its entrance is perforated with equidistant holes to provide uniform air circulation.

The solar collector is placed above a box body which serves as a cavity for containing pebbles bed acting as sensible heat storage medium intended to provide a heat supplement to the air entering the indirect drying chamber. The profile of the box body containing the pebbles is triangular. It is made, from outside to inside, of metal plates, a layer of polystyrene then a layer of plywood superposed on the lateral walls and at the base of the body in order to limit thermal losses.

An indirect drying chamber (B) equipped with several trays to contain the meat to be dried superimposed at a distance of 15 cm from each other is connected to the solar collector.

The volume of the indirect drying chamber is equal to (90 × 60 × 15) cm³. That of the direct chamber is equal to [(50 × 50 × 50)/2] cm³ with one tray to support the meat.

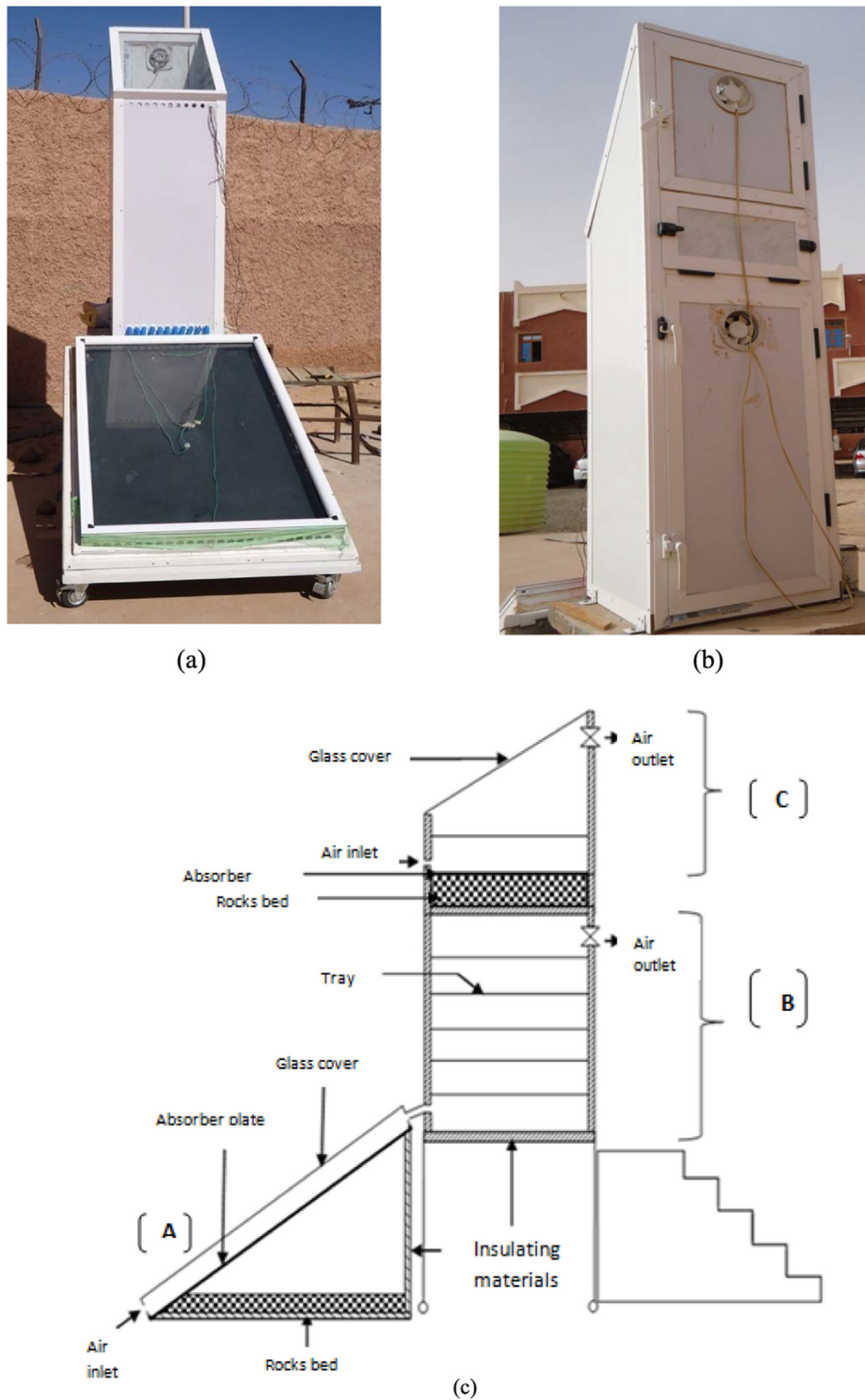


Fig. 1. The solar dryer: (a) Setup front view, (b) Setup back view, (c) Descriptive scheme of the setup.

A plenum (D) intended to contain a quantity of pebbles. It is placed between the indirect drying chamber and the direct one. Insulated from the first with polystyrene and plywood, it provides sensible thermal energy stored to the direct chamber.

The body uniting the indirect chamber, the plenum and the direct chamber is made of double-wall wood resins, with a layer of intermediate polystyrene of 3 cm thickness to limit thermal losses.

A centrifugal fan with an electric power of 6 W operating at a

voltage of 240 V is placed at the top of each chamber. The role of the ventilator is to evacuate the humid air to the outside. The operating air flow is set at a value of 120 m³/h exploitable within a temperature range of -10 to 70 °C.

The system is oriented to face south to maximize the solar radiation incident on the air heater.

2.2. Instrumentation and experiments

The meteorological data (ambient temperature, solar irradiation) are provided by the meteorological measurements station of the URER/MS of Adrar. The solar irradiation is measured with Kipp and Zonen CM11 pyranometer. The relative humidity of air is measured with an Opus 208 probe. The temperature distribution inside the solar dryer is measured by several thermocouple type-k inserted on different spots of the dryer. It is recorded at 10 min time intervals using a Fluke 2638A acquisition string of 0.0024% accuracy. The balance used for weight monitoring is of the type of PIONEER OHAUS with an accuracy of 0.001.

2.3. Experimentation procedure

All experiments were conducted in one of the Saharan prefectures of Algeria, the city of Adrar which is located at 27°53' North and 0°17' West at 257 m above sea level. The experiments related to the sensible heat storage have been carried out during November 2016, those of drying camel meat in July and November 2017. The process of experimentation is divided into two stages. The first aims to establish the link between the mass of pebble bed for storing thermal energy and the thermal efficiency of the solar collector. The mass of the pebbles bed is increased gradually passing from 0 kg to 40 kg in the cavity below the collector and from 0 kg to 10 kg for the direct drying chamber. The second consists of a drying process conducted at two different seasons of the year. The trays of the indirect and direct drying chambers are loaded with camel meat, once on 3rd of July of 2017 where the ambient temperatures are very high and again in 13th of November of 2017 where the weather conditions are more clement. All experiments are conducted under forced convection mode. The meat samples are cut into different parts of the carcass of a young 4-year-old camel whose slaughter was done in the municipal slaughterhouse of the department of Adrar. 4 kg of meat are sliced with a thickness of 1 cm, divided equally and placed without a pretreatment on the trays. In the indirect drying chamber, the trays are superimposed at equal distances from one another to ensure a uniform air circulation around the product. One charged tray is placed in the indirect dryer. Another one is left to dry in the open air as a control sample for the microbiological and biochemical quality.

The days of experimentation were chosen on the basis of the relative clarity of the sky according to meteorological forecasts. The weightings are performed at an interval of one hour of time. Each test is completed when three consecutive weighings display the same weight. The moisture contents are measured on the dry basis.

2.4. Data and performance analysis

The initial moisture content on the dry basis X_i is the weight of moisture present in the product per unit weight of the dry matter in the product and the instantaneous moisture content X_t at any given time t on dry basis is determined using the following are calculated from Eqs. (1) (El-Sebaai et al., 2002) and (2) (El-Sebaai and Shalaby, 2013).

$$X_i = \frac{(W_0 - W_d)}{W_d} \tag{1}$$

$$X_t = \left[\frac{(X_i + 1)W_t}{W_0} - 1 \right] \tag{2}$$

The moisture ratio X_d is determined as (Kavak, 2010)

$$X_d = \frac{X_t - X_e}{X_i - X_e} \tag{3}$$

The thermal efficiency of the collector is a common measure of collector performance in a solar dryer (Duffie and Beckman, 1991)

$$\eta_c = \frac{C_p m_a (T_{co} - T_{ci})}{A_s I_g} \tag{4}$$

The forced convective drying efficiency is obtained using the following equation by considering the energy consumption for forced convection (Tokar, 1997)

$$\eta_d = \frac{WL}{A_s I_g + P_f} \tag{5}$$

In the selection process of mathematical models predicting the drying kinetic of camel meat, the correlation coefficient R^2 , the statistical parameter reduced chi-square χ^2 and root mean square error $RMSE$ were used to determine the quality of fit. The criterion for goodness of fit is the higher value of R and the lower values of χ^2 and $RMSE$.

The reduced chi-square (χ^2) and root mean square error (RMSE) can be calculated as follows (Kavak and Bicer, 2008; Yaldiz et al., 2001)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{Rexp,i} - X_{Rpre,i})^2}{N} \tag{6}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{Rexp,i} - X_{Rpre,i})^2}{N}} \tag{7}$$

where $X_{Rexp,i}$ ith experimental moisture ratio calculated using Eq. (3); $X_{Rpre,i}$ ith predicted moisture ratio using drying model; N is the number of observations and n is the number of a model's constants.

3. Results and discussion

3.1. Results of experiments on sensible heat storage systems

During charging time, Pebbles bed absorbs thermal energy through the absorber of the solar collector; during the discharging period, it dissipates heat to the air flow passing through the collector to the indirect chamber. Too large a mass of pebbles would take a long charging time which will disadvantage the solar drying during the daytime period when the drying efficiency is the most important; a reduced mass will not improve the thermal efficiency of the solar collector, both cases are an obstacle to improve the time and to increase the drying temperature enough during the drying process of camel meat for a secure product on microbiological and biochemical levels. In order to determine the ideal mass of the pebbles bed for an optimal effect of the sensible heat storage, the masses of pebbles beds placed in the cavity below the solar collector and in the plenum below the indirect drying chamber were varied over several days while following the resulting thermal efficiencies as well as the temperature profiles recorded at different points of the system

3.1.1. Solar collector

The weight of the bed of pebbles disposed in the cavity made under the solar collector is varied at a rate of 5 kg per experimentation. Based on the data collected from the different experiments, the instantaneous thermal efficiency of the solar collector is calculated.

In Table 1, the average thermal efficiency of the collector was estimated at different times of the day for each experiment apart.

Over the period between 7:00 am and 10:00 am, the ATE is inversely proportional to the weight of the pebbles because the thermal charging time of the pebbles increases with the mass. Between 10:00 am and 04:00 pm that is the sunniest period of the day and until the mass of 40 kg, the ATE increases according to the mass. 40 kg of pebbles, on the day of 1st of November 2016 gives a maximum efficiency of 62.07% in this period of the day; with 50 kg of pebbles, the ATE decreases to the value of 53.64%. From 04:00 pm until sunset (which is around 06:10 pm), the ATE increases proportionally to the mass of pebbles. During this end-of-day period, the sensible stored heat is efficiently diffused to the system. After sunset, from the mass of 30 kg, the

Table 1
Average of thermal efficiency ATE of the solar collector for different pebbles masses over the day periods.

Pebbles mass (kg)	ATE (%) 7a.m.- 10 a.m.	ATE (%) 10 a.m - 4p.m.	ATE (%) 4 p.m.- Sunset	Efficiency time after sunset (minute)
0	34,43	51,5	32,72	0
15	32,57	54,038	37,5	0
30	31,36	57,16	65,09	50
40	30,67	62,07	79,06	60
45	28,27	54,95	78,56	70
50	25,09	53,64	89,048	70

difference in temperature between the inlet and the outlet of the solar collector is maintained from 50 to 70 min despite the absence of solar radiation.

The results relatives to experiments without sensible heat storage and to 40 kg of pebbles under the solar collector are shown in Fig. 2. It shows the gain in thermal efficiency η_c achieved with a mass of pebbles equal to 40 kg, compared to the efficiency of the setup without storage (0 kg of pebbles). The difference varies between 11% before 10:00 am and 28% between 10:00 am to 04:00 pm. By comparing the averages, instantaneous thermal efficiencies of the solar collector for each mass of pebbles and the system’s performance time after sunset, the ideal mass of the sensible storage for the solar collector is equal to 40 kg. This mass is maintained for all experiments of meat drying process that will follow next.

El-Sebaili et al. (2007) investigated the thermal performance of a double pass solar air heater with a packed bed based on limestone and gravel materials. They found that the thermal efficiency η_c of the heater was improved by 22–27% more than when no packed bed is used; which is in the same level of improvement brought by the use of sensible heat storage in our system. The evolution of ambient temperature and solar irradiation on the 1st of November 2016 for the thermal storage test is presented in Fig. 3. Fig. 4. shows the evolution of temperatures of different elements on the solar collector, the difference between the temperature at inlet and outlet of the solar collector and the temperatures of different elements of the indirect drying chamber for the experiment with a bed of pebbles of 40 kg under the collector.

From Fig. 3, the 1st of November 2016, day where the setup operated with 40 kg of pebbles as sensible heat storage system, records a max of 32 °C for temperature ambient T_{am} around 4:00 pm. The sky is clear with a maximal solar irradiation of 1090 W/m². From Fig. 4 (a), the absorber temperature T_{abs} records the largest values close to 90 °C, followed by the output of the solar collector T_{co} , which around 2:00 pm records 70 °C, then the air flow at duct’s middle of the solar collector T_{jc} and the glass temperature T_g who are both of the same range.

Fig. 4(b) shows temperatures difference between the inlet and the outlet of the solar collector. At 10:00 am, this difference is equal to 22 °C; at 01:13 pm, it reaches a maximum equal to 34.46° with an average of 27 °C between 10:00 am and 04:00 pm. Between 04:00 pm to 07:00 pm, the average temperature is 7 °C. The average of this difference over the diurnal period is about 16 °C. The system remains effective nearly an hour after sunset despite the absence of solar irradiation thanks to the sensible heat storage.

The evolution of temperatures at the inlet, of the flow air at the middle, at the outlet of the indirect drying chamber and of the ambient temperature are respectively represented by T_{iri} , T_{irm} , T_{iro} , T_{am} on Fig. 4(c). T_{irm} records its maximum value of 47 °C at 02:00 pm; the average of the difference between T_{irm} and T_{am} from 10:00 am to 04:00 pm, is about 13 °C; between 10:00 pm and 08:00 pm, it is about 10 °C.

3.1.2. The plenum

To determine the ideal mass of sensible heat storage pebbles bed to use at the level of the plenum below the direct dryer, the evolution of

the temperatures at different elements of the enclosure with different masses of pebbles was followed over the three consecutive days from 7th of November 2016 from 0 kg to 10 kg with a rate of 5 kg for each day. The experimental meteorological conditions for the three days are fairly uniform.

Fig. 5 shows the evolution of the instantaneous thermal efficiency η_c for each mass of the storage pebbles bed in the plenum below the direct drying chamber.

From 07:00 am to 10:00 am, Table 2 shows that the ATE decreases as the mass of the pebbles increases; this is related to the thermal charge time. For the mass of 5 kg, the ATE over the whole day takes the value of 49.94% (for the two other cases, it is around 39%), and the value of 57.02% between 10:00 am to 4:00 pm that is the sunniest period of the day and the most important phase of drying. After 04:00 pm, the efficiency average is proportional to the mass of pebbles. Beyond sunset (around 6:00 pm), sensible storage by pebbles bed brings no significant gain. Since the quantity of 5 kg and 10 kg is quite small, it does not accumulate significant sensible heat storage to be diffused after the absence of solar irradiation. All subsequent meat drying experiments were conducted with a mass of 5 kg of pebbles placed in the plenum under the direct drying chambers which optimally increases the thermal efficiencies with a value of around 12% during the day even if it does not ensure a thermal efficiency after sunset.

Fig. 6 shows the meteorological conditions of the experiment of the 8th of November 2016 with 5 kg of pebbles in the plenum. The sky is clear with a maximal value of solar irradiation equal to 1067 W/m² and a maximal temperature value equal to 32 °C. On Fig. 7 are represented the temperature profiles at different elements of the direct dryer and the difference between the ambient temperature T_{am} and the temperature T_{drm} of the air flow at the middle of the direct dryer chamber for the experiment.

The evolution of temperature at different elements of the direct drying chamber is represented in Fig. 7(a). The ambient temperature T_{am} records values around 30 °C for the period of time between 10:00 am and 04:00 pm. The largest temperature in the direct dryer is T_{dra} recorded on the absorber with a maximum of 65 °C around 01:11 pm. Between T_{am} and T_{dra} are displayed, in ascending order, the temperature at the outlet T_{dro} of the dryer with a maximum of 45 °C at 01:13 pm, the temperature of the glass T_{drg} , and the temperature of the air flow at the middle of the direct dryer T_{drm} with a maximum of 53.17 at 01:45 pm.

Fig. 7(b) shows the difference between T_{drm} and T_{am} . This difference is of the order of 15 °C by 10:00 am. It reaches a maximum of 19.5 °C at 01:50 pm and an average of 7 °C between 04:00 pm and the sunset.

3.2. Results of drying camel meat experiments

3.2.1. Operating conditions

In two different periods of the year 2017, drying tests of dromedary meat were conducted in the solar dryer in its two direct and indirect

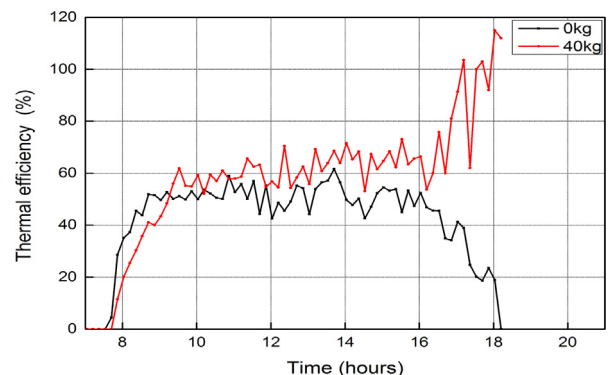


Fig. 2. Evolution of Thermal efficiency of the solar collector η_c for 0 kg and 40 kg of pebbles.

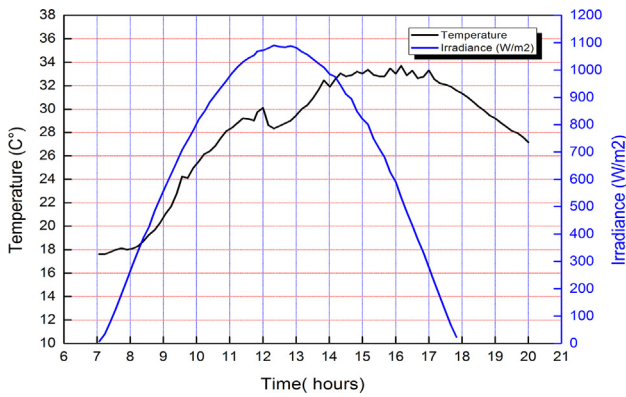


Fig. 3. Evolution of ambient temperature and solar irradiation on the 1st of November 2016.

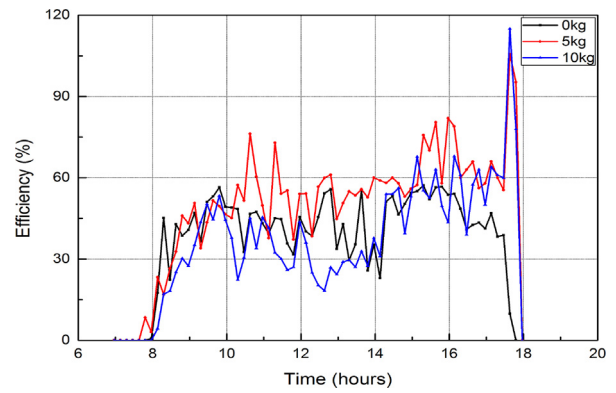


Fig. 5. Variation of thermal efficiency η_c for 0 kg, 5 kg and 10 kg of pebbles in the plenum.

chambers. The first experiment began on July 3, 2017, the second on November 13, 2017. The drying continued until the weight balance of the samples at three consecutive weighings. As a witness of the microbiological and physicochemical monitoring carried out, a quantity of camel meat was dried under open sky. Fig. 8 represents the meteorological conditions of the days of experimentation.

days without clouds with maximal values of solar irradiations over 1000 W/m^2 . The temperatures are proportional to each season varying between $11 \text{ }^\circ\text{C}$ and $26 \text{ }^\circ\text{C}$ for November and $25 \text{ }^\circ\text{C}$ to $41 \text{ }^\circ\text{C}$ for July. The maximal values of temperature and solar irradiation are recorded around solar noon.

From Fig. 8, solar radiation curves are smooth indicating very clear

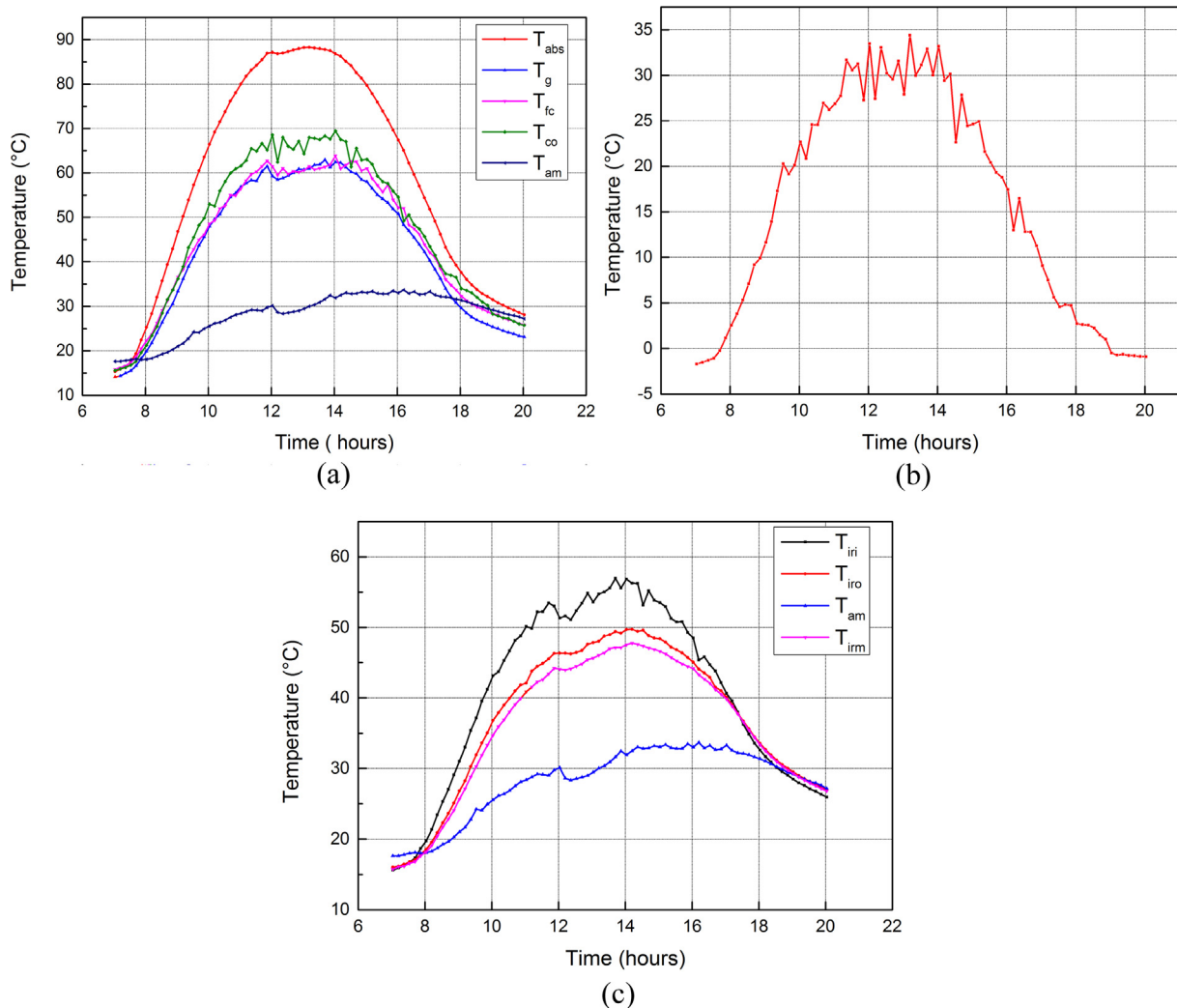


Fig. 4. Operating temperatures of setup components with 40 kg of pebbles UC: (a) Solar collector temperatures, (b) Difference between air flow temperature at the inlet and the outlet of the solar collector, (c) The indirect drying chamber temperatures.

Table 2
Average thermal efficiency ATE of the direct drying chamber for different masses of pebbles bed over different periods of the day.

Pebbles mass (kg)	ATE (%) from 7 a.m. to 10 a.m.	ATE (%) from 10 am to 4 p.m.	ATE (%) from 4 p.m. to sunset	The daily average of (η_c)
0	26.34	44.75	36.97	38.14
5	25.03	57.02	69.23	49.94
10	20.72	39.18	71.4	39.23

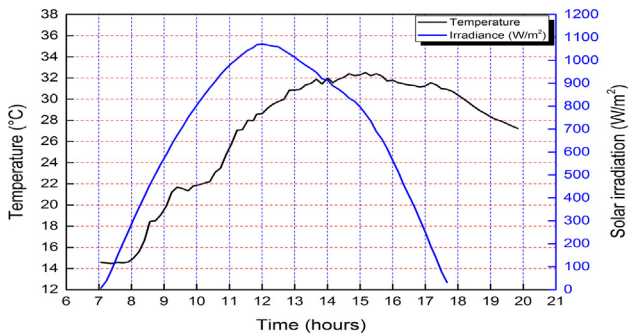


Fig. 6. Evolution of temperature and solar irradiation for the 8th November 2016.

3.2.2. Operating temperatures

The evolution of the temperature of different elements on the indirect chamber, at the experiments of July 2017 and November 2017 are respectively represented in Fig. 9(a) and (b). The same data relating to the direct drying chamber are respectively represented in Fig. 10(a) and (b).

The drying process in the indirect drying chamber lasts for two days in July and three in November. From both Fig. 9(a) and (b), the air flow in its passage at the entrance then in the middle and finally at the exit of the room takes respectively the following decreasing temperatures: T_{iri} , T_{irm} and T_{iro} . The temperature decreases in the direction of this axis because of the additional humidity which is charged to the air flow by the evaporated water in his path through the loaded trays. T_{iri} Shows the same daily profiles with a maximum of 67 °C for July and 60 °C for November. The temperature profiles of meat T_{irp} increased from one day to the next of the experimental: the same quantity of heat is supplied by the drying air (T_{iri} profiles are of the same order for the different days of

experimentation) to the product whose mass decreases considerably with time, the internal energy of this mass increases generating the increasing of their temperature. At the end of drying process T_{irp} increases to reach T_{irm} (45 °C and 35 °C as maximal values in July and November respectively) achieving the thermal equilibrium of the end of drying.

In the direct chamber, the air flow is heated by direct exposure to the sun's rays. This is why the temperature at this point T_{drm} increases very rapidly with respect to the temperature at the input T_{dri} which is of the same order as the ambient temperature T_{dra} (Fig. 10(a) and (d)) reaches its maximum values around 14:00. In July, this maximum is equal to 54 °C, in November it is equal to 44 °C the first day and 48 °C the second day. The additional moisture load at the exit of the chamber, due to the drying process, decreases the T_{dro} temperature at this point compared to the inlet and the middle. The temperature of the product in all experiments increases according to T_{drm} . All temperatures recorded in July are higher than those of November; this is related to meteorological conditions of each season. Under natural conditions, the direct dryer gives higher temperatures than the indirect.

3.2.3. Hygrometric degree

During the drying process, the air humidity (relative and absolute) varies at each point of the drying chamber. With the high values of the air temperature, the humidity of the latter is reduced by the effect of variation of its density. The relative humidity recorded at the entrance and exit of the indirect chamber for the July tests and November test are respectively shown in Fig. 11(a) and (b).

During day, the humidity difference between the incoming air and the air leaving the enclosure increases with time of drying in particular during the hours of strong irradiation when the ambient temperatures are maximum causing a decrease in the relative humidity of the air at the inlet of the chamber drying (the humidity of the air is inversely proportional to its temperature). This increase in temperature implies an increase in the rate of drying causing a significant evaporation of water of the meat charging the outgoing air with additional humidity: between 10:00 am and 04:00 pm, period of greatest amount of drying, the average values of the difference in humidity between the inlet and the outlet of the indirect drying chamber are equal to 7.45%, 2.73% and 3.6% respectively at the three days of drying in November and at 5.47% and 3.70% respectively at the two days of drying in July. After this period of the day, the humidity difference decreases until the sunless hours because of the absence of a heat source. The quantity of water evaporated the first day is more important given the high initial

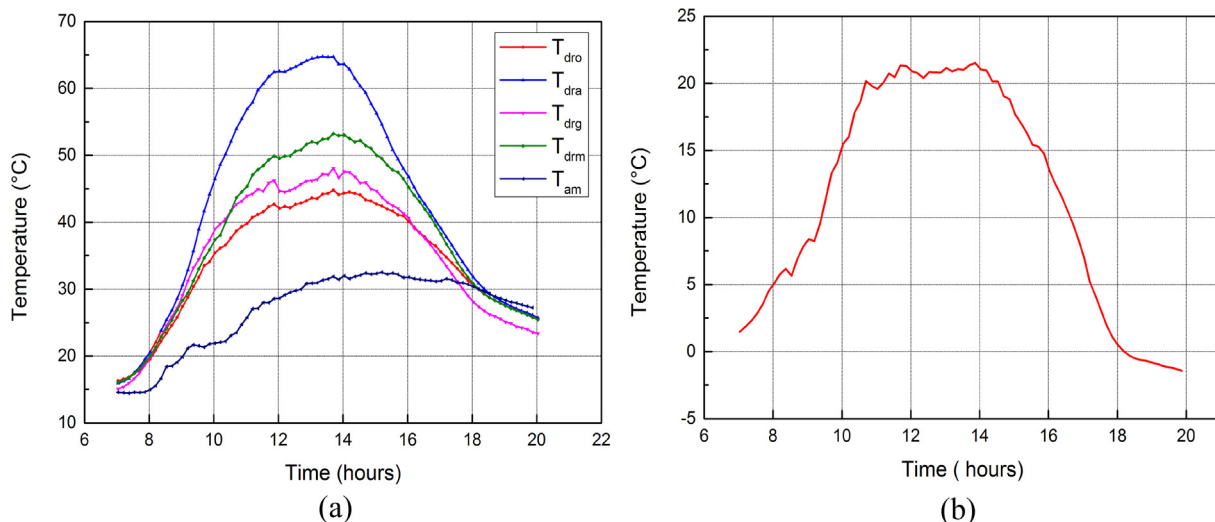


Fig. 7. Operating temperature with 5 kg of pebbles in plenum: (a) direct drying chamber temperatures. (b) Difference between ambient temperature T_{amb} and the temperature of air flow T_{drm} in the middle of direct drying chamber.

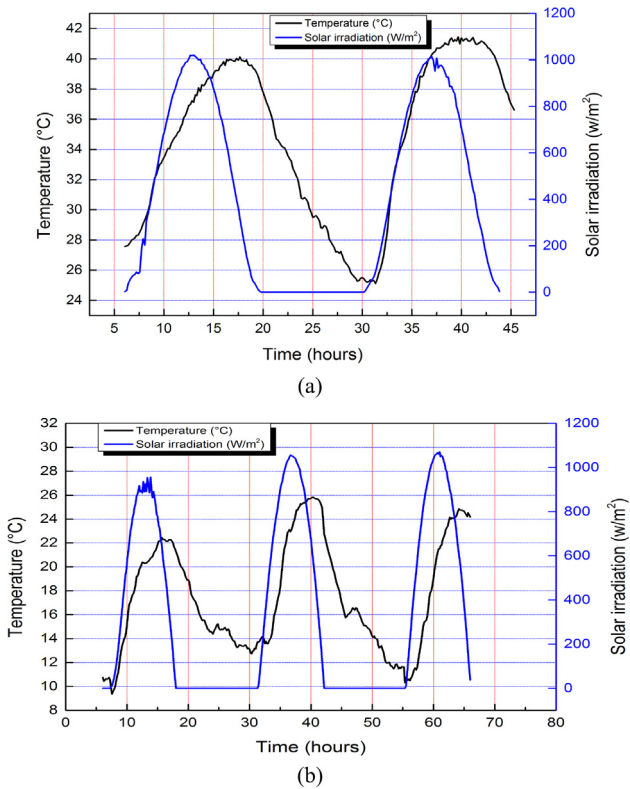


Fig. 8. Evolution of ambient temperature and solar irradiation on the days of experiments: (a) the 3rd and the 4th of July 2017, (b) the 13th, 14th and 15th of November 2017.

moisture content of the product, with the evolution of the process, the gap decreases because of the low moisture content of the product after a certain drying period.

3.2.4. Drying kinetic

The moisture content is the physical parameter that indicates the progress of the process of drying and the state of our product to dry, it decreases as a function of the drying time. The evolution of moisture content on dry basis X_i for each tray in the indirect drying chamber and their average AVG for July and November tests are respectively shown in Fig. 12(a) and (b). Those of the direct drying chamber are

respectively shown in Fig. 13(a) and (b).

In the indirect drying chamber, the trays are numbered in ascending order from the bottom (inlet of the air flow) to top (outlet of the air flow). The water content decreases proportionally to the placement height of the tray along the indirect drying chamber: lower is placed on the rack, faster is its drying. This difference in drying speed is due to the fact that more drying air advances in its path through the trays, the more it is charged with water vapor and its temperature decreases. This is inversely related to its ability to evaporate and accommodate additional moisture. For all the figures the initial moisture content on dry basis X of meat is 4 kg of water/kg of dry matter which represents approximately 80% of fresh meat total weight. In July (Fig. 12(a)), AVG passes from 4 to 2 (kg/kg) in 8 h; it stabilizes after 31 h with a value of 0.3 kg/kg. In November (Fig. 12(b)), AVG decreases by half in 12 h and reaches the equilibrium value of 0.3 (kg/kg) after 54 h. Time of indirect drying in November is double that in July.

In the direct drying chamber, for the experiment of July (Fig. 13(a)), X_i reaches the value of 2 kg/kg in 3 h of time and stabilizes for the value of 0.18 kg/kg in 10 h. It stabilizes at this time marking the end of drying. For the experiment conducted in November (Fig. 13(b)), X_i decreases by half after 4 h of time. The moisture content is equal to 0.5 kg/kg after 25 h of time and stabilizes at the value of 0.3 kg/kg after 30 h of drying. In November, the direct drying time is triple that in July, this is related to the meteorological conditions: the hotter is the season, the higher is the temperature in the dryer and the higher is the drying speed.

In Iraq, Saeed et al. (2013) dried camel meat sausage in an indirect solar dryer at November where the weather conditions are quite similar of those of Adrar at the same month (the conditions are indicated in its paper). The drying time for 6 kg of product in his experience was of 7 days which corresponds to 1.6 day/kg of meat. For our setup, the drying of 4 kg of fresh camel meat took 54 h which equals an average of 13.5 h/kg of meat. In July, this time of drying is sensibly improved; it is about 7.75 h/kg of fresh meat of camel.

3.2.5. Mathematical models

The reduced moisture content of meat (X_R) relative to the average of moisture content AVG is calculated for different trays of the indirect drying chamber. The X_R of the meat in drying chambers were adjusted with several fitting models taken from the literature. As drying kinetics present different evolutions between the July and November trials, the appropriate drying pattern may be different as well.

The coefficients of the models evaluated in this step have an averaged value over the entire drying period that varies from one

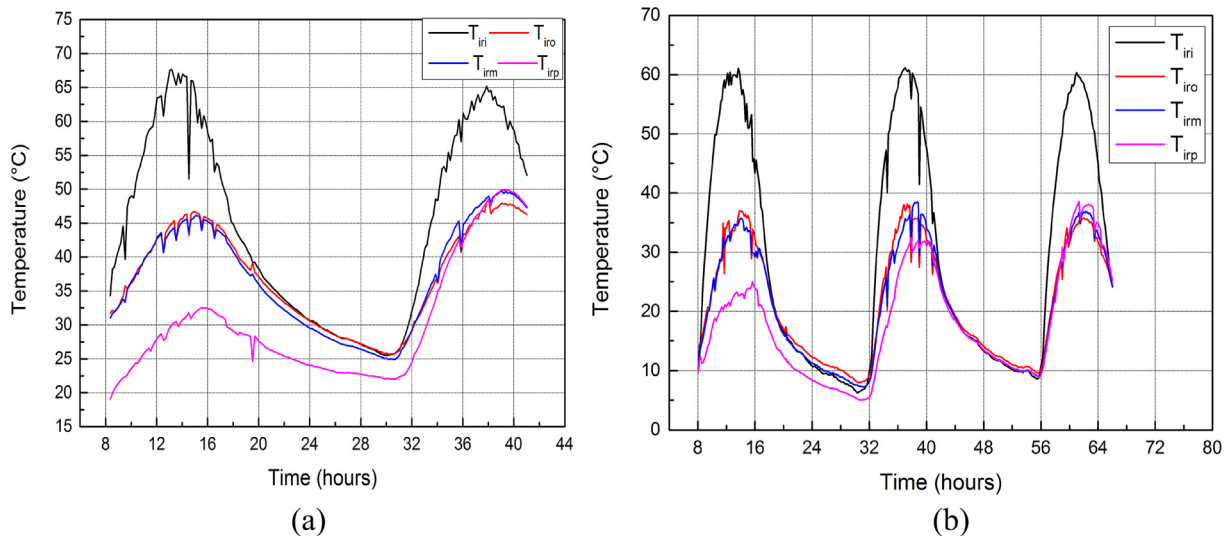


Fig. 9. Operating temperatures of the indirect chamber at drying experiments: (a) July experiment, (b) November experiment.

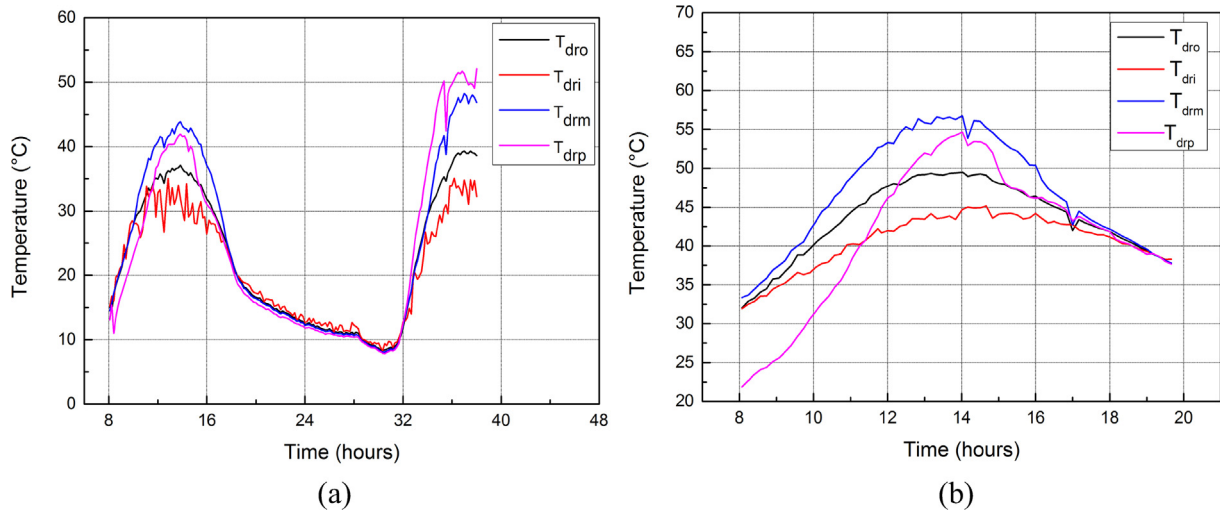


Fig. 10. Operating temperatures of the direct chamber at drying experiments: (a) July experiment, (b) November experiment.

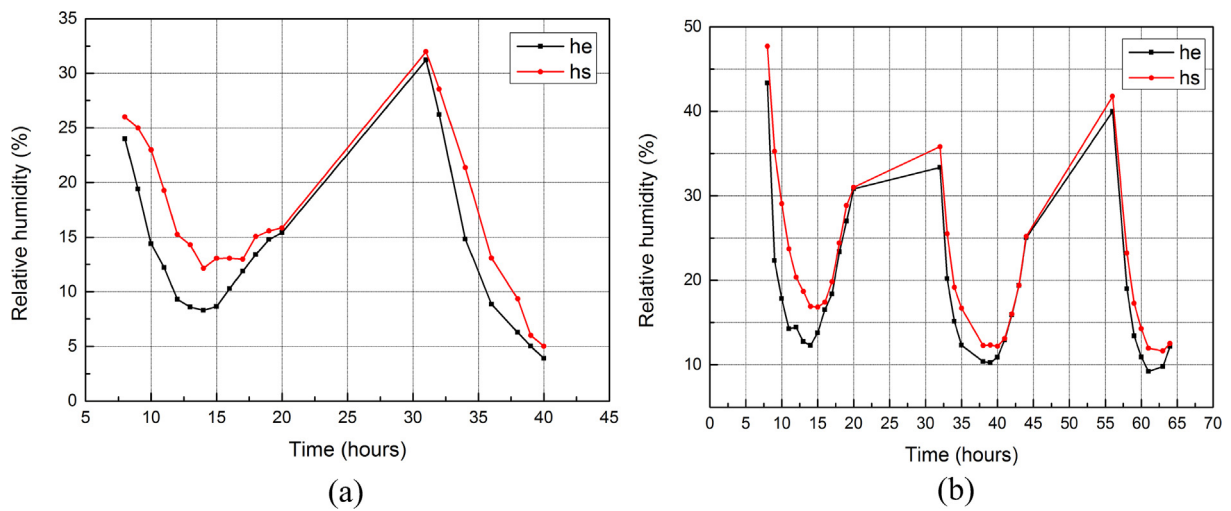


Fig. 11. Evolution of relative humidity at the inlet and the outlet of the indirect drying chamber: (a) July experiment, (b) November experiment.

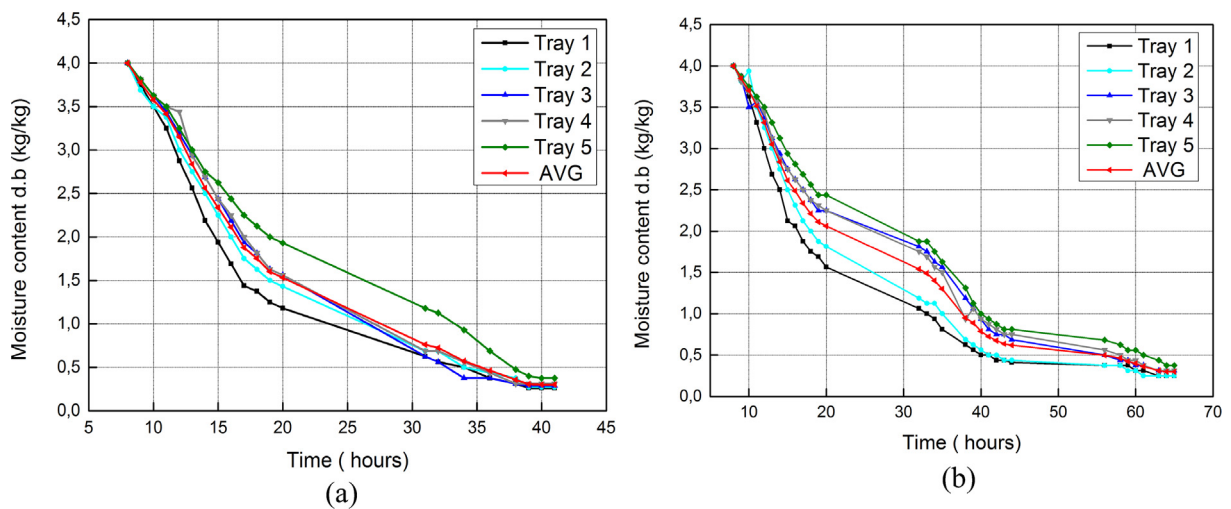


Fig. 12. Evolution of moisture content at dry basis X_i in the indirect drying chamber for each tray and their average: (a) July experiment., (b) November experiment.

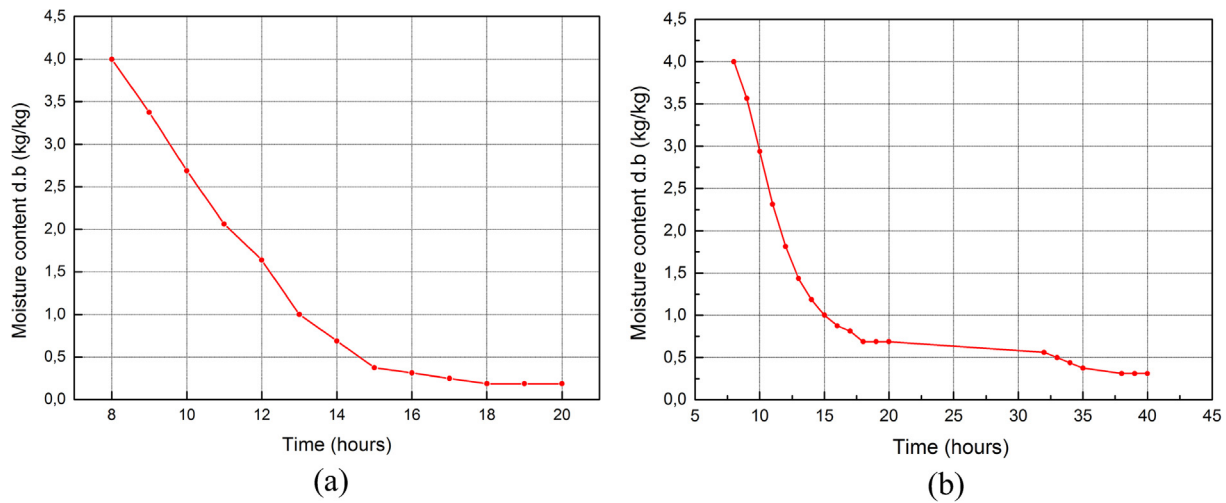


Fig. 13. Evolution of moisture content at dry basis X_r in the direct drying chamber: (a) July experiment., (b) November experiment.

Table 3
Mathematical models characterizing solar drying.

Model name	Model expression	Reference
Henderson and Pabis	$X_r = a \exp(-kt) + b$	Chinnan (1984)
Logarithmic	$X_r = a \exp(-kt) + b$	Yagcioglu et al. (1999)
Two terms	$X_r = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	Henderson (1974)
Midilli-Kucruk	$X_r = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al. (2002)

experiment to another; the models presented are only functions of time (t). After having tested several models, we present in Table 3 four models most adapted to the kinetic behavior of the camel meat during the drying process which gave a good fitting with the highest R^2 and the lowest χ^2 and RMSE.

Fig. 14 below shows the evolution of the reduced moisture content as a function of time and the most suitable model for the evolution of the reduced water content for each chamber and for each experiment.

Fig. 14 indicates that for both chambers, the most suitable model to describe the evolution of reduced moisture content in July is the logarithmic model and Midilli-Kucruk model in November. Results of

fitting by different mathematical models for the indirect drying chamber are given in Table 4 those of the direct drying chamber are given in Table 5.

The best results were transcribed in bold. Good accuracy has been achieved by logarithmic and Midilli-Kucruk models.

3.2.6. Drying rate

The high initial moisture content of camel meat (around 80%) explains, in part, the high drying rates for the various tests recording values around 30 gr/h (Fig. 15(a) and (b)) in the indirect drying chamber and 50 gr/h for the direct one (Fig. 16) and this, especially in the early hours of the process where the moisture content is in the zone of free water molecules less firmly bound to the product. In the indirect chamber, the higher the rack is placed, the lower the drying speed. On the first day of drying, the drying rate of meat on the lower tray is at least 36% and 43% more than the upper tray respectively on July and November. This is due to the fact that the drying capacity of the air is diminished because of the cumulated humidity load on its way. Then, a second phenomenon intervenes and reverses the facts: the faster the drying was done on the first day, the more, on the second day, we are in the bound water zone, the less it is easy to extract the residual water in

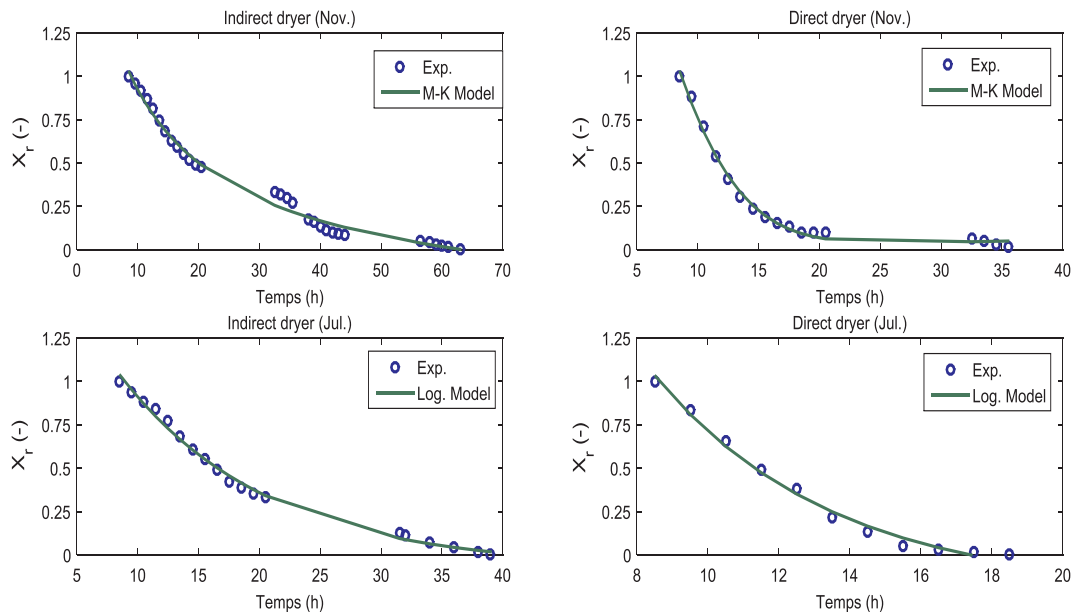


Fig. 14. Fitting of the evolution of reduced moisture content for different experiments.

Table 4

Coefficients of the fitting models describing the reduced moisture ratio content as a function of time for the indirect drying chamber. The bold represent the appropriate model and its parameters.

	Model	Coefficients				Model precision		
		a	K1	b	K2 (n)	χ^2	R ²	RMSE
July	Henderson and Pabis	2.411	0.0965	–	–	0.0177	0.9912	0.0323
	Midilli-Kucruk	2.199	0.0865	–0.0015	1	0.0109	0.9946	0.0261
	Logarithmic	2.242	0.0825	–0.07136	–	0.0108	0.9947	0.0260
	Two terms model	–26.15	0.0568	28.26	0.0586	0.0107	0.9947	0.0267
November	Henderson and Pabis	1.662	0.0594	–	–	0.0463	0.9849	0.0407
	Midilli-Kucruk	3.479	0.3993	–0.00186	0.5145	0.0372	0.9879	0.0378
	Logarithmic	1.627	0.0551	–0.0264	–	0.0448	0.9854	0.0407
	Two terms model	1.541	0.0567	0.6616	0.2564	0.0446	0.9855	0.0414

Table 5

Coefficients of the fitting models describing the reduced moisture ratio as a function of time for the direct drying chamber. The bold represent the appropriate model and its parameters.

	Model	Coefficients				Model precision		
		a	K1	b	K2 (n)	χ^2	R ²	RMSE
July	Henderson and Pabis	13.92	0.3014	–	–	0.0375	0.9703	0.0646
	Midilli-Kucruk	7.159	0.2189	–0.0091	1	0.0121	0.9904	0.0389
	Logarithmic	6.768	0.199	–0.2117	–	0.0111	0.9912	0.0373
	Two terms model	–4.255	0.0782	8.964	0.1214	0.0119	0.9906	0.0412
November	Henderson and Pabis	7.295	0.2283	–	–	0.0188	0.9876	0.0354
	Midilli-Kucruk	2.805	0.0282	0.00143	1.673	0.0095	0.9937	0.0270
	Logarithmic	8.443	0.2479	0.03163	–	0.0139	0.9908	0.0315
	Two terms model	7.795	0.2361	0.00368	–0.0680	0.0131	0.9914	0.0317

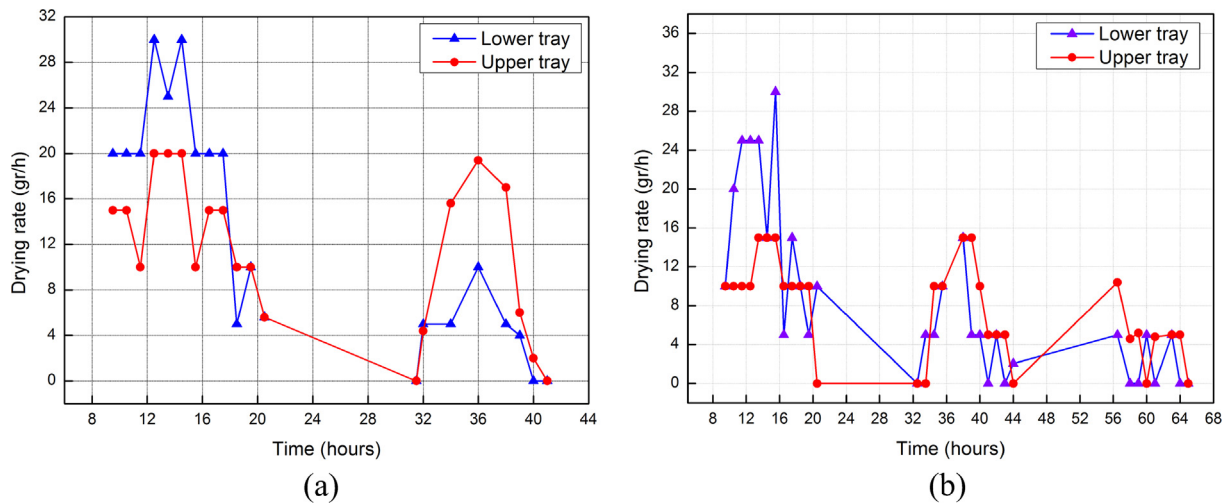


Fig. 15. Evolution of the drying rate of the upper and lower trays in the indirect drying chamber: (a) July experiment, (b) November experiment.

the product. On the second day, the samples of the upper tray release water at a drying rate of almost 38% in July and 100% in November larger than that of the lower tray because these molecules water belongs more to the free zone water of the product.

Fig. 16 shows the evolution of the drying rate in the direct drying chamber separately for July and November experiment. It is clear that the drying rate on July is more important, exceeding the value of 55 gr/h at the sunniest hours of the day which allows the drying process to end on the first day because of the higher temperatures. In November; the drying rate on the first day reaches 50 gr/h and the process of water evaporating continues on the second day with a rate of 5 gr/h.

3.2.7. System performance

Fig. 17(a) and (b) show the evolution of the drying efficiency η_d of

the indirect enclosure respectively for the July and November experiment. The same performance of the direct dryer in July and November is respectively shown in Fig. 17(c) and (d).

The daily average of chambers drying efficiency calculated for each experiment is expressed in Table 6.

In November, relative to the temperatures, drying times are longer than in July; however, for each of the chambers, the trends of drying efficiency η_d evolution are similar from one season to another. In the indirect chamber, over the hours between the beginning of drying and sunset of the first day of the process, ΔE the average of efficiency η_d recorded is about 18.34% in July and 15.72% in November (respectively Fig. 17(a) and (b)). These values decrease over time as the amount of residual water to be extracted from the meat by drying also decreases. At sunset, the η_d reaches extreme values (80%) because the

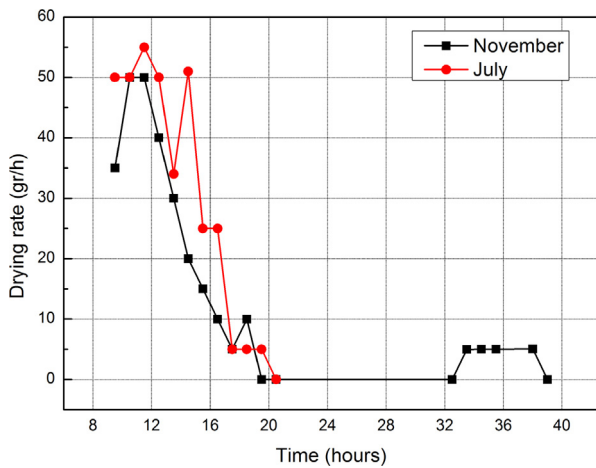


Fig. 16. Evolution of the drying rate in the direct drying chamber.

Table 6

Daily average of drying efficiency η_d for each experiment.

Day of experiment	Daily average of indirect chamber drying efficiency η_d (%)		Daily average of direct chamber drying efficiency η_d (%)	
	July	November	July	November
1st day	18.34	15.72	10.35	7.88
2nd day	4.81	7.84	–	2.84
3rd day	–	1.6	–	–

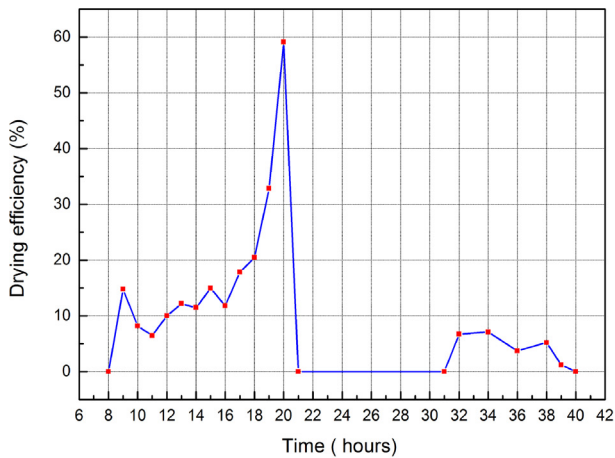
Table 7

Microbiological analyzes of camel meat.

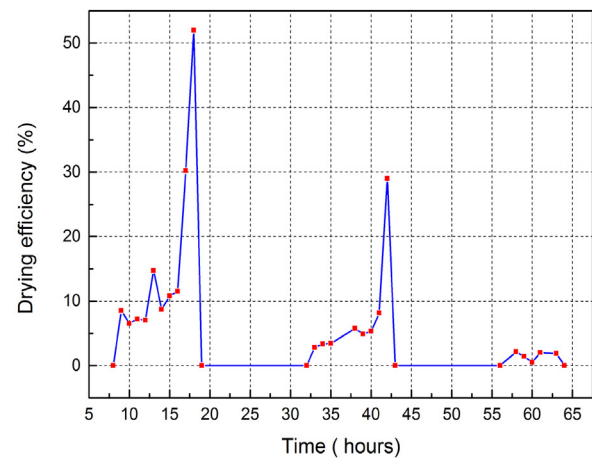
Microorganisms	Number				Norms
	V F	Indirect drying	Direct drying	Drying under open sky	
<i>GAMT</i>	8.1×10^5	5.7×10^3	5.1×10^2	10^4	5×10^5
<i>CT</i>	5.7×10^2	0.5×10^2	00	3.2×10^2	–
<i>CF</i>	1.5×10^2	7.2×10	00	2×10^2	3×10^2
<i>SA</i>	4×10^2	0.5×10^2	1.2×10^2	1.8×10^3	10^2
<i>S</i>	00	00	00	00	00
<i>Y</i>	20	00	00	31	–

indirect drying remains (in part, thanks to the performance of the solar collector promoted by pebbles bed) despite the decrease in solar radiation.

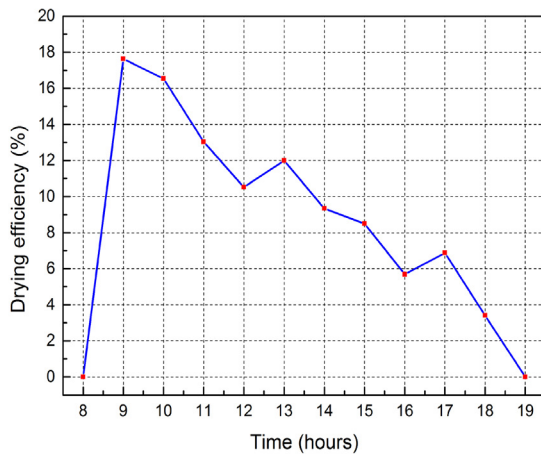
In July, the weight of the meat in the direct drying chamber stabilized at the first 10 h of the process with an AE equal to 10.35% (Fig. 17(c)) In November (Fig. 17(d)), the drying is spread over two days with an AE of 7.88% and 2.84% respectively. In the hot season,



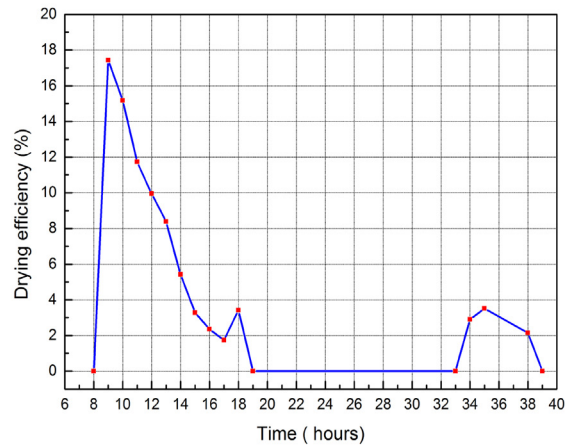
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 17. Evolution of drying efficiency η_d : (a) indirect drying chamber at July experiment, (b) indirect drying chamber at November experiment, (c) direct drying chamber at July experiment, (d) direct drying chamber for November.

Table 8
Physicochemical analyzes of camel meat.

	Fresh meat	Indirect drying	Direct drying	Dried under open sky
Protein content (%)	22	18.37	15.3	9.33
PH	5.47	5.95	5.73	5.87

the drying efficiency of the process is higher: the drying time is faster so the system is more efficient.

(Vijayan et al, 2016) developed an indirect forced convection solar dryer integrated with porous sensible heat storage medium; the average dryer efficiency was of 19%. The performance of the indirect drying our setup reached in November is of the same range.

3.2.8. The quality of the dried meat

Solar drying influences the microbiological, physicochemical and organoleptic quality of meat. We subjected the dried meat of November experiment to different analyzes in the microbiological laboratory of the URER/MS of Adrar in order to validate the quality of the dried camel meat.

a. Microbiological quality

In Table 7, we present the results of microbiological analyze conducted on camel meat during the test of November. During this month, and because of low temperatures compared to July, the conditions are more favorable for microbial degradation.

According to Table 7, in the fresh meat sample, the prevalence of *GAMT* is noted with a significant load of 8.1×10^5 ufc/g which confirms that camel meat is a favorable environment for this flora, these results are compatible with other works such as (ElMalti, 2008); this fact makes that solar drying of meat is a sanitary process. The results show that the germs' load of the indirect dried meat decreased significantly. in the direct dried meat, *CF* and *Y* disappeared from camel (passing to 0%) while after the open sky drying, these germs have resisted well enough and some of them have even increased in number (*CF*, *SA* and *Y*): moderate temperature, exposure to dust and insects infestation under an open sky justifies this increase.

The significant increase in temperature that the camel meat has undergone during indirect and direct temperature causes a significant mortality of germs, that promotes its hygienization and conservation particularly direct drying where the positive impact of solar radiation on microbiological and organoleptic has been proven by many authors (Nortje et al., 2006; Aymerich et al., 2008; Gailunas et al., 2008; Stermer and Hammerschmidt, 1987) demonstrated the destructive

action of ultraviolet rays on microorganisms present in meat products. It is concluded from the table above that the sanitary quality of camel meat dried in the realized setup is satisfactory and poses no risk to the health of the consumer according to the norms imposed by the Algerian legislation (Officiel newspaper number 35 of May 1988, 1998)

b. Physicochemical quality

Physicochemical analyzes gave the level of acidity PH and the protein content in fresh camel meat, dried in indirect and direct chambers then under open sky at November experiment. Table 8 indicates the results.

On fresh meat, the protein level is 22%. After drying under open sky, it decreases to 9.33%. The deterioration of the microbiological quality of the meat dried under open sky causes the fall of the protein content. In the indirect drying chamber, protein content is of 18.37%. The solar drying setup, with its two modes, preserves the meat protein in a very interesting way even more by direct drying (15.3%) where the temperature of air flow is higher compared to the indirect chamber. The increase of temperature causes greater deterioration of the protein. The solar drying preserves the level of acidity PH whatever its mode. This acidity ensures a high microbiological stability and the functions of the metabolisms of the microorganisms at ambient temperature (acid environment unfavorable for the pathogenic germs). These results are in agreement with other results obtained by Dawood and Alkanhal (1995). In conclusion to this, the protein level is better preserved in the case of indirect drying; the final microbiological quality is superior in the case of direct drying. However, both drying modes gave a very satisfactory final quality of dried camel meat. The camel meat appearance before and after drying is shown in Fig. 18.

4. Conclusion

A solar dryer consisting on a direct and an indirect drying chamber superimposed, operating under forced convection and reinforced by a system of sensible heat storage by pebbles was developed and investigated for drying fresh camel meat under climatic conditions of Adrar, a saharian prefecture of the Algerian Sahara. The drying experiments were conducted in July and in November of 2017. The following conclusions were drawn from the obtained results:

The sensible heat storage by bed of pebbles improved the diurnal thermal efficiency of the direct drying chamber by 11.8% more than when no packed bed is used, and for the solar collector by 28% and maintained its efficiency for an hour after sunset.

Under natural conditions, the direct dryer chamber provides higher temperatures than the indirect dryer chamber. In the indirect drying chamber, the initial Moisture on dry basis of camel meat equal to 4 kg/



Fig. 18. Trays loaded with camel meat: (a) before drying, (b) after drying.

kg was reduced to 0.3 kg/kg in 31 h July and 54 h in November. In the direct drying chambers, the moisture content stabilized at the value of 0.18 after 10 h of drying. In November at 0.3 kg/kg after 30 h. The higher is the temperature, the faster is the drying. For both chambers, the most suitable model to describe the evolution of reduced moisture content for July period is the logarithmic model; Midilli-Kucruk model gives the best prediction of the drying behavior of camel meat in November. In the indirect drying chamber, lower is the tray placed, greater is the drying rate in the first day, on the second day the phenomenon is inverted; in the direct chamber, the drying rate on July is higher than on November because of the higher temperatures. In July, the average of indirect drying efficiency over a day reaches 18.34% in July and 15.72% in November. For the direct drying, it reaches the average of 10.35% in July and 7.88% in November. The microbiological and physicochemical analyzes monitoring of experiments proved that the protein level has been better preserved by the indirect drying; the final microbiological quality was superior with the direct drying. However, both drying modes gave a very satisfactory final quality of dried camel meat contrary to the case of drying under open sky where the hygienic quality and physicochemical quality were much altered

Acknowledgements

The authors acknowledge the support provided by 'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER/MS), Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER)' of Adrar, Algeria to make and finalize this work.

References

- Aymerich, T., Picouet, P.A., Monfort, J.M., 2008. Decontamination technologies for meat products. *Meat Sci.* 78, 114–129.
- Bal, Lalit M., et al., 2010. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 2298–2314.
- Braham Wafa, Chaouch, et al., 2016. The 6th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES 2016), November 15–18, 2016/Paris, France, Solar drying characteristics and water desorption isotherm of camel.
- Chinnan, M.S., 1984. Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 22, 447–460.
- Dawood, A., Alkanhal, M.A., 1995. Nutrient composition of Najdi-camel meat. *Meat Sci.* 39 (1), 71–78.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Process*. A Wiley-Interscience publication.
- Elmalti, J., 2008. Application de procédés naturel pour la bioconservation de la viande du dromadaire et du cheval. Thèse doctorat, Faculté des sciences Ain chok université Hassan II, Casablanca.
- El-Sebaï, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I., El-Gohary, H.G., 2002. Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Convers. Manage.* 43, 2251–2266.
- El-Sebaï, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I., El-Bialy, E., 2007. Year round performance of double pass solar air heater with packed bed. *Energy Convers. Manage.* 48, 990–1003.
- El-Sebaï, A.A., Shalaby, S.M., 2013. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Convers. Manage.* 74, 109–116.
- Esakkimuthu, S., Hassaboub, Abdel Hakim, Palaniappan, C., Spinnler, Markus, Blumenberg, Jurgen, Velraj, R., 2013. Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Sol. Energy* 88, 144–153.
- 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. *J. Food Prot.* 71, 629–633.
- Harmeet, Singh, Saini, R.P., Saini, J.S., 2010. A review on packed bed solar energy storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 1059–1069.
- Henderson, S.M., 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 17, 1167–1168.565–569.
- Kadim, Isam T., Mahgoub, Osman, Al-Marzooqi, Waleed, 2008. Meat Quality and Composition of *Longissimus thoracis* from Arabian Camel (*Camelus dromedaries*) and Omani Beef: a comparative study. *J. Camelid Sci.* 1, 37–47. <http://www.isocard.org>.
- sacilik, kamil, 2007. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) *Journal of Food Engineering* 79, 23–30.
- Kavak, Akpinar E., 2010. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling, performance analyses. *Energy Convers. Manage.* 51, 2407–2418.
- Kavak, Akpinar E., Bicer, Y., 2008. Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Convers. Manage.* 49, 1367–1375.
- Kilgour, O.F.G., 1986. *Mastering Nutrition*. Macmillan Education Ltd., London, pp. 299–305.
- Kumar, M., Kumar, S., Sansaniwal, Khatak P., 2016. Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 346–360.
- Alkilani, Mahmud M., Sopian, K., Alghoul, M.A., Sohif, M., Ruslan, M.H., 2011. Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 1476–1490.
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., 2002. A new model for single layer drying. *Dry. Technol.* 20, 1503–1513.
- Nortjé, 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. Official newspaper number 35 of May 1988). *Journal Officiel de la Republique Algerienne*, 1998, 27 mai, No 35.
- Prakash, O., Kumar, A., 2013. Historical review and recent trends in solar drying systems. *Int. J. Green Energy* 10, 690–738.
- Saeed, Asaad R., Al-Hilphy, et al., 2013. Drying local camel sausages by solar dryer and study their chemical, microbial and organoleptic characteristics. *Am. J. Food Nutr* 3 (1), 22–30. <https://doi.org/10.5251/ajfn.2013.3.1.22.30>.
- Slimani, M.E.A., Amirat, M., Bahria, S., 2015a. Study and modeling of heat transfer and energy performance in a hybrid PV/T collector with double passage of air. *Int J Energy Clean Environ.* 16 (1–4), 235–245.
- Slimani MEA, Amirat M, Bahria S., 2015b. Analysis of thermal and electrical performance of a solar PV/T air collector: energetic study for two configurations. In: 3rd International conference on control, engineering and information technology, CEIT 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CEIT.2015.7232999>.
- Slimani M.E.A., Amirat M, Bahria S, Kurucz I, Aouli M, Sellami R., 2016. Study and modeling of energy performance of a hybrid photovoltaic/thermal solar collector: configuration suitable for an indirect solar dryer. *Energy Convers Manage.* 125:209–21.
- Slimani M.E.A., Amirat M., I. Kurucz, S. Bahria., A. Hamidat, W. Braham Chaouch., 2017. A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions. *Energy Conversion and Management.* 133: 458–476.
- Shalash, M.R., 1998. Provisional report. *Int. Found. Sci.* No. 6, 285.
- Stermer, B.A., Hammerschmidt, R., 1987. Association of heat shock induced resistance to disease with increased accumulation of insoluble extensin and ethylene synthesis. *Physiol. Molec. Plant Pathol.* 31 (3), 453–461.
- Tokar GM. 1997. Food drying in Bangladesh. Agro-based industries and technology project (ATDP), IFDC, Dhaka. Available from: <http://www.agrobengal.org/special/fooddry.htm>, 1997.
- Vijayan, S., Arjunan, T.V., Kumar, Anil, 2016. Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer. *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.* 36, 59–67.
- Wilson, R.T., 1984. *The Camel*. Longman Group Ltd., London, pp. 153–172.
- Yagcioglu, A. et al., 1999. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In: *Proceedings of the International Congress on Agricultural Mechanization and Energy*, 26–27 May, Adana, Turkey, Faculty of Agriculture, Cukurova University.
- Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H.I., 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26 (5), 457–465.
- Zhao, D.L., Li, Y., Dai, Y.J., Wang, R.Z., 2011. Optimal study of a solar air heating system with pebble bed energy storage. *Energy Convers. Manage.* 52, 2392–2400.