



Université Kasdi Merbah Ouargla

N° d'ordre :
N° de série :

**FACULTE DES SCIENCES
ET SCIENCES DE L'INGENIEUR**

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire
Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Physique
Option : Physique Energétique

Présenté par :
Warda Belachi

Thème

**APPLICATION DU SECHAGE SOLAIRE POUR LA
CONSERVATION DES PRODUITS AGRO-
ALIMENTAIRES**

Soutenu publiquement le : 15 / 02 / 2009

Devant le jury composé de :

Mr. Fethi Khelfaoui	Professeur	Université de Ouargla	Président
Mr. Hocine Benmoussa	Professeur	Université de Batna	Examinateur
Mr. Mostefa Zeroual	Maitre de Conférences	Université de Batna	Examinateur
Mr. Bachir Bouchekima	Professeur	Université de Ouargla	Rapporteur
Mr. Slimane Boughali	M.A. chargé de cours	Université de Ouargla	Co-rapporteur
Mr Djamel Mennouche	Maitre Assistant	Université de Ouargla	Membre Invité

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné pour terminer mon travail de recherche.

Je voudrais remercier mon encadreur le Professeur **Bachir Bouchekima**, pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de ce mémoire, pour ses conseils précieux, pour sa disponibilité et la compétence de son encadrement.

Je remercie également mon co-encadreur Monsieur **Slimane Boughali**, Maitre assistant Chargé de cours à l'université de Ouargla, pour son aide, pour ses conseils et pour sa disponibilité tout au long de cette étude.

Je voudrais aussi remercier tous les membres de jury : Professeur **Fethi Khelfaoui**, président du jury, Professeur **Hocine Benmoussa** et **Dr Mostefa Zeroual**, Maitre de conférences, tous deux membres examinateurs de l'université de Batna, avec ma profonde gratitude de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour avoir accepté de le juger .

Mes remerciements s'adressent aussi au Monsieur **Mennouche Djamel** Maitre assistant à l'université de Ouargla pour sa disponibilité durant mon travail expérimental, à Monsieur **Houti Ahmed**, le technicien du laboratoire de physique, à Monsieur **Bechki Djamel**, Maitre assistant chargé de cours à l'université de Ouargla pour leurs conseils ainsi que leurs encouragements, à mes amis **Roukia** et **Nadia** pour leurs disponibilités au laboratoire LENREZA.

Enfin je remercie vivement tous les membres de ma famille avec l'expression sincère de mes sentiments pour leur soutien et leurs encouragements permanents.

A tous les esprits ouverts qui ont contribué, de loin ou de prés, à la réalisation de ce modeste travail.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	I
NOMENCLATURE	VI
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ETUDE THEORIQUE DU SECHAGE	
1. NOTIONS GENERALES SUR LE SECHAGE	4
1.1. Définition	4
1.2. Caractéristiques de l'air de séchage	4
1.2.1. Humidité absolue	4
1.2.2. Humidité relative	4
1.2.3. Degré de saturation	4
1.2.4. Températures caractéristiques de l'air humide	5
1.2.4.1. Température de bulbe sec	5
1.2.4.2. Température humide	5
1.2.4.3. Température de rosée	5
1.2.4.4. Température de saturation adiabatique	5
1.3. Caractérisation des solides humides	5
1.3.1. Description du solide humide	5
1.3.2. Humidité absolue	6

1.3.3. Humidité relative	6
1.3.4. Hygroscopicité	7
1.4. Séchage des produits agricoles	7
1.4.1. Modes de séchage	7
1.4.2. Séchage par convection (entraînement)	8
1.4.3. Activité de l'eau et isotherme de sorption	9
1.4.3.1. Activité de l'eau dans le produit	9
1.4.3.2. Isothermes de sorption	10
1.4.4. Vitesse de séchage	11
1.4.5. Cinétique de séchage	12
1.4.5.1. Périodes du séchage	12
1.4.6. Types de modifications de la qualité	14
1.4.6.1. Modification biochimique due à la température	14
1.4.6.2. Pertes d'arômes	15
1.4.6.3. Modifications physiques et mécaniques des produits séchés	15
2. TYPE DE SECHOIRS SOLAIRES	15
2.1. Les systèmes actifs (les séchoirs hybrides)	16
2.2. Les systèmes passifs	18
2.2.1. Les séchoirs solaires directs	18
2.2.2. Les séchoirs solaires indirects	20
2.2.3. Les séchoirs mixtes	22

3. TRANSFERT DE CHALEUR	23
3.1. Généralités	24
3.1.1. Bilan d'énergie	24
3.1.2. Stockage d'énergie	24
3.1.3. Génération d'énergie	25
3.1.4. Chaleur latente de changement d'état	25
3.2. Les trois modes de transfert de chaleur	25
3.2.1. Transfert par conduction	25
3.2.2. Transfert par convection	26
3.2.3. Transfert par rayonnement	31
3.3. Modélisation du transfert thermique	35
3.3.1. Transfert de chaleur et analogies électriques	35
3.3.1.1. Coefficient d'échange et résistances thermiques	36
3.3.1.2. Les expressions des conductances	37
3.3.1.3. L'analyse nodale	40
4. TRANSFERT DE MASSE	41
4.1. Loi de Fick	41
4.2. Loi de Darcy	41
CHAPITRE 2 : DESCRIPTION ET FORMULATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME	
1. Position du problème	42
2. Hypothèses simplificatrices	44

3. Mise en équations du système	45
4. Détermination des coefficients d'échange	46
4.1. Échange thermique	46
4.1.1. Par convection	46
4.1.2. Par conduction	48
4.1.3. Par rayonnement	48
4.2. Puissance échangée par changement de phase	49
4.3. Critère de choix du modèle approprié	50
5. Méthode numérique de résolution	51
5.1. Discrétisation des équations	52
5.2. Durées du processus	52
5.3. Résolution numérique	53
5.3.1. Choix et principe de la méthode	53
5.3.2. Organigramme	54
CHAPITRE 3 : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION	
1. Plan expérimental de l'étude du séchage	56
2. Matériel et mode opératoire	56
2.1. Description du système de séchage	56
2.2. Préparation du produit	58
2.3. Méthode de travail	58
2.4. Appareillage de mesures	58

2.4.1. Détermination de l'humidité initiale et la masse sèche des produits à sécher	58
2.4.2. Mesure du rayonnement	59
2.4.3. Mesure des températures	59
2.4.4. Mesures de l'humidité et de la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre	59
2.4.5. Mesures de la vitesse et de la température de l'air extérieur	59
3. Analyse des résultats expérimentaux et validation du modèle de simulation	60
3.1. Résultats expérimentaux	60
3.1.1. Séchage de la tomate	60
3.1.1.1. Cinétique du séchage de la tomate	61
3.1.1.2. Modélisation de la teneur en eau réduite et courbes caractéristiques de séchage de la tomate	70
3.1.2. Séchage de l'oignon	78
3.1.2.1. Cinétique du séchage de l'oignon	78
3.1.2.2. Modélisation de la teneur en eau réduite et courbes caractéristiques de séchage de l'oignon	82
3.2. Confrontation entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés	88
3.2.1. Pour l'oignon	89
3.2.2. Pour la tomate	97
CONCLUSION	107
ANNEXES	109
BIBLIOGRAPHIE	127

NOMENCLATURE

Symbols	Designations	Unites
a_w	Activité de l'eau	
C	Chaleur spécifique	J/kg .K
C_m	Fraction massique	
C_{pa}	Capacité calorifique massique de l'air	J/kg.K
C_{ppr}	Capacité calorifique massique du produit	J/kg.K
C_{ppi}	Capacité calorifique massique de la paroi interne	J/kg.K
C_{ppe}	Capacité calorifique massique de la paroi externe	J/kg.K
D_f	Coefficient de diffusion	m^2/s
$-dx/dt$	Vitesse de séchage du produit	kg eau / kg MS.min
$(-dx/dt)_I$	Vitesse de séchage de première phase	kg eau / kg MS.min
F	Facteur de forme	
G_{cd}	Conductance thermique conduction	W/K
G_{cv}	Conductance thermique convective	W/K
G_r	Conductance thermique radiative	W/K
G_m	Conductance du fluide	W/K
Ha	Humidité absolue de l'air	kg eau / kg as
Hr	Humidité relative de l'air	%

Has	Humidité absolue de saturation de l'air	kg eau / kg as
h_{cp}	Coefficient d'échange thermique par convection l'air-produit	$W/m^2.K$
h_{ci}	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et la face interne de la paroi de l'armoire de séchage	$W/m^2.K$
h_r	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face externe de la paroi de l'armoire de séchage et la voûte céleste	$W/m^2.K$
h_{ce}	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air ambiant et la face externe de la paroi de l'armoire de séchage	$W/m^2.K$
h_c	Coefficient de convection thermique	$W/m^2.K$
I	Intensité du courant	Ampère
J	Flux massique surfacique	$kg /m^2.s$
K	Constant de séchage	1/min
k_f	Perméabilité intrinsèque	m^2
Lv	Chaleur latente de vaporisation	J/kg
m_v	La masse de la vapeur d'eau	kg
m_{as}	La masse de l'air sec	kg
\dot{m}	Débit massique de l'air	kg /s
M_S	Masse sèche du produit	kg
M_h	Masse humide du produit	kg
M	Emittance	W/ m^2
m_{pr}	Masse du produit par claie (tranche)	kg

m_{pe}	Masse d'une section i de la paroi externe de l'armoire de séchage	kg
m_{pi}	Masse d'une section i de la paroi interne de l'armoire de séchage	kg
Nu	Nombre de Nusselt	
P_v	Pression de vapeur d'eau	pascal
P_s	Pression de saturation	pascal
P_{ev}	Puissance d'évaporation	W
Pr	Nombre de Prandtl	
R	Résistance électrique	Ohm
R_{cd}	Résistance thermique par conduction	K/W
R_{cv}	Résistance thermique convective	K/W
R_t	Résistance thermique	K/W
Re	Nombre de Reynolds	Re
S_{pr}	Surface d'échange par convection air-produit	m^2
T	Température	K
T_h	Température humide	K
T_r	Température de rosé	K
ν_f	Viscosité cinématique	kg/m.s
v_a	Vitesse de l'air	m /s
V	Potentiels	Volts
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / kg MS
X_r	Teneur en eau du produit à base humide	kg eau / kg Mh
X_0	Teneur en eau initial du produit à base sèche	kg eau / kg Ms

X_e	Teneur en eau d'équilibre du produit à base sèche	kg eau / kg Ms
λ_c	Conductivité thermique	W/m.K
λ	Longueur d'onde	m
λ_d	Coefficient d'échange thermique par conduction entre les parois de l'armoire de séchage	W/m ² .K
φ_{st}	Flux de chaleur stocké	W
φ_g	Flux de chaleur généré	W
φ_s	Flux de chaleur sortant	W
φ_e	Flux de chaleur entrant	W
φ_i	Flux direct incident	W
φ_r	Flux réfléchi	W
φ_a	Flux absorbant	W
φ_t	Flux transmis	W
μ_f	Viscosité dynamique	Pascal .s
ρ_f	Masse volumique	kg/m ³
ρ_r	Facteur de réflexion	
ε	Emissivité de la surface	
σ	Constant de Stefan	W/ m ² K ⁴
ΔSp	Elément de surface de l'armoire de séchage	m ²
Ψ	Degré de saturation	%
α_a	Facteur d'absorption	
τ_t	Facteur de transmission	

Indices

a	Air
ab	L'air ambiant
c	Ciel
pr	Produit
pi	Paroi intérieure
pe	Paroi extérieure
P	Paroi
Pp	L'isolant entre les parois
v	Vent extérieur

LISTE DES FIGURES

Figure (1.1) : Description du solide humide	6
Figure (1.2) : Principes du séchage à l'air chaud	9
Figure (1.3) : Définition de l'humidité relative d'équilibre ou activité de l'eau	10
Figure (1.4) : Relation entre activité de l'eau et teneur en eau d'un produit	11
Figure (1.5) : Allure de séchage en fonction du temps	13
Figure (1.6) : Séchoir solaire hybride	17
Figure (1.7) : Exemples de séchoirs solaires directs simples	19
Figure (1.8) : Séchoir solaire indirect	21
Figure (1.9) : Séchoir solaire mixte	22
Figure (1.10) : Différents flux de chaleur	24
Figure (1.11) : Définition du coefficient de convection	28
Figure (1.12) : Distribution d'énergie du rayonnement émis par le corps noir selon la loi de Planck	33
Figure (1.13) : Phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission	34
Figure (1.14) : Conduction thermique	38
Figure (1.15) : Rayonnement thermique	39
Figure (1.16) : Transfert de chaleur par circulation fluide	40
Figure (2.1) : Echange thermique dans une tranche de séchoir	43
Figure (2.2) : Schéma électrique relatif à une tranche de séchoir	44
Figure (3.1) : Schéma descriptif du séchoir solaire	57
Figure (3.2) : Vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,0$ m/s	62
Figure (3.3) : Vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,5$ m/s	63
Figure (3.4) : Vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 2,0$ m/s	63
Figure (3.5) : Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,0$ m/s	64
Figure (3.6) : Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,5$ m/s	64

Figure (3.7) : Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 2,0$ m/s	65
Figure (3.8) : Vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 50^\circ\text{C}$	66
Figure (3.9) : Vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 65^\circ\text{C}$	67
Figure (3.10) : Vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 75^\circ\text{C}$	67
Figure (3.11) : Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 50^\circ\text{C}$	68
Figure (3.12) : Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 65^\circ\text{C}$	68
Figure (3.13) : Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 75^\circ\text{C}$	69
Figure (3.14) : Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et al. en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la tomate	72
Figure (3.15) : Courbe caractéristique de séchage de la tomate	77
Figure (3.16) : Teneur en eau réduite de l'oignon en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,5$ m/s	79
Figure (3.17) : Teneur en eau réduite de l'oignon en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 65^\circ\text{C}$	79
Figure (3.18) : Profil des courbes de vitesse de séchage de l'oignon	81
Figure (3.19) : Teneur en eau réduite prédite par le modèle logarithmique en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de l'oignon	84
Figure (3.20) : Courbe caractéristique de séchage de l'oignon	87
Figure (3.21) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 45^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5$ m/s	89
Figure (3.22) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 45^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5$ m/s	89
Figure (3.23) : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 45^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5$ m/s	90
Figure (3.24) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 55^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5$ m/s	90

Figure (3.25) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 55^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	91
Figure (3.26) : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 55^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	91
Figure (3.27) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$	92
Figure (3.28) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$	92
Figure (3.29) : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$	93
Figure (3.30) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	93
Figure (3.31) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	94
Figure (3.32) : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	94
Figure (3.33) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,5\text{m/s}$	95
Figure (3.34) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,5 \text{ m/s}$	95
Figure (3.35) : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,5\text{m/s}$	96
Figure (3.36) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0 \text{ m/s}$	97
Figure (3.37) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0 \text{ m/s}$	97
Figure (3.38) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	98
Figure (3.39) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	98
Figure (3.40) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	99
Figure (3.41) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de	

séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	99
Figure (3.42) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0 \text{ m/s}$	100
Figure (3.43) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0 \text{ m/s}$	100
Figure (3.44) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	101
Figure (3.45) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	101
Figure (3.46) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	102
Figure (3.47) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	102
Figure (3.48) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0 \text{ m/s}$	103
Figure (3.49) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0 \text{ m/s}$	103
Figure (3.50) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	104
Figure (3.51) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	104
Figure (3.52) : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	105
Figure (3.53) : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0 \text{ m/s}$	105

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (1.1) : Expression du nombre de Nusselt	30
Tableau (1.2) : Grandeurs électriques analogues aux grandeurs thermiques	37
Tableau (2.1) : Modèles de séchage appliqués à la description des courbes de séchage	51
Tableau (3.1) : Conditions expérimentales pour le séchage de la tomate	61
Tableau (3.2) : Modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage de la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 2 \text{ m/s}$	70 -71
Tableau (3.3) : Constantes de séchage pour le modèle de Midilli et al pour la tomate	73 -74
Tableau (3.4) : Modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage de l'oignon pour $T_a = 55^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5 \text{ m/s}$	82 – 83
Tableau (3.5) : Constantes de séchage pour le modèle logarithmique pour l'oignon	85

INTRODUCTION GENERALE

Les produits alimentaires sont généralement des milieux hétérogènes et rapidement périssables vu leur richesse en eau. Les biologistes ont constaté qu'en ramenant la teneur en humidité des produits agroalimentaires entre 10 et 20 %, les bactéries, les champignons et les enzymes sont presque tous neutralisés. Le séchage est l'une des plus anciennes opérations unitaires qui permet la conservation des aliments par l'élimination partielle ou totale d'eau.

Les produits séchés peuvent être conservés pendant plusieurs mois. En plus, un produit séché pèse environ 1/6 du produit alimentaire frais. Ils n'ont pas besoin d'équipement spécial pour le stockage et sont faciles à transporter.

Le séchage est une opération importante dans le domaine agro-alimentaire et industriel, il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide. Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement ; l'inconvénient lié au séchage ouvert au soleil qui est un séchage insuffisant, est la décoloration par le rayonnement UV et la contamination par la poussière, par les matériaux étrangers, par les insectes et micro-organismes. L'utilisation des divers séchoirs solaires a été développée pour surmonter les problèmes du séchage ouvert du soleil.

Le séchage solaire, économe en énergie, pourrait constituer une solution pour les pays en voie de développement, qui disposent souvent d'un gisement solaire important.

Le séchage solaire est donc un procédé de conservation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage. Il consiste en un moyen rentable pour la déshydratation des produits agro-alimentaires à basse température.

Dans le secteur agro-alimentaire, de nombreux travaux ont été menés pour optimiser l'opération de séchage. Cette opération consiste à rationaliser à la fois la consommation de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché. Ces considérations ont conduit à de nombreux travaux, et ce aux différents niveaux du processus : le séchoir, le produit et le coût économique. Cependant, le manque des données expérimentales et le coût prohibitif des installations de séchage demeurent les principaux facteurs qui limitent une utilisation, à grande échelle, du séchage. Néanmoins, la modélisation numérique des différents

transferts mis en œuvre lors de l'opération de séchage peut être d'un apport considérable et bénéfique pour sa maîtrise.

Nous nous intéressons dans ce travail à l'étude expérimentale et numérique de la cinétique de séchage de produits agro-alimentaires (tomate et oignon) dans le but de contribuer à l'étude des procédés de séchage des produits agro-alimentaires et à la conception des séchoirs solaires adaptés à ces produits. A cet effet, le séchoir installé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA) de l'université de Ouargla, est un séchoir solaire avec un appoint électrique utilisant totalement ou partiellement l'énergie solaire, fonctionnant en convection forcée.

L'objectif principal de ce travail est l'étude et le choix du modèle propre à notre séchoir dans le but de proposer un programme en langage FORTRAN 90 pour une approche de résolution numérique du problème. La validation de ce modèle numérique est effectuée par la comparaison entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux.

D'autre part, nous nous intéressons à l'approche macroscopique expérimentale qui consiste à déterminer le comportement cinétique des produits agro-alimentaires (tomate et oignon) au cours de leur séchage dans des conditions de température et de vitesse d'air contrôlées à l'aide d'un séchoir solaire indirect avec appoint électrique fonctionnant en convection forcée. Les différents essais expérimentaux consistent à étudier l'influence des diverses conditions de l'air (température, vitesse) sur le processus de séchage.

La vitesse de séchage est déterminée d'une façon empirique à partir de la courbe caractéristique de séchage (CCS).

Les courbes expérimentales présentées en teneurs en eau réduites en fonction du temps de séchage sont approchées par huit modèles mathématiques existant dans la littérature.

Le mémoire comporte le plan de travail suivant :

Dans le premier chapitre nous évoquons la notion générale sur le séchage solaire ainsi que les différents types des séchoirs solaires. Nous nous intéressons aussi à l'étude du transfert de chaleur et de masse.

Le second chapitre envisage le développement d'un modèle numérique par la mise en place d'un système d'équations décrivant les différents mécanismes énergétiques du séchoir, ainsi nous entreprenons la résolution mathématique du système.

Le troisième chapitre aborde l'interprétation et la discussion des différents résultats expérimentaux ainsi que la validation du modèle de simulation.

Enfin, nous terminons le travail par une conclusion qui englobe l'interprétation générale de l'étude suivie par une recommandation.

1. NOTIONS GENERALES SUR LE SECHAGE

1.1. Définition:

Le séchage est une opération importante dans les domaines agricole et industriel. Il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide autre que son eau d'hydratation [1]. Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant [2,3].

1.2. Caractéristiques de l'air de séchage [4, 5,6]:

L'air sec peut être considéré comme un mélange de gaz dont la composition est couramment approchée à l'aide des 3 concentrations volumiques suivantes; O₂: 0,210

N₂: 0,781, A_r: 0,009

L'air humide peut être considéré comme un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

1.2.1. Humidité absolue (humidité spécifique):

L'humidité absolue H_a (kg_v/kg_{as}) est définie comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par kg d'air sec.

$$H_a = \frac{m_v}{m_{as}} [kg_v . kg_{as}^{-1}] \quad (1.1)$$

Où m_v et m_{as} sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume v d'air humide.

1.2.2. Humidité relative:

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur, si $P_v < P_s(T)$. On définit alors l'humidité relative H_r de l'air comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation P_s de cette vapeur d'eau à la température T .

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} . 100 \quad (1.2)$$

$$0\% \leq H_r \leq 100\%$$

1.2.3. Degré de saturation:

Le degré de saturation est le rapport de l'humidité absolue de l'air à l'humidité absolue de l'air saturé à la même température.

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (1.3)$$

1.2.4. Températures caractéristiques de l'air humide :

La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement quatre températures remarquables.

1.2.4.1. Température du bulbe sec:

La température du bulbe sec T ou plus exactement température « sèche », est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec.

1.2.4.2. La température humide T_h :

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air.

La différence $(T - T_h)$ est représentative de l'humidité relative H_r de l'air car :

- Elle est nulle si l'air est saturé en vapeur d'eau soit, si $H_r = 100\%$, pas d'évaporation possible.
- Elle augmente avec la différence $(P_s(T) - P_v)$ qui est le terme moteur du transfert de masse donc elle diminue quand H_r augmente.

1.2.4.3. La température de rosée T_r :

Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau P_v considérée. Or P_v intervient dans l'expression de l'humidité spécifique, si bien que la température de rosée représente encore la température de saturation à humidité spécifique constante .

1.2.4.4. Température de saturation adiabatique T_{Gs} :

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température T_s .

1.3. Caractéristiques des solides humides:

1.3.1. Description du solide humide:

Avant le séchage, un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure 1.1. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses.

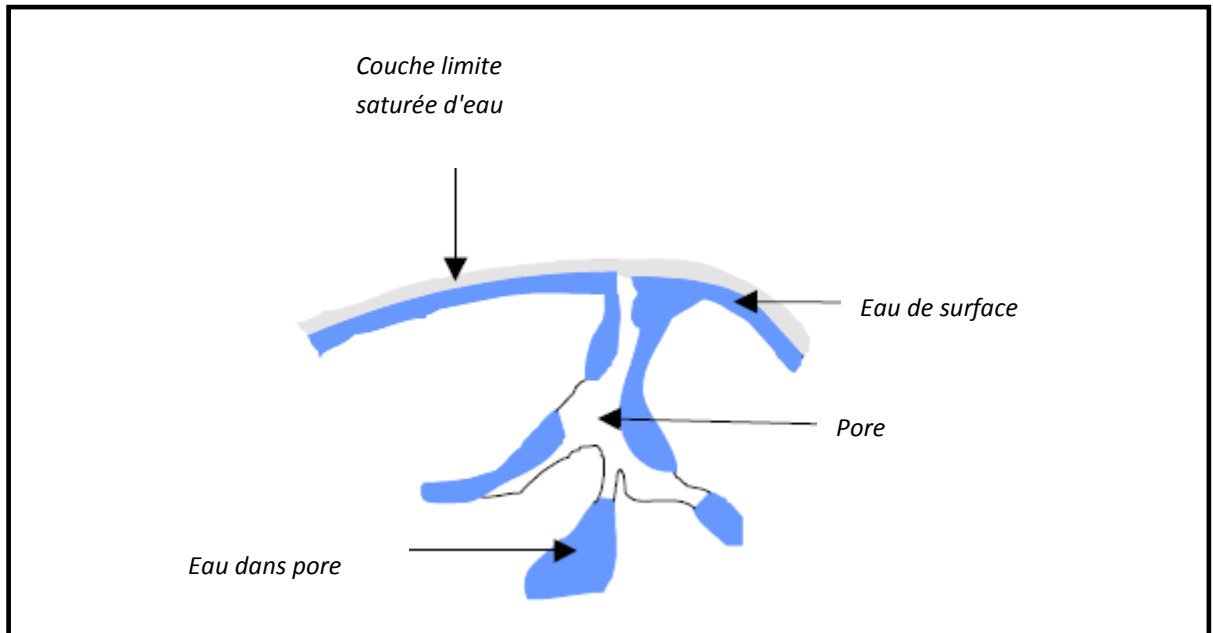


Figure 1.1: Description du solide humide

1.3.2. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche):

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité, s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche [7].

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (1.4)$$

1.3.3. Humidité relative (teneur en eau):

L'humidité relative d'un solide, appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (1.5)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations [8]:

$$X = \frac{X_r}{1 - X_r} \quad (1.6)$$

$$X_r = \frac{X}{1 + X} \quad (1.7)$$

1.3.4. Hygroscopicité

Un solide non hygroscopique est un solide pour lequel, à l'équilibre, la tension de vapeur du liquide l'imprégnant est maximale pour une température donnée (tension de vapeur "normale" du liquide s'il était seul dans une enceinte). C'est le cas durant le séchage des solides qui possèdent un film d'eau superficiel ou des solides dont les interstices sont suffisamment gros pour permettre la diffusion assez rapide de l'eau des pores à la surface.

Un solide devient **hygroscopique** quand l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle en eau est inférieure à la tension de vapeur maximale pour la température considérée. L'humidité relative de cet air est alors inférieure à 1. Ce comportement est dû principalement aux forces liées à la capillarité qui ont tendance "à retenir l'eau en phase liquide".

Le tracé des isothermes d'adsorption permet de rendre compte de ce comportement. On trace expérimentalement à une température donnée la courbe d'équilibre de l'humidité relative de l'air au contact du solide humide en fonction de l'humidité de ce solide.

1.4. Séchage des produits agricoles

1.4.1. Mode de séchage:

On peut distinguer divers procédés de séchage [9]:

- Les procédés mécaniques (décantation et filtration, centrifugation, compression)
- Les procédés thermiques, par élévation de température et diminution de la pression de vapeur de la phase gazeuse. L'humidité est extraite par évaporation et diffusion.

Diverses méthodes de chauffage peuvent également être utilisées:

- Convection naturelle, convection forcée
- Conduction
- Rayonnement
- Pertes diélectriques

Le procédé de séchage par convection, appelé aussi par entraînement, est plus répandu et fait l'objet de notre étude.

1.4.2. Séchage par convection (entraînement):

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec (figure 1.2), il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que:

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Le séchage est dit « isenthalpique » si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par l'air chaud.

L'air sert donc à la fois de fluide chauffant et de gaz vecteur pour l'eau enlevée. Entrant sec et chaud dans le séchoir, il en ressort humide et moins chaud [10]. L'enceinte où sont placés le corps humide à sécher et le flux de gaz est appelée séchoir.

Dans ce type de séchage, la convection est le seul mode de transfert prépondérant, néanmoins d'autres modes viennent se greffer à celui-ci.

La vitesse avec laquelle des quantités d'eau de produit sont évaporées est appelée vitesse de séchage. Cette dernière est intimement liée au mode d'apport de la chaleur latente de vaporisation au produit à sécher. Dans le séchage par entraînement, la convection devrait être le seul mode d'apport de chaleur. Toutefois, d'autres modes d'apport d'énergie peuvent se réunir pour fournir une petite partie de la chaleur latente de vaporisation. La conduction par

les claies supportant le produit et le rayonnement par les parois du séchoir représente les autres modes d'apport de cette chaleur latente de vaporisation [2].

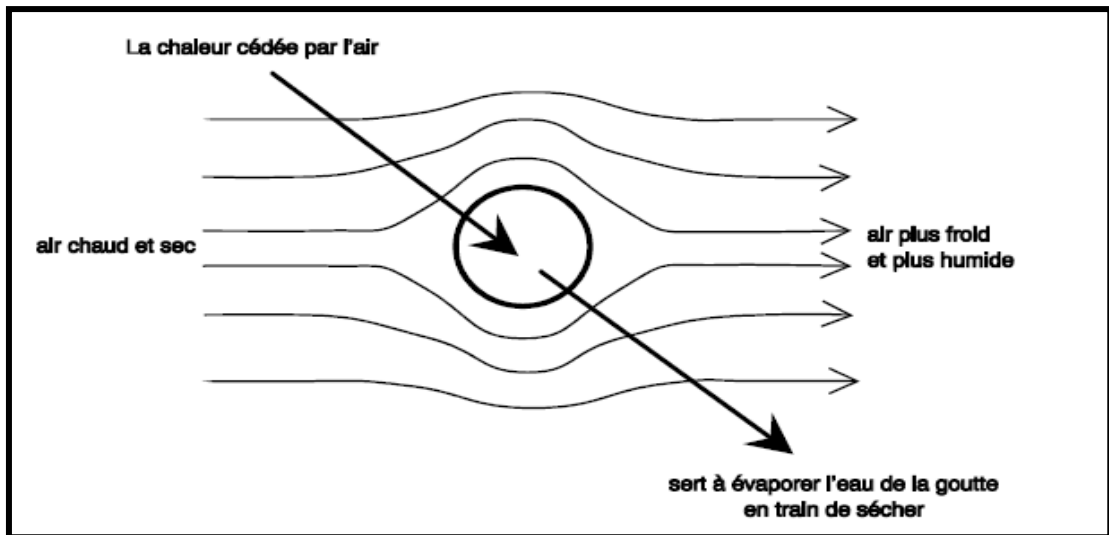


Figure 1.2: Les principes du séchage à l'air chaud

1.4.3. Activité de l'eau et isotherme de sorption:

1.4.3.1. Activité de l'eau dans le produit [8]:

L'activité de l'eau dans un produit est le rapport entre la pression de vapeur d'eau P_v à la surface du produit et la pression de vapeur d'eau pure $P_s(T)$ à la température T du produit.

$$a_w = \frac{P_v}{P_s(T)} \quad (1.8)$$

Si on considère un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre (figure 1.3), P_v , T , P_{va} , T_a , étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air :

L'équilibre impose: $T=T_a$ (pas de transfert de chaleur) et $P_v = P_{va}$ (pas de transfert de masse). L'humidité relative H_r de l'air s'écrit:

$$H_{ra} = \frac{P_{va}}{P_s(T_a)} \quad (1.9)$$

D'où l'on déduit: $H_{ra} = a_w$ (1.10)

L'activité de l'eau dans un produit est donc aussi l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit.

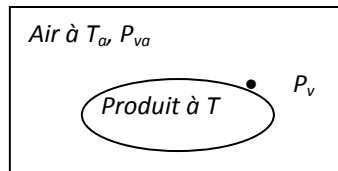


Figure 1.3 : Définition de l'humidité relative d'équilibre ou activité de l'eau

1.4.3.2. Isothermes de sorption :

L'activité a_w de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau et sa température T . La courbe représentant, pour une température T donnée, la teneur en eau d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre H_r (figure 1.4) est appelée :

- Isotherme d'adsorption, si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau [8].

La détermination des isothermes de sorption est une étape indispensable dans l'étude du séchage du fait qu'elle permet de déterminer la teneur en eau finale à atteindre à la sortie du séchoir en offrant des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit à sécher [7]. Ces courbes peuvent éventuellement différer d'un produit à l'autre, bien qu'on soit à la même valeur de l'humidité relative H_r et une température donnée [11].

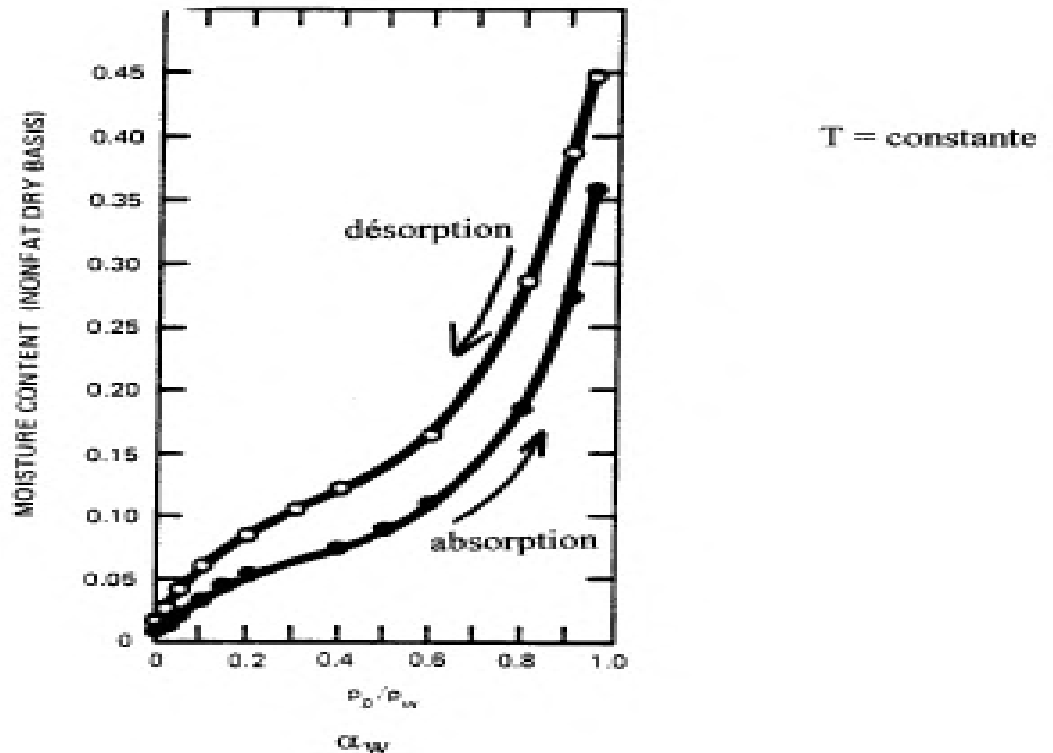


Figure 1.4: La relation entre activité d'eau et teneur en eau d'un produit [16]

1.4.4. Vitesse de séchage:

La vitesse de séchage est la masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau. Elle est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont [9]:

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur.

On peut déterminer la vitesse de séchage de deux façons différentes [12]:

- Soit on utilise les vitesses de séchage expérimentales d'une fine couche de produit en recherchant une corrélation qui donne directement l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps et des caractéristiques de l'air asséchant.

- Soit on se donne un modèle logique de transfert d'humidité entre le produit et l'air, les résultats expérimentaux servant à recalibrer le modèle.

1.4.5. Cinétique du séchage:

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Tous les travaux de séchage montrent que ces courbes se distinguent suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale, on constate l'existence de différentes périodes qui se caractérisent par un comportement différent de la vitesse de séchage [9]:

1.4.5.1. Périodes du séchage:

On distingue trois phases (figure 1.5) au cours d'une opération de séchage effectuée dans des conditions constantes de température, de débit et d'humidité de l'air [11]:

- phase 0 : phase de mise en température du produit ;
- phase I : phase de séchage à allure constante ;
- Phase II: phase de ralentissement.

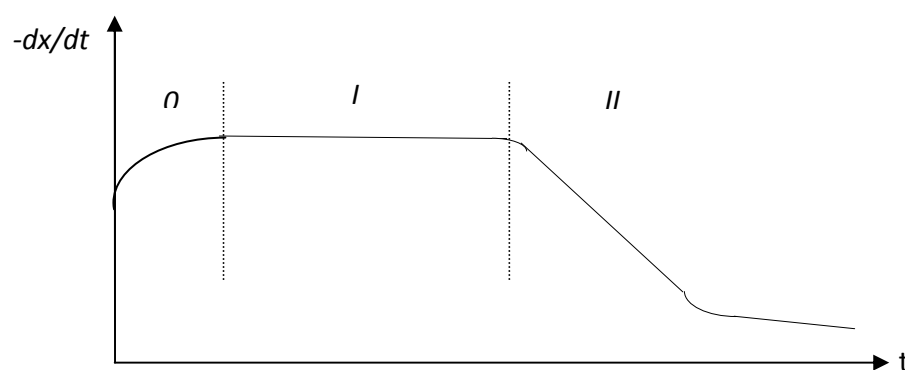


Figure 1.5: Allure de séchage en fonction du temps

➤ **Période de mise en température (phase 0):**

La période de mise en température disparaît pratiquement quand le produit est en particules ou en feuilles, elle correspond à la montée en température du matériau humide, jusqu'à atteindre la température de bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global [10, 13]

Dans cette période, l'humidité du produit varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide [9].

➤ **Période à vitesse de séchage constante (phase I) :**

Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface; l'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide; l'activité de l'eau (A_w) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit [7].

➤ **Période de ralentissement (phase II) :**

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants [2]:

- Disparition de l'eau libre en surface du produit :

Ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

- L'épaisseur du produit :

Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage.

- La diffusivité de l'eau dans le produit :

Elle varie avec la teneur du produit en eau. Plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

- La résistance mécanique des parois cellulaires intacts :

Les parois cellulaires intacts empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

- **Le croutage** : certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (phase I) et sont déposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés rendent imperméables la surface du produit.

1.4.6. Types de modifications de la qualité [2, 10] :**1.4.6.1. Modifications biochimiques dues à la température:**

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique. Ces modifications, généralement considérées comme indésirables, sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes:

- Réactions de Maillard, c'est-à-dire brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle.

- Oxydations de matières grasses (rancissement).

- Destruction de vitamines.

- Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant.

- Réactions enzymatiques : Si les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable ou par la température au cours du séchage, elles produisent leurs effets de brunissement des poly phénols ; hydrolyse des lipides, etc....

1.4.6.2. Pertes d'arôme :

Le séchage est un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule, mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation.

1.4.6.3. Modifications physiques et mécaniques des produits séchés:

Le séchage provoque chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- Migration des solutés vers la surface : Outre son effet sur l'aspect du produit, cette accumulation de sucres ou d'autres solutés en surface est préjudiciable à la valeur du produit lorsqu'il est consommé réhydraté.
- Fusion et migration de matières grasses,
- Modifications de forme: En règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permettent d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse.

2. TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES:

Le séchage solaire, économe en énergie pourrait, constituer une solution pour les pays qui disposent souvent d'un gisement solaire important. Pour cette raison, plusieurs types des séchoirs solaires ont été conçus et étudiés. Ainsi, suivant qu'il s'agit de fruits, de grains ...etc., les structures des séchoirs varient (disposition des produits, dimensions, températures ...). Suivant leur origine énergétique, on peut distinguer deux catégories générales : actif et passif.

Les systèmes passifs : L'énergie solaire seule en assure le fonctionnement, ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées de tout centre de distribution d'énergie.

Les systèmes actifs (hybrides): Ils associent à l'énergie thermique solaire une énergie d'appoint fuel gaz pour le chauffage ou bien l'électricité pour la circulation de l'air [14].

2.1. Les systèmes actifs (les séchoirs hybrides) [15]:

Les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : Fuel, électricité, bois, gaz ...
L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir :

- ✓ Maintien d'une température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu de bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire.
- ✓ Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

➤ **Avantages**

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.
- Forte augmentation de la productivité par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

➤ **Inconvénients**

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

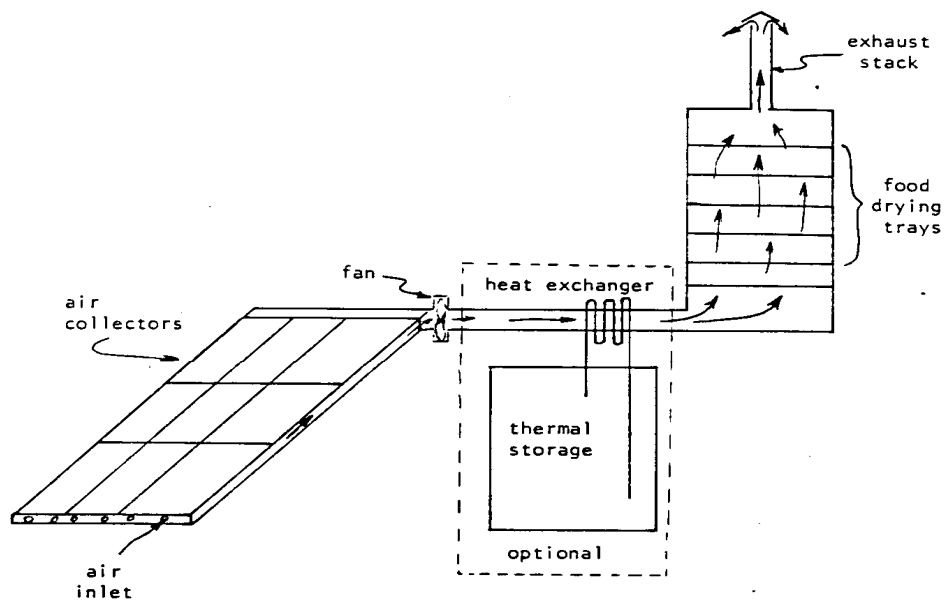


Figure 1.6: Séchoir solaire hybride

2.2. Les systèmes passifs :

Les séchoirs « passifs », ou séchoirs-serres sont constitués d'une enceinte dont le toit et (ou) les côtés en matériau transparent laissent pénétrer le soleil. Le rayonnement frappe donc directement les produits à sécher qui jouent alors le rôle d'absorbeurs. Dans ce cas, il est convenu de parler de séchoirs - serres directs. Toutefois, pour éviter que le rayonnement détériore certains produits, on interpose éventuellement entre ces derniers et la couverture transparente une surface opaque servant d'absorbeur et l'on dit que le séchoir-serre est indirect. Parfois, seule une partie du produit reçoit et absorbe le rayonnement : il s'agit alors de séchoirs-serres mixtes. Naturellement ces séchoirs passifs ne sont pas isenthalpiques [14].

2.2.1. Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaires directs sont conçus de façon à laisser pénétrer le rayonnement solaire directement dans l'armoire de séchage où il est converti en chaleur par le produit à sécher lui-même et les diverses parois opaques qu'il rencontre.

En pratique, les séchoirs directs sont constitués d'un caisson de forme variable offrant au rayonnement solaire une couverture transparente: vitre ou film plastique. Des claies sont disposées à l'intérieur du caisson entre lesquelles l'air circule le plus souvent par convection naturelle [12].

➤ **Avantages :**

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.

➤ **Inconvénients :**

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments.

- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

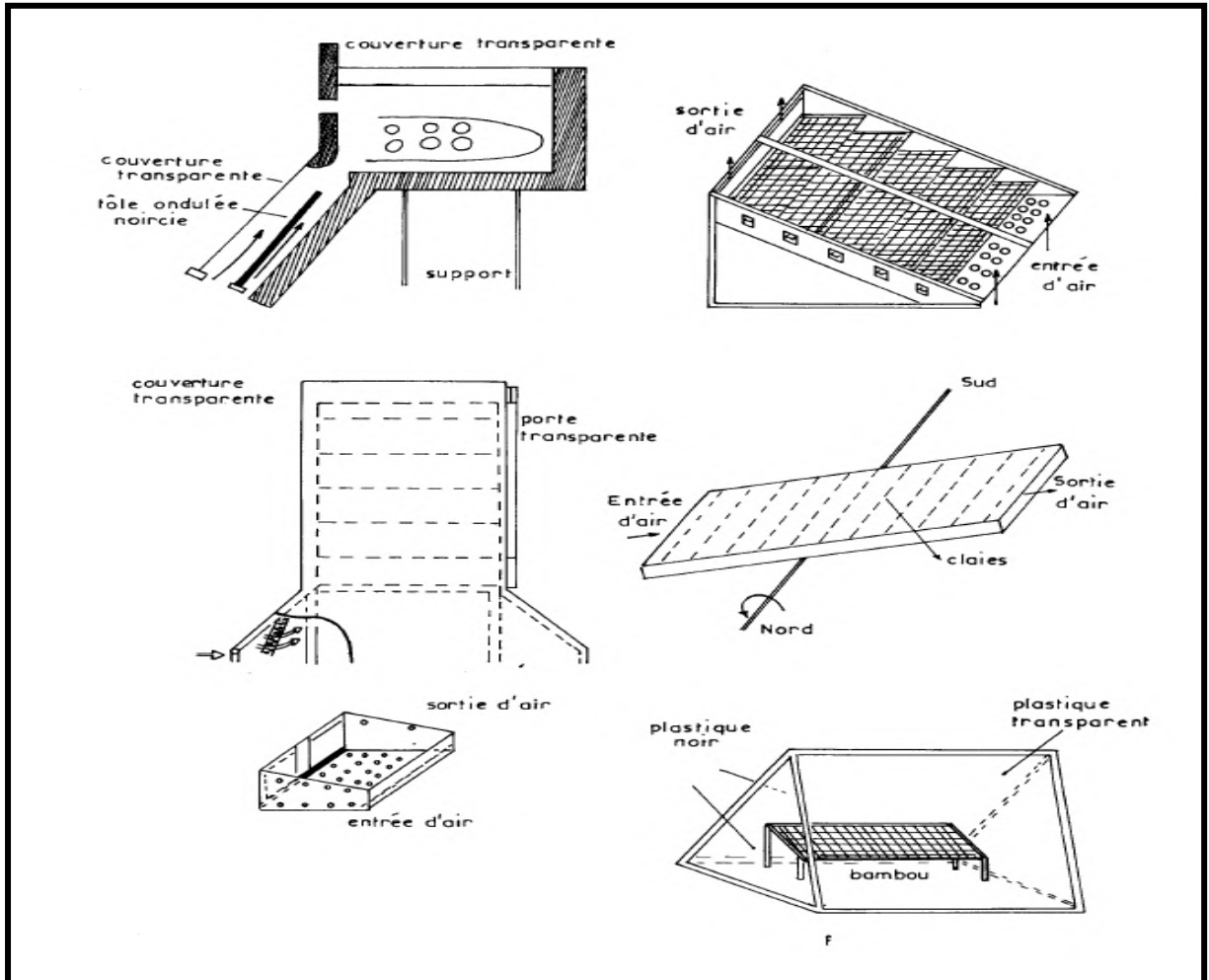


Figure 1.7: Exemples des séchoirs solaires directs simples

2.2.2. Les séchoirs solaires indirects :

Le séchoir solaire indirect se compose de 2 parties: un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur et une chambre de séchage qui contient le produit. L'air pénètre dans le collecteur; il est chauffé sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques [15].

➤ **Avantage :**

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

➤ **Inconvénients :**

- Rapidité de séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement

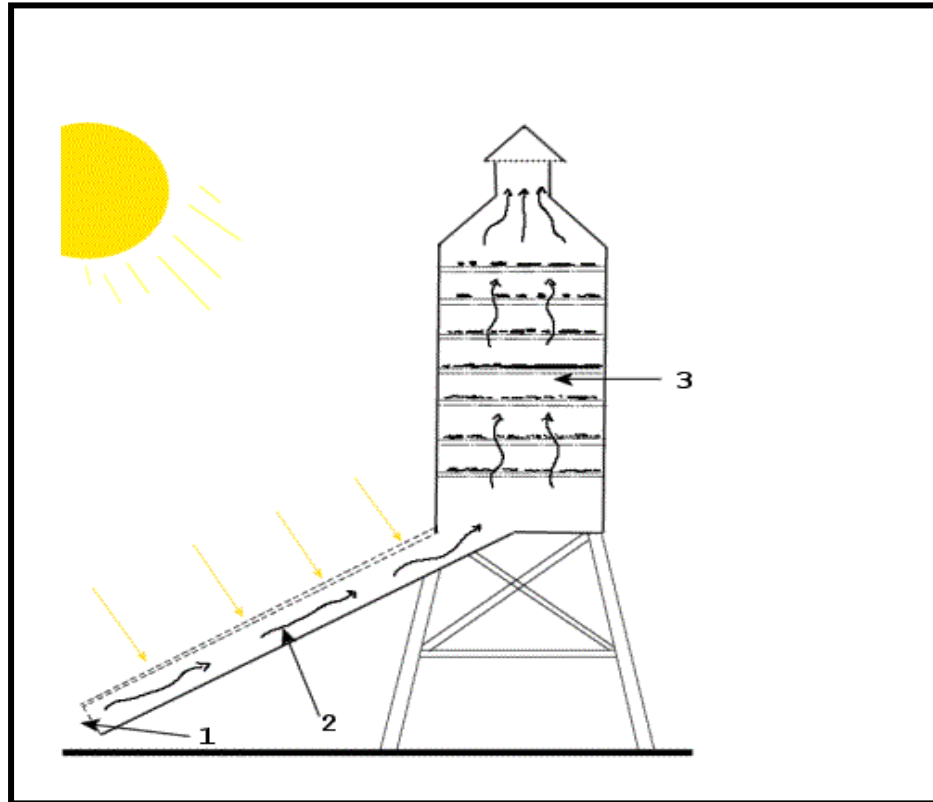


Figure 1.8: Séchoir solaire indirect

1. Entrée d'air
2. Partie exposée aux rayons du soleil, sous une vitre.
3. Claie.
4. Cheminée

2.2.3. Les séchoirs mixtes :

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage [7].

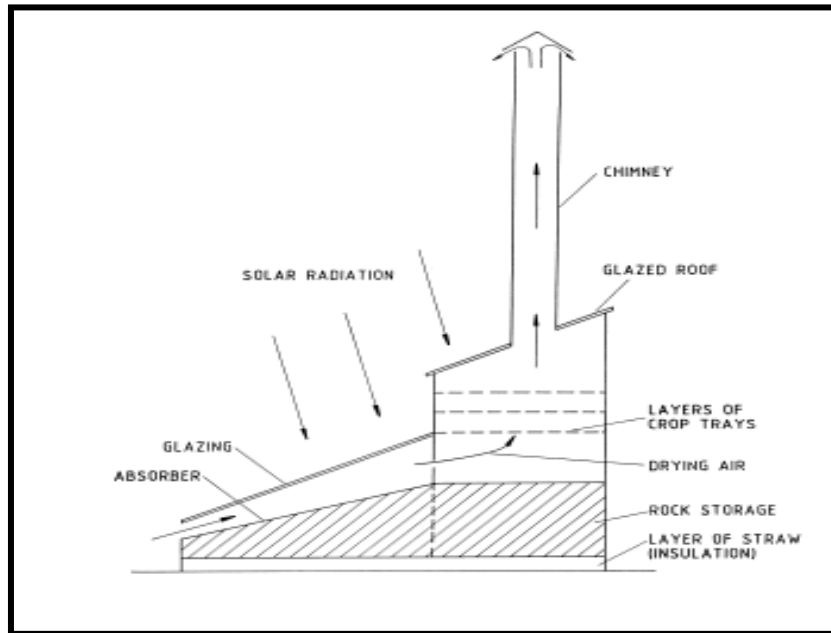


Figure 1.9: Séchoir solaire mixte

3. TRANSFERT DE CHALEUR [16, 17,18]:

Les multiples procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur, soit parce que c'est le but recherché (fours, coulée, échangeurs, thermoformage, induction, lits fluidisés, trempe, refroidissement), soit parce que ceux-ci interviennent d'une manière inévitable (chocs thermiques, pertes de chaleurs, rayonnement). Des connaissances de base dans ce domaine sont donc nécessaires à l'ingénieur de production ou de développement pour:

- Comprendre les phénomènes physiques qu'il observe;
- Maîtriser les procédés et donc la qualité des produits.

Le deuxième principe de la thermodynamique admet que la chaleur (ou énergie thermique) ne peut passer que d'un corps chaud vers un corps froid, c'est-à-dire d'un corps à température donnée vers un autre à température plus basse.

Le transfert de chaleur se produit suivant trois modes :

- Soit par interaction directe avec les particules voisines (choc de molécules par exemple), ce qui correspond à la conduction,
- Soit par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement,
- Soit enfin, dans le cas d'un gaz ou d'un liquide, par convection, mode d'échange résultant du mélange, à l'échelle macroscopique cette fois ci, des diverses parties d'un fluide à des températures différentes.

3.1. Généralités :

3.1.1. Bilan d'énergie :

Il faut d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être:

Φ_{st} : flux de chaleur stocké

Φ_g : flux de chaleur généré

Φ_s : flux de chaleur sortant

Φ_e : flux de chaleur entrant

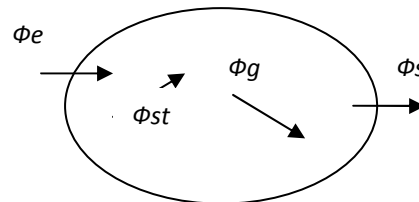


Figure 1.10 : Différents flux de chaleur

On applique alors le 1^{er} principe de la thermodynamique pour établir le bilan du système (S).

$$\Phi_e + \Phi_g = \Phi_s + \Phi_{st} \quad (1.11)$$

3.1.2. Stockage d'énergie:

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où, à pression constante :

$$\Phi_{st} = \rho.V.C.\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.12)$$

Φ_{st} : Flux de chaleur stocké [W]

ρ : Masse volumique [Kg /m³]

V : Volume [m³]

C : Chaleur spécifique [J /kg .°C]

T : Température [°C]

t : Temps [s]

3.1.3. Génération d'énergie:

Elle intervient lorsqu'une autre d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. Nous pouvons l'écrire sous la forme:

$$\Phi_g = \dot{q} \cdot V \quad (1.13)$$

Avec:

Φ_g : Flux d'énergie thermique générée [W]

\dot{q} : Densité volumique d'énergie générée [W /m³]

V : volume [m³]

3.1.4. La chaleur latente de changement d'état:

La chaleur latente spécifique d'une substance est la quantité de chaleur nécessaire pour entraîner le changement de phase d'une unité de masse de la substance. L'unité SI de la chaleur latente spécifique est le J/kg. La chaleur latente de fusion est la quantité d'énergie thermique dégagée par 1 kg de substance solide sans qu'il y ait changement de température. La chaleur latente de vaporisation est la quantité d'énergie thermique nécessaire pour transformer à l'état de vapeur 1 kg d'une substance sans qu'il y ait changement de température.

3.2. Les trois modes de transfert de la chaleur :

Dans les transferts thermiques, on peut distinguer trois modes de transfert : la conduction, la convection et le rayonnement ; chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes).

3.2.1. Transfert par conduction (ou diffusion):

La conduction est une transmission de la chaleur dans la matière par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement.

➤ **Loi de Fourier :**

Il existe une relation linéaire entre la densité de flux thermique et le gradient de température en tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu et au gradient de température.

$$\vec{\varphi} = -\lambda \cdot \vec{\text{grad}} T \quad (1.14)$$

3.2.2. Transfert par convection :

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides dans lesquels est généralement prépondérant.

On distingue la convection forcée, dans laquelle le mouvement du fluide est produit par une action extérieure (pompe, ventilateur ...), de la convection libre (ou naturelle),

Dans laquelle ce mouvement résulte simplement de la différence de densité entre les parties chaudes et froides du fluide.

➤ **Régime d'écoulement :**

Compte- tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer le régime d'écoulement.

• **Régime laminaire :**

L'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes. Entre deux filets fluides adjacents, les échanges de matière sont donc:

- Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides.
- Par convection et conduction (négligeable) si l'on considère une direction non normale aux filets fluides.

• **Régime turbulent :**

L'écoulement n'est plus permanent. Il est toujours possible de définir des lignes de courant moyennes à partir du champ des vitesses moyennes. L'échange de chaleur

dans un écoulement turbulent s'effectue par convection et conduction. On vérifie que ce dernier mode est généralement négligeable par rapport aux premiers.

➤ **Coefficient de convection :**

Considérons donc un fluide à la température de mélange T_m , en contact avec une paroi solide d'aire S et de température T_p ($T < T_m$), figure (2.2).

Le flux thermique de conduction à travers la couche laminaire peut s'exprimer par la loi de Fourier :

$$\Phi = \frac{\lambda}{e} \cdot S \cdot (T_m - T) \quad (1.14)$$

λ étant la conductivité thermique du fluide.

Mais cette relation n'est pas utilisable en pratique, car on ne connaît généralement pas l'épaisseur e du film laminaire. De plus, on imagine facilement que e va dépendre de la « vigueur » de la zone turbulente voisine.

On exprime alors le flux thermique par la loi de Newton, en posant $h = \lambda/e$:

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_m - T) \quad (1.15)$$

h s'exprime en $W/m^2 \cdot ^\circ C$. On l'appelle coefficient d'échange par convection. Son inverse ($R=1/h$) est la résistance de contact à l'interface.

Le coefficient de transfert de chaleur superficiel ou coefficient de convection h caractérise l'efficacité de la convection à transférer la chaleur. Il dépend de :

- La nature du fluide,
- Le régime d'écoulement du fluide (décrit par le nombre de Reynolds),
- La forme et de la rugosité de la surface du solide

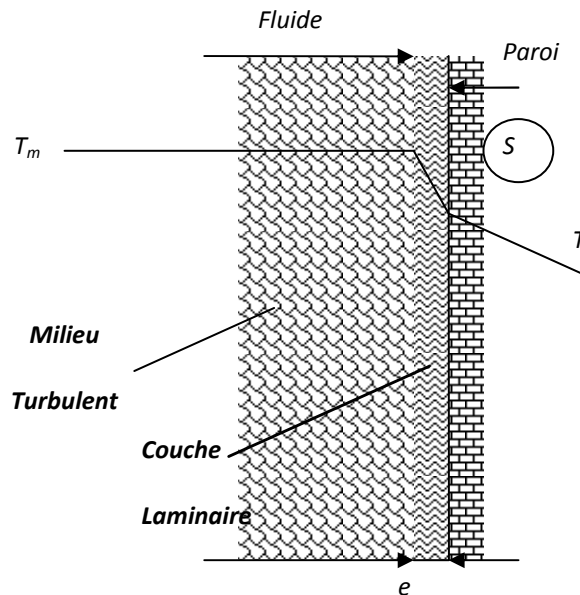


Figure 1.11 : Définition du coefficient de convection

➤ **Estimation des coefficients de transfert de chaleur en convection forcée :**

La littérature spécialisée contient de nombreuses lois empiriques permettant d'estimer le coefficient de convection. L'analyse dimensionnelle permet de généraliser et de comparer les résultats expérimentaux obtenus dans des conditions particulières. C'est la raison pour laquelle ces lois empiriques sont exprimées en fonction des nombres sans dimension qui résultent de l'analyse dimensionnelle. Pour la convection forcée, ces corrélations font intervenir les trois nombres sans dimensions suivants :

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Nu : nombre de Nusselt = $h d/\lambda$

Où : h : Coefficient de convection

d : Grandeur caractéristique du solide

λ : Conductibilité thermique du fluide

Re : Nombre de Reynolds = $u d/v$

Où :

u est la vitesse du fluide (m/s)

ν est la viscosité cinématique du fluide (m^2/s)

Pr: nombre de Prandtl = ν/α

Où α est la diffusivité thermique du fluide (m^2/s)

- **Expression du nombre de Nusselt :**

Les relations numériques sont en générale de la forme $Nu = f(Re, Pr)$

Elle est donnée par le tableau (1.1)

Les grandeurs physiques sont calculées à la température du film laminaire: $T_m = \frac{T + T_\infty}{2}$

Tableau (1.1) : Expression du nombre de Nusselt

Géométrie	Correlations
Écoulement sur un plan	<p>$Nu(x)$: Nu à la distance x du bord du plan</p> <p>$\bar{Nu}(L)$: Nu moyen sur la longueur L du plan.</p> <p>○ Écoulement turbulent :</p> $Nu(x) = 0,0288 Re(x)^{0.8} Pr^{0.333} \quad Re > 5 \cdot 10^5 \text{ et } Pr \geq 0,5$ $\bar{Nu}(L) = 0,35 Re(L)^{0.8} Pr^{0.333}$ <p>○ Écoulement laminaire :</p> $Nu(x) = 0.324 Re(x)^{0.5} Pr^{0.333} \quad Re < 5 \cdot 10^5 \text{ et } 10 \geq Pr \geq 0.5$ $\bar{Nu}(L) = 0.628 Re(L)^{0.5} Pr^{0.333}$
Écoulement dans un tube	<p>○ Écoulement turbulent : $Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^n$</p> <p>$n = 0,3$ si $T_{\text{fluide}} > T_{\text{paroi}} \quad Re > 5000$ et</p> <p>$n = 0,4$ si $T_{\text{fluide}} < T_{\text{paroi}} \quad 0,6 < Pr < 100$</p> <p>- Re calculé pour $D_h = 4.S/p$</p> <p>Ou S est la section de passage du fluide</p> <p>P est le périmètre de contact fluide paroi</p> <p>○ Écoulement laminaire : $Nu = 1,86(Re.Pr)^{0.333} \left(\frac{D}{L}\right)^{0.333} \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14}$</p> <p>Valable pour : $Re.Pr \cdot \frac{D}{L} \geq 10$</p> <p>$\mu$: calculé à la température T_p</p>

3.2.3. Transfert par rayonnement:

Le transfert de chaleur par rayonnement se produit entre deux surfaces par l'émission et l'absorption de radiations électromagnétiques. Contrairement aux modes de transfert par conduction ou convection, le rayonnement ne requiert aucun milieu physique pour sa propagation : il se propage même dans un vide parfait ou par n'importe quel milieu.

➤ Loi de Stefan-Boltzmann

L'énergie rayonnée par une surface est proportionnelle à sa température absolue T (en K) élevée à la puissance 4. La loi de Stefan-Boltzmann exprime le flux de chaleur émis:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1.16)$$

Où :

M est le flux de chaleur ou émittance [W/m^2],

ε est l'émissivité de la surface,

$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ est la constante de Stefan-Boltzmann

- **Le corps noir** : C'est un corps idéal qui absorbe toutes les radiations et émet le maximum d'énergie: l'émissivité d'un corps noir est égale à 1.
- **Les corps réels** : Ils ont une émissivité inférieure à 1. Les produits alimentaires, tout comme les corps organiques en général ont une émissivité assez élevée, de l'ordre de 0,8 à 0,95. Les corps métalliques peuvent avoir une émissivité très faible, selon leur état de surface et leur température.

➤ Loi de Kirchhoff

Le calcul du transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps est assez complexe car la position et la géométrie des corps influencent largement cet échange. Dans le cas d'un corps convexe placé dans une enceinte concave d'émissivité 1, la puissance de chauffe nette transférée au corps convexe est égale à :

$$\Phi = \varepsilon_{\text{corps}} S_{\text{corps}} \sigma (T_{\text{enceinte}}^4 - T_{\text{corps}}^4) \quad (1.17)$$

Cette relation est basée sur une propriété importante des corps gris (corps dont l'émissivité ε est indépendante de la longueur d'onde) : le facteur d'absorption α (fraction du rayonnement incident absorbé par le corps) est égal à l'émissivité ε :

Loi de Kirchhoff:

$$\alpha = \varepsilon \quad (1.18)$$

➤ **Répartition spectrale du rayonnement (lois de Planck et de Wien) :**

La loi de Stefan-Boltzmann donne l'émittance globale du rayonnement. La répartition spectrale de ce rayonnement pour un corps noir est donnée par la loi de Planck représentée graphiquement (figure 1.12)

On voit que, à toute température, l'émittance monochromatique (partie de l'émittance globale émise à une longueur d'onde donnée) suit une courbe de distribution admettant un maximum pour une certaine longueur d'onde λ_{\max} . La loi de Wien (dérivée de la loi de Planck) permet de calculer aisément ce maximum :

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \text{ } [\mu\text{mK}]}{T \text{ } [K]} \quad (1.19)$$

Constatons que le soleil, dont la température est de 5730 K a une émittance spectrale maximale à 0,5 μm , soit à l'intérieur du spectre visible (0,4 – 0,8 μm).

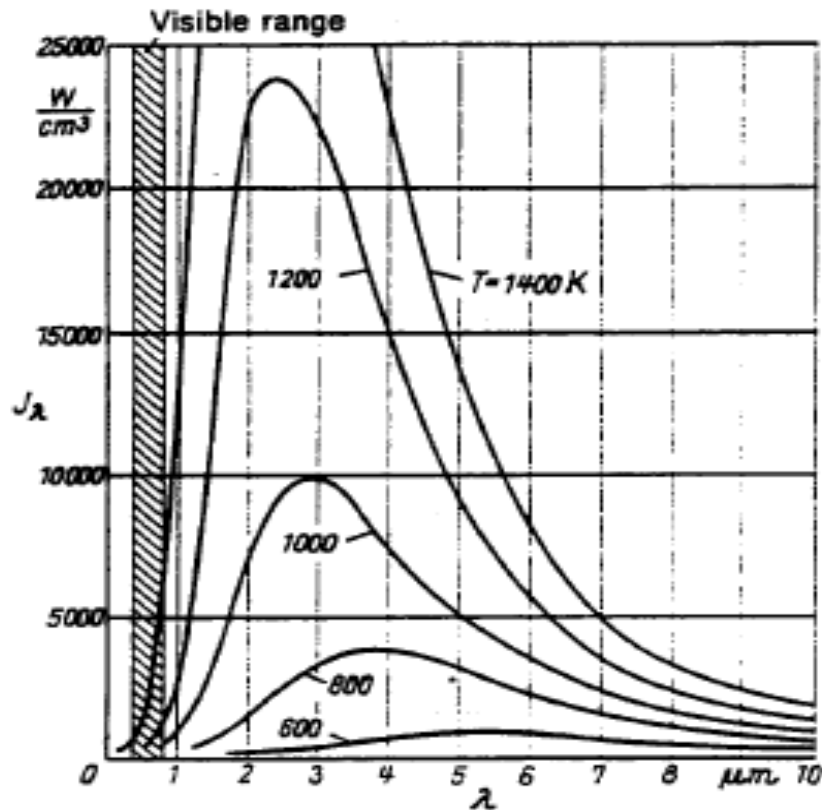


Figure 1.12 : Distribution d'énergie du rayonnement émis par le corps noir selon la loi de Planck

➤ **Réception du rayonnement par un solide (réflexion, absorption et transmission) :**

Lorsqu'un rayonnement atteint la surface d'un corps (figure 1.13), une fraction ρ_r de la puissance totale incidente est réfléchi, une autre fraction α_a est absorbée dans la masse du récepteur, et une troisième fraction τ_t pouvant être transmise, traverse le corps.

Si Φ_i , Φ_a , Φ_r , Φ_t sont respectivement les flux totaux incident, absorbé, réfléchi et transmis, définit les facteurs suivants:

- $\alpha_a = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$ facteur d'absorption (1.20)

- $\rho_r = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$ facteur de réflexion (1.21)

- $\tau_t = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$ facteur de transmission (1.22)

Ces facteurs sont liés par la relation:

$$\alpha_a + \rho_r + \tau_t = 1 \quad (1.23)$$

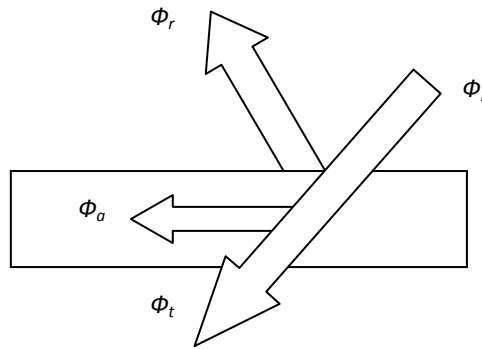


Figure 1.13 : Phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission

➤ **Facteur de forme :**

Soit deux surfaces émissives en présence l'une de l'autre échangeant leur rayonnement, le facteur de forme est défini par:

$$F_{12} = \frac{1}{\Sigma_1} \iint_{\Sigma_1 \Sigma_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} d\Sigma_1 d\Sigma_2 \quad (1.23)$$

$$F_{21} = \frac{1}{\Sigma_2} \iint_{\Sigma_1 \Sigma_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} d\Sigma_1 d\Sigma_2 \quad (1.24)$$

F_{12} : fraction du rayonnement émis par la surface Σ_1 et intercepté par la surface Σ_2 .

F_{21} : fraction du rayonnement émis par la surface Σ_2 et intercepté par la surface Σ_1 .

3.3. Modélisation du transfert thermique:

Un modèle et en particulier un modèle de transfert thermique constitue une représentation d'un système physique, où sont impliqués des échanges calorifiques.

Cette représentation peut se faire soit à travers un modèle mathématique, traduit par un groupe d'équations qui structure les relations entre les variables du système, soit par un modèle analogique, résultant précisément d'une analogie formelle entre différents systèmes. Il est ainsi classique d'établir un modèle par analogie électrique de certains systèmes thermiques [19].

3.3.1. Transfert de chaleur et analogies électriques [12]

Principe:

Considérons un système ayant pour but la transmission d'énergie sous forme de chaleur sensible. Ses différents éléments sont portés à des températures différentes et échangeant entre eux de la chaleur par conduction, convection et rayonnement. En fait, elles relèvent toutes du modèle suivant :

Soient deux éléments S_1 et S_2 d'un système S portés à des températures T_1 et T_2 , le flux de chaleur Φ échangé entre S_1 et S_2 vérifie la relation suivante :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_t} \quad (1.25)$$

R_t est la résistance thermique existant entre S_1 et S_2 , elle est fonction du type de transfert mis en cause, des matériaux utilisés, etc....

La méthode des analogies électriques a pour fondement la ressemblance entre cette relation régissant les transferts de chaleur entre deux éléments et la loi d'ohm qui régit les transferts de charges électriques entre deux points d'un circuit électrique et qui s'écrit :

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad (1.26)$$

I est l'intensité du courant circulant du point 1 vers le point 2.

V_1 et V_2 sont les potentiels respectifs aux points 1 et 2.

R est la résistance électrique du circuit entre 1 et 2.

Ce parallélisme conduit à envisager l'utilisation d'un circuit électrique comme modèle d'un système thermique. A tout élément pouvant être considéré comme homogène du point de vue de la température, on associe un point d'un circuit électrique et à tout mode de transfert de chaleur entre deux éléments de températures différentes, on associe une résistance électrique.

3.3.1.1. Coefficients d'échange et résistances thermique :

On écrit généralement, les transferts thermiques entre deux éléments en faisant référence à des coefficients d'échange thermiques plutôt qu'à des résistances.

Si h_{12} est le coefficient d'échange thermique entre 2 éléments et S la section à travers laquelle s'effectue le transfert, on peut écrire l'équation de transfert sous la forme:

$$\Phi = h_{12} \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.27)$$

La résistance thermique équivalente est simplement:

$$R_t = \frac{1}{h_{12} \cdot S} \quad (1.28)$$

Nous allons préciser la méthode de détermination des coefficients d'échange pour les types de transferts thermiques suivants :

- conduction
- Convection
- Rayonnement

La modélisation s'effectue alors en utilisant le tableau suivant :

Tableau (1.2) : Grandeurs électriques analogues aux grandeurs thermiques

Grandeurs thermiques		Grandeurs électriques	
Flux	Φ (w)	Courant électrique	I (A)
Température	T (K)	Potentiel	V (V)
Résistance thermique	Rt (K/W)	Résistance électrique	R (V/A)
Capacité	C (J/K)	Capacité	C (F)
Flux imposé	(W)	Génération de courant	(I)
Température imposée	(K)	Génération de tension	(V)

3.3.1.2. Les expressions des conductances [19]:**➤ Conductance conductive :**

Pour une plaque matérielle homogène d'une épaisseur e , de surface S , et de conductivité thermique λ , soumise à un écart de température ΔT entre ses deux plans limites (figure 1.14), le flux (Φ), (ou puissance thermique en Watts) traversant le matériau est déterminé par la loi de Fourier :

$$\Phi = \lambda \frac{S}{e} \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{cd}} = G_{cd} \Delta T \quad (1.29)$$

$$R_{cd} = \frac{e}{\lambda.S} \quad \text{est la résistance thermique conductivité (K/W)}. \quad (1.30)$$

$$G_{cd} = \frac{\lambda.S}{e} = \frac{1}{R_{cd}} \quad \text{est la conductance thermique (W/K)}. \quad (1.31)$$

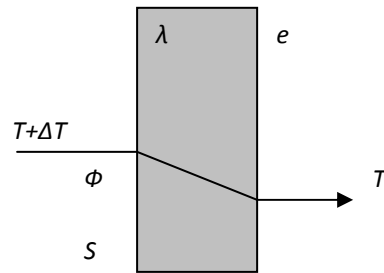


Figure 1.14: Conduction thermique

➤ **Conductance convective :**

L'échange thermique par convection forcée Φ (en Watts) qui traverse une surface S entre deux points de températures T_1 et T_2 est donné par la relation :

$$\Phi = hS(T_1 - T_2) = G_{cv}\Delta T = \frac{\Delta T}{R_{cv}} \quad (1.32)$$

$$R_{cv} = \frac{1}{hS} \quad \text{est la résistance thermique convective (K/W)}. \quad (1.33)$$

$$G_{cv} = hS \quad \text{est la conductance thermique convective (W/K)}. \quad (1.34)$$

➤ **Conductance radiative :**

Dans l'échange thermique par rayonnement, le flux Φ (en watts) échangé par deux corps (figure 1.15) est :

$$\Phi = \sigma \cdot S \cdot \varepsilon_1 (T_2^4 - T_1^4) = G_r \Delta T \quad (1.35)$$

$$(T_2^4 - T_1^4) = (T_2^2 - T_1^2)(T_2^2 + T_1^2) = (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_2 - T_1) \quad (1.36)$$

$$G_r = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot S (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \quad : \text{Conductance thermique radiative (w/k)} \quad (1.37)$$

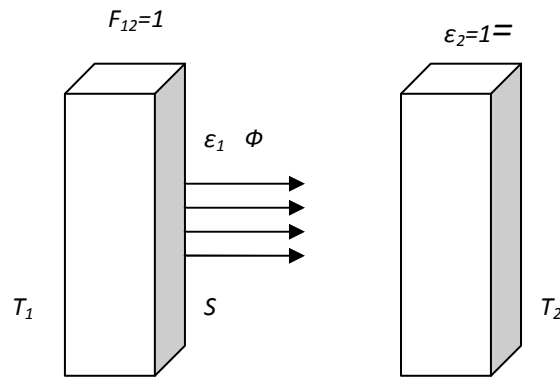


Figure 1.15:Rayonnement thermique

➤ **Conductance fluide :**

Considérons un fluide en circulation dans un guide supposé sans pertes latérales, (figure 1.16), lorsqu'une masse dm de fluide à la température T_i se déplace de la position x à la position $(x+dx)$ pendant un intervalle de temps dt , elle y communique une variation d'enthalpie :

$$dH_i = dm.C_p.T_i \quad (1.38)$$

La puissance transportée à la région d'abscisse $x+dx$ s'écrit donc :

$$\Phi = \frac{dH_i}{dt} = \frac{dm}{dt} C_p T_i = m C_p T_i = G_m T_i \quad (1.39)$$

La quantité $G_m = m C_p$ (en W/K), qui est égale au produit du débit massique de fluide par sa chaleur massique à pression constante, définit la conductance du fluide.

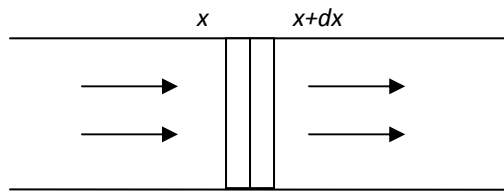


Figure1.16 :Transfert de chaleur par circulation fluide

3.3.1.3. Analyse nodale [19] :

L'analyse nodale d'un système thermique s'effectue en représentant tout sous ensemble isotherme au moyen de nœuds pondérés par la température.

Les échanges de flux entre les nœuds des systèmes discrets s'effectuent à travers des composants représentés par des symboles qualités de thermique : résistances, capacités, sources indépendantes ou liées, linéaires ou non linéaires.

4. Transfert de masse :

D'un point de vue phénoménologique les processus de diffusion, et plus généralement de migration atomique, peuvent être abordés de deux façons :

1. D'une manière assez formelle, à la façon de nombreuses lois d'écoulement en physique,
2. D'une manière beaucoup mieux fondée physiquement grâce à la thermodynamique des processus irréversibles qui justifient (on précise le degré d'approximation) des expressions posées naturellement suivant la démarche.

4.1. Loi de Fick:

La loi de Fick caractérise la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique ρ_f dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique. Le paramètre pertinent du milieu est D_f , qui le coefficient de diffusion moléculaire [7] :

$$J_c = -\rho_f D_f \frac{\partial C_m}{\partial x} \quad (1.40)$$

4.2. Loi de Darcy :

La loi de Darcy caractérise la diffusion d'ensemble d'un fluide de masse volumique ρ_f et de viscosité dynamique μ_f dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique, le paramètre pertinent du milieu est k , qui est la perméabilité intrinsèque [7].

$$J_s = -\rho_f \frac{k_f}{\mu_f} \frac{dP}{dx} \quad (1.41)$$

1. Position du problème:

L'air chauffé dans des insolateurs plans est soufflé à travers des claies contenant des produits agroalimentaires disposés en couches minces. Une méthode simple pour modéliser un tel séchoir consiste à le découper dans le sens de l'écoulement de l'air en tranches fictives d'épaisseur dZ , représentées sur la figure 2.1, dans lesquelles les températures et les humidités sont supposées constantes.

Ainsi, ces grandeurs varient suivant le mode pas à pas, d'une tranche à l'autre. Pour chaque tranche, on écrit les bilans thermiques et massiques dans les différents milieux en présence d'air, de produit, des parois... ; en notant que dans chacune des tranches, les échanges se font avec l'air pris dans les conditions de sortie de la tranche précédente.

Afin de faciliter l'écriture des équations et de mieux visualiser les échanges thermiques au sein d'une tranche, il est commode de représenter sur une figure le réseau électrique équivalent en utilisant les analogies suivantes:

- Densité de flux de chaleur : intensité du courant électrique
- Température: potentiel électrique
- Coefficient de transfert thermique: conductance
- Capacité thermique: capacité électrique

Sur ce réseau, (figure 2.2), chaque milieu est symbolisé par sa température et on représente les résistances, les capacités thermiques, le flux de chaleur du à l'évaporation et perdu par le produit, le flux de chaleur perdu par l'air au cours de son déplacement. Les bilans dans les différents milieux de la tranche fictive considérée s'obtiennent aisément en écrivant l'équilibre des flux en chaque nœud du réseau.

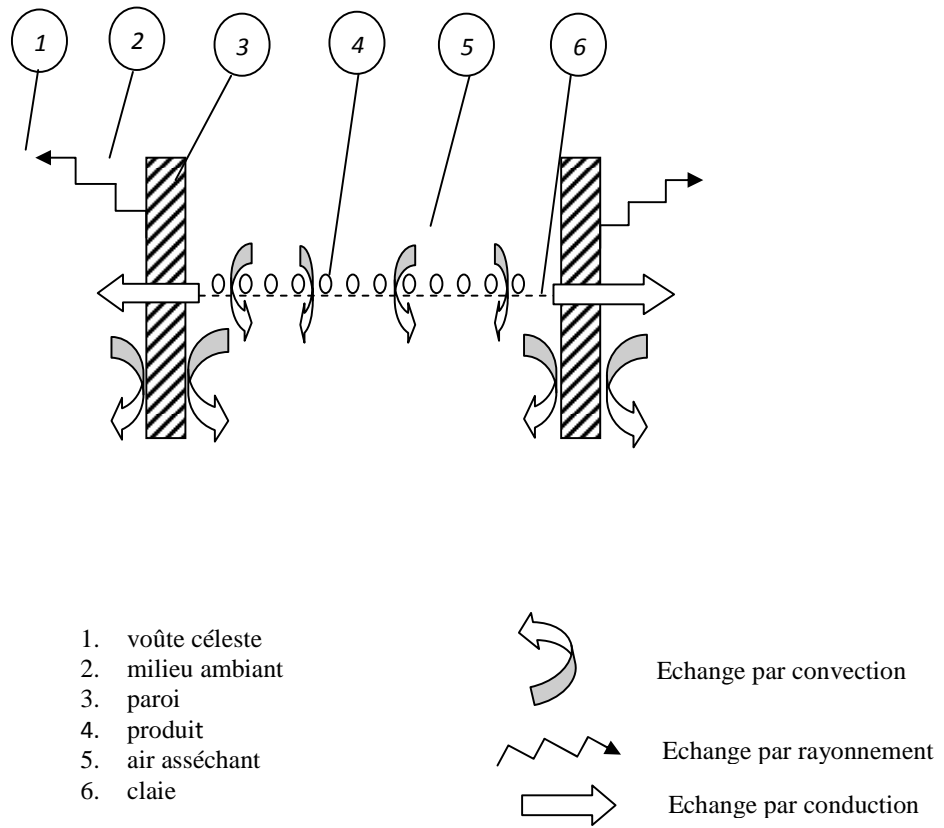


Figure 2.1: Echange thermique dans une tranche de séchoir

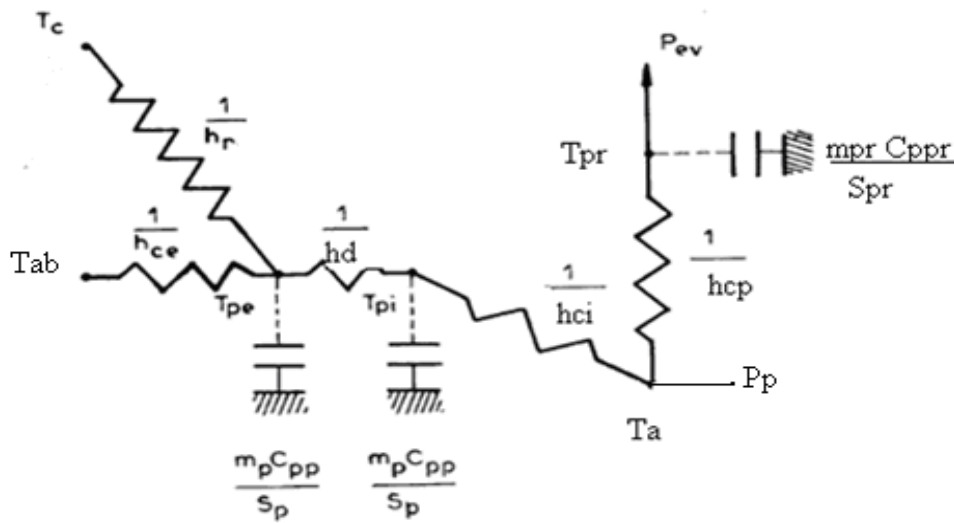


Figure 2.2: Schéma électrique relatif à une tranche de séchoir

2. Hypothèses simplificatrices:

Pour simplifier l'étude des transferts de chaleur et de masse couplés dont le séchoir est le siège, on suppose que:

1. Pour chaque claie, le problème est unidimensionnel dans la direction de l'écoulement de l'air asséchant.
2. Le système fonctionne avec une régulation de la température et du débit.
3. Les échanges radiatifs à l'intérieur de l'armoire de séchage sont négligés.
4. Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés.
5. La température et la teneur en eau à l'intérieur du produit sont supposées uniformes.
6. La conduction claie- produit est négligée
7. Le produit à sécher est coupé en rondelles (faible épaisseur)

8. La variation de volume des produits, au cours du séchage, est négligée

9. Les propriétés physiques du produit sont constantes

3. Mise en équations du système :

- Le bilan thermique au nœud i donne :

$$\frac{m_i C_{p_i}}{S_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \varphi_{conduction} + \varphi_{convection} + \varphi_{rayonnement} \quad (2.1)$$

- Les échanges thermiques décrits sur la figure 2.2 font intervenir les trois modes fondamentaux de transfert.
 - convection entre l'air et la paroi interne du séchoir
 - convection entre la paroi externe du séchoir et l'extérieur
 - conduction à travers les parois du séchoir
 - rayonnement entre la paroi externe du séchoir et la voûte céleste
 - transfert de chaleur lié à l'évaporation
- Les équations qui suivent traduisent les bilans thermiques effectués au niveau d'une tranche d'épaisseur ΔZ de l'armoire de séchage.

➤ **Bilan au niveau de l'air caloporteur :**

$$\dot{m}_a \cdot Cp \cdot \Delta z \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} = h_{cp} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) + h_{ci} \cdot \Delta S_p (T_a - T_{pi}) \quad (2.2)$$

➤ **Bilan au niveau du produit à sécher :** les produits sont le siège de transferts de chaleur et de masse.

$$m_{pr} \cdot Cpp_r \cdot \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} = h_{cp} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) - Pev \quad (2.3)$$

➤ **Bilan au niveau de la paroi isolante intérieure :**

$$m_{pi} \cdot Cppi \cdot \frac{\partial T_{pi}}{\partial t} = h_{ci} \cdot \Delta S_p \cdot (T_a - T_{pi}) - \lambda_d \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pi} - T_{pe}) \quad (2.4)$$

➤ **Bilan au niveau de la paroi isolante extérieure :**

$$m_{pe} \cdot Cppe \cdot \frac{\partial T_{pe}}{\partial t} = \lambda_d \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pi} - T_{pe}) - h_{ce} \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pe} - T_{ab}) - h_r \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pe} - T_c) \quad (2.5)$$

4. Détermination des coefficients d'échange :

4.1. Échanges thermiques

4.1.1. Par convection:

➤ Entre l'air ambiant et la face externe de la paroi de l'armoire de séchage [11]

$$h_{ce} = 5,67 + 3,86V_v \quad (2.6)$$

➤ Entre la face interne de la paroi de l'armoire de séchage et l'air asséchant :

$$h_{ci} = \frac{N_u \cdot \lambda_a}{\Delta Z} \quad (2.7)$$

D'après la référence [18]:

Pour un écoulement turbulent:

$$Re > 5 \cdot 10^5 \text{ et } Pr \geq 0,5$$

$$Nu = 0,35 Re^{0,8} Pr^{0,333}$$

Pour un écoulement laminaire:

$$Re < 5 \cdot 10^5 \text{ et } 10 \geq Pr \geq 0,5$$

$$Nu = 0,628 Re^{0,5} Pr^{0,333}$$

Pr : nombre adimensionnel de Prandtl

ΔZ : hauteur d'une tranche (pas d'espace)

➤ Entre le produit et l'air asséchant [11]:

$$h_{cp} = \frac{N_u \cdot \lambda_a}{D_{pr}} \quad (2.8)$$

Avec :

D_r : diamètre moyen du produit (m).

Nu : nombre de Nusselt.

$$N_u = 0,37 R_e^{0,6} \text{ D'après la relation proposée par Charm 1963 [11]}$$

R_e : nombre de Reynolds.

$$R_e = \frac{\rho_a V_a D_{pr}}{\mu_a}$$

V_a : vitesse de l'air.

4.1.2. Par conduction:

➤ à travers les parois de l'armoire de séchage :

$$\lambda_d = \frac{1}{\frac{e_{pi}}{\lambda_{pi}} + \frac{e_{pp}}{\lambda_{pp}} + \frac{e_{pe}}{\lambda_{pe}}} \quad (2.9)$$

Avec :

λ_{pi} : conductivité thermique de la paroi interne.

e_{pi} : épaisseur de la paroi interne du séchoir.

λ_{pp} : conductivité thermique de l'isolant entre les parois.

e_{pp} : épaisseur de l'isolant entre les parois.

λ_{pe} : conductivité thermique de la paroi externe.

e_{pe} : épaisseur de la paroi externe du séchoir

4.1.3. Par rayonnement:

➤ entre la face externe de la paroi de l'armoire de séchage et la voûte céleste :

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon_p (T_{pe} + T_c)(T_{pe}^2 + T_c^2) \quad (2.10)$$

Où σ est la constante de Stefan Boltzmann

ε_p est l'émissivité de la paroi du séchoir

T_c est la température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de

Swinbank [11]:

$$T_c = 0,0552.T_{ab}^{1.5}$$

4.2. Puissance échangée par changement de phase:

C'est une puissance perdue par le produit. Elle est égale au taux de masse d'eau évaporée multipliée par la chaleur latente de vaporisation:

$$P_{ev} = L_v \cdot \frac{dm}{dt} \quad (2.11)$$

L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, exprimée en $J.kg^{-1}$, donnée par la relation suivante : $L_v = 4186,8(597 - 0,56T_{pr})$

Avec T_{pr} : température de vaporisation prise égale à la température du produit.

$$\frac{dm}{dt} = m_{ps} \left(-\frac{dX}{dt} \right)$$

Où m_{ps} est la matière sèche dans le produit (kg)

$\left(-\frac{dX}{dt} \right)$: Vitesse de séchage exprimée en (kg d'eau / kg matière sèche.min)

La détermination de la cinétique de séchage se fait par calcul direct de la dérivée de la teneur en eau à partir des points expérimentaux.

Le principe de la méthode développée par Van Meel [20] consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant t $\left(-\frac{dX}{dt} \right)_t$, à la vitesse de première

phase $\left(-\frac{dX}{dt} \right)_I$, dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite

$\frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}}$. Etant donné que la première phase est absente dans le cas des produits agroalimentaires, alors on prend $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_0$ et $X_{cri} = X_0$.

Ainsi, la forme générale de l'équation de la courbe caractéristique de séchage est donnée par :
 $f = f(X^*)$

$$\text{Abscisse : } X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$$

$$\text{Ordonnée: } f = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I} = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0}$$

Où X_0 est la teneur en eau initiale du produit.

X_{eq} est la teneur en eau finale, c'est une caractéristique de chaque produit. C'est la valeur optimale, pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles et organoleptiques (Forme, texture, couleur, odeur et huiles essentielles).

4.3. Critère de choix du modèle approprié

Plusieurs modèles empiriques ou semi empiriques sont utilisés pour décrire les cinétiques de séchage et prédire la teneur en eau réduite X^* en fonction du temps de séchage. Pour décrire l'allure de séchage des oignons et de la tomate et déterminer l'équation empirique la plus adéquate, nous avons utilisé huit modèles de séchage en couches minces pour les produits agroalimentaires [21, 22,23, 24, 25,26]. Le Tableau (2.1) regroupe les équations empiriques de séchage utilisées dans la modélisation.

Tableau 2. 1: Modèles de séchage appliqués à la description des courbes de séchage

Nom du modèle	Expression du modèle
Newton	$X^* = \exp(-kt)$
Page	$X^* = \exp(-kt^n)$
Modified page	$X^* = \exp[-(kt)^n]$
Henderson et Pebis	$X^* = a \exp(-kt)$
Logarithmique	$X^* = a \exp(-kt) + c$
Two-term	$X^* = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Two-term exponentiel	$X^* = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
Midilli et al.	$X^* = a \exp(-kt^n) + bt$

Le modèle approprié à la description de l'allure de la cinétique de séchage de l'oignon ou de la tomate est choisi selon les critères suivants :

- Coefficient de corrélation (R^2) élevé
- χ -carré réduite minimale.

5. Méthode numérique de résolution:

Pour résoudre les équations de ce modèle, on a choisi la méthode de résolution numérique aux différences finies implicite, qui n'impose de restriction ni sur les pas de temps Δt ni sur les pas d'espace ΔZ . Dans cette méthode, toutes les inconnues sont exprimées au temps (t). Il en résulte un système de quatre équations à quatre inconnues.

5.1. Discrétisation des équations:

Pour déterminer les différentes températures (des parois du séchoir, de l'air et du produit au niveau de chaque claie) et les teneurs en eau du produit au niveau de chaque claie, nous avons discrétisé les équations précédentes par la méthode explicite (vers l'arrière) [27]. Ceci conduit à un système de quatre équations à quatre inconnues que l'on peut mettre sous la forme condensée suivante: $[A]X^n = B^n$

➤ **L'air asséchant T_{ai} :**

$$\dot{m}_a C_{p_a} (T_a^t(i-1) - T_a^t(i)) = h_{cp} S_{pr} (T_a^t(i-1) - T_{pr}^t(i)) + h_{ci} \Delta S_p (T_a^t(i-1) - T_{pi}^t(i)) \quad (2.12)$$

➤ **Au niveau du produit à sécher T_{pr} :**

$$m_{pr} C_{ppr} (T_{pr}^t(i) - T_{pr}^{t-\Delta t}(i)) = h_{cp} S_{pr} (T_a^t(i-1) - T_{pr}^t(i)) - L_v m_{ps} \frac{X^t(i) - X^{t-\Delta t}(i)}{\Delta t} \quad (2.13)$$

➤ **Au niveau de la paroi isolante intérieure T_{pi} :**

$$m_{pi} C_{ppi} (T_{pi}^t(i) - T_{pi}^{t-\Delta t}(i)) = h_{ci} \Delta S_p (T_a^t(i-1) - T_{pi}^t(i)) - \lambda_d \Delta S_p (T_{pi}^t(i) - T_{pe}^t(i)) \quad (2.14)$$

➤ **Au niveau de la paroi isolante extérieure : T_{pe}**

$$m_{pe} C_{ppe} (T_{pe}^t(i) - T_{pe}^{t-\Delta t}(i)) = \lambda_d \Delta S_p (T_{pi}^t(i) - T_{pe}^t(i)) - h_{ce} \Delta S_p (T_{pe}^t(i) - T_{ab}) - h_r \Delta S_p (T_{pe}^t(i) - T_c) \quad (2.15)$$

5.2. Durée du processus:

La durée totale de la simulation correspond au temps d'équilibre hydrique et thermique du produit, il est théoriquement infini. En pratique, nous avons adopté un critère basé sur la teneur en eau du produit.

$$X(t_f) - X_{eq} \leq \varepsilon$$

5.3. Résolution numérique:

5.3.1. Choix et principe de la méthode:

Pour la résolution numérique des systèmes d'équations, nous avons adopté la méthode itérative de **Gauss Seidel**, dont le principe consiste à :

- Choisir une distribution approximative initiale arbitraire $U^{(0)}$ (U désignant T)
- Calculer une suite de solutions approchées $U^{(p)}$, en affinant progressivement la solution jusqu'à obtenir un champ approchant suffisamment la solution exacte U^*

Il y'a convergence si

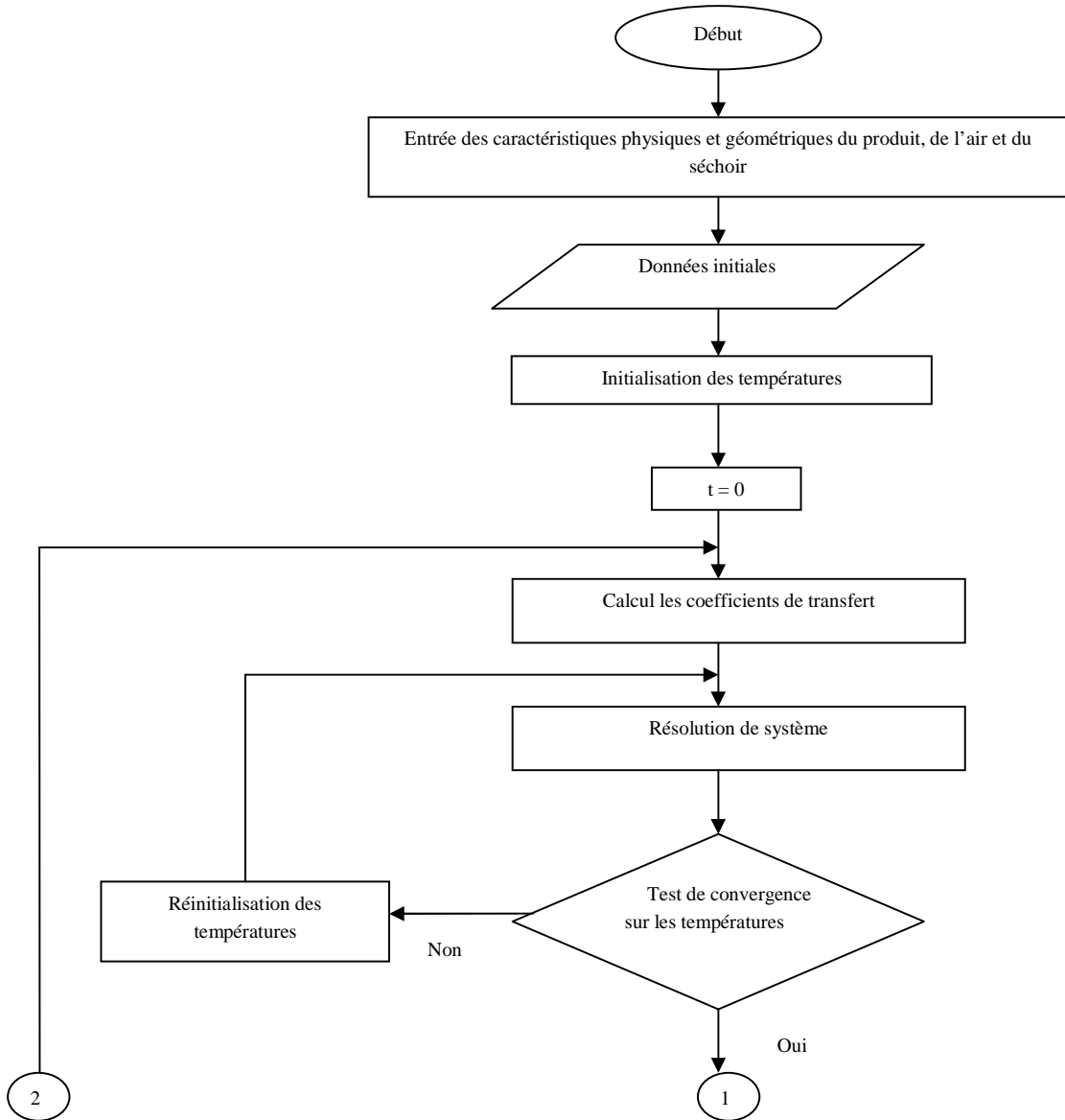
$$\lim U^{(p)} = U^*$$

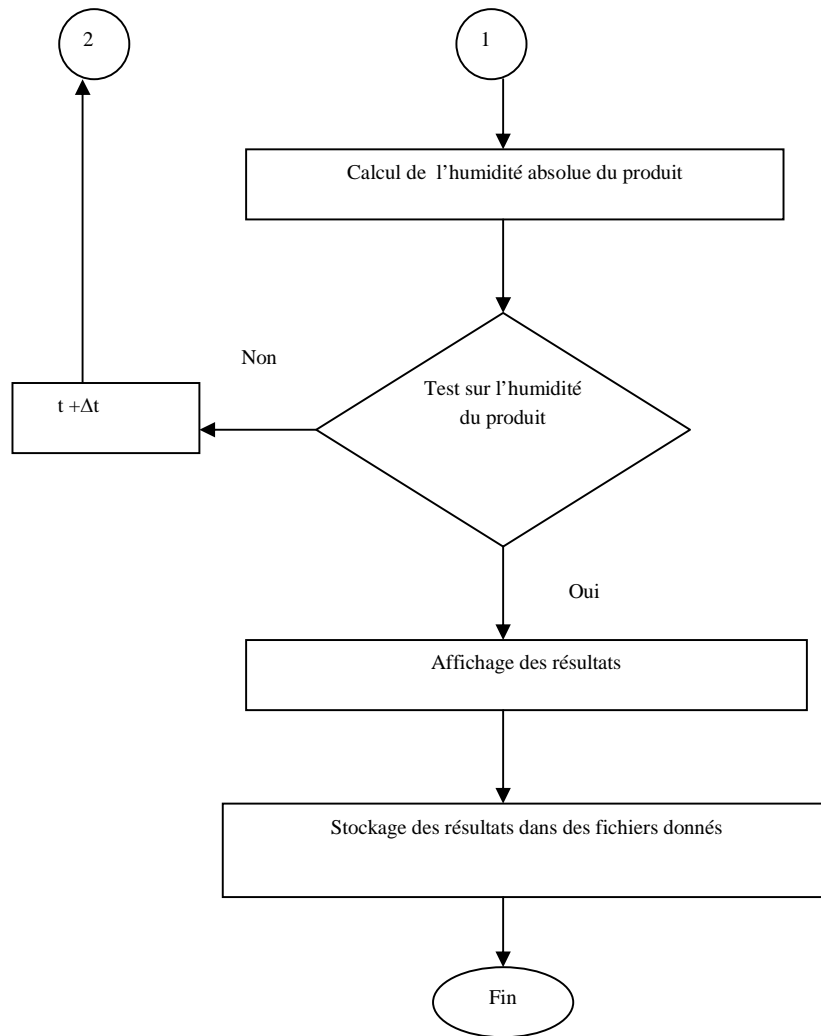
- Arrêter enfin les itérations selon un critère défini

Notre choix s'est porté sur cette méthode pour les raisons suivantes :

1. Nous avons à résoudre des systèmes de grande taille pour lesquels les méthodes directes sont inadaptées. Dans ce cas, les méthodes itératives sont plus appropriées car elles présentent les avantages suivants :
 - Plus rapides en temps de calcul et moins coûteuses en nombre d'opérations en mémoire machine que les méthodes directes.
 - Peu sensibles à l'accumulation des erreurs d'arrondis (dues à l'utilisation d'un ordinateur).
2. Nous pouvons contrôler la précision des résultats obtenus en fonction du nombre d'itérations (p).

5.3.2. Organigramme:





Dans ce chapitre consacré à la validation du modèle numérique, la première partie de ce chapitre expose les résultats expérimentaux des paramètres des produits à sécher (tomate, oignon) intervenant dans la modélisation. Des formulations semi-empiriques concernant ces grandeurs ont été proposées. Dans la seconde partie, on retrouve une confrontation entre les résultats expérimentaux et la simulation.

1. Plan expérimental de l'étude du séchage:

L'influence de deux variables expérimentales sur la cinétique de séchage a été étudiée: la température et la vitesse. A cette fin, un plan expérimental pour chaque produit (tomate et oignon) est présenté.

Pour la tomate, un ensemble de neuf essais a été réalisé pour des valeurs de température de l'ordre de 50°C à 75 °C pour des valeurs de vitesse de l'air comprises entre 1 et 2m/s.

Pour l'oignon, un ensemble de six essais a été réalisé pour des valeurs de température de l'ordre de 45°C à 65 °C pour des valeurs de vitesse de l'air comprises entre 1,5 et 2,5m/s.

2. Matériel et mode opératoire:

2.1. Description du système de séchage:

Le système étudié présenté sur la figure 3.1, est un séchoir convectif constitué des éléments suivants:

Une unité de production d'air chaud : Elle est constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage, de surface inclinée, la latitude de la ville de Ouargla 30° par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. L'absorbeur en tôle métallique est peint en noir. L'isolation thermique est en polystyrène et le vitrage est en verre.

Une chambre de séchage : Elle est de hauteur 2,8 m, de longueur 1 m, et de largeur 0,63 m. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polystyrène de 6 cm d'épaisseur. Cette chambre comporte 6 claies (étagères) sur lesquelles est posé le produit à sécher.

L'air chauffé pénètre à travers les claies pour sortir par un ventilateur d'aspiration dans un écoulement par convection forcée.

Des ventilateurs: C'est un élément qui permet de créer un écoulement forcé.

Une unité de production d'énergie d'appoint: Elle est constituée de résistances électriques à ailettes pilotées par un thermostat. Cette source de chaleur est placée à l'entrée de la chambre de séchage, cette unité assure un chauffage d'appoint en cas d'insuffisance de l'apport solaire.

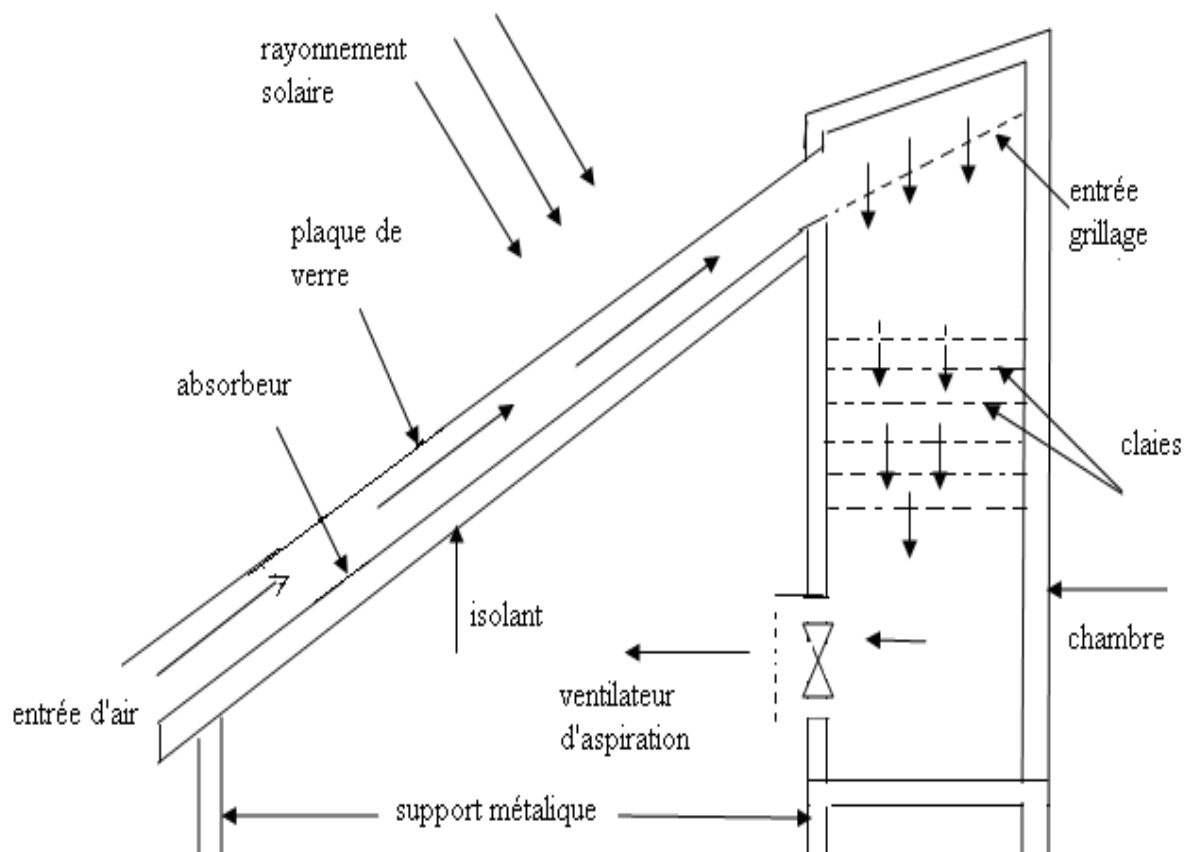


Figure 3.1 : Schéma descriptif du séchoir solaire

2.2. Préparation du produit:

On donne ici quelques informations sur la préparation correcte des aliments pour un séchage efficace.

- a. Pour obtenir un séchage uniforme, il faut que l'épaisseur des tranches soit la plus uniforme possible.
- b. Le lavage du produit pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations
- c. Couper et enlever les parties en haut et en bas.
- d. Découpage du produit en rondelles de 1 cm d'épaisseur.
- e. Dépôt des rondelles sur les claies, la masse initiale du produit à sécher est de 2 kg par claie telle que pour notre séchoir la claie de 0,47 m de largeur et de 0,83m de longueur.
- f. Pour l'oignon, enlever la peau extérieure.

2.3. Méthode de travail:

Pour suivre la quantité d'eau évaporée du produit au cours du séchage, nous avons mesuré le poids chaque 60 minutes à l'aide d'une balance. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale, par exemple pour l'oignon c'est 7 % [28] et pour la tomate 13% [7]. Les mesures de température, du rayonnement, et de la vitesse de l'air sont effectuées chaque 30 minutes.

2.4. Appareillages de mesures:

2.4.1. Détermination de l'humidité initiale et la masse sèche des produits à sécher:

La détermination de l'humidité initiale et la masse sèche du produit s'effectue à l'aide d'un analyseur d'humidité type MA 45 selon les étapes suivantes:

- Réglage de la température de l'analyseur d'humidité à 70°C pour la tomate [22] et 55°C pour l'oignon [15].

- Introduction d'une masse initiale du produit dans la chambre de l'analyseur.
- Démarrage de l'analyseur d'humidité en choisissant le programme convenable de chauffage.

Arrêt automatique de l'appareil dès que la masse de l'échantillon devient constante

L'analyseur est équipé d'une balance à affichage numérique de précision 0,001 qui mesure la masse du produit durant le fonctionnement de l'appareil.

2.4.2. Mesure du rayonnement solaire:

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en W/m^2 à l'aide d'un solarimètre et ceci durant la journée de l'expérience. Les résultats obtenus sont affichés par un appareil à affichage numérique (voir l'annexe A).

2.4.3. Mesures des températures:

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples de type K dans plusieurs endroits du séchoir solaire:

- Entrée et sortie du capteur solaire
- Entrée et sortie de la chambre de séchage
- Au niveau des claies portant le produit à sécher

Les résultats sont affichés sur un appareil Testo 445 (voir l'annexe A).

2.4.4. Mesures de l'humidité et de la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre:

L'humidité et la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage sont mesurées respectivement à l'aide d'une sonde à affichage numérique et d'un anémomètre connecté à un appareil de marque Testo 645 (voir l'annexe A).

2.4.5. Mesures de la vitesse et de la température de l'air extérieur:

Les mesures de la vitesse et de la température de l'air extérieur sont effectuées à l'aide d'un appareil KIMO type LV 110 (voir l'annexe A).

Les mesures de la vitesse et de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur sont effectuées à l'aide d'un appareil Testo 425 (voir l'annexe A).

3. Analyse des résultats expérimentaux et validation du modèle:

Ces deux parties consacrées à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus pour les deux produits à sécher (tomate et oignon), ainsi qu'à la validation de notre modèle numérique. Cette étape est réalisée à travers une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de la simulation. L'objectif recherché ici est de valider les prédictions du modèle numérique concernant l'évolution de la teneur en eau à base sèche, ainsi que la vitesse de séchage et la température du produit à sécher.

3.1. Résultats expérimentaux:

3.1.1. Séchage de la tomate:

Le séchage de la tomate commencé par une humidité relative initiale autour de 98 % et continue jusqu' à la teneur en humidité finale d'environ 13 % [7], ce qui à été alors pris comme humidité d'équilibre.

Les expériences de séchage sont réalisées pour trois températures de l'air asséchant: 50°C, 60°C, et 75°C et pour trois vitesses d'air : 1m/s, 1,5 m/s et 2 m/s.

Les différentes conditions expérimentales de séchage sont présentées dans le tableau (3.1)

Tableau 3.1: Conditions expérimentales pour le séchage de la tomate

N° essai	Température de l'air (°C)	Vitesse de l'air (m/s)	Temps de séchage (min)
1	50	1	840
2	50	1,5	720
3	50	2	660
4	65	1	555
5	65	1,5	480
6	65	2	420
7	75	1	420
8	75	1,5	360
9	75	2	300

3.1.1.1. Cinétique du séchage de la tomate:

➤ Influence de la température de l'air sur la cinétique de séchage de la tomate :

A partir des données expérimentales on obtient une courbe représentant la perte de masse en fonction du temps. La courbe de séchage est représentée par l'évolution de la teneur en eau sur base sèche ou la teneur en eau sur base sèche réduite en fonction du temps.

Pour une même vitesse d'air asséchant, la vitesse de séchage initiale augmente quand la température de l'air asséchant croît les figures (3.2 et 3.3 et 3.4) et par conséquent la teneur en eau de la tomate diminue considérablement.

Les figures (3.5 et 3.6 et 3.7) représentant les variations de la teneur en eau sur base sèche réduite en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant. On observe sur ces figures que l'influence de ce paramètre apparaît comme le paramètre le plus important que celle de la vitesse au début de séchage. En effet, l'augmentation de la température de l'air chauffé, provoque une augmentation de la diffusivité hydrique du produit et en conséquence une accélération de la migration interne de l'eau.

Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux sur le séchage des produits agro-alimentaires [3, 14, 23, 28, 29, 30, 31, 32, 33].

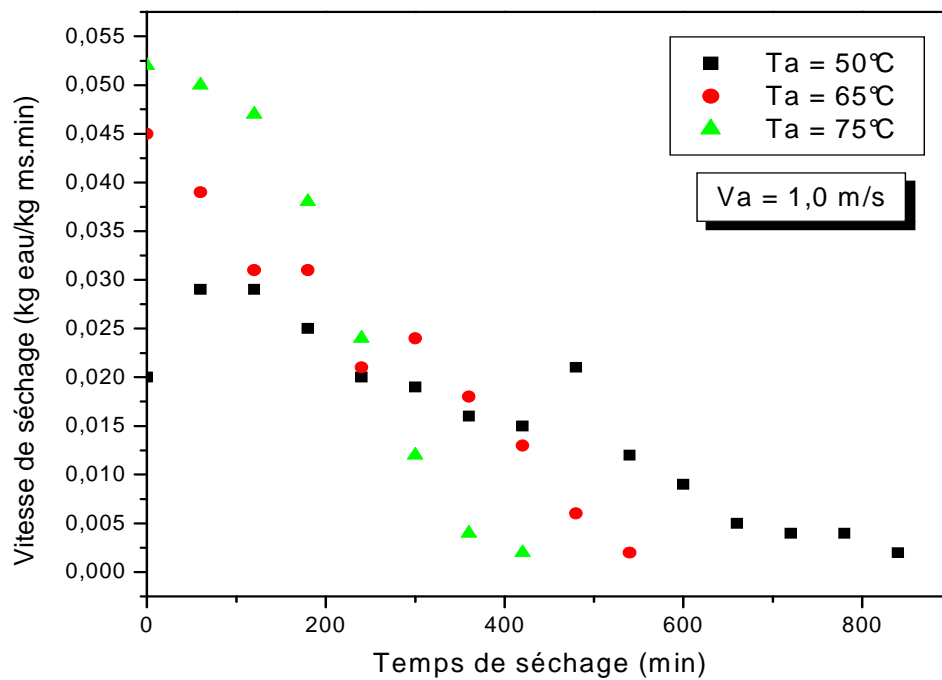


Figure 3.2: La vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,0$ m/s

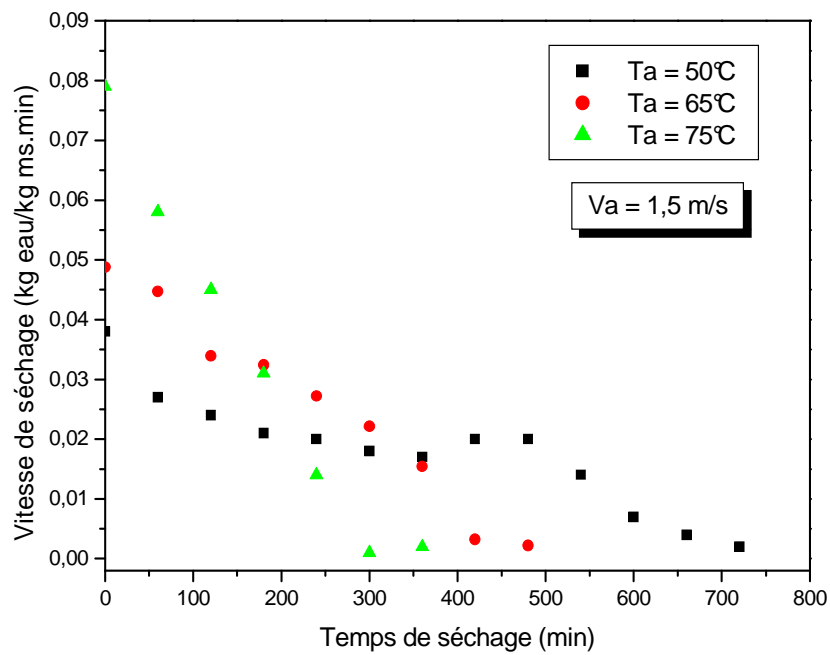


Figure 3.3: La vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,5$ m/s

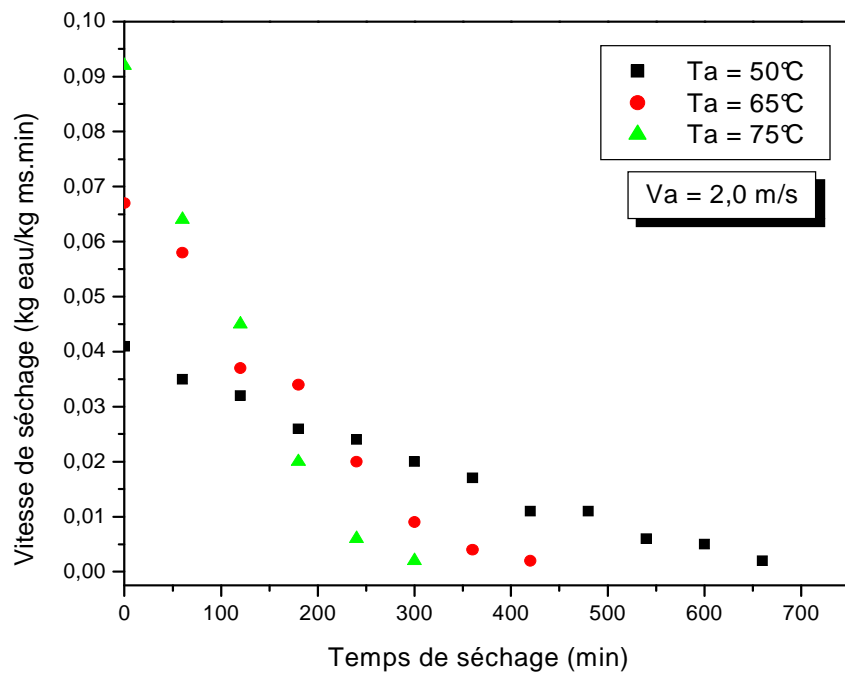


Figure 3.4: La vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 2,0$ m/s

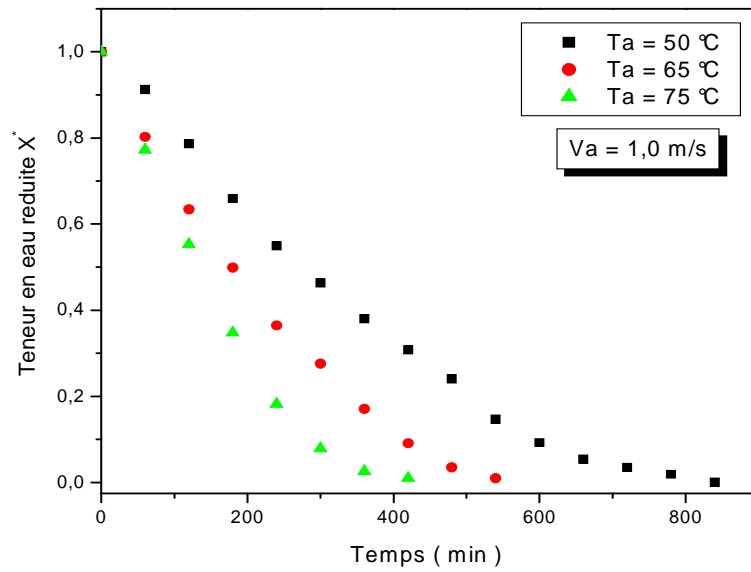


Figure 3.5: Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,0$ m/s

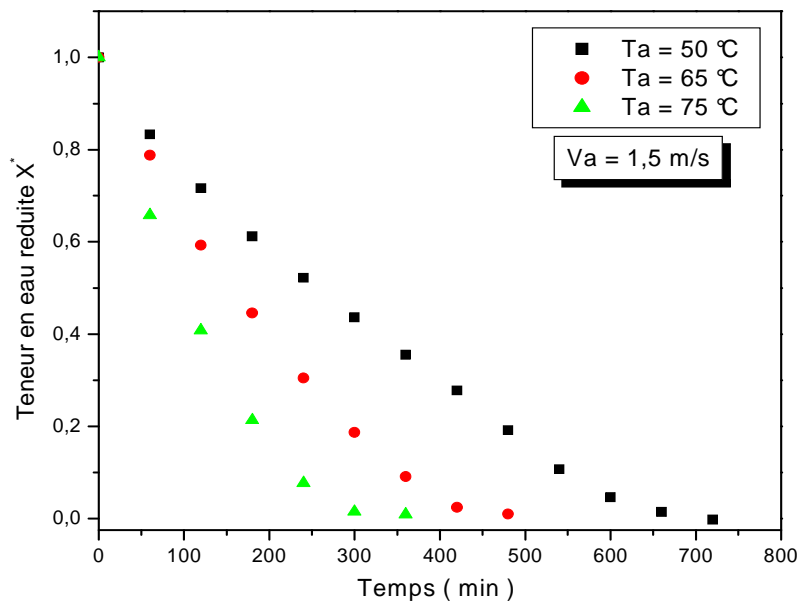


Figure 3.6: Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,5$ m/s

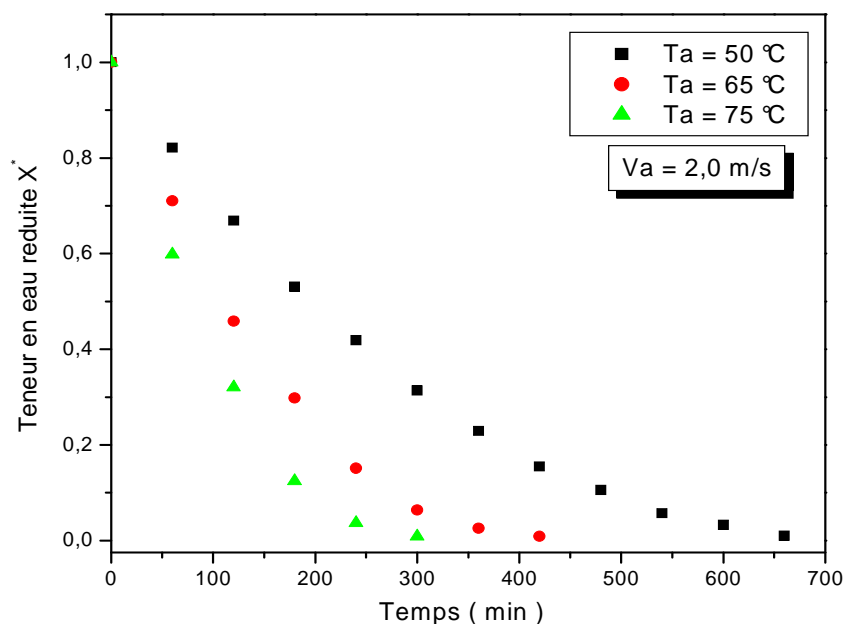


Figure 3.7: Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 2,0$ m/s

➤ Influence de la vitesse de l'air sur la cinétique du séchage de la tomate :

On observe globalement une influence de la vitesse de l'air asséchant sur la vitesse de séchage illustré sur les figures 3.8 et 3.9 et 3.10. Ces figures montrent qu'au début de séchage la vitesse initiale de séchage augmente nettement avec la vitesse de l'air asséchant. Les figures (3.11 et 3.12 et 3.13) représentant les variations de la teneur en eau sur base sèche réduite en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant. Ces figures montrent que l'augmentation du débit (vitesse de l'air) favorise les échanges convectifs et entraîne un séchage presque uniforme. Ce résultat traduit par la vitesse de séchage est lié au coefficient de transfert de chaleur qui augmente avec la vitesse de l'air asséchant.

On remarque que l'influence de ce facteur demeure plus faible que celle de la température. Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux sur le séchage des produits agroalimentaires [14, 23, 28, 30, 31, 32].

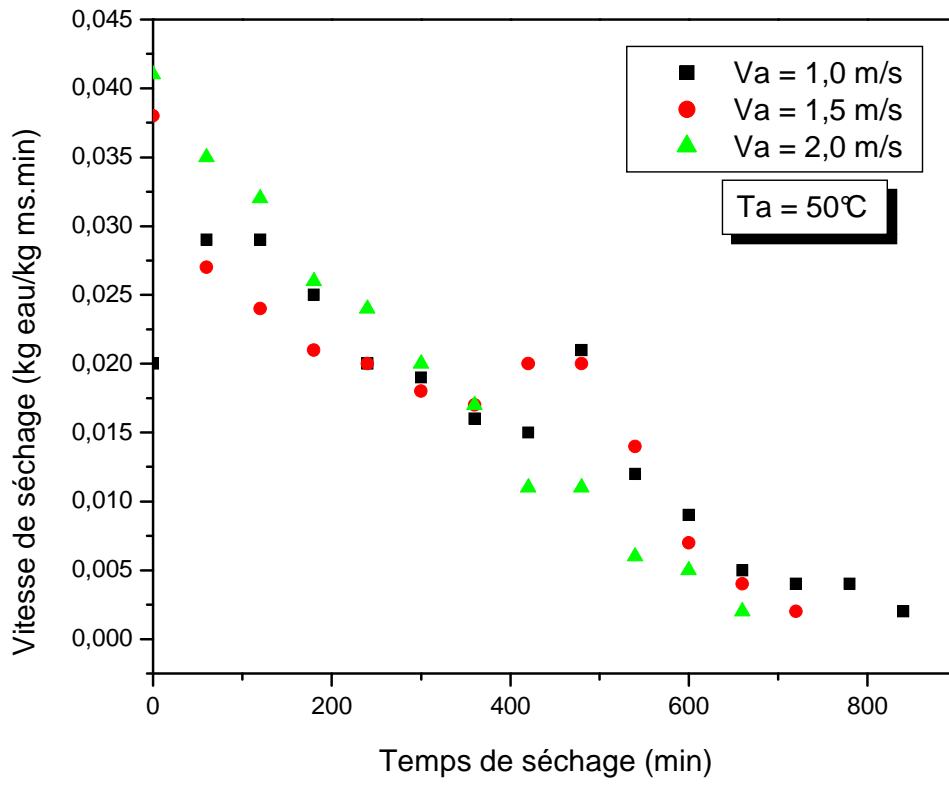


Figure 3.8: La vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 50^\circ\text{C}$

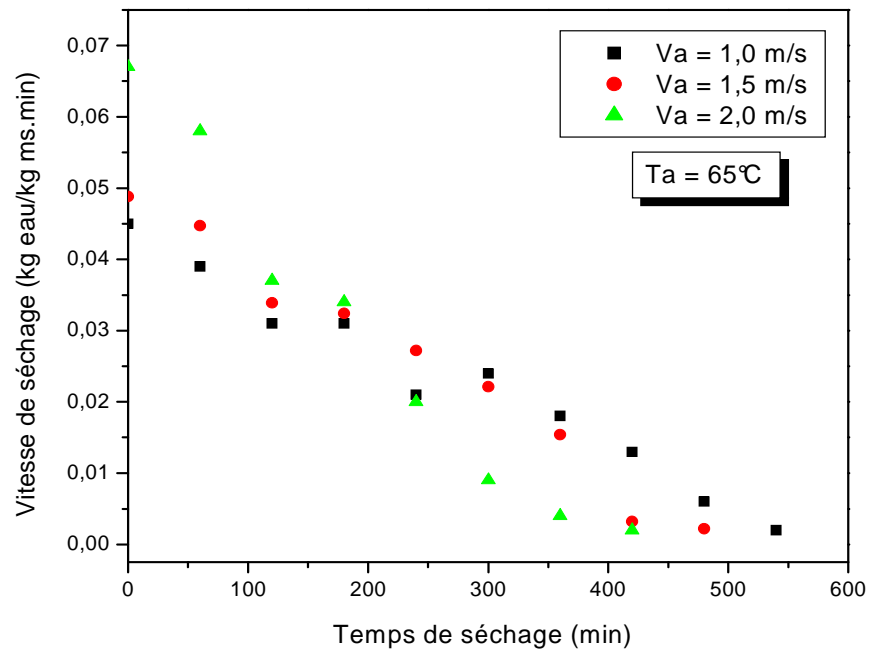


Figure 3.9: La vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 65^\circ\text{C}$

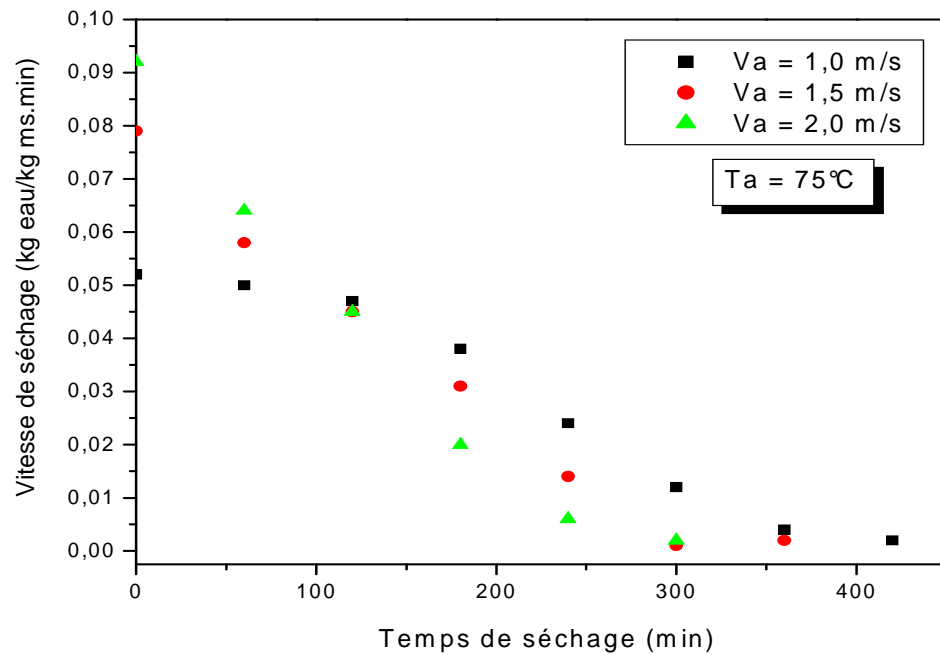


Figure 3.10: La vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 75^\circ\text{C}$

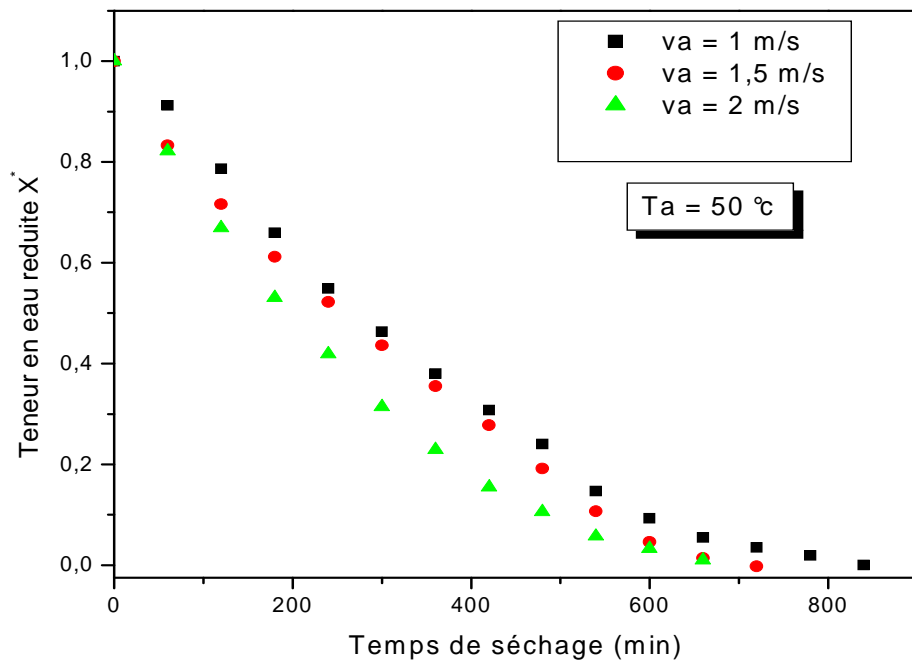


Figure 3.11: Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 50^\circ\text{C}$

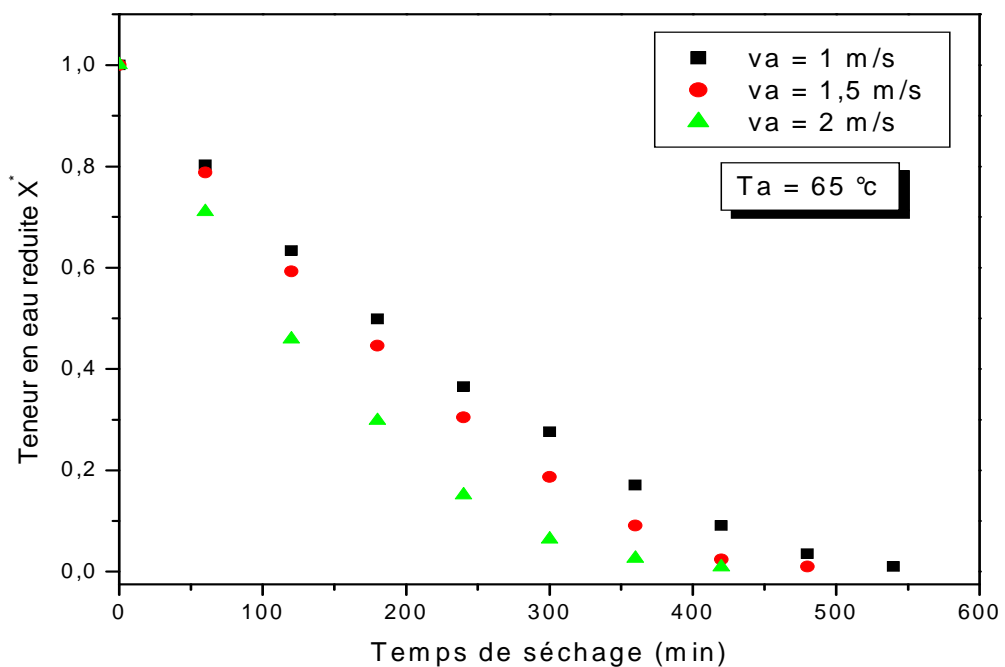


Figure 3.12: Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 65^\circ\text{C}$

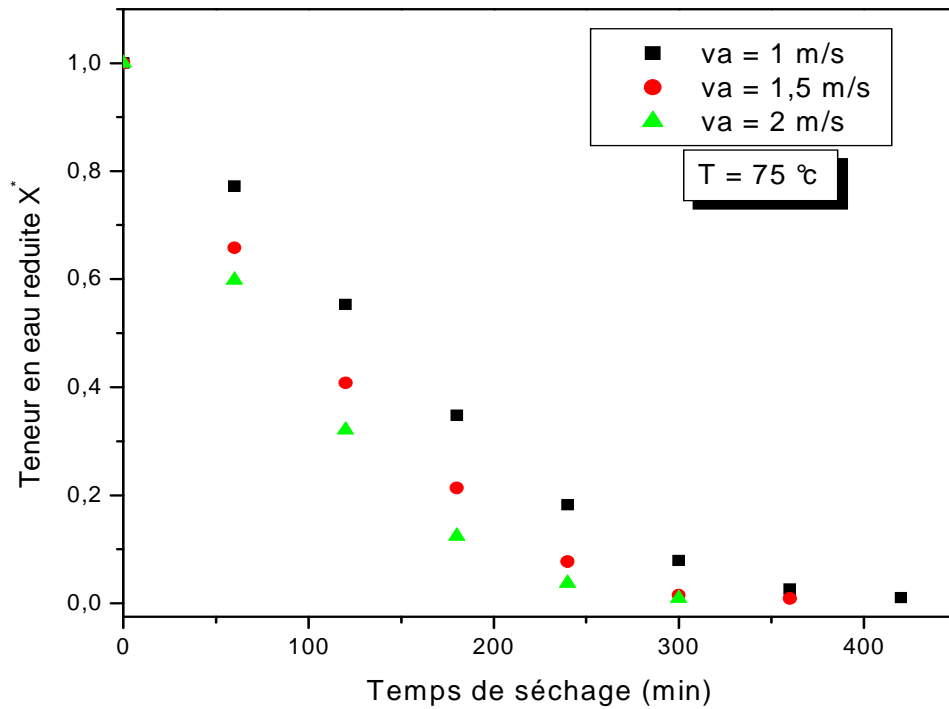


Figure 3.13: Teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 75^\circ\text{C}$

Les figures (3.2, 3.3, 3.4, 3.8, 3.9 et 3.10) montrent le type de courbe de vitesse de séchage obtenue pour les essais effectués.

On note l'absence de la phase à allure croissante et de la phase à allure constante et la présence unique de la phase à allure décroissante. Ceci est conforme aux résultats expérimentaux de certains auteurs pour le séchage de la tomate: D.Mennouche [7] et H.Ridene et al [3].

3.1.1.2. Modélisation de la teneur en eau réduite et courbes caractéristiques de séchage:

➤ **Teneur en eau réduite :**

Les courbes présentant les teneurs en eau réduite en fonction du temps de séchage sont décrites par huit modèles de séchage en couche mince des produits agro-alimentaires, le meilleur modèle est choisi selon les critères suivants:

- Coefficient de corrélation (R^2) élevé
- X^2 réduite minimale

D'après les résultats expérimentaux le modèle de Midilli et al a montré une bonne corrélation avec les courbes expérimentales. Le tableau (3.2) montre les coefficients de chaque modèle pour $T=50^\circ\text{C}$, et $v=2\text{m/s}$.

Tableau 3.2: Modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage de la tomate pour $T= 50^\circ\text{C}$, et $V= 2 \text{ m/s}$.

Modèle	Coefficient	R^2	X^2
Newton $X^* = \exp(-kt)$	$K=0,00403$	0,98308	0,00184
Page $X^* = \exp(-kt^n)$	$K=0,000980$ $n = 1,24999$	0,99692	0,00037
Modified page $X^* = \exp[-(kt)^n]$	$K=0,0039$ $n = 1,2586$	0,99694	0,00037
Henderson et Pebis $X^* = a \exp(-kt)$	$a = 1,04582$ $k = 0,00421$	0,98593	0,00168

Modèle	Coefficient	R ²	X ²
Logarithmique $X^* = a \exp(-kt) + c$	a = 1,18971 k = 0,00291 c = -0,18021	0,99912	0,00012
Two-term $X^* = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	a = -34,95557 k ₀ = 0,00715 b = 35,9448 k ₁ = 0,00701	0,99703	0,00044
Two-term exponentiel $X^* = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	a = 1,78684 k = 0,00559	0,99625	0,00045
Midilli et al $X^* = a \exp(-kt^n) + bt$	a = 0,99569 k = 0,0017 n = 1,12926 b = -0,00011	0,99958	0,00006

En effet la figure 3.14 montre une bonne concordance entre les teneurs en eau réduites expérimentales et les teneurs en eau réduites calculées par le modèle de Midilli et al.

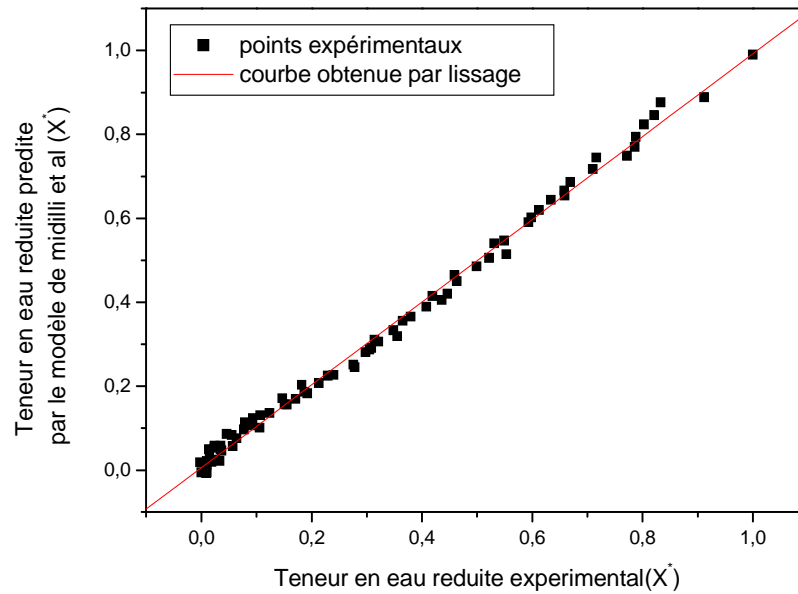


Figure 3.14 : Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et al en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la tomate.

- **Détermination des constantes du modèle de Midilli :**

Les constantes du modèle: K (min^{-1}) et b (min^{-1}), et les coefficients a et n (sans dimension).

Pour déterminer ces coefficients on utilise la méthode de régression non-linéaire pour chaque température et pour chaque vitesse: tableau (3.3).

Tableau 3.3: Les constantes de séchage pour le modèle de Midilli et al pour la tomate

Température (°C)	Vitesse (m/s)	Les constantes	R ²	X ²
T = 50 °C	1	a = 0,99 k = 0,00069 n = 1,22 b = -0,0001	0,99729	0,00031
	1,5	a = 0,99 k = 0,00078 n = 1,22 b = -0,0001	0,99197	0,00086
	2	a = 0,99 k = 0,00102 n = 1,22 b = - 0,0001	0,99871	0,00014
T = 65 °C	1	a = 0,99 k = 0,0012 n = 1,22 b = -0,0001	0,99769	0,00027
	1,5	a = 0,99 k = 0,00144 n = 1,22	0,99715	0,00035

		b = - 0,0001		
	2	a = 0,99 k = 0,00212 n = 1,22 b = - 0,0001	0,99896	0,00014
T = 75 °C	1	a = 0,99 k = 0,00184 n = 1,22 b = - 0,0001	0,99511	0,00067
	1,5	a = 0,99 k = 0,00262 n = 1,22 b = - 0,0001	0,9983	0,00024
	2	a = 0,99 k = 0,00330 n = 1,22 b = - 0,0001	0,99916	0,00017

On observe sur ce tableau que la constante K varie avec la température et la vitesse mais les autres coefficients a , b , et n sont constantes telles que :

- $a = 0,99$
- $b = - 0,0001$
- $n = 1,22$

Pour déterminer la formule de la constante K on s'est basé sur ORIGINE 6.0 par la méthode régression non-linéaire.

$$K = 0,01833V^{0,83791} \exp\left(\frac{-179,00045}{T}\right) \quad (3.1)$$

Telle que V : est la vitesse de l'aire asséchant

T : est la température de l'air asséchant

$$\text{Donc : } X^* = a \exp(-k.t^n) + b.t$$

Ces expressions peuvent être employées pour estimer la teneur en eau réduit de la tomate à tout moment pendant le processus du séchage pour différentes conditions de l'air.

➤ Courbe caractéristique du séchage :

Pour pouvoir décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelle condition de l'air nous avons utilisé le principe de la courbe caractéristique de séchage. La détermination de la courbe caractéristique correspond à l'expression de la variation d'une vitesse de séchage réduite en fonction d'une teneur en eau réduite X^* . Nous cherchons donc sur une expression du type :

$$\frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I} = f(X^*)$$

Avec $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t$: vitesse de séchage à un instant t (kg /kg.ms.minute)

$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I$: Vitesse de séchage (kg /kg.ms.minute) pendant la première phase (la phase à vitesse constante), prise égale à la valeur de vitesse de séchage au point $X^* = 1$.

A partir de nos expériences, nous avons établi la corrélation expérimentale de la vitesse de séchage normée de la tomate.

Nous avons utilisé la méthode d'optimisation non linéaire de Marquard-Levenberg [20,34] en utilisant le logiciel ORIGINE 6.0 et traitant tous les points expérimentaux. Le meilleur lissage est obtenu en choisissant comme critère d'évaluation un coefficient de corrélation R^2 élevé et X^2 minimale.

La figure 3.15 représente les valeurs expérimentales des vitesses de séchage réduites des essais ainsi que la courbe caractéristique obtenue par lissage. Cette figure montre que la vitesse de séchage normée de la tomate sous forme d'un polynôme d'ordre 3 en fonction X^* selon l'expression (3.2).

$$f(X^*) = 0,03972 + 2,48916X^* - 3,71419X^{*2} + 2,31832X^{*3} \quad (3.2)$$

$$R^2 = 0,9082$$

$$X^2 = 0,00943$$

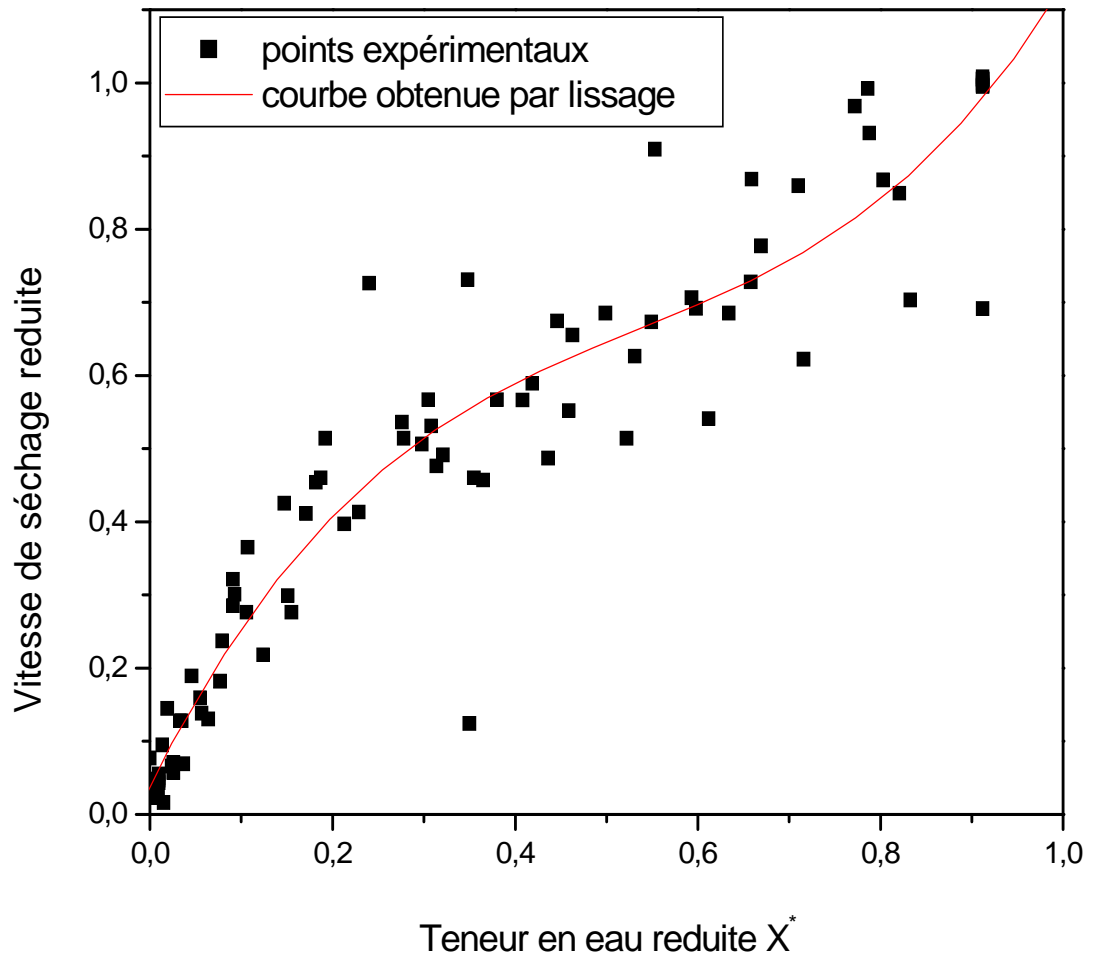


Figure 3.15 : Courbe caractéristique de séchage de la tomate

3.1.2. Séchage de l'oignon:

Durant l'opération de séchage de l'oignon nous avons commencé par une humidité relative initiale autour de 86%, et nous avons continué jusqu'à la teneur en humidité finale environ de 7 à 8 % [28]. Cette dernière est la valeur optimale pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles.

Les expériences de séchage sont réalisées pour trois températures de l'air asséchant : 45°C, 55°C, et 65°C et pour trois valeurs de sa vitesse : 1,5m/s, 2m/s, et 2,5m/s.

3.1.2.1. Cinétique du séchage:

➤ Influence de la température et la vitesse de l'air asséchant sur la cinétique du séchage du l'oignon :

Les figures 3.16 et 3.17 montrent l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant et pour différentes valeurs de sa vitesse respectivement. On observe que pour un même débit d'air asséchant (vitesse d'air), la vitesse de séchage augmente quand la température de l'air asséchant croît et par conséquent la teneur en eau de l'oignon diminue considérablement (figure 3.16) et nous constatons que pour une même température de l'air asséchant, une augmentation du débit d'air asséchant favorise l'accélération du processus de séchage (figure 3.17).

Ce résultat en accord avec d'autres travaux sur le séchage de l'oignon: P.N.Sasarvadia et al [28] et L.Bennamoun [29] et P.N.Sasarvadia [33].

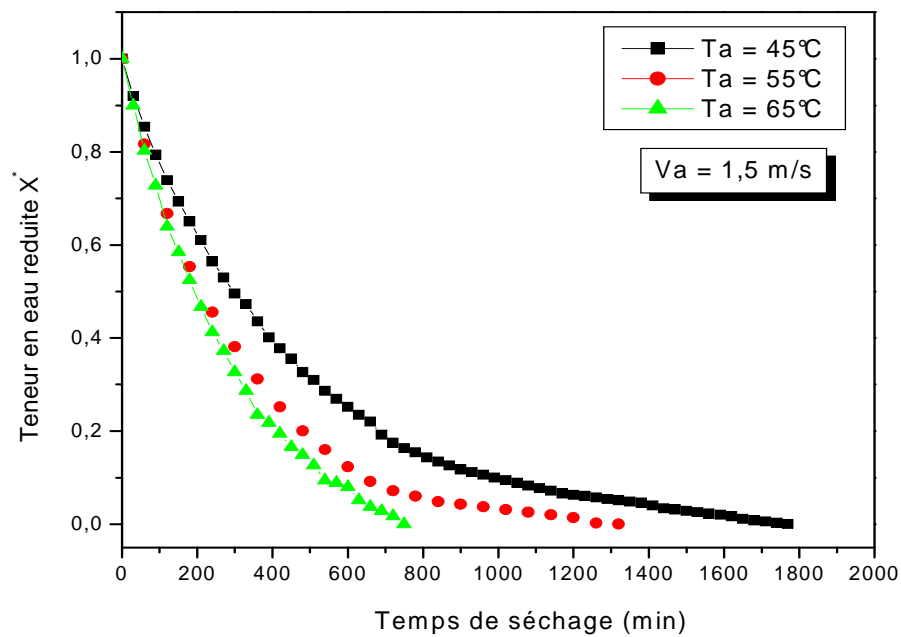


Figure 3.16: Teneur en eau réduite de l'oignon en fonction du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant pour $V_a = 1,5 \text{ m/s}$

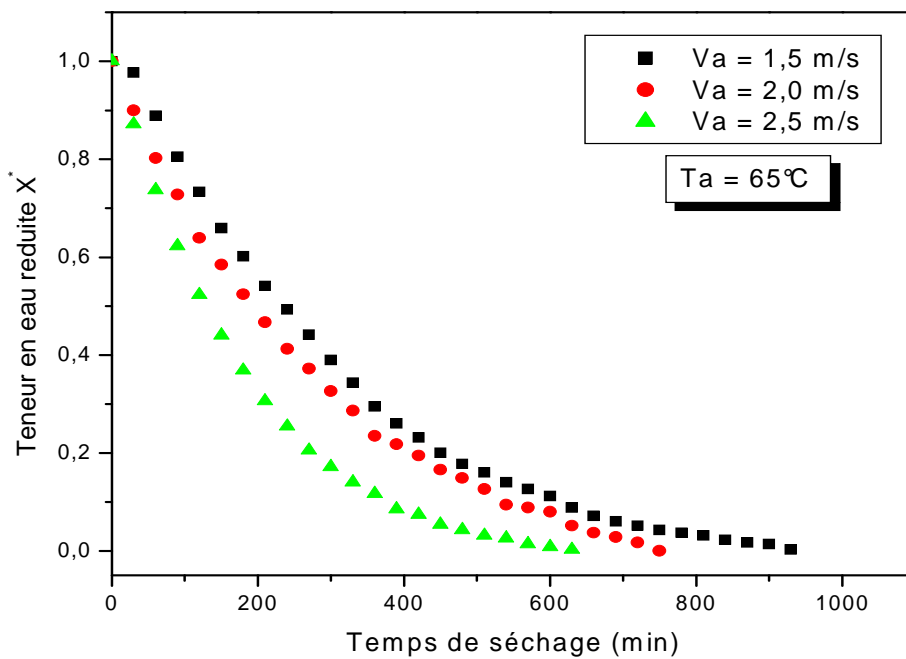


Figure 3.17 : Teneur en eau réduite de l'oignon en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse de l'air asséchant pour $T_a = 65^\circ\text{C}$

La figure 3.18 montre le type de courbe de vitesse de séchage obtenue pour les essais effectués. On note l'absence de la phase à allure croissante et de la phase à allure constante et la présence unique de la phase à allure décroissante. Les mêmes résultats ont été obtenus pour différents produits agroalimentaires [24, 35, 36,37].

On signale que la période de mise en température disparaît pratiquement lorsque le produit est en feuilles [38, 39, 40, 41, 42, 43] et l'absence de la période à phase constante est caractéristique de la majorité des produits alimentaires [3].

La décroissance de la vitesse de séchage en fonction du temps, s'explique par le fait qu'au début du séchage, l'évaporation de l'eau se trouvant à la surface du produit ne demande pas beaucoup d'énergie, par contre la diffusion de l'eau de la partie intérieure du produit vers la surface nécessite beaucoup de temps [34].

Le séchage durant la phase à allure décroissante est régi par la diffusion d'eau dans le solide. C'est un mécanisme complexe impliquant l'eau dans deux états liquide et vapeur, qui est souvent caractérisé par la diffusion effective. Cette propriété dépend de la température, de la pression et de la teneur en eau du produit [20].

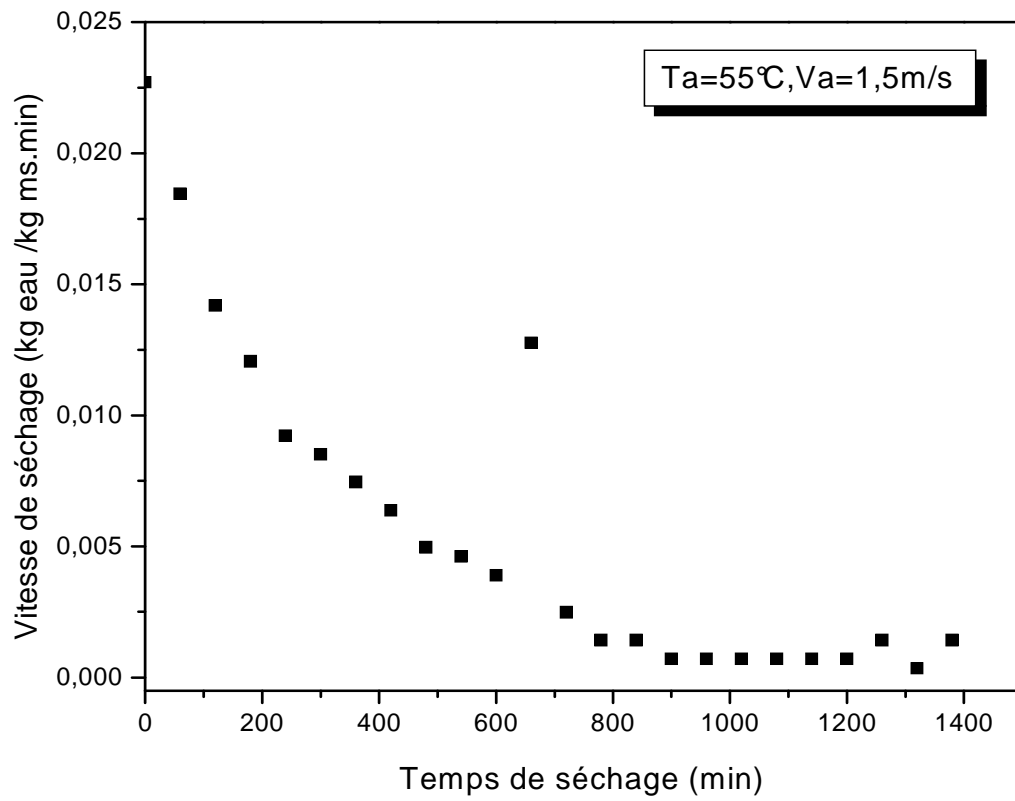


Figure 3.18 : Profil des courbes de vitesse de séchage de l'oignon

3.1.2.2 Modélisation de la teneur en eau réduite et courbe caractéristique de séchage :

➤ **Teneur en eau réduite :**

Les résultats expérimentaux de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage ont été adoptés aux modèles empiriques les plus importants, utilisés dans la littérature. Les modèles mathématiques choisis sont indiqués dans le tableau (2.1). Les techniques non linéaires de régression permettent d'obtenir les constantes pour chaque modèle, en utilisant le logiciel Origin 6.0. Le meilleur modèle est choisi selon les critères suivants :

- Coefficient de corrélation (R^2) élevé

- X^2 réduite minimale

Les coefficients de chaque modèle de séchage sont déterminés tableau (3.4) pour $T = 45^\circ\text{C}$ et $V = 1,5\text{m/s}$. Le modèle logarithmique a montré une bonne corrélation avec les courbes expérimentales avec un $R^2 = 0,99937$ et de $X^2 = 0,00006$.

Tableau 3.4: Modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage de l'oignon pour ($T=55^\circ\text{C}$, et $V= 1,5\text{ m/s}$)

Modèle	Coefficient	R^2	X^2
Newton $X^* = \exp(-kt)$	$K=0,00336$	0,9989	0,00009
Page $X^* = \exp(-kt^n)$	$K= 0,00274$ $n = 1,03422$	0,99923	0,00007
Modified page $X^* = \exp[-(kt)^n]$	$K= 0,00333$ $n = 1,0362$	0,99923	0,00007
Henderson et Pebis $X^* = a \exp(-kt)$	$a = 1,0059$ $k = 0,0039$	0,99894	0,00009

Modèle	Coefficient	R ²	X ²
Logarithmique $X^* = a \exp(-kt) + c$	a = 1,01188 k = 0,00324 c = -0,01242	0,99937	0,00006
Two-term $X^* = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	a = 0,29673 k ₀ = 0,00338 b = 0,70915 k ₁ = 0,00338	0,99894	0,0001
Two-term exponentiel $X^* = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	a = 0,00336 k = 0,99878	0,9989	0,00009
Midilli et al $X^* = a \exp(-kt^n) + bt$	a = 0,99507 k = 0,00285 n = 1,02445 b = -6,1564.10 ⁻⁶	0,99938	0,00006

La validation du modèle logarithmique à été confirmée en comparant le rapport estimé ou prévu d'humidité à n'importe quelle condition

La figure 3.19 donne une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de la teneur en eau réduite à différentes valeurs de la température et différentes valeurs de la vitesse. On observe dans cette figure que les données prévues généralement réunies autour de la ligne droite montre une concordance du modèle logarithmique en décrivant le comportement au séchage à convection forcée de l'oignon en couches minces.

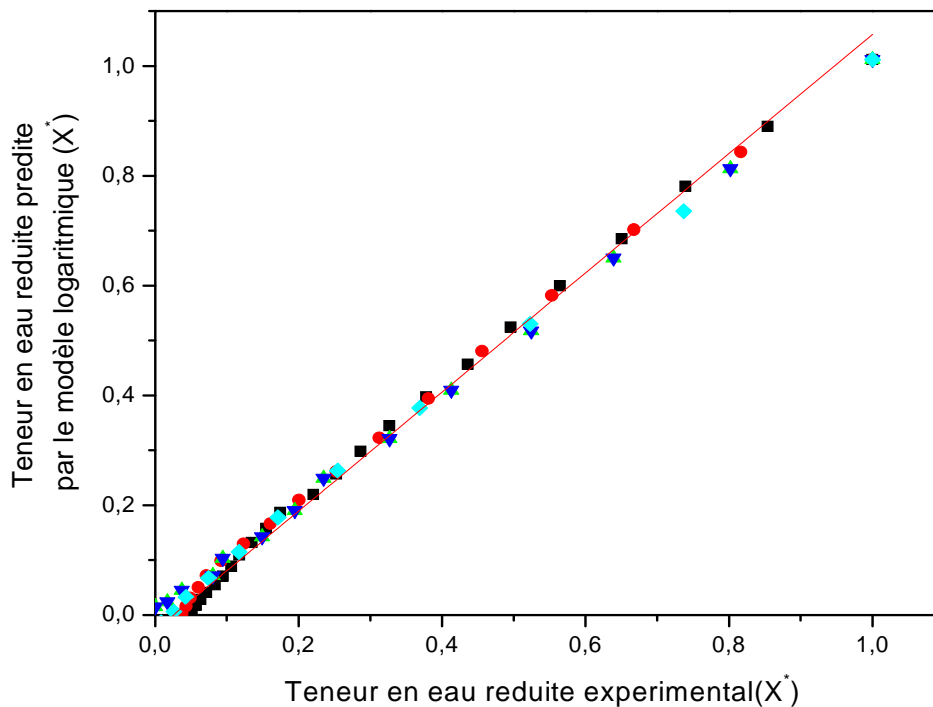


Figure 3.19 : Teneur en eau réduite prédite par le modèle logarithmique en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de l'oignon

- **Détermination des constantes du modèle de logarithmique :**

La constante du modèle : K en (min^{-1}) et les coefficients a et c (sans dimension). Pour déterminer ces coefficients, on utilise la méthode de régression non-linéaire pour chaque température et pour chaque vitesse comme indique dans le tableau (3.5).

Tableau 3.5: Les constantes de séchage pour le modèle logarithmique pour l'oignon

Température	Vitesse (m/s)	Les constantes	R ²	X ²
T = 45 °C	1,5	a = 1,082 k = 0,002 C = -0,07	0,9886	0,0008
T = 55 °C	1,5	a = 1,082 k = 0,00282 C = -0,07	0,98989	0,00082
T = 65 °C	1,5	a = 1,082 k = 0,0029 C = -0,07	0,9947	0,00051
	2	a = 1,082 k = 0,00339 C = -0,07	0,99929	0,00006
	2,5	a = 1,082 k = 0,00491 C = -0,07	0,99847	0,00014

On observe sur ce tableau que la constante K varie avec la température et la vitesse de l'air asséchant selon l'expression (3.3). Et les d'autres coefficients a et c sont constants:

$$a = 1,082$$

$$c = -0,07$$

Pour déterminer la formule de la constante K basé sur ORIGINE 6.0 par la méthode de régression non-linéaire.

$$K = 0,00853V^{0,80387} \exp\left(\frac{-76,5431}{T}\right) \quad (3.3)$$

Donc :
$$X^* = a \exp(-k.t) + c$$

Ces expressions peuvent être employées pour estimer la teneur en eau réduite du l'oignon à tout moment pendant le processus du séchage pour différentes conditions de l'air.

➤ **Courbe caractéristique de séchage de l'oignon :**

Sur la figure 3.20, sont présentées les vitesses de séchage normées en fonction des teneurs en eau réduite pour différentes conditions de l'air asséchant. Cette figure montre un bon regroupement des courbes de séchage.

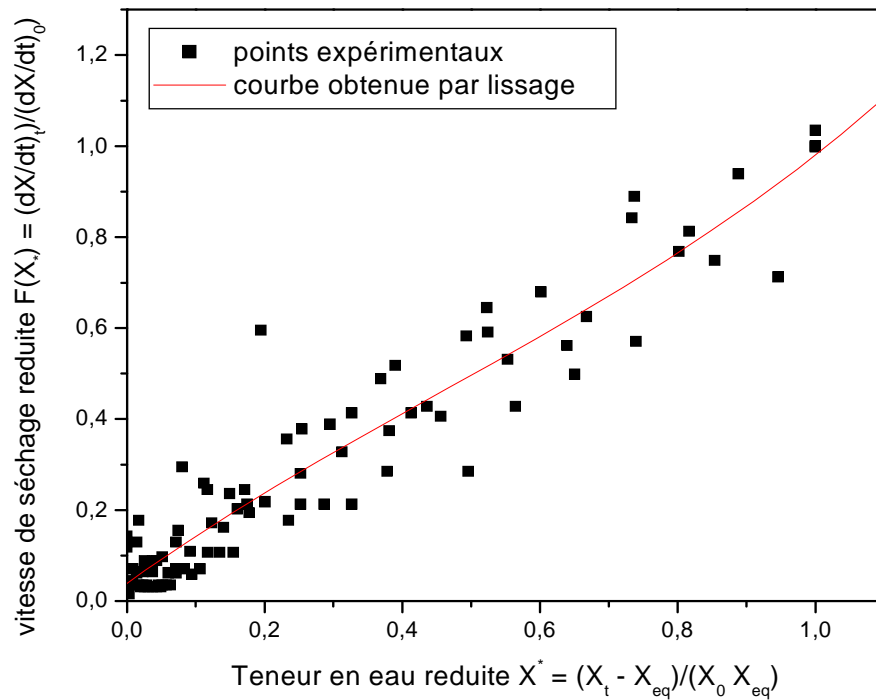


Figure 3.20. : Courbe caractéristique de séchage de l'oignon

Le lissage de la courbe caractéristique de séchage de l'oignon a permis de déterminer l'équation caractéristique de la vitesse de séchage sous forme d'un polynôme de degré 3.

$$f(X^*) = 0,03943 + 1,07966X^* - 0,52516X^{*2} + 0,38643X^{*3} \quad (3.4)$$

Les critères utilisés pour prévoir la meilleure équation qui décrit la CCS sont le Coefficient de corrélation $R^2 = 0,91254$ et $X^2 = 0,00713$

3.2. Confrontation entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés :

Dans ce paragraphe, on présente les différents résultats obtenus par le modèle numérique de notre séchoir pour le séchage de l'oignon et de la tomate : profils des températures, teneurs en eau et vitesse de séchage.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés est effectuée sur la base des évolutions de la teneur en eau et la vitesse de séchage et la température du produit.

Les valeurs des paramètres physiques d'entrée fixes dans le programme sont : la courbe caractéristique déterminée de séchage, toutes les propriétés physiques du produit (chaleur massique, humidité initiale, humidité d'équilibre...), toutes les caractéristiques de notre séchoir.

Pour simuler un essai de séchage, les conditions opératoires de séchage au niveau expérimental (la température, l'humidité et la vitesse de l'air), ainsi que les conditions initiales (la masse, la température et l'humidité initiale du produit), pour chacun des essais sont les données d'entrée du nos programme de simulation.

Les figures suivantes représentent les différentes comparaisons des résultats obtenus sur les essais.

3.2.1. Pour l'oignon:

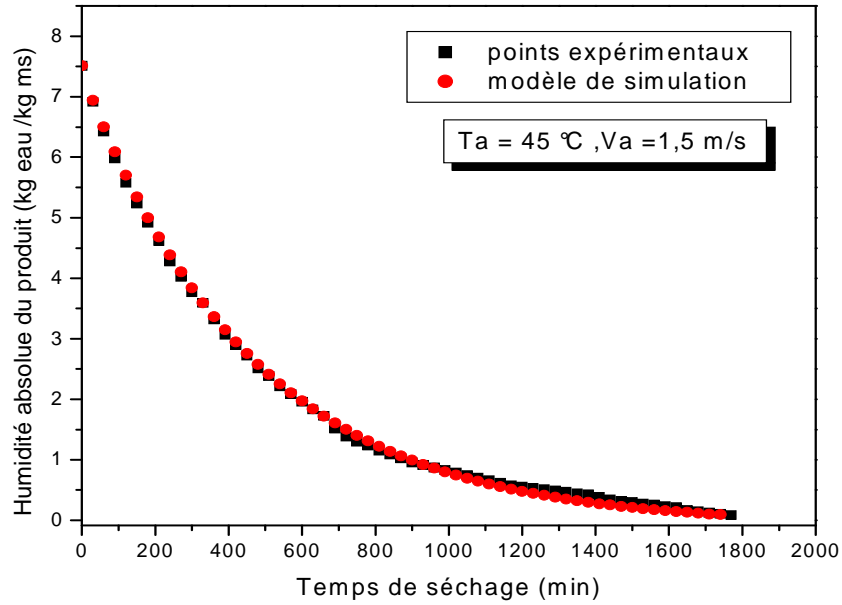


Figure 3.21 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 45^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

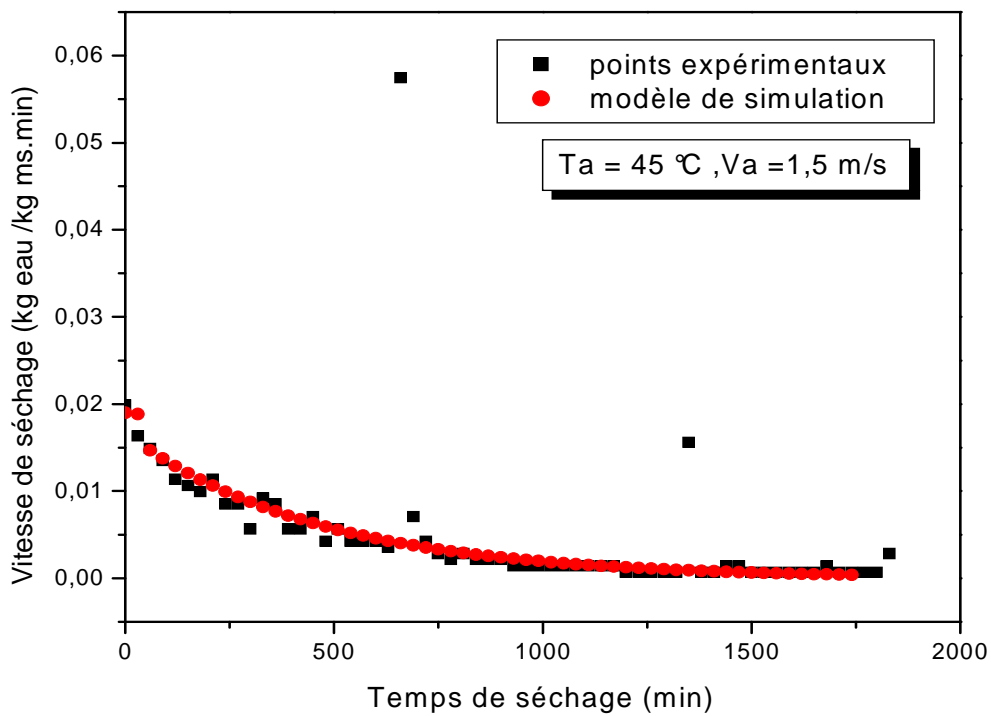


Figure 3.22 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 45^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

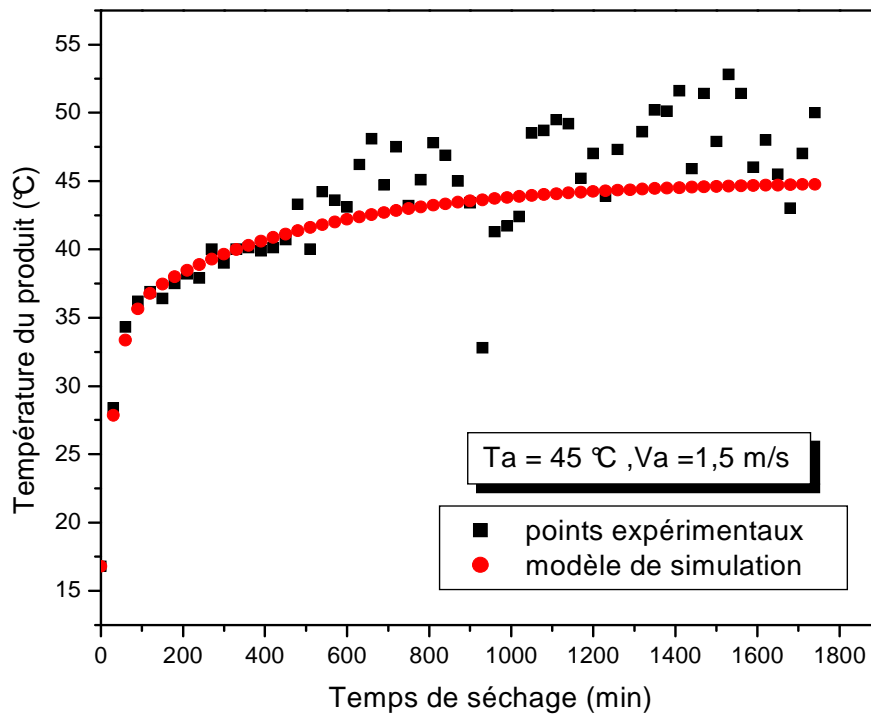


Figure 3.23 : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 45^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

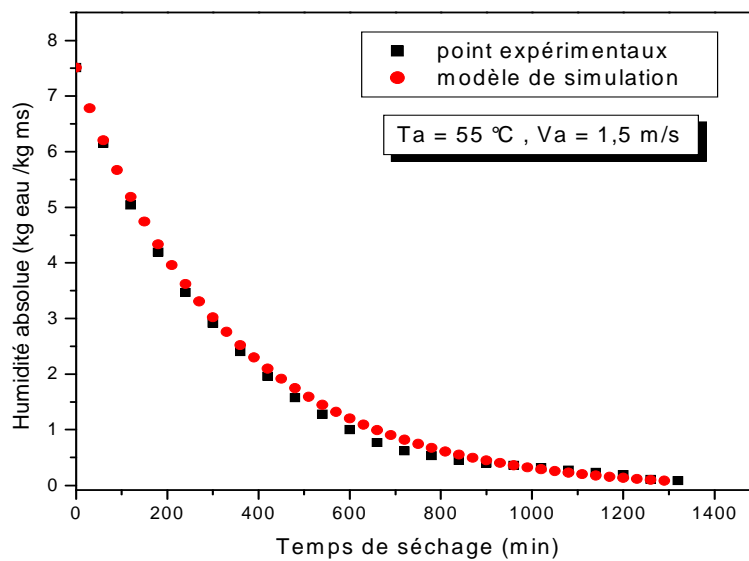


Figure 3.24 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 55^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

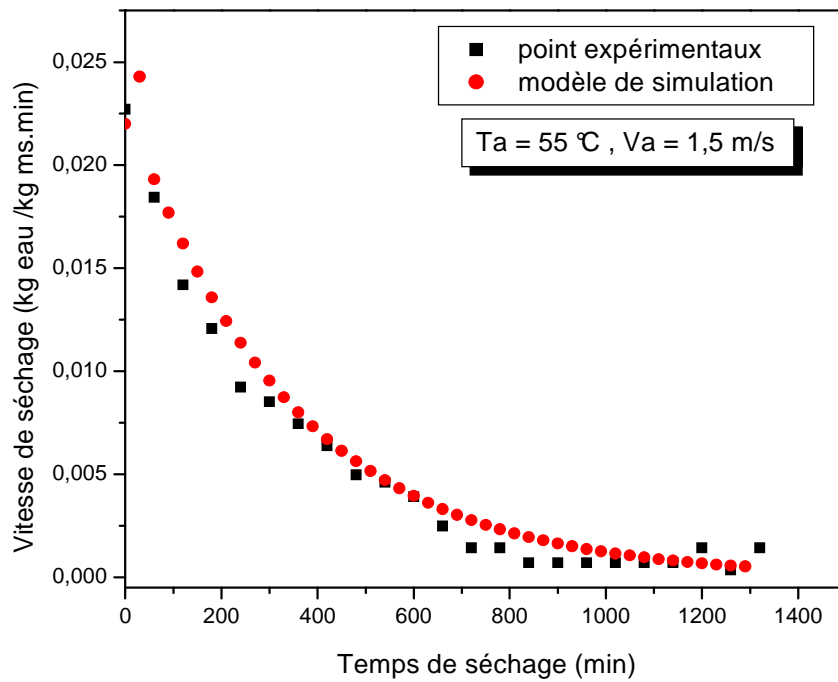


Figure 3.25 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 55^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

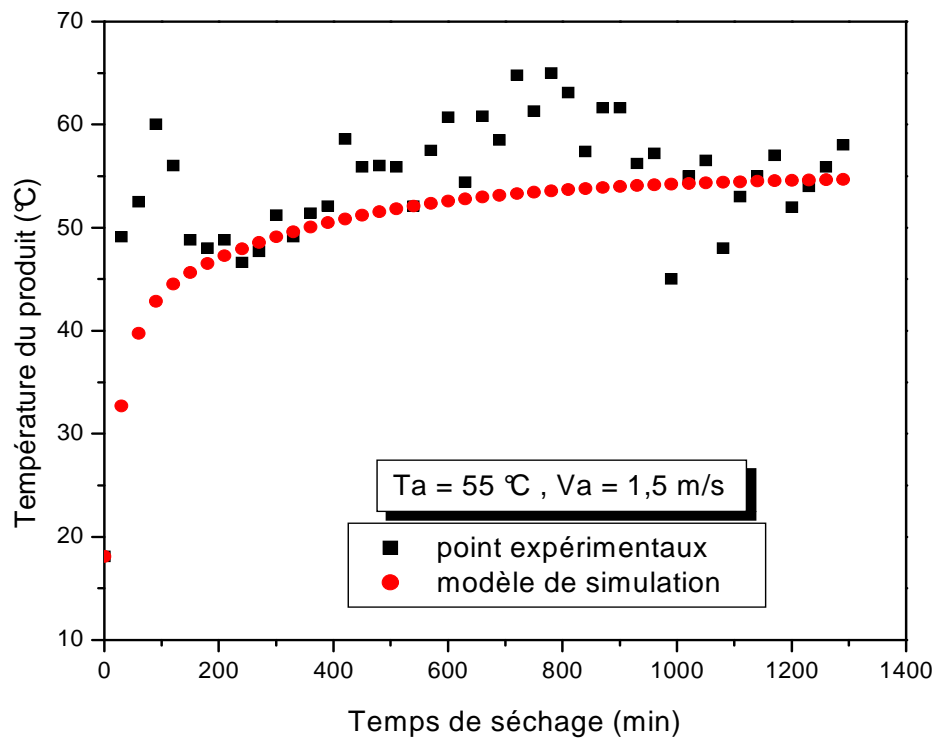


Figure 3.26 : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 55^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

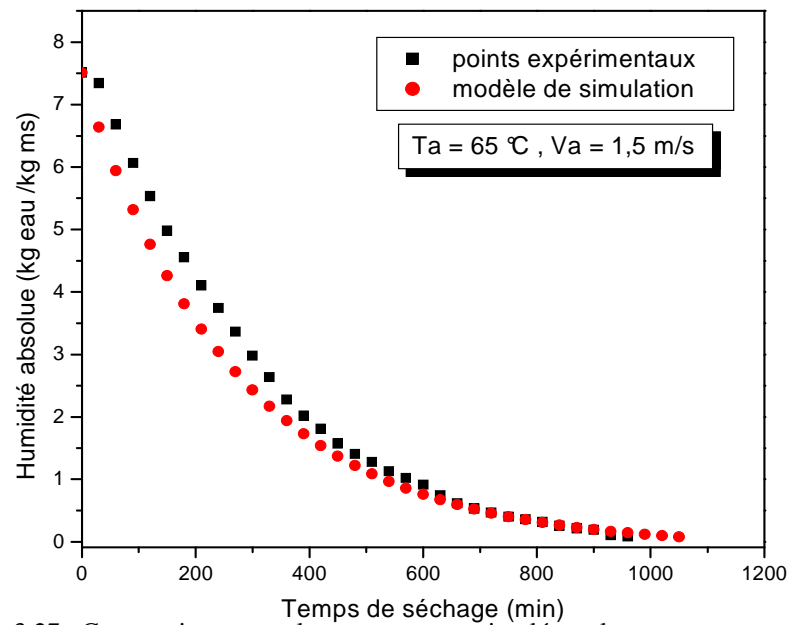


Figure 3.27 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65\text{°C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

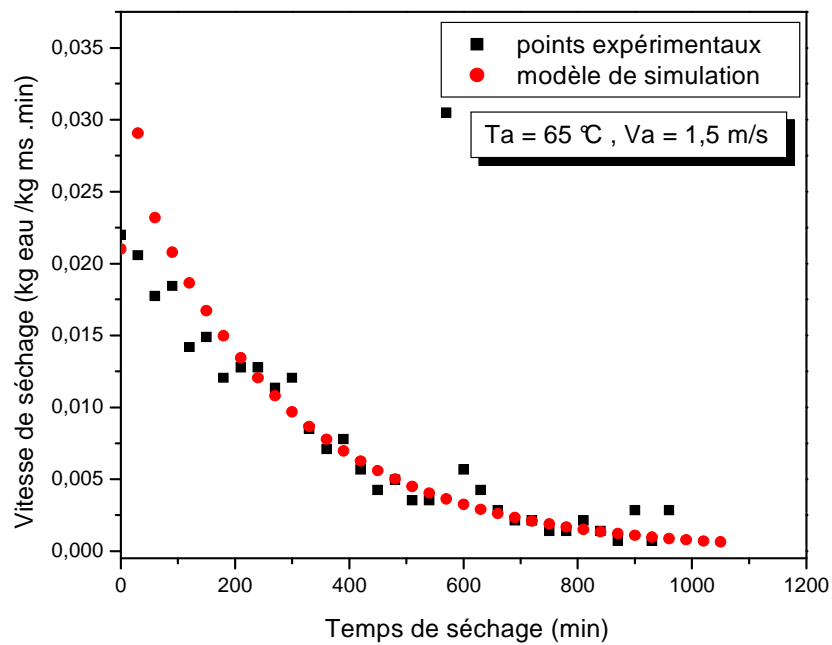


Figure 3.28 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65\text{°C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

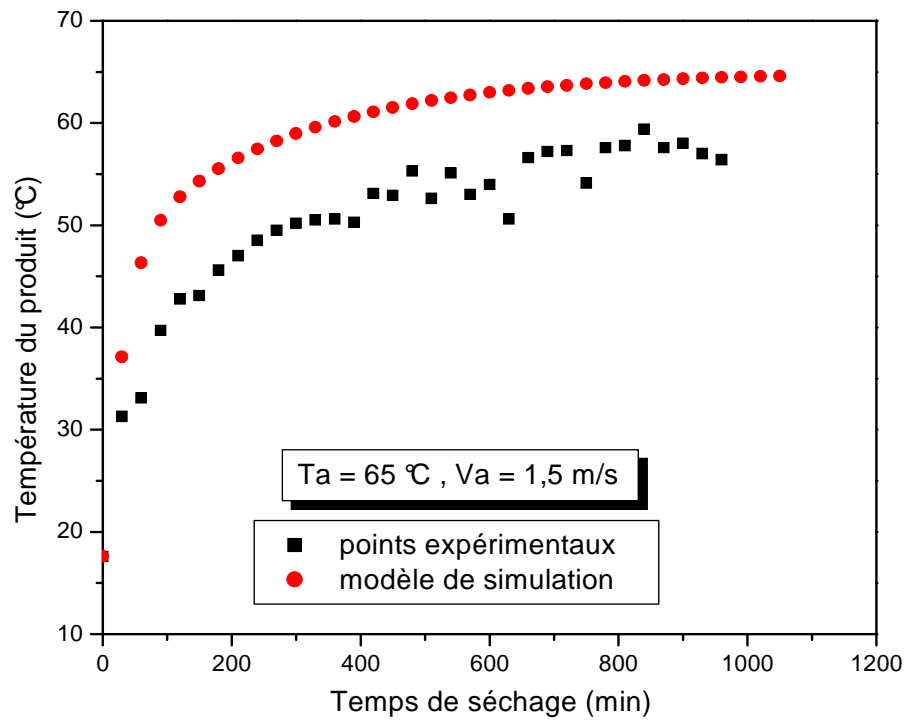


Figure 3.29 : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65\text{ °C}$, et $V_a = 1,5\text{ m/s}$.

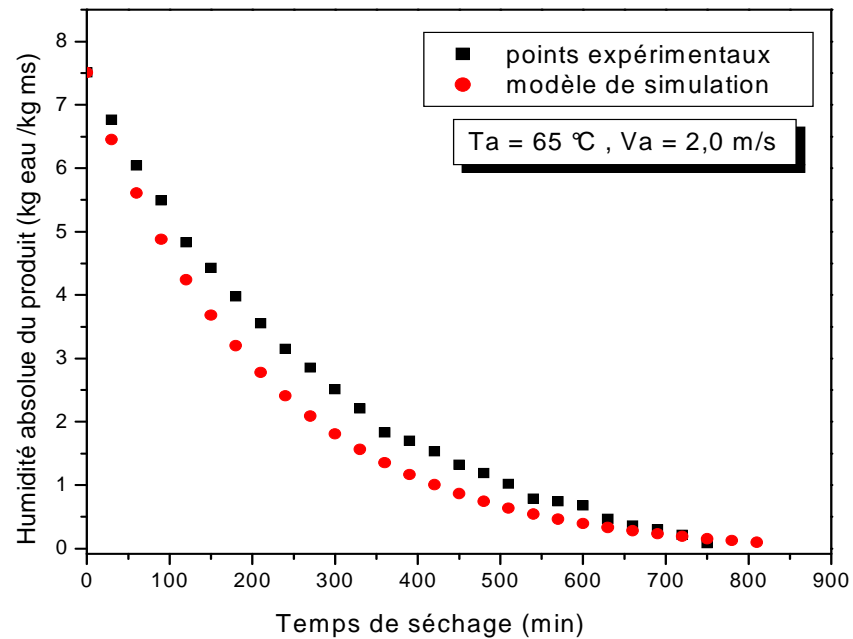


Figure 3.30 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65\text{ °C}$, et $V_a = 2,0\text{ m/s}$.

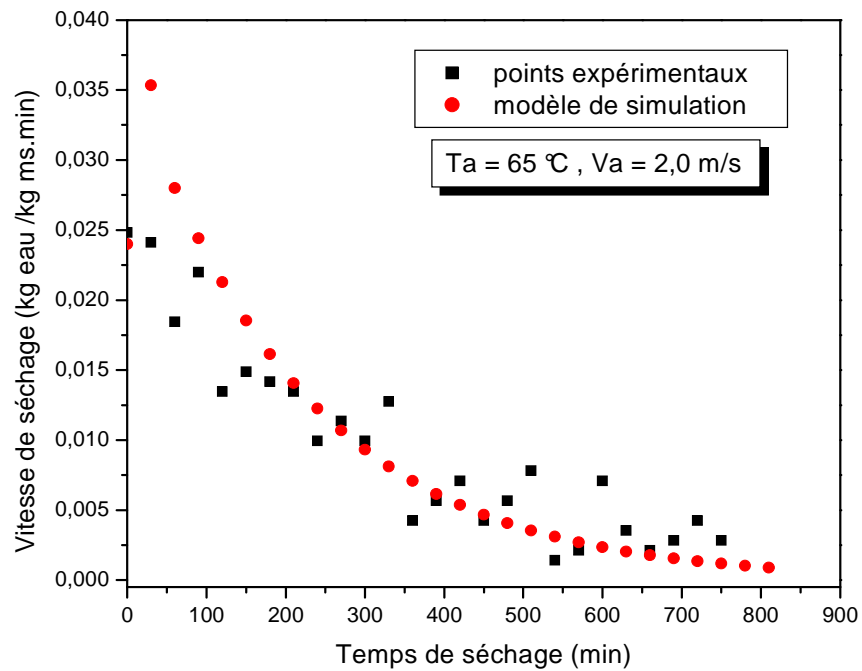


Figure 3.31 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0\text{m/s}$.

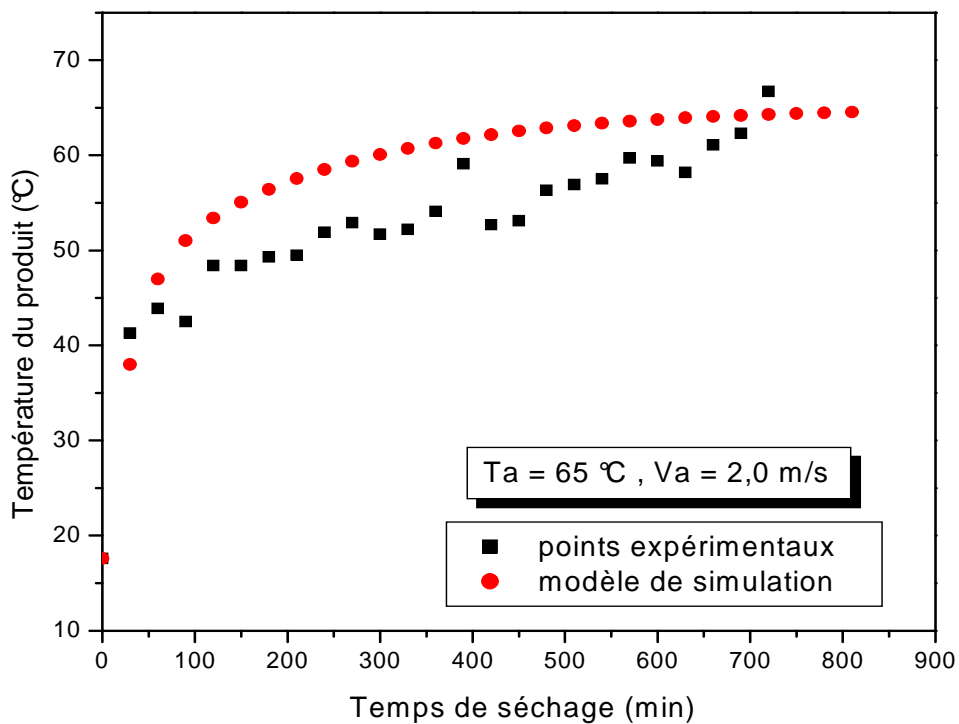


Figure 3.32 : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0\text{m/s}$.

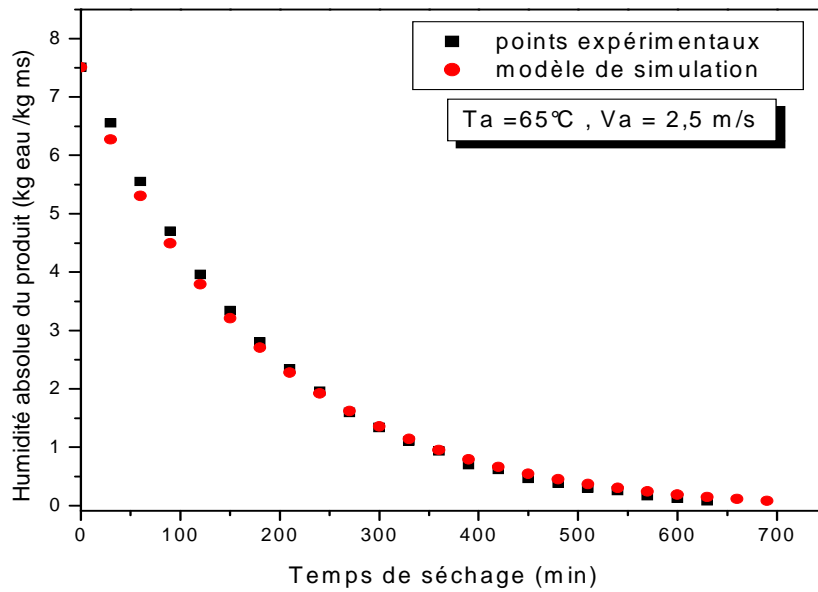


Figure 3.33 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,5\text{m/s}$.

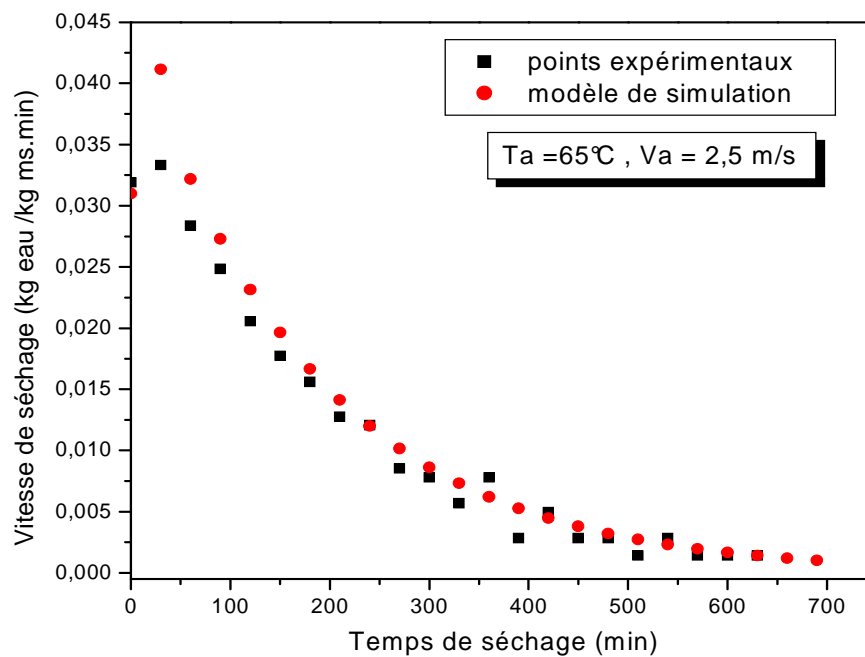


Figure 3.34 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,5\text{m/s}$.

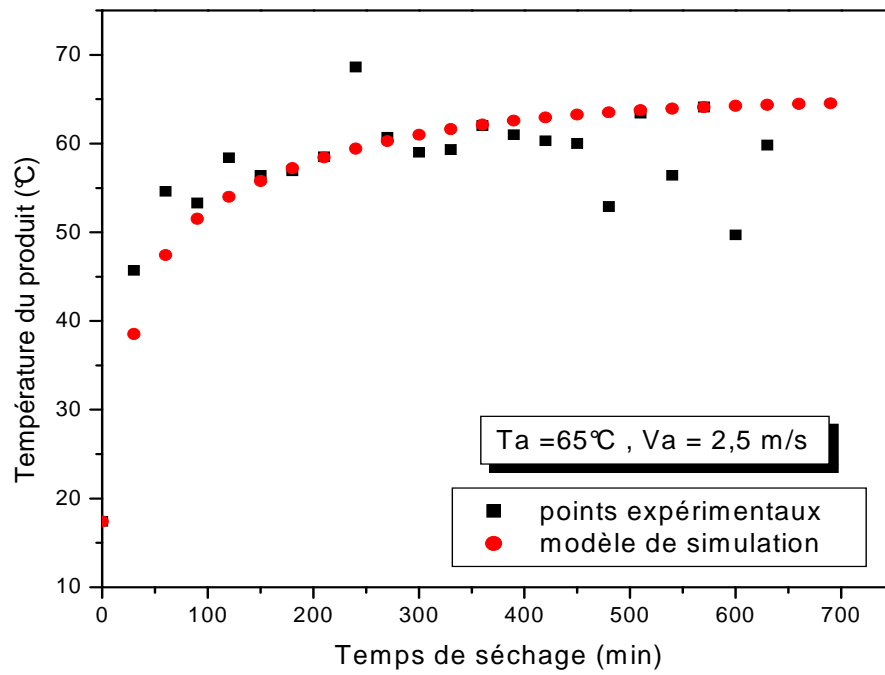


Figure 3.35 : Comparaison entre les températures du produit : simulée et expérimentale pour l'oignon pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,5\text{m/s}$.

3.2.2. Pour la tomate:

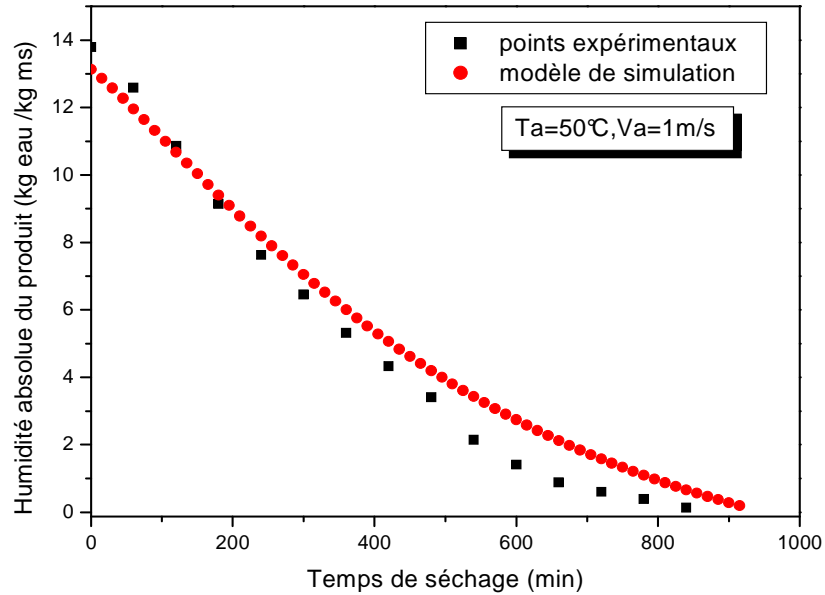


Figure 3.36 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^{\circ}\text{C}$, et $V_a = 1,0\text{m/s}$.

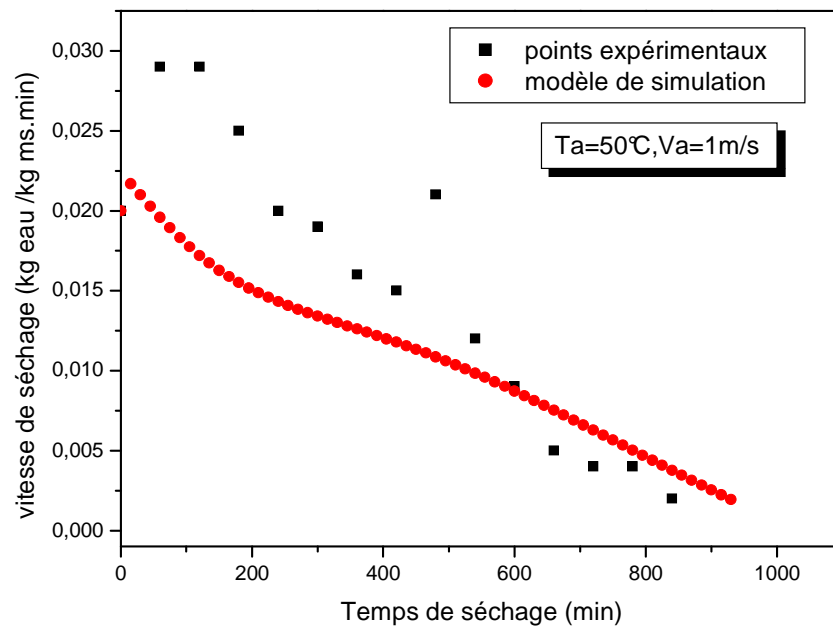


Figure 3.37 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^{\circ}\text{C}$, et $V_a = 1,0\text{m/s}$.

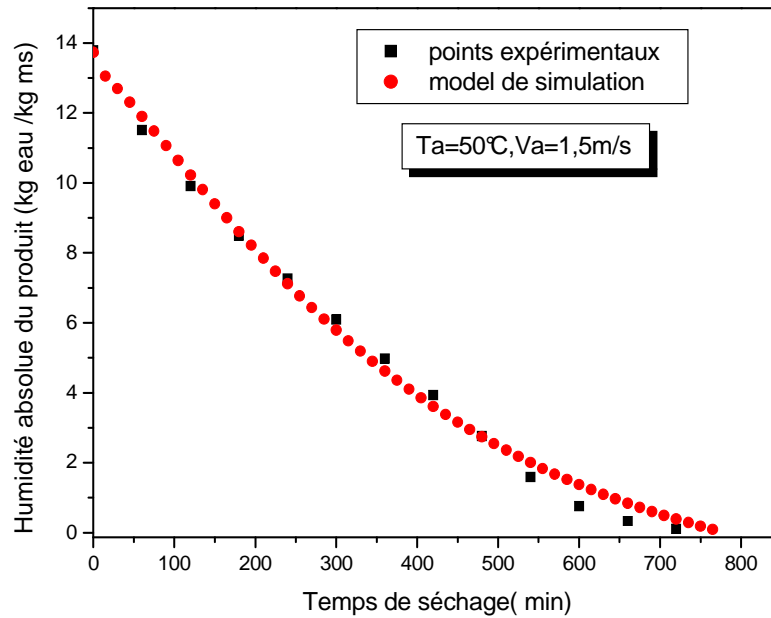


Figure 3.38 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

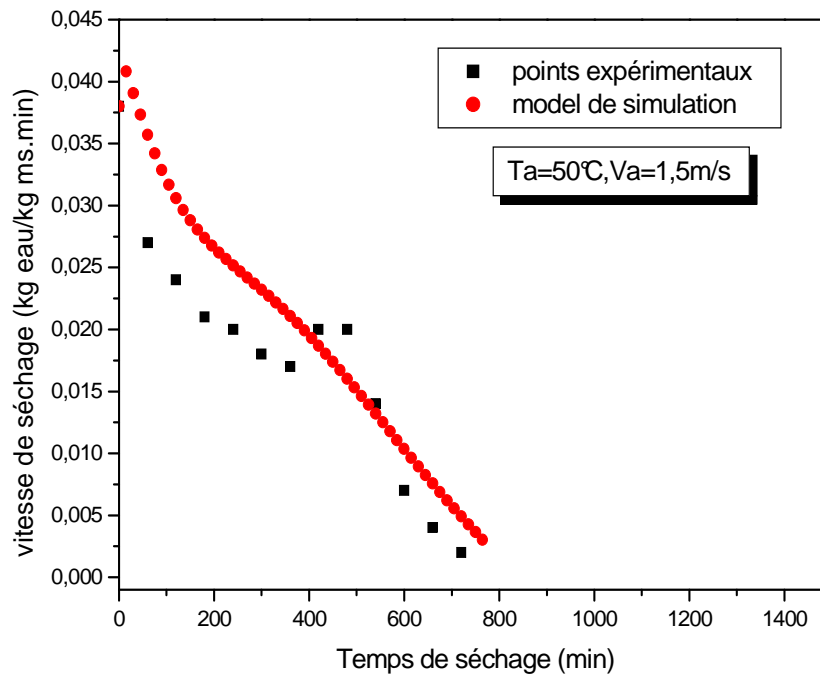


Figure 3.39 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

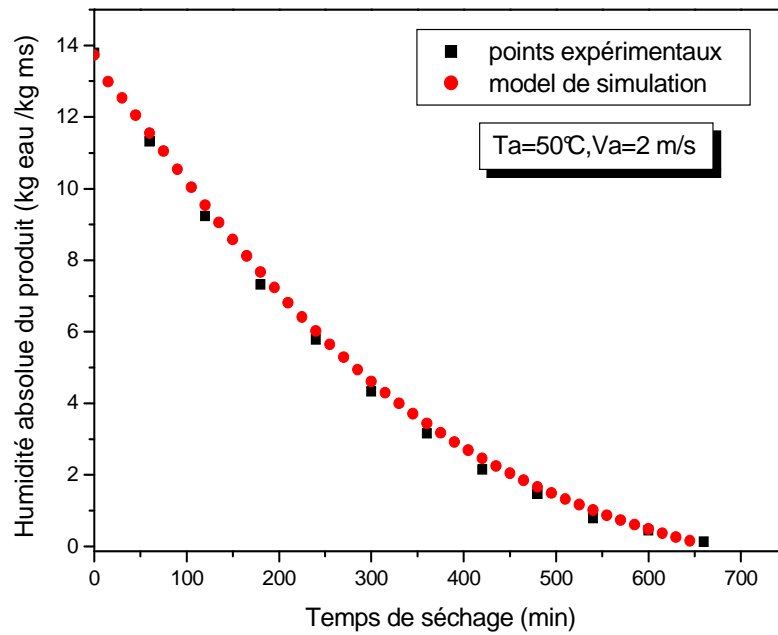


Figure 3.40 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^{\circ}\text{C}$, et $V_a = 2,0\text{m/s}$.

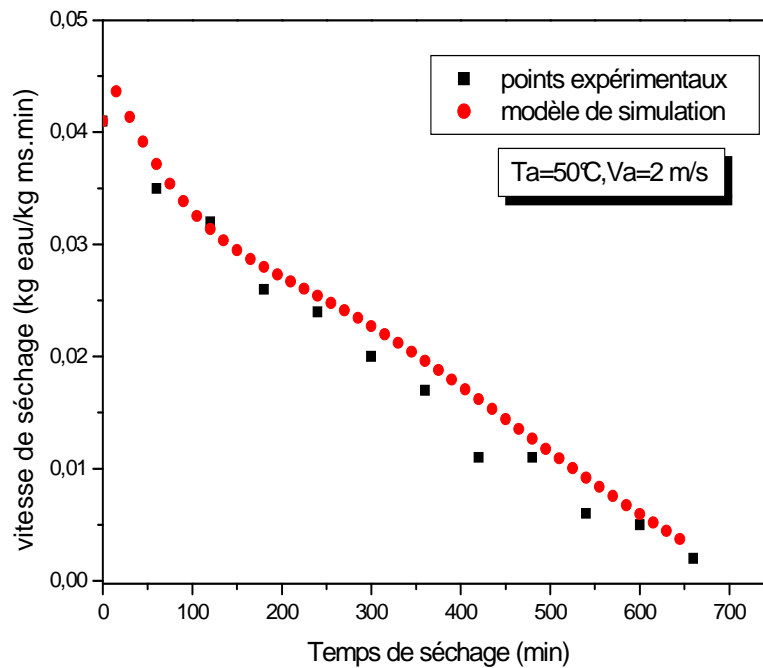


Figure 3.41 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 50^{\circ}\text{C}$, et $V_a = 2,0\text{m/s}$.

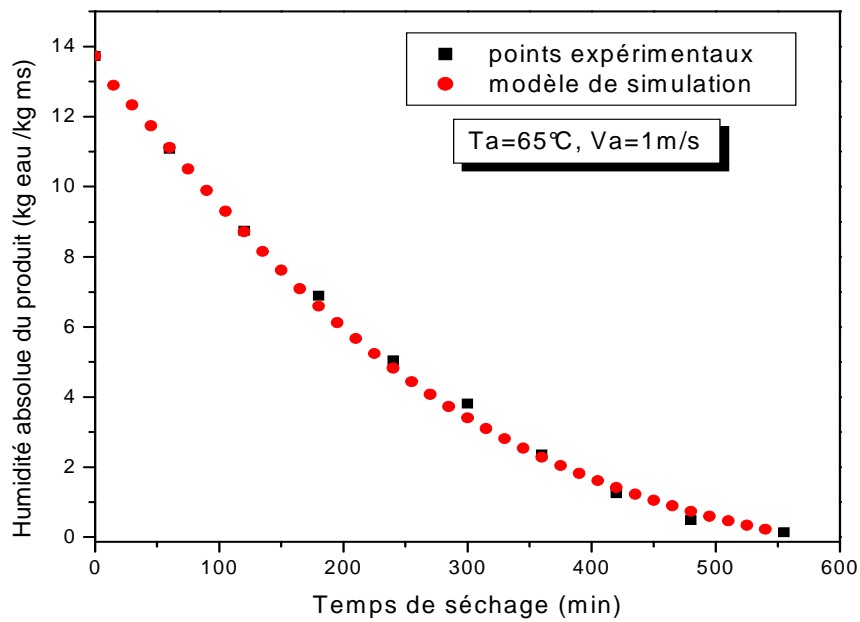


Figure 3.42 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0\text{m/s}$.

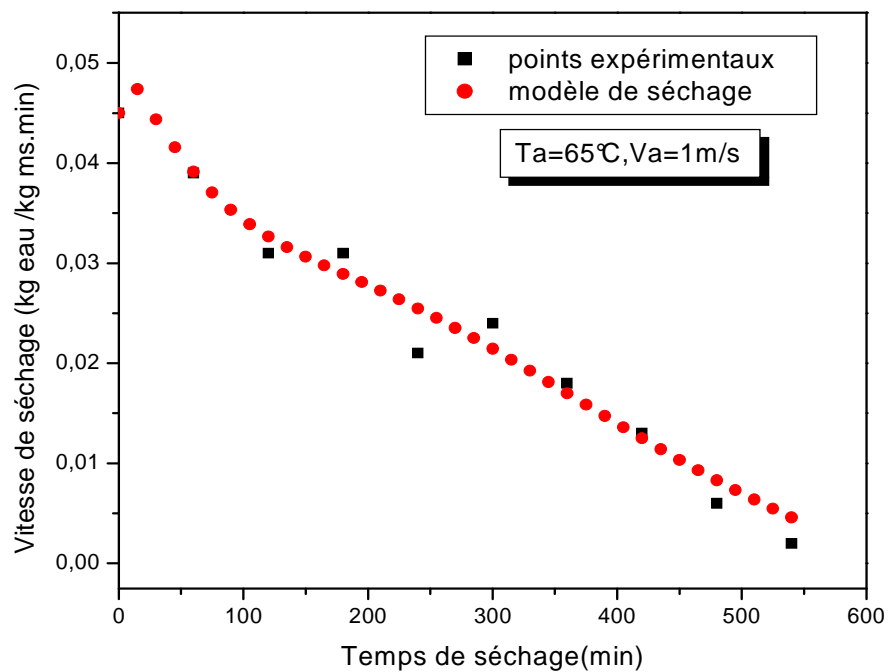


Figure 3.43 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0\text{m/s}$.

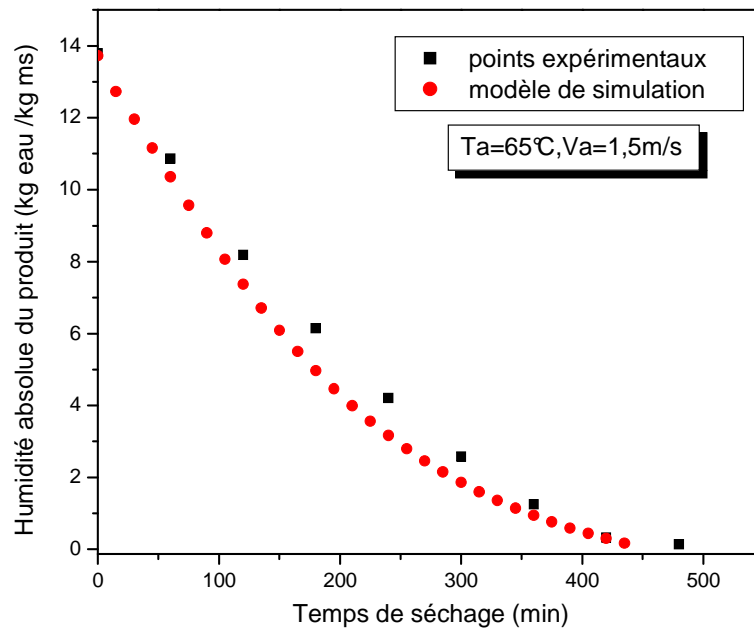


Figure 3.44 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

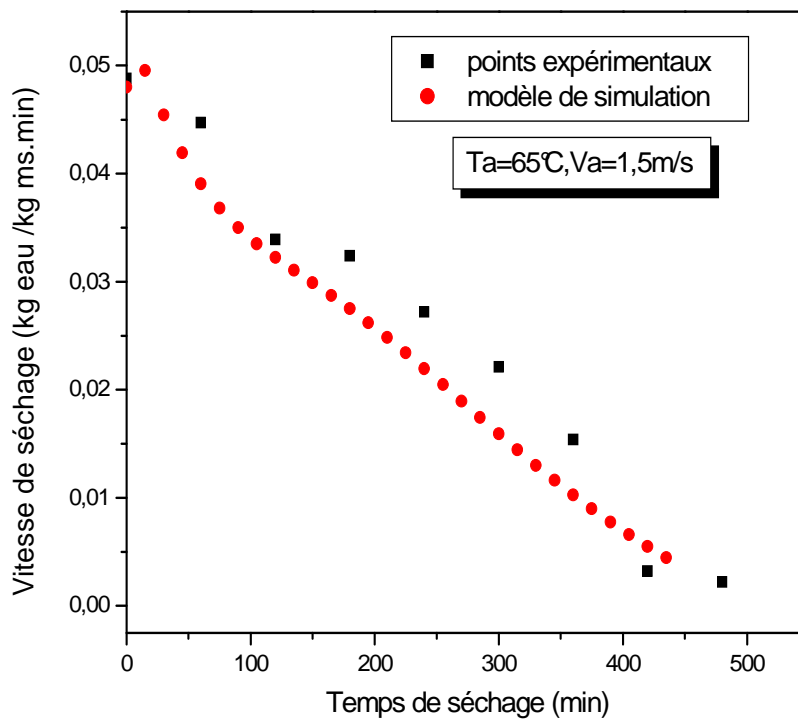


Figure 3.45 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

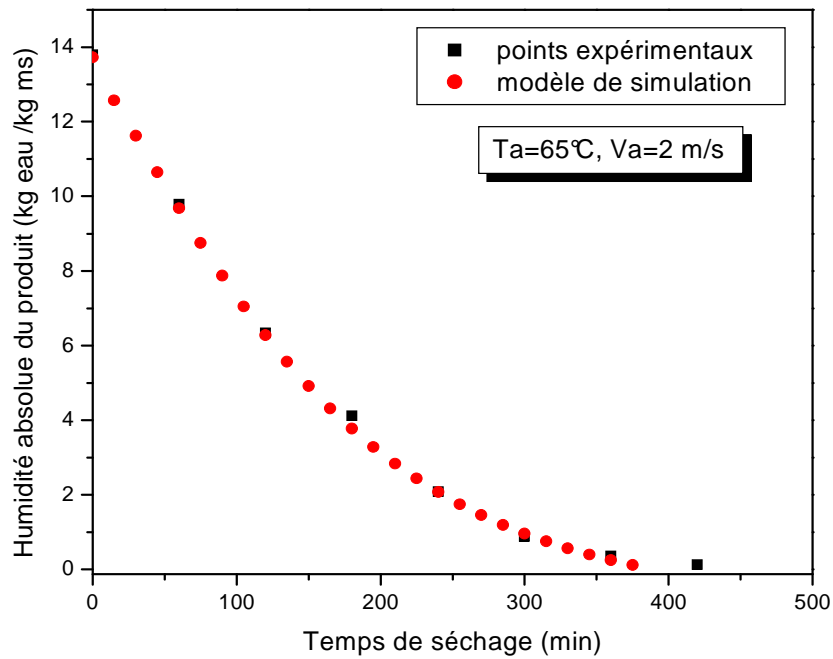


Figure 3.46 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0\text{m/s}$.

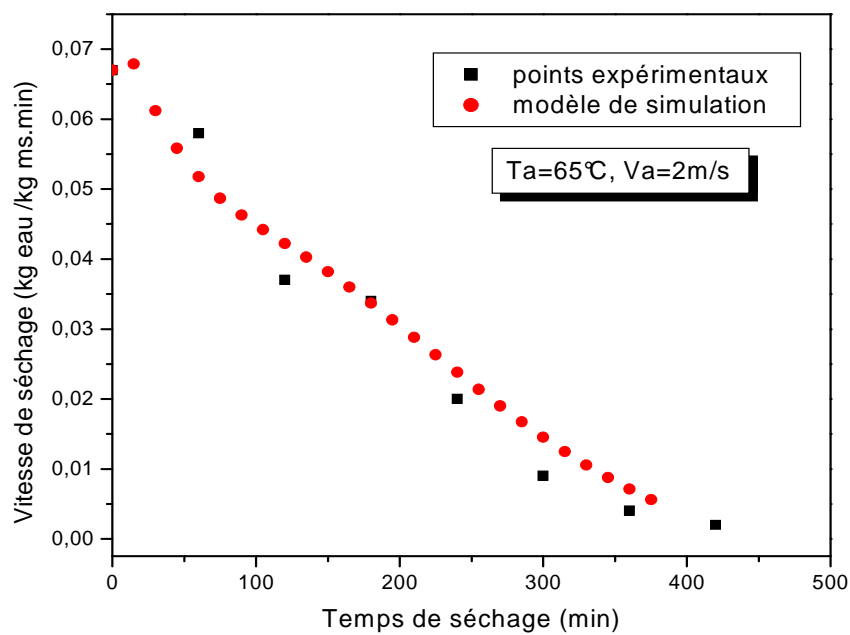


Figure 3.47 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 65^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0\text{m/s}$.

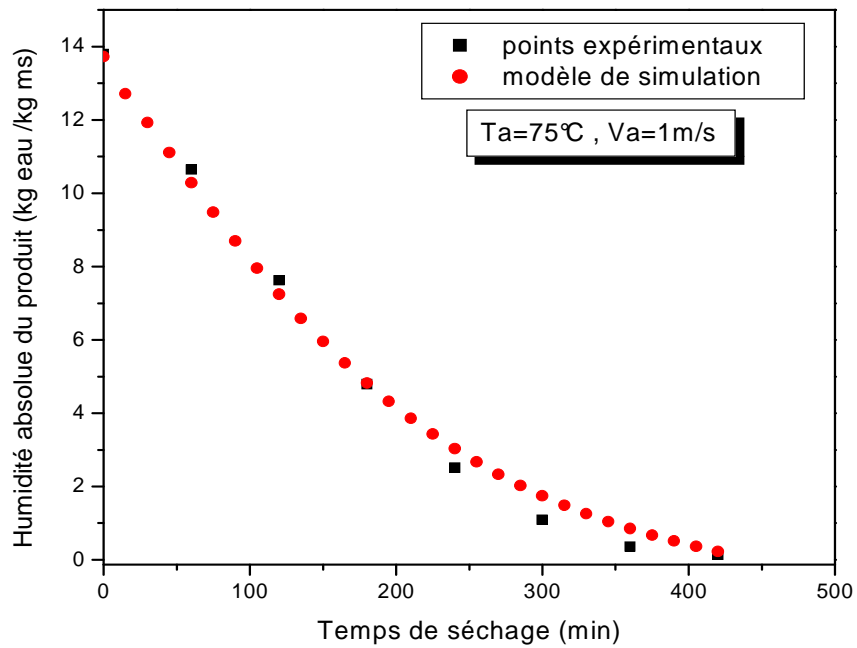


Figure 3.48 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0\text{m/s}$.

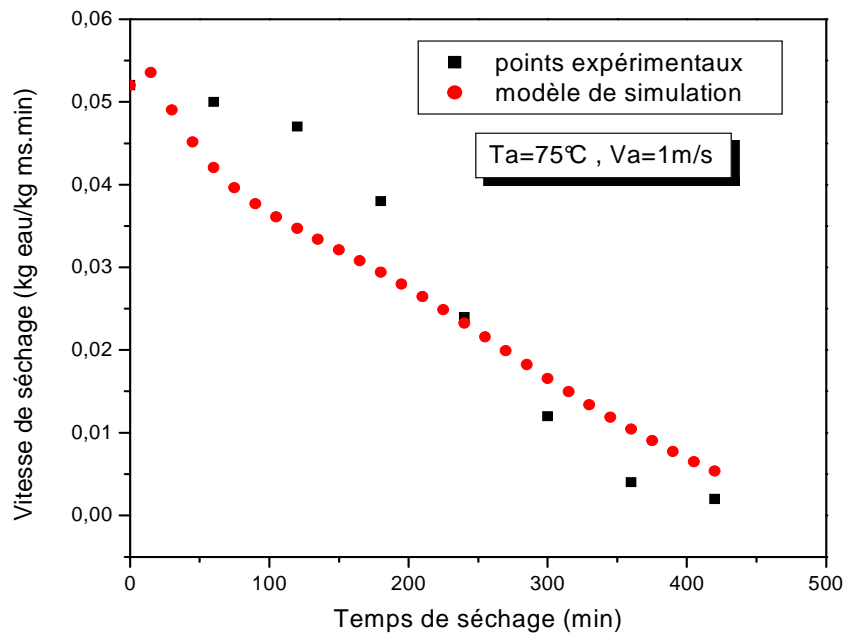


Figure 3.49 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,0\text{m/s}$.

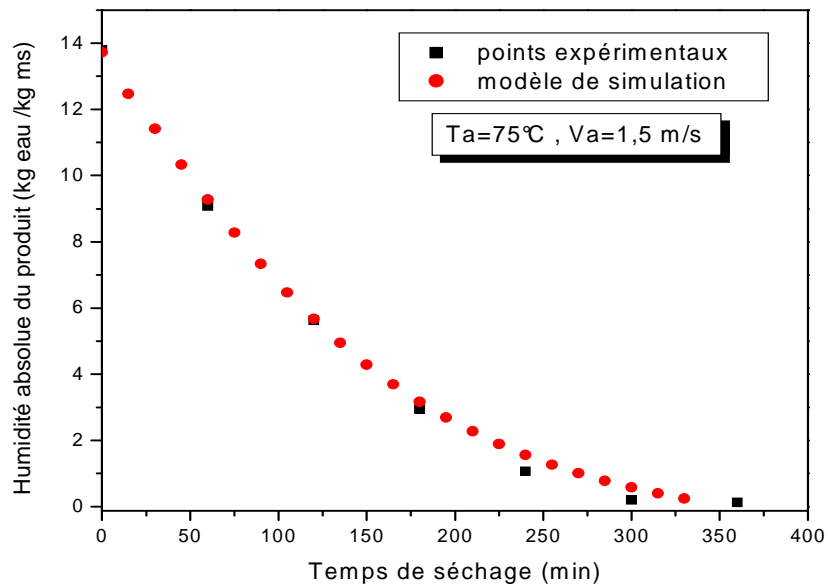


Figure 3.50 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

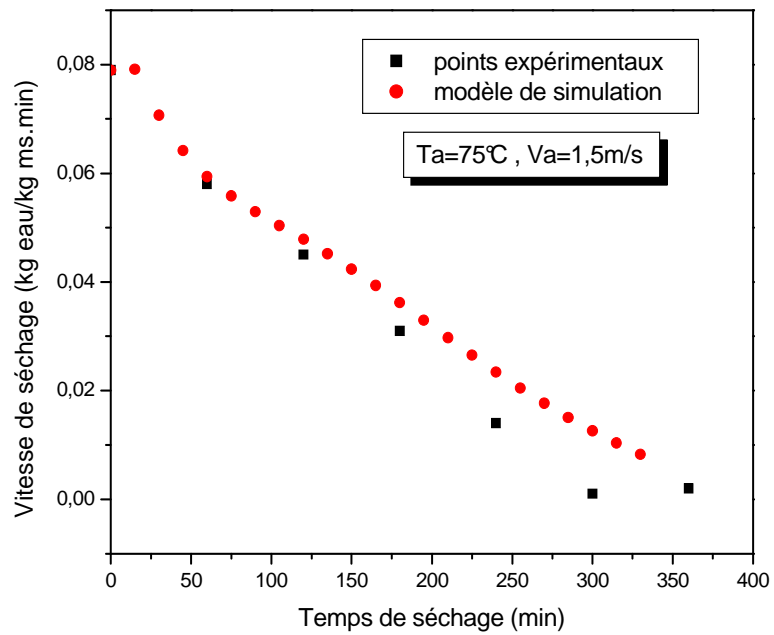


Figure 3.51 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 1,5\text{m/s}$.

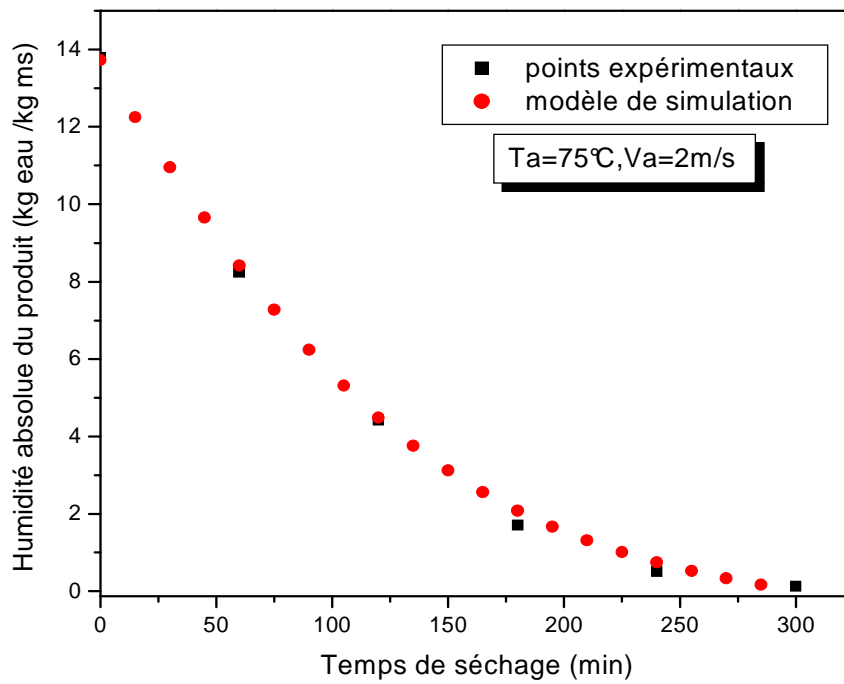


Figure 3.52 : Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0\text{m/s}$.

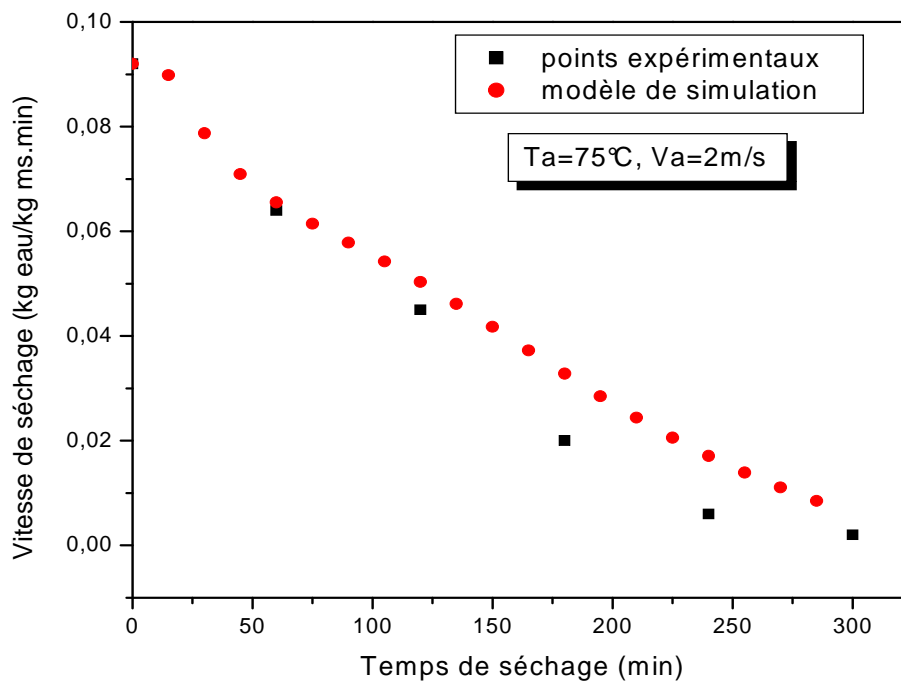


Figure 3.53 : Comparaison entre la vitesse de séchage simulée et la vitesse de séchage expérimentale pour la tomate pour $T_a = 75^\circ\text{C}$, et $V_a = 2,0\text{m/s}$.

Validation du modèle:

Les courbes obtenues par le modèle de simulation pour les deux produits présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Cependant il existe parfois un écart important entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux quant à la température du produit. Pour expliquer cet écart, il est nécessaire de faire les remarques suivantes:

- Les coefficients d'échanges convectifs de chaleur entre le produit et l'air asséchant ne sont pas tous bien connus, en effet le coefficient d'échange convectif est pris constant pour une vitesse de l'air donnée alors qu'il devrait varier selon l'évolution de la température du produit.
- Les hypothèses simplificatrices considérées contribuent aussi à l'explication de l'écart observé entre les profils de température (phénomène de rayonnement et de conduction négligés).
- Les conditions initiales prises en compte dans le modèle ne fournissent pas toujours une bonne approximation de la réalité.
- Les problèmes expérimentales:
 - Problème de thermo-couple
 - Problème de thermostat

CONCLUSION

Ce travail est une contribution à l'amélioration du procédé du séchage solaire des produits agro-alimentaires. L'étude des différents mécanismes de transfert de chaleur et de masse régissant les dispositifs de séchage dans un séchoir partiellement solaire fonctionnant à convection forcée. Le développement et la validation d'un modèle numérique à échelle de laboratoire sont les objectifs de ce mémoire.

Nous avons présenté dans ce travail une modélisation des différents éléments qui constituent un système de séchage par convection forcée. Ces modèles sont décrits par des équations de bilans thermique et massique entre les différents milieux d'échange, permettant ainsi de simuler le fonctionnement du séchoir, en utilisant un programme de calcul en langage FORTRAN 90.

La validation du modèle développé est ensuite effectuée grâce à la réalisation d'une étude expérimentale. Les données issues des expérimentations sont essentielles pour passer des courbes de vitesse de séchage, aux courbes caractéristiques de séchage.

Durant l'opération de séchage nous avons respecté la teneur finale des produits : 13% pour la tomate et 8% pour l'oignon. Cette dernière est la valeur optimale pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles. Dans cette étude, les expériences de séchage solaire convectif en couches minces de nos produits à sécher sont effectuées pour plusieurs valeurs de températures et plusieurs valeurs de vitesse de l'air asséchant.

Les courbes expérimentales obtenues de la tomate et de l'oignon ont montré la présence unique de la phase de ralentissement et l'absence de la phase de mise en température du produit ainsi que la phase à allure constante. Le principal facteur qui influe sur les cinétiques de séchage est la température de l'air asséchant.

La courbe caractéristique de séchage de la tomate ou de l'oignon est obtenue et l'équation de la vitesse de séchage est déterminée empiriquement. L'analyse statistique des résultats expérimentaux en coordonnées réduites $X^*(t)$, soit pour la tomate ou pour l'oignon, lissés par huit modèles, a permis de conclure que le modèle de Midilli et al est le plus

approprié pour la description des cinétiques de séchage solaire convectif en couches minces de la tomate. Pour l'oignon le modèle logarithmique est le plus approprié.

Les résultats expérimentaux de l'étude du séchage ont ensuite été confrontés aux résultats théoriques pour valider les résultats prédits par la simulation numérique. On observe une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés.

Finalement, à travers les résultats obtenus nous recommandons :

1. La modélisation du couplage de la chambre de séchage avec l'insolateur
2. L'application de cette étude pour d'autres produits agro-alimentaires.

ANNEXE A

1. Le dispositif expérimental



Le séchoir solaire



Le capteur solaire



Les claies de la chambre de séchage

2. Les appareils des mesures :

Analyseur d'humidité



Appareil d'affichage



Solarimètre



Appareil testo 445



Appareil testo 645



Anémomètre



Appareil KIMO de type LV 110



Appareil testo 425 :



La Balance



Propriétés physiques de l'air asséchant et du produit à sécher:

Dans cet annexe, on donne les expressions et les corrélations qui ont été utilisées pour déterminer les propriétés thermo physiques de l'air de séchage et du produit à sécher « tomate et oignon »

- **Propriétés physiques de l'air de séchage :**

On a pu approcher quelques propriétés physiques de l'air asséchant en fonction de la température de séchage de la manière suivante pour la température de l'air entre 0°C et 100°C

La masse volumique : Elle s'exprime en (kg/m³)

$$\rho = \frac{353}{T + 273}$$

Capacité calorifique : Elle s'exprime en (J/kg °C)

$$C_p = 1008$$

Conductivité Thermique : Elle s'exprime en (W/m°C)

$$\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} T + 0,0242$$

Viscosité dynamique : Elle s'exprime en (pascal. s)

$$\mu = 10^{-5} \cdot (0,0046T + 1,7176)$$

Nombre de Prandtl :

$$Pr = -2,54 \cdot 10^{-4} T + 0,7147$$

- **Propriétés physiques de l'oignon :**

Les composantes du produit à sécher (l'oignon) :

Eau	87,6 %
Proteines	01,25 %
Carbohydrates	04,91 %
Fat	00,25 %
Autres	05,99 %

Capacité calorifique :

$$C_p = 1,424m_{\text{carbohydrates}} + 1,549m_{\text{proteins}} + 1,675m_{\text{fat}} + 0,837m_{\text{autres}} + 4,187m_{\text{eau}}$$

Humidité relative initiale : L'humidité relative initiale du produit à sécher (l'oignon) est 86 % .

Humidité absolue initiale (teneur en eau) : La teneur en eau du produit à sécher X est liée à l'humidité relative X_r par la relation :

$$X = \frac{X_r}{1 - X_r}$$

Humidité d'équilibre (critique) :

Pour l'oignon, l'humidité relative finale (d'équilibre) est de 7% à 8 % et l'humidité absolue d'équilibre est de 0,075 à 0,087 kg d'eau par kilogramme de matière sèche.

- **Propriétés physiques de la tomate :**

Les composantes du produit à sécher (tomate) :

Valeur nutritionnelle moyenne pour 100g:

Eau	94,5g
Valeur calorique	18 kcal
Protides	0,9g
Glucides	2,8g
Lipides	0,2g
Provitamine A	0,38 mg
Vitamine B1	0,06 mg
Vitamine B2	0,04 mg
Vitamine B6	0,11mg
Vitamine C	15 mg
Vitamine pp	0,7 mg
Fer	0,4 mg
Calcium	10 mg
Magnésium	10 mg
Phosphore	24 mg
Potassium	1,2 mg
Sodium	1,2 mg
Fibres	{{ 19 }} g

Chaleur spécifique C_p (J/kg °C) :

$$C_p = \sum X_i C_{pi}$$

Telle que X_i : fraction massique = m_i / m_T

Eau	$4176,2 - 0,0909T + 5,4731 \cdot 10^{-3} T^2$
Glace	$2062,3 + 6,0769T$
Protéines	$2008,2 + 1,2089T - 1,3129 \cdot 10^{-3} T^2$
Graisses	$1984,2 + 1,4373T - 4,8008 \cdot 10^{-3} T^2$
Glucides	$1548,8 + 1,9625T - 5,9399 \cdot 10^{-3} T^2$
Fibres	$1845,9 + 1,8306T - 4,6509 \cdot 10^{-3} T^2$
Cendres	$1092,6 + 1,8896T - 3,6817 \cdot 10^{-3} T^2$

Conductivité thermique λ (W/m °C) :

$$\frac{1}{\lambda_T} = \sum \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i} \quad \text{Et} \quad \varepsilon_i = \frac{X_i}{\rho_i} \quad : \text{Fraction volumique}$$

Eau	$0,57109 + 1,7625 \cdot 10^{-3} T - 6,7036 \cdot 10^{-6} T^2$
Glace	$2,2196 - 6,2489 \cdot 10^{-3} T + 1,0154 \cdot 10^{-4} T^2$
Protéines	$0,17881 + 1,1958 \cdot 10^{-3} T - 2,7178 \cdot 10^{-6} T^2$
Graisses	$0,18071 - 27604 \cdot 10^{-3} T + 1,7749 \cdot 10^{-7} T^2$
Glucides	$0,20141 + 1,3874 \cdot 10^{-3} T - 4,3312 \cdot 10^{-6} T^2$
Fibres	$0,18331 + 1,2497 \cdot 10^{-3} T - 3,1683 \cdot 10^{-6} T^2$
Cendres	$0,32961 + 1,4011 \cdot 10^{-3} T - 2,9069 \cdot 10^{-6} T^2$

La densité ρ (kg / m³):

$$\frac{1}{\rho} = \sum \frac{X_i}{\rho_i}$$

Eau	$997,18 + 3,1439 \cdot 10^{-3}T - 3,7574 \cdot 10^{-3}T^2$
Glace	$916,89 - 1,3071 \cdot 10^{-1}T$
Protéines	$1329,9 - 5,1840 \cdot 10^{-1}T$
Graisses	$925,59 - 4,1757 \cdot 10^{-1}T$
Glucides	$1599,1 - 3,1046 \cdot 10^{-1}T$
Fibres	$1311,5 - 3,6589 \cdot 10^{-1}T$
Cendres	$2423,8 - 2,8063 \cdot 10^{-1}T$

Mode de séchage	Le produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H _r de l'air	Le modèle mathématique utilisée	L'objectif du travail	Référence
Séchage solaire indirect (forcé) Maroc	Peaux d'orange et pulpe de betrave	T = 35°C, 40°C, 45°C, 50°C. V = 1, 1.5, 2,5m/s Ha = 0,005,0,015, 0,025, 0,035 kg/kg as)		C'est une étude numérique qui permet de simuler le fonctionnement d'un séchoir solaire et présente l'influence des paramètres de l'air sur le modèle	"Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée "A.Belghit, M.Belhamidi, A.Bennis, B.C.Boutaleb, S.Benet, Rev. Energ. Therm (1997)36,837-850, Elsever, Paris.[14]

Mode de séchage	Le produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H _r de l'air	Le modèle mathématique utilisé	L'objectif du travail	Référence
Séchage solaire indirect (forcé) Maroc	La menthe verte	T = 40°C, 45°C, 50°C. V = 300 m ³ /h H _r = 24 %		En déterminant expérimentalement les isothermes de sorption de la menthe verte ensuite, d'une étude expérimentale de la cinétique du séchage convectif de la menthe verte dans un séchoir partiellement solaire. Un modèle mathématique permettant de simuler le fonctionnement du système de séchage.	"Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte", M. Kouhila , A.Belghit, M. Daguenet. Entropie, n°233, pp.20-31[11].

Mode de séchage	Le produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H _r de l'air	Le modèle mathématique utilisé	L'objectif du travail	Référence
Séchage solaire indirect (forcé) Maroc	La menthe verte	T = 50 °C, 55°C, 60 °C V = 300 m ³ /h, 100 m ³ /h H _r = 0 %		D'une étude expérimentale du séchage par convection forcée de la menthe. l'objectif principal de cette étude est de répondre aux questions suivantes: -les modèles de simulation élaborés dans des travaux ultérieurs peuvent –ils être validés expérimentalement ? -quels sont les facteurs aérothermiques qui influencent la cinétique de séchage de la menthe, et quel est leur impact sur le durée de séchage du produit ?	"Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire", M.Kouhila, A.Belghit, M.Kaoua et M. Daguenet, Entropie,n°233, pp.20-31. Rev.Energ.Ren:Physique Energétique (1998) ,1-5. [1]

Mode de séchage	Le produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H _r de l'air	Le modèle mathématique utilisé	L'objectif du travail	Référence
Séchage solaire direct (convection naturel) Ankara	Tomate Coupe en M=4,5kg X _i =93,35% X _f =11,5%	T= 22,4°C à 35,6°C H _r = 14,5% à 50,9%	Le modèle mathématique: Tow term exponential	D'une étude expérimentale du séchage par convection naturelle de la tomate, proposition des modèles mathématiques pour établir le modèle propre pour description de la cinétique de séchage de la tomate.	Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato K. Sacilik, R. Keskim, A. Konuralp Elicin Journal of food Engineering 73(2006)231-238[22]

Mode de séchage	Le produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H _r de l'air	Le modèle mathématique utilisé	L'objectif du travail	Référence
Séchage solaire direct (convection naturelle) Ankara	Pomme	T = 30 °C, 40°C, 50 °C V = 0,6 , 0,8, 0,9 m/s Hr = 40%, 30%,20%		D'une étude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, on présente les équations des bilans thermiques et massiques du système de séchage	"Simulation model for a solar drying process". S. Timoumi, D.Mihoubi, F. Zagrouba Dessalination 168 (2004)111-115[31]

Mode de séchage	Le produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H _r de l'air	Le modèle mathématique utilisé	L'objectif du travail	référence
Séchage solaire indirect en convection naturelle Algérie	Menthe M=200g Piment M= 300g Raisin M=500g Laurier M=300g Verveine M=300g	T=30°C à 80°C		Une étude expérimentale du séchage solaire des plusieurs plantes.	"Etude expérimentale d'un séchoir solaire" R. Miri, O. Mokrani, F. Said et M. Belhamel Rev Energ Ren Zones Arides (2002) 41-48

Mode de séchage	Le produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H_r de l'air	Le modèle mathématique utilisé	L'objectif du travail	Référence
Séchage solaire indirect en convection forcée Maroc	Prickly peqr peel	T= 32 à 36°C V= 0.0277 à 0,0833 m ³ /S	Midilli _ Kucuk	C'est une étude expérimentale de séchage solaire en couches minces dans un séchoir fonctionnant en convection forcée. Dans ce travail une modélisation de la cinétique de séchage par des modèles mathématique est établi le modèle approprié, et aussi étudiée l'influence des paramètres de l'air.	"Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (opuntia ficus indica)" S.Lahsani, M.Kouhila, M.Mahrouz, A. Ildimam , A.Jamali Energy 29 (2004)211-224[30]
Mode de séchage	Le produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H_r de l'air	Le modèle mathématique utilisée	L'objectif du travail	Référence

Séchage solaire indirect en convection forcée India	Oignon	V= 0.167, 0,278 kg /s		Une étude numérique et expérimentale du séchage solaire de l'oignon a permis d'étudier l'influence de la position du produit dans le séchoir et les dimensions du produit sur le processus de séchage	"Modelling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application " Dilip jain Journal of Food Engineering 71(2005)170-178
--	--------	--------------------------	--	---	---

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Kouhila , A. Belghit , M. Kaoua, et M. Daguinet, « Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire », *Rev. Energ. Ren.*,(1-3),1998.
- [2] B. Touati, Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie (2001).
- [3] H. Ridene, S. Azzouz, D. Ghorbel, L. Ayed, M. B. Slama, A. Belghith, Séchage des tomates par l'air chaud : cinétique et qualité, 1^{er} séminaire maghrébin sur les sciences et technologies de séchage, 2006, Tunisie, 271-279
- [4] A. Charreau, R. Cavalle, Séchage : Théorie et calculs, *Technique de l'ingénieur*, J 2480 , 1-23, (1991).
- [5] F. Vachet, Séchage dans l'industrie chimique, *Technique de l'ingénieur*, J 2483, (1-19), (1993).
- [6] Jean Castaing-Lavignottes, Air humide : propriétés thermodynamiques, opérations unitaires et technologie associées à son emploi, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, (2003).
- [7] D. Mennouche, Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2006
- [8] Yves Jannot, Isothermes de sorption : Modèles et détermination, LEPT-ENSAM, (1-5), 2003.
- [9] A. Mouafki, Modélisation et Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2004.
- [10] J. J. Bimbenet, Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires, SEPAIC, Paris (1-33), (1978)

- [11] M. Kouhila, A. Belghit, M. Daguene, Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et la cinétique de séchage de la menthe verte, (2001) *Entropie*, n° 233, (20-31)
- [12] M. Daguene, *Les séchoirs solaires : théorie et pratique* », Publication de L'UNESCO, Paris, France, (1985).
- [13] J. P. Nadeau, J. R. Puiggali, *Séchage : des processus physiques aux procédés industriels*, Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France, (1995).
- [14] A. Belghit, M. Belhamid, A. Bennis, B. C. Boutaleb, S. Benet, Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, *Rev. Gén. Therm* (1997) Elsevier, Paris, (837-850).
- [15] P. Duzed, *Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés*, Edition du Greth, France (1999)
- [16] A. Besson et W. Bauer, *Sciences alimentaires 1, les Traitements thermiques*, Université de Lausanne, 1-52, 2001
- [17] B. Eyglunent, *Manuel de thermique : théorie et pratique* », Hermes Sciences Publications, Paris, France, (1997)
- [18] Saccadura J-F.,1978, *Initiation aux transferts thermiques*, CAST INSA de Lyon, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 1980
- [19] R. Djeghel, *Modélisation thermique d'une serre agricole*, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2004
- [20] A. Benhamou, A. Idlimam, A. Lamharrar, B. Benyoucef et M. Kouhila, Diffusivité hydrique et cinétique de séchage solaire en convection forcée des feuilles de marjolaine, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 n°1(2008) 75-85.
- [21] I. T. Togrul, D.Pehlivan, Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers, *Journal of Food Engineering*, 55 (2002) 209-216.
- [22] K. Sacilik, R. Keskin, A. K. Elicin, Mathematical Modeling of Solar Tunnel Drying of Thin Layer Organic Tomato, *Journal of Food Engineering* 73 (2006), 231-238.

- [23] O. Yalduz and C. Eretkyn, Thin layer solar drying of some vegetables, *Drying Technology*, 19(2001), 583-597.
- [24] G. P. Sharma, R. C. Verma, P. Pathara, Mathematical modelling of infrared radiation thin layer drying of onion slices, *Journal of Food Engineering* 71 (2005) 282–286.
- [25] A. R. Celma, S. Rojas, F. Lopez, I. Montero, T. Miranda, Thin layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction, *Journal of Food Engineering* 80 (2007), 1261-1271
- [26] E. K. Akpinar, Y. Bicer, Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun, *Energy Conversion and Management*, 2008, 1-9
- [27] N. Benaouda, A. Boulemtafes, M. Belhamel, Etude du comportement thermique et dynamique d'un séchoir solaire, 12èmes journées internationales de thermique, 2005, Maroc, 165-170
- [28] P. N. Sarsavadia, R. L. Sawhney, D.R. Pangavhane, S. P. Singh, Drying behaviour of brined onion slices, *Journal of Food Engineering*, 40 (1999) 219-226.
- [29] L. Bennamoun, A. Belhamri, Design and simulation of a solar dryer for agriculture products, *Journal of Food Engineering*, 59(2003) 259-266.
- [30] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam, A. Jamali, Thin layer convective solar drying and mathematical modelling of prickly pear peel (*opuntia ficus indica*), *Energy*, 29 (2004) 211-224.
- [31] S. Timoumi, D. Mihoubi, F. Zagrouba, Simulation model for a solar drying process, *Desalination*, 168(2004) 111-115.
- [32] M. K. Krokida, V. T. Karathanos, Z. B. Maroulis, D. Marinou-Kouris, Drying kinetics of some vegetables, *Journal of Food Engineering*, 59 (2003) 391-401.
- [33] P.N.Sarsavadia, Development of a solar- assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion», *Renewable Energy*, 32 (2007), 2529-2547

- [34] M. Aghfir, M. Kouhila, A. Jamali, L. A. Mohamed, Séchage solaire convectif pour la conservation des feuilles de romarin (*ros marinus of ficinalis*), 13^e journées internationales de thermique, 2007, France (1-5).
- [35] S. Kooli, A. Fadhel, A. Farhat, A. Belghith, Drying of red pepper in sun and greenhouse conditions mathematical modelling and experimental validation, *Journal of Food Engineering* 79, 2007, 1094–1103
- [36] E. K. Akpınar, Y. Bicer, C. Yildiz, Thin layer drying of red pepper, *Journal of Food Engineering*, 59, 2003, 99–104
- [37] E. K. Akpınar, A. Midilli, Y. Bicer, Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling, *Energy Conversion and Management* 44, 2003, 1689-1705
- [38] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, Experimental study of drying kinetics of cladode of *Opuntia ficus indica*, Tétouan –Maroc , 254-259 , 2002
- [39] L. Ait. Mohamed , M. Kouhila, A. Jamali, S. Lahsasni, N. Kechaou, M. Mahrouz, Single layer solar drying behaviour of citrus *Aurantium* leaves under forced convection, *Energy Conversion and Management* 46 (2005) 1473–1483
- [40] M. Kouhila, M. Fliyou, A. Belghit, M. Otmani, N. Kechaou, Experimental study of solar drying kinetics of Moroccan eucalyptus globules, Tétouan-Maroc, 2002, 247-253.
- [41] I. Doymaz, Thin layer drying behaviour of mint leaves, *Journal of Food Engineering* 2005, 1-6.
- [42] Xiaoxi Yang, Wei Xu, Jing Ding, Yizho, « Theoretical and experimental studies on low-temperature adsorption drying of fresh ginger, 2005, *J. of Thermal Sciences*, Vol. 15, n°1, 71-78.
- [43] I. Doymaz, Drying characteristics and kinetics of okra, *Journal of Food Engineering*, 69, 2005, 275-279

المخلص:

تطرقنا في هذا العمل إلى الدراسة التجريبية و العددية لحركية التجفيف لمنتوج زراعي – غذائي (الطماطم و البصل) بهدف المساهمة في فهم و إدراك آلية تجفيف المنتجات الزراعية – الغذائية. هذا العمل عبارة عن محاكاة لمختلف العناصر المكونة لنظام التجفيف بالحمل القصري , بكتابة الموازنات الحرارية و الكتلية بين مختلف أوساط التبادل. هذا النموذج العددي يسمح بمحاكاة عمل المجفف باستعمال برنا مج بلغة الفورتران.

التأكد من صحة هذا النموذج يكون بتحقيق الدراسة التجريبية بحيث إن المعطيات التجريبية تهدف أساسا للحصول علي منحنيات سرعة التجفيف و دراسة تأثير عوامل الهواء المجفف (درجة الحرارة و السرعة) علي حركية التجفيف لهذه المنتجات.

الكلمات المفتاحية : التجفيف الشمسي ؛ المجفف الشمسي ؛ محاكاة ؛ الحمل القصري ؛ الطماطم ؛ البصل .

Résumé:

Nous intéressons dans ce travail à l'étude expérimentale et numérique de la cinétique de séchage d'un produit agro-alimentaire (tomate, et oignon) dans le but de contribuer à la compréhension du séchage des produits agro-alimentaires. On a présenté dans ce travail une modélisation des différents éléments qui constituent un système de séchage par convection forcée, ces modèles sont décrits par des équations de bilans thermique et massique entre les différents milieux d'échange. Ce modèle numérique permet de simuler le fonctionnement de notre séchoir, en utilisant un programme de calcul en langage FORTRAN 90.

La validation du modèle développé est ensuite effectuée grâce au développement d'une étude expérimentale. Les données issues des expérimentations sont essentielles pour passer des courbes de vitesse de séchage, et étudier l'influence des paramètres de l'air asséchant (température, vitesse) sur la cinétique de séchage.

Mots clés: séchage solaire, séchoir solaire, modélisation, simulation, convection forcée, tomate, oignon.