



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**Aymen RAFAI**

Le : jeudi 26 avril 2018

## **Étude d'un Séchoir solaire à convection forcée pour le séchage de la pomme de terre à Biskra**

---

### **Jury :**

Dr.	BAGAR Abdelhakim	MCA	Université de Biskra	Président
Dr.	CHABANE Foued	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	MEHAMEDJ Djemoui	MCB	Université de Biskra	Examineur



# Remerciements

*Avant tout je remercie "Allah" le tout puissant, le Miséricordieux, qui m'a donné le courage, la volonté, la force, la santé et la persistance pour accomplir ce modeste travail. Merci de m'avoir éclairé le chemin de la réussite et m'avoir aidé à surmonter toutes les difficultés lors de mes études.*

*Je s'adresse mes plus vifs remerciements à Mon encadreur **Mr CHABANE Foued**, Maître de Conférence à la faculté des Sciences et de la technologie, Université Biskra, pour son encadrement, ses encouragements, ses orientations, pour ses aides, sa patience, ses conseils scientifiques judicieux, sa compétence et sa gentillesse qui m'ont permis de bien mener ce modeste travail et pour avoir participé activement à la correction de ce manuscrit.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury pour avoir accepté l'évaluation de mon travail.*

*Je remercie aussi tous les enseignants et les enseignantes qui m'ont formé durant ces 5 années, et m'ont préparé pour cette dernière année de master. Merci pour vos encouragements et votre gentillesse.*

*Enfin, Je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.*

# DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de vos interminables conseils; assistance et soutien moral, en témoignage de ma reconnaissance et mon affection, dans l'espoir que vous en serez fiers.*

*A mon Très chère père, mon exemplaire dans cette vie, qui m'a toujours soutenu et m'encouragé, et qu'a été toujours présent pour moi.*

*A la plus chère au monde, ma mère qui a toujours m'encouragé durant mes études. Je t'aime maman. Je demande à Dieu les protéger et leur réserver une longue vie.*

*A mes grand- parents maternels et paternels*

*"La paix a son âme"*

*A ma 2<sup>ème</sup> mère, je souhaite dieux que la protégée.*

*A mes Très chères sœurs*

*A mes Très chers frères*

*A la petite fleur de la famille "Mayar" et le beau "Khalil"*

*A mes oncles et tantes paternels et maternels et leurs enfants.*

*A tous ma famille Rafai et Necib*

*A mes beaux-frères*

*A toute la promotion master 2019-2020 / Option Energétique du*

*Département des sciences et de la technologie*

*Université Mohamed Khider-Biskra-*

*A toute personne qui me connaît de près ou de loin.*



# «Nomenclature»

$A_c$ : Zone d'ouverture de l'absorbeur	(m <sup>2</sup> )
d: diamètre du produit	(mm)
$D_{eff}$ : diffusivités efficaces	
e: épaisseur du produit	(mm, m)
G: intensité du rayonnement solaire	(W/m <sup>2</sup> )
h: coefficient de transfert de chaleur	(W/m <sup>2</sup> °C)
$I_T$ : Incident de rayonnement solaire total sur le capteur	(W/m <sup>2</sup> )
L: longueur	(°)
M :masse de produit	(kg)
$\dot{m}$ : débit massique d'air	(Kg/s)
H : hauteur de la grille de l'entrée à la salle de séchage	(cm)
$M_0$ : teneur en humidité initiale	(%, base humide)
$M_d$ : Masse sèche de produit	(g) ou (kg)
$M_{eq}$ : teneur en humidité d'équilibre	(%, base humide)
$M_{exp.i}$ : le taux d'humidité expérimental	(%)
$M_h$ : Masse humide de produit	(kg)
$M_{mod.i}$ : est le taux d'humidité du prédicat	(%)
$M_{out}$ : perte de masse liquide	(g)
MR: taux d'humidité	(%)
$M_t$ : teneur en humidité à tout moment de séchage	(%, base humide)
N: le nombre d'observations	
Q: Énergie utile réelle collectée	(W)
R: Coefficient de corrélation	
$R^2$ : facteur de détermination	
RH: humidité relative	(%)
RMSE: erreur quadratique moyenne	
t: temps de séchage	(s, min, h)
Ta: température ambiante	(°C)
Tab: température moyenne de la plaque absorbante	(°C)
Tch: température de la chambre de séchage	(°C)

T <sub>en</sub> : température d'entrée de la salle de séchage	(°C)
T <sub>produit</sub> : température du produit	(°C)
V: vitesse de l'air	(m/s)
$\chi$ : Humidité absolue d'un solide	(kg/kg ( <i>Md</i> ))
$\chi^2$ : erreur chi carré	
$\chi_r$ : teneur en humidité sur une base humide	(kg/kg ( <i>Mh</i> ))
$\eta$ : efficacité du capteur solaire	(%)
$\varphi$ : Latitude du lieu	(°)

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure (I-1):</b>	Schéma d'un capteur plan à air .....	P4
<b>Figure (I-2):</b>	principe d'un capteur solaire plan.....	P4
<b>Figure (I-3):</b>	fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	P5
<b>Figure (I-4):</b>	Un angle capteur plat (hiver-été).....	P6
<b>Figure (I-5):</b>	Schéma du lyophilisateur.....	P8
<b>Figure (I-6):</b>	Le Principe de la déshydratation osmotique.....	P9
<b>Figure (I-7):</b>	Un système de roue déshydratante pour l'application de séchage.....	P9
<b>Figure (I-8):</b>	courbes de séchage.....	P12
<b>Figure (I-9):</b>	Représentation typique des séchoirs solaires.....	P13
<b>Figure (I-10):</b>	Séchoirs solaires directs.....	P14
<b>Figure (I-11):</b>	Séchoirs solaires indirects.....	P14

## Chapitre II

<b>Figure (II-1):</b>	Schéma de principe du séchoir solaire en mode mixte.....	P18
<b>Figure (II-2):</b>	Variation du coefficient de transfert de chaleur par convection avec le temps de séchage pour les cylindres et les tranches de pomme de terre.....	P19
<b>Figure (II-3):</b>	Variation de la consommation d'énergie spécifique avec le temps de séchage pour les cylindres et les tranches de pomme de terre.....	P19
<b>Figure (II-4):</b>	Poêle-cheminée solaire non vitré à convection forcée.....	P19
<b>Figure (II-5):</b>	Variation de l'intensité solaire avec le temps.....	P20
<b>Figure (II-6):</b>	Comparaison des rendements thermiques du poêle-cheminée solaire.....	P20
<b>Figure (II-7):</b>	Schéma de la configuration expérimentale.....	P21
<b>Figure (II-8):</b>	Changements dans les niveaux de composés bioactifs dans la cerise séchée en fonction de la température de séchage et de la période de stockage.....	P21
<b>Figure (II-9):</b>	Schéma de principe du sécheur sous vide à micro-ondes.....	P22
<b>Figure (II-10):</b>	Courbes de déformation des testicules de perforation appliquées aux croustilles des différents processus: a) blanchiment à l'eau chaude (BL (A)) suivi de MWVD; b) blanchiment à l'eau chaude (BL (A)) suivi de MWMFD; c) imprégnation sous vide et blanchiment aux micro-ondes (BL (B)) suivi de MWMFD; et d) imprégnation sous vide et blanchiment à l'eau chaude (BL (C)) suivi de MWMFD.....	P22

<b>Figure (II-11):</b>	Description schématique du système de séchage.....	P23
<b>Figure (II-12):</b>	variation de la teneur en eau en fonction du temps associé à un panneau (a) et deux panneaux (b).....	P23
<b>Figure (II-13):</b>	Séchoir solaire à mode mixte à convection naturelle conçu en interne.....	P24
<b>Figure (II-14):</b>	Variation du coefficient de transfert de chaleur par convection pendant le séchage solaire en mode mixte de cylindres de pomme de terre de 8, 10 et 13 mm de diamètre (a) sans retrait et (b) avec retrait.....	P25
<b>Figure (II-15):</b>	Le séchoir solaire indirect à convection forcée.....	P25
<b>Figure (II-16):</b>	Taux d'humidité par rapport à (t, temps), en comparant la courbe expérimentale avec celle prédite sur la base: (a, b) des modèles suggérés; (c, d) Modèle Midilli-Kucuk.....	P26
<b>Figure (II-17):</b>	Propriétés de collage des échantillons d'amidon traités à la chaleur sèche répétée (RDH) et à la chaleur sèche continue (CDH).....	P27
<b>Figure (II-18):</b>	Thermogrammes DSC des échantillons d'amidon traités à la chaleur sèche (RDH) et à la chaleur sèche continue (CDH) natifs.....	P27
<b>Figure (II-19):</b>	Le séchoir solaire expérimental.....	P28
<b>Figure (II-20):</b>	Forme au début et à la fin du séchage.....	P28
<b>Figure (II-21):</b>	Expérimental avec une approximation exponentielle du taux d'humidité sans dimension moyen en fonction du temps de séchage pour les quatre essais de la forme du disque.....	P29
<b>Figure (II-22):</b>	Expérimental avec un rapport d'humidité sans dimension moyen approximatif exponentiel en fonction du temps de séchage pour les quatre essais de forme cubique.....	P29
<b>Figure (II-23):</b>	Expérimental avec un rapport d'humidité sans dimension moyen approximatif exponentiel en fonction du temps de séchage pour les quatre essais de forme parallélépipédique.....	P30
<b>Figure (II-24):</b>	Domaine de calcul d'une tranche de patate douce IIRCD.....	P30
<b>Figure (II-25):</b>	Courbe de séchage de la patate douce pendant IIRCD (expérimental et simulation) et CD réalisée à 70 °C.....	P31
<b>Figure (II-26):</b>	Température expérimentale et simulation pour la patate douce pendant IIRC...	P31
<b>Figure (II-27):</b>	Flux thermique infrarouge, convectif vers l'intérieur et évaporatif pour IIRCD de patate douce.....	P32

<b>Figure (II-28) :</b>	Vue schématique de la configuration expérimentale complète pour le séchage par convection.....	P32
<b>Figure (II-29):</b>	Répétabilité de l'expérience à (a) une vitesse d'écoulement d'air de 4 m / s et une température de 50 ° C, (b) une vitesse d'air de 6 m / s et une température de l'air de 50 ° C.....	P33
<b>Figure (II-30):</b>	Validation des données actuelles avec les données disponibles dans la littérature.....	P33
<b>Figure (II-31):</b>	Variation de (a) la teneur en humidité avec le temps de séchage et (b) la vitesse de séchage pour différentes températures de l'air et à une vitesse d'écoulement de 2 m / s.....	P34
<b>Figure (II-32):</b>	Installation expérimentale pour le séchage solaire en mode mixte par convection naturelle.....	P35
<b>Figure (II-33):</b>	Comparaison entre les teneurs en humidité dimensionnelles expérimentales et calculées obtenues en utilisant des paramètres de séchage variables et constants pour les cylindres de pomme de terre.....	P35
<b>Figure (II-34):</b>	Comparaison entre les teneurs en eau dimensionnelles expérimentales et calculées obtenues en utilisant des paramètres de séchage variables et constants pour les tranches de pomme de terre.....	P36
<b>Figure (II-35):</b>	Distribution mesurée et prédite de la teneur en humidité sans dimension obtenue en utilisant des paramètres de séchage constants pour les tranches de pomme de terre.....	P36
<b>Figure (II-36):</b>	Distribution mesurée et prédite de la teneur en humidité sans dimension obtenue en utilisant des paramètres de séchage constants pour les cylindres de pomme de terre.....	P37
<b>Figure (II-37):</b>	Caractéristiques et propriétés de séchage des tranches de pomme de terre violettes. A, courbes de taux d'humidité. B, courbes de vitesse de séchage. C, profils viscosité-température. D, courbes d'hydrolyse en fonction du temps. HAD, séchage à air chaud; FIHPD, séchage par pompe à chaleur à infrarouge lointain; AIJD, séchage par jet d'air; VFD, lyophilisation sous vide.....	P38

## Chapitre III

<b>Figure (III-1):</b>	Image satellite de la zone d'expérience.....	P41
<b>Figure (III-2):</b>	Courbes de température et d'humidité relative de Biskra.....	P42
<b>Figure (III-3):</b>	Configuration expérimentale (capteur solaire avec chambre de séchage).....	P42

<b>Figure (III-4):</b>	Configuration expérimentale de la chambre de séchage.....	P43
<b>Figure (III-5):</b>	Orifices dans la chambre de séchage.....	P43
<b>Figure (III-6):</b>	Support du produit de séchage.....	P44
<b>Figure (III-7):</b>	Une balance électronique numérique.....	P44
<b>Figure (III-8):</b>	Un thermomètre-contrôle (modèle TPM-10).....	P45
<b>Figure (III-9):</b>	A thermocouples de type k.....	P45
<b>Figure (III-10):</b>	Hygromètre (modèle PCE-555).....	P45
<b>Figure (III-11):</b>	pyranomètre (modèle Voltcraft PL-110SM).....	P46
<b>Figure (III-12):</b>	Un anémomètre numérique (modèle KIMO-LVA).....	P46
<b>Figure (III-13):</b>	Voltage régulateur (AC 220V 4000W).....	P47
<b>Figure (III-14):</b>	Représente de Moteur d'aspiration d'air.....	P47
<b>Figure (III-15):</b>	Tranches de pomme de terre humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 0,011 Kg /s, hauteur de la grille 4,8 cm.....	P48
<b>Figure (III-16):</b>	Tranches de pomme de terre humides et séchées de 3 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 0,011 Kg /s, hauteur de la grille 6,8 cm.....	P48
<b>Figure (III-17):</b>	Tranches de pomme de terre humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 0,024 Kg /s, hauteur de la grille 4,8 cm.....	P49
<b>Figure (III-18):</b>	Tranches de pomme de terre humides et séchées de 3 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 0,024 Kg /s, hauteur de la grille 6,8 cm.....	P49
<b>Figure (III-19):</b>	distribution des volets dans Originlab 8.....	P53
<b>Figure (III-20):</b>	Fenêtre où choisir le modèle à tester.....	P54
<b>Figure (III-21):</b>	Tableau des résultats d'analyse du modèle.....	P55
<b>Figure (III-22):</b>	Graph des résultats d'analyse du modèle.....	P55

## Chapitre IIV

<b>Figure (IV-2a):</b>	Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s .....	P63
<b>Figure (IV-2b):</b>	Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.01 kg/s.....	P63
<b>Figure (IV-2c):</b>	Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P64
<b>Figure (IV-2d):</b>	Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P65

<b>Figure (IV-2e):</b>	Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P66
<b>Figure (IV-2f):</b>	Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P66
<b>Figure (IV-3a):</b>	Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P68
<b>Figure (IV-3b):</b>	Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P68
<b>Figure (IV-3c):</b>	Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P69
<b>Figure (IV-3d):</b>	Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P70
<b>Figure (IV-3e):</b>	Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P71
<b>Figure (IV-3f):</b>	Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P72
<b>Figure (IV-4a):</b>	Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P73
<b>Figure (IV-4b):</b>	Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P74
<b>Figure (IV-4c):</b>	Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P75
<b>Figure (IV-4d):</b>	Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s...	P75

<b>Figure (IV-4e):</b>	Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s..	P77
<b>Figure (IV-4f):</b>	Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s..	P77
<b>Figure (IV-5a):</b>	Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P79
<b>Figure (IV-5b):</b>	Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P79
<b>Figure (IV-5c):</b>	Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P80
<b>Figure (IV-5d):</b>	Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P81
<b>Figure (IV-5e):</b>	Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P82
<b>Figure (IV-5f):</b>	Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P82
<b>Figure (IV-6a):</b>	Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P83
<b>Figure (IV-6b):</b>	Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P84
<b>Figure (IV-6c):</b>	Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P85
<b>Figure (IV-6d):</b>	Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P85
<b>Figure (IV-6e):</b>	Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P86

<b>Figure (IV-6f):</b>	Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P87
<b>Figure (IV-7a):</b>	Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P88
<b>Figure (IV-7b):</b>	Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P89
<b>Figure (IV-7c):</b>	Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P89
<b>Figure (IV-7d):</b>	Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P90
<b>Figure (IV-7e):</b>	Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P91
<b>Figure (IV-7f):</b>	Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P91
<b>Figure (IV-8a):</b>	Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P92
<b>Figure (IV-8b):</b>	Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.....	P93
<b>Figure (IV-8c):</b>	Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P94
<b>Figure (IV-8d):</b>	Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.....	P94
<b>Figure (IV-8e):</b>	Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P95
<b>Figure (IV-8f):</b>	Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.....	P96
<b>Figure (IV-9a):</b>	Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur, débit = 0,01 kg/s.....	P97
<b>Figure (IV-9b):</b>	Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur, débit = 0,01 kg/s.....	P97

<b>Figure (IV-9c):</b>	Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur, débit = 0.024 kg/s.....	P98
<b>Figure (IV-9d):</b>	Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur, débit = 0.024 kg/s.....	P98
<b>Figure (IV-9e):</b>	Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur, débit = 0.0348 kg/s.....	P99
<b>Figure (IV-9f):</b>	Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur, débit = 0.0348 kg/s.....	P100

# Listes des tableaux

## Chapitre I

<b>Tableau (I.1):</b>	Avantages et inconvénients pour les différents types de séchoirs solaires.....	p15
-----------------------	--	-----

## Chapitre III

<b>Tableau (III.1):</b>	Modèle mathématique appliqué aux courbes de séchage.....	P50
<b>Tableau (III-2):</b>	Modèle de séchage en couche mince à décrire tranche de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur et hauteur 4.8 cm.....	P56
<b>Tableau (III-3):</b>	Modèle de séchage en couche mince à décrire tranche de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur et hauteur 6.8 cm.....	P56
<b>Tableau (III-4):</b>	Modèle de séchage en couche mince à décrire tranche de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur et hauteur 4.8 cm.....	P56
<b>Tableau (III-5):</b>	Modèle de séchage en couche mince à décrire tranche de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur et hauteur 6.8 cm.....	P56
<b>Tableau (III-6):</b>	La différence entre la teneur en eau théorique et expérimentale pour H= 4,8 cm et épaisseur = 2mm.....	P57
<b>Tableau (III-7):</b>	La différence entre la teneur en eau théorique et expérimentale pour H= 6,8 cm et épaisseur = 2mm.....	P58
<b>Tableau (III-8):</b>	La différence entre la teneur en eau théorique et expérimentale pour H= 4,8 cm et épaisseur = 3mm.....	P58
<b>Tableau (III-9):</b>	La différence entre la teneur en eau théorique et expérimentale pour H= 6,8 cm et épaisseur = 3mm.....	P59

# Sommaire

<b>Dédicace</b> .....	
<b>Remerciements</b> .....	
<b>Nomenclature</b> .....	
<b>Liste des figures</b> .....	
<b>Liste des tableaux</b> .....	
<b>Sommaire</b> .....	
<b>Introduction</b> .....	

## **Chapitre I : Application et processus de séchage solaire**

I.1. Introduction.....	P03
I.2. Les Capteurs solaires.....	P03
I.2.1. Technologie des capteurs solaires plans .....	P03
I.2.1.1. Composants du système de conversion thermique.....	P03
I.2.1.2. Principe d'un capteur solaire plan.....	P04
I.2.1.3. Fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	P05
I.2.1.4. L'efficacité des capteurs solaires.....	P05
I.2.1.5. Composants des capteurs solaires d'air.....	P06
I.2.1.6. Position et orientation d'un capteur.....	P06
I.2.2. Application de capteurs solaires.....	P07
I.3. Généralités sur le séchage.....	P07
I.3.1. Méthodes de séchage.....	P07
I.3.1.1. Séchage à basse température.....	P07
I.3.1.2. Séchage à haute température.....	P07
I.3.1.3. Lyophilisation.....	P08
I.3.1.4. Le Séchage Osmovac (déshydratation osmotique).....	P08
I.3.1.5. Séchage déshydratant.....	P09
I.3.2. Objectifs de séchage.....	P09
I.3.3. applications du séchage solaire.....	P09

I.3.3.1. Le séchage solaire agricole.....	P10
I.3.3.2. Le séchage solaire industrielle.....	P10
I.3.4. Terminologie du séchage.....	P10
I.3.4.1. Humidité .....	P10
I.3.4.2. Taux d'humidité.....	P10
I.3.4.3. Humidité absolue d'un solide.....	P10
I.3.4.4. Humidité relative.....	P11
I.3.5. Effet des paramètres sur le séchage.....	P11
I.3.5.1. Température.....	P11
I.3.5.2. Débit massique.....	P11
I.3.5.3. Humidité relative de l'air.....	P11
I.3.5.4. Teneur en humidité du produit de séchage.....	P11
I.3.6. Vitesse de séchage.....	P11
I.3.7. Périodes de taux de séchage.....	P12
I.4. Classification des séchoirs solaires.....	P12
I.4.1. Les séchoirs solaires directs.....	P14
I.4.2. Les séchoirs solaires indirects.....	P14
I.4.3. Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire.....	P14
I.5. Conclusion.....	P15
References.....	P16

## **Chapitre II : Étude bibliographique**

II.1. Introduction.....	P18
II.2. Etude bibliographique.....	P18
II.3. Conclusion.....	P38
References.....	P39

## **Chapitre III : Étude expérimentale et théorique**

III.1. Introduction.....	P41
III.2. Localisation des expériences et climat de zone.....	P41
III.2.1. Lieu des expériences.....	P41
III.2.2. Climat zone expérimentale.....	P42
III.3. Étude expérimentale.....	P42
III.3.1. Fabrication de la chambre de séchage.....	P43
III.3.2. Procédure expérimentale.....	P44

III.3.3. La disposition du produit.....	P49
III.4. Etude théorique.....	P50
III.4.1. Calcul des diffusivités effectives.....	P51
III.4.2. Modèle de séchage en couche mince.....	P52
III.4.3. Utilisation de logiciel Originlab 8.....	P52
III.4.4. Description du logiciel.....	P52
III.4.5. Travailler sur la courbe.....	P54
III.4.6. Essai de Modèle.....	P55
III.5. Conclusion.....	P60
References.....	P61

### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

IV.1. Introduction.....	P62
IV.2. Variation de l'intensité du rayonnement solaire.....	P62
IV.3. Variation de la température moyenne de la plaque absorbante.....	P67
IV.4. Variation de la température d'entrée de la salle de séchage.....	P73
IV.5. Variation de température de la chambre de séchage.....	P78
IV.6. Variation de la température du produit .....	P83
IV.7. Changement d'humidité relative du produit.....	P87
IV.8. La variation de la perte de masse liquide au cours du temps de chaque produit.....	P92
IV.9. Détermination du taux d'humidité réduit MR.....	P96
IV.10. Conclusion.....	P101
<b>Conclusion générale.....</b>	
<b>Résumé.....</b>	

# « Introduction générale »

Le séchage au soleil varie d'une région à l'autre et pour assurer le succès de ce processus; La zone désignée doit avoir une température ambiante élevée et une forte intensité de rayonnement solaire, et le temps de séchage et le maintien de la qualité du produit sont les deux critères de base pour choisir la méthode de séchage appropriée car l'Algérie bénéficie de beaucoup de soleil pendant la plupart des jours de l'année. Il bénéficie d'un ensoleillement annuel moyen d'environ 2 500 heures, et reçoit une énergie solaire quotidienne moyenne de 16,2 à 27 MJ / m<sup>2</sup> au niveau horizontal (**Bennamoun & Belhamri, 2007**). Cette énergie est suffisante, surtout en été, pour répondre à la demande énergétique de séchage des produits agricoles (**Abdelhamid Farhat et al**). L'augmentation des prix et la pénurie de carburant ont conduit à des études et des recherches approfondies sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie alternative, en particulier dans les pays en développement. L'énergie solaire a de nombreuses applications importantes, y compris le séchage solaire, qui est une technologie commune à toutes les autres applications et constitue une étape importante introduite dans diverses industries alimentaires, car par le passé, les aliments étaient séchés en les exposant directement à la lumière du soleil en raison du manque de technologie appropriée pour ce processus. Mais maintenant, il existe de nombreuses façons d'accomplir le processus de séchage comme la méthode indirecte, qui dépend du collecteur d'air solaire pour augmenter le chauffage de l'air, et la salle de séchage pour garder le produit à sécher des microbes à l'extérieur et l'isolation qui émet de la chaleur dans un espace plus petit Le rôle de cette étape est de réduire la teneur en eau des produits Prétraitement, pour neutraliser les activités bactériennes et fongiques, et cela se traduit par la conservation des produits alimentaires pendant une longue période (plusieurs mois). De plus, le séchage est considéré comme l'une des solutions suggérées au problème de la disponibilité de nombreux produits agricoles qui sont consommés en grande quantité au cours des quatre saisons (**TOUATI, 2008**).

Le séchage solaire des récoltes, fruits, légumes et viandes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air (exposition direct ou soleil). Il a été employé pour sécher des grains, fruits, viandes, poissons et d'autres produits alimentaires destinés à la consommation. Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle (exposition direct ou soleil) sans l'aide technique. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air.

La méthode traditionnelle du séchage souffre de maints problèmes, parmi ces derniers, le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, l'incertitude du temps, le coût de la main d'œuvre élevé, la nécessité de zones vastes, l'infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou les séchoirs solaires (**Busunia MA., 2001**).

Un séchoir solaire correctement conçu peut alléger les inconvénients liés au séchage ouvert du soleil, et les qualités du produit sec (final) peuvent être améliorées. Beaucoup de scientifiques ont étudié la modélisation de séchage solaire des produits agricoles et il y a également simulation des études sur les séchoirs solaires (directs, indirects) et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisé par la cinétique de séchage.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier le comportement de séchage solaire du séchage en couche mince pour la pomme de terre, en utilisant un séchoir solaire indirect et une salle de séchage sous convection forcé, en plus de déterminer un modèle mathématique en utilisant les données expérimentales réalisés dans le site expérimental au sien de l'université **MOHAMED KHIDER** Biskra, pour calculer le taux d'humidité de ce comportement de séchage.

Notre mémoire se compose de quatre chapitres:

Le premier chapitre présente une revue de l'importance des capteurs solaires et décrit le processus de séchage solaire et tout le nécessaire pour le réaliser.

Le deuxième chapitre se compose du deuxième chapitre consiste en une étude bibliographique et présente plusieurs études antérieures qui ont un but commun avec notre travail.

Le troisième chapitre décrit les étapes de l'expérience et montre tous les outils de mesure et les matériaux nécessaires pour assurer l'opération de séchage, ainsi que la méthode de détermination du modèle.

Le dernier chapitre explique et interprète les résultats expérimentaux obtenus, qui ont été traduits en courbes, et il donne des comparaisons entre le modèle utilisé.

# Chapitre I

Application et  
processus de séchage  
solaire

## **I.1. Introduction :**

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide.

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année).

L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique, par l'utilisation d'équipements pour capter le rayonnement solaire.

Dans ce chapitre on va présenter les différentes méthodes et moyens de séchage solaire, le fonctionnement, les composants de capteurs solaires qui sont plus efficaces dans le séchage, définir également les types de séchoirs existants et quels sont-ils utilisés.

## **I.2. Les capteurs solaire :**

Les capteurs solaires thermiques sont des appareils spéciaux d'échangeur de chaleur qui permettant la conversion de l'énergie de rayonnement solaire en énergie thermique [17].

Fondamentalement, Il existe deux principaux types de capteurs solaires :

- les capteurs plans.
- les capteurs par concentration.

### **I.2.1. Technologie des capteurs solaires plans : (vitrés à air)**

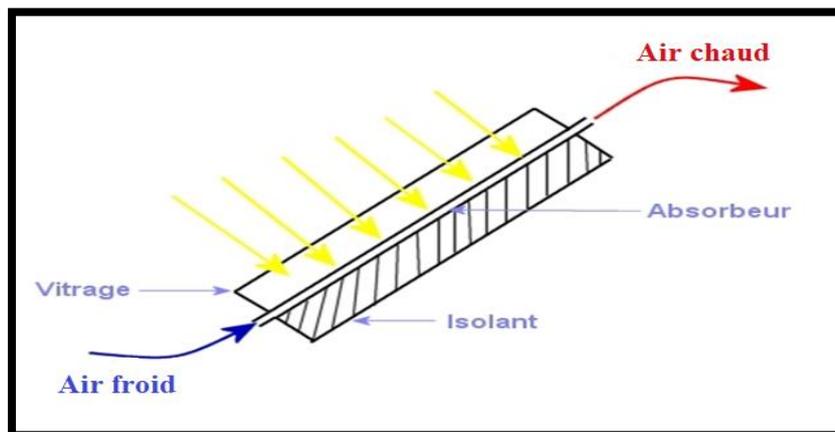
#### **I.2.1.1. Composants du système de conversion thermique :**

Les capteurs plans absorbent le rayonnement solaire au moyen d'une plaque peinte en noir et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduits, sa température (liquide ou air) augmente en raison de la chaleur reçue par la plaque absorbante.

Les principaux composants des capteurs solaires sont [11]:

- Une surface pour capter le rayonnement solaire.P03

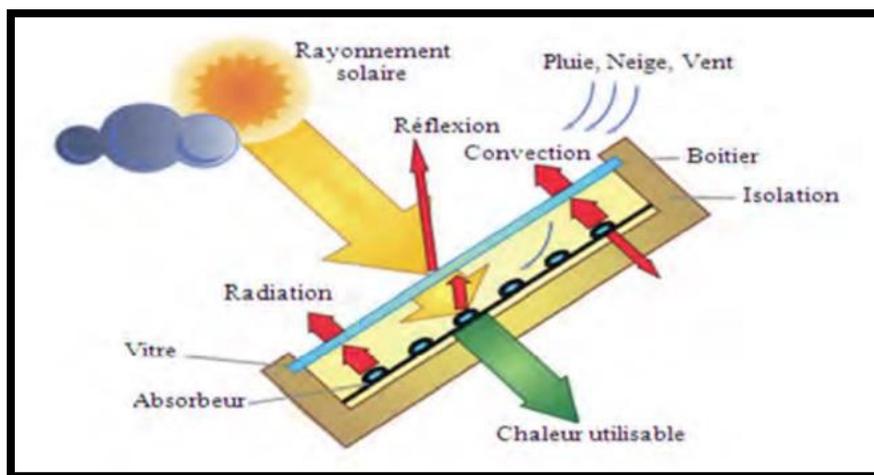
- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories), les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont : l'eau et l'air.
- Un stockage thermique.
- Un réseau de distribution.



Figure(I.1): Schéma d'un capteur plan à air.

### I.2.1.2. Principe d'un capteur solaire plan

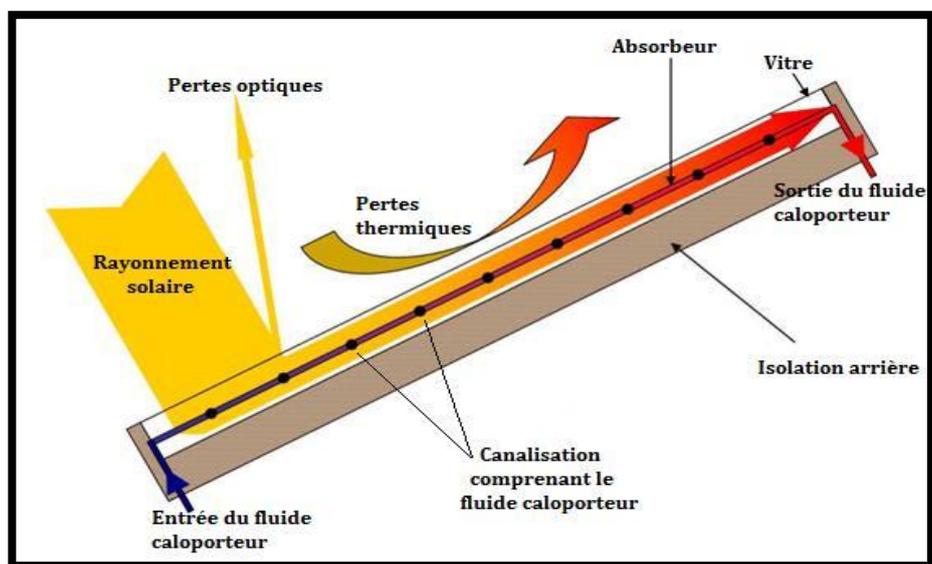
Le principe de conversion du rayonnement solaire en énergie thermique est basé sur la paroi absorbante qui s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident, et l'effet de serre qui consiste à accumuler la chaleur dans un capteur pour la transférer directement ou par l'intermédiaire d'un fluide qui circule sous cette paroi et récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ( $T_{fs} - T_{fe}$ ) à la traversée du capteur [1],[14].



Figure(I.2): principe d'un capteur solaire plan.

### I.2.1.3. Fonctionnement d'un capteur solaire plan :

Le principe de fonctionnement est dit de l'effet de serre. Les rayons du soleil (d'une longueur d'onde visible,  $\sim 0.5 \mu\text{m}$ ) traversent la couverture transparente supérieure, en verre ou en plastique, puis frappent l'absorbeur. Celui-ci étant noir, il absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent il se chauffe. En effet, tout corps chaud émet des rayonnements aux températures usuelles, celui-ci se trouve dans le domaine de l'infrarouge ( $\sim 9\mu\text{m}$ ). A cette longueur d'onde, le verre est parfaitement opaque et réfléchit donc tout cet infrarouge. La chaleur reste ainsi prisonnière du capteur [24].



Figure(I.3): fonctionnement d'un capteur solaire plan.

### I.2.1.4. L'efficacité des capteurs solaires :

L'efficacité des capteurs solaires dépend du matériau du collecteur recouvert; la vitesse de l'air, l'absorbeur et sa place dans le capteur, le principal paramètre d'efficacité d'un capteur solaire est le degré de chauffage de l'air [2], le rendement instantané du capteur solaire  $\eta$  est défini comme [12] :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}} = \frac{Q}{I_T \cdot A_C} \quad (\text{I-1})$$

Où:

$Q$  : puissance thermique utile par  $\text{m}^2$  du capteur [W].

$I_T$  : Rayonnement solaire total incident sur le capteur [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

$A_C$ : Zone d'ouverture de l'absorbeur [ $\text{m}^2$ ].

### I.2.1.5. Composants des capteurs solaires d'air :

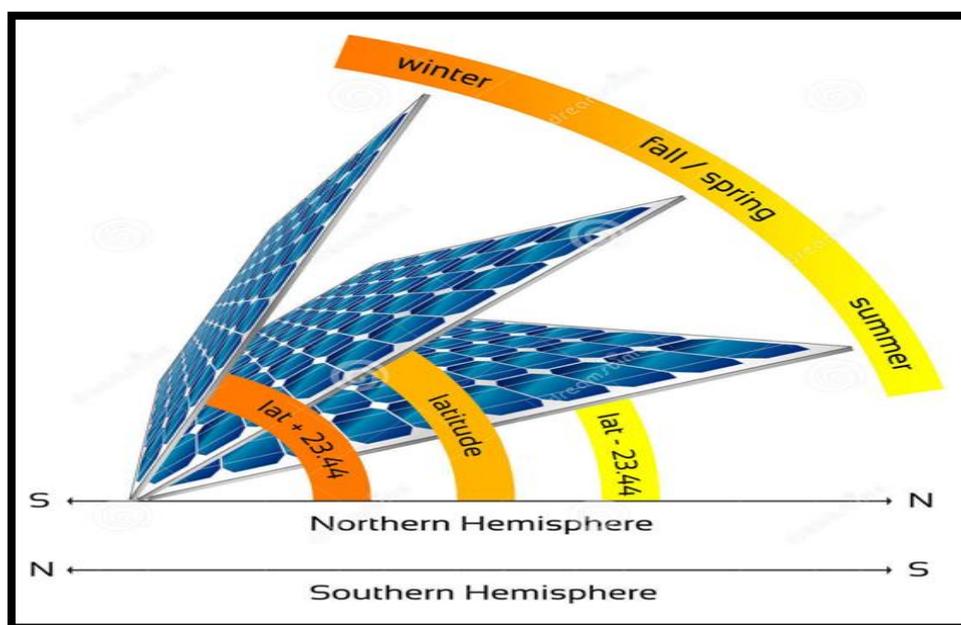
- **La vitre** : Une surface transparente pour capter le rayonnement solaire (en verre).
- **L'absorbeur** : C'est une plaque noire qui absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur.
- **L'isolant** : L'isolant a pour rôle de limiter les déperditions calorifiques (en bois).
- **Le fluide caloporteur** : Le fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail. Les fluides caloporteurs utilisés sont l'air et l'eau [16].

### I.2.1.6. Position et orientation d'un capteur :

La hauteur du soleil sur le ciel change presque chaque semaine de l'année. Le plus haut est en été quand est le meilleur moment pour le capteur et le plus bas en hiver.

Les capteurs sont généralement fixes et ne nécessitent aucun suivi du soleil. Le capteur doit être orienté directement vers l'équateur, face au sud dans l'hémisphère nord et au nord dans le sud.

L'angle d'inclinaison optimal du capteur est égal à la latitude de l'emplacement avec des variations d'angle de 10 à 15 ° plus ou moins selon l'application [15].



Figure(I.4): Un angle capteur plat (hiver-été).

### **I.2.2. Application de capteurs solaires :**

Les capteurs solaires sont utilisés pour [5]:

- La production d'eau chaude sanitaire
- Le chauffage d'habitation
- La production de la vapeur
- La production d'électricité
- La distillation de l'eau
- La cuisson solaire.

### **I.3. Généralités sur le séchage:**

Le séchage et tout particulièrement le séchage au soleil l'une des plus anciennes techniques de conservation des produits agroalimentaires utilisée par l'homme. Elle consiste en l'exposition du produit aux rayons du soleil et à l'air libre, qui offre un poids plus léger et plus long pour le transport et un petit espace pour le stockage [4], Le processus de séchage se déroule en deux étapes:

- La première étape se produit à la surface du matériau de séchage à vitesse de séchage constante et est similaire à la vaporisation de l'eau dans l'air ambiant.
- La deuxième étape a lieu avec une vitesse de séchage décroissante (décroissante). L'état du deuxième étage déterminé par les propriétés du matériau à sécher [10].

#### **I.3.1. Méthodes de séchage:**

Il existe de nombreuses méthodes et manières pouvant être utilisées pour le séchage:

##### **I.3.1.1. Séchage à basse température:**

Il est utilisé pour les endroits où la température ambiante moyenne est d'environ 10 ° C. La plage de température utilisée pour ce type de séchage va de 15 à 50 ° C. Il utilise de l'air naturel ou chauffé à basse température pour sécher le produit très longtemps. Même s'il s'agit d'un processus relativement plus lent et dépendant de conditions météorologiques favorables.

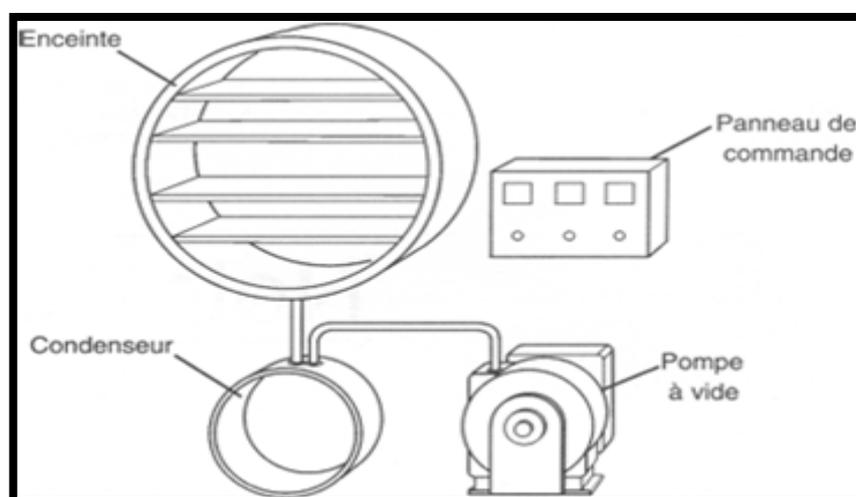
##### **I.3.1.2. Séchage à haute température:**

Le séchage à haute température utilise une température commençant à 50 ° C et c'est la méthode la plus courante dans les pays développés. Il est utilisé pour sécher les produits à haute teneur en humidité tels que les fruits et légumes. Un système de recirculation d'air

chaud peut être utilisé avec une unité de déshumidification pour augmenter l'efficacité du système avec moins de gaspillage d'énergie [3].

### I.3.1.3. Lyophilisation:

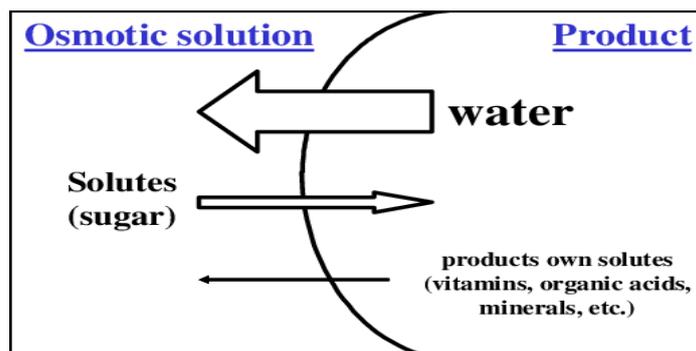
La lyophilisation est un processus de séchage dans lequel le solvant ou le milieu de suspension est cristallisé à basse température, puis sublimé de l'état solide directement dans la phase vapeur. Le but de la lyophilisation est de produire une substance avec une bonne stabilité au stockage et qui est inchangée après reconstitution avec de l'eau, bien que cela dépende également beaucoup de la dernière étape du processus; l'emballage et les conditions de stockage [19].



**Figure(I.5):** Schéma du lyophilisateur. (Site web)

### I.3.1.4. Le Séchage Osmovac (déshydratation osmotique):

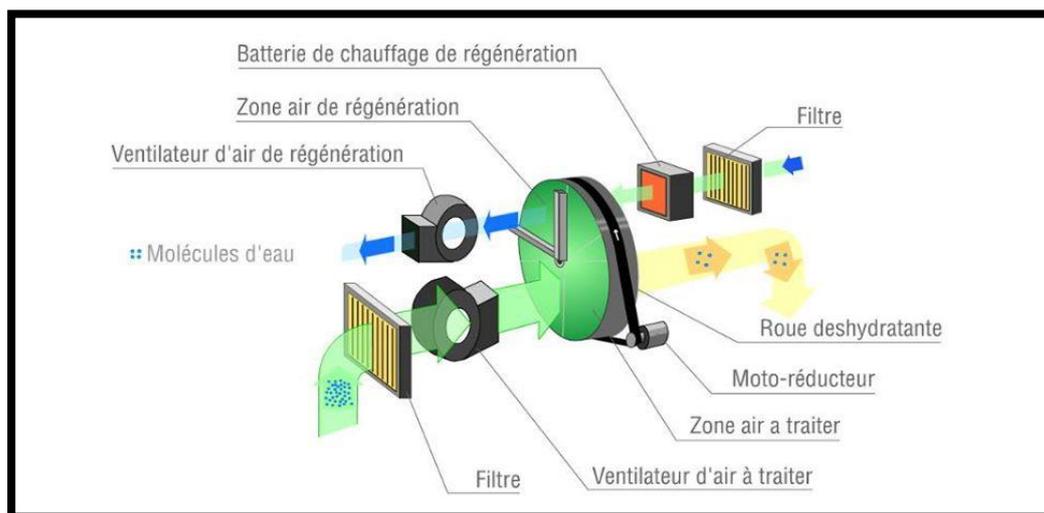
La déshydratation osmotique (DO) est une technique d'élimination de l'eau, qui est appliquée aux produits horticoles tels que les fruits et légumes pour réduire la teneur en eau. La déshydratation osmotique est une technique utile pour la production d'aliments sûrs, stables, nutritifs, savoureux, économiques et concentrés obtenus en plaçant les aliments solides, entiers ou en tranches dans des solutions aqueuses de sucre ou de sel de haute pression osmotique [9].



**Figure(I.6):** Le Principe de la déshydratation osmotique. (Site web)

### I.3.1.5. Séchage déshydratant:

C'est l'une des meilleures méthodes de déshydratation de l'air d'échappement pour la recirculation, si l'air d'échappement est encore chaud. Par conséquent, l'efficacité du système peut être améliorée. Le déshydratant peut être régénéré à l'aide de la chaleur solaire.



**Figure(I.7):** Un système de roue déshydratante pour l'application de séchage (Site web).

### I.3.2. Objectifs de séchage [3]:

- Le séchage réduira considérablement le poids et facilitera le transport.
- Diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaires
- Inhibant le développement de tous les micro-organismes.
- Permet de stocker les produits dans les conditions ambiantes et plus long.

### I.3.3. applications du séchage solaire:

Les applications de séchage solaire sont classées en deux catégories principales [20]:

### I.3.3.1. Le séchage solaire agricole :

Est un processus essentiel dans la préservation des cultures agricoles telles que la carotte, les herbes et les épices et les légumes.

### I.3.3.2. Le séchage solaire industrielle :

L'application du séchage solaire dans les secteurs industriels peut être étudiée pour différents matériaux, tels que la biomasse, la brique, le textile, le ciment, les polymères, le papier et les produits connexes, et le bois, ainsi que pour différents processus, tels que le séchage de matériaux poreux, le traitement des eaux usées et les processus pharmaceutiques. Par exemple, l'utilisation de séchoirs solaires dans le traitement des eaux usées.

## I.3.4. Terminologie du séchage:

### I.3.4.1. Humidité:

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage [6].

### I.3.4.2. Taux d'humidité:

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

### I.3.4.3. Humidité absolue d'un solide:

L'humidité autoritaire ou taux d'humidité ou teneur ( $kg_{av}/kg_{as}$ ) en eau à base sèche, où plus simplement humidité s'exprime par liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I-2)$$

Où :

X : Humidité absolue d'un solide [kg / kg ( $M_s$ )].

$M_h$  : Masse humide de produit [kg].

$M_s$  : Masse sèche de produit [kg].

#### I.3.4.4. Humidité relative :

L'humidité relative où titre en eau (%), ou teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide. (H. Ben cheikh, 2011)

$$X = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I-3})$$

#### I.3.5. Effet des paramètres sur le séchage:

Les paramètres les plus importants, qui déterminent la qualité du produit séché, sont mentionnés ci-dessous [3]:

##### I.3.5.1. Température:

La température de séchage détermine principalement la qualité du produit séché. Une température de séchage élevée peut altérer la capacité de germination des graines et peut endommager le produit, une température de séchage plus basse peut entraîner un temps de séchage plus long, ce qui peut entraîner une contamination microbienne.

##### I.3.5.2. Débit massique:

Le débit massique joue un rôle important dans le processus de séchage. Le débit massique optimal est conçu en utilisant les exigences de température et la vitesse d'air maximale, qui peuvent être maintenues, à l'intérieur de la chambre de séchage [8].

##### I.3.5.3. Humidité relative de l'air:

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température [6].

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} \cdot 100 \quad 0\% < H_r < 100\% \quad (\text{I-4})$$

##### I.3.5.4. Teneur en humidité du produit de séchage:

La teneur en humidité du produit à sécher est un facteur important pour déterminer la qualité du produit et donc la valeur marchande. Les produits ayant une teneur en humidité plus élevée s'avèrent avoir un temps de séchage inférieur à ceux ayant une teneur en humidité très inférieure.

#### I.3.6. Vitesse de séchage:

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporé de solide a séché par unité de temps et de masse de solide sec, ou toute simplement la limite du quotient

de la différence de teneur  $\Delta m$  par l'intervalle de temps  $\Delta t$ , c'est la grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert.

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse de l'air [18].

### 1.3.7. Périodes de taux de séchage:

Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle courbe de vitesse de séchage.

Sur cette courbe figure (I.8), on distingue trois régions :

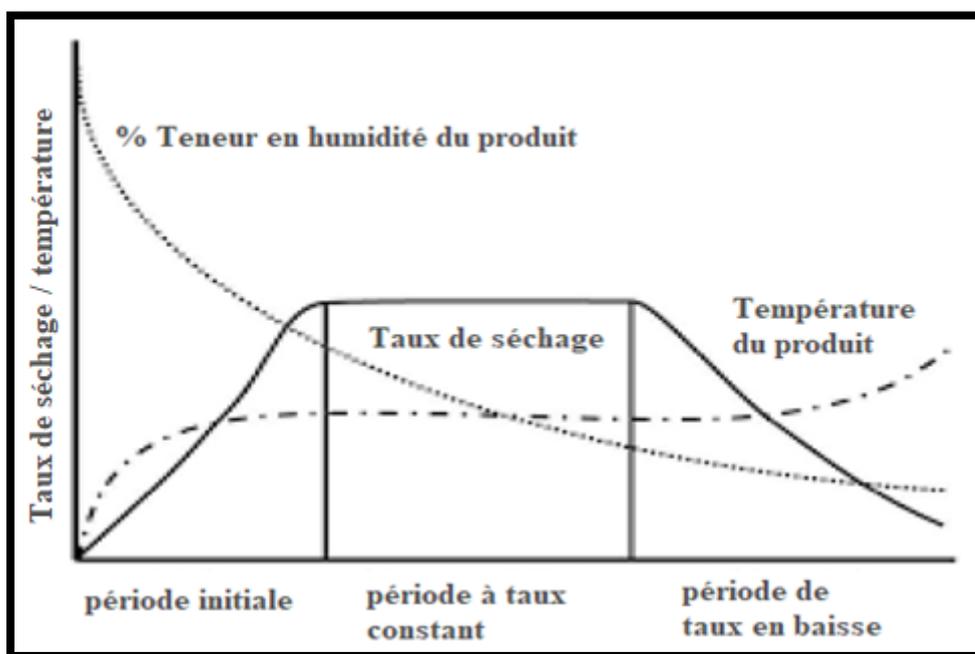


Figure (I.8): courbes de séchage [21].

- **La première phase:** période tarifaire initiale ou période tarifaire croissante.
- **La deuxième phase:** période à taux constant
- **La troisième phase:** période de baisse des taux.

### I.4. Classification des séchoirs solaires:

D'une manière générale les systèmes de séchage solaire sont classés d'après leurs modes de chauffage et la manière dans laquelle l'énergie solaire est utilisée. D'une manière générale, ils peuvent être classés dans deux groupes majeurs, à savoir :

- Les systèmes de séchage d'énergie solaire actifs (souvent appelés les séchoirs solaires hybrides).
- les systèmes de séchage d'énergie solaire passifs (conventionnellement appelés les séchoirs solaires a circulation naturelle de l'air de séchage).

Trois sous classes distinctes peuvent être identifiées pour ces deux systèmes de séchage actifs et passifs (selon le type du séchoir et le mode d'utilisation de l'énergie solaire), à savoir:

- Les séchoirs solaires de type direct.
- Les séchoirs solaires de type indirect [23].

Les principaux types de séchoirs à énergie solaire sont illustres dans la figure (I.9) :

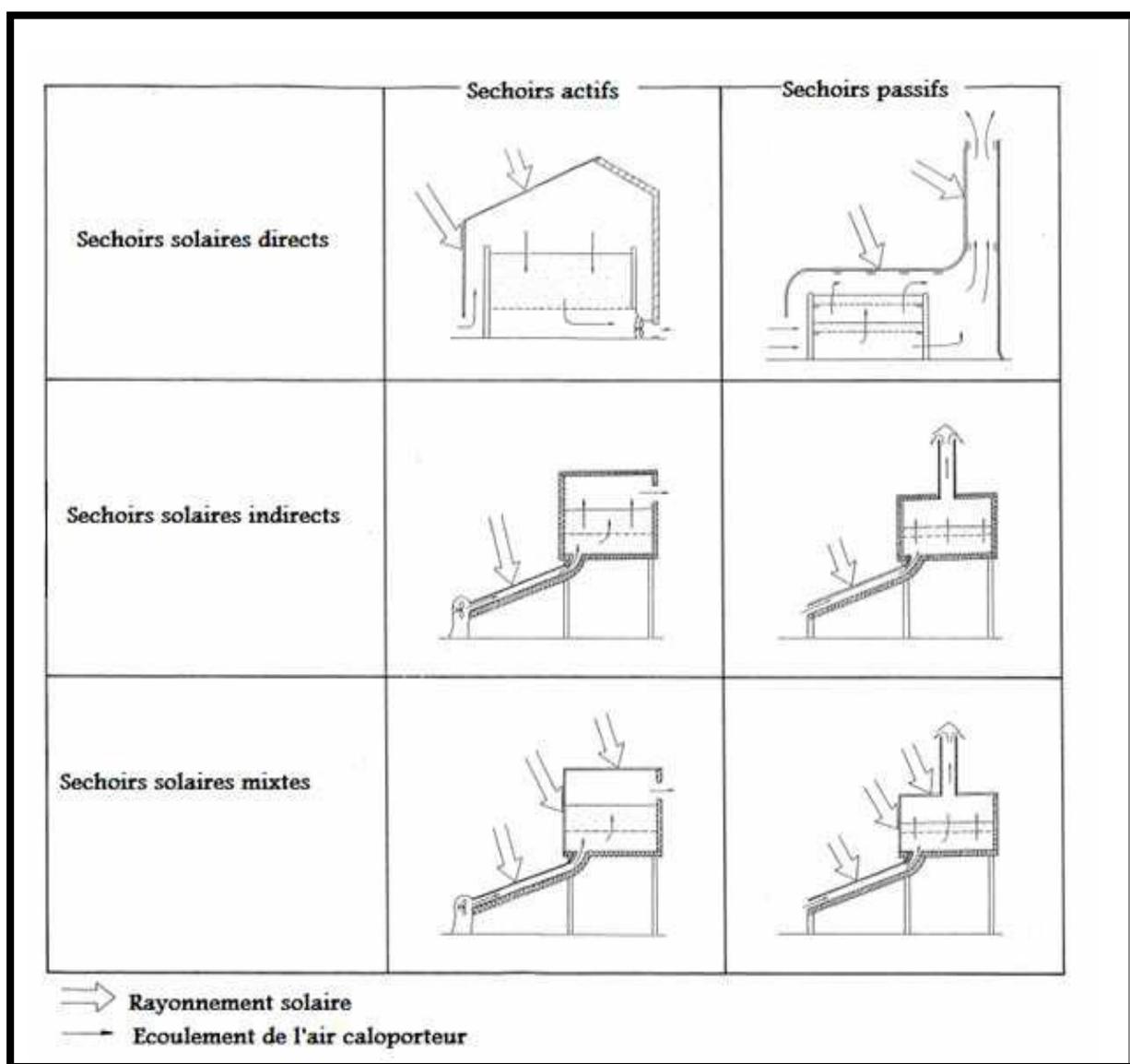


Figure (I.9) : Représentation typique des séchoirs solaires [22].

#### I.4.1. Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception du séchoir coffre à plateau adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités.



Figure (I-10): Sécheurs solaires directs (Site web).

#### I.4.2. Les séchoirs solaires indirects :

Ce type de séchoir diffère du séchoir direct par le transfert de chaleur et l'élimination des vapeurs. Dans cette méthode, l'air atmosphérique chauffé dans le collecteur à plaques plates puis cet air chaud provenant du collecteur à plaques plates circulent dans la cabine où sont placés les produits. L'humidité de ce type de séchoir est éliminée par convection ainsi que par diffusion, voir figure :



Figure (I-11): Séchoirs solaires indirects [7].

#### 1.4.3. Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire :

**Tableau (I.1) :** Avantages et inconvénients pour les différents types de séchoirs solaires

Type de séchoir solaire	Les avantages	Les inconvénients
Séchoir direct	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel [22].</li> <li>▪ Pas besoin de main-d'œuvre qualifié [22].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température élevée en fin de séchage.</li> <li>▪ Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil [22].</li> <li>▪ Jaunissement des légumes verts [22].</li> <li>▪ Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du et augmente les risque de moisissure [22].</li> </ul>
Séchoir indirect	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le produit n'est pas exposé directement au soleil [22].</li> <li>▪ Le produit conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C)</li> <li>▪ Température limitée (55°C) [22].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coût important [6].</li> <li>▪ Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir [6].</li> </ul>

**Conclusion :**

Ce premier chapitre nous a permis de nous pencher sur le séchage solaire qui est l'une des applications les plus renouvelables, il dépend de plusieurs façons ou de multiples techniques et outils pour y parvenir dans de bonnes conditions. Ainsi que l'effet des paramètres sur le séchage.

Pour comprendre mieux le principe de fonctionnement des ces paramètres, une partie est réservé aux différents types de séchoirs existants, aux avantages et aux inconvénients ainsi que leurs classification suivant le principe de fonctionnement.

<< **Références** >>

- [1] : A, S., & G, G. (1981). *Ingénierie des systèmes solaires*, Technique et Documentation. Paris.
- [2] : Aboltins, A. e. (2009). "Investigations of air solar collector efficiency." *Proceedings of the 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development Engineering for Rural Development*. (Vol. 1).
- [3] : Aravindh, M. A. (2015). "Solar drying—a sustainable way of food processing." *Energy sustainability through green energy*. Springer. New Delhi.
- [4] : BAHADJ, a. (2014). *Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre*. Ouargla, Université Kasdi Merbah .
- [5] : BALLO, D., & BETTARCHA, N. M. (2019). *ETUDE EXPERIMENTALE D'UN RETRO-CONCENTRATEUR SOLAIRE PARABOLIQUE*. Mostaganem, Université Abdel Hamid Ben Badis.
- [6] : Belachi.W. (2009). *Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires* Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah- Ouargla.
- [7] : Boukadoum, A. (s.d.). *Le séchage solaire des produits agricoles*. Recherche et Développement , 11.
- [8] : Boukerche, M. (2019). *Etudes expérimentales du séchage solaire par convection naturelle*. BISKRA, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [9] : Chandra, S. a. (2015). "Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 55).
- [10] : El-Sebaii, A. A. (2012). "Solar drying of agricultural products: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16).
- [11] : Fares, A. (2018). *Etude et optimisation du séchage solaire indirect des produits agro-alimentaires dans la région de Biskra, thème de master.*. Biskra, , université Mohamed Kheider.
- [12] : Garg, H. P. (2000, 1997). *Solar Energy Fundamentals and Applications: First Revised Edition*, New Delhi, and Tata McGraw-Hill.
- [13] : H. Ben cheikch, M. O. (2011). *Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif*. Mémoire de l'ingénieur d'état. Université Kasdi Merbah – Ouargla.
- [14] : J, B., & P, R. (2007). *Les énergies alternatives*, Omniscience.

[15] : KALOGIROU, s. A. Solar thermal collectros and applications. Progress in energy and combustion science (Vol. 30(3)).

[16] : N.Chalal. (2007). Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect. Mémoire de magister. Constantine, Université Mentouri.

[17] : N.Nadir. (2009). Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire.Mémoire de magister. Ouargla, université Kasdi Merbah .

[18] : Nadir.N. (2009). Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire.Mémoire de magister. université Kasdi Merbah Ouargla.

[19] : Oetjen, G.-W. a. (2004). Freeze-drying. John Wiley & Sons.

[20] : Pirasteh, G. e. (2014). "A review on development of solar drying applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 31).

[21] : Rahmanta MA, F. M. ( August 2015). Application of Rotary Drum Dryer at Ombilin Coal Fired Power Plant. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing (Vol. 3).

[22] : S.BOUGHALI. (2010). Etude et optimisation du séchage solaire des produits agroagroalimentaires. Université Hadj-Lakhder. Batna.

[23] : TOUATI, B. (2008). Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (Mentha viridis).Thèse de Doctorat:. Université Abou-Bekr Belkaid -Tlemcen.

[24] : Zitani, B. (2007). Etude et Modélisation du Comportement en Régime Transitoire. Mémoire de magistère. ANNABA, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR.

# Chapitre II

Etude

bibliographique

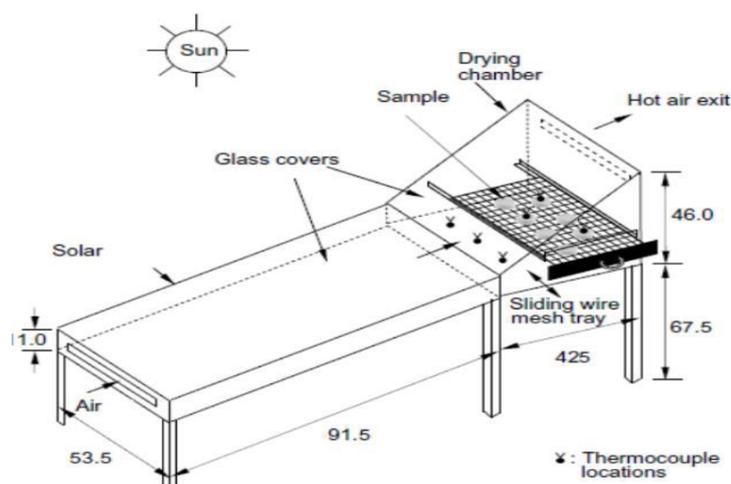
## II.1. Introduction:

Le séchage solaire est un domaine très large, et ses applications varient à bien des égards et différentes techniques selon les besoins en utilisant des matériaux spéciaux, pour cette raison, de nombreuses études ont été menées sur le séchage solaire, nous allons donc voir dans ce deuxième chapitre plusieurs articles et dissertations qui contiennent certaines des études expérimentales précédentes sur le séchage solaire des produits agricoles et leurs différentes techniques et les équipements exploités sur cette opération.

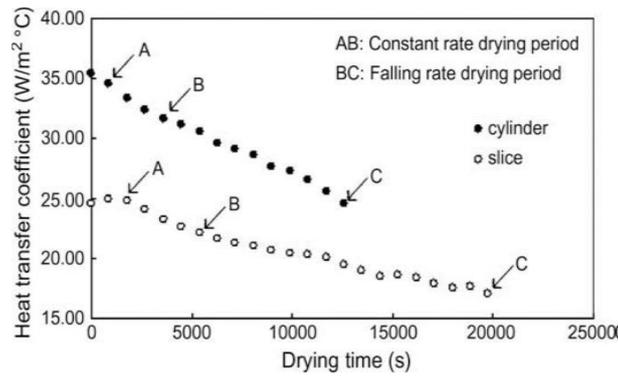
## II.2. Etude bibliographique:

### P.P. Tripathy et al [12]:

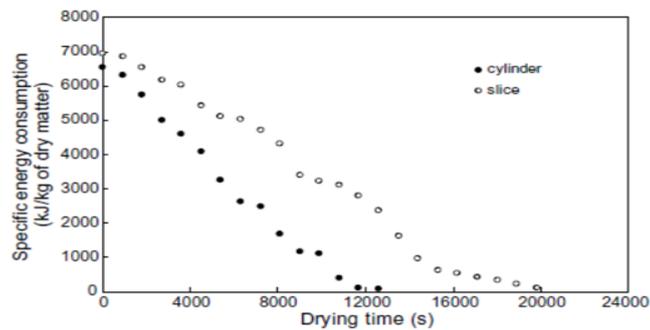
Dans ce travail présenté, un séchoir solaire à mode mixte à convection naturelle est utilisé pour effectuer les expériences sur des cylindres et des tranches de pomme de terre de même épaisseur de 0,01 m avec une longueur et un diamètre respectifs de 0,05 m. pour la détermination du coefficient de transfert de chaleur par convection. La présente enquête indique que les échantillons cylindriques présentent des valeurs de  $h_c$  plus élevées et une vitesse de séchage plus rapide que celles des tranches. Les résultats de l'analyse énergétique révèlent que pour les deux géométries d'échantillon, la diminution de la teneur en humidité du produit pendant le séchage a entraîné une réduction significative de la consommation d'énergie spécifique. Pour des conditions de séchage presque similaires, une réduction considérable de la consommation d'énergie spécifique est obtenue pour les cylindres, comme prévu.



**Figure (II-1):** Schéma de principe du séchoir solaire en mode mixte. (cm.)



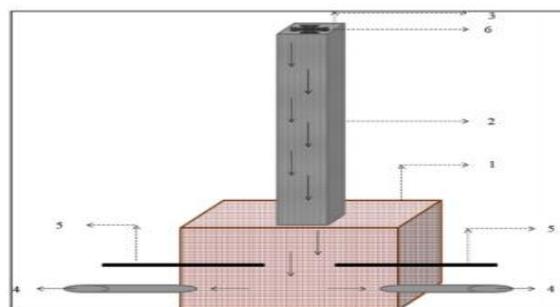
**Figure (II-2):** Variation du coefficient de transfert de chaleur par convection avec le temps de séchage pour les cylindres et les tranches de pomme de terre.



**Figure (II-3):** Variation de la consommation d'énergie spécifique avec le temps de séchage pour les cylindres et les tranches de pomme de terre.

**Prakash et al [8]:**

Dans cette étude, un réchauffeur d'air de cheminée solaire a été utilisé et l'effet du vitrage, des ailettes et de la convection (naturelle / forcée) sur l'efficacité thermique du réchauffeur a été étudié. Il a été constaté que l'incorporation de vitrage et d'ailettes améliorerait les performances du radiateur. De plus, le radiateur a montré une efficacité améliorée lorsqu'il fonctionnait en mode de convection forcée. Parmi les conceptions, le réchauffeur d'air de cheminée solaire vitré à induction forcée avec ailettes a affiché la moyenne la plus élevée.



**Figure (II-4):** Poêle-cheminée solaire non vitré à convection forcée.

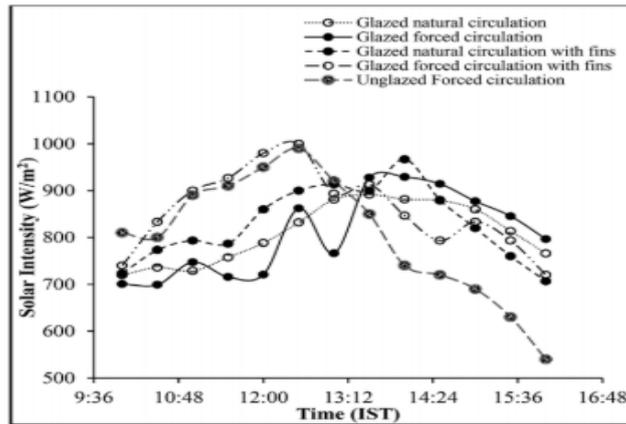


Figure (II-5): Variation de l'intensité solaire avec le temps.

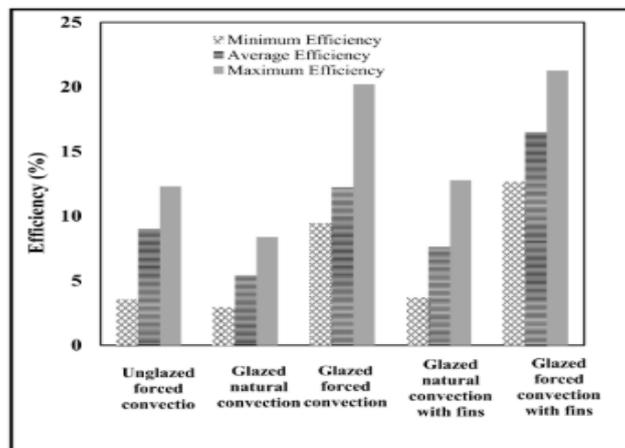


Figure (II-6): Comparaison des rendements thermiques du poêle-cheminée solaire.

**Rachida Ouaabou et al [10]:**

Cette étude a été réalisée pour étudier l'efficacité du système de séchoir à convection solaire indirect en déterminant les différentes caractéristiques du séchoir et pour évaluer les effets du séchage et de la période de stockage sur la qualité des fruits. Les cerises douces du cultivar "Burlat" ont été séchées à 60, 70 et 80 ° C, puis stockées pendant un an et analysées pour les phénoliques totaux, l'activité antioxydant, les flavonoïdes totaux et les anthocyanes totales. La consommation totale d'énergie et l'énergie électrique spécifique de la cerise séchée ont montré une tendance à la baisse avec l'augmentation de la température. Le modèle Midilli – Kucuk était le modèle le mieux adapté pour sécher la cerise.



Figure (II-7): Schéma de la configuration expérimentale.

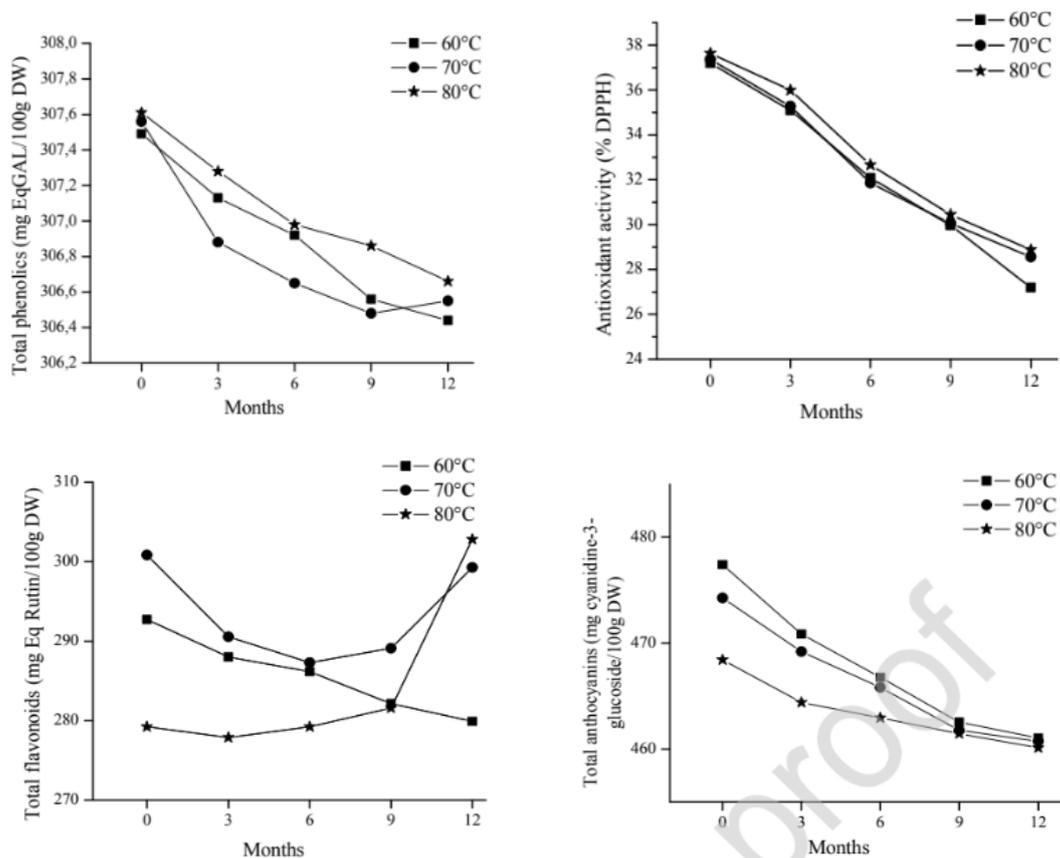
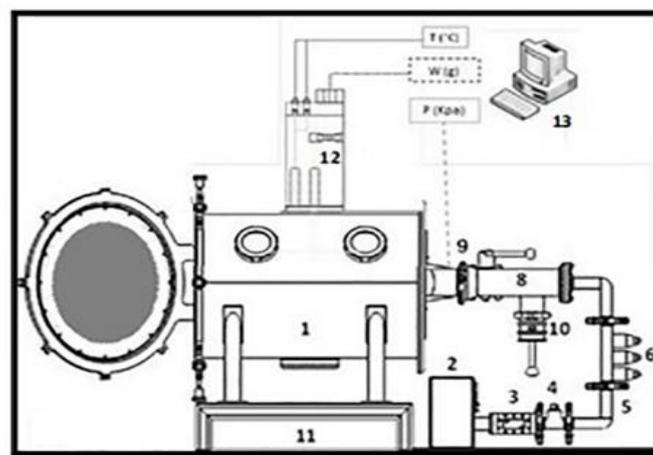


Figure (II-8): Changements dans les niveaux de composés bioactifs dans la cerise séchée en fonction de la température de séchage et de la période de stockage.

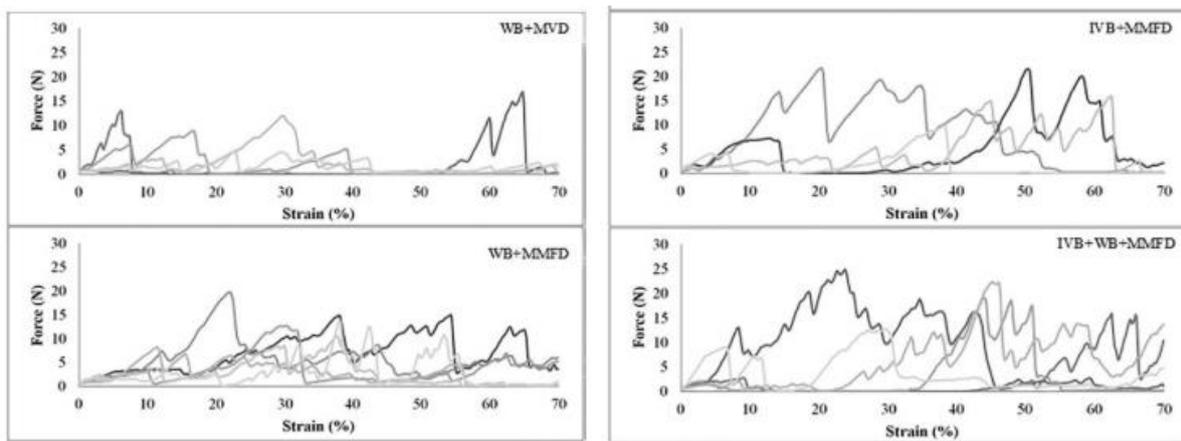
Barreto et al [2]:

Le travail présente la production de collations de pommes de terre sans huile en utilisant des cycles successifs d'impulsions de chauffage et de vide à micro-ondes et a donc été appelé

séchage multiflash à micro-ondes (MWMFD). Les courbes de séchage ont présenté trois périodes: une période de chauffage, une période de vitesse de séchage élevée favorisée par les impulsions de vide et une période de vitesse de chute. Le temps de séchage de 400 g de pommes de terre était d'environ 60 min, réduisant progressivement la puissance des micro-ondes de 800 à 200 W. résultant en une microstructure poreuse et fragile, caractéristique des produits croustillants, ainsi qu'en résultant une surface du produit avec une couleur jaune doré. Les résultats de cette étude ont indiqué que le MWMFD était un processus approprié pour produire des collations croustillantes aux pommes de terre, sans huile, en seulement 60 minutes.



**Figure (II-9):** Schéma de principe du sécheur sous vide à micro-ondes.



**Figure (II-10):** Courbes de déformation des testicules de perforation appliquées aux croustilles des différents processus: a) blanchiment à l'eau chaude (BL (A)) suivi de MWVD; b) blanchiment à l'eau chaude (BL (A)) suivi de MWMFD; c) imprégnation sous vide et blanchiment aux micro-ondes (BL (B)) suivi de MWMFD; et d) imprégnation sous vide et blanchiment à l'eau chaude (BL (C)) suivi de MWMFD.

Samira Chouicha et al [3]:

Ce travail visait à étudier un séchoir solaire indirect pour améliorer les performances le système de séchage solaire. Ils essayés de suivre l'impact de divers facteurs de contrôle du séchage solaire hybride sur la qualité des tranches de pommes de terre séchées. Les résultats actuels ont montré que les meilleures conditions de fonctionnement pour assurer la meilleure efficacité, un temps de faible duré et une meilleure qualité du produit ont été sélectionnées comme suit:

1- Séchage hybride (énergie solaire) avec amélioration de la livraison des panneaux solaires, du temps de séchage et de la qualité du produit. Les conditions de fonctionnement utilisées étaient les suivantes: vitesse du flux d'air 0,51 m / s pour une durée de 2h 45min sur la période comprise entre le 06 mai 2012 et le 28 mai 2012.

2- Séchage hybride (courant électrique conventionnel) à vitesse maximale, effectué à: 0,5 m / s en 1 h 15min la période entre le 13 mai 2012 et le 18 mai 2012.

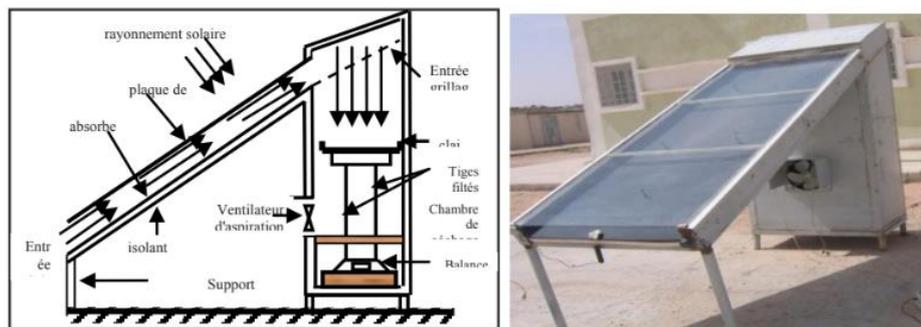


Figure (II-11): Description schématique du système de séchage.

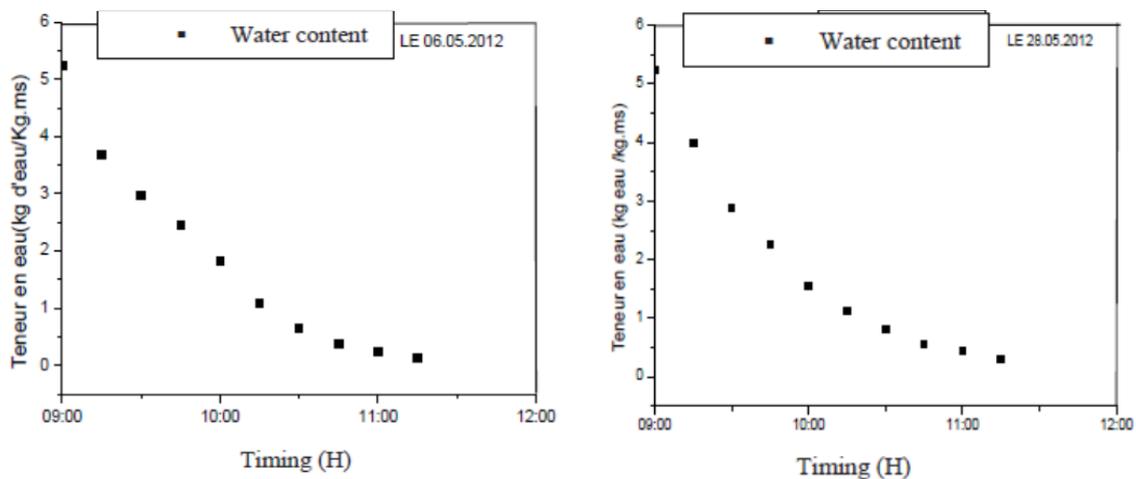


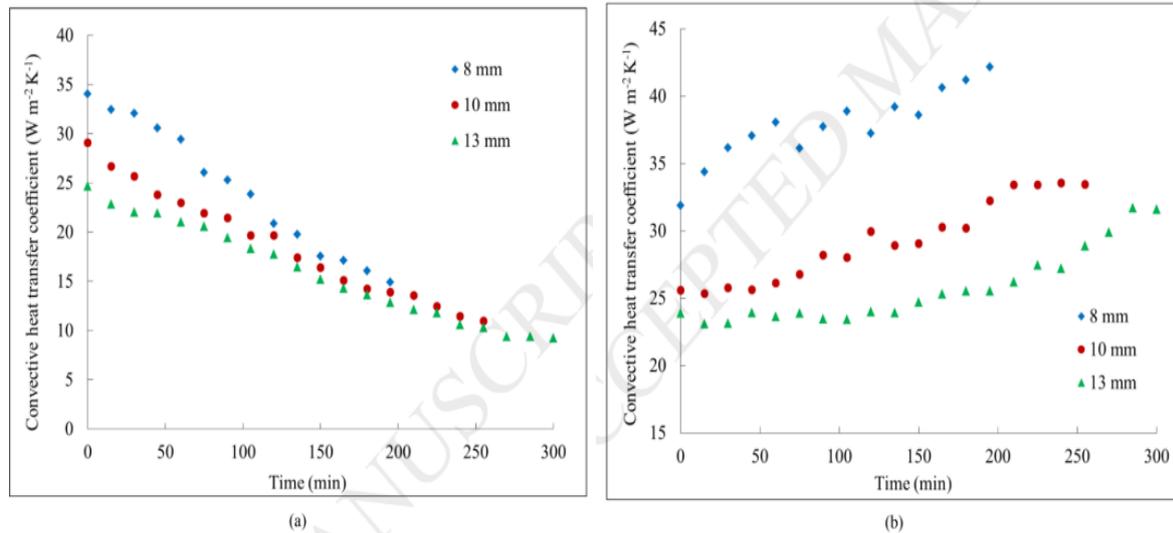
Figure (II-12): variation de la teneur en eau en fonction du temps associé à un panneau (a) et deux panneaux (b).

**Kshanaprava et al [5]:**

La présente étude traite de l'évaluation du coefficient de transfert de chaleur par convection,  $h_c$  en tenant compte de l'effet de retrait dans le modèle mathématique pendant le séchage solaire en mode mixte des cylindres de pomme de terre. Ont été réalisées avec des cylindres de pomme de terre de diamètres variables (8, 10 et 13 mm) d'une longueur fixe de 50 mm. Le coefficient de transfert de chaleur par convection,  $h_c$  a été évalué sans et avec prise en compte de l'effet de retrait dans le modèle mathématique. Les résultats ont prédit que la prise en compte du retrait de l'échantillon conduisait à une surestimation des valeurs moyennes du coefficient de transfert de chaleur par convection,  $h_{con}$  de 55,72 à 61,86% pour les échantillons étudiés. Il a également été observé que la teneur en humidité et le diamètre de l'échantillon avaient une influence significative sur le coefficient de transfert de chaleur. Les températures d'échantillon attendues tenant compte du retrait étaient en accord étroit avec les résultats expérimentaux montrant des erreurs statistiques plus faibles. Les températures d'échantillon prévues pour le retrait étaient en accord étroit avec les résultats expérimentaux montrant des valeurs plus faibles d'erreurs statistiques.



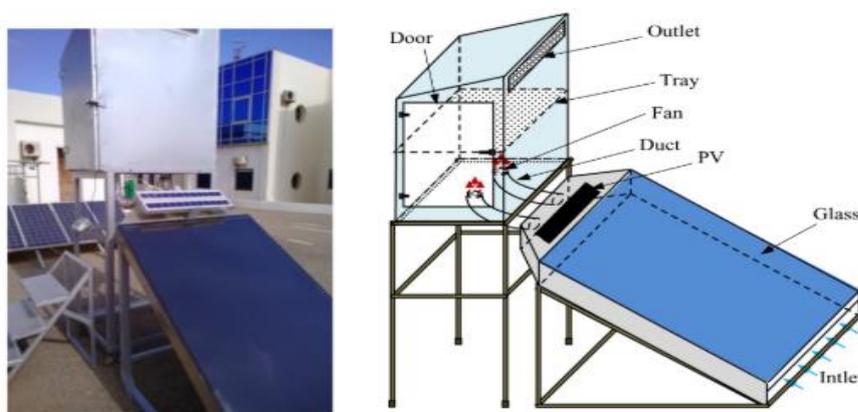
**Figure (II-13):** Séchoir solaire à mode mixte à convection naturelle conçu en interne.



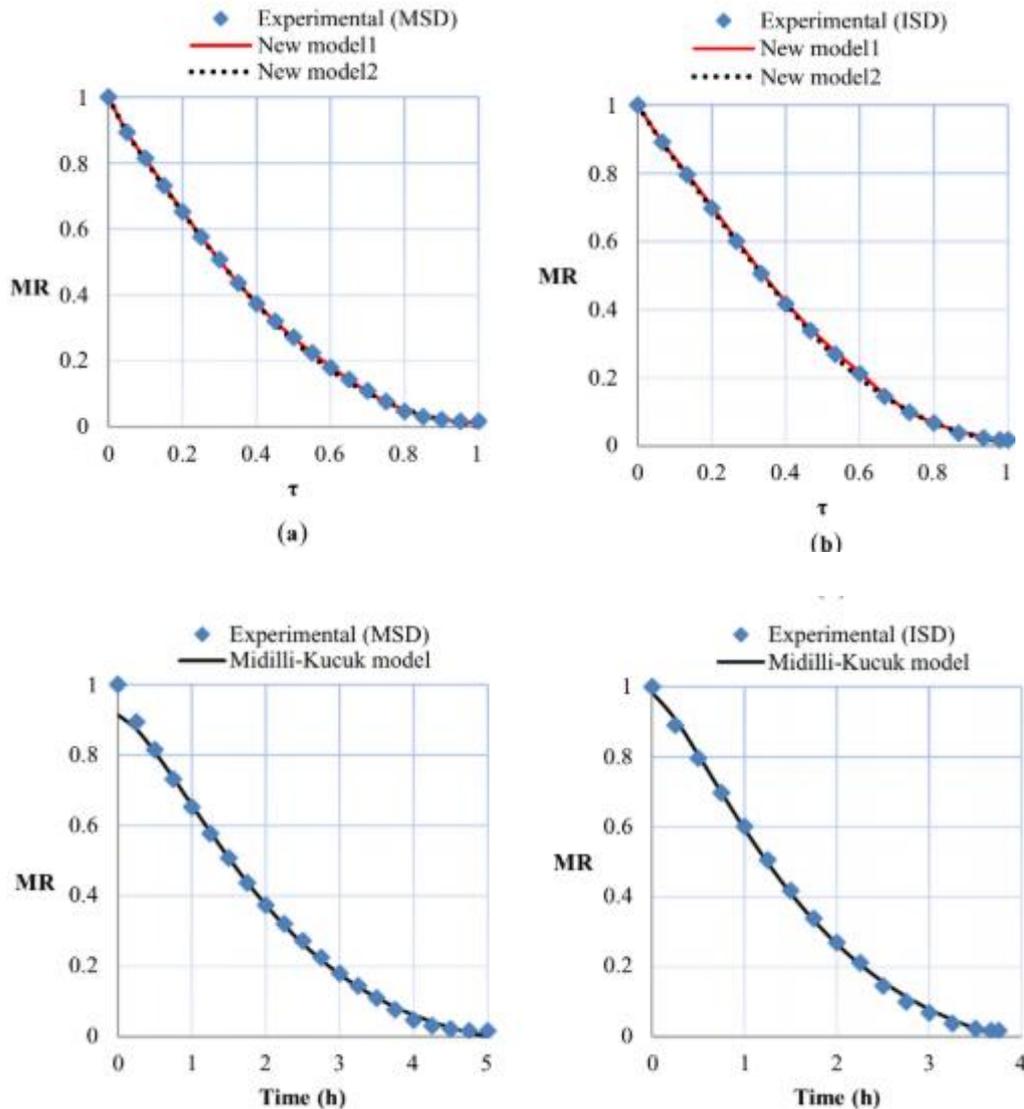
**Figure (II-14):** Variation du coefficient de transfert de chaleur par convection pendant le séchage solaire en mode mixte de cylindres de pomme de terre de 8, 10 et 13 mm de diamètre (a) sans retrait et (b) avec retrait.

**Ahmed Djebli et al [1]:**

Cette étude étudie le processus de séchage des pommes de terre à l'aide d'un séchoir solaire indirect et mixte avec convection forcée et une comparaison de leurs performances respectives. Les résultats expérimentaux ont indiqué que le séchoir solaire mixte avait la vitesse de séchage la plus lente par rapport au séchoir solaire indirect avec des temps de séchage de 4 h 45 min et 3 h 40 min respectivement, même si la température au niveau du plateau dans le séchoir solaire mixte était supérieure à celle du séchoir solaire indirect. Sept modèles théoriques ont été étudiés et leur précision relative validée par rapport aux données expérimentales.



**Figure (II-15):** Le séchoir solaire indirect à convection forcée.

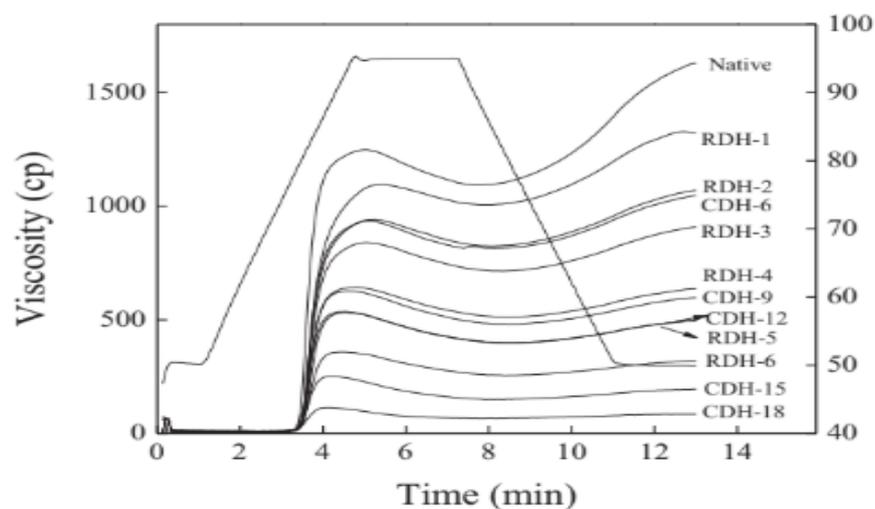


**Figure (II-16):** Taux d'humidité par rapport à ( $t$ , temps), en comparant la courbe expérimentale avec celle prédite sur la base: (a, b) des modèles suggérés; (c, d) Modèle Midilli-Kucuk.

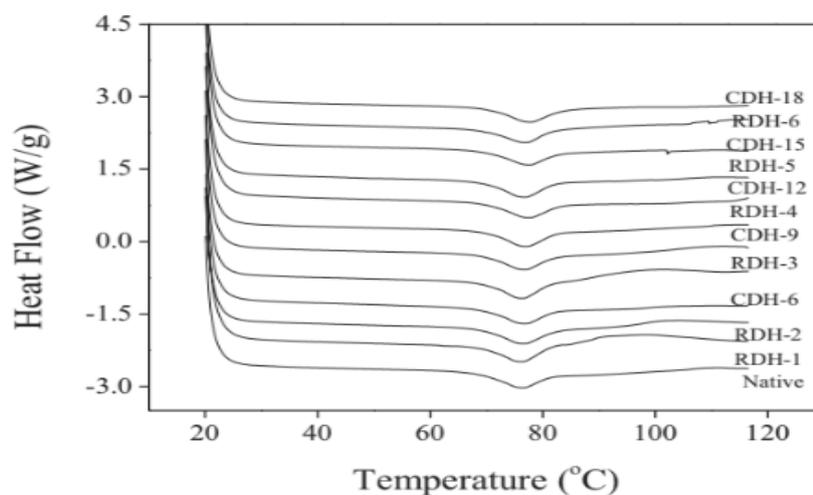
#### Min Gou et al [4]:

Dans cette étude, nous avons examiné, L'effet des traitements RDH et CDH sur les propriétés structurales, physico-chimiques et digestives de l'amidon de patate douce a été étudié. En tant que traitement de modification physique, le traitement thermique à sec a montré de grands effets sur les propriétés physicochimiques et digestives. Les résultats ont montré que le schéma cristallin d'origine de type A de l'amidon de patate douce est resté inchangé après les traitements CDH ou RDH. En général, la cristallinité relative, la solubilité, le pouvoir de gonflement, la transmittance lumineuse et les valeurs des paramètres thermiques

( $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $\Delta T$ ) se sont révélés significativement plus élevés pour l'amidon traité par CDH que ceux traités par RDH.



**Figure (II-17) :** Propriétés de collage des échantillons d'amidon traités à la chaleur sèche répétée (RDH) et à la chaleur sèche continue (CDH).



**Figure (II-18) :** Thermogrammes DSC des échantillons d'amidon traités à la chaleur sèche (RDH) et à la chaleur sèche continue (CDH) natifs.

### Mohamed Yacine Nasri [6]:

Dans cette étude, les expériences ont été menées sur le séchage solaire des pommes de terre, coupées en trois formes différentes; parallélépipédiques cylindriques, cubiques et rectangulaires, de même quantité, et Utilisation du modèle de diffusion et des courbes expérimentales de la cinétique de séchage. Les résultats montrent que la cinétique de séchage dépend, de la forme et de la taille des articles, qui constituent chaque quantité.



Figure (II-19) : Le séchoir solaire expérimental.

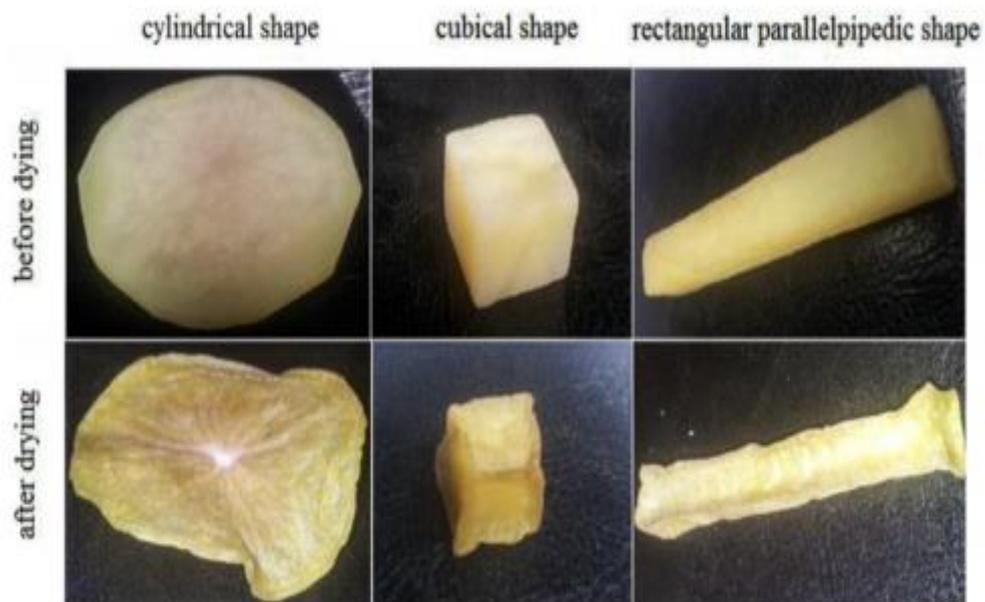
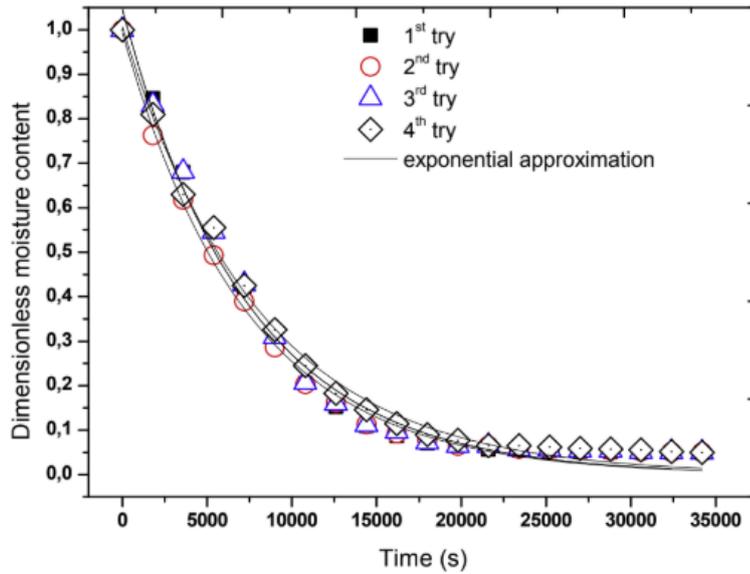
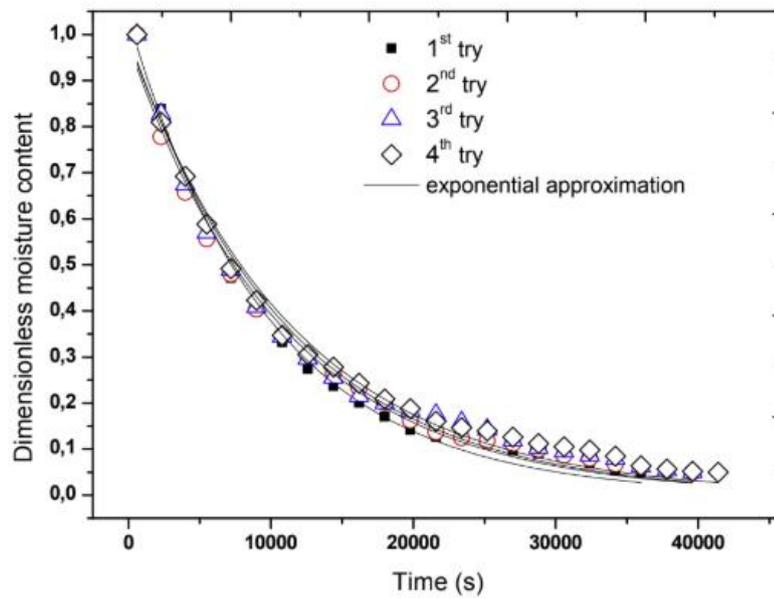


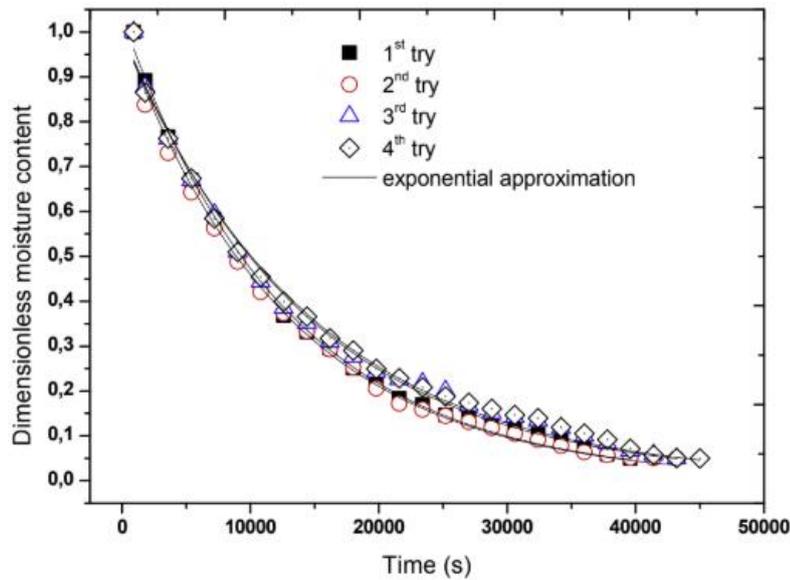
Figure (II-20) : Forme au début et à la fin du séchage.



**Figure (II-21) :** Expérimental avec une approximation exponentielle du taux d'humidité sans dimension moyen en fonction du temps de séchage pour les quatre essais de la forme du disque.



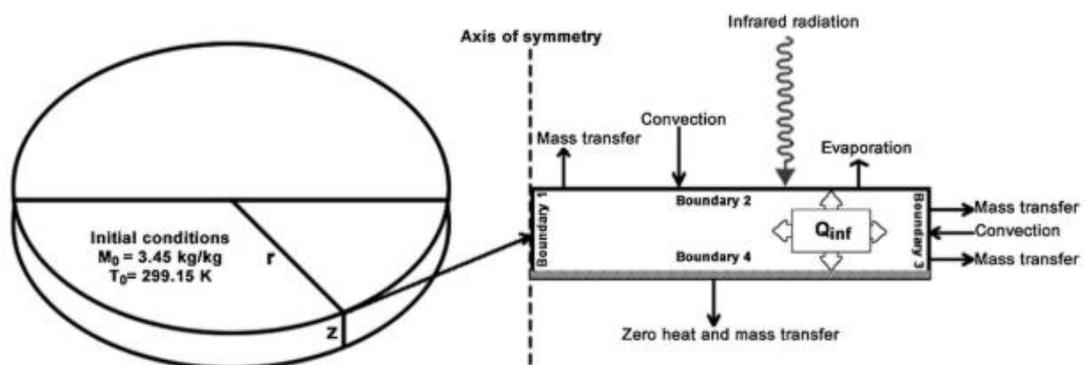
**Figure (II-22):** Expérimental avec un rapport d'humidité sans dimension moyen approximatif exponentiel en fonction du temps de séchage pour les quatre essais de forme cubique.



**Figure (II-23) :** Expérimental avec un rapport d'humidité sans dimension moyen approximatif exponentiel en fonction du temps de séchage pour les quatre essais de forme parallélépipédique.

**Daniel I. [7]:**

Dans cette étude, un modèle mathématique basé sur la physique a été développé pour comprendre le mécanisme de séchage des patates douces en utilisant IIRCD. Ce modèle était basé sur le retrait et le retrait dépendant de l'évaporation. Les résultats de la simulation de la distribution de l'humidité et de la température ont été validés par des données expérimentales de séchage. Les résultats ont montré que le séchage des patates douces avec IIRCD est plus efficace en termes de qualité du produit final par rapport à la méthode de séchage à chaud à l'air chaud.



**Figure (II-24) :** Domaine de calcul d'une tranche de patate douce IIRCD.

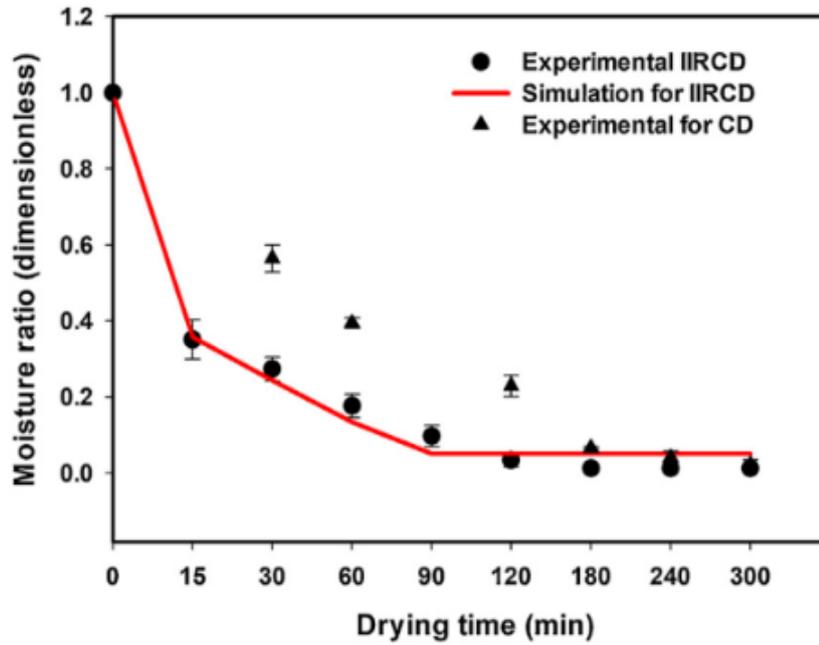


Figure (II-25): Courbe de séchage de la patate douce pendant IIRCD (expérimental et simulation) et CD réalisée à 70 °C.

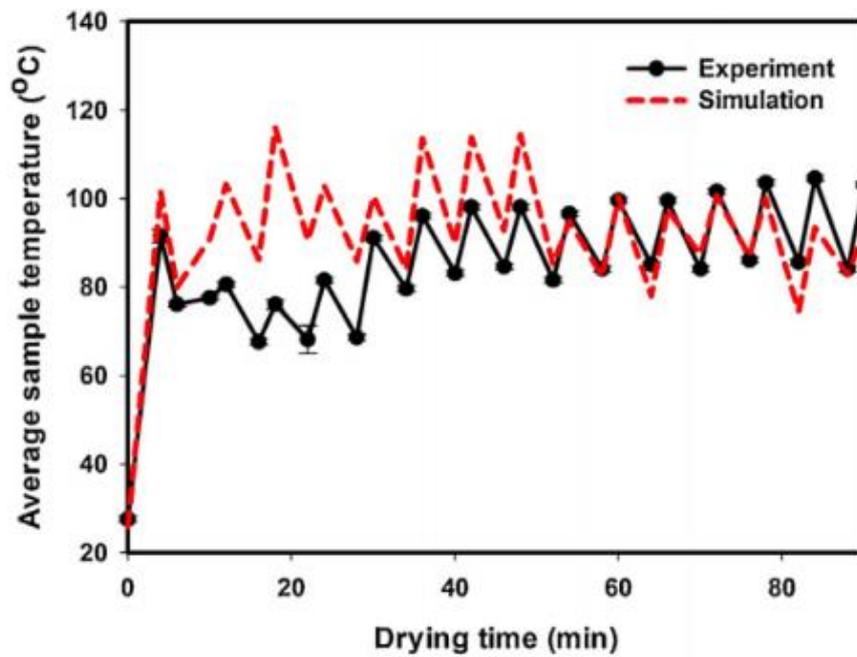
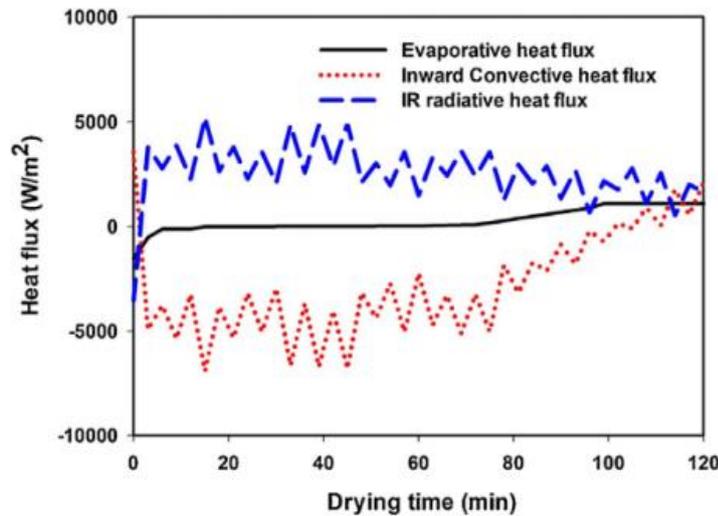


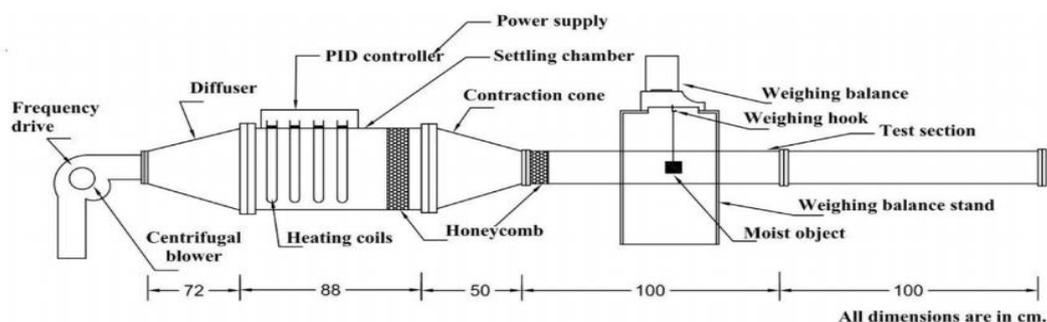
Figure (II-26) : Température expérimentale et simulation pour la patate douce pendant IIRC.



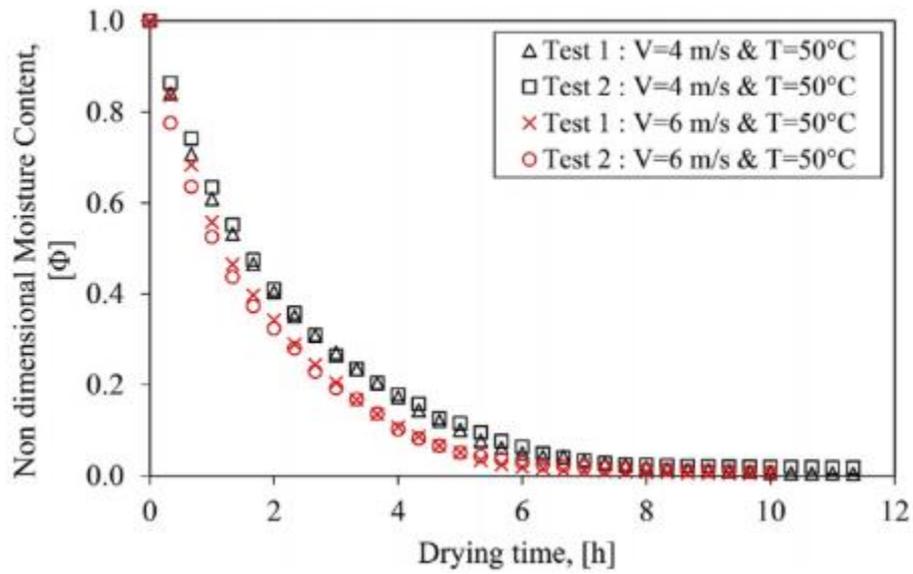
**Figure (II-27) :** Flux thermique infrarouge, convectif vers l'intérieur et évaporatif pour IIRCD de patate douce.

### Punit Singh [11]:

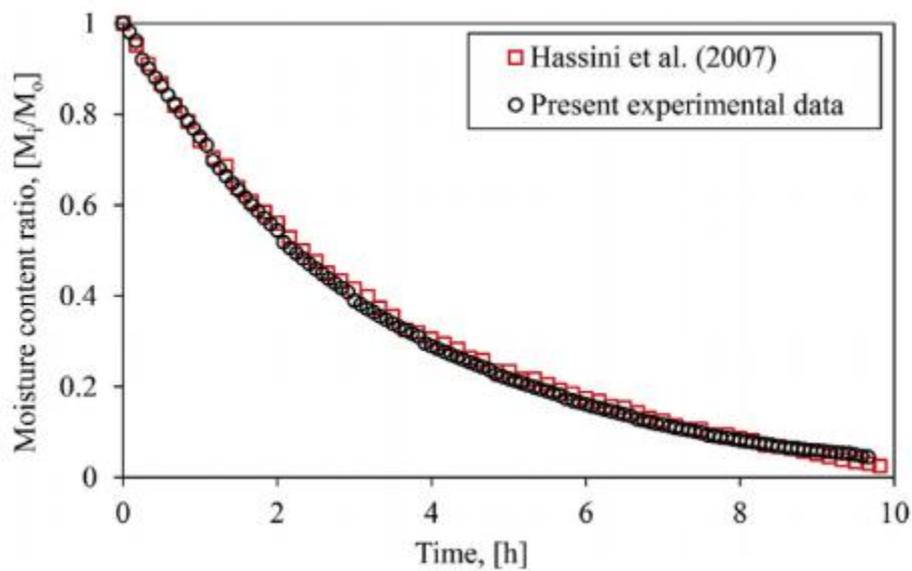
Dans cette étude, des échantillons de pommes de terre ont été prélevés sous une forme cylindrique à différentes vitesses et températures. La diversité de la teneur en humidité transitoire, de la vitesse de séchage, de la dispersion efficace de l'humidité et de l'énergie d'activation a été déterminée. Le débit d'air rapide et la température ont un impact majeur sur le temps de séchage de l'échantillon de pomme de terre. Environ 30% du temps de séchage est réduit lorsque la vitesse de l'air est augmentée de 2 à 6 m / s et environ 36% du temps de séchage est enregistré lorsque la température de l'air est augmentée de 40 à 60 ° C. Notez que la consommation d'énergie et la SEC augmente avec la vitesse et la température de l'air. De plus, la diffusion efficace de l'humidité augmente avec l'augmentation de la vitesse et de la température de l'air.



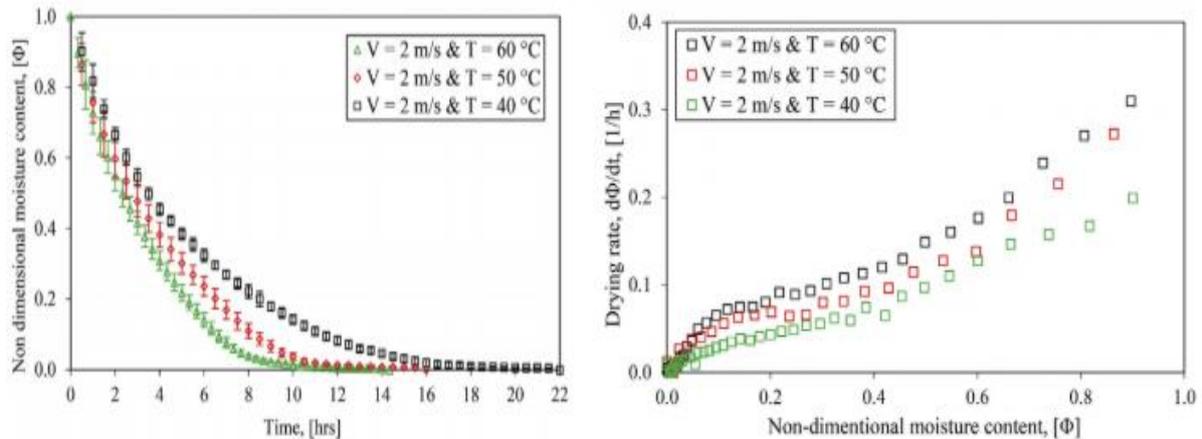
**Figure (II-28) :** Vue schématique de la configuration expérimentale complète pour le séchage par convection.



**Figure (II-29) :** Répétabilité de l'expérience à (a) une vitesse d'écoulement d'air de 4 m / s et une température de 50 ° C, (b) une vitesse d'air de 6 m / s et une température de l'air de 50 ° C.



**Figure (II-30):** Validation des données actuelles avec les données disponibles dans la littérature.



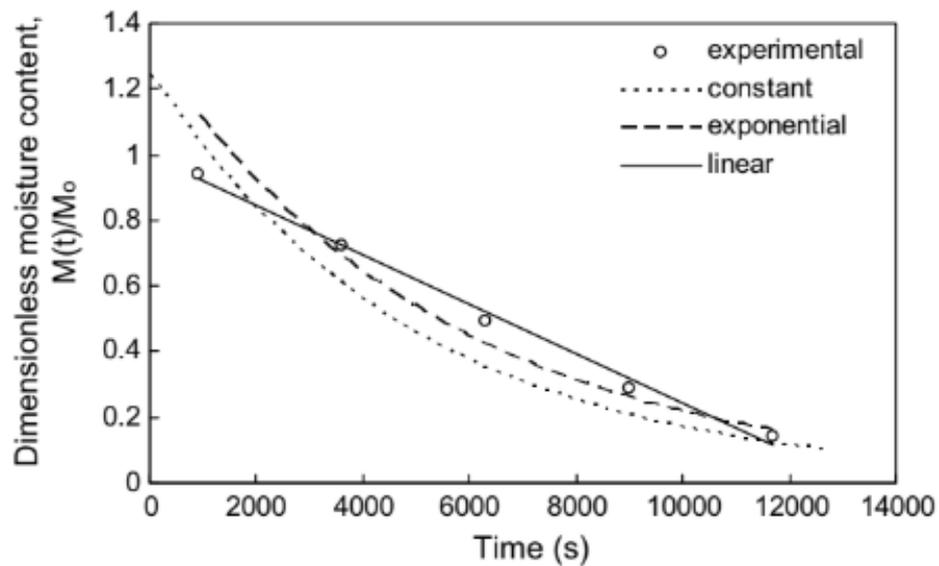
**Figure (II-31) :** Variation de (a) la teneur en humidité avec le temps de séchage et (b) la vitesse de séchage pour différentes températures de l'air et à une vitesse d'écoulement de 2 m / s.

### P.P. Tripathy [13]:

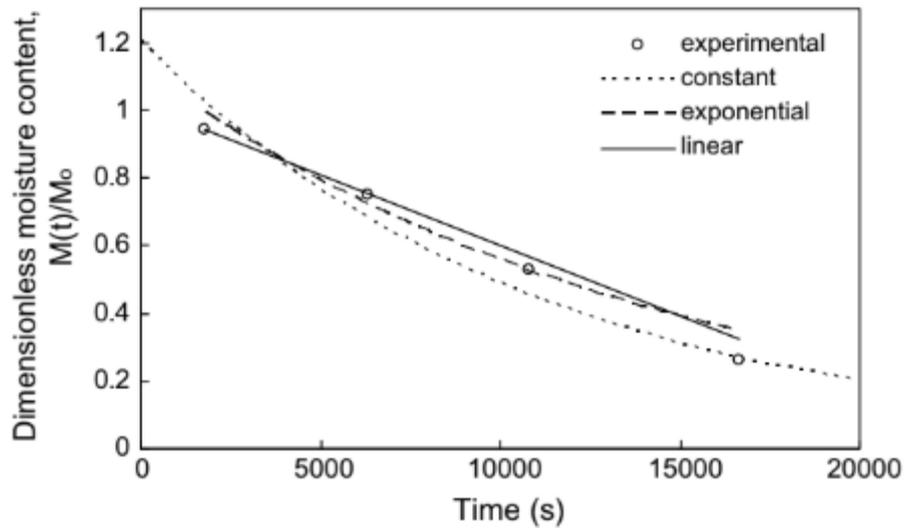
Dans le présent travail, un séchoir solaire à mode mixte à l'échelle du laboratoire a été utilisé pour effectuer des expériences de séchage par convection naturelle avec des cylindres de pomme de terre de longueur 0,05 m et de diamètre 0,01 m et des tranches de diamètre 0,05 m et d'épaisseur 0,01 m. La présente analyse révèle que la constante de séchage et le facteur de retard augmentent avec la température de l'échantillon, comme prévu. Des corrélations linéaires et exponentielles pour ces paramètres sont proposées pour représenter leur variation en fonction de la température de l'échantillon. Les résultats de l'analyse des erreurs statistiques indiquent que la corrélation linéaire proposée peut mieux représenter les courbes cinétiques de séchage expérimentales pour les cylindres et les tranches. La comparaison des teneurs en eau sans dimension expérimentales avec celles calculées avec des valeurs variables (dépendant de la température) et constantes des paramètres de séchage montre que les résultats prévus des paramètres variables peuvent mieux simuler les expériences.



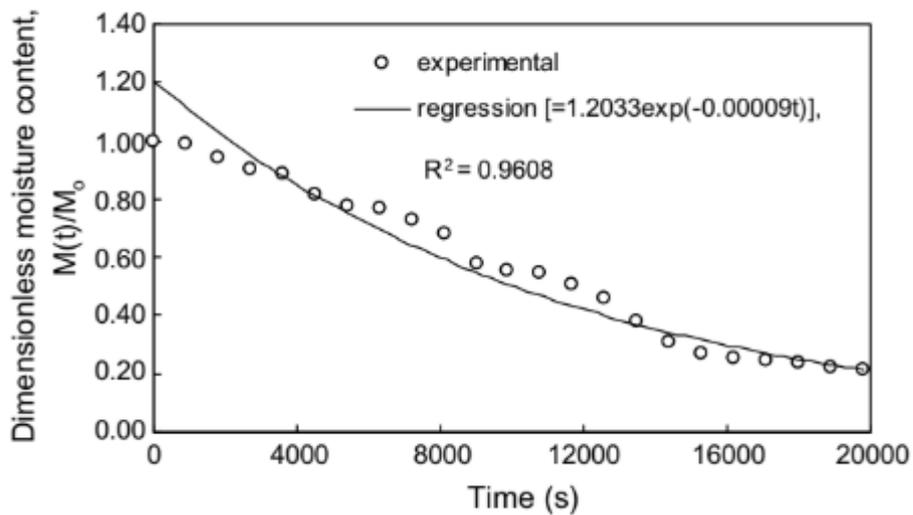
**Figure (II-32)** : Installation expérimentale pour le séchage solaire en mode mixte par convection naturelle.



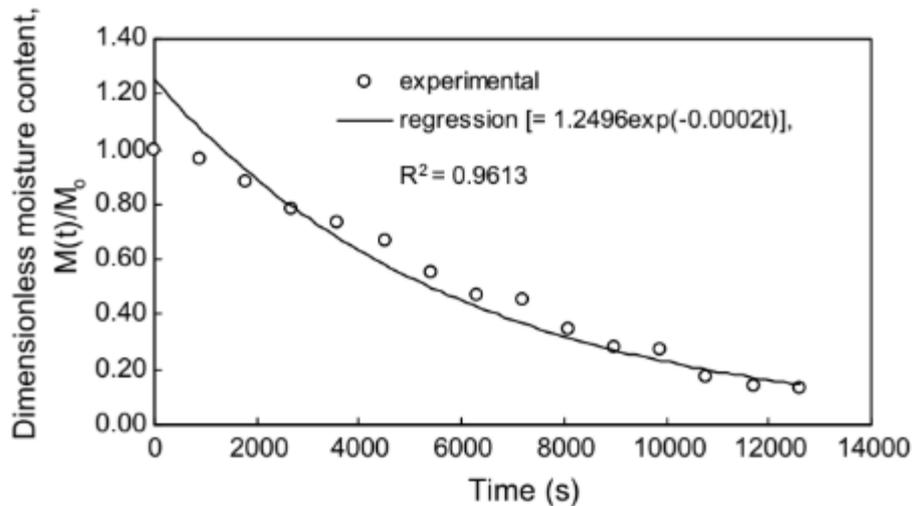
**Figure (II-33)** : Comparaison entre les teneurs en humidité dimensionnelles expérimentales et calculées obtenues en utilisant des paramètres de séchage variables et constants pour les cylindres de pomme de terre.



**Figure (II-34) :** Comparaison entre les teneurs en eau dimensionnelles expérimentales et calculées obtenues en utilisant des paramètres de séchage variables et constants pour les tranches de pomme de terre.



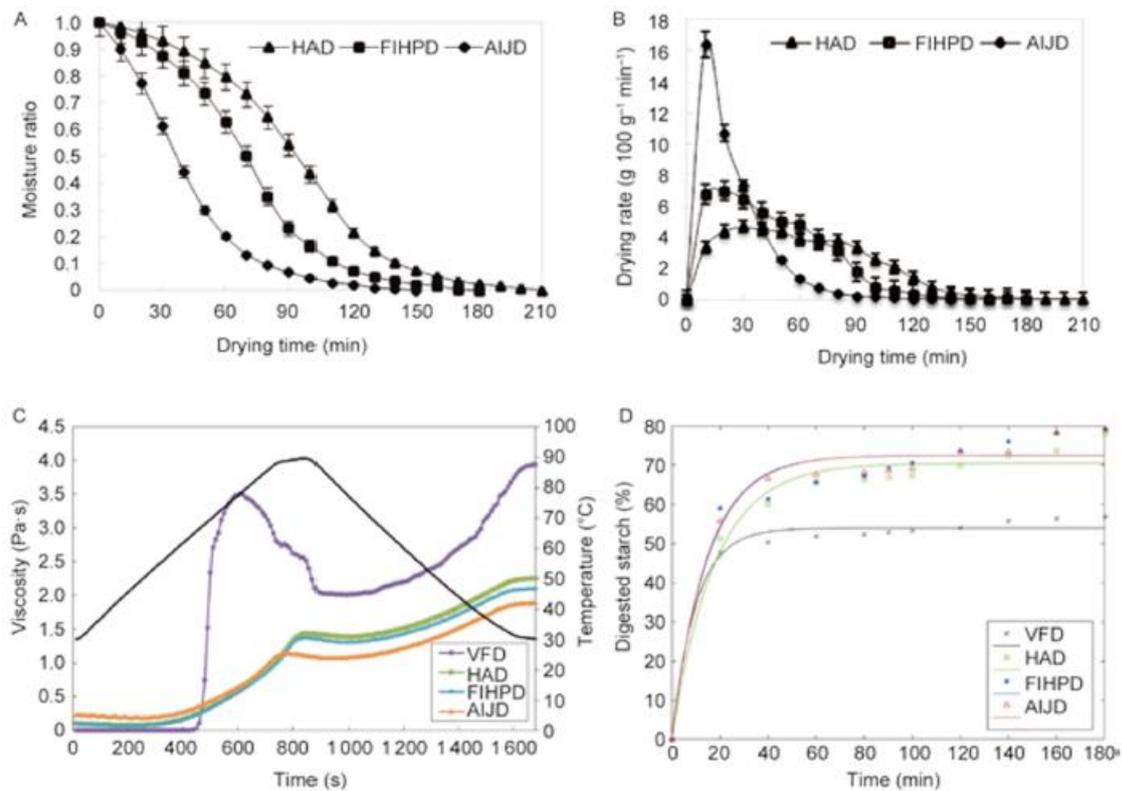
**Figure (II-35) :** Distribution mesurée et prédite de la teneur en humidité sans dimension obtenue en utilisant des paramètres de séchage constants pour les tranches de pomme de terre.



**Figure (II-36) :** Distribution mesurée et prédite de la teneur en humidité sans dimension obtenue en utilisant des paramètres de séchage constants pour les cylindres de pomme de terre.

#### QIU Gan et al [9]:

Dans cette étude, la farine de pomme de terre violette a été séchée en utilisant différentes méthodes (telles que la lyophilisation sous vide VFD, le séchage à l'air chaud HAD, le séchage par jet d'air choc AIJD et le séchage par pompe à chaleur infrarouge lointain, FIHPD) où le taux de séchage le plus élevé était en utilisant AIJD. Une prévalence plus élevée, une efficacité énergétique et un taux de digestion idéaux par rapport à FIHPD, VFD et HAD ont également produit le taux de synergie le plus bas, la capacité de gel la plus élevée et la stabilité maximale en termes de congélation, décongélation et séchage.



**Figure (II-37) :** Caractéristiques et propriétés de séchage des tranches de pomme de terre violettes. A, courbes de taux d'humidité. B, courbes de vitesse de séchage. C, profils viscosité-température. D, courbes d'hydrolyse en fonction du temps. HAD, séchage à air chaud; FIHPD, séchage par pompe à chaleur à infrarouge lointain; AIJD, séchage par jet d'air; VFD, lyophilisation sous vide.

### Conclusion :

Après avoir jeté un regard sur ces études antérieures qui ont été réalisées sur le séchage solaire des produits agricoles. Nous pouvons dire que ces études peuvent être développées et améliorées en utilisant de nombreuses techniques selon les besoins, donc pour cela, les chercheurs cherchent toujours à améliorer le rendement de séchage par les moyens possibles, ils dépendent également de plusieurs modèles mathématiques pour comparer leurs études, et le but de tout cela est d'obtenir la meilleure qualité et de réduire le temps de séchage.

## &lt;&lt; Références &gt;&gt;

- [1] : Ahmed Djebli, S. H. (2020). Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. *ELSEVIER* .
- [2] : Barreto, I., Tribuzib, G., Juniorc, A. M., Carciofia, B., & Laurindoa, J. (2019). Oil-free potato chips produced by microwave multiflash drying. *ELSEVIER Journal of Food Engineering* , 133-139.
- [3] : Chouicha, S. e. (2013). Solar drying of sliced potatoes. An experimental investigation. 1276-1285.
- [4] : Gou, M., Wu, H., Saleh, A. S., Jing, L., Liu, Y., Zhao, K., et al. (2019). Effects of repeated and continuous dry heat treatments on properties of sweet potato starch. *ELSEVIER International Journal of Biological Macromolecules* , 869-877.
- [5] : Kshanaprava Dhalsamant, P. T. (2018). Heat transfer analysis during mixed-mode solar drying of potato cylinders incorporating shrinkage: Numerical simulation and experimental validation. *Food and Bioproducts Processing* .
- [6] : Nasri, M. Y., & Belhamri, A. (2018). Effects of the climatic conditions and the shape on the drying kinetics, Application to solar drying of potato-case of Maghreb's region. *ELSEVIER Journal of Cleaner Production* , 1241-1251.
- [7] : Onwude, D. I., Hashima, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2019). Experimental studies and mathematical simulation of intermittent infrared and convective drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *ELSEVIER Food and Bioproducts Processing* , 163-174.
- [8] : Prakash, P., & Pambudi, N. A. (2019). Performance study of a solar chimney air heater. *ELSEVIER Studies in Thermal Engineering* , 3-5.
- [9] : QIU Gan, J. Y.-l., & Yun, D. (2019). Drying characteristics, functional properties and in vitro digestion of purple potato slices dried by different methods. *ELSEVIER ScienceDirect* , 2162–2172.
- [10] : Rachida, O., Nabil, B., Ouhammou, M., Idlimam, A., Lamharrar, A., Ennahli, S., et al. (2019). Impact of solar drying process on drying kinetics, and on bioactive profile of Moroccan sweet cherry. *Journal Pre-proof* .
- [11] : Singh, P., & Talukdar, P. (2019). Design and performance evaluation of convective drier and prediction of drying characteristics of potato under varying conditions. *ELSEVIER International Journal of Thermal Sciences* , 176-187.
- [12] : Tripathy, P. P. (2009). "Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying." *Applied Thermal Engineering*. 29.5-6, 884-891.

[13] : Tripathy, P., & Kumar, S. (2008). Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying. *ELSEVIER Energy Conversion and Management* 49 , 2941–2948.

# Chapitre III

Etude  
expérimentale  
et théorique

## 1. Introduction :

Le séchage solaire est l'un des processus qui ont trouvé une application en Algérie, en raison des grandes quantités de rayonnement solaire qui peuvent être exploitées dans ce pays, et l'objectif principal de ce processus est de garder les produits agricoles pour une utilisation à tout moment.

Ce chapitre vise à décrire le comportement de séchage solaire d'un produit agricole (pommes de terre) à l'aide d'un séchoir solaire indirect et une salle de séchage par convection naturelle et forcée conçu et préinstallé. De plus, des modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire ce processus à partir de données d'expérience. Les expériences ont été menées à l'Université de Biskra et réalisées entre février et mars 2020.

## 2. Localisation des expériences et climat de zone:

### 2.1 Lieu des expériences:

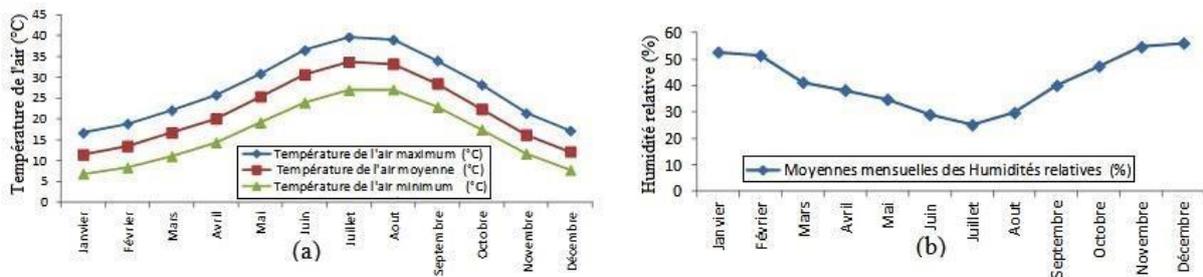
Les expériences ont été réalisées près du hall technologique du département de génie mécanique de l'université de Biskra, qui est situé à  $34^{\circ} 48'$  de latitude et  $5^{\circ} 44'$  de longitude, dans le sud-est de l'Algérie avec 120 m d'altitude par rapport à la niveau de la mer, la ville se situe à environ 400 km d'Alger.



**Figure (III-1):** Image satellite de la zone d'expérience.

**2.2 Climat zone expérimentale:**

Biskra a lieu dans la région aride, elle se caractérise par un été très chaud et sec ; la température moyenne est de 43,5 ° C avec 12% d'humidité relative en moyenne, et un hiver très froid; température minimale moyenne de 4 ° C avec une humidité relative maximale moyenne de 89% [3].



**Figure (III-2):** Courbes de température et d'humidité relative de Biskra [3].

**3. Étude expérimentale:**

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur le séchage d'un produit agricole (pommes de terre), à l'aide d'un capteur solaire et d'une salle de séchage, qui avait été conçu et créé précédemment dans le hall technologique du département de génie mécanique de l'Université de Biskra, qui a été mené de février à mars. 2020.



**Figure (III-3):** Configuration expérimentale (capteur solaire avec chambre de séchage).

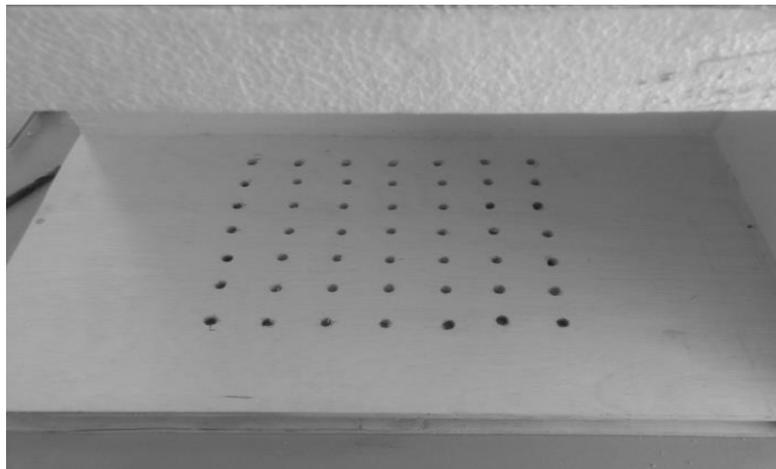
### 3.1 Fabrication de la chambre de séchage:

La chambre est en bois de plusieurs types, protégée de tous les côtés avec une isolation de bonne qualité. Connectez-vous au panneau solaire par un tuyau qui fait passer l'air à travers les trous pour distribuer cet air sur le produit séché; ses dimensions sont de 80 cm x 50 cm x 50 cm.



**Figure (III-4):** Configuration expérimentale de la chambre de séchage.

- **Orifices:** Nous avons percé des trous afin de répartir l'air sur le produit et éviter de le brûler. Dans notre cas, nous mettons des trous de 10 mm de diamètre dans une planche carrée, 30 cm par 30 cm.



**Figure (III-5):** Orifices dans la chambre de séchage.

- **La grille:** est un support sur lequel le produit est disposé, avec des trous pour l'élimination de l'eau, fixés par quatre tiges équilibrées pour nous permettre de peser le produit sans le retirer, voir Fig. (III-6). Cette grille se caractérise par sa dureté et sa résistance à la rouille.



**Figure (III-6):** Support du produit de séchage.

### 3. 2 Procédure expérimentale:

Des observations expérimentales ont été enregistrées entre 9h00 et 16h30 en mars et avril 2020, alors que deux expériences ont été enregistrées en juin et juillet 2020 en raison des conditions de santé du pays à l'Université de Biskra. Deux tailles différentes de tranches de pommes de terre en couche mince telles que 2 et 3 mm ont été placées sur des plaques de grille rectangulaires, qui ont été utilisées pour accueillir une masse différente de nos échantillons. Ces plaques ont été prises sur la balance électronique numérique pour déterminer l'élimination de l'humidité toutes les demi-heures de séchage à différentes hauteurs telles que 4,8, 6,8 et 8,8 cm, voir la figure (III-7).



**Figure (III-7):** Une balance électronique numérique.

Un thermomètre-contrôle (modèle TPM-10), voir Fig. (III-8), a été maintenu juste au-dessus de la tranche de la surface du produit pour mesurer la température et l'humidité.



**Figure (III-8):** Un thermomètre-contrôle (modèle TPM-10).

La température a été mesurée à l'aide de thermocouples calibrés de type K comme indiqué sur la figure (III-9), à différents endroits, qui sont la température d'entrée du sécheur, la température de surface du produit, la température d'entrée et de sortie de la chambre de séchage, l'entrée du capteur solaire, la température de sortie et la température de la plaque absorbante du collecteur.



**Figure (III-9):** A thermocouples de type k.

Un hygromètre (modèle PCE-555) utilisé pour mesurer l'humidité relative de l'extérieur.



**Figure (III-10):** Hygromètre (modèle PCE-555).

Un pyranomètre (modèle Voltcraft PL-110SM) appareil robuste et facile à utiliser pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire par unité de  $W / m^2$  comme le montre la figure (III-11).



**Figure (III-11):** pyranomètre (modèle Voltcraft PL-110SM).

Un anémomètre numérique (modèle KIMO-LVA) voir figure (III-12), ayant une lisibilité de  $0,01 m / s$ , a été utilisé pour mesurer la vitesse du vent.



**Figure (III-12):** Un anémomètre numérique (modèle KIMO-LVA)

Le régulateur de tension (AC 220V 4000W) voir la figure (III-13) a été utilisé pour régler la tension du moteur électrique 4000W 220V régulateur de tension SCR et le contrôle de la vitesse du moteur électrique.



**Figure (III-13):** Voltage régulateur (AC 220V 4000W).

Le Moteur d'aspiration d'air qui permet au flux forcé de convertir la température chaude dans la chambre de séchage vers l'extérieur.



**Figure (III-14):** Représente de Moteur d'aspiration d'air.

Des notes expérimentales ont été enregistrées à chaque période de 30 minutes. La mesure s'est arrêtée lorsque la masse fixe des échantillons a été achevée. La différence de masse a directement donné la quantité de teneur en eau évaporée pendant n'importe quelle période de temps. Le diamètre du produit est de 4 cm et les épaisseurs 2 et 3 mm .Les produits humides et secs sont affichés en fonction de la hauteur de grille à partir de l'entrée de la salle de séchage 4,8, 6,8 et 8,8, respectivement, et le débit d'air est de 0,011, 0,024 et 0,034 kg /

s. Voir ces figures comme exemple pour les expériences de pomme de terre réalisées avant et après le séchage solaire :



**Figure (III-15):** Tranches de pomme de terre humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 0,011 Kg /s, hauteur de la grille 4,8 cm.



**Figure (III-16):** Tranches de pomme de terre humides et séchées de 3 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 0,011 Kg /s, hauteur de la grille 6,8 cm.



**Figure (III-17):** Tranches de pomme de terre humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 0,024 Kg /s, hauteur de la grille 4,8 cm.



**Figure (III-18):** Tranches de pomme de terre humides et séchées de 3 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 0,024 Kg /s, hauteur de la grille 6,8 cm.

### 3.3 La disposition du produit :

D'autre part, pour étudier l'effet de disposition du produit par rapport à l'entrée de la chambre de séchage, on a considéré trois configurations, qui sont respectivement égales à 4,8, 6,8 et 8,8 cm par rapport à l'entrée de la chambre de séchage, le réglage de la position est assuré par l'utilisation d'une grille mobile.

Comme valeurs de débit volumique seconde d'air asséchants, on a ajusté le potentiomètre de telle sorte à ce que les débits soient égaux à 0,011 et 0,024 et 0,0334 kg / s.

#### 4. Etude théorique:

Les modèles de séchage en couche mince décrivant les courbes de séchage des produits agricoles sont principalement divisées en trois catégories différentes, théoriques, semi-théoriques et expérimentales. Le modèle théorique prend en compte la résistance interne au flux d'humidité tandis que les modèles semi-théoriques et expérimentaux prennent en compte la résistance externe au flux d'humidité entre le produit et l'air de séchage.

Les modèles mathématiques choisis utilisés dans cette étude sont identifiés dans le tableau 1.

**Tableau (III.1):** Modèle mathématique appliqué aux courbes de séchage.

No.	Nom du modèle	modèle	Références
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Ayensu (1997)
2	Page	$MR = \exp(-ktn)$	Agrawal and Singh (1977)
3	Modified Page I	$MR = \exp[-(kt)^n]$	Akpinar and Bicer (2006)
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Westerman et al. (1973)
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu et al. (1999)
6	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Sacilik et al. (2006)
7	Two term	$MR = a \exp(-kot) + b \exp(-k1t)$	Dandamrongrak et al. (2002)

Le taux d'humidité des échantillons pendant le séchage a été exprimé par l'équation (III-1):

$$MR = \frac{Mt - Meq}{M0 - Meq} \quad [6]. \quad (\text{III-1})$$

Où (Mt) est la teneur en humidité à tout moment de séchage (% , base humide), (M0) est la teneur en humidité initiale (% , base humide), et (Meq) est la teneur en humidité d'équilibre (% , base humide).

Les modèles de couches minces (tableau 1) étaient appropriés pour trouver le modèle le plus approprié pour décrire la courbe de séchage des pommes de terre.

La régression non linéaire a été utilisée pour obtenir chaque constante des modèles mathématiques choisis à l'aide du programme informatique suivant (Microsoft Office (Excel) pour choisir le meilleur modèle expérimental pour décrire les courbes de séchage. ( $\chi^2$ ) comme un écart carré entre les observations expérimentales et projetées des modèles de couche mince et l'erreur de racine carrée moyenne (RMSE). Plus les valeurs de R2 (proximité de un) sont

élevées, plus les valeurs de  $\chi^2$  et **RSME** (proximité de zéro) adéquation [6]. Ces paramètres peuvent être décrits dans les équations suivantes:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Mexp}i - \text{Mmod}i)^2}{N-m} \quad (\text{III-2})$$

$$\text{RMSE} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{Mexp}i - \text{Mmod}i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III-3})$$

$$\text{SSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{Mexp}i - \text{Mmod}i)^2 \quad (\text{III-4})$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Mexp}i - \text{Mmod}i) \sum_{i=1}^N (\text{Mmod}i - \text{Mexp}i)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (\text{Mexp}i - \text{Mmod}i)^2][\sum_{i=1}^N (\text{Mexp}i - \text{Mmod}i)^2]}} \quad (\text{III-5})$$

Où (M exp,i) est le rapport d'humidité expérimental, (M mod,i) est le rapport d'humidité prédéfini, (N) est le nombre d'observations et (m) est le nombre de constante du modèle de séchage.

#### 4.1. Calcul des diffusivités effectives:

Il a été admis que les caractéristiques de séchage des produits biologiques dans la période de vitesse de chute peuvent être décrites en utilisant l'équation de diffusion de Fick. La solution de la loi de Fick pour une dalle était, selon l'équation (III-6) [2].

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{4H^2}\right) \quad (\text{III-6})$$

Pour une longue période de séchage, l'équation (III-6) peut être encore simplifiée au seul premier terme de la série [5], Cette équation (III-6) est écrite sous une forme logarithmique selon l'équation (III-7):

$$\ln(MR) = \ln \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \ln\left(\frac{8}{\pi}\right) - \left(\pi^2 \frac{D_{eff}}{4H^2}\right) t \quad (\text{III-7})$$

Les diffusivités sont généralement déterminées en traçant les données de séchage expérimentales en termes de Ln (MR) en fonction du temps de séchage t dans l'équation (III-7), car le graphique donne une ligne droite avec une pente selon l'équation (III-8) [1].

$$k_0 = \left( \pi^2 \frac{D_{\text{eff}}}{4H^2} \right) \quad (\text{III-8})$$

#### 4.2. Modèle de séchage en couche mince:

La modélisation mathématique du séchage solaire est une traduction des différents phénomènes physiques associés au fonctionnement du séchage solaire (changement d'humidité, transfert de masse, transfert de chaleur, etc.) en équations mathématiques.

Afin de décrire le comportement de séchage solaire d'un produit de séchage en couche mince pour un produit de pomme de terre de différentes tailles et hauteurs depuis l'entrée de la chambre de séchage et à différents débits, nous avons décidé de trouver et de définir un modèle mathématique pour déterminer l'humidité MR en fonction du temps de séchage à partir des données expérimentales obtenues.

Ce modèle a été choisi par l'équation d'analyse Courbe non linéaire Fit (logistique) (III-8), pour être considéré comme un bon modèle basé sur le coefficient de corrélation  $R^2$  et pour être plus proche des courbes expérimentales.

$$MR = A2 + \frac{(A1-A2)}{\left(1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p\right)} \quad (\text{III-9})$$

Dans notre étude de ce phénomène, nous utilisons un logiciel spécial (8 Originlab) pour analyser les résultats obtenus et les comparer.

L'échantillon correspondant à l'étude obtenue doit être sélectionné selon les critères statistiques suivants :

- l'erreur moyenne relative (EMR).
- Coefficient de corrélation (r) élevé (tendant vers 1).
- Erreur standard de l'évaluation (S) minimale (tendant vers 0).

#### 4.3 Utilisation de logiciel Originlab 8:

Nous identifierons dans ces lignes Logiciel Originlab 8.

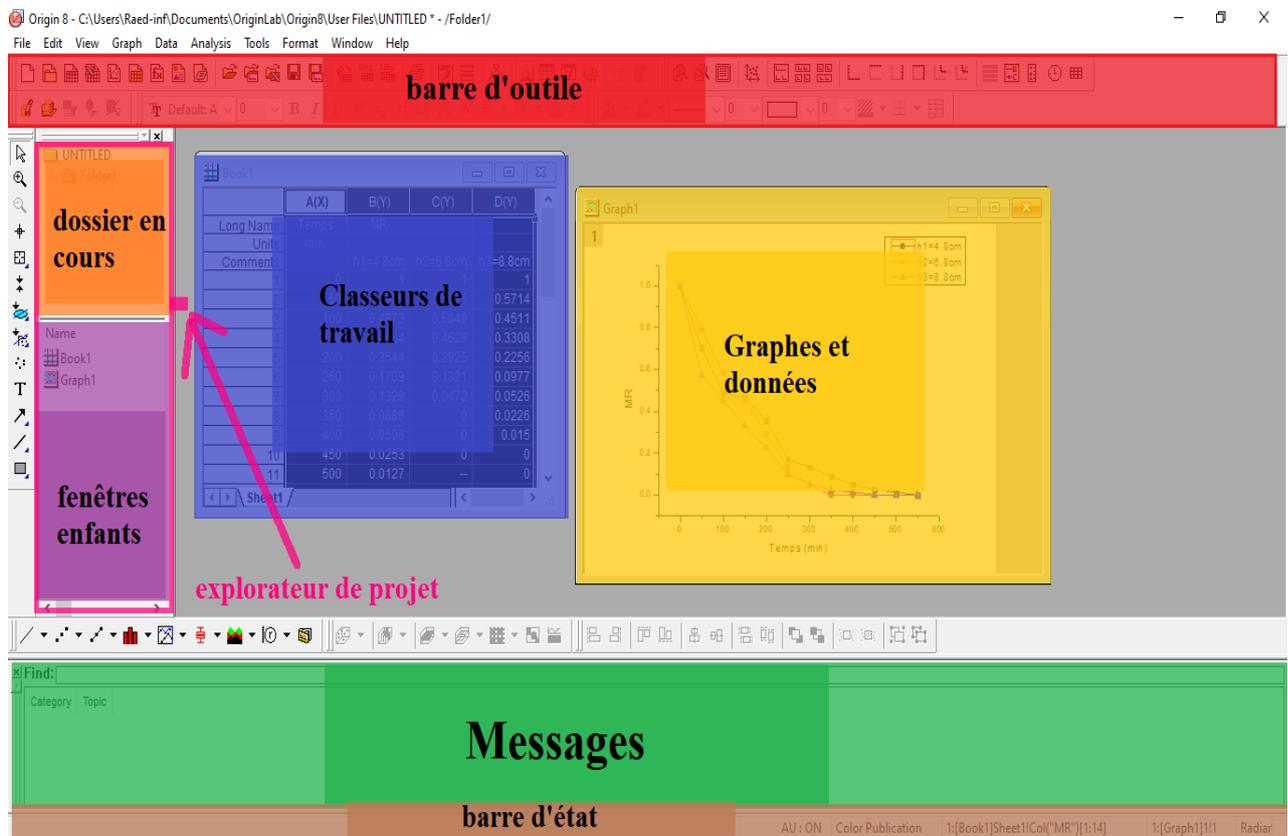
#### 4.4 Description du logiciel :

L'interface utilisateur de Originlab 8 est divisée en volets :

- Manipuler des classeurs.
- Créer des fenêtres graphiques.
- Gérer l'espace de travail avec l'Explorateur de projets.
- barre d'état.
- barre des messages.

- barre d'état.

Les volets, ainsi que la barre d'outils et la barre d'état, sont clairement indiqués dans la Figure (II-...) ci-dessous:



**Figure (III-19) :** distribution des volets dans Originlab 8.

- Origin a de nombreuses fenêtres et espaces de travail disponibles pour effectuer diverses tâches. Vous pouvez voir tous les types de fenêtres dans la boîte de dialogue Nouveau (Fichier: Nouveau). Les fenêtres les plus fréquemment utilisées sont classeurs de travail , Graphe et ...

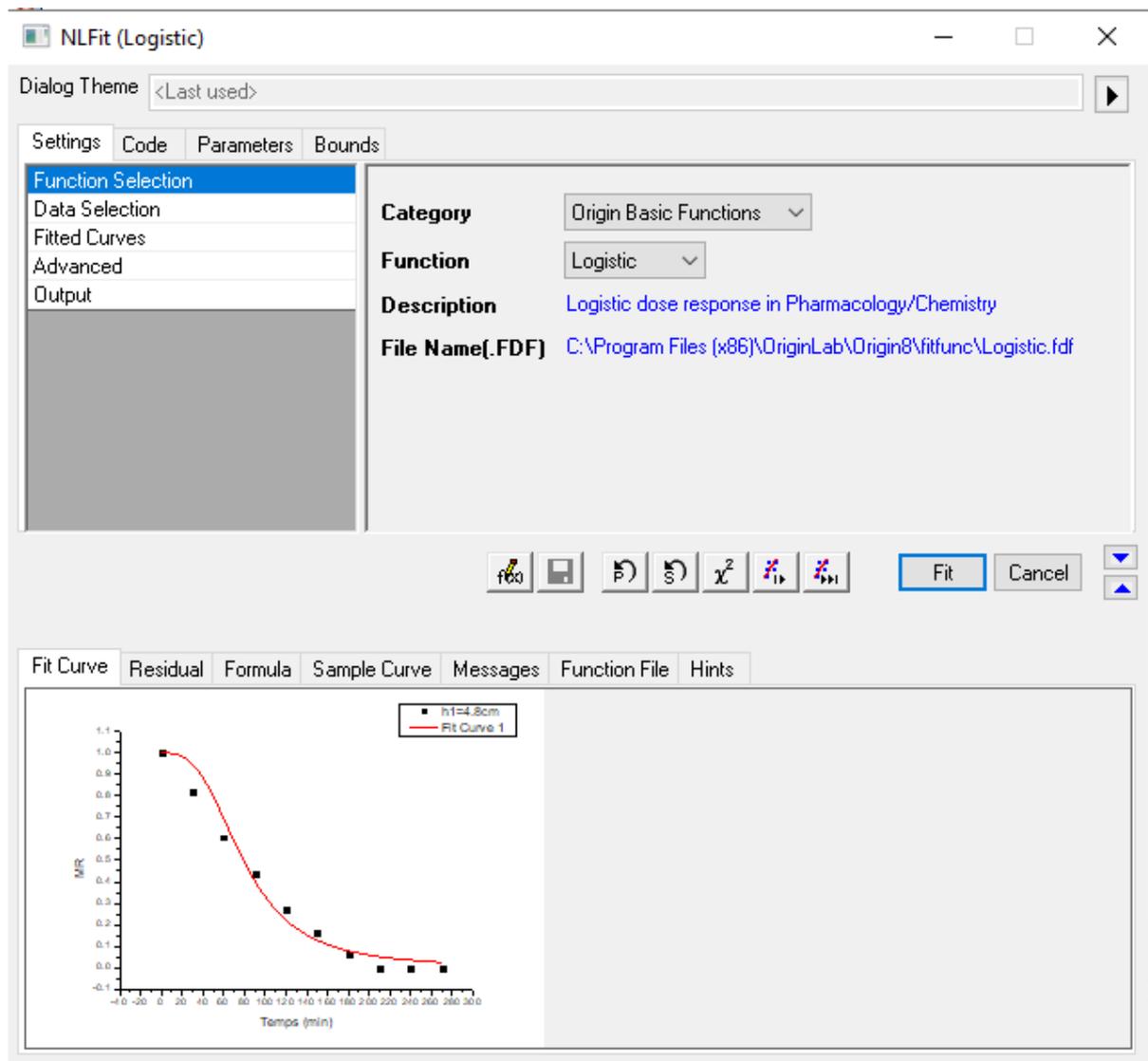
- Le classeur Origin est la structure principale pour organiser vos données. Chaque classeur est composé d'une ou plusieurs feuilles de calcul Origin. Et chaque feuille de calcul, à son tour, est composée (généralement) d'une ou plusieurs colonnes de feuille de calcul ou ensembles de données. Les colonnes dans Origin ont différents types, tels que X, Y, Z, etc.. qui représentent la désignation du tracé pour la représentation graphique.

- La fenêtre Graphique est un conteneur pour des représentations graphiques de vos données expérimentales et de vos résultats d'analyse. Les fenêtres de graphique peuvent contenir un seul tracé dans une seule couche de graphique ou elles peuvent contenir plusieurs tracés dans plusieurs couches de graphique.

- La couche graphique est l'unité fondamentale du graphique d'origine. Le calque est composé d'un ensemble de valeurs d'échelle d'axe, d'un ou plusieurs tracés de données et de toutes les étiquettes de texte, objets de dessin, légendes de graphiques / échelles de couleurs, objets de bouton, etc. les uns des autres, ce qui vous laisse une grande latitude dans la cartographie de vos données.

#### 4.5 Travailler sur la courbe :

Après avoir entré les valeurs expérimentale du l'activité de l'eau et la teneur en eau nous choisissons dans le menu " Analysis" Fitting" Fit logistic Model(s) "Open dialog" La fenêtre suivante apparaît:



**Figure (III-20) :** Fenêtre où choisir le modèle à tester.

Dans la fenêtre, nous choisissons le modèle que nous voulons tester les valeurs précédemment saisies qui correspondent aux résultats.

Le programme présente de nombreuses informations sur le modèle, telles que les résultats statistiques, le tableau des valeurs théoriques, la comparaison des résultats obtenus et autres.

Nous cliquons sur "Fit" pour analyser les résultats et la fenêtre suivante apparaît:

	A	B	C	D
1	Model	Logistic		
2	Equation	$y = A2 + (A1-A2)/(1 + (x/x0)^p)$		
3	Reduced Chi-Sqr	7.38217E-4		
4	Adj. R-Square	0.99451		
5			Value	Standard Error
6	MR	A1	0.9902	0.02637
7		A2	-0.19568	0.07036
8		x0	92.19858	7.7941
9		p	1.72829	0.20441

Figure (III-21) : Tableau des résultats d'analyse du modèle.

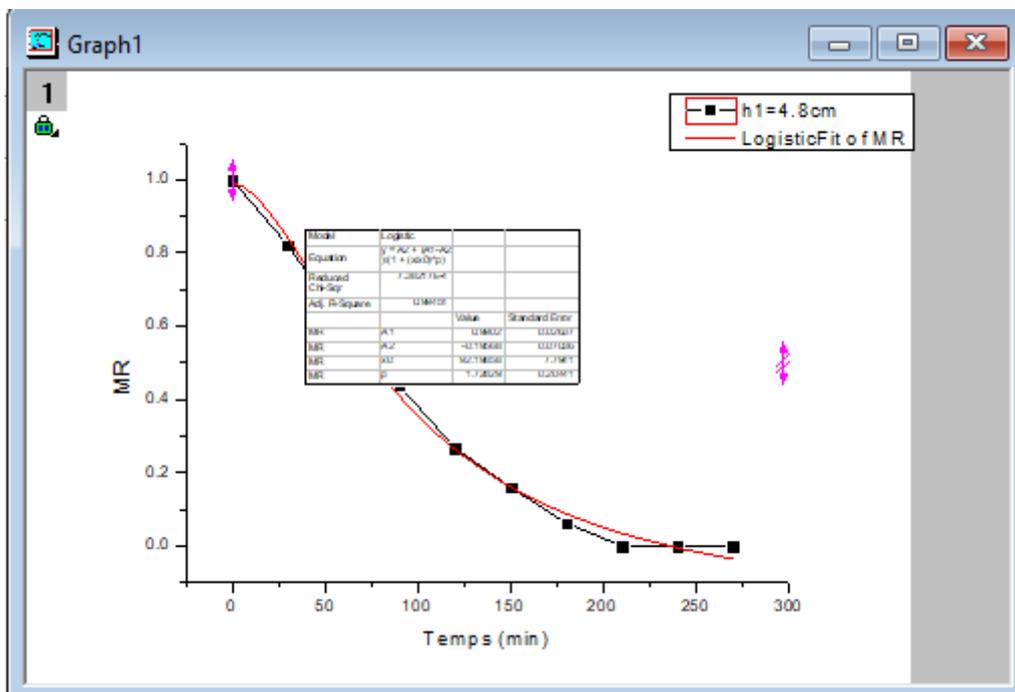


Figure (III-22) : Graph des résultats d'analyse du modèle.

#### 4.6 Essai de Modèle :

Après choisi le modèle à appliquer aux résultats expérimentaux, nous essaye-le pour obtenir les informations statistiques, les tableaux des résultats au suivants :

➤ Dans chaque tableau, le débit d'air est modifié et la hauteur et l'épaisseur sont fixes.

**Tableau. (III-02) :** Modèle de séchage en couche mince à décrire tranche de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur et hauteur 4.8 cm.

débit (Kg/s)	R <sup>2</sup>	RMS	χ <sup>2</sup>
M1=0,011	0.99451	0.01981329	0.00044865
M2=0,024	0.99431	0.02142074	0.00050473
M3=0,0348	0.98165	0.03565734	0.00135515

**Tableau. (III-3) :** Modèle de séchage en couche mince à décrire tranche de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur et hauteur 6.8 cm.

débit (Kg/s)	R <sup>2</sup>	RMS	χ <sup>2</sup>
M1=0,011	0.98542	0.0321214	0.00116076
M2=0,024	0.9877	0.02787298	0.00087402
M3=0,0348	0.98761	0.03116826	0.00111024

**Tableau. (III-4) :** Modèle de séchage en couche mince à décrire tranche de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur et hauteur 4.8 cm.

débit (Kg/s)	R <sup>2</sup>	RMS	χ <sup>2</sup>
M1=0,011	0.99493	0.02106243	0.00049908
M2=0,024	0.99792	0.12808504	0.0184565
M3=0,0348	0.99383	0.02253965	0.00056448

**Tableau. (III-5) :** Modèle de séchage en couche mince à décrire tranche de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur et hauteur 6.8 cm.

débit (Kg/s)	R <sup>2</sup>	RMS	χ <sup>2</sup>
M1=0,011	0.99292	0.02227235	0.00055806
M2=0,024	0.9877	0.02708225	0.00088014
M3=0,0348	0.99232	0.02444819	0.00067243

Les tableaux (III-2), (III-3), (III-4) et (III-5) illustrés ci-dessus montrent que les paramètres statistiques obtenus à partir du modèle extrait pour sécher la fine couche des tranches de pomme de terre sélectionné. Les valeurs des paramètres ont été estimées en adaptant le modèle aux données expérimentales en effectuant une analyse de non-régression Linéarité à l'aide du logiciel origine 8 où l'ajustement du modèle est déterminé en regardant la valeur la plus élevée du coefficient de détermination (R<sup>2</sup>). Chi-carré minimum (χ<sup>2</sup>) et erreur quadratique moyenne (RMSE). Le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) a été utilisé comme critère principal pour l'adéquation du modèle. On voit que le modèle extrait a la valeur la plus

élevée du coefficient de détermination ( $R^2$ ), qui est la valeur la plus basse correspondant au chi carré ( $\chi^2$ ) et à la racine carrée moyenne de l'erreur (RMSE). Nous concluons donc que le modèle extrait est le plus approprié pour décrire le comportement de séchage en couche mince d'échantillons de pommes de terre.

**Tableau (III-6):** La différence entre la teneur en eau théorique et expérimentale pour H= 4,8 cm et épaisseur = 2mm.

M1				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.9902	1	0.0098	0.0098
30	0.84125312	0.8214	-0.01985312	-0.02416986
60	0.60779704	0.6071	-0.00069704	-0.00114814
90	0.40962468	0.4375	0.02787532	0.06371502
120	0.26450938	0.2679	0.00339062	0.01265628
150	0.1616188	0.1607	-0.0009188	-0.00571748
180	0.08816026	0.0625	-0.02566026	-0.41056417
M2				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.97727	1	0.02273	0.02273
30	0.87621833	0.8377	-0.03851833	-0.04598105
60	0.69416128	0.6948	0.00063872	0.00091928
90	0.51772591	0.5325	0.01477409	0.02774478
120	0.37470704	0.4026	0.02789296	0.06928208
150	0.26573267	0.2792	0.01346733	0.04823543
180	0.18393972	0.1623	-0.02163972	-0.1333316
210	0.12226343	0.0909	-0.03136343	-0.34503221
240	0.0751681	0.0584	-0.0167681	-0.28712494
270	0.03865372	0.0325	-0.00615372	-0.18934521
M3				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.99609	1	0.00391	0.00391
30	0.71241939	0.7025	-0.00991939	-0.01412013
60	0.52853227	0.4873	-0.04123227	-0.08461373
90	0.39739626	0.4684	0.07100374	0.15158782
120	0.29879073	0.3544	0.05560927	0.15691104
150	0.22180747	0.1709	-0.05090747	-0.29787873
180	0.15997044	0.1329	-0.02707044	-0.2036903
210	0.1091734	0.0886	-0.0205734	-0.23220538
240	0.06668017	0.0506	-0.01608017	-0.31778985
270	0.03059442	0.0253	-0.00529442	-0.2092657

**Tableau (III-7):** La différence entre la teneur en eau théorique et expérimentale pour H= 6,8 cm et épaisseur = 2mm.

M1				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.99114	1	0.00886	0.00886
30	0.76992718	0.736	-0.03392718	-0.04609671
60	0.54251903	0.584	0.04148097	0.07102906
90	0.37138876	0.352	-0.01938876	-0.05508171
120	0.2470095	0.28	0.0329905	0.11782322
150	0.15563624	0.168	0.01236376	0.07359381
180	0.08704677	0.064	-0.02304677	-0.36014865
210	0.01036695	0.009	-0.00136695	-0.14446839
M2				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.98979	1	0.01021	0.01021
30	0.79507286	0.7541	-0.04097286	-0.05433346
60	0.62492066	0.6475	0.02257934	0.03487158
90	0.48111705	0.5	0.01888295	0.03776589
120	0.35908922	0.4016	0.04251078	0.10585355
150	0.25468959	0.2213	-0.03338959	-0.15087928
180	0.16458529	0.1475	-0.01708529	-0.11583247
210	0.08916084	0.0774	-0.01186084	-0.15195989
M3				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.98748	1	0.01252	0.01252
30	0.81945481	0.7925	-0.02695481	-0.03401238
60	0.59247121	0.5849	-0.00757121	-0.01294446
90	0.4052175	0.4528	0.0475825	0.10508504
120	0.26592802	0.2925	0.02657198	0.09084439
150	0.16417668	0.1321	-0.03207668	-0.24282121
180	0.08913324	0.0672	-0.02193324	-0.32641603

**Tableau (III-8):** La différence entre la teneur en eau théorique et expérimentale pour H= 4,8 cm et épaisseur = 3mm.

M1				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.98618	1	0.01382	0.01382
30	0.8568613	0.8304	-0.0264613	-0.03186573
60	0.61376295	0.6161	0.00233705	0.00379329
90	0.40424566	0.4464	0.04215434	0.09443177
120	0.25791897	0.2411	-0.01681897	-0.0697593
150	0.16039119	0.1339	-0.02649119	-0.19784313
180	0.0947937	0.0982	0.0034063	0.03468738

M2				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	1	1	0	0
30	0.97164941	0.81415929	-0.15749012	-0.19343895
60	0.82323286	0.61061947	-0.21261339	-0.34819295
90	0.4666887	0.38938053	-0.07740817	-0.19872325
120	0.37161773	0.29123894	-0.08047879	-0.27671214
150	0.22227701	0.17274336	-0.04953365	-0.28678682
180	0.12808618	0.0919469	-0.03613928	-0.39307698
M3				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.98185	1	0.01815	0.01815
30	0.83052501	0.785	-0.04552501	-0.05799364
60	0.60512086	0.6355	0.03037914	0.04780352
90	0.41953032	0.4393	0.01976968	0.04500269
120	0.28583356	0.2897	0.00386644	0.01334636
150	0.19180269	0.1776	-0.01420269	-0.07997012
180	0.12490793	0.0935	-0.03140793	-0.33591371
210	0.07625125	0.0748	-0.00145125	-0.01940177
240	0.039997	0.0374	-0.002597	-0.06943861

**Tableau (III-9):** La différence entre la teneur en eau théorique et expérimentale pour H= 6,8 cm et épaisseur = 3mm.

H2-Ep2				
M1				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.99564	1	0.00436	0.00436
30	0.71500896	0.6972	-0.01780896	-0.02554354
60	0.50261422	0.5046	0.00198578	0.00393535
90	0.350775	0.3853	0.034525	0.0896055
120	0.24849069	0.2661	0.01760931	0.06617553
150	0.16960133	0.1651	-0.00450133	-0.02726426
180	0.08912985	0.0642	-0.02422985	-0.38824188
210	0.06154035	0.055	-0.00654035	-0.11891549
M2				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.99452	1	0.00548	0.00548
30	0.69343444	0.67307692	-0.02035752	-0.03024546
60	0.32745282	0.375	0.04754718	0.12679248
90	0.14643636	0.11538462	-0.03105174	-0.26911509
120	0.05051131	0.03846154	-0.01204977	-0.3139393
M3				
temps	Mr (théorique)	Mr (expérimental)	$\Delta(Mr)$	$\Delta(Mr)/ Mr$ (expérimental)
0	0.98542	1	0.01458	0.01458
30	0.83471662	0.8049	-0.02981662	-0.03704388
60	0.6004925	0.6016	0.0011075	0.00184093

90	0.40579935	0.439	0.03320065	0.07562791
120	0.26604404	0.2927	0.02665596	0.09106922
150	0.16851597	0.1382	-0.03031597	-0.21936299
180	0.09972941	0.0732	-0.02652941	-0.36242363

Les tableaux (III-9), (III-8), (III-7), (III-6) montrent le calcul des résultats théoriques de la teneur en eau d'équilibre du produit à l'aide de l'équation (III-9). Ce calcul est basé sur les conditions expérimentales présentées dans les mêmes tableaux en comparant les résultats expérimentales et théoriques, nous avons calculé l'incertitude relative et absolue pour différentes conditions (débit d'air, distance du produit à l'entrée de la chambre de séchage, épaisseur du produit) où il a été observé que :

Concernant les résultats de l'incertitude relative, ont été enregistrées des valeurs très faibles allant de 0,001 à 0,1 dans tous les cas, tandis que les résultats d'incertitude absolue étaient élevés dans certains cas, la valeur la plus élevée étant estimée à 0.393, pour H= 4,8 cm et épaisseur = 3mm, débit = 0.024 kg/s et la faible valeur estimée à 0.0018, pour H= 6,8 cm et épaisseur = 3mm, débit = 0.0348 kg/s.

### Conclusion:

Dans cette étude, nous décrivons les étapes expérimentales qui ont été achevées entre février et mai 2020, et en fonction des matériaux nécessaires et des outils de mesure spéciaux, les expériences ont été menées dans de bonnes conditions, ce qui a été l'une des principales raisons de l'enregistrement. Résultats positifs après séchage d'échantillons de pommes de terre d'épaisseurs différentes. Un modèle mathématique a été proposé pour étudier la propriété de séchage des pommes de terre. Le modèle a été validé à l'aide de plusieurs données expérimentales extraites de la littérature. De plus, les valeurs des paramètres ont été estimées par l'adéquation du modèle aux données expérimentales. Une analyse de régression non linéaire a été réalisée à l'aide du programme Origin 8 bien que la qualité de l'ajustement ait été évaluée à l'aide de méthodes de test statistiques telles que le chi carré faible ( $\chi^2$ ) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le coefficient de détermination ( $R^2$ ) a été utilisé comme les critères initiaux. L'adéquation du modèle. Les résultats ont montré que le modèle proposé dans les travaux actuels est le meilleur. Le présent modèle peut être utile pour l'industrie alimentaire pour analyser la cinétique de séchage des pommes de terre afin que la qualité de ces produits puisse être préservée.

## &lt;&lt; Références &gt;&gt;

[1] : Babalis, . S., & Belessiotis, . V. (2004). Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering* (65), 449–458.

[2] : Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Clarendon. Oxford, England.

[3] : Hanafi, A. e. (2016). "Stratégie d'amélioration du confort thermique d'une place publique d'une ville saharienne'Biskra/Algérie'." *Revue des Energies Renouvelables* 19.3 . 465-480.

[4] : J, C. ((1975)). *The mathematics of diffusion*. Clarendon. Oxford, England.

[5] : Togrul, H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77 , 610–619.

[6] : V. Shanmugam, E. N. (2006). *Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer Renewable Energy*31,.

# Chapitre IV

## Résultats et discussion

## 1. Introduction :

Le séchage solaire est une opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit) en utilisant des différents équipements et techniques, cette opération influe sur les paramètres de l'air et du produit.

Les résultats obtenus sont extraits expérimentalement puis discutés et interprétés. Ainsi, dans ce chapitre, nous allons présenter un ensemble de chiffres liés aux courbes traduisant les résultats, obtenus expérimentalement au cours du processus de séchage, puis nous expliquons et nous interprétons ces courbes qui décrivent les principaux facteurs de séchage.

## 2. Variation de l'intensité du rayonnement solaire :

Les figures (IV-2a), (IV-2b), (IV-2c), (IV-2d), (IV-2e) et (IV-2f) présentent les courbes de l'intensité du rayonnement solaire en fonction du temps pendant la journée avec différentes épaisseurs de produit, de débit d'air et de distance entre la grille et la source d'air (trous dans la chambre de séchage) pour sécher la pomme de terre. Le produit a été séché en 9 jours à l'aide d'un capteur solaire inclinable à 38 degrés.

L'objectif principal de ce rayonnement solaire est de chauffer la plaque d'absorption. A travers l'énergie solaire, l'air sera chauffé pour être utilisé dans le processus de séchage, le rayonnement solaire augmente avec le temps, jusqu'à un niveau maximum de 13 m puis il diminue de nouveau, nous avons observé les résultats suivants:

- **Pour débit 01 = 0.011 kg/s :**

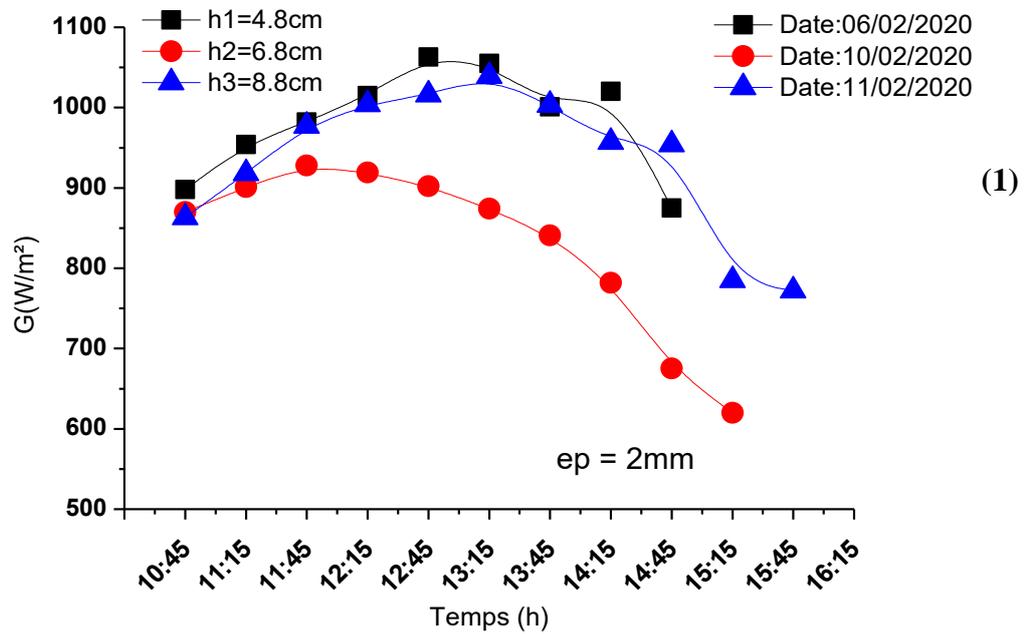


Figure (IV-2a): Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.01 kg/s.

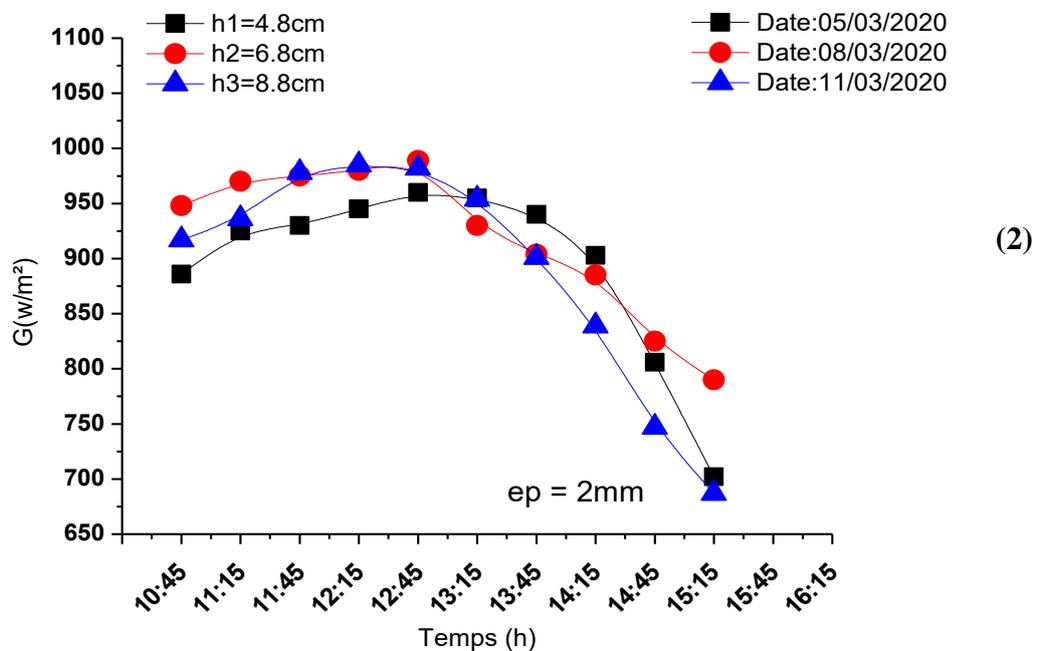
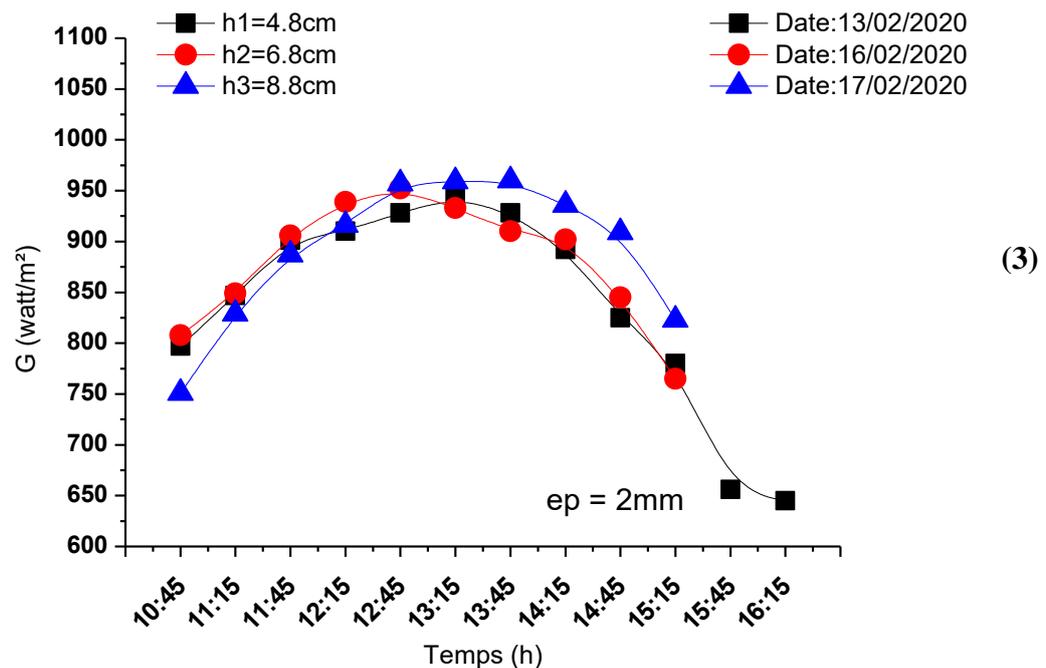


Figure (IV-2b): Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.01 kg/s.

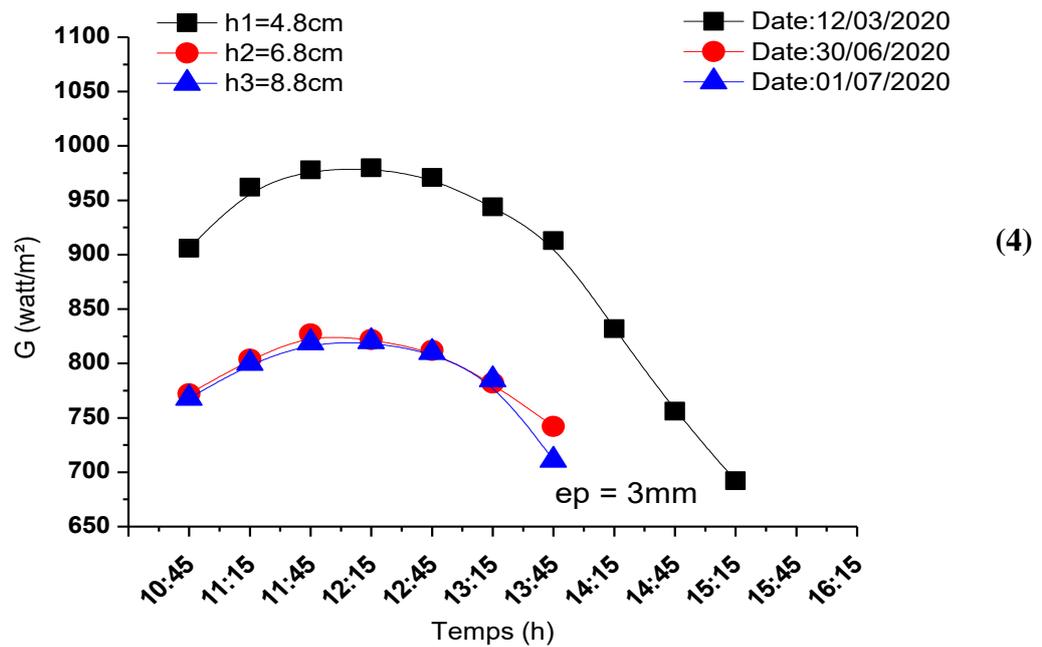
La figure (IV-2a) représente la variation de l'intensité du rayonnement solaire en 3 jours de séchage de la pomme de terre avec un débit de 0.011 kg/s et une épaisseur de 2 mm. On observe que l'intensité du rayonnement solaire a dépassé la valeur de 1000 w / m<sup>2</sup> pendant le premier et le troisième jour, tandis que les autres jours n'ont pas dépassé cette valeur. L'enregistrement du 06 février 2020 à 12h45 a une valeur maximale de 1063 w / m<sup>2</sup>, mais dans l'intervalle entre (12h45 – 13h45) de premier jour l'intensité du rayonnement solaire diminue jusqu'à moins de 600 w / m<sup>2</sup> à cause du nuage.

Pour le même débit 0.011 kg/s et une l'épaisseur de 3mm, on a observé que l'intensité du rayonnement solaire a dépassé la valeur de 975 w / m<sup>2</sup>, le 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> jours à 13h, et démunie dans l'intervalle (13h – 15h15) jusqu'à 675 w / m<sup>2</sup>. L'enregistrement du 05/03/2020 à 13h30 possède une valeur maximale de 1050 w / m<sup>2</sup>. voir la figure (IV-2b)

- **Pour débit 02 = 0.024 kg/s :**



**Figure (IV-2c):** Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.



**Figure (IV-2d):** Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.

La figure (IV-2c) représente la variation de l'intensité du rayonnement solaire en 3 jours de séchage de la pomme de terre avec un débit de 0.024 kg/s et une épaisseur de 2mm. On a observé que l'intensité du rayonnement solaire a dépassé la valeur de 900 w / m<sup>2</sup> au cours les trois jours, l'enregistrement du 17 février 2020 à 12h45 a indiqué une valeur maximale de 959 w / m<sup>2</sup>.

Pour un même débit de 0,024 kg / s et une épaisseur de 3 mm, il a été observé que l'intensité du rayonnement solaire ne dépassait pas la valeur de 850 watts / m<sup>2</sup>, les deuxième et troisième jours tout au long de la période de séchage, tandis que sur le premier jour c'était mieux car il a été enregistré à 12h30 une valeur maximale de 975 W / m<sup>2</sup> (voir Figure IV-2d).

- **Pour débit 03 = 0.0348 kg/s :**

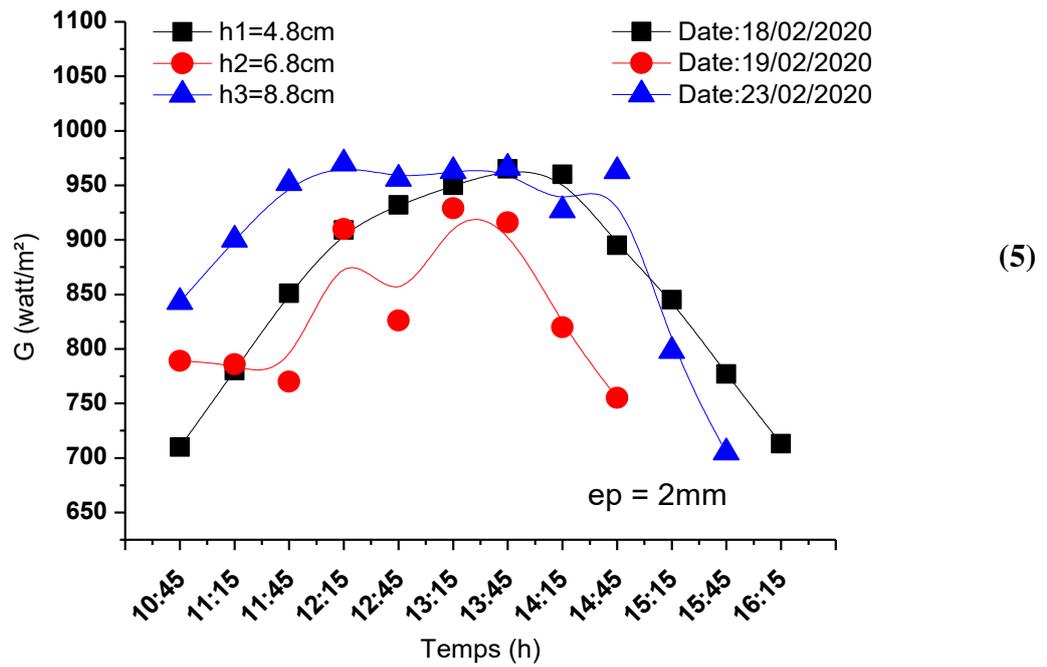


Figure (IV-2e): Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.

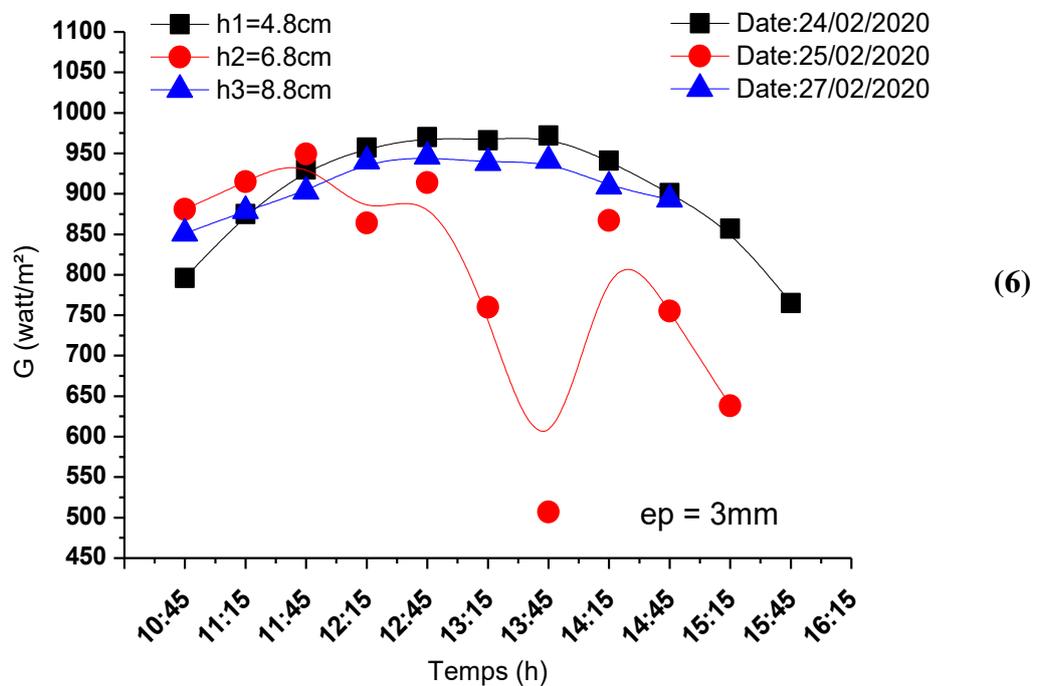


Figure (IV-2f): Variation de l'intensité du rayonnement solaire en 1-3 jours de séchage de la pomme de terre épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.

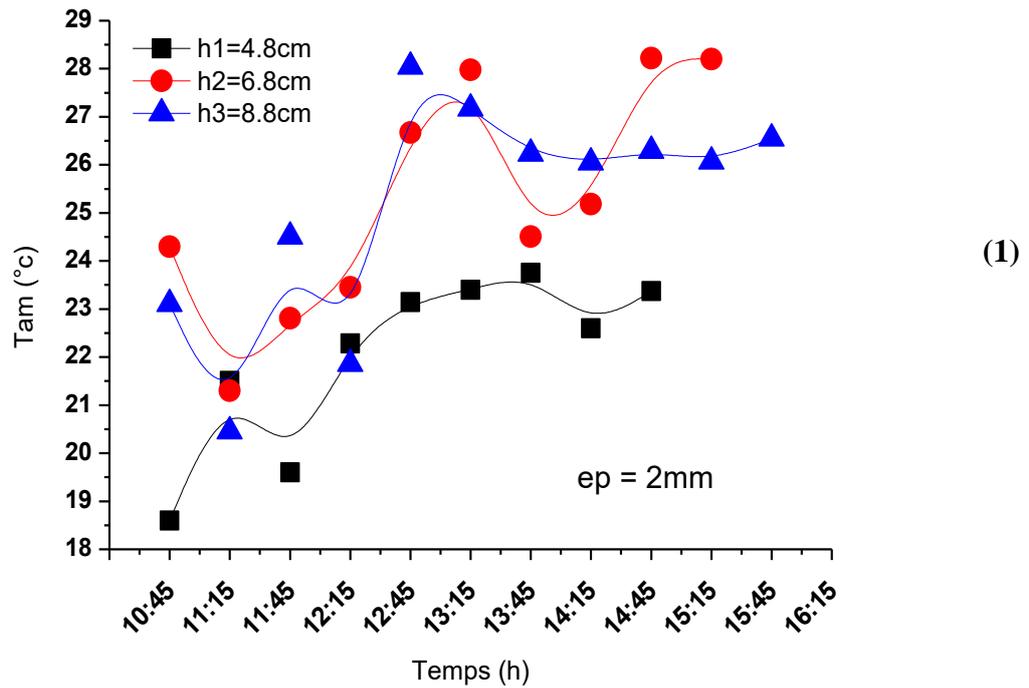
La figure (IV-2e) représente la variation de l'intensité du rayonnement solaire en 3 jours de séchage de la pomme de terre avec un débit de 0.0348 kg/s et une épaisseur de 2 mm. On a observé que l'intensité du rayonnement solaire a dépassé la valeur de 950 w / m<sup>2</sup> pour le premier et le 3<sup>ème</sup> jours, l'enregistrement du 23 février 2020 à 11h45 indique une valeur maximale de 970 w / m<sup>2</sup>, au contraire on observe que pour le 2<sup>ème</sup> jour l'intensité du rayonnement solaire ne dépasse pas cette valeur.

Pour le même débit et une épaisseur 3mm, on a observé que l'intensité du rayonnement solaire ne dépassé pas la valeur de 1000 w / m<sup>2</sup> pour le premier et le 3<sup>ème</sup> jours, l'enregistrement du 24 février 2020 à 13h prend une valeur maximale de 970 w / m<sup>2</sup>. Pour les même paramètre (débit et épaisseur), on a observé que le 2<sup>ème</sup> jour ne dépasse pas cette valeur, comme il est enregistré le 25 février 2020 à 12h, il prend une valeur maximale de 949 w / m<sup>2</sup>. voir la figure (IV-2f)

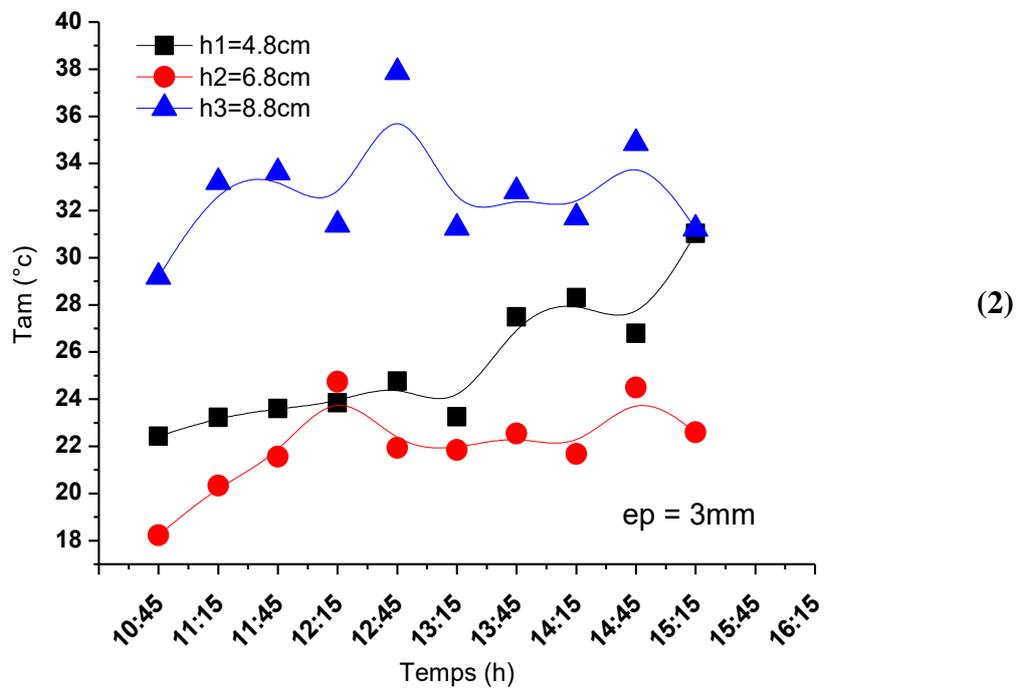
### 3. Variation de la température moyenne de la plaque absorbante:

Les figures (IV-3a), (IV-3b), (IV-3c), (IV-3d), (IV-3e) et (IV-3f) montrent la variation de la température moyenne de la plaque absorbant le capteur solaire au fil du temps, dans les 18 jours suivant les expériences de séchage. Cette plaque absorbante est la principale cause de chauffage de l'air qui traverse la chambre de séchage grâce à elle une température élevée est obtenue à partir du rayonnement solaire qui est distribué dans cette absorption. Ces courbes ont la même forme que les courbes de rayonnement solaire car elles augmentent au maximum puis diminuent avec le temps du coucher du soleil, et nous avons enregistré les résultats suivants:

- **Pour débit 01 = 0.011 kg/s :**



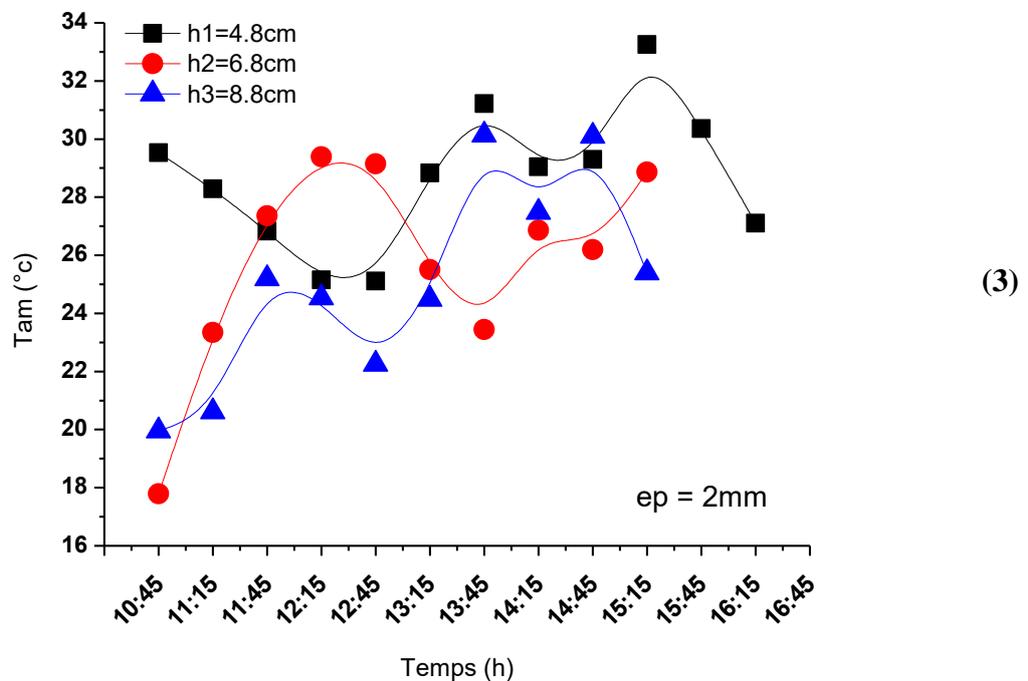
**Figure (IV-3a):** Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.



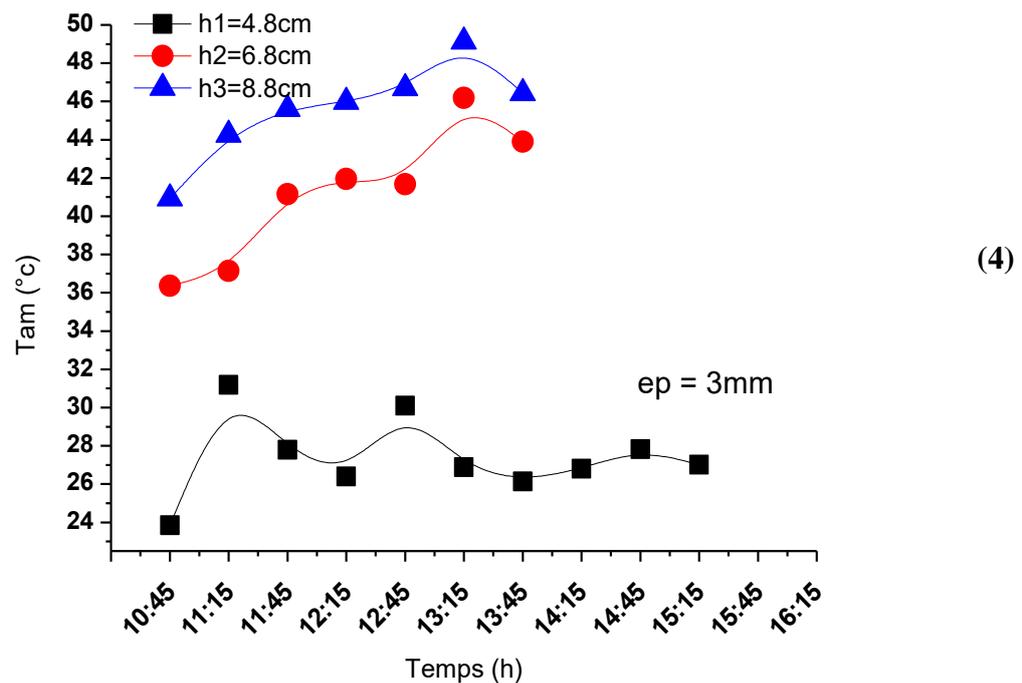
**Figure (IV-3b):** Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.

La figure (IV-3a) représente les variations de température en fonction du temps pour un débit de 0.011 kg/s et un épaisseur de 2mm, Cette courbe diminue et augmente au cours des trois jours, alors que la meilleure valeur enregistrée était de 28,8° C au 10 février 2020, ce qui correspond à 675 W / m<sup>2</sup> d'intensité de rayonnement solaire à 15 h00. La température la plus basse est enregistré le 6 février 2020 à 10h45, elle est estimée à 18,6 ° C. Pour le même débit et le même épaisseur, la figure (IV-3b) représente une température qui varie avec le temps de manière instable, où la température la plus élevée a été enregistrée le 11 mars 2020 à 13h00, elle était estimée à 37,87°C, ce qui correspond à 982 W / m<sup>2</sup> par rapport à celle enregistrée le 8 mars à 10h00, elle est estimée à 18,23 ° C.

- **Pour débit 02 = 0.024 kg/s :**



**Figure (IV-3c):** Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.

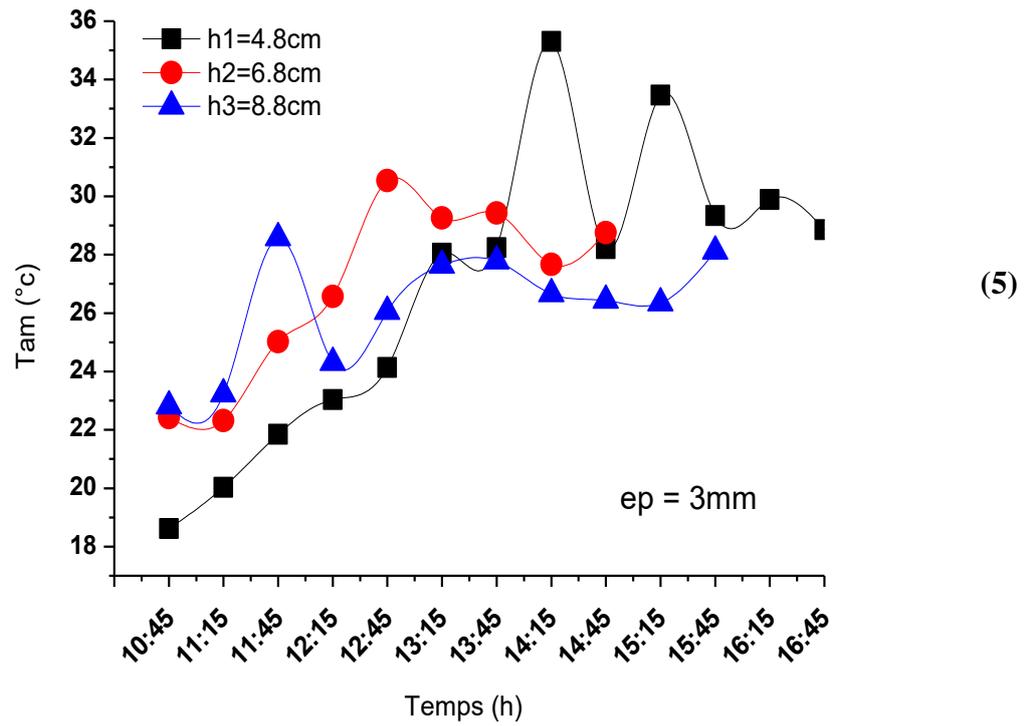


**Figure (IV-3d):** Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.

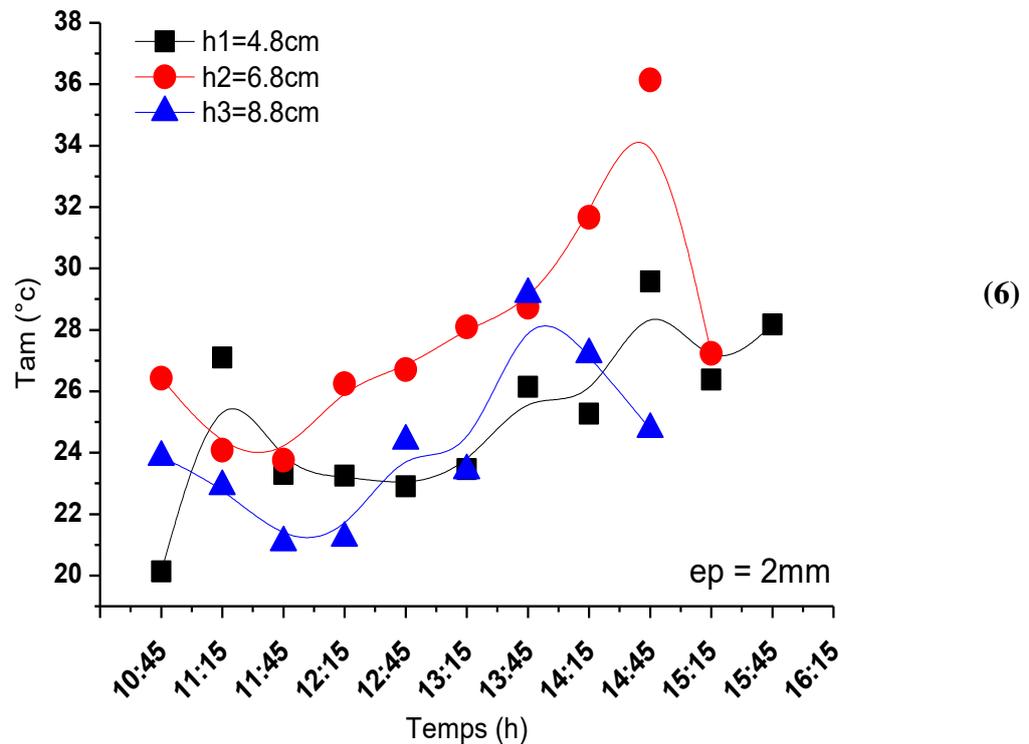
La figure (IV-3c) représente la température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre pour un débit 0.024 kg/s\_ et une épaisseur de 2mm. Elle montre des changements répétés de température qui diminuent et augmentent au cours des trois jours, tandis que la température moyenne la plus élevée de ce matériau absorbant a été enregistrée et estimée à 33,5 ° C le 13 février 2020, ce qui est équivalent à 780 W / m<sup>2</sup> de l'intensité du rayonnement solaire à 15h00. La température d'altitude la plus basse est enregistrée le 16 février 2020 à 10h30, elle est estimée à 17,79 ° C.

Pour le même débit et le même épaisseur, il a été constaté que la température varie avec le temps de manière instable. Le 12 mars, on a remarque que la température moyenne la plus faible était de 23,84 ° C qui est enregistrée à 10h00. Pendant les autres jours, la température a dépassé la valeur de 43 degrés Celsius, car la température moyenne la plus élevée enregistrée pour cette absorption était estimée à 49,13 ° C le 1er juin 2020, ce qui équivaut à 785 watts / m<sup>2</sup> de rayonnement solaire à 13 h. (voir la figure (IV-3d))

- **Pour débit 03 = 0.0348 kg/s**



**Figure (IV-3e):** Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.



**Figure (IV-3f):** Température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.

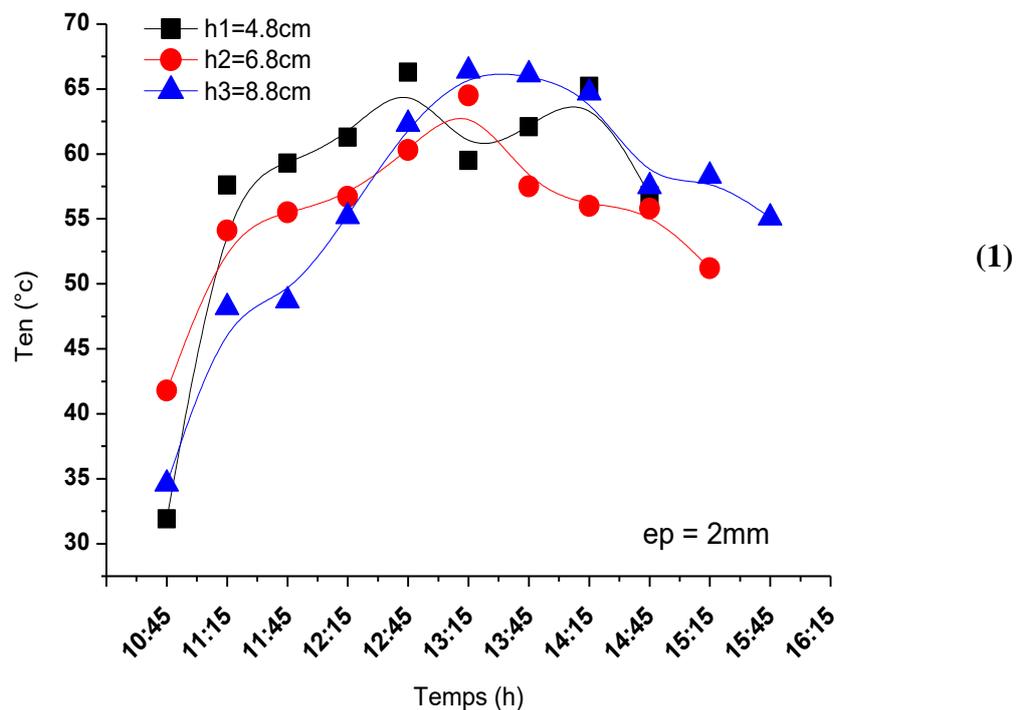
La figure (IV-3e) représente la température de surface absorbante moyenne en fonction du temps pendant trois jours de séchage de la pomme de terre pour un débit de 0.0348 kg/s\_ et une épaisseur de 2 mm. Cette illustration représente les variations fréquents de température qui diminue et qui augmente au cours des trois jours, On a observé une valeur maximale de la température moyenne absorbée égale à 35,30 ° C le 18 février 2020 à 12h30, ce qui équivaut à 960 watts / m<sup>2</sup> d'intensité de rayonnement solaire pour le premier jour, mais les autres jours elle ne dépassait pas 31 ° C en raison d'infériorité des valeurs de rayonnement solaire.

Pour le même débit et la même épaisseur, nous avons observé que la température varie avec le temps de manière instable, où la température la plus élevée a été enregistrée le 25 mars 2020 à 15h00, elle était estimée à 36,14°C, ce qui correspond à 755 W / m<sup>2</sup> par rapport à celle enregistrée le 24 mars à 10h00 qui est estimée à 20,13 ° C, voir La figure (IV-3f).

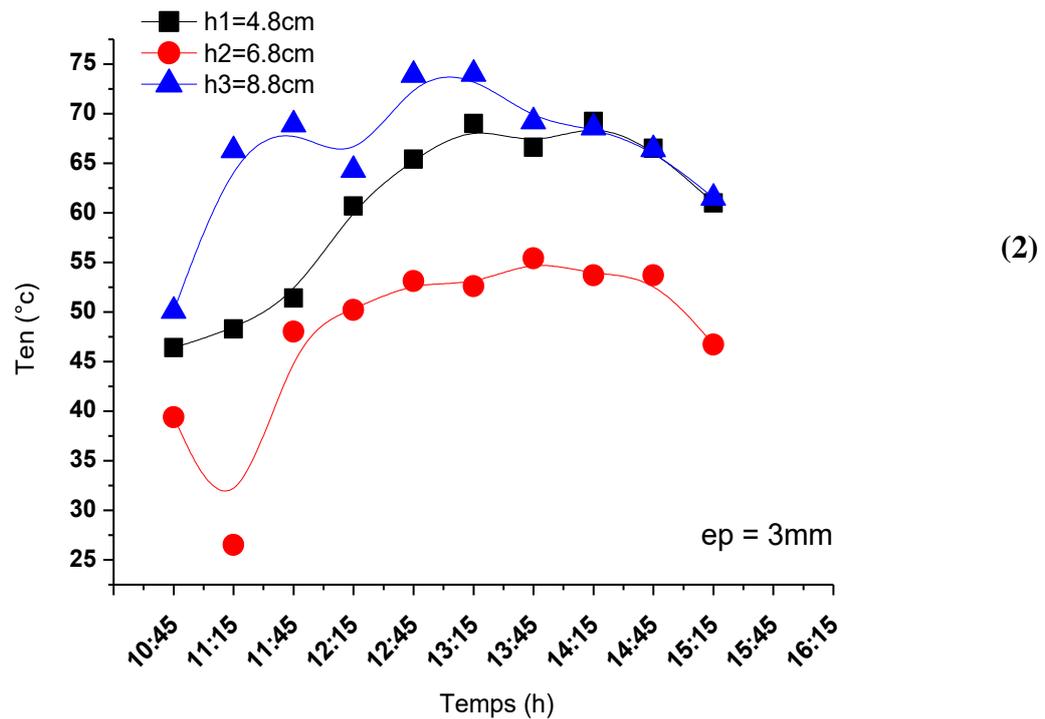
#### 4. Variation de la température d'entrée de la salle de séchage:

Les figures (IV-4a), (IV-4b), (IV-4c), (IV-4d), (IV-4e) et (IV-4f) représentent la variation de la température d'entrée de la chambre de séchage en fonction du temps, pour différentes expériences de séchage de pommes de terre. Par conséquent, lorsque l'air chaud sort du capteur d'air solaire, il se déplace à travers un canal spécial, puis sa température est mesurée directement à l'entrée de la salle de séchage.

- Pour débit 01 = 0.011 kg/s :



**Figure (IV-4a):** Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.



**Figure (IV-4b):** Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.

Pour les tentatives de **la courbe (1)**, le comportement de la première tentative était proche du comportement de la troisième tentative, qui s'est recoupé en trois points, et la valeur maximale de la température de l'entrée de la chambre de séchage était de  $66,3^{\circ}\text{C}$  pour la première tentative et  $66,4^{\circ}\text{C}$  pour la troisième. Pendant la deuxième tentative, le contraste était moins, ce qui vaut  $64,5$  degrés Celsius en raison de la vitesse de l'air.

Pour les tentatives de **la courbe (2)**, le comportement de la troisième tentative était proche de celui de la première tentative, qui s'est recoupé en trois points, et la valeur maximale de la température de l'entrée de la chambre de séchage était de  $73,9^{\circ}\text{C}$  pour la troisième tentative et de  $69,2^{\circ}\text{C}$  pour la première. Mais, pendant la deuxième tentative, le contraste était moins, il n'a pas dépassé  $55,4^{\circ}\text{C}$  en raison de la vitesse de l'air.

- Pour débit  $02 = 0.024$  kg/s :

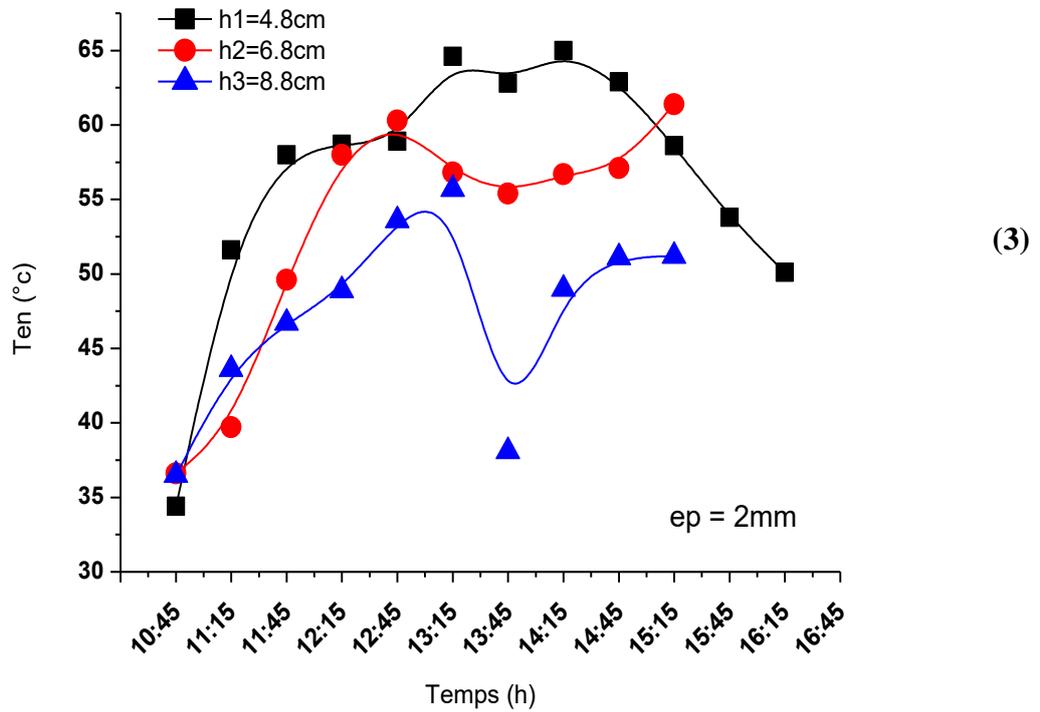
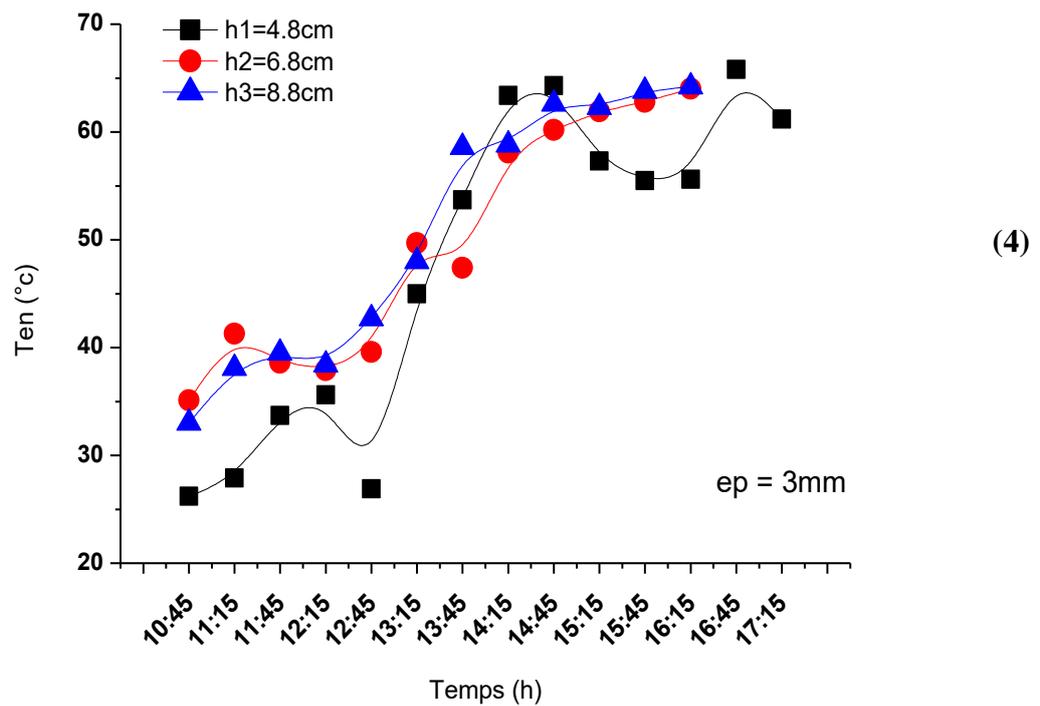


Figure (IV-4c): Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.

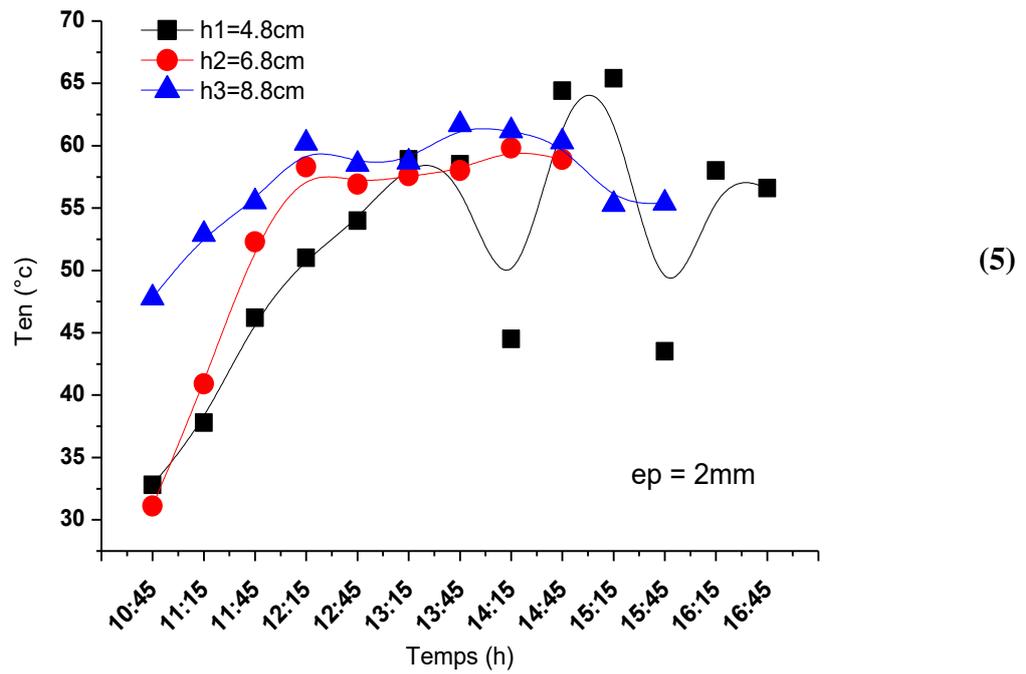


**Figure (IV-4d):** Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.

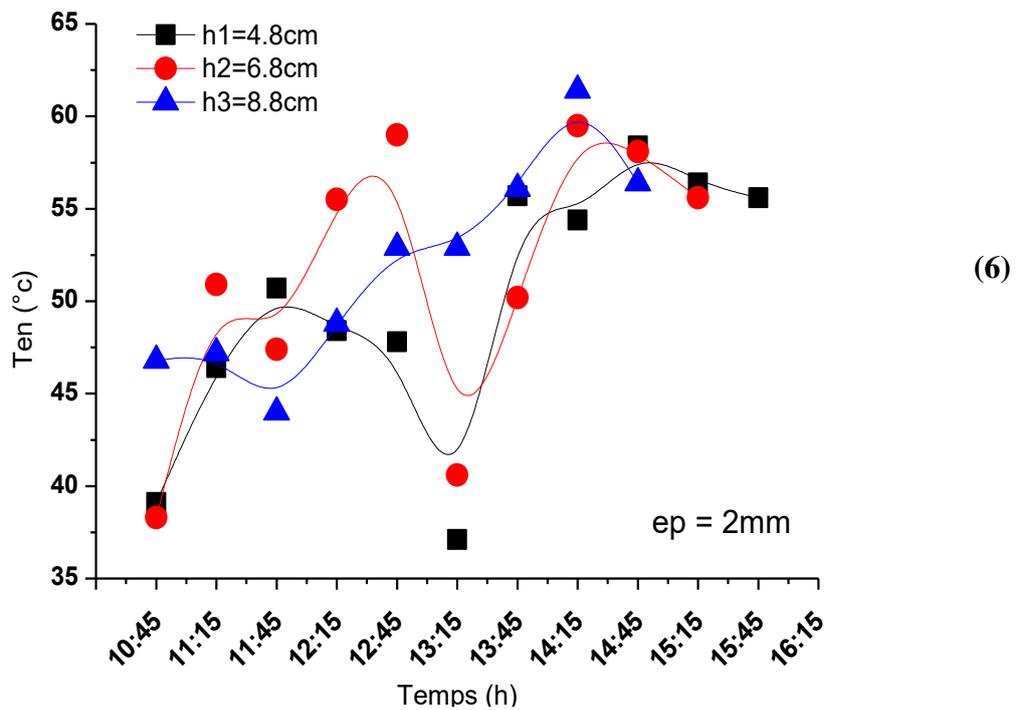
Pour les tentatives de **la courbe (3)**, Nous remarquons une augmentation puis une diminution de la température de l'entrée de la salle de séchage avec au cours du temps dans tous les cas, où il a été remarqué que la première tentative était la meilleure en raison des valeurs enregistrées les plus élevées de la température estimée  $65,00\text{ }^{\circ}\text{C}$ , et la différence de température entre la première tentative et l'autre était élevée et la cause de cette différence est la vitesse de l'air qui cela affectait la circulation de l'air à l'intérieur du capteur solaire car il y avait un accord de température avec la deuxième tentative à certains moments, qui s'est recoupé en deux points identifiés à 12h45 et 15h15, et à la fin la deuxième tentative est devenue plus élevée jusqu'à la fin.

Pour les tentatives de **la courbe (4)**, nous observons Les deuxième et troisième tentatives étaient accord en température entre 10h00 et 15h15 min, mais la troisième tentative était la meilleure le reste du temps et sa température maximale était de  $64,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Alors que le changement de température lors de la première tentative était faible, qui a enregistré la valeur maximale de la température de  $65,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bien que le rayonnement solaire soit le plus élevé et que la raison en soit la vitesse de l'air qui affectait la circulation de l'air à l'intérieur du capteur solaire.

- **Pour débit 03 = 0.0348 kg/s**



**Figure (IV-4e):** Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.



**Figure (IV-4f):** Variation de la température d'entrée de la salle de séchage avec le temps de 3 jours de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.

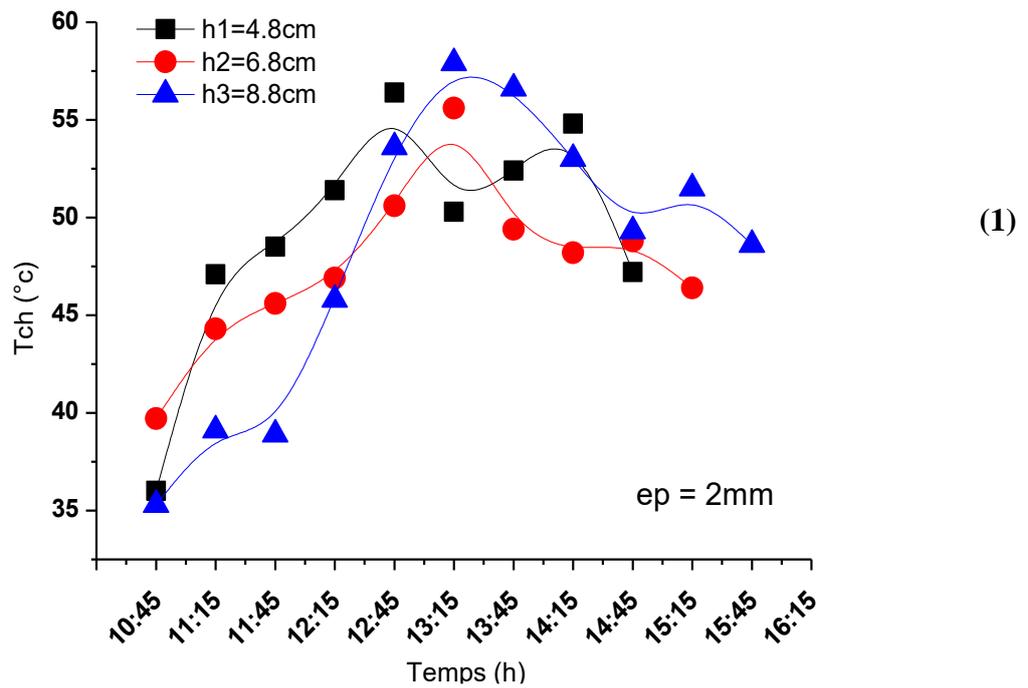
Pour les tentatives de **la courbe (5)**, il a été noté que la courbe dans la deuxième tentative était très proche de la troisième tentative, et la valeur maximale de la température d'entrée de la chambre de séchage était de 59,8 °C dans la deuxième tentative et de 61,7 °C pour la troisième. La variation était faible dans la première tentative, qui ne dépassait pas la valeur de 58.9 °C au début tandis que dans ce dernier il devient plus élevé jusqu'à la fin qui enregistré la valeur maximale de la température de 65,4 °C à cause de la vitesse de l'air.

Pour les tentatives de **la courbe (6)**, montre que la température de l'entrée de la chambre de séchage augmenté et diminué avec le temps, où il a été observé qu'il y avait une concordance entre le comportement de la première tentative et de la deuxième tentative, tandis que la deuxième tentative était meilleure en raison des valeurs plus élevées enregistrées pour la température, qui était estimée à 59,5 °C. Quant à la troisième tentative, elle était le meilleur qui soit, il a une température maximale de 61,4 °C et cette différence est due à la vitesse de l'air.

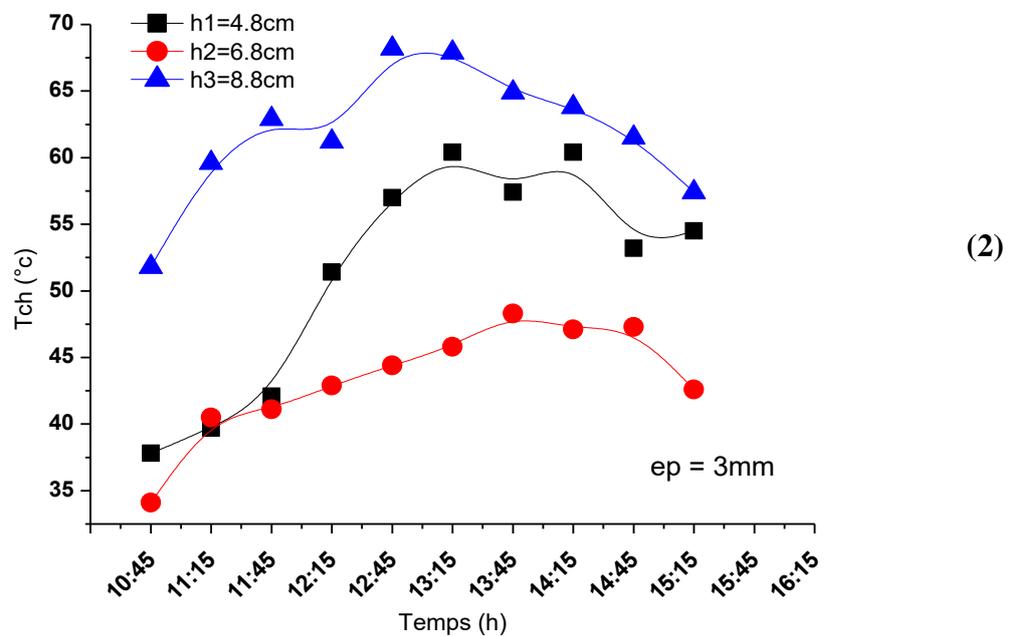
##### **5. Variation de température de la chambre de séchage:**

Les figures (IV-5a), (IV-5b), (IV-5c) , (IV-5d) , (IV-5e) et (IV-5f) montrent la variation de la température à l'intérieur de la salle de séchage au cours du temps pour sécher les pommes de terre avec différentes épaisseurs, débits et hauteurs entre l'entrée de la salle de séchage et la grille. Nous avons noté les résultats suivants:

- **Pour débit 01 = 0.011 kg/s :**



**Figure (IV-5a):** Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.

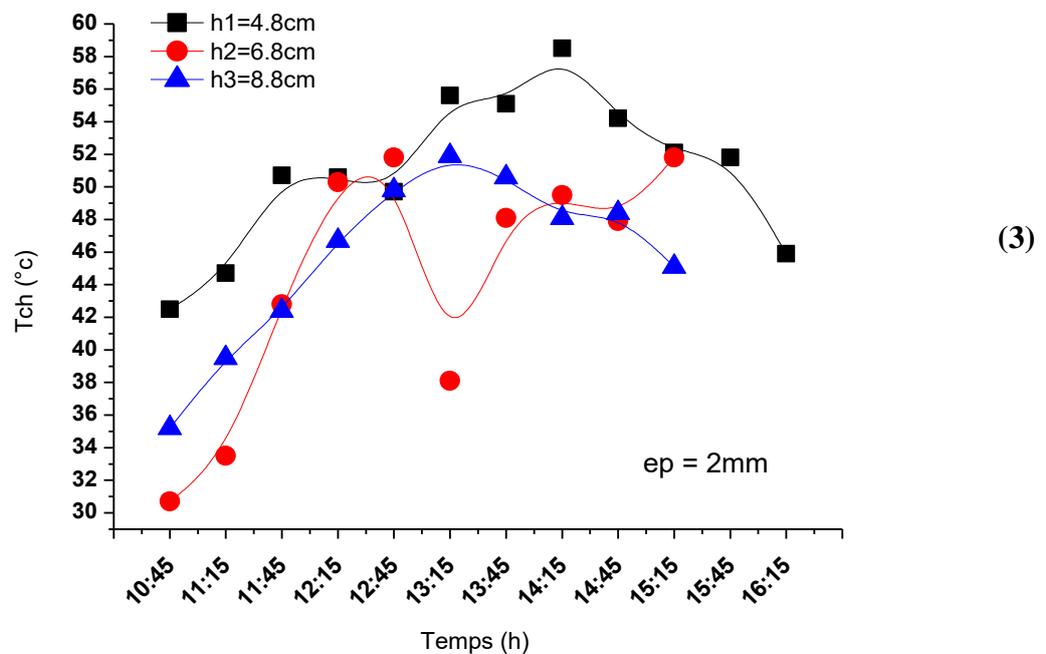


**Figure (IV-5b):** Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.

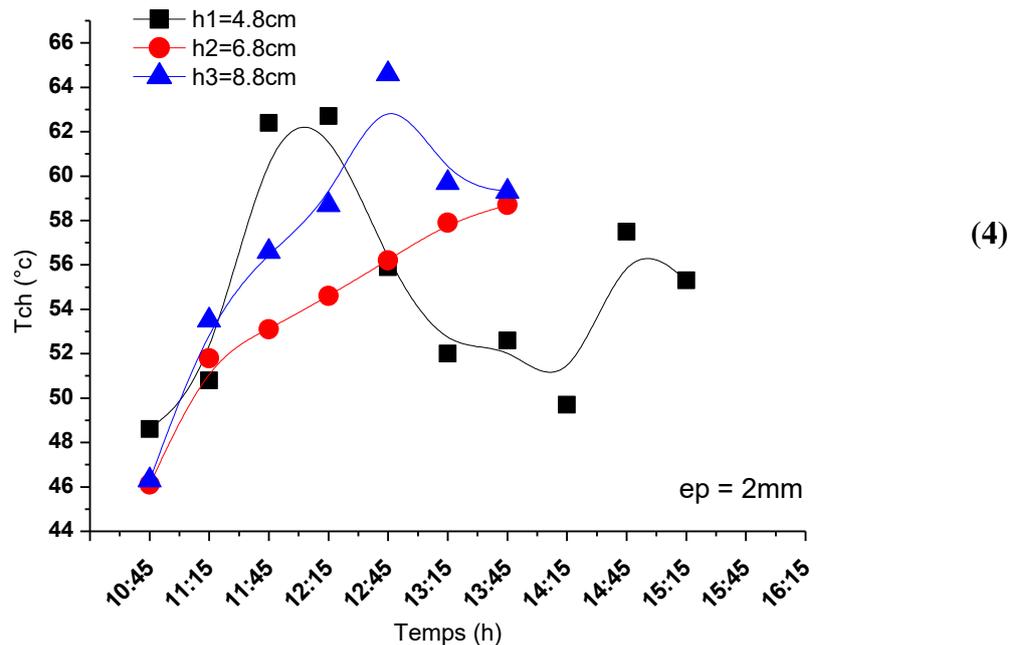
Pour les tentatives de **la courbe (1)**, la température de la salle de séchage augmente de manière significative dans le temps dans tous les cas mais elle commence à baisser à la fin du séchage, et la meilleure valeur enregistrée était de  $66.4^{\circ}\text{C}$ .

Pour les tentatives de **la courbe (2)**, La température de la chambre de séchage change avec le temps car il existe une sorte de congruence entre l'état de la première et de la troisième température. Cependant, le changement était faible dans le deuxième cas, et cela cause de la température d'entrée de la chambre de séchage, qui était également plus basse.

- Pour débit  $02 = 0.024\text{ kg/s}$  :



**Figure (IV-5c):** Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.



**Figure (IV-5d):** Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.

Pour les tentatives de **la courbe (3)**, On observe une augmentation de la température de la salle de séchage au cours du temps dans tous les cas, mais elle commence à diminuer à la fin du séchage, et la meilleure valeur enregistrée dans le premier cas était 58,5 ° C, tandis que dans la deuxième cas une baisse brutale a été observée en raison d'une diminution de la température de l'entrée de la salle de séchage a enregistré la valeur la plus basse de 56,8 ° C.

Pour les échantillons de pommes de terre de **3 mm** d'épaisseur, le débit d'air est de **0,024 kg / s**. La température de la chambre de séchage a augmenté de manière significative avec le temps dans tous les cas, alors qu'une diminution de la température a été observée par rapport à une hauteur de  $h_1 = 4,8$  cm avec une épaisseur de 3 mm qui était à partir de 12h15. Dans les deuxième et troisième cas, une chute tardive a été observée à la fin du séchage, et la meilleure valeur enregistrée était de 64 ° C, (voir Fig. IV-5d).

- **Pour débit 03 = 0.0348 kg/s :**

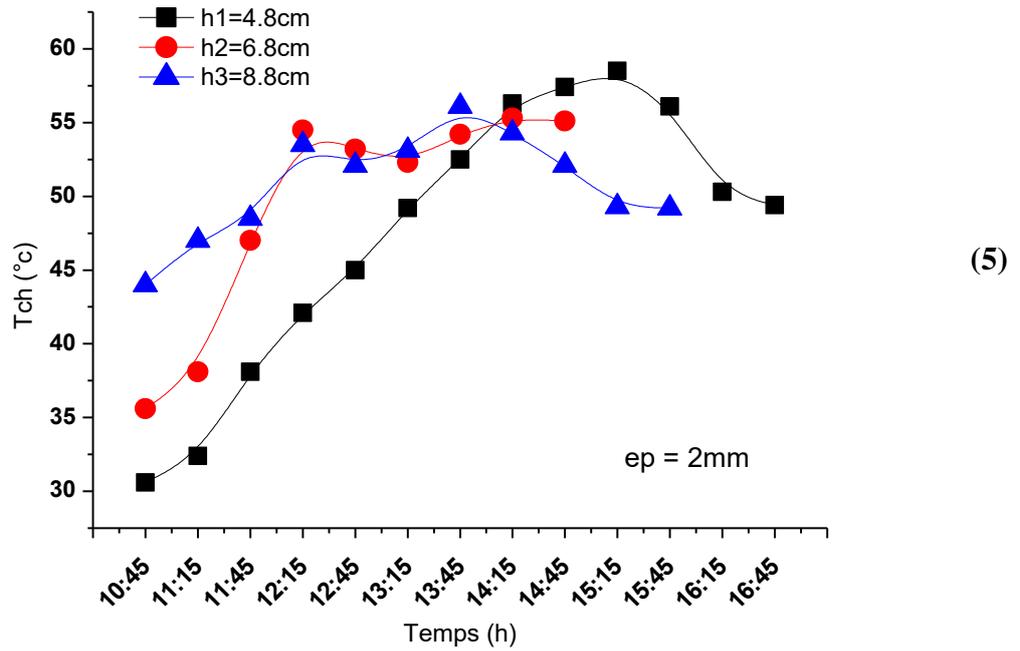


Figure (IV-5e): Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.

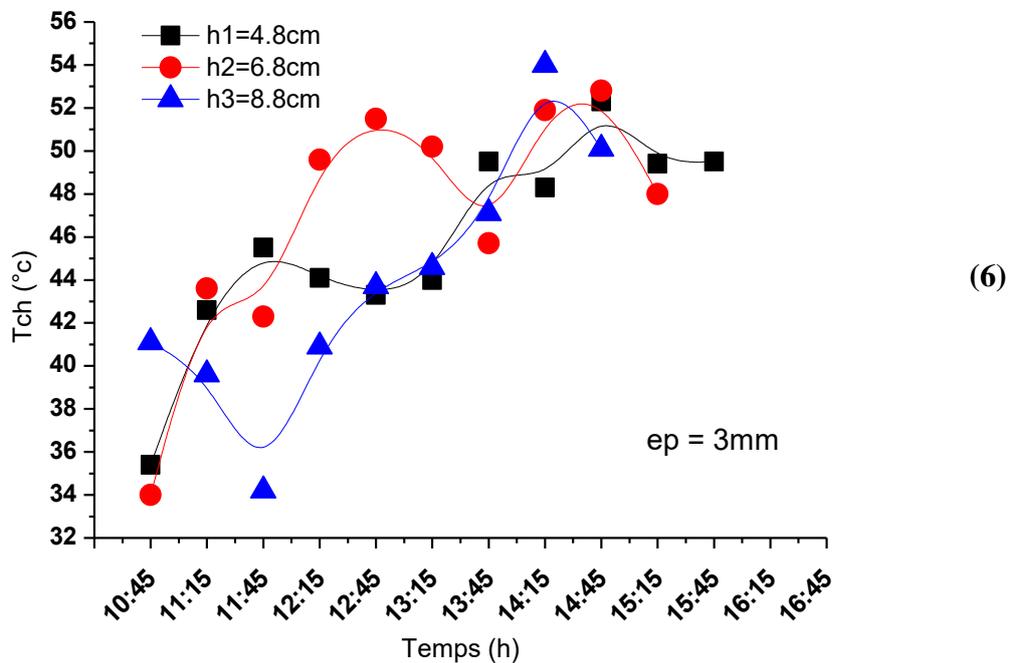


Figure (IV-5f): Variation de la température ambiante de séchage en fonction du temps pour les tranches de pomme de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.

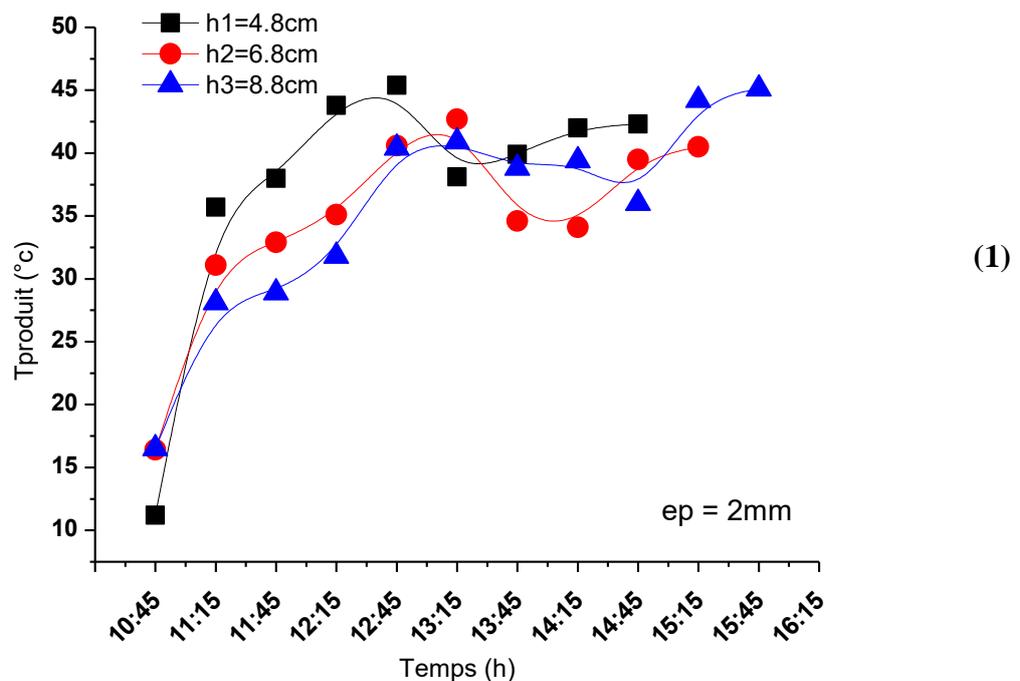
Pour les tentatives de **la courbe (5)**, Nous observons que l'augmentation de la température de la chambre de séchage est présente de manière constante dans tous les cas, et le premier cas était le meilleur en température la plupart du temps, qui a enregistré sa valeur maximale de 58.5 °C, tandis que la température du deuxième cas était plus basse en raison de la température de l'entrée de la salle de séchage.

Pour les tentatives de **la courbe (6)**, la température de la chambre de séchage change de manière significative au cours du temps parce que nous notons une augmentation et une diminution dans tous les cas, et la meilleure valeur a été estimée à 54 °C dans le troisième cas, tandis qu'une baisse de la température de la salle de séchage est causée par une baisse de la température d'entrée Chambre de séchage.

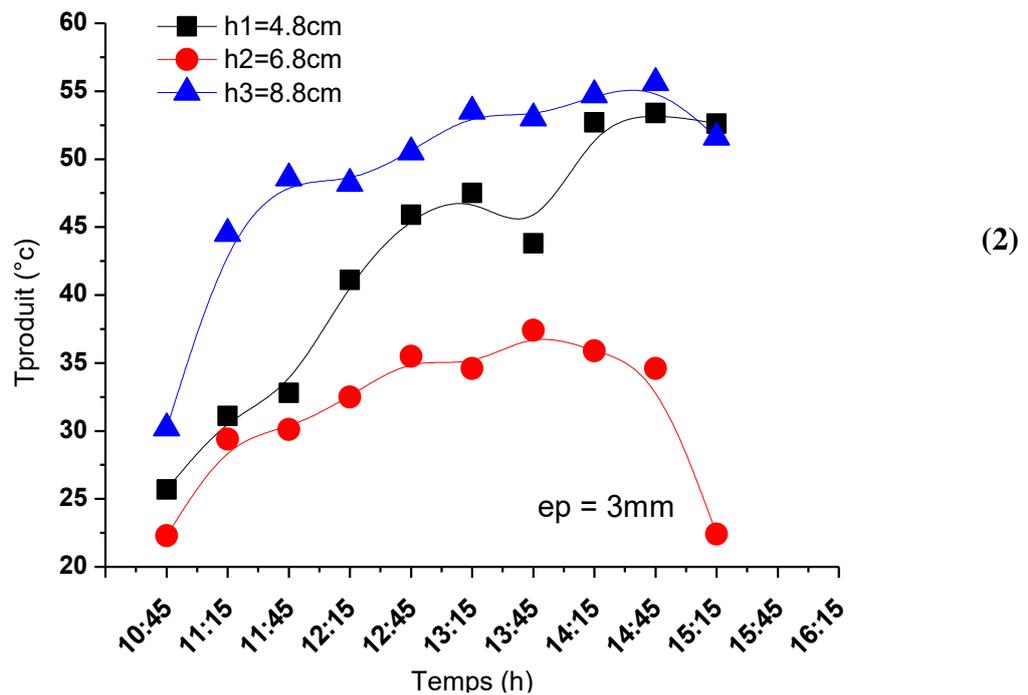
#### 6. Variation de la température du produit:

La température du produit varie avec le temps pour sécher les pommes de terre de différentes épaisseurs, débits et hauteurs entre l'entrée de la chambre de séchage et la grille des figures (IV-6a), (IV-6b), (IV-6c), (IV-6d), (IV-6e) et (IV-6f). Nous avons noté les résultats suivants:

- **Pour débit 01 = 0.011 kg/s :**



**Figure (IV-6a):** Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.



**Figure (IV-6b):** Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.

Des courbes de séchage des pommes de terre apparaissent pour l'expérience, qui portait sur une épaisseur de 2 mm et un débit de 0,011 kg / s, où dans le premier cas la hauteur de 4,8 cm avait la meilleure variation de température du produit la plupart du temps, tandis que le second cas avec une hauteur de 6,8 cm avait un accord en degré Chauffeur uniquement au début du séchage. Alors que le troisième cas avec une hauteur de 8,8 cm a la différence la plus élevée à la fin entre 15h15 et 15h45 avec une valeur maximale de 45,1 ° C, voir la figure (IV-6a) (1).

Concernant l'expérience qui traitait de l'épaisseur de 3 mm et du même débit, le troisième cas d'une hauteur de 8,8 cm a enregistré la meilleure différence de température à tout moment et une grande différence entre elle et les autres tentatives, et a atteint une valeur élevée de 55,6 ° C, voir la figure (IV-6b) (2).

- **Pour débit 02 = 0.024 kg/s :**

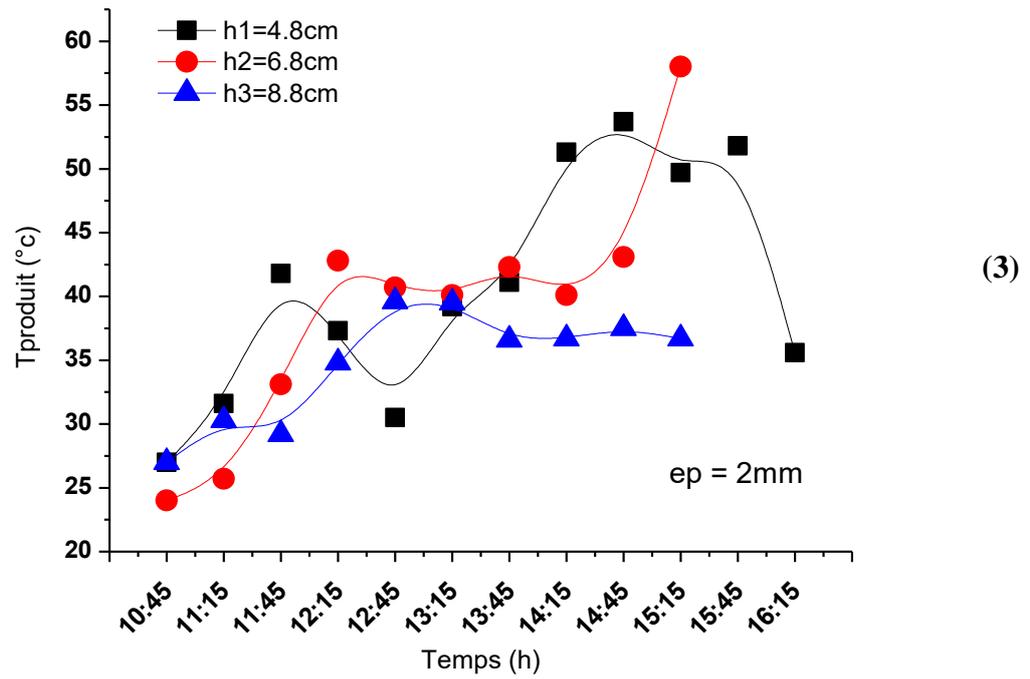


Figure (IV-6c): Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.

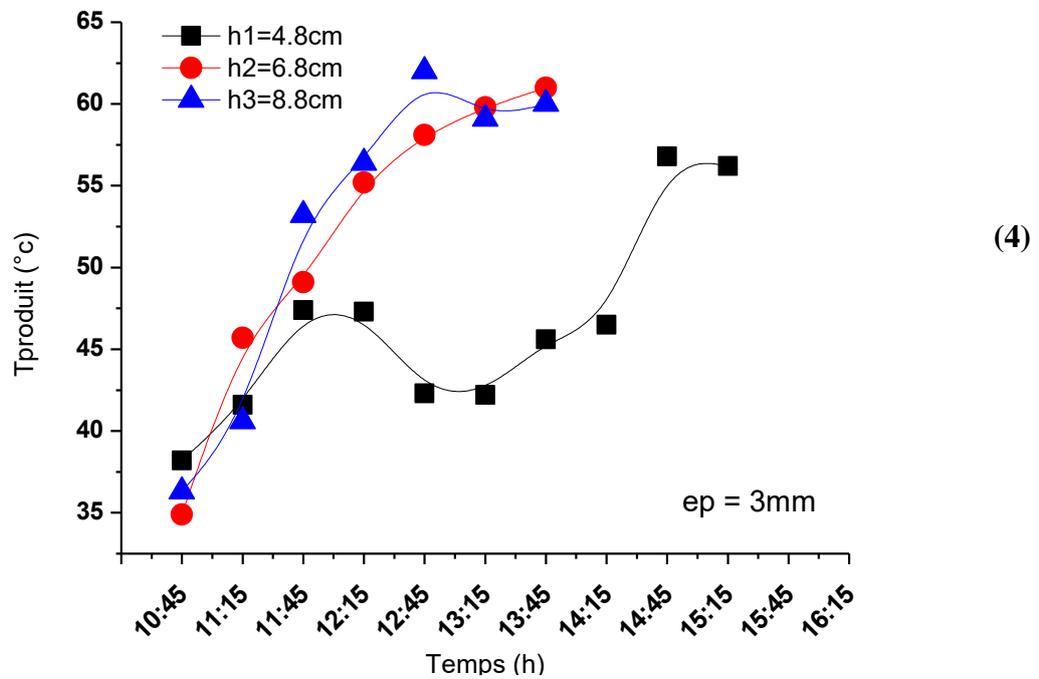
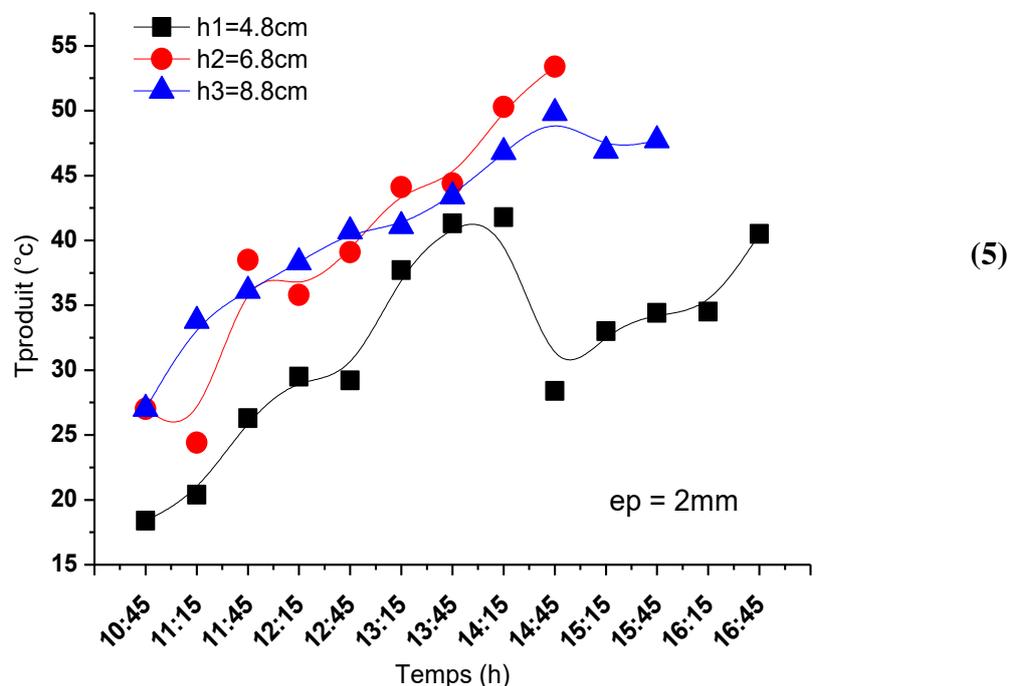


Figure (IV-6d): Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.

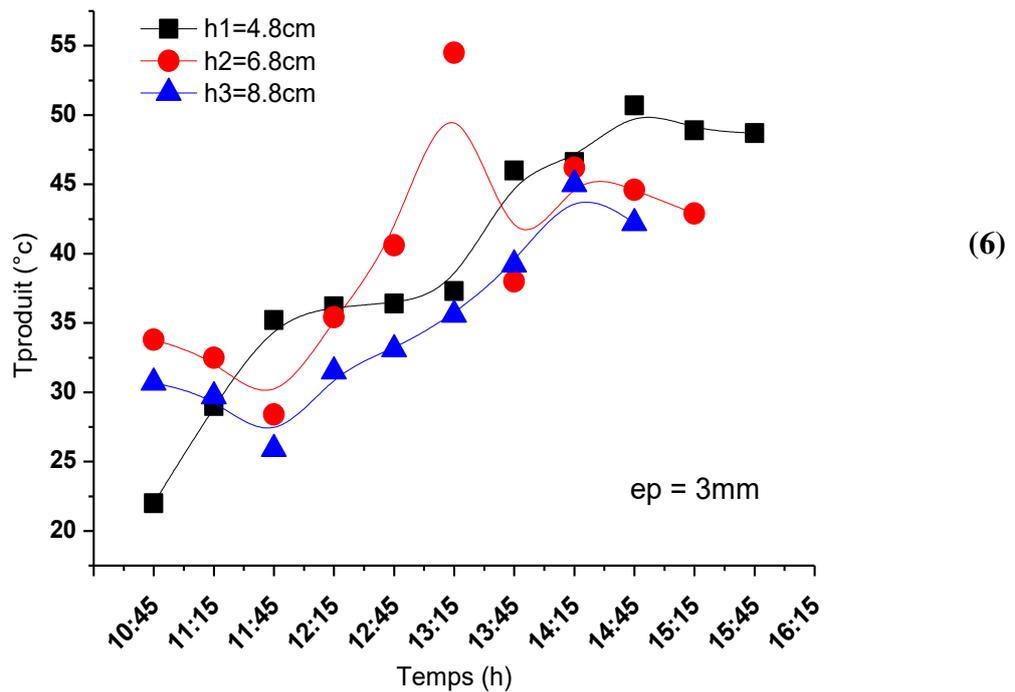
Pour les courbes qui traitent d'une épaisseur de 2 mm et d'un débit de 0.024 kg / s, une bonne différence de température du produit a été observée la plupart du temps dans le premier et le deuxième cas, et sa température maximale est de 53,7 et 58 ° C, respectivement. Le troisième cas, qui a une hauteur de 8,8 cm, a une bonne différence seulement au début, puis il a été réduit parce que la température dans la chambre de séchage était plus basse que les autres tentatives, voir la figure (IV-6c) (3).

Les courbes qui traitent de l'épaisseur de 3 mm et du débit de 0,024 kg / s, montrent une grande différence de température du produit dans les deuxième et troisième cas la plupart du temps, et la valeur de capacité maximale a été enregistrée à 61 et 62 °C respectivement. Pour le premier cas, qui a une hauteur de 8,8 cm, il avait une bonne différence seulement au début, puis il a été réduit parce que la température dans la salle de séchage était plus basse que les autres tentatives, voir la figure (IV-6d) (4).

- **Pour débit 03 = 0.0348 kg/s :**



**Figure (IV-6e):** Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.



**Figure (IV-6f):** Variation de la température du produit en fonction du temps pour différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.

Pour les courbes d'une épaisseur de 2 mm et d'un débit de 0,0348 kg / s, une concordance de température a été observée entre le deuxième cas d'une hauteur de 6,8 cm et le troisième d'une hauteur de 8,8 cm la plupart du temps et sa température maximale égale à 53,4 et 49,8 ° C respectivement tandis que le premier cas avec une hauteur de 4,8 cm, nous observons une différence significative, par ce que la température dans la chambre de séchage était plus basse que les autres tentatives, voir la figure (IV-6e) (5).

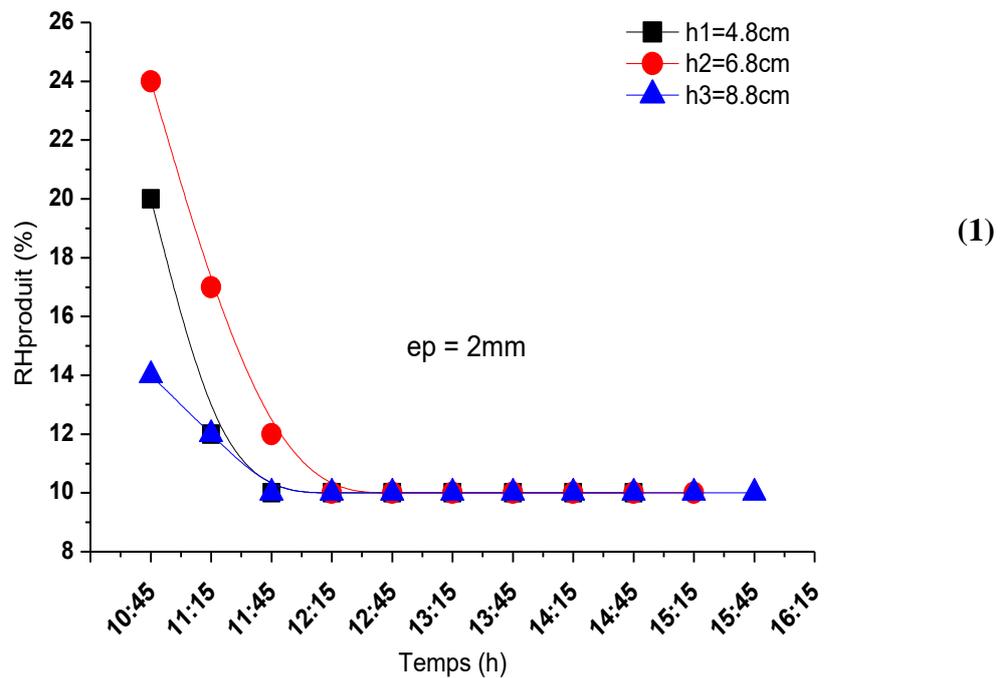
Concernant les courbes d'épaisseur 3 mm et de même débit, dans les premier et troisième cas la meilleure différence de température à tout moment et une grande différence entre elles et le deuxième cas, qui a atteint la valeur la plus élevée à 54,5 °C, voir la figure (IV-6f) (6) .

### 7. Changement d'humidité relative du produit:

Les figures (IV-7a), (IV-7b), (IV-7c), (IV-7d) , (IV-7e) et (IV-7f) illustrées ci-dessous montrent la variation de l'humidité relative du produit avec différents volumes, hauteurs et flux d'air à l'intérieur de la salle de séchage et pendant la période de séchage. On observe que

toutes les courbes décroissent dans le temps de la valeur d'humidité relative maximale à la plus basse, ce qui explique la forte teneur en humidité du produit humide au début du processus, qui perd progressivement son humidité jusqu'à ce qu'il sèche. On note également que ces courbes prennent une forme opposée à celle liée à la température du produit, voir Fig. (IV-6a), (IV-6b) et (IV-6c) sont augmentés comme nous l'avons dit précédemment, confirmant que l'élévation de température accompagne toujours une diminution de l'humidité.

- **Pour débit 01 = 0.011 kg/s :**



**Figure (IV-7a):** Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.

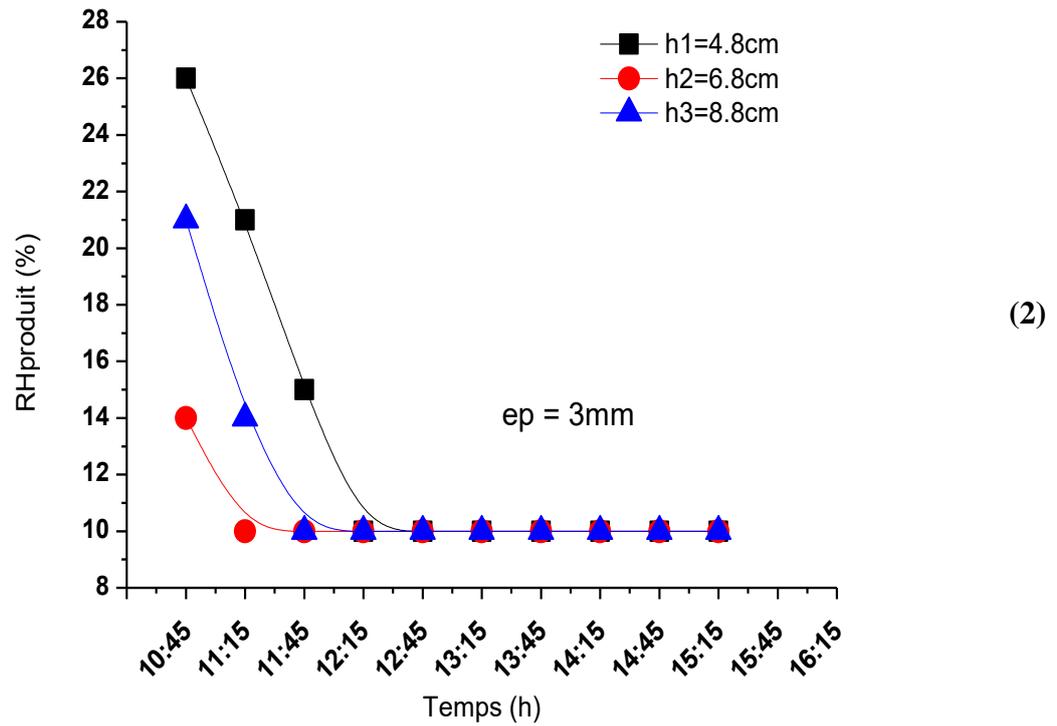


Figure (IV-7b): Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.

- Pour débit 02 = 0.024 kg/s :

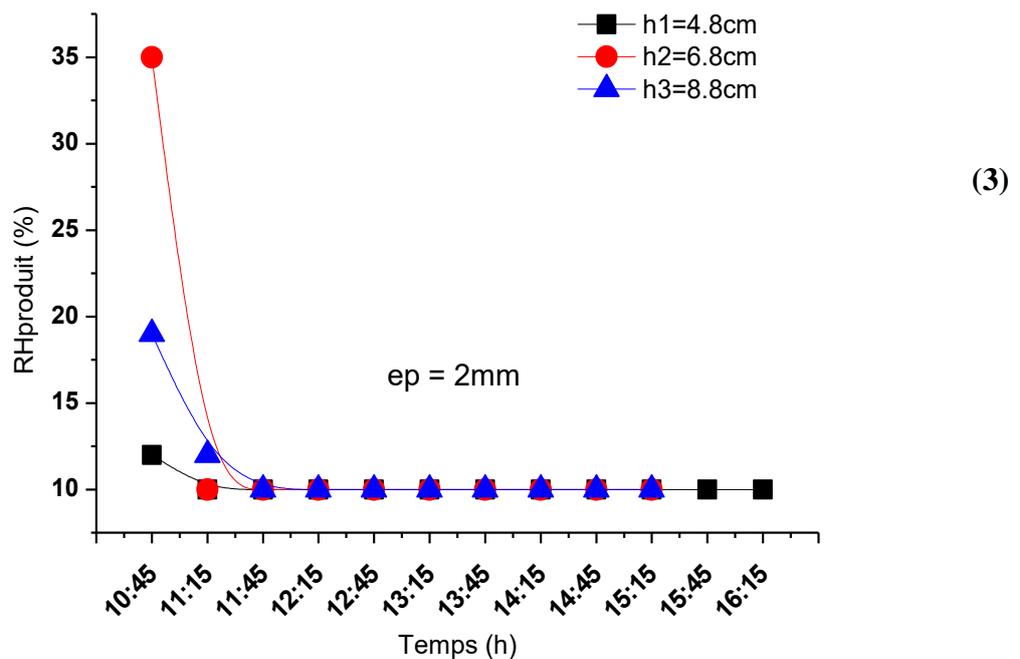
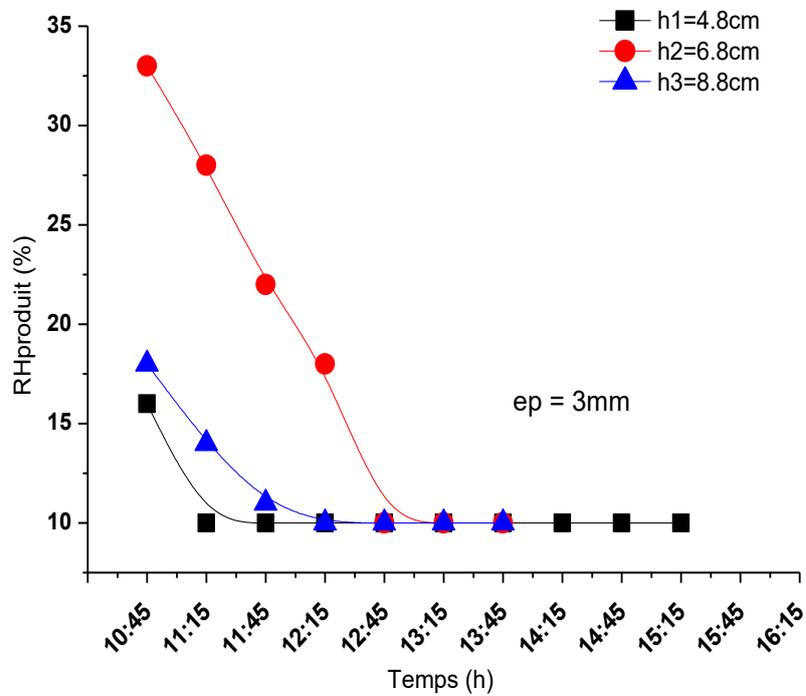


Figure (IV-7c): Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.



(4)

Figure (IV-7d): Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.

- Pour débit 03 = 0.0348 kg/s :

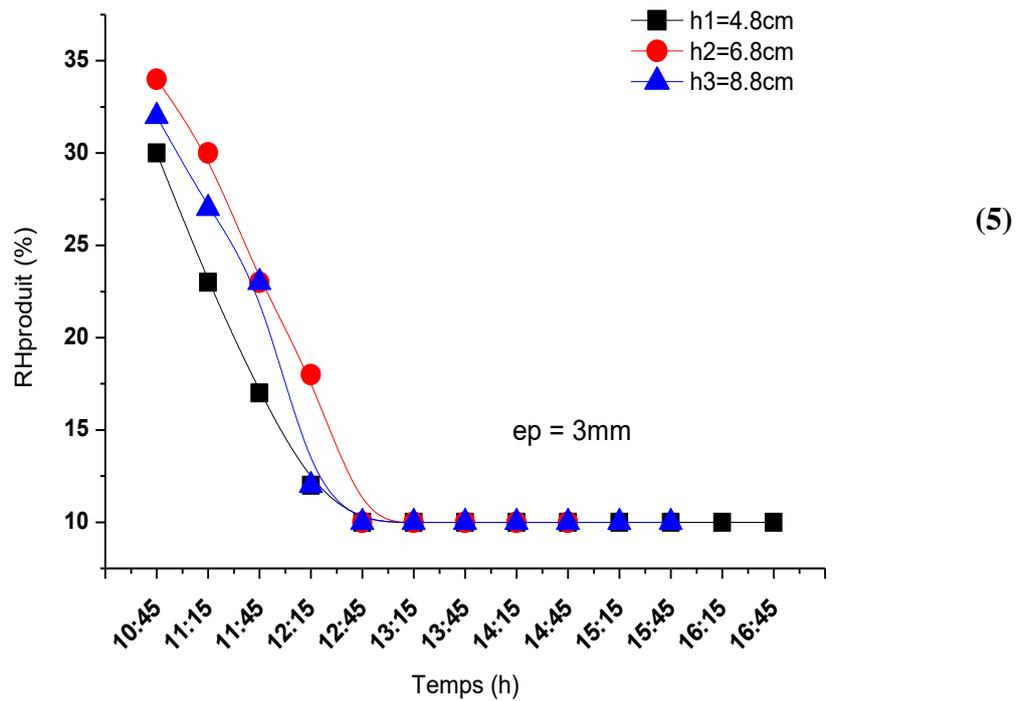


Figure (IV-7e): Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.

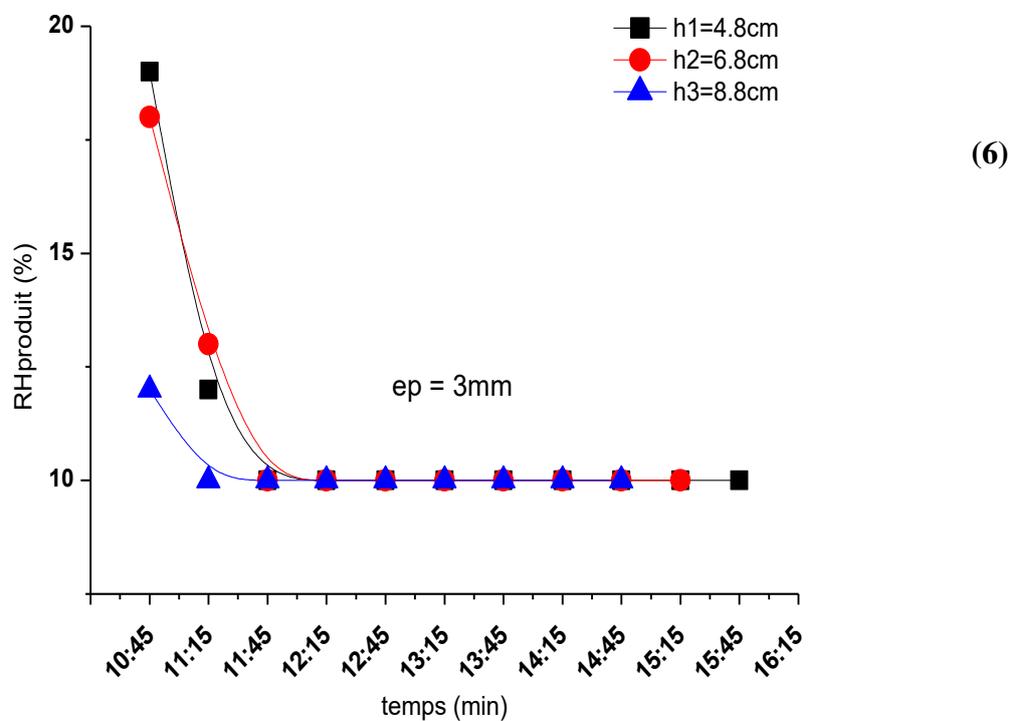
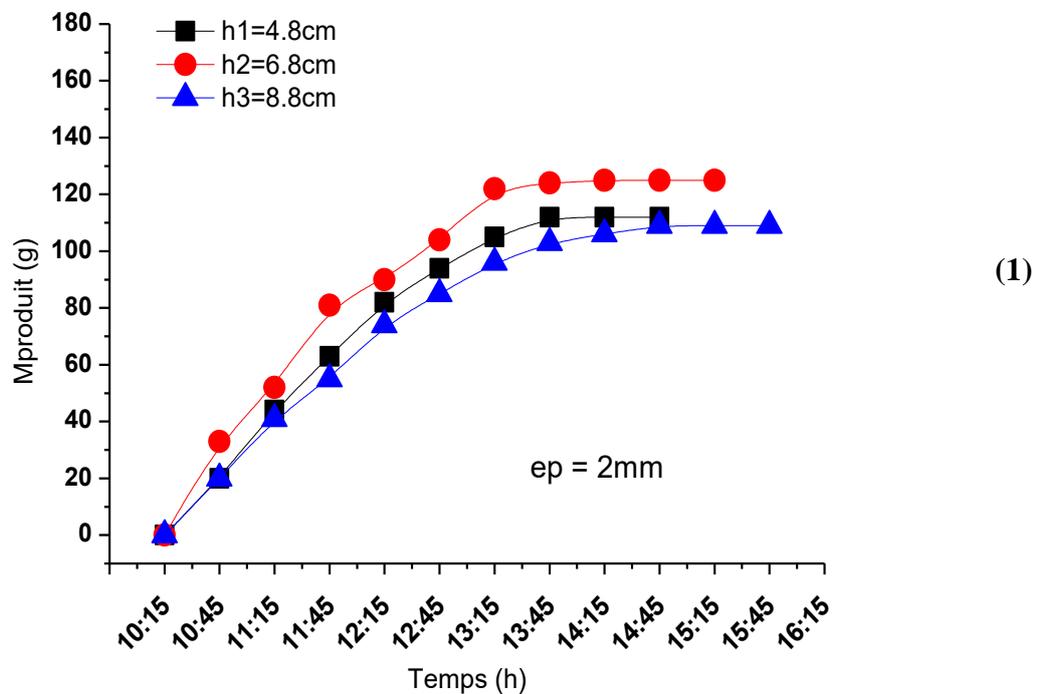


Figure (IV-7f): Le changement d'humidité relative du produit en fonction du temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.

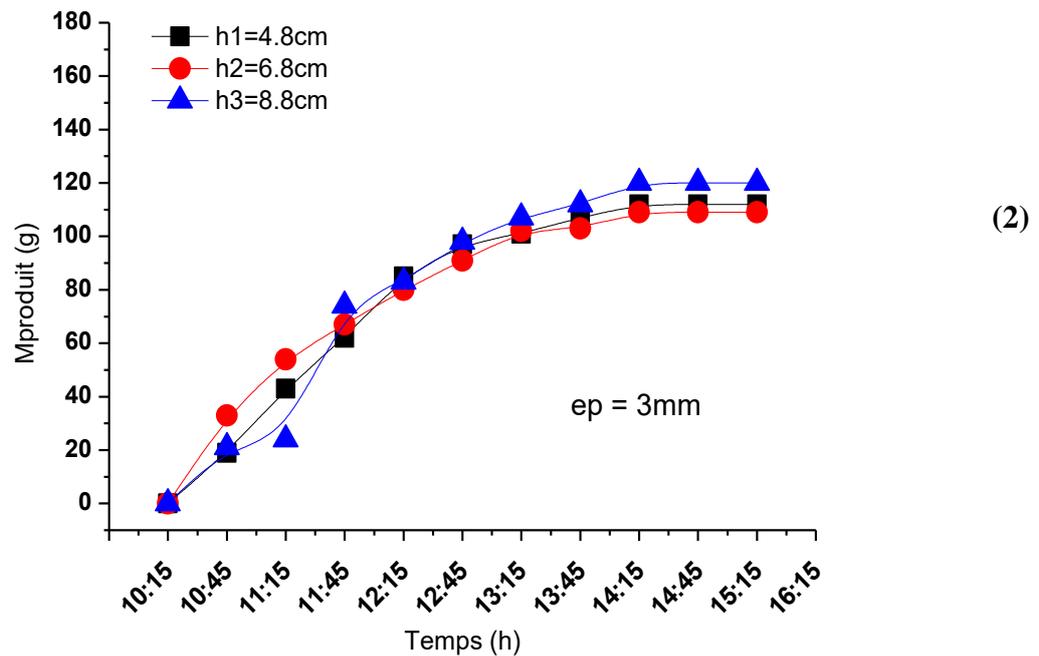
### 8. La variation de la perte de masse liquide au cours du temps de chaque produit:

Les figures (IV-8a), (IV-8b), (IV-8c), (IV-8d), (IV-8e) et (IV-8f) ci-dessous montrent les courbes de variation de la perte de masse liquide du produit humide pendant le temps de séchage jusqu'à la fin, car le produit perd l'eau en raison de l'évaporation due à l'air chaud circulant dans la chambre de séchage. Ces courbes diminuent avec le temps, ce qui signifie que la masse de fluide perdue augmente à chaque fois, puis elle s'arrête et cela indique la fin du processus de séchage, et nous avons remarqué les résultats suivants:

- **Pour débit 01 = 0.011 kg/s :**



**Figure (IV-8a):** Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0,01 kg/s.



**Figure (IV-8b):** Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0,01 kg/s.

Pour les échantillons d'une épaisseur de 2 mm et d'un débit de 0,011 kg / s, il a été observé qu'une expérience avec une hauteur de 6,8 cm est préférable principalement en perdant de la masse, tandis que d'autres expériences étaient proches, à cause de la différence de température de la chambre de séchage et de la hauteur du grille de l'entrée la chambre séchage, et la valeur la plus élevée enregistrée était la perte de 125 g de masse liquide par rapport à la masse totale de 146 g, (voir la figure (IV-8a).(1)) ,Par rapport à l'échantillon d'une épaisseur de 3 mm, nous avons constaté que toutes les expériences acceptaient de perdre la masse liquide avec une légère supériorité par rapport à l'expérience liée à une hauteur de 8,8 cm et enregistreraient une valeur de perte maximale de 120 grammes. La masse liquide de la masse totale est de 129 g, tandis que la différence d'épaisseur était la cause de l'augmentation de la perte de masse liquide, (voir la figure (IV-8b). (2)).

- Pour débit 02 = 0.024 kg/s :

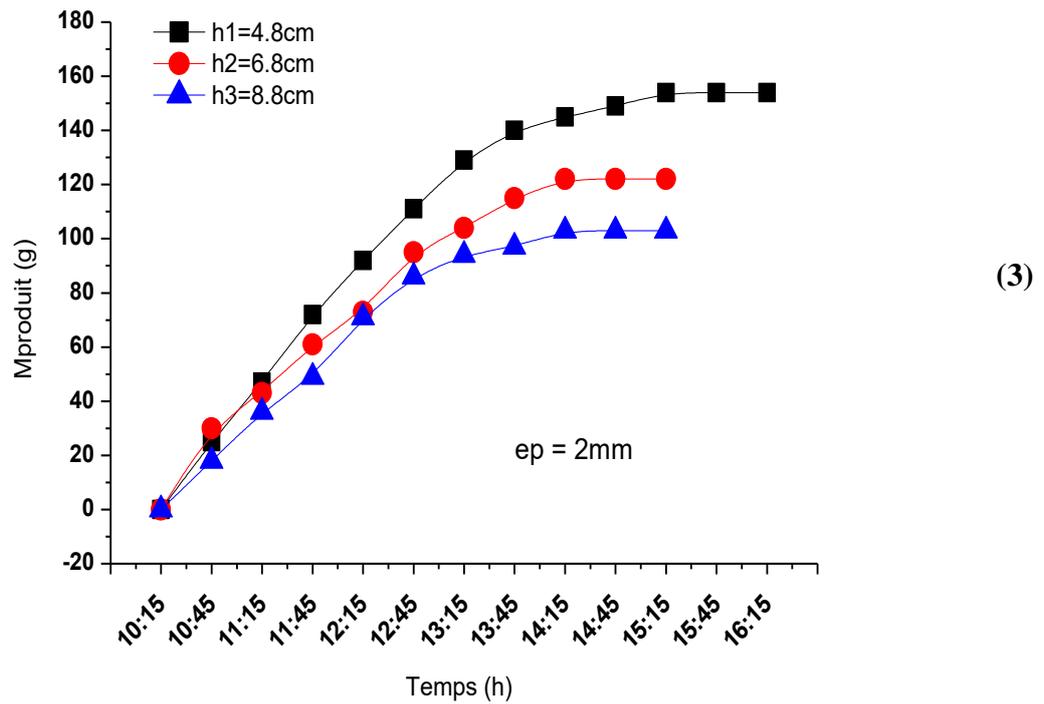


Figure (IV-8c): Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.024 kg/s.

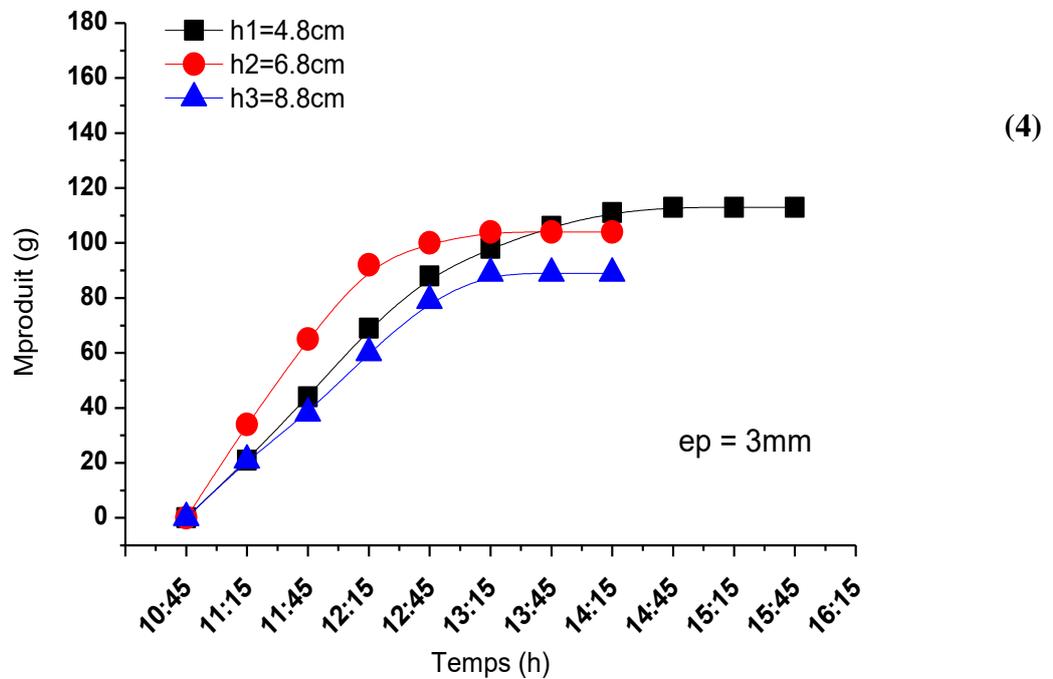
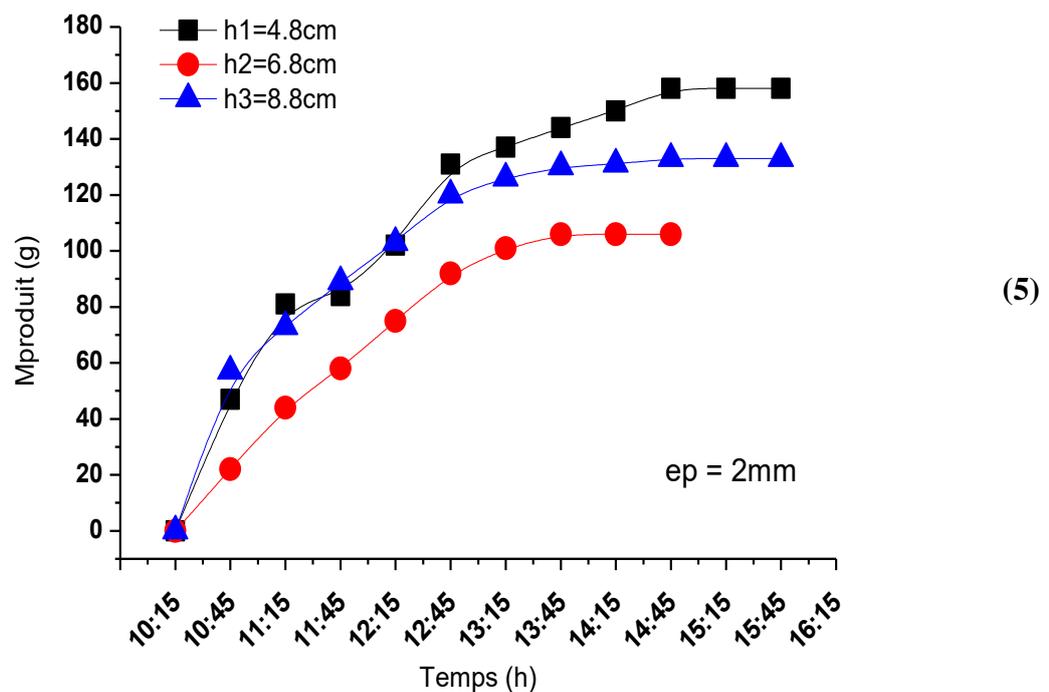


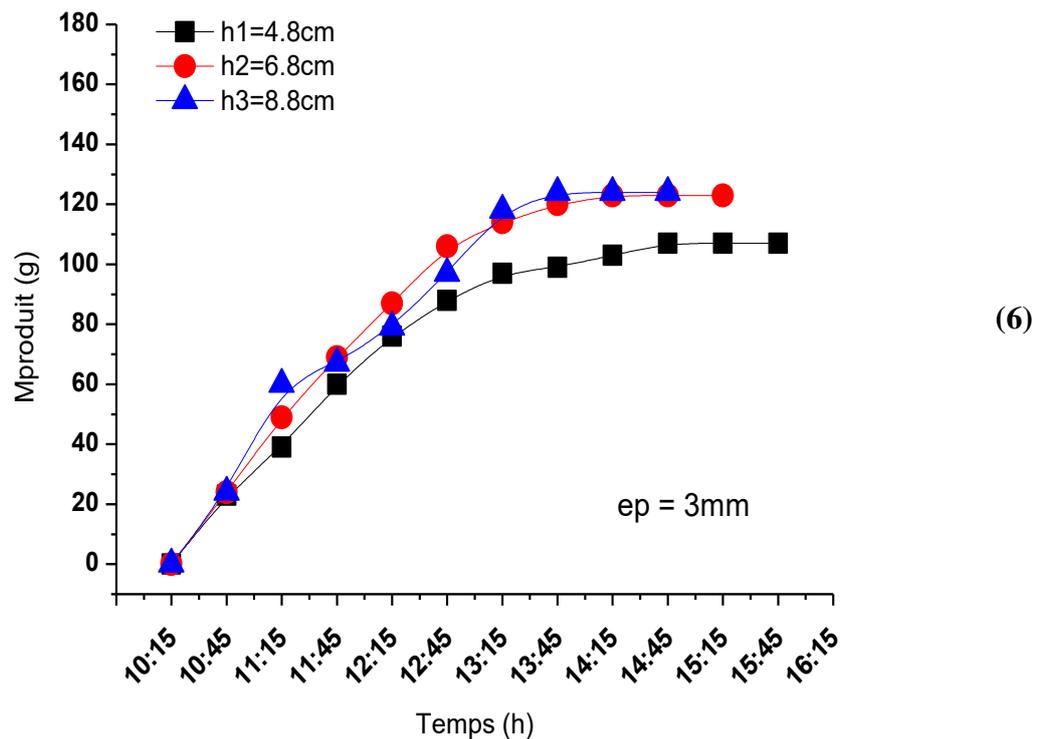
Figure (IV-8d): Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.024 kg/s.

Pour les échantillons d'une épaisseur de 2 mm et d'un débit de 0,024 kg / s, il a été noté qu'une expérience d'une hauteur de 4,8 cm enregistrait la meilleure perte de masse de 154 g, alors que d'autres expériences étaient proches, à cause de la différence de température de la chambre de séchage et de la hauteur d'un réseau de A l'entrée de la salle de séchage où plus le résultat était proche, meilleur, (voir la figure (IV-8c).(3)), par rapport à l'échantillon d'une épaisseur de 3 mm, nous avons constaté que toutes les expériences sont acceptables pour la perte de masse liquide et une légère supériorité a été observée pour l'expérience liée à une hauteur de 8,8 cm par rapport aux autres expériences et la valeur de perte maximale a été enregistrée 113 g. La masse liquide de la masse totale est de 134 g, (voir la figure (IV-8d). (4)).

- **Pour débit 03 = 0.0348 kg/s :**



**Figure (IV-8e):** Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 2 mm, débit = 0.0348 kg/s.

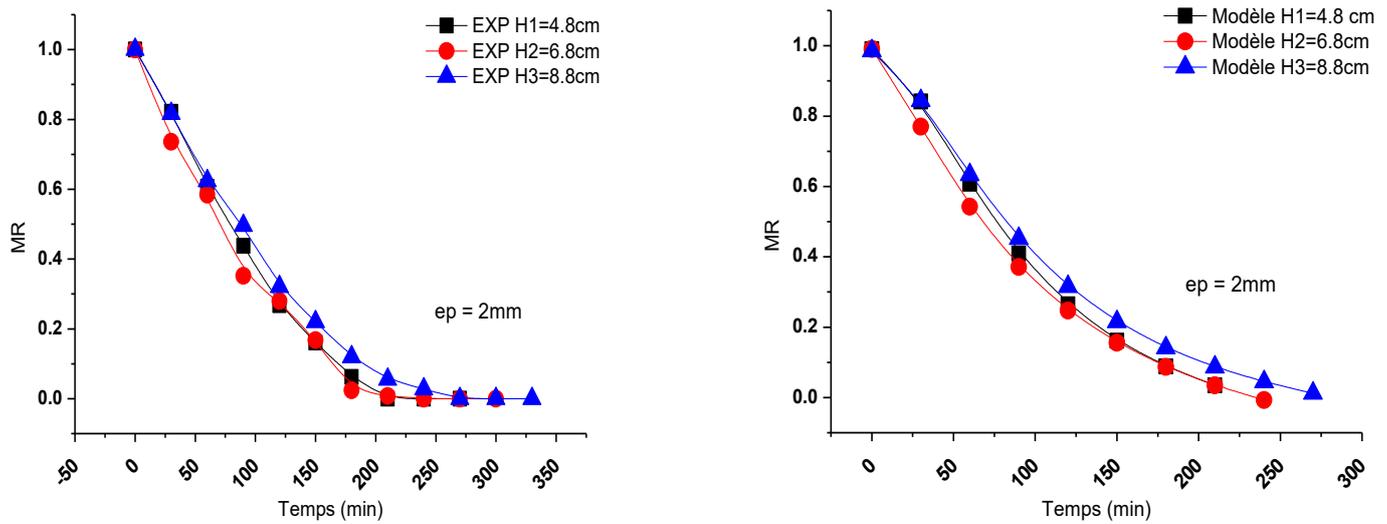


**Figure (IV-8f):** Variation de la perte de masse liquide pendant le temps de séchage des pommes de terre, épaisseur = 3 mm, débit = 0.0348 kg/s.

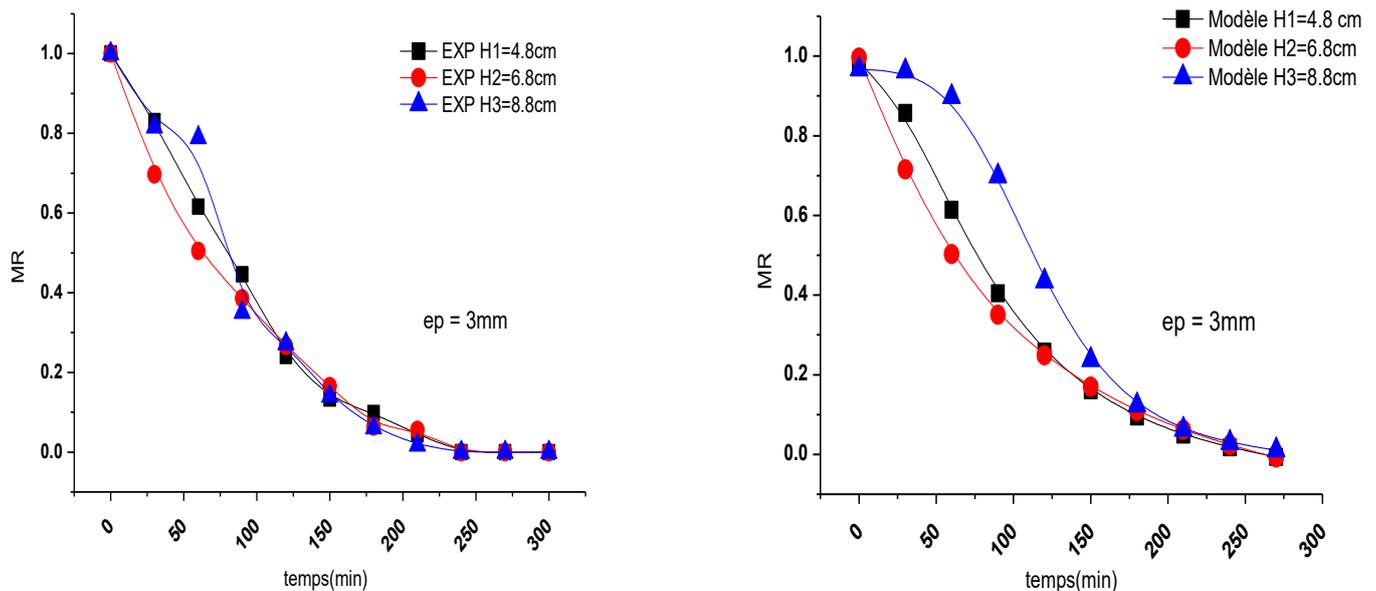
Pour les échantillons **d'une épaisseur de 2 mm et d'un débit de 0,0348 kg / s**, il a été noté qu'une expérience était la meilleure réalisée en matière de perte de masse liquide parce que on enregistré une valeur maximale de 158 g de perte de masse totale de 172 g à une hauteur de 4,8 cm, Alors que les autres expériences étaient moins nombreuses, en raison de la différence de température dans la salle de séchage et de la hauteur du grille de l'entrée de la salle de séchage où plus la hauteur est proche, c'est mieux (voir la figure (IV-8e).(5)) , par ex, par rapport à l'échantillon **d'une épaisseur de 3 mm**, nous avons constaté que l'expérience avec une hauteur de 4,8 est beaucoup moins que les autres expériences lorsque la valeur de perte la plus faible était estimée à 107 g, la masse massique totale était de 125 g. La raison en est la différence de température de la salle de séchage due à la différence de proportion de rayonnement solaire et également à la différence d'épaisseur du produit, (voir la figure (IV-8f).(6)).

#### 9. Détermination du taux d'humidité réduit MR:

- **Pour débit 01 = 0.011 kg/s :**



**Figure (IV-9a):** Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur, débit = 0,01 kg/s.



**Figure (IV-9b):** Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur, débit = 0,01 kg/s.

Les figures (IV-9a) et (IV-9b) montre les changements dans les valeurs de teneur en humidité expérimentale et attendue avec le temps de séchage, qui montre la valeur de la teneur en humidité prédite par le modèle extrait. Les résultats expérimentaux et notre modèle abstrait pour le séchage solaire de bandes de pommes de terre de 2 et 3 mm d'épaisseur ont été comparés, respectivement. On voit que le modèle extrait de séchage solaire était plus cohérent

avec les résultats expérimentaux dans les courbes de 2 mm d'épaisseur, alors qu'ils étaient compatibles avec toutes les courbes de l'épaisseur de 3 mm à l'exception de la courbe de hauteur H3 = 8,8. C'était différent, mais c'était en accord avec elle en fin de séchage. On peut donc dire que le modèle abstrait de séchage solaire est approprié pour expliquer le comportement de séchage des tranches de pomme de terre.

• Pour débit 02 = 0.024 kg/s :

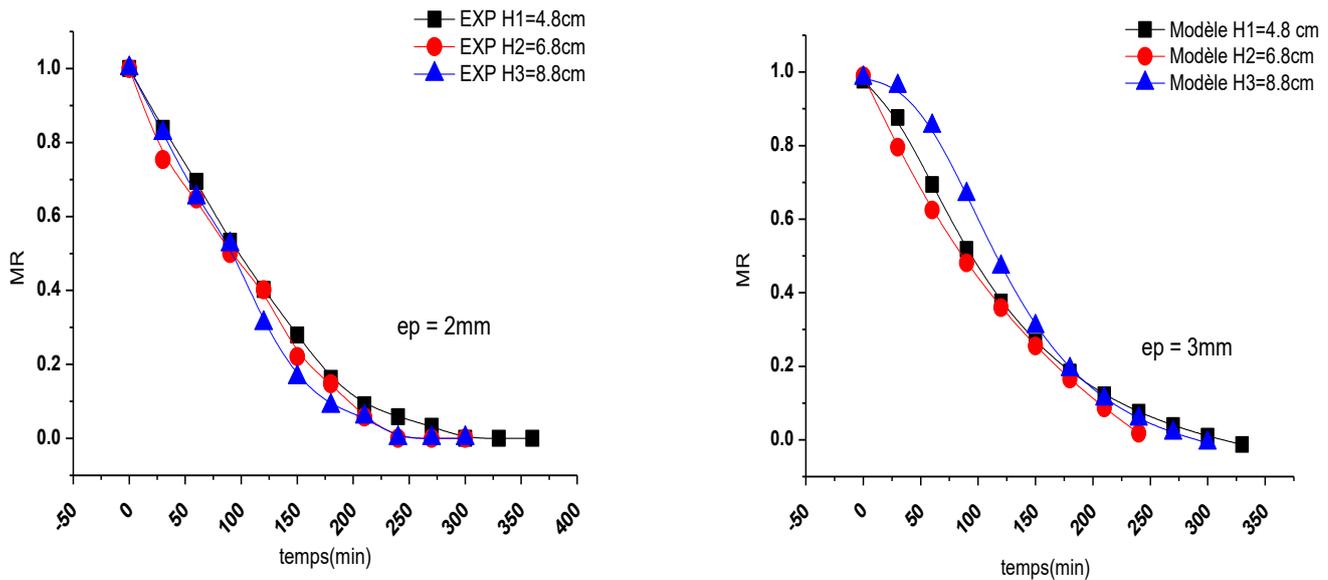
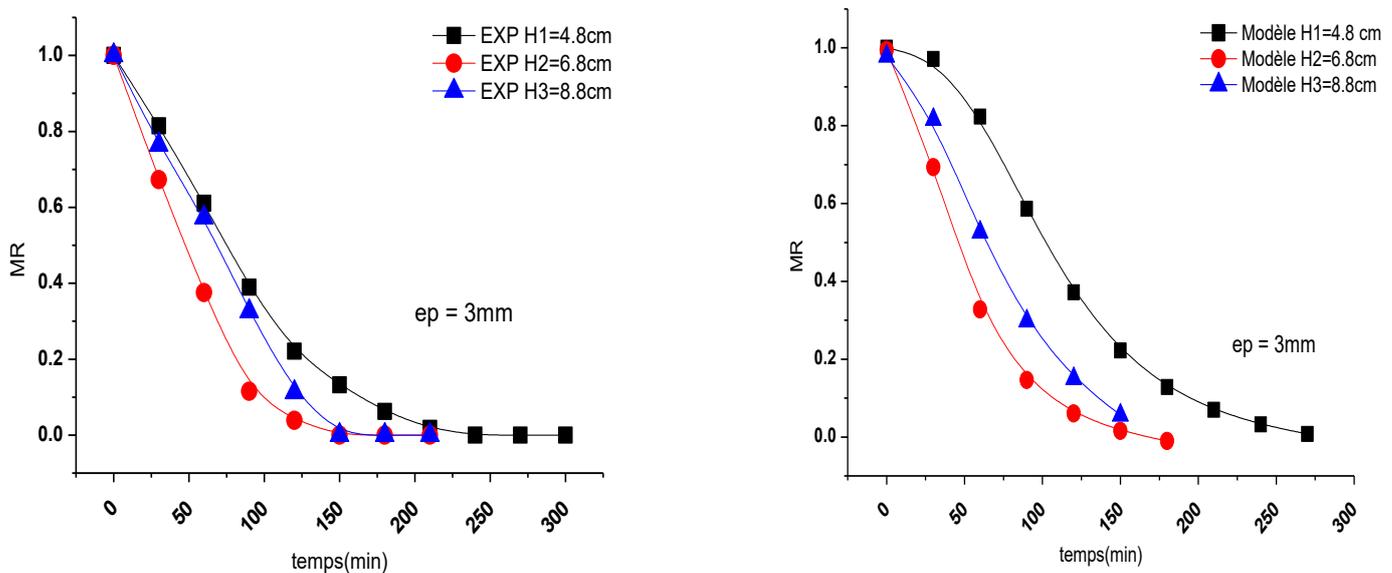


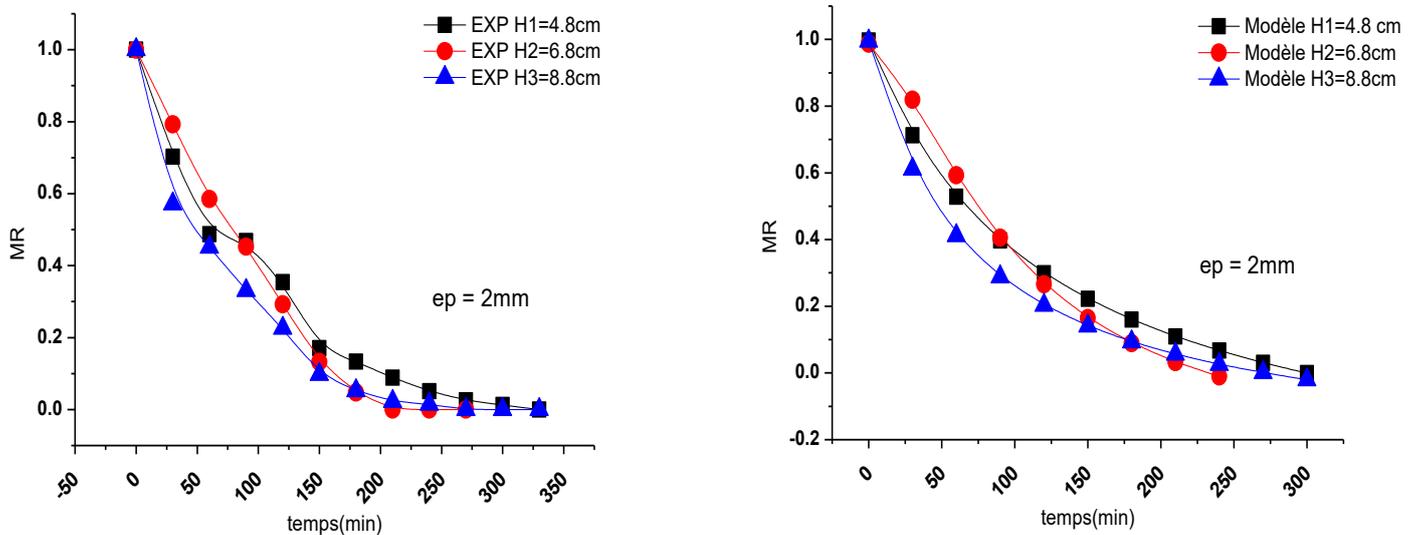
Figure (IV-9c): Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur, débit = 0.024 kg/s.



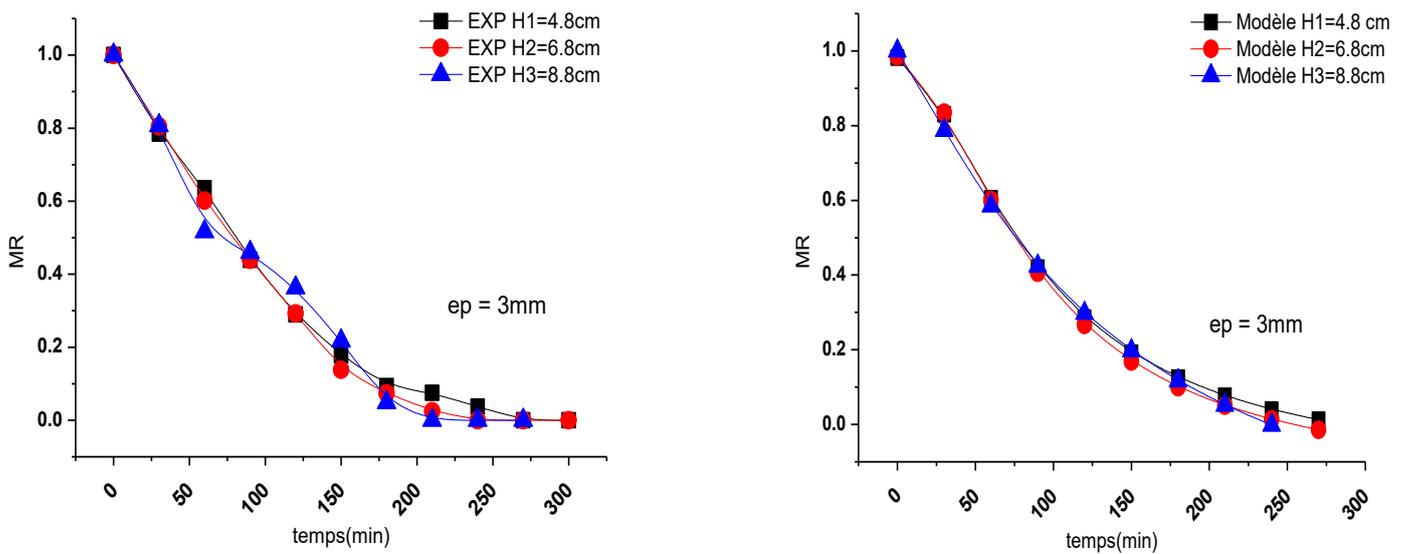
**Figure (IV-9d):** Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur, débit = 0.024 kg/s.

Sur les figures (IV-9c) et (IV-9d), nous avons présenté les courbes MR de la diminution d'humidité en fonction du temps, déterminées par le modèle extrait et celles obtenues expérimentalement, les résultats expérimentaux et notre modèle abstrait pour le séchage solaire de tranches de pomme de terre de 2 et 3 mm d'épaisseur, respectivement, ont été comparés en fonction de la différence de hauteur de grille. Depuis l'entrée de la salle de séchage, le débit d'air est estimé à 0,024 kg / s. En comparaison, on constate que les résultats expérimentaux ont été proches du modèle extrait pendant la plupart des temps de séchage par rapport aux courbes de 2 mm d'épaisseur. S'il était également compatible avec toutes les courbes de 3 mm d'épaisseur, à l'exception de la courbe de hauteur H1 = 4,8, il était différent, ce qui confirme que le modèle extrait peut être la meilleure description du comportement au séchage.

• Pour débit 03 = 0.0348 kg/s :



**Figure (IV-9e):** Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur, débit = 0.0348 kg/s.



**Figure (IV-9f):** Le rapport d'humidité en fonction du temps de séchage pour différents modèles de tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur, débit = 0.0348 kg/s.

Les figures (IV-9e) et (IV-9f) montrent les changements des valeurs de teneur en humidité expérimentales et attendues avec le temps de séchage, illustrant la valeur de la teneur en humidité prédite par le modèle extrait. Les résultats expérimentaux et notre modèle abstrait de séchage solaire de tranches de pommes de terre de 2 et 3 mm d'épaisseur, respectivement, ont été comparés, car nous voyons que le modèle extrait du séchage solaire était plus cohérent avec les résultats expérimentaux dans toutes les courbes, nous pouvons dire que le modèle abstrait de séchage solaire est approprié pour expliquer le comportement de séchage des pommes de terre.

**IV.10. Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons analysé et comparé un ensemble des courbes reflétant les facteurs les plus importants affectant le processus de séchage solaire, qui change progressivement au fil du temps. L'objectif principal de ce chapitre était d'étudier les divers changements qui se produisent dans les facteurs primaires du début du processus de séchage à sa fin et de fournir des explications appropriées. Il a été observé que ces facteurs s'influencent respectivement comme le rayonnement solaire qui affecte directement la température moyenne de la plaque absorbante. Quant à la température de l'air chaud à l'entrée de la salle de séchage, c'était la première raison affectant la température de la salle de séchage, le produit séché et l'humidité relative. En revanche, nous avons constaté que le modèle extrait qui détermine la faible teneur en humidité était le meilleur pour décrire le comportement au séchage des produits utilisés.

# Conclusion générale

# « Conclusion générale »

Le séchage est l'un des processus de base qui augmente efficacement la durée de conservation des produits de l'industrie alimentaire, et c'est un processus énergivore. Ceci présente l'utilisation des séchoirs solaires, qui ont connu un développement remarquable ces dernières années.

Dans ce travail, nous sommes intéressés à suivre le développement de certaines normes de performance pour le séchage solaire indirect par convection forcée d'air chaud, qui a été conçu et construit à l'avance avec des matériaux locaux, car cette étude traite du séchage de la couche mince de pommes de terre dans différentes conditions (différence d'épaisseur, débit d'air et distance de la grille de l'entrée de la salle de séchage). Constituée d'études expérimentales et théoriques, cette étude a été menée avec l'objectif principal d'améliorer les performances de séchage par l'expérimentation et la simulation (la simulation numérique a été réalisée par origine 8).

Les données expérimentales ont été adaptées au modèle mathématique de l'humidité et comparées au modèle extrait.

La partie expérimentale dépend du séchage par énergie solaire thermique indirecte d'un produit de denrées agricoles (pommes de terre), dont le but est de suivre pendant la journée au cours du processus, et des courbes de variation de vitesse de séchage, de température et de changement de teneur en eau de ces produits.

Des tests fréquents montrent que la vitesse de séchage est fortement influencée par l'épaisseur de l'échantillon, le débit d'air et la différence de disposition du produit par rapport à l'entrée de la chambre de séchage du produit. Les échantillons de pommes de terre d'une épaisseur de 2 mm, d'un débit de 0,011 kg /s et d'une hauteur de 4,8 cm ont été plus rapides à sécher.

La faible épaisseur facilite le transfert de l'air chaud à travers les échantillons, ce qui donne au produit la capacité d'absorber rapidement une grande quantité de chaleur, ce qui conduit à une augmentation de sa température et améliore ainsi l'évaporation de l'eau présente sous forme d'humidité, d'autre part, le phénomène de propagation de l'eau restreinte due au transfert de chaleur et de masse, qui Il se manifeste par la vitesse de séchage rapide et par conséquent atteindre une faible teneur en eau en très peu de temps. Par contre, dans les bandes

épaisses (3 mm), l'air chaud traverse à peine les échantillons et réduit le gradient d'humidité et la diffusion d'humidité d'autant plus qu'il s'agit de convection forcée pour faire passer l'air Chaud à travers la salle de séchage.

La différence de disposition du produit par rapport à l'entrée de la salle de séchage: lorsque le produit est trop loin de l'entrée de la chambre, l'air chaud perdra une quantité de chaleur absorbée par les composants à l'intérieur de la chambre, sinon lorsque le produit à sécher est placé loin de la trappe de soufflage d'air chaud, la température du produit diminuera en conséquence pour un faible transfert de chaleur qui, dans ce cas, entraîne un faible transfert de masse et donc une faible vitesse de séchage.

L'utilisation de différents débits d'air chaud: pour s'assurer que ce paramètre est modifié au moyen d'un variateur de vitesse, et pour la modification du transfert de chaleur permettant d'abaisser ou d'augmenter la température de l'air chaud pour provoquer une modification de la transmission de masse, et une modification de l'humidité de l'air sec. Cependant, dans les capteurs solaires à air plat, lorsque le débit d'air augmente jusqu'à un certain niveau, la température de l'air à la sortie du capteur associée à l'entrée de la chambre de séchage diminuera ce qui se traduira par une moindre énergie transférée par le fluide caloporteur, ce qui nous donne un faible transfert de chaleur et de masse et donc une vitesse Séchage faible.

De plus, l'influence de l'intensité du rayonnement solaire est le facteur principal pour accomplir le processus de séchage dans le but de chauffer la plaque absorbante; Les tests ont donnés de bons résultats pour le rayonnement solaire et l'absorption de température moyenne avec des valeurs maximales de  $1063 \text{ W / m}^2$  et  $101,2 \text{ }^\circ \text{C}$ , respectivement.

Quant à la température du produit, elle est directement affectée par la température à l'entrée et à l'intérieur de la salle de séchage, qui travaille à se débarrasser de l'humidité par évaporation, ce qui explique l'accompagnement de "haute température avec faible humidité relative".

De plus, l'humidité relative du produit à sécher est élevée au début des expériences en raison de la forte teneur en humidité des échantillons de produit séché, puis diminue progressivement avec le temps jusqu'à la fin du test.

Enfin, un modèle mathématique a été utilisé pour déterminer la teneur en humidité réduite, le modèle a été validé à l'aide de plusieurs données expérimentales extraites de la littérature, et le modèle proposé a montré qu'il était le mieux adapté aux données

expérimentales avec les valeurs moyennes les plus élevées pour  $R^2$  et Les valeurs moyennes les plus basses pour  $\chi^2$  et RMSE .Les résultats ont montré que le modèle proposé dans le présent travail est le meilleur. Le présent modèle peut être utile pour l'industrie alimentaire pour analyser la cinétique de séchage des pommes de terre afin que la qualité de ces produits puisse être préservée.

## الملخص:

هدفت دراستنا التجريبية إلى دراسة سلوك التجفيف الشمسي لمنتج غذائي في الحمل الحراري القسري باستخدام مجفف شمسي غير مباشر ، تم تصميمه وصنعه مسبقًا بمواد محلية. تبحث هذه الدراسة في تجفيف الطبقة الرقيقة للبطاطس، والتي تم تقطيعها إلى شرائح دائرية حيث كنا مهتمين بتأثير المعلمات الأربعة (الترتيب ، وسمك قطع المنتج ، والتغير في تدفق الهواء) على سرعة التجفيف. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة نمذجة رياضية لمستوى الرطوبة كما تعتمد النمذجة الرياضية على تطبيق النموذج الملائم للنتائج التجريبية باستخدام تحليل الانحدار غير الخطي عن طريق برنامج 8 origin. تم أخيرًا اختيار النموذج على أساس  $\chi^2$  و **Chi-square** و **RMSE** و **R**. بينت النتائج أن حركيات التجفيف تعتمد على سمك وترتيب العينات و التغير في تدفق الهواء. وأن النموذج المستخلص تم اختياره كأفضل نموذج لوصف سلوك التجفيف.

## Résumé :

Notre étude expérimentale visait à étudier le comportement au séchage solaire d'un produit alimentaire en convection forcée à l'aide d'un séchoir solaire indirect, conçu et construit auparavant avec des matériaux locaux. Cette étude porte sur le séchage en couche mince de pommes de terre, coupées en tranches circulaires, nous sommes intéressés à l'effet des quatre facteurs (disposition, épaisseur du produit et changement de débit d'air) sur la vitesse de séchage. L'objectif principal de ce travail est d'étudier la modélisation mathématique du taux d'humidité. La modélisation mathématique dépend de l'application du modèle approprié aux résultats expérimentaux en utilisant l'analyse de régression non linéaire en utilisant le programme d'origine 8. Le modèle a finalement été choisi sur la base du **chi carré**( $\chi^2$ ), **RMSE** et **R<sup>2</sup>**. Les résultats ont montré que la cinétique de séchage dépend de l'épaisseur et de la disposition des échantillons et du changement de débit d'air. Et que le modèle extrait a été choisi comme le meilleur modèle pour décrire ce comportement de séchage.

## Abstract :

Our experimental study aimed to study the solar drying behavior of a food product in forced convection using an indirect solar dryer, previously designed and built with local materials. This study concerns the thin layer drying of potatoes, cut into circular slices, we are interested in the effect of the four factors (arrangement, thickness of the product and change of air flow) on the drying speed. The main objective of this work is to study the mathematical modeling of humidity levels. The mathematical modeling depends on applying the appropriate model to the experimental results using nonlinear regression analysis using the original program 8. The model was eventually chosen based on chi-square ( $\chi^2$ ), RMSE and R<sup>2</sup>. The results showed that the drying kinetics depend on the thickness and arrangement of the

samples and the change in air flow. And that the extracted model was chosen as the best model to describe this drying behavior.