

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Thèse

Présentée

AU DEPARTEMENT DE MECANIQUE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA

Pour obtenir le diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES EN GENIE MECANIQUE
Option : Energétique

Par

Slimane BOUGHALI

**ETUDE ET OPTIMISATION DU SECHAGE SOLAIRE DES
PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES DANS LES ZONES
ARIDES ET DESERTIQUES**

Soutenue publiquement le : 13/07/2010 devant le jury composé de :

| | | |
|--------------------|---|---------------|
| Mohamed.SIAMEUR | Professeur à l'Université de Batna | Président |
| Hamza.BOUGUETTAIA | Professeur à l'Université de Ouargla | Examineur |
| Mostefa. ZEROUAL | Maître de conférence à l'Université de Batna | Examineur |
| Abdelhafid. MOUMMI | Maître de conférence à l'Université de Biskra | Examineur |
| Hocine. BENMOUSSA | Professeur à l'Université de Batna | Rapporteur |
| Bachir. BOUCHEKIMA | Professeur à l'Université de Ouargla | Co-rapporteur |

AVANT- PROPOS

Les travaux exposés dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA), Faculté des sciences et de la technologie et des sciences de la matière, Université Kasdi Merbah Ouargla. Par cette occasion je tiens à adresser mes plus vifs remerciements au directeur actuel, Omar Boukraa, ainsi qu'à l'ancien directeur Mohamed Tayeb Meftah.

Je remercie de manière très spéciale mon directeur de thèse, le professeur Hocine Benmoussa pour sa patience et sa compréhension, ses conseils et la confiance qu'il m'a toujours témoignée durant la réalisation de ce travail. J'adresse également mes remerciements au professeur Bachir Bouchekima, membre actif et moteur de l'équipe séchage au sein du laboratoire LENREZA.

Je suis très sensible à l'honneur que nous fait le professeur Si Ameer de l'Université Hadj Lakhdar de Batna d'avoir accepté de présider le jury; qu'il trouve ici ma profonde gratitude ainsi que mes sincères remerciements.

Mes remerciements vont également à mes examinateurs Mrs Pr. Bouguettaia, Dr Zeroual, et Dr Moummi pour avoir consacré du temps à l'examen de ce travail. Je suis très sensible à l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à mon jury de thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude !

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Mr Houti, technicien du laboratoire, pour le temps qu'il a consacré avec nous au montage des prototypes et de sa disponibilité appréciée.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu et aidé dans ce travail.

Enfin, j'entends dédier ce mémoire à mes parents, à tous les membres de ma famille, ainsi qu'à toute l'équipe de séchage du laboratoire LENREZA.

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Avant Propos | 1 |
| Sommaire | 2 |
| Nomenclature | 5 |
| Introduction Générale | 9 |
| CHAPITRE 1: GISEMENT SOLAIRE | 15 |
| 1. L'astre solaire | 16 |
| 1.1 Paramètre physique de l'astre solaire | 16 |
| 1.2 Rayonnement solaire | 17 |
| 1.3 Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire | 19 |
| 1.4 Interaction des rayonnements électromagnétiques | 21 |
| 1.5 Mesure du rayonnement solaire sur terre | 23 |
| CHAPITRE 2: NOTION GENERALE SUR LE SECHAGE | 25 |
| 2.1 Introduction | 26 |
| 2.2 L'air humide | 26 |
| 2.3 Caractéristiques des solides humides | 28 |
| 2.4 Les formes d'eau dans les aliments | 31 |
| 2.5 Activité de l'eau dans les aliments | 32 |
| 2.6 Isotherme d'absorption et de désorption | 32 |
| 2.7 Courbes de séchage | 35 |
| 2.8 Les différents modes de séchage | 39 |
| 2.9 Le séchage à l'air libre | 41 |
| 2.10 Les différents types de séchoir solaire | 43 |
| 2.11 Evaluation des séchoirs solaires | 47 |
| 2.12 Mode de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage | 49 |
| 2.13. Description et formulation mathématique du séchage | 50 |
| 2.14 Qualité des produits séchés | 55 |
| 2.15. Démarche à suivre pour bien mener une opération de séchage | 57 |
| CHAPITRE 3: APPROCHE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DES PROCEDES DE SECHAGE SOLAIRE | 61 |
| 3.1 Cas de la tomate | 62 |
| 3.2 Modèle théorique de description des mécanismes de séchage | 64 |
| 3.3 Modèle numérique de séchage | 70 |
| 3.4 Approche de l'optimisation du séchage solaire | 70 |
| 3.5 Approche expérimentale du séchage solaire | 72 |
| 3.6 Appareillage de mesure | 76 |
| 3.7 Séchage de la tomate | 76 |

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE4: ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION DES MODELES | 80 |
| 4.1 Comparaison des cinétiques de séchage de la tomate pour les deux prototypes de séchoir: naturel et forcé | 81 |
| 4.2 Influence des paramètres aérothermiques sur la durée de séchage dans le séchoir actif | 82 |
| 4.3 Cinétique de séchage des tranches de tomate dans un séchoir indirect hybride | 87 |
| 4.4 Effet du prétraitement sur la cinétique de séchage des tranches de tomate. | 96 |
| 4.5 Comparaison des résultats du modèle numérique et des résultats expérimentaux | 97 |
| 4.6 Coefficient de diffusion effectif de l'humidité du produit | 98 |
| 4.7 Comportement thermique du capteur solaire plan à vide | 106 |
| 4.8 Efficacité énergétique | 108 |
| 4.9 Contribution de l'énergie électrique et solaire dans le séchoir indirect hybride | 111 |
| 4.10 Analyse économique de l'amortissement du système | 112 |
| | |
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 114 |
| | |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 118 |
| | |
| ANNEXE A1 | 127 |
| | |
| ANNEXE A2 | 131 |
| | |
| RESUME | 136 |

NOMENCLATURE

| | | |
|-----------|--|--------------------|
| a_w | Activité de l'eau du produit | |
| C_{ppe} | Chaleur massique de la paroi externe | $J.kg^{-1}C^{-1}$ |
| C_{pa} | Chaleur massique de l'air | $J.kg^{-1}C^{-1}$ |
| C_{pe} | Chaleur massique de l'eau | $J.kg^{-1}C^{-1}$ |
| C_{ppi} | Chaleur massique de la paroi interne | $J.kg^{-1}C^{-1}$ |
| C_{ppr} | Chaleur massique du produit | $J.kg^{-1}C^{-1}$ |
| C_s | Chaleur spécifique du substrat | $J/kg C^{-1}$ |
| D_{VT} | Coefficient de thermo migration de vapeur | m^2/s |
| D_{LT} | Coefficient de thermo migration du liquide | m^2/s |
| D_L | Coefficient de diffusion du liquide | m^2/s |
| D_V | Coefficient de diffusion du liquide | m^2/s |
| D_M | coefficient de diffusion massique isotherme | m^2/s |
| D_T | coefficient de diffusion massique non isotherme | m^2/s |
| D_{MV} | coefficient de diffusion isotherme de la vapeur | m^2/s |
| D_{TV} | coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur | m^2/s |
| H | Enthalpie de l'air humide | $J.kg^{-1}$ |
| h_{ce} | Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air ambiant et la face externe de la paroi de l'armoire de séchage | $W. m^{-2}.K^{-1}$ |
| h_{ci} | Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et la face interne de la paroi de l'armoire de séchage. | $W. m^{-2}.K^{-1}$ |
| h_{cp} | Coefficient d'échange thermique par convection air-produit | $W. m^{-2}.K^{-1}$ |
| h_d | Coefficient d'échange thermique par conduction entre les parois de l'armoire de séchage | $W. m^{-2}.K^{-1}$ |
| H_r | Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face externe de la paroi de l'armoire de séchage et la voûte céleste. | $W. m^{-2}.K^{-1}$ |
| J_L | Flux masse surfacique du liquide | kg/m^2s |
| J_V | Flux masse surfacique de la vapeur d'eau | kg/m^2s |
| K | conductivité hydraulique du milieu | $W/m^2 K.$ |
| L_v | Chaleur latente de vaporisation de l'eau à $0^\circ C$ | Jkg^{-1} |

| | | |
|----------------|---|-----------------------------|
| \dot{m} | Taux de changement de phase | kg/s |
| $m_{a,s}$ | Masse de l'air sec | kg |
| M_h | Masse du produit humide | 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 |
| m_{pr} | Masse du produit par claie | kg |
| M_s | Masse du produit sec | kg |
| $m_{v,e}$ | Masse de la vapeur d'eau | kg |
| Nu | Nombre de Nusselt | |
| P_m | Pression de vapeur à la surface mouillée du solide | Pa |
| Pr | Nombre de Prandtl | |
| $P_{S,\theta}$ | Pression de saturation de la vapeur d'eau à la température θ | Pa |
| P_V | Pression de la vapeur d'eau dans l'air | Pa |
| Re | Nombre de Reynolds | |
| S_p | Surface du produit | m^2 |
| S_{pr} | Surface d'échange par convection air produit | m^2 |
| ΔS_p | Elément de surface de l'armoire de séchage | m^2 |
| T_H | Température humide | $^{\circ}C$ |
| $T_{s,p}$ | Température à la surface du produit | $^{\circ}C$ |
| $T_{a,a}$ | Température de l'air asséchant | $^{\circ}C$ |
| T_p | Température du produit | $^{\circ}C$ |
| X | Humidité absolue ou Teneur en eau | (kg d'eau/kg matière sèche) |
| X_i | Humidité absolue initiale | |
| X_{eq} | Humidité absolue d'équilibre | (kg d'eau/kg matière sèche) |
| X_r | Humidité réduite | $X_r = X/X_i$ |
| X_s | Humidité d'un solide en équilibre avec une atmosphère saturée en humidité | (kg d'eau/kg matière sèche) |

| | | |
|----------------|--|-------------------------------------|
| dX/dt | Vitesse de séchage | (Kg eau / kg matière sèche. min) |
| Y | Masse de la vapeur d'eau à θ °C | kg |
| φ | Humidité relative | % |
| φ_{eq} | Humidité relative d'équilibre | % |
| Ψ | Degré de saturation | |
| θ | Température | °C |
| α | Coefficient d'échange convectif | $W m^{-2} C^{-1}$ |
| λ | Conductivité thermique du produit | $W m^{-1} C^{-1}$ |
| λ^* | conductivité thermique apparente | $[W/m^2 K]$. |
| ρc | capacité calorifique équivalente | $J/m^3 K$ |
| ρ_s | Masse volumique de la phase solide | kg/m^3 |
| ρ_L | masse volumique de la phase liquide | kg/m^3 |
| ϕ_{cond} | Quantité de chaleur transférée au produit par conduction par unité de temps | W |
| ϕ_{conv} | Quantité de chaleur transférée au produit par convection par unité de temps | W |

Indices

| | |
|-------|--------------------------|
| a | Air |
| ab | Air ambiant |
| c | Ciel |
| P | Paroi |
| pe | Paroi extérieure |
| pi | Paroi intérieure |
| P_p | Isolant entre les parois |
| pr | Produit |
| v | Vent extérieur |

INTRODUCTION

GENERALE

La crise qui secoue actuellement le secteur de l'énergie dans le monde et la tension que connaissent les énergies fossiles ont rendu incontournable le développement des énergies alternatives et renouvelables comme l'énergie solaire.

Les ressources pétrolières et gazières sont appelées à s'épuiser, même si, actuellement, elles représentent une véritable aubaine pour notre pays. Mais à long terme, l'Algérie devra faire appel à des sources d'énergie renouvelable ; d'autant plus qu'elle possède un important gisement solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen avec 169440 TWh/an, soit 5000fois la consommation algérienne en électricité et 60fois la consommation de l'Europe des 15. La moyenne de l'éclairement solaire est de : 1700 kWh /m²/an pour les régions côtières, 1900 kWh /m² /an pour les hauts plateaux et 2650 kWh /m² /an pour le Sahara [1].

Les applications techniques de l'énergie solaire sont vastes, certaines peuvent être rudimentaires et d'autres très sophistiquées, puisque cela va de l'amélioration du séchage traditionnel des aliments à la production de plusieurs mégawatts électriques par le biais des concentrateurs solaires (projet hybride gaz-solaire de 130Mw électrique Hassi-Rmel) ou bien par les aérogénérateurs (projet hybride diesel-éolien de 10 Mw électrique Tindouf) ou par des générateurs photovoltaïques [2].

Dans le sud algérien, où l'humidité relative de l'air est inférieure à 30% durant la plus grande partie de l'année, où la durée de l'ensoleillement est de 3600heures/an et où le rayonnement solaire globale annuel est en moyenne de 650W/m² [3], le séchage solaire des produits agricoles constituera une solution avantageuse pour la réduction des pertes après récolte. L'opération de séchage est une opération dévoratrice d'énergie. Dans les pays développés environ 12 à 25% de la demande totale d'énergie primaire est consacrée au séchage [4]. La perte des produits agricoles dans les pays en voie de développement due à une surproduction pendant la période des récoltes et au manque de moyen de stockage s'élève au environ de 30 à 40% de la production globale [5]. Le séchage est l'une des méthodes de conservation des produits agro-alimentaires parmi tant d'autre ex: congélation, manipulation génétique du produit mais cette dernière est coûteuse et demande une haute technicité; quant à la congélation elle consomme beaucoup d'énergie car elle est alimentée en courant électrique d'une façon permanente ce qui se répercute sur le coût du produit.

De nos jours l'accroissement incessant de la population mondiale exige un accroissement parallèle de la production alimentaire. Cet indispensable surplus peut, dans un certain

pourcentage, être récupéré dans la réduction des pertes après récoltes: un séchage correct, bien adapté, est un remède envisageable.

Pour les pays en voie de développement, on a pensé à sécher en exploitant l'énergie solaire méthode ancestrale utilisée dans le passé et jusqu'au jour d'aujourd'hui, néanmoins il faut noter que l'efficacité des processus de séchage en plein air est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensibles au rayonnements ultra violets, insectes, rongeurs, etc.) [5]. Pour parer aux inconvénients du séchage en pleine air des séchoirs solaires ont été conçus. En plus de l'aspect purement énergétique il faut prendre en considération l'aspect économique et l'aspect qualité du produit séché. Au fait la philosophie générale est la suivante: Compte tenu des conditions météorologiques et des contraintes biologiques du produit à sécher .Quelle est l'installation solaire qui séchera une production donnée dans les meilleurs délais et à moindre coût tout en gardant les propriétés organoleptiques du produit?!

Pour bien maîtriser une opération de séchage il faut pouvoir maîtriser les trois paramètres fondamentaux : Température, Humidité et vitesse de l'air asséchant. Il faut prendre l'opération de séchage en vitesse c'est-à-dire pouvoir sécher rapidement pour éviter le pourrissement du produit mais pas trop vite une croûte risque alors de se former en surface empêchant l'eau de sortir ; ni à trop haute température le produit se dénature et noircit. Il faut prendre aussi en considération les propriétés et les caractéristiques du produit à sécher. "Sécher est devenu beaucoup plus un art qu'une science"?!!

Bien définir les grands objectifs : l'objectif est-il d'accroître la vente des produits secs, voire d'introduire une nouvelle activité économique ou surtout de limiter les pertes après une récolte destinée à l'autoconsommation « we eat what we can and we can what we can't ».Il faut alors raisonner en termes de service rendus et non en termes strictement commerciaux. En plus il faut préserver les propriétés organo-leptiques du produit lors du séchage et penser à la ré humidification du produit lors de son utilisation une seconde fois. L'opération de séchage des produits agro-alimentaires est simple dans son principe, mais élaborée dans son mécanisme, elle consiste à un transfert de chaleur et de masse couplés. Les mécanismes physiques qui contrôlent ces transferts de matière sont divers ; ils dépendent de la structure et de la composition des produits, mais aussi probablement des procédés utilisés pour générer ces transferts. Par souci de simplification ces transferts sont généralement modélisés par les lois de Fick qui supposent un mécanisme purement diffusif.

De nombreux modèles ont été développés dans la littérature pour décrire le processus de séchage. Ces modèles peuvent être classés en deux grandes catégories correspondant à deux démarches différentes.

1. les modèles de connaissances, correspondant à une démarche théorique, analysent et décrivent les mécanismes de transfert entrants en jeu lors du séchage d'un produit. Ces modèles sont complexes et font apparaître dans leur écriture un certain nombre de paramètres spécifiques au produit tel que le coefficient de diffusion qui varie en fonction de la température et de la teneur en eau du produit.
2. Les modèles de comportements correspondant à une démarche empirique, la spécificité du produit ainsi que la complexité de sa structure est incluse dans l'équation cinétique développée.

Le choix d'un type de séchoir et de ses dimensions est encore empirique et trop rudimentaire pour traduire la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Cette thèse s'inscrit dans une optique d'étude et d'optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires en mettant l'accent sur la conception et la réalisation au niveau du Laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA) Université de Ouargla de deux prototypes de séchoir solaire indirect de complexité aussi réduite que possible, l'un fonctionnant en convection naturelle, l'autre en convection forcée. L'opération de séchage est simple dans son principe et très complexe dans la compréhension exacte du processus; cette complexité est due au fait que le processus physique est fortement non linéaire, les phénomènes dominants dépendent des conditions de séchage et changent au cours du séchage et les processus d'échange et d'interaction sont compliqués. A cet effet on a recours à une approche macroscopique expérimentale qui consiste à déterminer le comportement cinétique d'un produit agroalimentaire au cours de son séchage dans des conditions aérothermiques fixées. Pour cela on doit:

- dégager un type de séchoir adéquat à réaliser pour le séchage des produits agricoles.
- étudier l'influence des paramètres aérothermiques, épaisseurs des tranches de tomate, effet de prétraitement et coefficient de diffusion sur la teneur en eau et sur la cinétique de séchage des tranches minces de tomate. Suite aux différents compromis existants dégager le couple optimum.

-trouver le modèle mathématique approprié pour ce mode de séchage et pour ce type de produit dans ces conditions opératoires spécifiques; confronter les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques.

-Une réflexion sur les problèmes d'économie d'énergie lors des opérations de séchage, nous amène à calculer le quote-part de l'énergie électrique et solaire dans cette opération, ainsi que le temps de retour de l'investissement pour notre type de séchoir.

Cet ouvrage est composé de quatre parties:

La première partie traite le gisement solaire et l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement émis par le soleil avant d'arriver au niveau du capteur.

Dans la deuxième partie on en trouve: les notions théoriques de base pour la compréhension du phénomène de séchage (l'air humide, les isothermes de sorption et désorption, cinétique de séchage...etc.), étude comparative (avantages et inconvénients) entre le séchage à l'air libre et sous séchoir, les différents types de séchoir solaires actifs et passifs sont énumérés, système d'équations mathématiques régissant le phénomène de séchage au sein de la chambre de séchage est étudié et enfin la notion de qualité du produit séché est mise en exergue.

Dans la troisième partie on a fait une étude épistémologique sur le séchage avec les premiers formalismes (à partir de 1921) de Lewis, Sherwood et Hougen; (formalismes posés mais avec un inconvénient majeur c'est qu'ils négligent complètement l'effet de la chaleur). Les seconds formalismes (à partir de 1938) modèle de Luikov, Krisher, Philip et De vries, Whitaker; (modèle qui prennent en compte le couplage transfert de chaleur et de masse). Le développement de plusieurs modèles mathématiques simulant le transfert de chaleur et de masse est abordé dans cette partie La notion d'optimisation (conceptuelle et spécifique) a été étudié. L'approche expérimentale du séchage solaire (types de séchoir, appareillage de mesure, protocole du séchage de la tomate) terminent ce chapitre.

Dans la quatrième partie on a fait une analyse des résultats expérimentaux qu'on a confrontés avec les modèles mathématiques existants. Suite aux paramètres statistiques calculés (R^2 et χ^2) le modèle approprié pour décrire les cinétiques de séchage pour ce type de produit (tranche de tomate mince) dans ces conditions est le modèle de Midilli. L'effet du prétraitement et de l'efficacité énergétique du capteur et du séchoir est étudié à la fin de ce chapitre, de même le quote-part des énergies électriques et solaires utilisés dans cette

opération ainsi que le temps de retour de l'investissement pour notre type de séchoir a été calculé.

On a terminé notre travail par une conclusion rassemblant l'ensemble des résultats et par l'énoncé de perspectives qui pourraient constituer une suite favorable pour l'optimisation de notre séchoir.

CHAPITRE 1:

GISEMENT SOLAIRE

1. L'ASTRE SOLAIRE:

Il est utile d'effectuer un bref aperçu sur l'astre solaire qui est à l'origine de toute vie sur terre. La machine soleil est considérée comme étant une grande centrale nucléaire fournissant de l'énergie et gardant ses déchets (centrale nucléaire idéale). Cette machine nous délivre une énergie propre (non polluante), gratuite, disponible, silencieuse, et elle ne tombe jamais en panne. On ne fournit aucun effort pour produire cette énergie mais on conçoit seulement des appareils pour la capter.

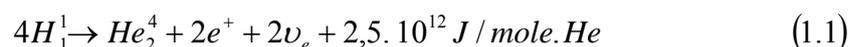
1.1 PARAMETRES PHYSIQUES DE L'ASTRE SOLAIRE:

Le soleil est une pseudo sphère de plasma (matière ionisée) dont le rayon est égale à 695980 km soit 109 fois le rayon de la terre. Il est situé à une distance moyenne de 149598000km de la terre. Le diamètre angulaire du soleil, vu par un observateur terrestre a pour valeur moyenne 32' soit 0,5° environ. Le soleil est formé d'une masse gazeuse de $1.9891 \cdot 10^{30}$ kg composée des éléments hydrogène, hélium et d'un mélange comportant tous les autres éléments du tableau de Mendeliev; ces composantes sont dans des proportions respectives de 80%, 19% et 1%. Sa densité est de 1,41 celle de la terre est égale a 5,5 [1].

L'astre solaire a une forme pseudo sphérique non homogène constituée de plusieurs couches concentriques. On trouve du centre vers l'extérieur selon les théories actuelles:

*Le noyau:

De dimension et de composition inconnue et qui est inaccessible aux investigations car tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches extérieures. La température atteint 15 millions de degrés et la pression 1 milliard atmosphère. C'est dans le noyau que se produisent une suite de réactions thermonucléaires exothermiques compliquées (fusion nucléaire) dite cycle de Bethe qui transforment, l'hydrogène en Hélium et qui s'écrit globalement:



Où e^+ désigne l'électron positif, ν_e neutrino électronique.

*Une zone radiative:

Zone de combustion de type radiatif de 500.000 km d'épaisseur à travers laquelle l'énergie est véhiculée uniquement par rayonnement.

*Une zone convective:

Zone convective de 100.000 km d'épaisseur à travers laquelle l'énergie est entraînée par des mouvements de convection.

*La photosphère:

D'une épaisseur de 400km seulement, la température à sa surface est de l'ordre de 4500°K, au delà de la photosphère la structure du soleil est généralement connue sous le nom d'atmosphère solaire.

*La chromosphère:

D'une épaisseur de 8000 km, ou la température augmente de 4500°K à 50.000°K vers l'extérieur.

*La couronne solaire:

Représentant l'aurole du soleil, s'étend jusqu'à 250 10⁶ km dans l'espace interplanétaire. La température varie de 1 à 2 millions de degrés [2].

1.2 LE RAYONNEMENT SOLAIRE:

La connaissance du rayonnement solaire dans tous ses aspects est nécessaire dans toute application de l'énergie solaire. Ce rayonnement est perturbé à la traversée de l'atmosphère (absorption, réflexion, réfraction), chose qu'on doit prendre en considération, ainsi que la répartition spectrale en fonction de la longueur d'onde car les récepteurs d'énergie sont généralement sélectifs et fonctionnent dans une bande de fréquence appropriée. Pour cela on a vu utile de définir ci-dessous quelques notions essentielles pour le rayonnement solaire.

1.2.1 Spectre solaire:

Le rayonnement solaire est constitué par un flux de particule appelé photons émise par le soleil et se déplaçant à la vitesse de $3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$. Ces photons composants le rayonnement électromagnétique sont porteur d'une énergie d'après la loi de Louis de Broglie $E=hv=h\frac{c}{\lambda}$ où

h est la constante de Planck, ν est la fréquence, c est la vitesse de la lumière, λ longueur d'onde.

Le spectre du rayonnement solaire c'est sa décomposition en longueur d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est composée de toute sorte de rayonnement de couleur différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde qui s'étend en hors atmosphère pratiquement de $0.1\mu\text{m}$ à $0.4\mu\text{m}$, répartie comme suit:

| | |
|--|--------------------------|
| Zone spectrale de $0.1\mu\text{m}$ a $0.38\mu\text{m}$ | rayonnement ultra-violet |
| " de $0.38\mu\text{m}$ a $0.78\mu\text{m}$ | " visible |
| " de $0.78\mu\text{m}$ a $0.4\mu\text{m}$ | " infra-rouge. |

1.2.2 Constante solaire:

La constante solaire représente le flux du rayonnement solaire reçu par une surface unitaire disposée perpendiculairement aux rayons solaires.

Supposons que toute l'énergie émise par le soleil est reçue par la terre (absence de l'atmosphère) on aura alors:

$$\text{constante solaire} = S_0 = \sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{D_{ST}} \right)^2 \quad (1.2)$$

R_s = rayon du soleil, D_{ST} = distance terre-soleil, $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}\text{W/m}^2\text{K}^4$

Ce flux mesuré hors atmosphère terrestre a pour valeur moyenne $(S_0)_{\text{ext}} = 1353\text{Wm}^{-2}$. Cette valeur est une valeur moyenne puisque la distance terre soleil ($14.945.000\text{km} \pm 1.7\%$) varie au cour de l'année. Il faut donc appliquer à la constante solaire une correction en fonction du quantième n du jour de l'année (compté a partir du 1°janvier). La constante solaire hors atmosphère pour un jour quelconque s'écrit selon [2]: $(S_0)_{\text{ext}}= 1353(1+0,033\cos 0.984n)$ où n représente le quantième annuel (de 1 à 365).

1.2.3 L'Albédo:

L'albédo d'une surface c'est le rapport de la puissance réémise à la puissance reçue du rayonnement solaire Une surface blanche est caractérisée par un albédo voisin de 1 tandis qu'une surface noir son albédo est très faible et avoisine le zéro. L'albédo du sol intervient

souvent; il varie avec sa nature, son couvert végétal et son état d'humidité. Pour un même sol l'albédo varie selon qu'il est nu ou couvert de verdure sec ou saturé d'humidité.

1.3 INFLUENCE DE L'ATMOSPHERE SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE:

1.3.1 Rôle de l'atmosphère:

L'atmosphère terrestre protège la terre des excès de rayonnement solaire et arrête les rayons les plus dangereux au développement de la vie sur terre, exemple du filtrage des rayons ultra violet par la fameuse couche d'ozone de la stratosphère. Cette énergie solaire qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère: par absorption, réflexion, réfraction et par diffusion. La structure de cette atmosphère conditionne, par conséquent, les divers transferts énergétiques sol- atmosphère.

1.3.2 Structure de l'atmosphère

La stratification de l'atmosphère en trois grandes couches est représentée par:

-L'homosphère, comprise entre 0 et 90 km d'altitude

-L'hétérosphère, " " 90 et 700 km "

-L'exosphère, " " 700 et 3000 km "

L'homosphère est subdivisée en trois principales couches énumérées ci-dessous:

-La troposphère: s'étend de la surface de la terre à une altitude de 10 à 16 km, où la température et la pression y décroissent, respectivement de 5,6°C par kilomètre et de 400 à 100 mbar jusqu'à la base de la couche immédiatement supérieur qui est la stratosphère. Plus de la moitié de la masse gazeuse de l'atmosphère se trouve dans la troposphère; elle contient une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78 et 21%), du CO₂, de la vapeur d'eau, des aérosols, des nuages de gouttelette d'eau ou de cristaux de glace.

-La stratosphère: se situe entre 16km et 55km d'altitude elle contient plusieurs couches dont l'une particulièrement riche en ozone, présente une température voisine de 0°C à la limite supérieur de la couche. Ce réchauffement est du a l'absorption partielle du rayonnement ultraviolet émis par le soleil. La pression n'est plus que de 1mb à sa limite supérieure, la stratopause.

-Ionosphère: s'étale de 55km jusqu'à 500km. Les couches ionosphériques, responsables de propagation radioélectrique, se situent en chevauchement entre l'homosphère et l'hétérosphère, c'est le lieu de formation des aurores polaires ou boréales caractérisés par des jets de lumière formant des arcs et des voiles de couleur jaune doré. On notera, que les limites des couches sont fonction des latitudes et des saisons.

1.3.3 Air Masse:

Pour traduire l'influence de l'atmosphère (Figure1.1) on introduit la notion d'air masse (A.M)

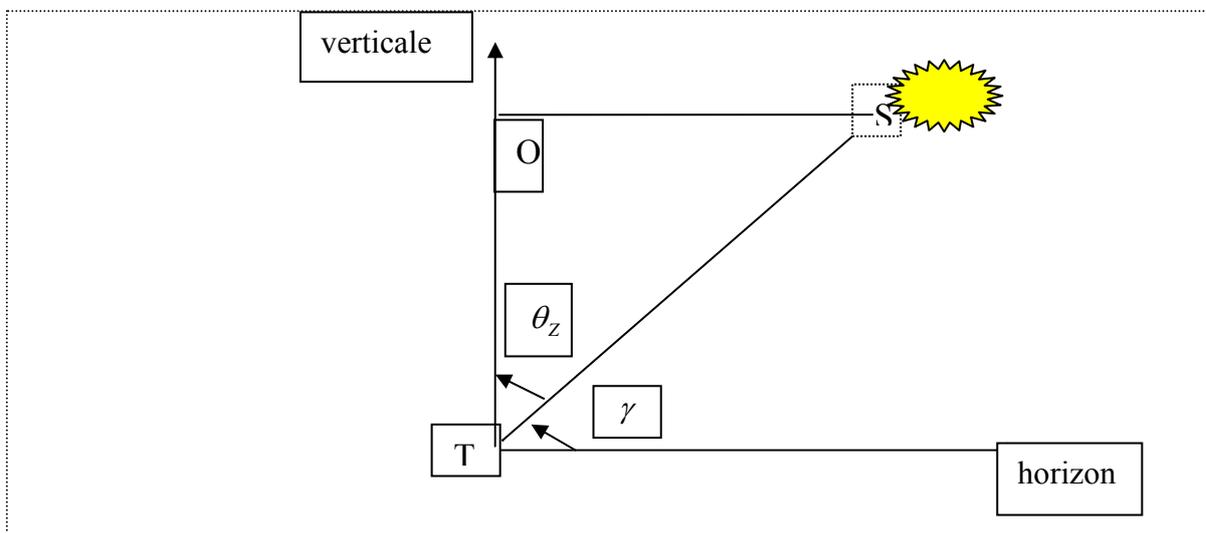


Fig.1.1: masse atmosphérique ou air masse

$$\text{Air Mass} = \frac{\overline{TS}}{\overline{TO}} = \frac{\text{trajet du rayon solaire}}{\text{épaisseur de l'atmosphère}}$$

On appelle "masse d'air" m ou air mass en anglais, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, par rapport à une traversée verticale.

La longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère est:

$$TS = \frac{TO}{\sin \gamma}, \text{ d'ou } m = \frac{1}{\sin \gamma} = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

γ =hauteur du soleil

θ_z =angle du zénith

La valeur de m calculée est fonction de l'altitude du lieu (Z en km) et de la pression atmosphérique (P en mbar ou kPa) [1].

$$m = \left(\frac{1}{\sin \gamma} \right) \left(\frac{P}{1000} \right) \left(1 - \frac{Z}{5} \right) \quad (1.3)$$

Par convention, AM_0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère.

AM_1 " " à incidence verticale $\gamma = 90^\circ$.

$AM_{1,5}$ " " incliné d'un angle $\gamma = 45^\circ$.

1.4 INTERACTION DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES:

1.4.1 Interaction des rayonnements électromagnétiques avec l'atmosphère:

Le rayonnement solaire avant d'atteindre le sol traverse les différentes couches atmosphériques où il subit le phénomène de diffusion et d'absorption.

1.4.1.1 Phénomène de diffusion:

La diffusion est, en fait, la résultante des phénomènes de réflexion, réfraction et de diffraction par les particules et les gaz existant dans l'atmosphère. La diffusion varie d'un lieu à un autre, d'une saison à une autre. Le niveau de diffusion est corrélié à la longueur d'onde du rayonnement solaire, de l'épaisseur des couches atmosphériques traversées, ainsi que de la densité des particules et des molécules existantes dans ces couches. Il existe 3 types de diffusion:

*Diffusion de Rayleigh:

Elle se produit lorsque les longueurs d'onde du rayonnement solaire sont supérieures aux dimensions des particules. La diffusion de Rayleigh par les molécules d'azote et d'oxygène existe dans toutes les couches de l'atmosphère; c'est elle qui rend le ciel visible en dehors du faisceau issu du soleil.

*Diffusion de Mie:

Se produit lorsque les longueurs d'onde du rayonnement solaire avoisinent les dimensions des particules. Ce type de diffusion est souvent produit par la poussière, le pollen, la fumée et l'eau.

*Diffusion non sélective:

Se produit lorsque les longueurs d'onde du rayonnement sont inférieures aux dimensions des particules; ce qui fait que toutes les longueurs d'onde sont dispersées. Les gouttes d'eau de l'atmosphère dispersent le bleu, le vert et le rouge de façon presque égale, engendrant une lumière blanche. Ce qui explique la couleur des brouillards et des nuages.

1.4.1.2 Phénomène d'absorption:

L'ozone, dont la teneur est prépondérante vers l'altitude de 25km, absorbe les rayonnements ultraviolets qui sont néfastes à la santé des êtres vivants. La vapeur d'eau existante en grande proportion dans la troposphère absorbe les infra rouges. Le bioxyde de carbone est un gaz à effet de serre qui absorbe beaucoup de rayonnement dans la portion infrarouge thermique du spectre et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère.

1.4.2 Interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière:

L'ensemble des capteurs solaires ne répond pas de la même façon quand ils sont exposés face au soleil. Les cellules photovoltaïques par exemple répondent au rayonnement global et dépendent beaucoup de la longueur d'onde. Elles sont particulièrement sensibles aux radiations solaires de longueur d'onde comprise entre (0.4 et 1 μ m) du spectre solaire; par contre les capteurs thermiques (séchoir, chauffe eau, etc.) sont plus sensibles aux rayonnements infra rouges, de plus, lorsque l'énergie solaire incidente (φ_i) atteint le capteur (Figure 1.2), la surface peut absorber l'énergie (φ_a), réfléchir(φ_r) ou transmettre l'énergie incidente (φ_t) de tel façon que :

$$\varphi_i = \varphi_r + \varphi_a + \varphi_t \quad (1.4)$$

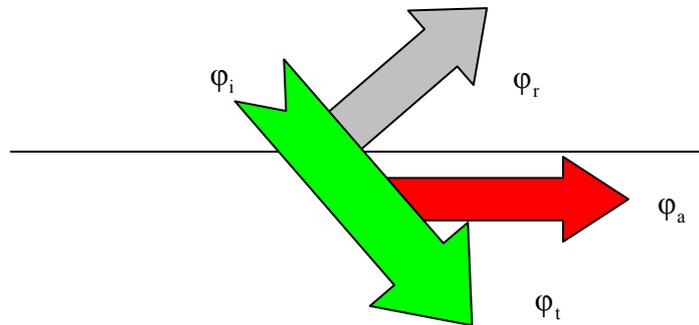


Figure1.2 : phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission
 Au niveau du capteur solaire.

1.5 MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR TERRE:

1.5.1 Composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire arrivant au niveau de notre capteur est la somme de deux rayonnements : rayonnement direct (I) provenant directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère et rayonnement diffus (D) qui est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère et provenant des différents obstacles (nuages, aérosols, végétation, terre....etc.) et n'ayant pas une direction privilégiée. La somme du rayonnement direct (I) et du rayonnement diffus (D) constitue le rayonnement global (G).

$$G = I + D \quad (1.5)$$

Le rayonnement global est mesuré expérimentalement à l'aide d'un pyranomètre appareil dont son globe de verre lui confère une grande acceptation angulaire de telle façon qu'il peut capter les rayons venant de toutes les directions, lorsque l'appareil est muni d'un dispositif pare-soleil, il peut mesurer le rayonnement diffus. Le rayonnement direct (I) est mesuré à l'aide

d'un pyréliomètre, appareil très coûteux généralement équipé d'un système asservi qui « suit le soleil » dans sa trajectoire. Connaissant ces deux grandeurs on peut en déduire le rayonnement diffus à l'aide de l'équation (1.5).

1.5.2 Eclairement ou densité de puissance :

Les éclairements s'expriment en Wm^{-2} . La constante solaire qui représente l'éclairement moyen du rayonnement solaire hors atmosphère est voisine de 1370Wm^{-2} . L'éclairement global moyen au niveau de notre capteur à air incliné à la latitude de Ouargla avoisine les 950Wm^{-2} .

1.5.3 Irradiation ou densité d'énergie:

Représente l'énergie correspondante à l'éclairement sur une durée déterminée, elle s'exprime en Wh m^{-2} ou en J m^{-2} .

CHAPITRE 2

NOTION GENERALE

SUR LE SECHAGE

2.1 INTRODUCTION:

Le séchage est une opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau. Cette opération met en jeu un transfert de chaleur (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide) et un transfert de masse (le liquide imprégnant le solide passe à l'état de vapeur dans l'air asséchant).

Le séchage est largement utilisé dans l'industrie chimique où il vient souvent en complément d'opérations comme la sédimentation, la filtration ou l'essorage. Les raisons du séchage peuvent être regroupées comme suit:

*Faciliter la conservation des produits (en réduisant l'activité de l'eau) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités agricoles ou industrielles.

*Diminuer la masse et le volume des produits pour réduire leur encombrement et faciliter leur transport.

*Donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit (flocons de purée de pomme de terre, café lyophilisé.....etc.).

Mais en revanche les inconvénients du séchage sont:

*Modification du produit dans sa forme, sa texture, ses qualités nutritionnelles et organoleptiques.

*L'opération est énergivore : le séchage absorbe, par exemple en France 14% de la consommation énergétique industrielle, 40% de l'énergie consommée en séchage étant imputable aux industries agro-alimentaires (Nadeau et Puiggali,1995)[4]

Ces problèmes de séchage solaire liés à la conservation des produits agricoles se posent, en particulier, dans les pays en voie de développement qui disposent en général de ressources solaires importantes; et l'une des multiples façons de valoriser ces ressources est la production de chaleur à basse température, suffisante pour le séchage.

2.2 L'AIR HUMIDE:

Le mode de séchage le plus répandu dans l'industrie chimique est le séchage par convection; il consiste à faire agir sur la matière à sécher un courant de gaz ou d'air (de faible

humidité) et chaud qui vaporise l'humidité du solide et entraîne la vapeur en se transformant en un gaz ou air humide refroidi.

Le mélange air sec et vapeur d'eau constituent l'air humide. Nous définissons ci-après les importantes grandeurs caractérisant l'air humide.

2.2.1 L'humidité absolue (X):

Appelée aussi humidité spécifique, ou teneur en eau; représentant le rapport de la masse de la vapeur d'eau ($m_{v,e}$) contenue dans un volume V de l'air humide sur la masse d'air sec ($m_{a,s}$) contenue dans ce même volume.

$$X = \frac{m_{v,e}}{m_{a,s}} \quad (2.1)$$

2.2.2 L'humidité relative(ϕ):

L'humidité relative (ϕ) c'est le rapport entre la pression de la vapeur d'eau dans l'air (P_v) sur la pression de saturation ($P_{s,\theta}$) de cette vapeur d'eau à la température θ .

$$\phi = \frac{P_v}{P_{s,\theta}} \quad (2.2)$$

En pratique, on utilise beaucoup plus l'humidité absolue (X) que la pression P_v par conséquent on donne le rapport entre l'humidité absolue (X) de l'air pour une certaine température et X_s humidité absolue correspondante à l'état de saturation pour la même température; rapport appelée degré de saturation Ψ .

$$\psi = \frac{X}{X_s} \quad (2.3)$$

2.2.3 Température sèche T et température humide T_H de l'air:

On nomme température sèche de l'air ou d'un gaz la température indiquée par une sonde de température nue placée dans le courant d'air ou de gaz.

La température humide (ou température de bulbe humide) c'est la température indiquée par le thermomètre lorsqu'on couvre le bulbe du thermomètre avec une mèche humide (imprégnée d'eau liquide ex:tissu, coton,).

La différence ($T-T_H$) représente l'humidité relative de l'air.

*Elle est égale à zéro si l'air est saturé en vapeur d'eau c'est-à-dire $\varphi=100\%$ donc pas d'évaporation possible.

*Elle augmente avec la différence $[P_s(\theta) - P_v]$ qui est le terme moteur du transfert de masse.

2.2.4 Enthalpie de l'air humide:

L'enthalpie de l'air humide définit le contenu énergétique de cet air.

L'enthalpie notée H de 1kg d'air sec associée à Ykg de vapeur d'eau à $\theta^\circ\text{C}$ représente la quantité de chaleur à fournir à ce mélange sous une pression constante pour l'amener de la température de référence 0°C à la température de $\theta^\circ\text{C}$. Les états de référence à considérer sont l'eau liquide et le gaz sec à 0°C .

L'enthalpie de l'air humide H est la somme de l'enthalpie de l'air et de l'enthalpie de l'eau.

$$H = c_{p_a} \theta + Y(L_v + c_{p_e} \theta) \quad (2.4)$$

Où c_{p_a} et c_{p_e} sont respectivement les chaleurs massiques de l'air et de l'eau à l'état gazeux et L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C .

2.3 CARACTERISTIQUES DES SOLIDES HUMIDES:

2.3.1 Humidité absolue

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

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (2.5)$$

2.3.2 Humidité relative

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.

$$\varphi = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (2.6)$$

2.3.3 Hygroscopicité

L'hygroscopicité d'un corps c'est sa tendance à absorber l'humidité de l'air.

La présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur due aux forces de surface et de force capillaire qui sont fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides.

a - Lorsque le liquide adhère à la surface externe d'un solide, il est retenu par des forces superficielles peu intenses.

La rétention du liquide par adsorption à l'intérieur des pores, met en jeu des forces capillaires d'autant plus intenses que les interstices sont plus fins. Dans le cas de gros capillaires, l'humidité n'est retenue que faiblement. Au cours du séchage, qui s'effectue par évaporation du liquide superficiel, ce dernier est peu à peu remplacé par du liquide provenant des interstices du solide.

Un solide se comportant de cette manière n'est pas hygroscopique.

b - Lorsque les pores présentés par le solide sont extrêmement fins, les forces capillaires sont intenses et peuvent retenir en profondeur de notables quantités d'humidités. Dans un tel cas, l'eau qui se déplace n'est plus qu'une eau liée ou vapeur d'eau. Ce solide est dit hygroscopique.

2.3.4 Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz

Considérons un solide mouillé, d'humidité X , soumis à l'action d'un courant gazeux constant, renfermant sous forme vapeur, une certaine quantité du liquide associé au solide. Sous pression constante, et à une température déterminée, le mélange gazeux est caractérisé par son humidité relative ϕ qui est le quotient de la pression partielle P_V de la vapeur dans le mélange à la même température θ par la pression de saturation P_S .

Si la tension de vapeur P_m (pression de vapeur à la surface mouillée) du liquide associé au solide est différente de P_V il s'établit entre deux phases en présence, un transfert de matière tendant vers un état d'équilibre qui est atteint lorsque $P_V = P_m$.

* Si $P_V > P_m$ ce transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère gazeuse vers le solide et correspond à un phénomène d'adsorption, c'est-à-dire à un mouillage du solide.

* Si $P_V < P_m$ le transfert de matière s'effectue du solide vers la phases gazeuse et correspond à une désorption, c'est-à-dire à un séchage du solide.

* Lorsque $P_V = P_m$ l'état d'équilibre est atteint et il n'y a pas de transfert de matière pour une température donnée, la pression restant constante, à chaque valeur de l'humidité relative φ de l'atmosphère correspondant une valeur de l'humidité à l'équilibre X_{eq} du solide, et on peut construire une isotherme d'équilibre, relative au solide considéré [Figure2.1].

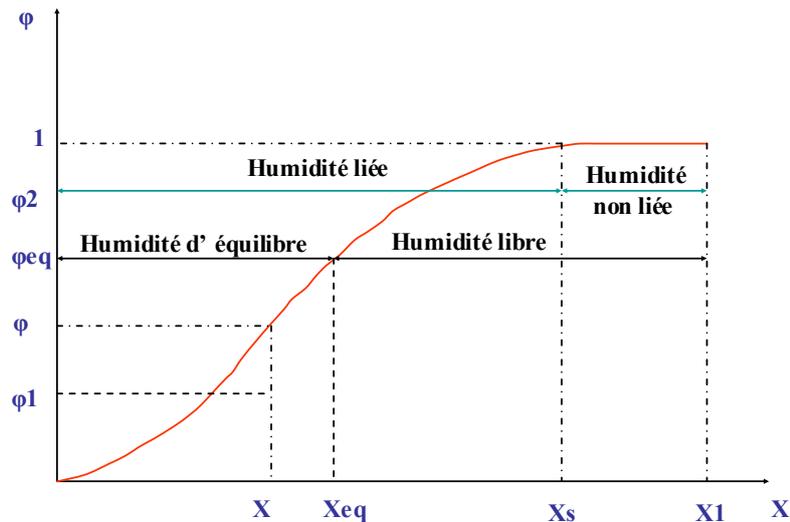


Figure 2.1: Isotherme d'équilibre

On voit sur la figure 2.1, que l'humidité X d'un solide ne peut être en équilibre qu'avec une atmosphère dont l'humidité relative est φ_{eq} . Si l'humidité relative de l'atmosphère est :

- 1- $\varphi_1 < \varphi_{eq}$ il y'a désorption c'est-à-dire séchage du solide.
- 2- $\varphi_2 > \varphi_{eq}$ il y'a adsorption c'est-à-dire mouillage.

Soit X_s l'humidité d'un solide en équilibre avec une atmosphère saturée en humidité ($\varphi = 1$).

Si un solide d'humidité $X_1 > X_{eq}$ est soumis à un courant gazeux constant, d'humidité relative, il perd son humidité jusqu'à ce que celle-ci devienne égale à X_{eq} qui est l'humidité à l'équilibre du solide correspondant à φ_{eq} . Un séjour, même prolongé dans cette atmosphère ne diminue pas son humidité au dessous de X_{eq} . La différence $(X_1 - X_{eq})$ représente l'humidité libre qui seule peut être évaporée.

Lorsque l'humidité d'un solide est inférieure à X_s , elle exerce une pression de vapeur inférieure à celle du liquide pur à la même température ; elle est appelée humidité liée au solide, elle consiste au liquide contenu dans les capillaires fins ou en solution retenu dans les parois cellulaires du solide, ou adsorbé à la surface du solide.

Si au contraire, l'humidité du solide est supérieure à X_s , elle est appelée humidité non liée : la tension de vapeur qu'elle exerce est celle du liquide pur à la température où l'on opère. Cette humidité peut se lire sur le diagramme, elle est égale à $(X_1 - X_s)$.

2.4 LES FORMES D'EAU DANS LES ALIMENTS:

L'eau dans un aliment peut généralement se présenter sous trois formes:

2.4.1 Eau d'hydratation:

L'eau d'hydratation est retenue soit sous forme d'un film adhérent à la surface externe du solide ou dans les espaces interstitiels et les pores par des forces de capillarité liées à la tension superficielle du liquide cette eau est appelée "eau libre"; soit d'une façon plus intime, par des forces de cohésion plus importantes avec la matrice solide et/ou avec les autres molécules d'eau; cette eau est appelée "eau liée".

2.4.2 Eau de constitution:

L'eau de constitution participe à la structure moléculaire intime du solide, comme par exemple l'eau contenue dans les gels. Son élimination, plus ou moins complète, constitue une déshydratation et modifie la structure même du solide, et ce n'est pas notre but recherche lors d'un séchage. La déshydratation est accompagnée d'une modification de la structure moléculaire primitive du produit.

2.4.3 Vapeur d'eau:

La vapeur d'eau mélangée à l'air sec occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide.

2.5 ACTIVITE DE L'EAU DANS LES ALIMENTS:

L'activité de l'eau A_w est une grandeur classique, utilisée pour évaluer la capacité avec laquelle un produit dans une atmosphère donnée se dégrade d'un point de vue biologique. Elle correspond au rapport entre la pression de la vapeur d'eau de l'aliment (pression de la vapeur d'eau à la surface du produit) et la pression de la vapeur d'eau pure à la même température θ^0 .

$$A_w = \frac{\text{pression partielle de l'eau dans l'aliment à } \theta_0}{\text{pression partielle de l'eau pure à } \theta_0} \quad (2.7)$$

L'activité de l'eau dans un produit représente aussi l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit (lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre eux).

La valeur de l'activité de l'eau varie entre 0 (produit sec au point que toute l'eau est liée à l'aliment, et donc sans qualité réactive) et 1 (eau pure et sans soluté, difficile à atteindre et surtout à maintenir). La valeur optimale pour la conservation des produits biologiques, sans additif ni réfrigération, correspond à une activité de l'eau située entre 0.25 et 0.35; la croissance des bactéries est généralement limitée lorsque l'activité de l'eau descend en dessous de 0.90 de même les moisissures et les levures sont inhibées respectivement vers une activité de 0.70 et 0.80 [5].

2.6 ISOTHERME D'ADSORPTION ET DE DESORPTION:

2.6.1 Relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau

Les courbes, donnant la teneur en eau (X en kg d'eau par kg de matière sèche) en fonction de l'activité de l'eau dans un produit pour une température donnée, sont appelées isothermes de désorption (cas du séchage) ou d'adsorption (cas de la réhumidification). Pour chaque valeur de l'activité (a_w) d'un produit, l'isotherme donne la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) du produit à une température donnée. Ces deux courbes d'isothermes (Fig2.2) ont généralement des allures différentes (effet hystérésis) car le séchage d'un produit entraîne des modifications de structure et de porosité irréversible [5].

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit. Elle permet de calculer la teneur en eau d'équilibre X_{eq} du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau X du produit à la fin

du séchage. La détermination de cette courbe consiste à placer un échantillon du produit dans une atmosphère à humidité relative connue jusqu'à l'équilibre (masse de l'échantillon inchangée) à ce moment on relève la valeur de l'humidité absolue d'équilibre du produit, ce qui représente un point de la courbe. La méthode utilisée est la méthode des sels saturés qui consiste à suspendre un échantillon du produit dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante. Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixée La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. On utilise autant de sels ou de concentration différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme. Le tableau A1 indiquant les humidités relatives de l'air au-dessus des solutions salines saturées pour diverses températures est présenté en annexe A1. Cette méthode est très longue : l'équilibre air/produit n'est parfois atteint qu'après plusieurs semaines, elle ne convient donc pas à la détermination des points de l'isotherme correspondants aux valeurs élevées de HR pour des produits biologiques qui subiraient des dégradations dues aux moisissures avant que l'équilibre ne soit atteint. La cinétique peut toutefois être accélérée de manière importante en créant un vide dans les récipients ce qui peut alors étendre le champ d'application de la méthode en réduisant la durée de la mesure [5].

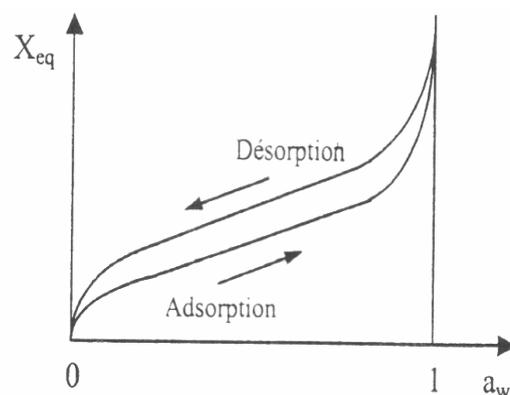


Figure 2.2: Isotherme d'adsorption et de désorption

Les isothermes d'adsorptions/ désorption se composent de trois zones, chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit.

*Zone1 ($a_w < 0.3$) : correspond à l'eau "fortement liée" dite aussi eau de constitution. L'eau est intimement liée aux composantes biochimiques par des liaisons covalentes; cette eau n'est

pratiquement pas disponible comme solvant ou réactif et correspond à la première couche (monocouche) qui entoure la matière sèche d'aliment.

*Zone2 ($0.3 < a_w < 0.7$): correspond à l'eau "faiblement liée", sous forme de couche polymoléculaire (multicouche) recouvrant partiellement la surface du substrat sec.

*Zone3 ($a_w > 0.7$): correspond à l'eau "libre" ou eau "liquide" qui n'est retenue à la surface du substrat sec que par des liaisons hydrogènes. Cette eau est disponible tant comme solvant que réactif. C'est uniquement sous cette forme que l'eau est utilisée par les micro-organismes et peut permettre les réactions enzymatiques.

2.6.2 Modèles de représentation des courbes de sorption et désorption:

De nombreux modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques ont été proposés pour décrire le comportement des courbes de sorption/désorption déterminées expérimentalement. Toutefois deux modèles sont plus particulièrement utilisés par les chercheurs: le modèle de BET (Brunauer-Emmett-Teller) particulièrement intéressant pour l'étude de la partie des courbes relative aux faibles teneurs en eau et le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) qui lui représente les courbes de sorption/désorption jusqu'à une activité de 0,80 à 0,85 [5]

| Auteurs | Equation du modèle | Références |
|-------------------------------------|---|------------------------|
| Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T) | $X_{eq} = (A+BT)(C a_w) / (1-a_w)(1-a_w+C.a_w)$ | Iglesias& Cherifie[6] |
| Oswin | $X_{eq} = (A+BT)(a_w / 1-a_w)^C$ | Oswin [7] |
| Halsey | $X_{eq} = \exp [-\exp(A+BT) / X_{eq}^C]$ | Iglesias& Cherifie [6] |
| Henderson | $1-a_w = \exp [-K.(T+n).X_{eq}^C]$ | Thompson [8] |
| Chung-Pfost | $a_w = \exp [(-A/(T+B)) \exp(-CX_{eq})]$ | Pfost [9] |
| Langmuir | $X_{eq} = 1/[A+B.a_w^{C-1}]$ | Langmuir 10] |
| Peleg | $X_{eq} = A.a_w^{k1} + B.a_w^{k2}$ | Peleg [11] |
| Guggenheim-Anderson-de Boer (G.A.B) | $X_{eq} = \frac{A.B.C.a_w}{[1-B.a_w][1-B.a_w+B.C.a_w]}$ | Van den Berg [12] |

Tableau 2.1 Modèles des courbe de sorption, désorption

2.7 COURBES DE SECHAGE

Les courbes de séchage sont représentées soit par les variations de l'humidité absolue (X) du produit en fonction du temps, soit par la variation de la vitesse de séchage ($-dX/dt$) en fonction du temps t ou même la courbe proposée par Krisher ($-dX/dt$) en fonction de l'humidité absolue X (Krisher [13]).

2.7.1 Cinétique du séchage

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau ($\text{kg d'eau} / \text{m}^2 \text{ s}$) en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit pendant l'opération de séchage en fonction du temps. Les courbes de cinétique de séchage varient suivant le produit à sécher et contiennent de une à trois principales périodes de la cinétique de séchage, tout dépend du produit, figure (2.3).

On obtient la courbe de séchage expérimentale en suivant la variation de l'humidité absolue du produit par des pesées successives au cours du séchage jusqu'à atteindre l'humidité absolue d'équilibre du produit. Pour chaque produit il existe une valeur d'humidité optimale d'équilibre pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses propriétés organo-leptiques et nutritionnelles [5]. On doit impérativement atteindre cette valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de $\phi_{\text{eq}} = 11\%$ [14].

2.7.2. Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide

L'expérience permettant de caractériser la cinétique de séchage consiste à soumettre une couche mince d'un produit à l'action d'un courant d'air de température, humidité et vitesse fixées et de mesurer la masse du produit en fonction du temps.

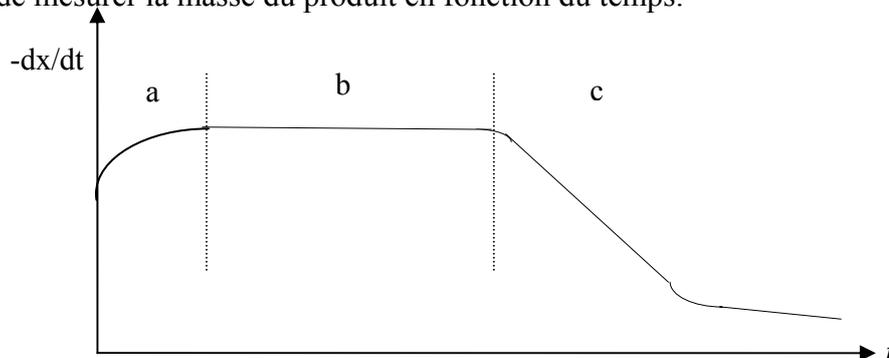


Figure 2.3: périodes du séchage

Dans la courbe ci-dessus est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps. Souvent on construit aussi la courbe de la vitesse de séchage en fonction de l'humidité restant dans la matière au cours du séchage.

Dans la figure 2.3 on distingue trois périodes :

2.7.2.1 Période de mise en température (région a)

Quand un produit d'une température de surface T_s et d'une pression partielle de vapeur d'eau P_s est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage jusqu'à atteindre la température du bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global.

2.7.2.2. Période à allure constante (région b)

Cette période de séchage à vitesse constante correspond à l'évaporation du liquide superficiel. Le liquide remonte en surface sous l'action des forces d'aspiration des capillaires et il se renouvelle à une vitesse suffisante pour former une pellicule continue et compenser l'évaporation. Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air et le produit est entièrement utilisé pour l'évaporation de l'eau. Cette période est identique au séchage isenthalpe d'un film d'eau et dépend donc essentiellement des conditions aérauliques entourant le produit à sécher. Lorsque l'humidité superficielle du solide n'est pas renouvelée à une allure suffisante pour maintenir en surface une pellicule continue du liquide, la vitesse cesse d'être constante. Pour les produits alimentaires et biologiques, on n'observe en général pas de période de séchage à vitesse constante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure du produit, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le durcissement et la rétraction de la surface du produit [5].

2.7.2.3 Période de ralentissement (région c)

Au cours de cette période la surface du produit n'est plus saturée en vapeur d'eau et le transfert de masse est contrôlé par les mécanismes complexes du déplacement de l'eau de

l'intérieur vers la surface du produit [4]. Cette période représente souvent la quasi totalité du séchage. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

***Disparition de l'eau libre en surface de produit :** La zone d'évaporation "front de séchage" qui se trouvait en surface se déplace vers l'intérieur du produit. En amont de cette zone, il y a migration de l'eau libre, tandis qu'en aval c'est l'eau liée et la vapeur d'eau qui sont évacués. La brusque réduction de la surface effective de transfert due à une alimentation insuffisante en eau libre est la cause de ce ralentissement.

***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 ce 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 intactes :** Les parois cellulaires intactes 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 (région b) et sont disposés 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 imperméabilisent la surface du produit.

2.7.3 Courbe caractéristique de séchage:

La complexité des phénomènes intervenants au cours du séchage, la difficulté de déterminer certains paramètres comme la diffusivité, et le fait qu'il est toujours nécessaire d'avoir recours à l'expérimentation pour ajuster des constantes, ont fait que certains spécialistes se sont orientés vers une démarche empirique, l'idée étant à partir de quelque simple expérience de séchage, de déterminer une loi applicable au plus grand nombre de condition opératoires.

Van Meel [15] a eu l'idée de rassembler l'ensemble des courbes expérimentales de séchage d'un produit, obtenues pour différents paramètres de l'air de séchage en une courbe moyenne unique dite courbe caractéristique de séchage, qui représente en quelque sorte la carte d'identité du produit. Cette courbe correspond à l'expression de la variation d'une vitesse de

séchage réduite en fonction d'une teneur en eau réduite X_r , expression du type

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

Avec: $\left(\frac{-dX}{dt}\right)$: vitesse de séchage à un instant t

$\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1$: vitesse de séchage pendant la première phase (phase à vitesse constante),

et tant donné que la première phase est absente dans la majorité des produits agro-alimentaires

on aura alors $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1 = \left(\frac{-dX}{dt}\right)_i$

$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad \text{et} \quad X_{cr} = X_i$$

X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre donnée par les isothermes de desorption.

X_i est la teneur en eau initiale.

2.7.4 Modèles mathématiques des courbes d'humidité réduites

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour prédire l'humidité absolue réduite ou teneur en eau réduite d'un produit en couche mince $X_r = X/X_0$ en fonction du temps de séchage.

| Nom du modèle | Expression du modèle | Références |
|----------------------------|---|---------------------------|
| Lewis | $X_r = \exp(-kt)$ | Lewis [16] |
| Henderson and Pabis | $X_r = a \exp(-kt)$ | Zhang and Litchfield [17] |
| Page | $X_r = \exp(-kt^n)$ | Diamante and Munro [18] |
| Modified page | $X_r = \exp(-(kt)^n)$ | Overhults et al. [19] |
| Logarithmique | $X_r = a \exp(-kt) + c$ | Yagcioglu et al. [20] |
| Two- terme | $X_r = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$ | Henderson [21] |
| Two- terme exponential | $X_r = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$ | Sharaf-Eldeen et al. [22] |
| Approximation of diffusion | $X_r = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$ | Yaldiz and Ertekin [23] |
| Verma et al. | $X_r = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$ | Verma et al. [24] |
| Midilli et al. | $X_r = a \exp(-kt^n) + bt$ | Midilli et al. [25] |

Tableau 2.2: Modèles mathématiques de l'humidité réduite

Le modèle approprié à la description de l'allure de l'humidité absolue réduite d'un produit est choisi selon les paramètres statistiques suivants:

Coefficient de corrélation (r) élevé (tendant vers 1)

Ki-carrée (χ^2) minimale (tendant vers 0).

Tel que:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{pre,i}^* - \bar{X}_{pre,i}^*)^2}{\sum_{i=1}^n (X_{exp,i}^* - \bar{X}_{exp,i}^*)^2} \quad (2.8)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_{exp,i}^* - X_{pre,i}^*)^2}{N - n} \quad (2.9)$$

Où: $X_{exp,i}^*$: représente la $i^{ème}$ humidité absolue réduite expérimentale.

$X_{pre,i}^*$: représente la $i^{ème}$ humidité prédite selon le modèle approprié

N : est le nombre de points expérimentaux

n : désigne le nombre de constante de chaque modèle.

2.8 LES DIFFERENTS MODES DE SECHAGE:

2.8.1 Séchage direct appelé aussi séchage par convection ou par entraînement:

Le caractère spécifique de ce mode de séchage réside dans le fait que l'air de séchage remplit deux fonctions simultanées l'apport de chaleur vers la surface du produit, selon la loi de Newton ($\phi_{conv} = \alpha S_p (T_{a,a} - T_{s,p})$) et récupération de la vapeur d'eau dégagée du produit. Il est à noter que la circulation du fluide caloporteur peut être une convection naturelle ou forcée.

2.8.2 Séchage indirect ou par conduction

Le produit se trouve en contact avec une paroi conductrice de chaleur qui est chauffée par un fluide caloporteur (air, eau, gas, vapeur d'eau). Sous l'action de la chaleur ainsi transmise par conduction, le liquide s'évapore ou se vaporise. La vapeur formée étant entraînée par action

d'un léger courant de gaz auxiliaire ou par dépression. Le transfert de chaleur par conduction assure le passage de l'énergie vers les couches internes du produit selon la loi de Fourier

$$(\phi_{cond} = -\lambda S_p \frac{dT_p}{dx}).$$

2.8.3 Séchage par rayonnement

On sait que toute surface dont la température est supérieure au zéro absolue émet un rayonnement capable de se transformer en chaleur, et que l'émittance énergétique totale d'une surface ou flux de chaleur émis par l'unité d'aire de cette surface, est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface. Il en résulte que dans de nombreux séchoirs, une fraction plus au moins grande du flux de chaleur reçu par la matière est transmise par rayonnement et il convient, surtout si la température des parois est élevée, d'en tenir compte dans le calcul du flux, pour éviter un échauffement excessif de la matière. Mais, indépendamment de ces séchoirs où l'énergie rayonnée n'est qu'accessoire, on réalise des séchoirs où le rayonnement (micro-onde ou infrarouge à partir de surface surchauffée ou de lampe) constitue pratiquement le seul mode de transmission de chaleur. Une surface portée à une température suffisamment élevée émet un rayonnement infrarouge qui sera absorbé d'une façon plus ou moins complète par le produit à sécher.

2.8.4 Séchage sous vide

Le point d'ébullition d'un liquide s'abaissant lorsqu'on diminue la pression, le séchage réalisé sous vide provoque l'ébullition rapide du liquide à éliminer. L'opération qui s'effectue alors par vaporisation s'en trouve accélérée et la durée du séjour de la matière dans le séchoir écourtée. Ce mode opératoire rend ainsi possible le séchage de substances thermosensibles, difficile à traiter sous pression normale, en raison du séjour plus ou moins long qu'elles devraient subir à température élevée.

2.8.5 Séchage par perte diélectrique

Le séchage par pertes diélectriques est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectrique). On l'obtient en plaçant la matière à sécher dans un champ électrique alternatif à très haute fréquence (1 à 30Mhz). Un tel champ existe entre les

armatures d'un condensateur plan relie à un générateur. Sous l'action de ce champ, les molécules du diélectrique se polarisent et sont contraintes de changer de polarité à chaque alternance. Ce changement de polarité provoque des vibrations mécaniques des dipôles moléculaires qui causent des frictions inter atomiques et inter-moléculaires engendrant de la chaleur qui sert à l'échauffement régulier de la matière.

2.8.6 Séchage par lyophilisation

C'est un séchage s'effectuant sous une pression très réduite, inférieure à celle qui correspond au point triple du fluide qui constitue l'humidité à évacuer. Cette humidité se trouve donc congelée et son élimination se produit directement de la phase solide à la phase vapeur, sans passer par l'état liquide, c'est-à-dire par sublimation à basse température. Cette méthode de séchage étant évidemment très onéreuse ne peut s'appliquer qu'à des matières qui, en raison de leur fragilité à la chaleur ne supportent pas les méthodes habituelles de séchage par exemple: les substances biologiques (plasma sanguin, cellules...), produits pharmaceutiques (antibiotiques), produits alimentaires (café, lait, jus de fruit...).

2.9 LE SECHAGE A L'AIR LIBRE:

Méthode ancestrale utilisée jusqu'au jour d'aujourd'hui, consistant à étaler en plein air les produits à sécher. C'est une technique facile et pas coûteuse, néanmoins elle peut causer des pertes importantes. Un tableau comparatif a été dressé mettant en évidence les avantages et les inconvénients du séchage à l'air libre et sous séchoir. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

| Séchage sous séchoir solaire | Séchage à l'air libre |
|---|---|
| <p><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none"> *Réduction du temps de séchage *Maîtrise de la teneur en eau finale désirée. *Protection du produit contre le rayonnement ultraviolet. *A l'abri des intempéries, des insectes et des champignons. *Maîtrise de l'opération de séchage. *Energie gratuite <p><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none"> *Consommation de l'énergie conventionnelle (électricité, gaz, bois....) si système hybride. *Investissement relativement important. *Main d'œuvre qualifiée. | <p><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none"> *Procédé simple et non coûteux *N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée *Source d'énergie solaire gratuite et non polluante *Pas de dépense d'énergie *Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit *Peu de changement de couleur <p><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none"> *Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure). *Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire. *l'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensibles au rayonnements ultra violets, insectes, rongeurs, perte de vitamine...etc.). |

Tableau 2.3: Avantages et inconvénients du séchage sous séchoir solaire et du séchage à l'air libre

2.10 LES DIFFERENTS TYPES DE SECHOIR SOLAIRE

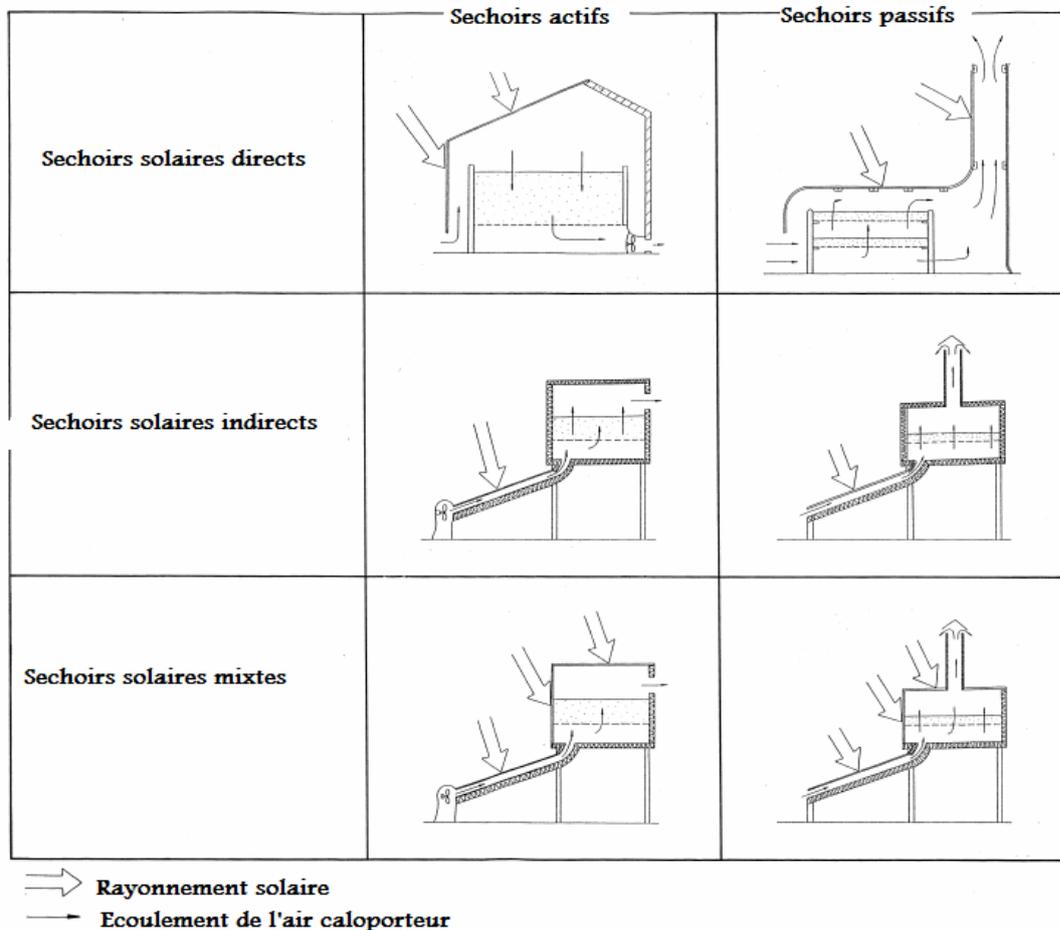


Figure 2.4: Différents types de séchoirs solaires.

Il existe une très grande diversité de type de séchoirs, aussi grande que la diversité des produits à sécher. Les débits de produit à sécher et leur temps de séjour dans le séchoir diffèrent d'un produit à un autre, de même l'opération de séchage peut prendre quelques minutes jusqu'à plusieurs dizaines de jours.

Généralement pour les produits agro-alimentaires les systèmes de séchage solaire sont classés selon le mode de chauffage (direct par convection, indirect par conduction, par rayonnement infrarouge), le mode d'apport de chaleur (direct ou indirect) et le mode de manipulation du produit (accessibilité).

On distingue deux grandes classes de séchoir solaire pour produits agricoles:

2.10.1 Séchoir solaire passif ou à convection naturelle:

Le séchage par convection naturelle utilise l'énergie solaire, qui chauffe l'air caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Cet air chauffé a tendance à monter vers le haut et sort par une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits à sécher. L'écoulement de l'air asséchant ici se fait par effet de cheminée. L'énergie solaire seul en assure le fonctionnement, ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées de tout sorte de distribution d'énergie. L'un des inconvénients de ce type de séchoir c'est le risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

2.10.2 Séchoir solaire actif ou à convection forcée :

Le fluide asséchant est forcé par un ventilateur, ce qui permet une augmentation du pouvoir évaporateur du séchoir. Généralement la convection forcée l'emporte largement sur la convection naturelle qui ne permet pas encore, étant donné l'état des recherches en cette matière, de contrôler le déroulement du séchage.

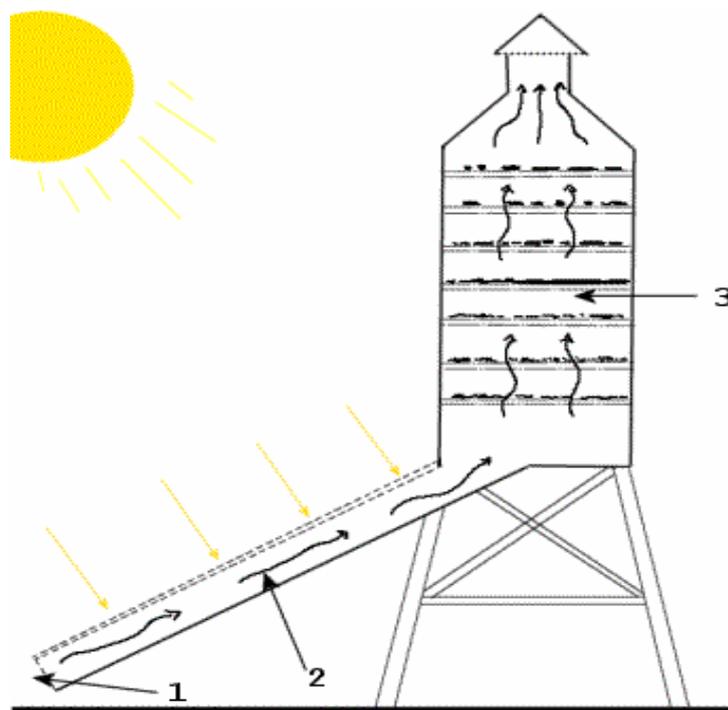
Cette classe de séchoir solaire permet un meilleur contrôle de l'opération de séchage et une bonne amélioration du temps de séchage par rapport au séchoir passif, car l'air asséchant est évacuée en vitesse et d'une façon continue. Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité conventionnelle ou photovoltaïque pour faire fonctionner le ventilateur.

2.10.3 Séchoir solaire direct:

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chères comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Néanmoins l'interaction direct rayonnement solaire – produit engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments [26].

2.10.4 Séchoir solaire indirect

Le séchoir solaire indirect (Fig. 2.5) se compose essentiellement de deux parties: en amont un insolateur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur où l'air asséchant est chauffé et monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de déssiccation contenant les produits à sécher où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur. Ce dernier sort vers l'extérieur de la chambre de dessiccation par le biais d'une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits. Ces systèmes possédant des insolateurs plans en amont sont plus performants et plus répandus que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive.....etc) [27]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agro-alimentaires.



1. Entrée d'air 2. insolateur plan 3. clais 4. cheminée

Figure 2.5: Séchoir solaire indirect

2.10.5 Séchoirs solaires mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, 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.

2.10.6 Séchoirs solaires hybrides

Dans ce type de séchoir hybride (Fig.2.6) on utilise une des sources d'énergies auxiliaires (électrique, gaz, fuel, bois, biomasse.....) pour parer aux aléas climatiques et ajuster la température de l'air asséchant à la température fixe de consigne moyennant des thermostats. Les séchoirs solaires hybrides sont plus performants que les séchoirs solaires passifs, car ils peuvent fonctionner par temps couvert ou pendant la nuit. Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité, gaz, pièce de rechange et demande un personnel qualifié pour la maintenance.

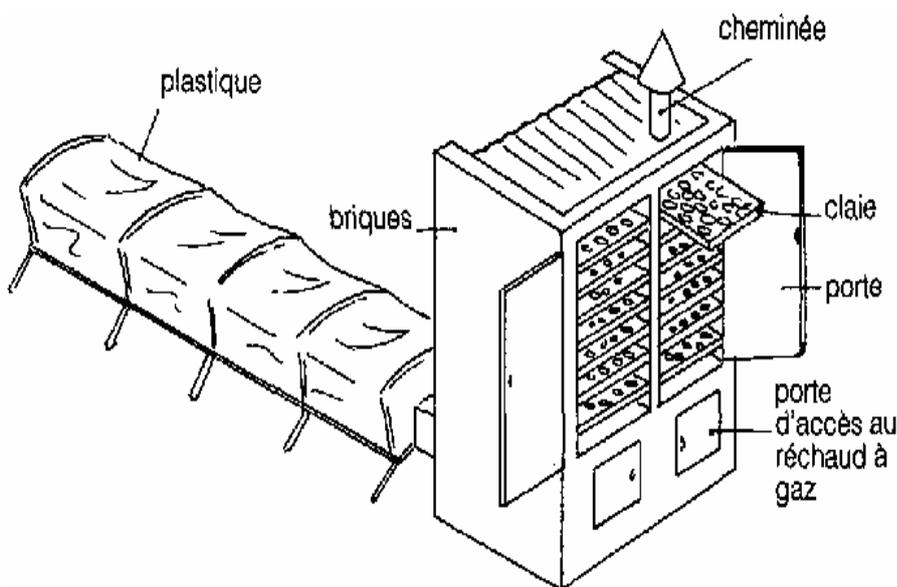


Figure 2.6: Séchoir solaire hybride solaire gaz

2.10.7 Séchoir solaire continu

Il existe de très nombreux types de séchoirs fonctionnant en continu. Dans ce type de séchoir le produit et l'air se déplacent, ces déplacements relatifs air/produit peuvent être complexes, mais cependant on peut toujours se ramener à des arrangements de modules à circulation élémentaires [à courants parallèles ou co-courant (CC), à contre courant (CC) et à courant

croisé (C+)]. Le co-courant air produit est préférable au contre-courant, car dans ce second cas, le produit le plus sec est mis en contact avec l'air le plus chaud [5].

2.10.8 Séchoir solaire discontinu

Les séchoirs discontinus ne conviennent que pour le traitement de masses peu importantes de matière qui, au cours de l'opération de dessiccation ne subissent aucun déplacement. Seul le fluide caloporteur se déplace. Cette configuration dénote une simplicité dans la construction alors qu'un séchage continu exigerait une motorisation des tapis ou chariot contenant les produits et par suite une certaine sophistication. Le mode de déplacement croisé de l'air asséchant où il arrive perpendiculairement au produit posé sur les claies est le plus intéressant par rapport aux autres modes car les coefficients de transfert sont meilleurs, à cause des turbulences créées par les produits [4].

2.11 EVALUATION DES SECHOIRS SOLAIRES

Tester un séchoir est nécessaire pour évaluer ses performances techniques et fournit une base de comparaison avec les autres séchoirs, et peut aider les industriels à améliorer leurs designs et ainsi permettre aux usagés de sélectionner le séchoir approprié

Les paramètres du produit comme: les propriétés physiques (dimension, densité,...etc.), humidité du produit et coefficient de transfert de masse et de chaleur entre le produit et l'air asséchant changent tout le long du processus de séchage. De plus ces paramètres sont influencés par les conditions externes au produit comme la température, l'humidité et le flux de l'air asséchant de même que la composition chimique du produit [34]. Chaque produit tolère une température maximale qui dépend du type de produit (légumes, fruits, céréales....etc.), utilisation du produit séché, degré d'humidité et degré de maturité [100].

Les procédures de test standard des capteurs solaires à air et à eau existent dans la littérature [101-104]. Néanmoins, les tests standard d'évaluation des performances des séchoirs solaires font défauts [105]. Ceci est du aux différents designs de séchoir, matériaux utilisés, conditions opératoires, préférence du consommateur ou du client et la qualité du produit séché.

(Grupp et al, 1995) [106] ont présenté une méthode d'évaluation et de comparaison de séchoir solaire. Le but de ces tests était d'évaluer les différents séchoirs d'après les perspectives des usagés. Ils ont testé six types de séchoir solaire (séchoir à box circulaire, séchoir à claies,

séchoir cabinet, séchoir tunnel, deux types de séchoir à cheminée) à la plataforma solar de Almeria en Espagne. Les paramètres d'évaluation utilisés sont: type et dimension du séchoir, surface du capteur, surface des claies, température et temps de séchage, humidité du produit, qualité du produit séché et la convenance de la manipulation. En général il n'existe pas de procédure particulière d'évaluation des séchoirs. Les séchoirs sont évalués en mesurant et en comparant certains paramètres sélectionnés

(Reddy, 1985) [107] note que la fixation d'un test standard rigide pour les systèmes solaires afin d'améliorer leur design et leur performance demande beaucoup d'expériences qui consomment beaucoup de temps et de moyens. Donc, le test standard doit être assez souple et modulable afin de prendre compte des différents types de séchoir ainsi que les différents modes opératoires et ne devrait pas être trop élaboré car le test process devient très laborieux et très cher. Selon (Nonhebel, 1971) [108] la sélection d'un type de séchoir, représente un compromis entre le coût du séchoir, qualité du produit, temps de séchage et convenance de l'installation et de la manipulation. Les paramètres généralement reportés lors de l'évaluation d'un séchoir [34] se résument comme suit:

2.11.1 Caractéristiques physiques du séchoir:

- * Type, forme et dimension du séchoir
- * Capacité du séchage/ densité de charge
- * Surface de la claie et nombre de claie (applicable)
- * Convenance de la charge et décharge des produits

2.11.2 Performances thermiques

- * Temps de séchage et vitesse de séchage
- * Température et humidité de l'air asséchant
- * Flux de l'air asséchant
- * Efficacité du séchoir

2.11.3 Qualité du produit séché

- * Qualité organoleptique (couleur, saveur, goût, arôme, texture)
- * Eléments nutritifs
- * Capacité de réhydratation

2.11.4 Coût du séchoir et temps d'amortissement

Pour enlever l'eau, il faut fournir une certaine quantité d'énergie. Une partie de celle-ci, l'électricité du ventilateur ou l'énergie utilisée par l'appoint est payante, de même la main d'œuvre pour la charge et décharge des produits et le suivi de l'opération de séchage est rémunérée, ajouté à cela le prix de revient des produits frais à sécher; l'ensemble constitue les coûts de fonctionnement du séchoir. Le coût d'investissement représente le prix du séchoir complet. L'ensemble des coûts de fonctionnement et d'investissement représente le coût du séchoir. Le temps d'amortissement représente le temps nécessaire pour que l'ensemble des bénéfices annuels réalisés par le séchoir soit égal à l'investissement initial (coût du séchoir).

2.12 MODE DE TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE AU COURS DU SECHAGE

Le séchage (Fig.2.7) est caractérisé par un transfert de chaleur et de masse (l'eau sous forme de vapeur). L'eau est transférée de l'intérieur du produit vers l'interface produit-air par le phénomène de diffusion et de l'interface vers l'air asséchant par le phénomène de convection.

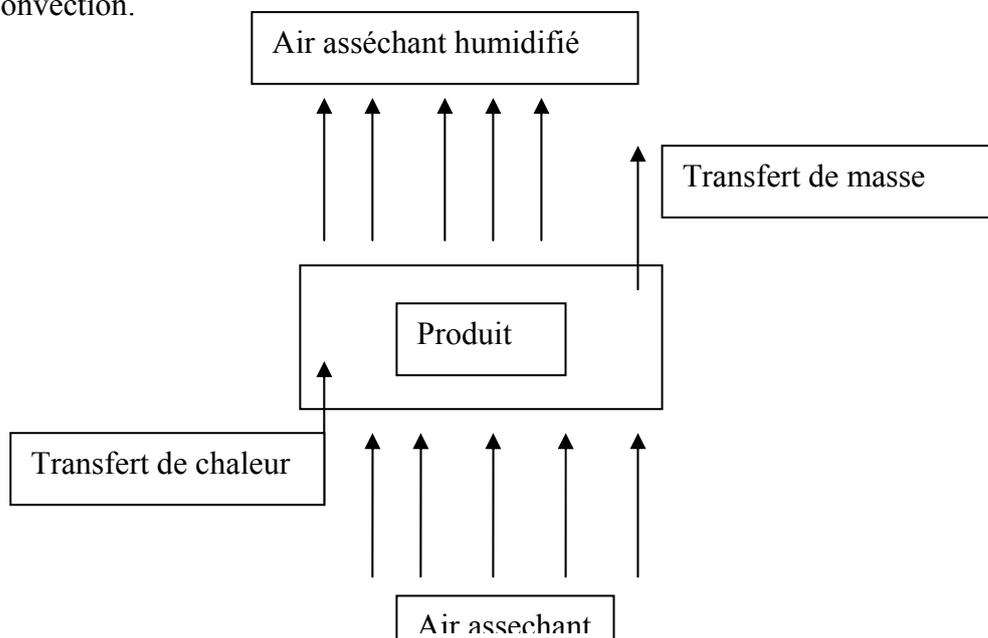


Figure 2.7: Mode de transfert lors du séchage

Apportant l'énergie nécessaire à l'activation et la libération des molécules d'eau, ce transfert

de chaleur se fait en deux étapes différentes:

*Transfert par convection:

L'air asséchant alimente la surface du produit en chaleur d'après la loi de Newton:

$$\phi_{conv} = \alpha S_p (T_{a,a} - T_{s,p}) \quad (2.10)$$

*Transfert par conduction:

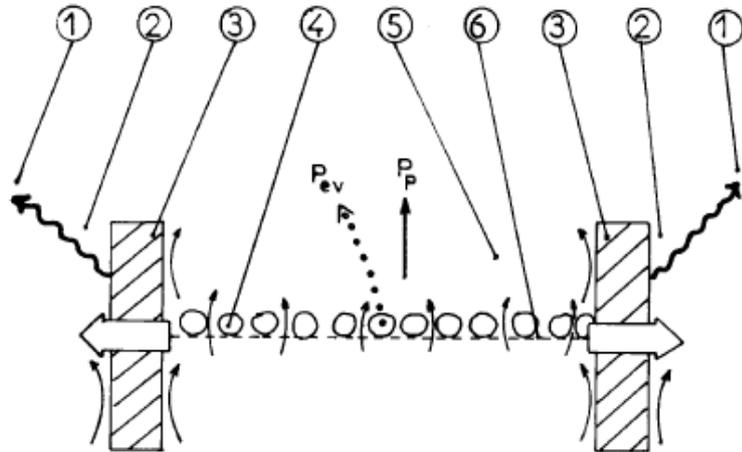
La surface du produit chauffée par l'air asséchant, cette chaleur énergie est transmise vers les couches internes du produit par conduction. Ce phénomène est régi par la loi de Fourier:

$$\phi_{cond} = -\lambda S_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \quad (2.11)$$

2.13 DESCRIPTION ET FORMULATION MATHÉMATIQUE DU SÉCHAGE

2.13.1 Description et modélisation du caisson de dessiccation

Puisque nous procédons à un séchage à température, à débit, et à humidité d'air constants à l'entrée du séchoir hybride indirect, nous nous contentons de simuler le comportement de l'unité de séchage muni du chauffage d'appoint. Le modèle élaboré tient compte des phénomènes de transfert air produit d'une manière globale et les grandeurs physiques utilisées sont des grandeurs macroscopiques et non pas des grandeurs locales. Ce modèle global permet de simuler la cinétique de séchage de la tomate dans l'hypothèse des conditions constantes. Deux modes de transferts sont mis en jeu: thermique et massique. Leur étude nécessite la connaissance des coefficients et des surfaces d'échange. La modélisation du système se réduit à une étude unidimensionnelle, grâce à la configuration du caisson de dessiccation composée des claies horizontales, contenant des tranches minces de tomate traversées perpendiculairement par un air asséchant chaud. On découpe le séchoir dans le sens de l'écoulement de l'air en tranches fictives d'épaisseur dZ , où la température et l'humidité sont supposées constantes. Néanmoins, 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, du produit et des parois voir figure (2.8); en notant que dans chacune des tranches, les échanges se font avec l'air pris dans des conditions de sortie de la tranche précédente.



1. voûte céleste
2. milieu ambiant
3. paroi
4. produit
5. l'air asséchant
6. claie

- nuisance cédée par l'air
-→ nuisance perdue par évaporation
- ↪ échange par convection
- ~~~~ échange par rayonnement
- ⇨ échange par conduction

Figure 2.8: Echange thermique et massique dans une tranche du caisson de dessiccation

2.13.2 Hypothèses simplificatrices

Vu la complexité du problème, nous avons utilisé quelques hypothèses simplificatrices. Plusieurs travaux entamés sur le séchage des produits agroalimentaires ont montré que ces hypothèses sont réalistes et les simplifications n'ont pratiquement pas d'influence sur les résultats (A. Belghit 1997 [69], L. Benamoune & A. Belhamri 2006 [81]).

Pour simplifier l'étude des transferts de chaleur et de masse couplés au niveau des claies de séchage on suppose les hypothèses suivantes:

- Les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligeables
- Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligeables
- La température et la teneur en eau à l'intérieur du produit sont supposées uniformes

- Les variations temporelles de la température de l'air sont négligeables devant celle du produit.
- Le produit est coupé en rondelles de couche minces
- La variation du volume du produit au cours du séchage est négligée
- Pour chaque claie, le problème est unidimensionnel dans la direction de l'écoulement de l'air asséchant

2.13.3 Equations du modèle

On suppose que le caisson de dessiccation est découpé en un certain nombre de tranches fictives dans la direction Z de l'écoulement, définies par le volume délimité par deux claies et les parois de l'armoire de séchage, voir figure (2.8)

- bilan au niveau de la paroi isolante extérieure

$$m_{pe} \cdot C_{ppe} \cdot \frac{\partial T_{pe}}{\partial t} = h_d \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pi} - T_{pe}) - h_{ce} \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pe} - T_{ab}) - h_r \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pe} - T_c) \quad (2.12):$$

- bilan au niveau de la paroi isolante intérieure

$$m_{pi} \cdot C_{ppi} \cdot \frac{\partial T_{pi}}{\partial t} = h_{ci} \cdot \Delta S_p \cdot (T_a - T_{pi}) - h_d \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pi} - T_{pe}) \quad (2.13)$$

- bilan au niveau de l'air caloporteur

$$\dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta Z \cdot \frac{\partial T_a}{\partial Z} = -h_{cp} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) - h_{ci} \cdot \Delta S_p (T_a - T_{pi}) \quad (2.14)$$

- bilan au niveau des tranches minces de tomate: siège de transfert de chaleur et de masse

$$m_{pr} C_{ppr} \cdot \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} = h_{cp} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) - m^* L_V \quad (2.15)$$

Où $m^* = dm/dt = m_{ps} (dX/dt)$ avec m_{ps} = matière sèche dans le produit (kg), et (dX/dt) la vitesse de séchage exprimée en kg d'eau par kg de matière sèche/s) et L_V la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J \text{ kg}^{-1}$).

2.13.4 Détermination des coefficients d'échange

a) Par conduction

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

$$h_d = \frac{1}{\frac{e_{pi}}{\lambda_{pi}} + \frac{e_{pp}}{\lambda_{pp}} + \frac{e_{pe}}{\lambda_{pe}}} \quad (2.16)$$

Avec :

λ_{pi} = conductivité thermique de la paroi interne, λ_{pp} = conductivité thermique de l'isolant entre les parois, λ_{pe} = conductivité thermique de la paroi externe.

e_{pi} = épaisseur de la paroi interne du séchoir. e_{pp} = épaisseur de l'isolant entre les parois.

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

b) Par rayonnement

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

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon_p (T_{pe} + T_c)(T_{pe}^2 + T_c^2) \quad (2.17)$$

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(1963) [109] :

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

c) Par convection

- Entre l'air ambiant et la face externe de la paroi de l'armoire de séchage (Mc Adams, 1954)[110]

$$h_{ce} = 5,67 + 3,86V_v \quad (2.18)$$

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

$$h_{ci} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{\Delta Z} \quad (2.19)$$

Où $Nu = 0,35 Re^{0.8} Pr^{0.333}$ où Pr est le nombre adimensionnel de Prandtl et ΔZ la hauteur d'une tranche (pas d'espace) (Saccadura, 1978) [111]

- Entre le produit et l'air asséchant:

$$h_{cp} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{D_{pr}} \quad (2.20)$$

Avec :

D_{pr} : diamètre moyen du produit, Nu : nombre de Nusselt égale à $0.37 Re^{0.6}$ d'après la relation de Charm 1963 [112].

Re : nombre de Reynolds.

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

V_a : vitesse de l'air au niveau du produit.

2.13.5 Méthode de résolution

Pour déterminer les différentes températures (des parois du séchoir, de l'air asséchant et du produit au niveau de chaque claie) et teneurs en eau du produit au niveau de chaque claie, nous devons discrétiser les équations (2.12) à (2.15). Ceci conduit à un système de quatre équations à quatre inconnues que l'on peut mettre sous forme condensée suivante: $[A] X^n = B^n$

Où $[A]$: matrice des coefficients

X : vecteur des inconnues

B : vecteur connu lié aux coefficients de l'équation initiale

Pour la résolution numérique des systèmes d'équations, nous adoptons 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 exact U^*

Il y'a convergence si

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

Arrêter enfin les itérations selon un critère défini ($X = X_{eq}$)

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).

-Nous pouvons contrôler la précision des résultats obtenus en fonction du nombre d'itérations.

:

2.14 QUALITE DES PRODUITS SECHES

L'opération de séchage doit être menée de telle façon que la qualité du produit ne sera pas fortement altérée à la fin de l'opération. La majorité des produits agroalimentaires sont modifiés par le séchage, le produit réhydraté diffère du produit initial et cela pour plusieurs raisons élucidées ci-dessous:

2.14.1 Altérations physiques et mécaniques

Le départ de l'eau du produit engendre un effondrement de celui-ci sur lui-même. La forme du produit séchée finale diffère du produit initial.

Les phénomènes de migration des solutés vers la surface, migration de matière grasse, fissuration, rétraction sont préjudiciable à la qualité du produit.

2.14.2 Altérations biochimiques

L'effet de la température élevée pendant un certain temps provoque sur les produits agroalimentaires des modifications qui sont considérés généralement nuisibles à la qualité du produit. Les principales modifications sont:[5]

- Réaction de Maillard : c'est une réaction biochimique non enzymatique résultant de combinaison entre protéines et glucides en donnant un produit brun. Néanmoins ces réactions entraînent une perte nutritionnelle.
- Dénaturation des protéines, engendrant une limitation du pouvoir de réhydratation
- Réactions enzymatiques: produisent l'effet du brunissement du produit. Pour anéantir cet effet on doit inactiver les enzymes par un traitement préalable, genre blanchiment, ou réduire la température de séchage.
- Destruction des vitamines
- Oxydation des matières grasses (rancissement).

2.14.3 Perte d'arome et de couleur

L'eau contenue dans le produit à sécher est éliminée en emportant avec elle tout autre produit volatil existant également dans le produit. Cas des arômes pour les produits agroalimentaires. La couleur du produit séché est moins altérée par rapport au produit initial pour les basses températures et pour les systèmes de séchoir à convection forcée.

2.14.4 La qualité sensorielle

C'est une combinaison de différents sens de conception obtenu dans le choix et la consommation du produit. L'aspect jugé par l'œil, par exemple: couleur, taille, forme, uniformité et absence des déformations. C'est un aspect important dans l'évaluation de la qualité du produit. Le sens du goût est limité à: doux, aigre, salé et amer. La saveur implique les sens du goût, de l'arôme et de la sensation. La perte de saveur en produit sec est souvent due aux pertes volatiles, par la même occasion de la migration de la vapeur d'eau du produit vers l'extérieur. De même les réactions chimiques d'oxydation contribuent à la détérioration de la saveur. [34]

2.14.5 La qualité nutritive

Ceux-ci incluent des paramètres chimiques tels que le contenu de sucre, l'acide ou la vitamine C ascorbique, le contenu de bêta-carotène, et le contenu d'acidité avant et après le séchage. La vitamine C est infectée par les températures élevées; la qualité nutritive inférieure indique la perte nutritive due aux températures de séchage plus élevées et à de plus longues périodes de séchage; une acidité plus élevée indique la détérioration de qualité due à la fermentation. [5]

2.14.6 La capacité de réhydratations

Quelques fruits et légumes secs sont consommés après réhydratation. Quand l'eau est ajoutée, le produit regagne sa saveur, arôme, texture et aspects originaux. Cependant, le produit ne reviendra jamais complètement à ses états originaux. Plus il s'approche de ses niveaux originaux d'humidité, meilleur sera sa texture et aspect. Des dommages de tissu dans le produit pendant le processus de séchage affectent la capacité de réhydratations du produit sec. Un prétraitement osmotique s'impose avant de commencer l'opération de séchage qui rendra les parois des cellules plus perméables. Lewicki [62] a proposé une méthode pour calculer les capacités de réhydratations, qui sont basées sur la capacité de matériel sec d'absorber l'eau et de tenir des solubles à l'intérieur de la matrice de produit. Ceci tient compte de la capacité d'absorption d'eau WAC (Water Absorption Capacity) et de la capacité de possession de la matière sèche DHC (Dry matter Holding Capacity), et sont donnés par:

$$WAC = \frac{M_r(100 - s_r) - M_d(100 - s_d)}{M_0(100 - s_0) - M_d(100 - s_d)} \quad (2.12)$$

$$DHC = \frac{M_r \cdot S_r}{M_d \cdot S_d} \quad (2.13)$$

Où

M_r : Masse du produit réhydraté en (kg).

M_d : Masse du produit sec en (kg)

M_0 : Masse du produit après le séchage en (kg)

S_r : Contenu de matière réhydraté (%)

S_d : Contenu de matière sec (%)

S_0 : Contenu de matière après le séchage (%)

La capacité de réhydratation (RC) du produit sec est le produit de WAC et de DHC, donné par:

$$RC = WAC \cdot DHC \quad (2.14)$$

2.15. DEMARCHE A SUIVRE POUR BIEN MENER UNE OPERATION DE SECHAGE SOLAIRE

2.15.1 Détermination des contraintes du produit

Il faut dégager le genre de produit à sécher, ainsi que ses caractéristiques, afin de bien dimensionner le séchoir et déterminer les conditions opératoires optimales de l'opération de séchage. La construction d'un prototype de séchoir doit tenir compte de plusieurs critères énumérés ci-dessous.

- 1- Nature du produit (fruits, légumes, viandes, céréales, poissons.....) qui nous détermine le type de séchoir et les conditions opératoires.
- 2- La quantité de produit à sécher journalièrement et la durée de séchage qui conditionne le dimensionnement de l'installation.
- 3- Diminuer l'intervalle entre l'époque de récolte et celle du séchage pour éviter la détérioration du produit par l'air environnant.
- 4- La préparation à effectuer: lavage, égouttage, épluchage, décorticage.....

- 5- Pre-traitements: blanchiment, salage, soufrage, trempage dans des solutions caustiques,.....
- 6- Degré de séchage souhaité, plus l'humidité d'équilibre du produit est très basse, plus le temps de séchage est long.
- 7- Les fourchettes des températures requises pour effectuer le séchage. Leur connaissance est indispensable à double titre, d'abord pour choisir le mode de captation du rayonnement solaire, ensuite pour contrôler la conduite du séchage. Si les températures de séchage ne doivent pas dépasser 70°C (cas de la majorité des produits agricoles), les capteurs plans relativement bon marché suffisent pour capter le rayonnement solaire. Au-delà, il faut le concentrer ou employer des surfaces absorbantes sélectives. Il s'agit là des techniques sophistiquées dont le surcoût forcément trop élevé doit être, d'une manière générale, soigneusement étudié et qui, par suite ne conviennent pas à des produits courants. En fait il faut respecter ces valeurs critiques si non le produit se détériora et ne gardera pas ses propriétés organoleptiques.
- 8- Croutage: Il faut éviter le croutage en séchant moins vite à des températures plus ou moins basse pour que l'eau ne reste pas emprisonnée à l'intérieur du produit suite à la fermeture des pores en surface du au croutage.

2.15.2. Caractéristiques du site

2.15.2.1.Facteurs climatiques:

La connaissance du gisement solaire du site pour l'implantation d'un séchoir solaire est une condition nécessaire. Les données relatives à la température et l'humidité de l'air, vitesse du vent sont disponibles au niveau des stations météorologiques; néanmoins, les données relatives aux rayonnements direct,diffus et global généralement ne sont pas disponible au niveau de ces stations, il faut donc faire appel aux formules empiriques reposant sur le traitement statistique des données météorologiques existantes.

Des températures ambiantes trop basses sont de toute évidence une contre indication à l'implantation d'installations complètement solarisées, le séchage s'effectuant trop lentement, dans ce cas, une autre source de chaleur est nécessaire pour élever la température de sorte que le solaire n'est plus alors qu'un appoint dont il faut étudier la rentabilité avec soin.

Inversement, des températures extérieures trop élevées notamment dans les zones arides exigent que des précautions soient prises pour éviter que la température de l'air asséchant ne dépasse la valeur supportable par le produit. La nécessité d'une ventilation convenable s'impose pour diminuer la température dans le cas du besoin. Le paramètre degré d'humidité de l'air est important et le séchage ne peut se réaliser avec un air saturé ou contenant plus de 80% d'humidité car son pouvoir évaporatoire est très faible. La direction et la vitesse des vents dominants sont utiles car ces derniers peuvent réduire le gain de chaleur utile d'un capteur à air solaire ou augmenter les pertes de chaleur de l'enceinte de séchage. L'orientation du séchoir et la localisation des conduits intérieurs d'air doivent être étudiées relativement aux vents dominants.

D'autres questions générales peuvent être posées sur certaines commodités du site :

- Existence ou pas de l'électricité dans le site
- Espace disponible
- Existence ou pas de combustible pour le chauffage d'appoint
- Disponibilité ou pas de l'eau pour lavage et prétraitement des produits à sécher
- Matériaux de constructions nécessaires (verre, aluminium, plexiglas, laine de verre.....) existent –ils localement ou peut on leur trouver des substituants locaux?
- Moyens de stockage, leur capacité, leur emplacement?

2.15.2.2. Facteurs humains

- Existence ou pas sur place d'une main d'œuvre compétente
- Intervention de la main d'œuvre locale (artisans, forgerons) pour la construction des petits séchoirs simples et rustiques pour traiter de petite quantité de produit à usage domestique; ou peuvent aussi fabriquer des systèmes de séchage solaire comportant des organes de captation, de stockage, de gestion et de contrôle, capables de traiter des quantités plus importantes et destinées au secteur industriel.

2.15.3. Réalisation du séchoir

- choix du type de séchoir:

Le choix du type de séchoir est corollé au type de produit à sécher. Pour les produits volumineux les séchoirs serres sont tout indiqués d'un point de vue technico-économique. Si on a des produits à haute valeur commerciale (fruits, légumes, poisson....etc.) les séchoirs

tunnels conviennent mieux. Dans tout les cas de figure il est conseillé d'assurer la ventilation par convection forcée afin de pouvoir contrôler le débit de l'air asséchant et par suite sa température. La ventilation par convection naturelle ne garantissant pas un bon déroulement du séchage, peut convenir, à la rigueur, pour un usage individuel aux exigences réduites. L'utilisation de l'appoint dépend des conditions atmosphériques et de l'objectif du manipulateur est ce qu'il veut sécher d'une façon continue le jour et la nuit, dans ce cas le système d'appoint s'impose, ou seulement pendant le jour?

-modélisation et simulation du comportement du séchoir en fonction des différents paramètres (débit, température, humidité de l'air,...etc.)

- construction du séchoir

-expérimentation du séchoir à vide et sous charge

-ajustement et mise au point du séchoir avec une optimisation technico-économique.

CHAPITRE 3:

APPROCHE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DES MECANISMES DE SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGRO- ALIMENTAIRES:

3.1 CAS DE LA TOMATE:

Introduction générale:

Le nom tomate vient de l'espagnol tomate, c'est un mot universel utilisé dans de nombreuses langues avec de faible variation phonétique et orthographique. Tomato en anglais, tomate en allemand, espagnol, français et portugais; tomat en danois, norvégien, suédois; tomaat en néerlandais; à l'exception de l'italien pomodoro. En arabe on utilise deux mots: Tamatam(traduction de tomato) et banadora (traduction de pomodora).

La tomate de nom scientifique (*Lycopersicon esculentum*) est l'un des légumes les plus importants dans l'alimentation humaine et qui se consomme frais ou transformé. La tomate est devenu un élément incontournable de la gastronomie de nombreux pays. La plante est cultivée en plein champ ou sous serre, sous presque toutes les latitudes. La tomate a donné lieu au développement d'une importante industrie de transformation, pour la production de concentrée, de sauce, notamment le ketchup, de jus et de conserve. Compte tenu de son importance économique, elle est l'objet de nombreuses recherches scientifiques et elle est considérée parmi les produits agricoles les plus commercialisés au monde. La production mondiale de la tomate est estimée d'après la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) à 133 millions de tonnes par an en 2008.. L'Algérie occupe la 33^{ème} place mondiale avec une production annuelle de 800.000 tonnes, Tunisie 18^{ème} place avec 1.000.000 tonnes, Maroc 16^{ème} place avec 1.237.030 tonnes , Espagne 9^{ème} place avec 3.664.100 tonnes, Italie 6^{ème} place avec 6.530.162 tonnes, France (non classée) avec une production de 575.428 tonnes (<http://faostat.fao.org>).

Pendant la dernière décennie les scientifiques étaient intéressés par les propriétés anti-oxydantes de la tomate; où ils avaient constaté que la consommation de cette dernière diminue le risque de quelques cancers [35]. Plusieurs études épidémiologiques ont montré que la prise de lycopène en quantité est associée inversement au risque du cancer de la prostate, du pancréas et de l'estomac [36,37].

La tomate est un produit contenant des composés bénéfiques pour la santé, c'est une source de caroténoïdes (particulièrement le lycopène) et de l'acide ascorbique (vitamine C). Elle nous fournit aussi du fer, potassium, et quelque vitamine B, elle est une bonne source de fibres diététiques tableau (3.1). Elle contient environ 93% d'eau, cette large quantité d'eau qu'elle contient la rend périssable; et la composition chimique de la tomate dépend des conditions de culture, degré de maturité et des conditions environnementales où elle est cultivée [36].

Les valeurs nutritionnelles moyennes pour 100g de tomate crue sont présentées dans le tableau ci-dessous [72].

| | | | | | |
|-------------------------|--------|-----------|-------|-----------|--------|
| Valeur calorifique | 20kcal | Calcium | 11mg | Zinc | 0,24mg |
| Eau | 93g | Chlore | 40mg | Fibre | 1,2g |
| Protide | 1g | Fer | 0.6mg | Cellulose | 0,6g |
| Lipide | 0.3g | Potassium | 280mg | | |
| Glucide | 4g | Magnésium | 10mg | | |
| Vitamine B ₁ | 0,09mg | Sodium | 3mg | | |
| Vitamine B ₂ | 0,04mg | Phosphore | 27mg | | |
| Vitamine C | 38mg | Soufre | 11mg | | |

Tableau 3.1 Valeur nutritionnelle de 100g de tomate

La surproduction pendant la période de récolte et la surabondance du produit dans le marché engendrent la réduction du prix de la tomate. Cette dernière est très périssable à l'état mûr, ce qui implique une perte assez conséquente pendant la période de récolte d'où un déséquilibre entre l'offre et la demande. Par conséquent, un besoin accru se fait sentir pour augmenter la durée de vie de la tomate en procédant au séchage ou à d'autres procédés de conservation.

Le séchage naturel de la tomate est une méthode traditionnelle pour conserver l'excès de production des produits agricoles après la récolte. Néanmoins cette méthode a prouvé ses limites, car l'opération se fait avec un temps de séchage important qui peut porter préjudice à la qualité du produit séché d'autant plus que cette qualité est intimement liée aux conditions climatiques et est sujette à la contamination par les animaux.

Par conséquent, différentes configurations de séchoirs ont été développées pour sécher une panoplie de produits agricoles (Ekechukwa and Norton 1998) [27], (Farkas 2004) [73], (Ramana Murthy 2009) [74], (Atul Sharma and al, 2009) [75]. Plusieurs travaux expérimentaux de différent produit en couche mince ont été élaborés, à titre d'exemple et de façon non exhaustive on cite: oignon et poivron (Kiranoudis and al, 1992) [76], pomme de terre (Chen and al, 1994) [77], pomme de terre douce (Diamante and Munro 1991) [18], carotte (Doymaz, 2004a) [50], piment (Hossain and Bala, 2007) [82].

Pour ce qui est de la tomate, (Zanoni et al, 1999) [83] ont étudié le séchage des tomates, échantillons coupées en deux, dans un séchoir conventionnel pour $T=80^{\circ}\text{C}$ et $T=100^{\circ}\text{C}$, de même ils ont étudié l'effet des conditions de séchage sur le contenu en lycopène de la tomate. (Hawladar et al, 1991) [47] séchés les tomates en couche mince dans des séchoirs conventionnels actifs avec des plages de température et de vitesse allant respectivement de 40°C à 80°C et de 0.7ms^{-1} à 1.8ms^{-1} , afin de déterminer les caractéristiques de séchage de la tomate et la corrélation existante entre le coefficient de diffusion effectif et les paramètres de température et de vitesse de l'air asséchant. (Shi et al, 1999) [84] utilisèrent l'air asséchant conventionnel à 95°C pour étudier la dégradation du lycopène. (Akambi et al, 2006) [48] ont étudié le comportement de la cinétique de séchage des tranches minces de tomate pour les températures de $45, 60$ et 75°C . (Doymaz, 2007) [14] avait étudié l'effet du pré-traitement sur les cinétiques de séchage des tomates coupées en deux et étalées sur les claies d'un séchoir à convection forcée. L'air asséchant de vitesse 1.5ms^{-1} , est chauffé à des températures de $55, 60, 65$ et 70°C à l'aide des résistances électriques, traverse perpendiculairement les claies. Pour le séchage solaire de la tomate; (Sebai et al, 2002) [85] ont réalisé localement (Tanta Egypte) un séchoir solaire indirect à convection naturelle pour sécher tomate, oignon, figue et raisin. Ils ont étudié expérimentalement et théoriquement la corrélation existante entre la constante de séchage K et la température du produit en couche mince à sécher. (Sacilik et al, 2006) [38] ont étudié expérimentalement les courbes de séchage solaire de tranche de tomate coupée en deux et étalée dans un séchoir solaire tunnel passif dans les conditions atmosphériques d'Ankara (Turkey) et ils les ont comparées au mode de séchage à l'air libre. Cependant, très peu d'études ont été faites sur le séchage solaire des tomates en couche mince. Par conséquent, une étude a été entamée pour la réalisation et l'optimisation du séchage solaire de la tomate sous les conditions climatiques de Ouargla.

3.2 MODELE THEORIQUE DE DESCRIPTION DES MECANISMES DE SECHAGE:

Le processus de séchage est complexe et cette complexité est due aux difficultés suivantes:

- *le processus physique est fortement non linéaire
- *les processus d'échange et d'interaction sont complexes
- *les phénomènes dominants dépendent des conditions de séchage et changent au cours du séchage.

Les propriétés de transport à l'intérieur du produit dépendent fortement de la température et de l'humidité.

Différentes approches ont été utilisées sur une grande variété de produit pour décrire les mécanismes de séchage. Ces approches théoriques permettent la prédiction des transferts internes de la matière et de la chaleur dans un produit.

3.2.1 étude épistémologique du séchage

3.2.1.1 Les premiers formalismes de séchage

Vu la complexité du phénomène de dessiccation, différentes approches ont été utilisées sur une grande variété de produit pour décrire les mécanismes de séchage.

*Lewis (1921): Initiateur des premiers travaux scientifiques sur le séchage, il caractérise le phénomène de séchage par deux processus indépendants [16]:

- Diffusion de l'intérieur du produit vers la surface (diffusion liquide)
- Evaporation à la surface

*Sherwood (1929): assimile le processus de séchage à une diffusion moléculaire décrite par la loi de Fick [28].

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

Cette approche utilise la concentration en eau comme force motrice du processus.

Cette équation écrite suivant une seule dimension, est résolue analytiquement, en supposant que le coefficient de diffusion D reste constant. Ce modèle donne des résultats plus ou moins satisfaisants pour certains matériaux, tel que le bois ou l'argile, mais fait apparaître un écart important avec les expériences pour d'autres tel que le savon par exemple. Sherwood explique ce fait par les variations du coefficient de diffusion durant le séchage.

*Hougen (1937): Utilise la théorie capillaire dans son étude sur les matériaux granulaires, pour calculer le profil de la distribution de l'humidité dans un lit de sable [29]. Hougen démontre plus tard les limites du modèle diffusif et le rôle joué par la capillarité en présentant

des comparaisons avec des mesures expérimentales. Ces travaux montrent que la théorie capillaire est bien plus adaptée pour modéliser le phénomène mais une amélioration s'avère nécessaire.

Les premiers formalismes sur le séchage sont posés mais avec un inconvénient majeur, c'est qu'ils négligent complètement l'effet de la chaleur.

3.2.1.2 Les seconds formalismes de séchage (couplage des transfert de chaleur et de masse)

La traduction du processus de séchage par un système d'équation mathématique couplé qui illustre le transfert de chaleur et de masse est le fruit des travaux des chercheurs suivants: Krisher (1938), Luikov(1934), Philip et Devries(1957).

*Théorie de Krisher: Krisher introduit une nouvelle théorie qui suppose que l'humidité peut se déplacer par une combinaison de transport capillaire pour la phase liquide et diffusif pour celle vapeur [30].

$$\begin{aligned} J_L &= -D_L \rho_L \text{grad } X \\ J_V &= -D_V \rho_V \text{grad } P_V \end{aligned} \quad (3.2)$$

Avec D_L et D_V respectivement coefficient de diffusion du liquide et de la vapeur d'eau en (m^2s^{-1}).

J_L =flux masse surfacique du liquide ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

J_V = flux masse surfacique de la vapeur d'eau ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

*Modèle de Luikov: En 1934 Luikov met en évidence le phénomène de thermodiffusion et établit qu'un gradient de température contribue à la migration d'humidité dans un milieu .Il propose un formalisme mathématique qui suppose que les flux de diffusion de vapeur et de liquide soient le fait d'un gradient de concentration totale et d'un gradient de température

$$\begin{aligned} J_L &= -D_L \rho_S \text{grad}X - D_{LT} \rho_S \text{grad}T \\ J_V &= -D_V \rho_S \text{grad}X - D_{VT} \rho_S \text{grad}T \end{aligned} \quad (3.3)$$

Avec ρ_S : masse volumique de la phase solide

D_{LT} : coefficient de thermo-migration du liquide (m^2s^{-1})

D_{VT} : coefficient de thermo-migration de vapeur (m^2s^{-1})

Ce système d'équation est complété par les bilans d'énergie et de masse comportant un terme de changement de phase \dot{m} (quantité d'eau qui s'évapore par unité de volume et de temps à l'intérieur du milieu) tel que:

$$\dot{m} = \tau \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} \quad \text{où } \tau \text{ est un facteur adimensionnel caractérisant la}$$

résistance à la diffusion de vapeur dans le matériau. τ tend vers 0 au début du séchage quand la migration d'humidité est essentiellement liquide et tend vers 1 à la fin du séchage quand la migration d'humidité est essentiellement vapeur. Le système d'équation devient alors [31]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= \text{div} [D_m (\text{grad}X + \delta_s \text{grad}T)] \\ \frac{C_s \rho_s \partial T}{\partial t} &= \text{div} [D_T (\text{grad}X)] - L_v \tau \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$D_m = D_v + D_L$ coefficient de diffusion totale (m^2s^{-1})

$\delta_s = \frac{D_{VT} + D_{LT}}{D_v + D_L}$ coefficient de thermo-migration.

C_s = chaleur spécifique du substrat ($J \text{ kg}^{-1}C^{-1}$)

L_v = chaleur latente de vaporisation ($J \text{ kg}^{-1}$)

D_T = diffusivité thermique (m^2s^{-1})

L'inconvénient de ce modèle c'est que le facteur τ est très difficile à déterminer expérimentalement.

*Modèle de Philip et De vries

Le séchage se traduit par une combinaison de gradient de température et d'humidité en tenant compte en plus de l'effet de la pesanteur, modèle illustré à partir d'étude sur les transferts de chaleur et de masse au niveau des sols [32].

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= \text{div} \left[D_M \text{grad}X + D_T \text{grad}T - \frac{\rho_L}{\rho_s} K \right] \\ \frac{\rho c \partial T}{\partial t} &= \text{div} (\lambda^* \text{grad}T) + \rho_L L_v (D_{MV} \text{grad}X + D_{TV} \text{grad}T) \end{aligned} \quad (3.5)$$

*Modèle de Whitaker

Le formalisme de Whitaker [33] est basé sur une "macroscopisation" des équations physiques relative à l'état microscopique de chaque phase présente dans le milieu poreux. Ce modèle utilise la technique de prise de moyenne sur un volume élémentaire représentatif (V.E.R) figure (3.1); concept qui permet de passer d'un milieu discontinu à un milieu continu fictif avec des grandeurs physiques moyennes. Soit une grandeur physique Φ_i associée à la phase i présente dans le milieu poreux On définit la valeur moyenne de cette grandeur par

$$\langle \Phi_i \rangle = \frac{1}{V} \int_V \Phi_i dV$$

les équations de continuité, quantité de mouvement et d'énergie aux trois phases liquide, solide et gazeuse dans un volume élémentaire représentatif. Les systèmes d'équation obtenus sont complétés par les relations thermodynamiques appliquées à la phase gazeuse.

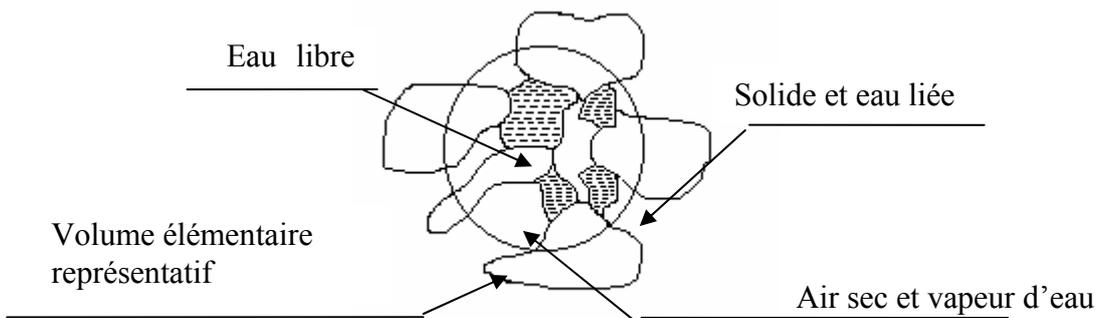


Figure3.1 Volume élémentaire représentatif dans un milieu poreux

L'opération de séchage modifie l'ensemble des propriétés des produits agro-alimentaires où le transport de l'eau (liquide ou vapeur) et les composés volatils sont gouvernés par un mécanisme de diffusion moléculaire. En réalité plusieurs modèles de transfert d'humidité dans la phase de séchage décroissante sont proposés dans la littérature, cependant le modèle diffusif est généralement le plus adapté, bien que le mécanisme réel de transfert d'humidité n'est pas totalement maîtrisé. Ce modèle diffusif est utilisé pour adapter les données de séchage de plusieurs produits biologiques [86, 87].

La diffusion de l'humidité dans les couches minces de tomate peut être calculée à partir des données expérimentales de séchage en utilisant la seconde loi de Fick: énoncée comme suit:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (3.7)$$

Où X: Humidité absolue (kg eau /kg matière sèche), t=Temps (s), D_{eff} : Coefficient de diffusion effectif de l'humidité dans le solide (m^2/s), x :Longueur (m).

La solution de cette équation développée par Crank 1975 [88] peut être appliquée aux tranches minces de tomate pour plusieurs épaisseurs, en supposant que la distribution initiale de l'humidité est uniforme, coefficient de diffusion et température constants et l'effet de rétrécissement négligeable. Le ratio d'humidité (MR) des tranches minces de tomate peut être déterminée par l'expression ci-dessous [89, 47, 50].

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3.8)$$

Où D_{eff} : représente la diffusivité effective (m^2/s), L: épaisseur de la tranche mince de tomate, $n=1, 2, 3, \dots$ etc. représente le nombre des termes de la série.

Pour les longues périodes de séchage t et pour des épaisseurs d'échantillons L très petit, les termes dans la sommation de la série ci-dessus correspondant à $n > 1$ sont relativement petits; à cet effet l'équation (3.8) peut être simplifiée au premier terme de la série seulement. Le ratio d'humidité MR peut être réduit à (X/X_0) à cause de la valeur de X_e qui est relativement petite devant X et X_0 .

En introduisant le logarithme aux deux membres de l'équation (3.8), on obtient l'équation ci-dessous (3.9).

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4} \frac{t}{L^2} \quad (3.9)$$

Le coefficient effectif de diffusion est déterminé en traçant le graphe donnant les valeurs expérimentales de $\ln(X/X_0)$ en fonction du temps de séchage (t); le graphe ainsi tracé nous donne une droite de pente $(\pi^2 D_{eff}/4L^2)$. Connaissant la pente du graphe et l'épaisseur de la tranche de tomate, on peut calculer le coefficient de diffusion effectif voir chapitre (4.6.1).

3.3 MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE

Le processus de séchage se déroulant au sein du caisson de dessiccation peut être simulé par deux phénomènes physiques couplés: un transfert de chaleur et un transfert de masse. Leur étude nécessite la connaissance des coefficients et des surfaces d'échanges. La modélisation numérique du système se réduit à un ensemble d'équation régissant ces transferts (pour plus de détail voir chapitre 2 paragraphe 2.13.); l'étude se réduit à une étude unidimensionnelle, grâce à la configuration du caisson de dessiccation (claires superposées selon la direction de l'air qui les traverse).

3.4 APPROCHE DE L'OPTIMISATION DU SECHAGE SOLAIRE:

L'optimisation d'un système impose un critère d'évaluation, qui est la fonction objectif.

Parfois, l'optimisation est multicritère et la fonction objectif sera difficile à définir.

Généralement Il existe deux niveaux d'approche de l'optimisation:

3.4.1 Optimisation conceptuelle:

C'est une optimisation par comparaison d'alternatives ou de concepts différents; cette optimisation conduit à des choix entre des configurations différentes de systèmes (type de séchoir direct, indirect, hybride...etc.) ou de procédés. Cette optimisation est fondamentalement discontinue. Dans notre cas le choix s'est porté sur le séchoir hybride indirect pour les raisons citées ci-dessous.

3.4.1.1 Expose de motif pour le choix du séchoir indirect par rapport aux autres procédés

Une étude comparative, relevant les avantages et les inconvénients entre le séchage à l'air libre et sous séchoir, a été préalablement faite dans le chapitre 2.9 et dénote que le séchage sous séchoir est plus attractif que le séchage à l'air libre.

Les problèmes majeurs rencontrés lors de l'utilisation des séchoirs passifs c'est la non fiabilité des résultats car l'opération de séchage dépend largement des conditions atmosphériques locales et la difficulté de contrôler la température et le flux de l'air asséchant et par conséquent la qualité du produit. Le temps de séchage dépasse généralement une journée, comme le séchoir passif ne fonctionne pas la nuit donc possibilité d'altération car le produit est encore humide.

Pour pallier à tous ces inconvénients nous nous sommes orientés vers le séchoir solaire indirect hybride. Ce dernier présente les avantages suivants:

- * L'incidence du rayonnement solaire sur le produit n'est pas direct ce qui évite les dommages thermiques localisés et la caramélisation; sauvegarde les vitamines et la couleur du produit [5].
- * Maîtrise et maintient les paramètres aérothermiques constants lors de l'opération de séchage.
- * Le prototype réalisé facilite la charge et décharge des produits dans les claies.
- * Le séchoir actif est plus effective et plus contrôlable que le séchoir passif.
- * Forte augmentation de la productivité par rapport au séchoir passif

3.4.2 Optimisation spécifique:

Elle concerne une configuration donnée répondant à un schéma descriptif donné. A cette configuration spécifique on associe une représentation mathématique de type continue par rapport aux variables du problème. C'est une optimisation de fonctionnement (régime nominal). Dans notre cas l'écoulement de l'air asséchant doit être perpendiculaire aux claies de séchage contenant le produit afin d'avoir des conditions optimales de contact air-produit et un coefficient de transfert de chaleur important

3.4.3 Critère et fonction objectif:

Le problème d'optimisation fait intervenir une fonction objectif (FO) ou fonction coût associée à un critère; l'optimum recherché correspond à la solution la meilleure au sens de ce critère.

En pratique, il ressort que la définition du critère d'optimisation est une opération difficile où le savoir faire et l'intuition du chercheur sont fortement sollicités. Le choix est souvent délicat car généralement on a un ensemble de choix ou de critères.

On peut dresser une liste des différents critères non exhaustifs pour un séchoir: L'optimisation peut porter sur :

- le temps de séchage /vitesse de séchage: le séchage doit se faire en vitesse si non les moisissures vont prendre le dessus.
- la quantité de produit séché par jour ou par opération

- la qualité du produit finale séché, qui elle-même est composée de plusieurs critères (propriétés organoleptiques, acceptation par le consommateur, goût, forme, couleur du produit...etc.)
- forme du séchoir (type de séchoir, dimensions, efficacité, convenance de la charge/décharge des produits à sécher.....etc.)
- Le coût économique: on cherche un minimum de coût ou un maximum de bénéfice
- Consommation énergétique: diminuer au maximum en allant vers le tout solaire.
- Valeur écologique : pollution minimale.

3.5 APPROCHE EXPERIMENTALE DU SECHAGE SOLAIRE

3.5.1 Introduction:

Ces dernières décennies ont vu se développer considérablement la théorie de séchage et la compréhension des phénomènes physiques qui gouvernent la migration interne de l'eau. Néanmoins, en dépit de la complexité des différents mécanismes régissant le processus de séchage, en plus des changements des caractéristiques physiques des produits (nature, forme, propriété physique) au cours de l'opération et la variation de quelques paramètres exemple de la diffusivité en fonction de l'humidité et de la température; nous laisse à conclure du moins pour l'instant qu'il semble irréaliste de vouloir faire une description mathématique complète d'un matériau au cour du séchage. Ce qui fait qu'on a opté pour l'étude expérimentale des cinétiques de séchage qui englobe le maximum d'information avec un minimum de complexité. Dans cette approche expérimentale, toute la spécificité du produit ainsi que les conditions de séchage sont inclus dans la structure même de l'équation cinétique développée. Les travaux ont été souvent consacrés à la modélisation et un modèle ne saurait remplacer la réalité; néanmoins il faudra toujours s'appuyer sur l'expérience existante ou à réaliser de façon à assurer une validation aussi complète que possible du modèle proposé. L'originalité de notre approche consiste en un recours systématique à l'expérimentation en concevant et réalisant deux prototypes de séchoirs solaires indirects sur lesquels on étudie leur comportement thermique ainsi que l'influence de certains paramètres sur la cinétique de séchage. .

3.5.2 Prototype de séchoir solaire indirect

Deux prototypes de séchoir solaire indirect: l'un passif ou à convection naturelle figure (3.2) et l'autre actif ou à convection forcée figure (3.3); ont été concoctés localement avec des matériaux locaux et tester à vide, puis sous charge pour voir le comportement de ces deux prototypes. Une bonne maîtrise relative de l'opération de séchage avec le séchoir forcé par rapport au séchoir naturel a été constatée. L'influence de la température et de la vitesse de l'air asséchant, paramètres influents lors du transfert de chaleur et de masse, a été mise en évidence.



Figure 3.2 séchoir solaire indirect passif ou naturel



Figure 3.3 Séchoir solaire indirect actif ou forcé.

Les expériences ont été réalisées sur le toit du laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA), faculté des sciences et de la technologie et science de la matière. Université Kasdi Merbah Ouargla.

3.5.3 Description du séchoir actif hybride(solaire électrique)

Le prototype utilisé est schématisé ci- dessous figure (3.4). C'est un séchoir hybride (solaire- électricité), indirect à convection forcée il est constitué de deux unités: un capteur solaire et un caisson de dessiccation.

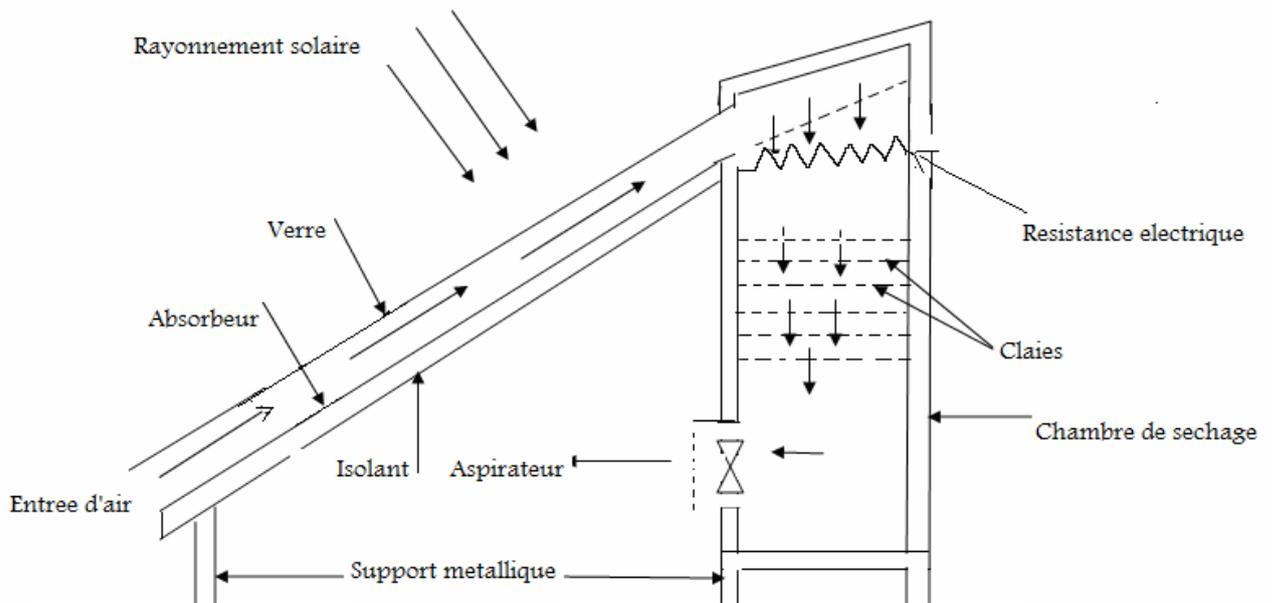


Figure 3.4 Diagramme schématique du séchoir indirect actif

3.5.3.1 Le capteur solaire

C'est un capteur solaire plan à air à simple circulation et à simple vitrage dont la configuration est parallélépipédique (2,45 m x 1m) transforme le rayonnement solaire en énergie thermique. Il est constitué d'un absorbeur en tôle galvanisée de (0.002m) d'épaisseur peinte en noire mate. Il est recouvert aussi d'une plaque de verre d'épaisseur 0,005m. Les cotés latéraux et les parties inférieures sont isolés thermiquement avec le polystyrène. L'air y circule entre la vitre et l'absorbeur.

Le capteur est incliné d'un angle de 31° (latitude de la ville de Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud.

3.5.3.2. Le caisson de dessiccation

Le caisson de dessiccation est une unité de longueur (1m), de largeur (0.60m) et de hauteur (1,65m). Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polystyrène. Le caisson contient:

*Une résistance de chauffe de (3,75 kW d'incertitude $\pm 2\%$) est placée à l'entrée de la chambre de séchage reliée à un thermostat au cas où le solaire seul ne suffit pas pour atteindre les températures voulues

*Un aspirateur de marque (KFA-30A, P= 40W) de 20cm de diamètre avec un débit d'air réglable à l'aide d'une vanne, (de vitesse 1400 tours/min, débit volumique $0,325 \text{ m}^3 / \text{s}$) est fixé à la sortie du caisson pour évacuer vers l'extérieur l'air humidifié par l'évaporation de l'eau des produits.

*six claies en grillage galvanisé, chacune de surface $0,4\text{m}^2$ avec possibilité de contenance du caisson jusqu'à huit claies; ces dernières sont distantes les unes des autres de 0,12m. La masse de produit à sécher contenue sur chaque claie est dans notre cas égale à 2kg, avec un flux de $0,0314$, $0,0470$ et $0,0628 \text{ m}^3/\text{s}$. La masse de produit que peut sécher un séchoir dépend de la densité de produit étalée sur chaque claie [34]. La capacité de notre prototype est de 9,6 jusqu'à 12,8kg de produit à sécher.

3.5.3.3 Fonctionnement du système

L'air frais capté de l'extérieur est préalablement chauffé dans le capteur solaire, par le contact air absorbeur qui lui permet d'élever sa température. Ce dernier arrive à l'entrée de l'armoire de séchage et avant de traverser les claies, l'air est chauffé par des résistances

électriques qui fournissent en cas de besoin un appoint en énergie permettant d'assurer une température de séchage fixe et réglable. L'aspirateur aspire l'air de séchage qui traverse les claies superposées, et l'évacue vers l'extérieur.

3.6 APPAREILLAGES DE MESURES

3.6.1 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 (MGE de type DS 120 avec incertitude $\pm 5\%$) et ceci durant la journée de l'expérience.

3.6.2 Mesure de la température vitesse, et humidité relative de l'air dans le séchoir

Les mesures des températures sont effectuées à l'aide des thermocouples de type K (chromel-alumel)(0,2 mm de diamètre: incertitude $\pm 2\%$) reliés à un appareil (Testo modele 945 : incertitude $\pm 0.3^\circ C$). Les mesures sont prises dans plusieurs endroits : entrée, sortie du capteur et entrée du caisson de dessiccation.

La vitesse de l'air asséchant est mesurée à la sortie du caisson de dessiccation. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre (Testo modèle 445: incertitude $\pm 0,03ms^{-1}$) L'appareil Testo 445 à affichage numérique est aussi muni d'une sonde pour la mesure de l'humidité relative de l'air.

3.7 SECHAGE DE LA TOMATE

3.7.1 Préparation du produit

La tomate a été achetée fraîche du marché local et choisie d'une façon homogène pièce par pièce en utilisant trois critères qui sont la dimension (taille moyenne), le degré de maturation (ni crue ni trop mur), et la morphologie externe (surface saine sans fissure).

Une fois lavée manuellement avec de l'eau fraîche pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations; elle est découpée en rondelles de 1 cm d'épaisseur puis étaler sur les claies.

3.7.2 Détermination de l'humidité relative initiale du produit

La détermination de la masse sèche du produit s'effectue à l'aide d'un analyseur d'humidité (Sartorius MA 45, Sartorius A.G., Gottingen, Germany: incertitude ± 0.1). Après la préparation d'un échantillon de la tomate (45g) on l'introduit dans l'analyseur d'humidité. Cet appareil est réglé à une température de 70°C [38], elle s'arrête automatiquement dès que la masse devient constante. L'analyseur est équipé d'une balance à affichage numérique de précision 0,001g qui mesure la masse du produit durant le fonctionnement de l'appareil. L'expérience a été refaite trois fois pour chaque échantillon pour minimiser les erreurs. Une valeur moyenne d'humidité relative trouvée est de 93,40 % ($\pm 0,9$).

3.7.3 Détermination de la courbe caractéristique de séchage

L'intérêt de cette courbe est important. Il suffit de connaître les valeurs de la teneur en eau initiale et d'équilibre pour pouvoir décrire la cinétique de séchage dans n'importe quel condition de l'air asséchant. Le principe de la courbe caractéristique de séchage est de réduire l'ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir les mettre sous forme utilisable non seulement par l'expérimentateur lui-même, mais aussi par l'ensemble de la communauté scientifique. La démarche suivie est de normaliser le rapport $(-dX/dt)/(-dX/dt)_i$ dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite X_r .

Suite aux différents essais expérimentaux de séchage réalisés dans des conditions opératoires différentes, nous avons établi une corrélation exprimant la vitesse de Séchage normée de la tomate sous forme d'un polynôme d'ordre 3 en X_r figure (3.5).

Nous avons utilisé la méthode d'optimisation non linéaire en utilisant le logiciel Origin et en traitant tous les points expérimentaux. Le meilleur lissage est obtenu en choisissant comme critère d'évaluation un coefficient de corrélation R^2 élevé (0,9082) et χ^2 minimal (0,00943).

La fonction polynomiale représentant la courbe caractéristique de séchage de la figure ci-dessous est donnée d'après le logiciel origine 6.1 comme suit:

$$\text{Vitesse de sechage reduite} = f(X_r) = 0,03972 + 2,48916X_r - 3,71419X_r^2 + 2,31832X_r^3$$

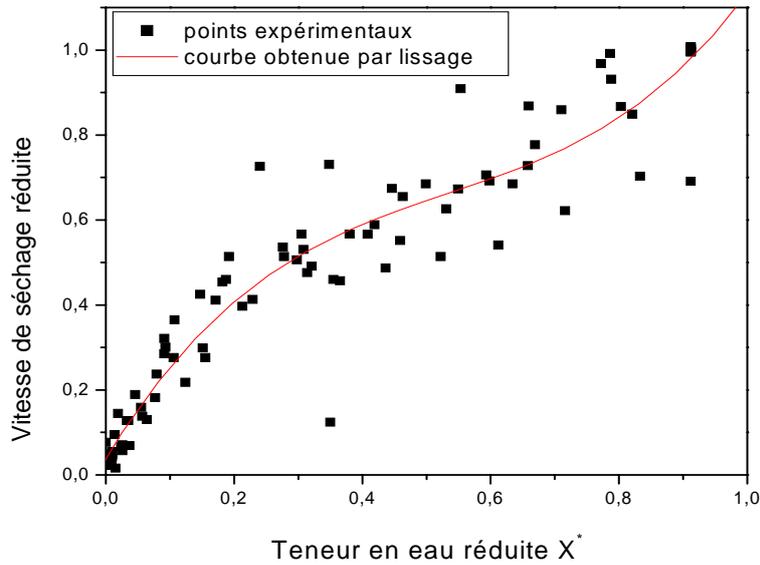


Figure 3.5 Courbe caractéristique de séchage de la tomate

Teneur en eau réduite $X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \approx \frac{X}{X_i}$ car X_{eq} est très petit devant X et X_i

X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre donnée par les isothermes de desorption.

X_i est la teneur en eau initiale.

X_r est la teneur en eau réduite

$$\text{Vitesse de séchage réduite} = \left(\frac{-dX}{dt} \right) / \left(\frac{-dX}{dt} \right)_1 = f(X_r)$$

Avec: $\left(\frac{-dX}{dt} \right)$: vitesse de séchage à un instant t

$\left(\frac{-dX}{dt} \right)_1$: vitesse de séchage pendant la première phase (phase à vitesse constante),

et tant donné que la première phase est absente dans la majorité des produits agro-alimentaires

on aura alors $\left(\frac{-dX}{dt} \right)_1 = \left(\frac{-dX}{dt} \right)_i = \text{vitesse de séchage initiale}$

La vitesse de séchage réduite sera égale donc à $\left(\frac{-dX}{dt} \right) / \left(\frac{-dX}{dt} \right)_i$

3.7.4 Protocole expérimental

La tomate achetée, lavée puis coupée en tranches de 1cm d'épaisseur est étalée sur les claies de la chambre de séchage (2000g pour chaque claie). La perte de poids du produit au niveau de la claie est suivie du début de l'expérience jusqu'à la fin c'est à dire de 8h jusqu'à 17h; en pesant le produit toutes les heures à l'aide d'une balance numérique (incertitude $\pm 0.001g$); le séchoir est réglé à la température de consigne une heure avant le début de l'expérience pour achever la phase transitoire. L'opération de séchage est considérée achevée lorsqu'on arrive à l'humidité relative d'équilibre du produit qui est dans notre cas de 11%) [14], valeur de la teneur en eau à base humide où le développement de tout micro-organisme est inhibé. Les mesures de température, du rayonnement, de la vitesse et de l'humidité de l'air sont relevés toutes les 30 minutes; d'où on tracera le profil d'humidité ou la cinétique de séchage du produit en fonction du temps. A la fin de chaque journée le produit est stocké dans des boites en plastique hermétiques et placé dans un réfrigérateur pour éviter toute réhydratation pendant la nuit et gardera ses états pour la continuité de l'opération le long demain. A la fin de l'opération de séchage, les échantillons secs sont laissés se refroidir à la température ambiante puis scellés dans des sacs en plastique.

Les expériences de séchage ont été exécutées à 50, 65 et 75 °C avec des épaisseurs d'échantillons d'approximativement (1, 1.5 et 2cm), et pour différentes vitesses d'air (1, 1,5 et 2 m/s); pendant la période de l'année la plus défavorable pour le séchage (Novembre 2007)

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RESULTATS

EXPERIMENTAUX

ET VALIDATION DES MODELES

4.1 COMPARAISON DES COURBES DE SECHAGE DE LA TOMATE POUR LES DEUX PROTOTYPES DE SECHOIR:NATUREL ET FORCE.

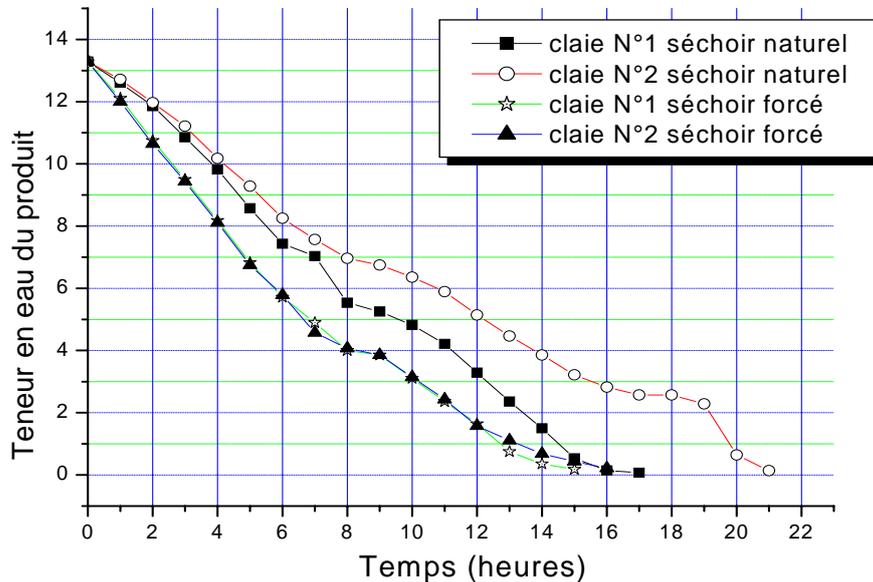


Figure 4.1 courbes de séchage de deux claies de tomate pour deux modes de séchage

Lors de l'utilisation des deux prototypes de séchoirs indirects on a constaté que le séchage à convection forcé figure (3.3) est mieux maîtrisé que celui à convection naturelle figure (3.2). Dans le mode forcé il y a homogénéisation de l'opération de séchage au niveau de tous les produits des deux claies, par contre pour le séchage à convection libre on a remarqué que les échantillons de produits se trouvant aux alentours des claies sont plus ou moins grillés par rapport aux autres cela est du probablement à la mauvaise circulation de l'air asséchant qui a engendré des zones de chauffés. En plus il y a un décalage important en temps de séchage entre la claie N°1 et la claie N°2 (4heures) figure (4.1). En mode naturel on ne peut maîtriser l'opération de séchage car les conditions de séchage (rayonnement solaire, température, vitesse et humidité changent tout le long de la journée) ce qui fait qu'on est obligé de travailler avec des valeurs moyennes pour approcher les caractéristiques de l'opération de séchage.

Le temps de séchage en convection forcé se trouve réduit par rapport au séchage naturel.

4.2 INFLUENCE DES PARAMETRES AEROTHERMIQUES SUR LA DUREE DE SECHAGE DANS LE SECHOIR ACTIF.

4.2.1 Effet de la température sur l'humidité du produit

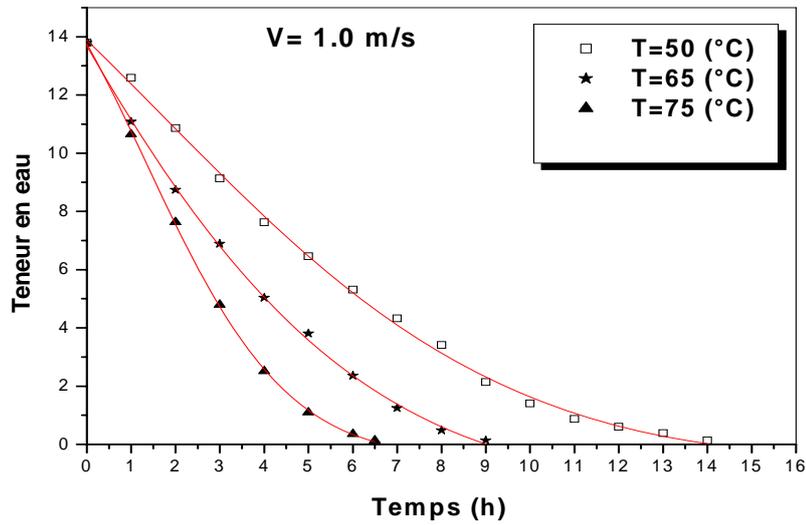


Fig. 4.2. Variation de l'humidité du produit dans le temps pour une vitesse fixée de 1ms^{-1}

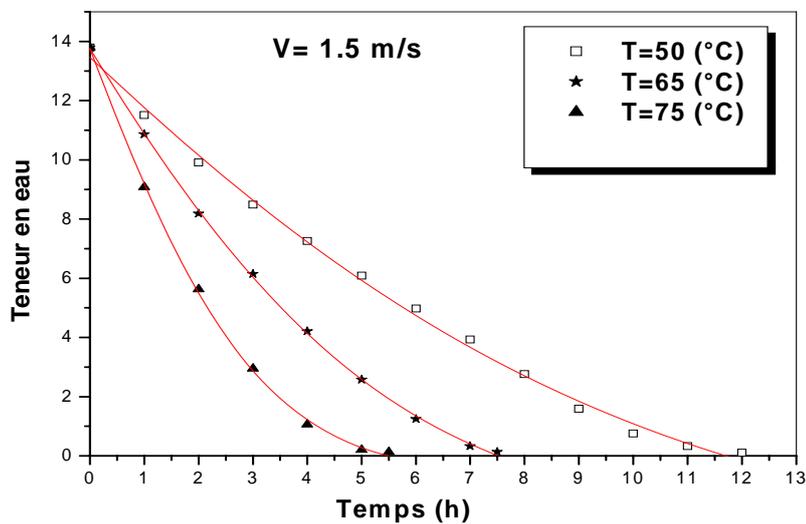


Fig4.3Variation de l'humidité du produit dans le temps pour une vitesse fixée de 1.5ms^{-1}

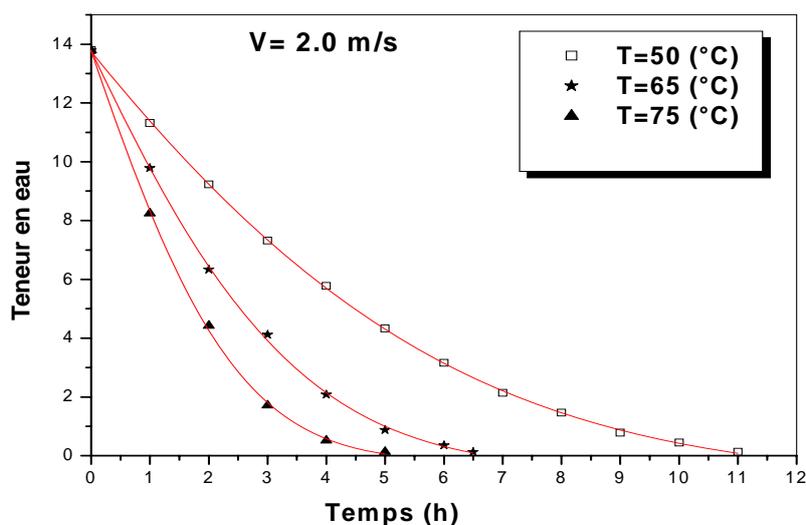


Fig.4.4 Variation de l'humidité du produit dans le temps pour une vitesse fixée de 2ms^{-1}

Les courbes expérimentales ci-dessus Figures (4.2- 4.4) montrent que l'élévation de température de 50°C à 75°C engendre une diminution du temps de séchage très appréciable (14h, 9h et 6.5h respectivement pour des température de 50, 65 et 75°C avec une vitesse de l'air asséchant fixe de 1ms^{-1}). Cette influence est due à l'augmentation de la pression osmotique de l'eau à l'intérieur du produit qui accélère la migration de l'eau du produit vers l'extérieur.

De même pour la vitesse de l'air caloporteur, une augmentation de 1ms^{-1} à 2ms^{-1} engendre une diminution relative du temps de séchage (pour $T=50^{\circ}\text{C}$, le temps de séchage est de 14h, 12h et 11h, respectivement, pour $V=1\text{ms}^{-1}$, 1.5ms^{-1} et 2ms^{-1}), cela est dû à l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur et de masse entre le produit et l'air asséchant.

Pour la température de 65°C , avec les différentes vitesses, le temps de séchage est de 9h, 7.5h et 6.5h; par contre pour la température de 75°C il chute d'une manière importante à 6.5h, 5.5h et 5h. On peut conclure par conséquent, qu'il y a une forte influence de la température de l'air caloporteur par rapport à sa vitesse sur le séchage de la tomate. Ceci est conforme aux travaux réalisées par Krokida [40] pour différents produits agricoles où il a constaté que le facteur température est le facteur le plus influant sur la cinétique de séchage.

D'après l'allure des courbes (4.2- 4.4) on remarque au début du séchage une migration rapide de l'humidité du produit vers l'extérieur (pente de la courbe très importante au début du

processus de séchage) cette pente diminue au fur et à mesure que le temps de séchage augmente. Il est beaucoup plus difficile d'extraire l'eau liée que l'eau libre.

En l'absence de régulation, l'humidité de l'air est une donnée de l'expérience sur laquelle nous nous pouvons agir. Cependant l'expérience a montré que dans l'air réchauffé à température constante, l'humidité de l'air X_a à l'entrée de la chambre de séchage variait peu au cours de l'expérience [40].

Le meilleur procédé de séchage c'est d'extraire l'humidité en vitesse, si non la moisissure va prendre le dessus c'est-à-dire le produit moisira avant qu'il se séchera. Mais pas trop vite une croûte risque alors de se former en surface empêchant l'eau de sortir, ni à très haute température le produit se dénature et noircit. Il faut prendre en considération les caractéristiques et les propriétés du produit.

En plus il faut préserver les propriétés organoleptiques du produit lors du séchage et penser à la réhumidification du produit lors de son utilisation une seconde fois. Le couple adéquat pour la tomate est ($T=65^{\circ}\text{C}$, $V=1.5\text{ms}^{-1}$). La tomate séchée à 60°C se réhydrate mieux que celle séchée à 70 ou 80°C [41].

4.2.2 Effet de la vitesse sur l'humidité du produit

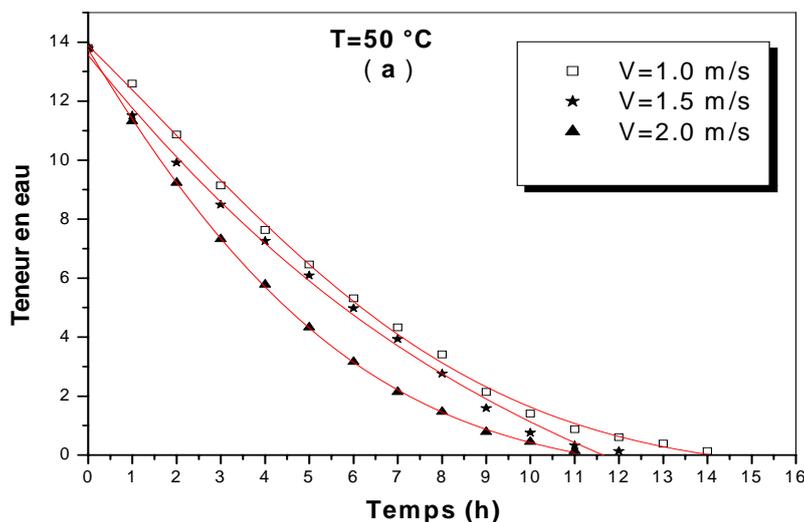


Fig.4.5 Variation de l'humidité du produit dans le temps pour une température fixée de 50°C

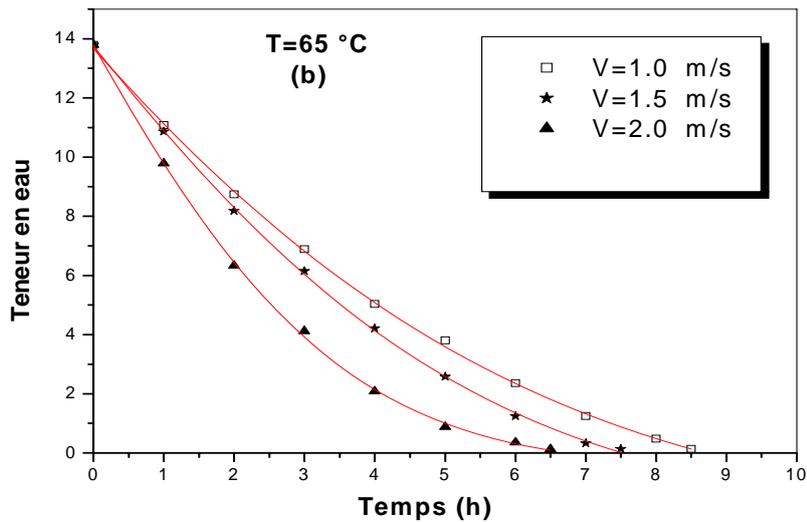


Fig.4.6 Variation de l'humidité du produit dans le temps pour une température fixée de 65°C

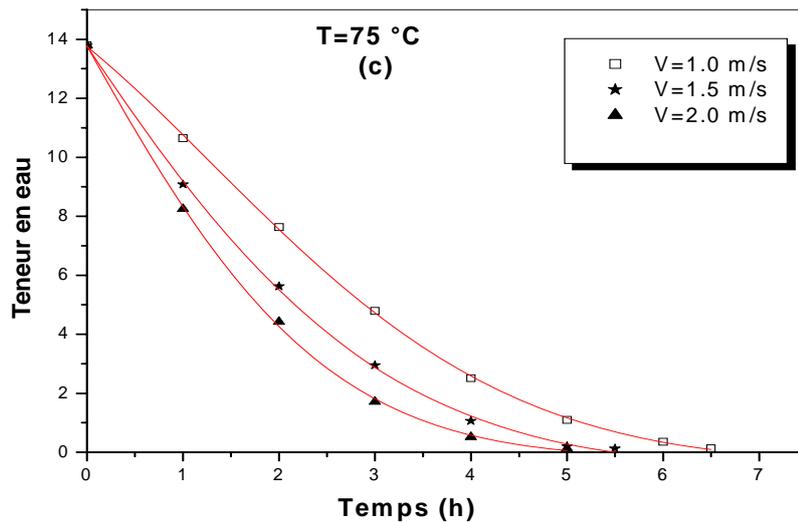


Fig.4.7 Variation de l'humidité du produit dans le temps pour une température fixée de 75°C

D'après les figures ci-dessus (4.5- 4.6- 4.7) il apparaît clairement comparativement au figure (4.2 -4.3-4.4) que l'effet de la vitesse de l'air asséchant sur le temps de séchage est moindre que l'effet de la température. Les faisceaux de courbe de la teneur en eau pour les différentes vitesses sont plus convergents que ceux des différentes températures. L'intervalle de temps de séchage moyen entre le temps de séchage maximum et minimum est d'après les figures: $\Delta t_{\text{moy}} = 2.16^\circ\text{C}$ pour les différentes vitesses et $\Delta t_{\text{moy}} = 6.66^\circ\text{C}$ pour les différentes températures.

L'effet de la vitesse de l'air est moindre en comparaison avec l'effet de la température de l'air. Ceci s'explique aussi par le fait que la température du produit s'abaisse (refroidissement) causé par l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant d'où une diminution de la pression de la vapeur d'eau ce qui implique une diminution de l'évaporation de l'eau (Madamba et al, 1996 [42], S. Lahsasni, M. Kouhila, et al 2004, [43], S. J. Babalis, V. G. Belessiotis 2004, [44], A. Kaya, O. Aydin et al 2007, [45], A. Maskan, S. Kaya , M. Maskan 2002, [46]).

4.3 CINETIQUE DE SECHAGE DES TRANCHES DE TOMATE DANS UN SECHOIR INDIRECT HYBRIDE.

(a)

(b)

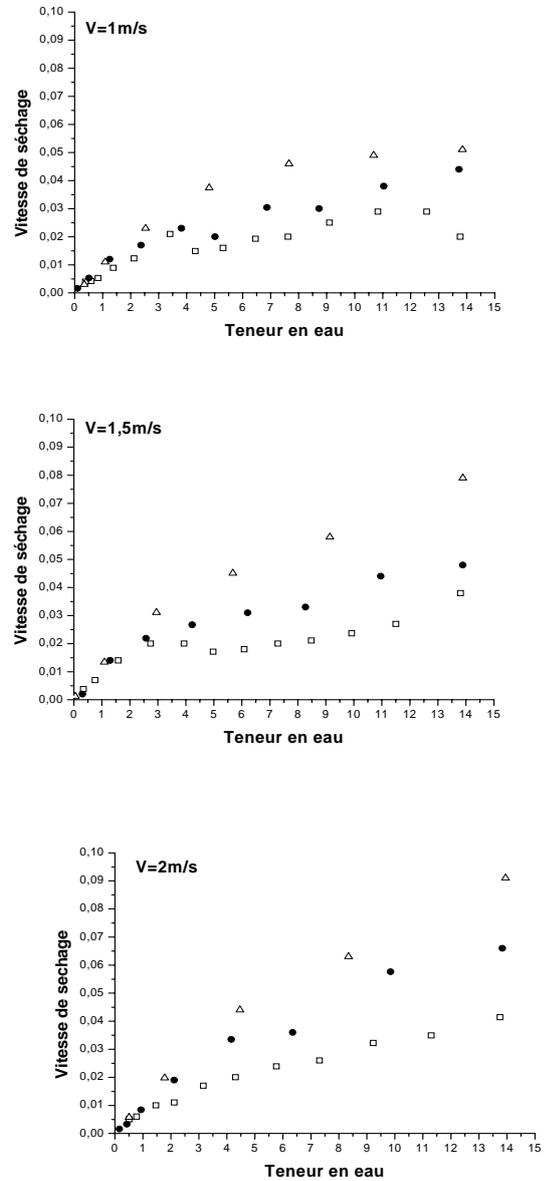
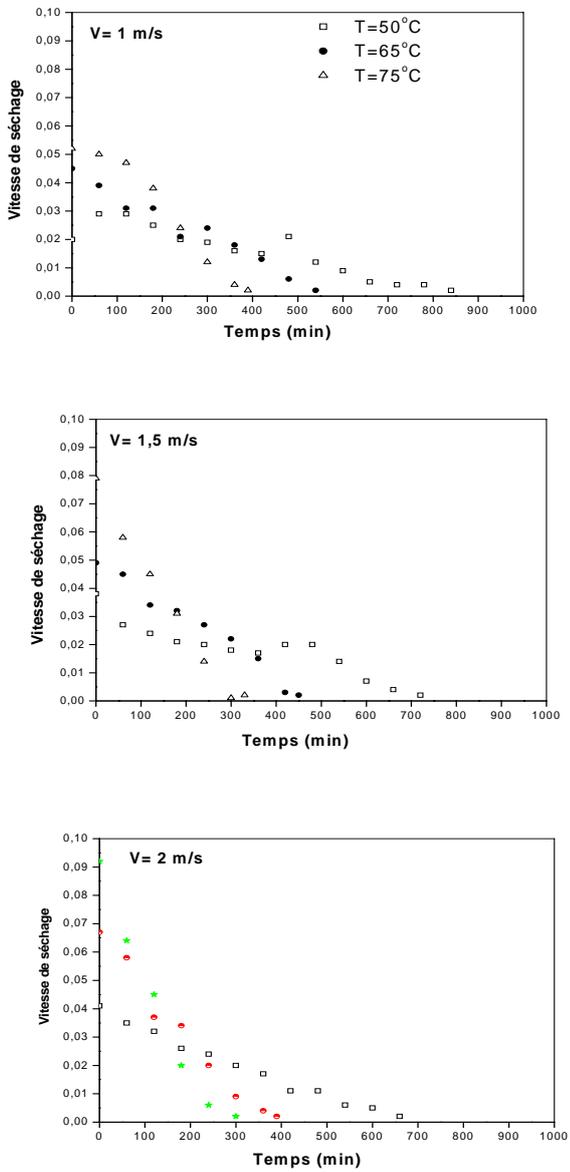


Fig.4.8 Influence de la température de l'air sur la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps (a) et de la teneur en eau (b) pour les différentes vitesses.

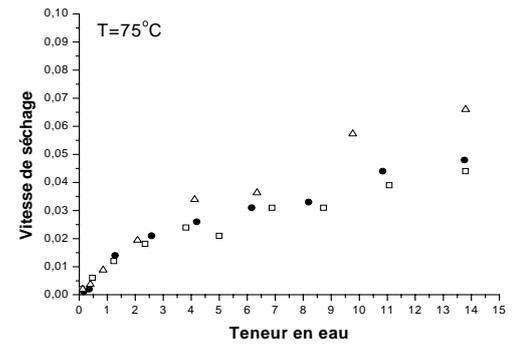
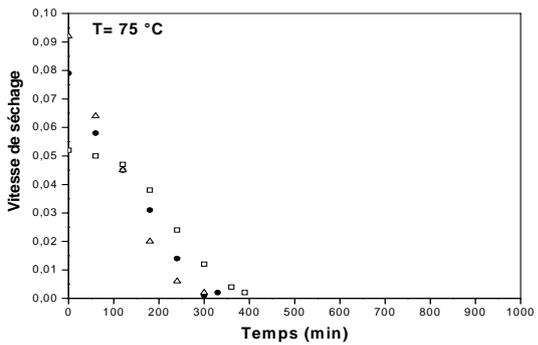
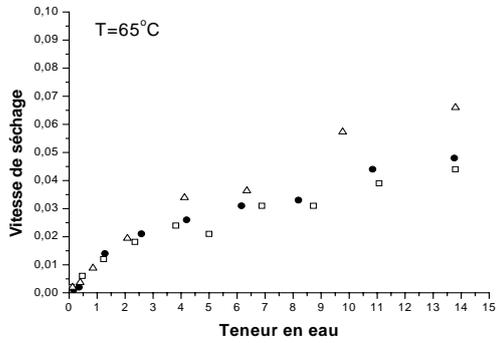
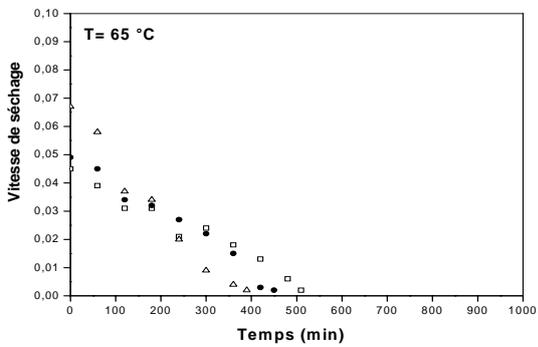
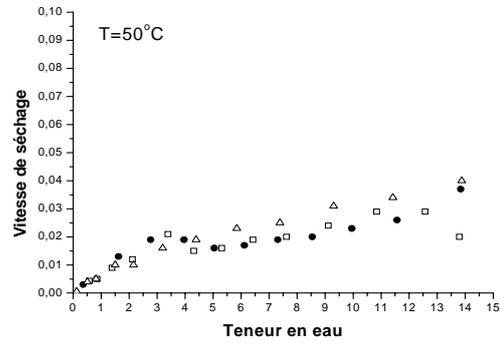
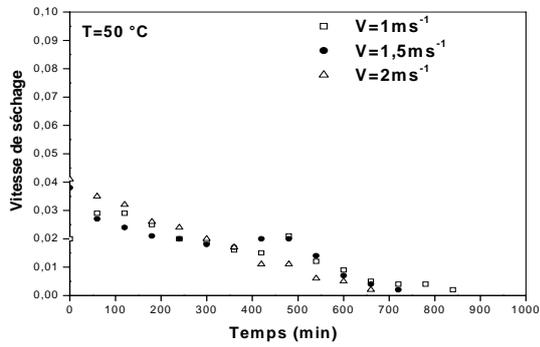


Fig.4.9 : L'influence de la vitesse de l'air sur la variation de la vitesse de séchage En fonction du temps (a) et la teneur en eau (b) pour les différents température.

On note d'après les figures (4.8 et 4.9) ci-dessus que seule la phase de séchage à allure décroissante est mise en évidence dans ce genre de produit agroalimentaire et absence de la phase de mise en température et de la phase de séchage à allure constante et ceci s'explique: par l'absence de l'eau libre à la surface du produit et aussi à la structure de ce dernier. En plus l'augmentation des paramètres de vitesse de 1 à 2ms⁻¹ et de température de l'air asséchant de 50 à 75°C engendre généralement une augmentation de la vitesse de séchage notamment au début de l'opération de séchage. Néanmoins, vers la fin de l'opération, l'influence de ces paramètres est complètement anéantie pour les basses teneurs en eau du produit, voir les courbes ci-dessus donnant la variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit, ceci s'explique par le fait que presque la totalité des molécules d'eau libres et liées ont été évaporées et reste que les molécules d'eau liées à la structure même du produit qui ne sont pas concernées par l'opération de séchage.

4.3.1 Epaisseur des tranches minces (1cm)de tomate

Lors de notre expérience du séchage des tranches minces de tomate dans notre prototype de séchoir indirect hybride ; on a constaté: la présence unique de la troisième phase de séchage (phase décroissante), absence de la première phase de mise en température et absence de la deuxième phase de séchage à vitesse constante figure (4.10).

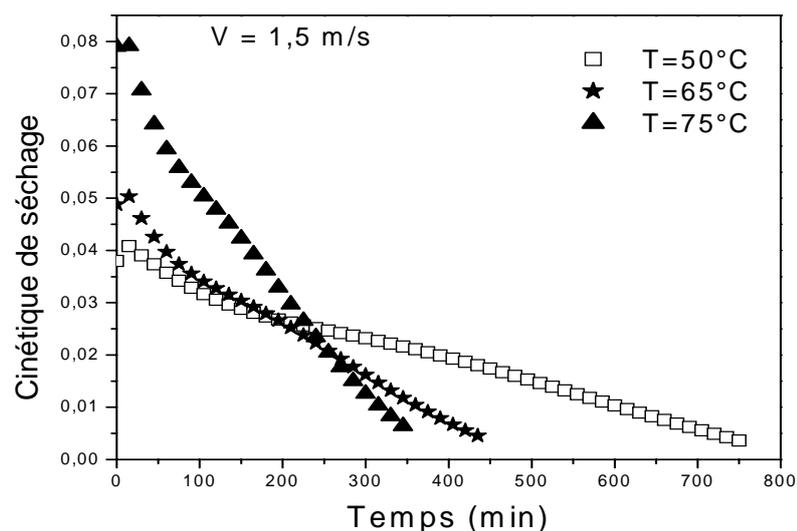


Fig.4.10 Cinétique de séchage des tranches minces (1cm) de tomate

Généralement c'est le cas pour tous les produits agro-alimentaires et cela est du probablement à la structure des produits agricoles et par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieur.

La même allure de la cinétique de séchage des produits agricoles est observée par: Hawlader et al. (1991)[47], Akanbi et al. (2006)[48] et Sacilik et al. (2006)[49] pour les tranches minces de tomate. Krokida et al. (2003)[39] pour différents produits végétaux. Doymaz(2004a)[50] pour les tranches minces de carotte, et Doymaz (2005)[51] pour les figues. Ceci s'explique aussi par le fait que le film d'eau à la surface des produits agro-alimentaires est inexistant et que le transfert d'humidité de l'intérieur de ces produits à la surface est effectué par plusieurs mécanismes compliqués (diffusion liquide, diffusion vapeur ou capillarité). Ces mécanismes changent pendant le processus de séchage (Cui et al. 2004) [52]. Jusqu'au jour d'aujourd'hui la théorie exacte des mécanismes réels régissant le transfert d'humidité dans la phase de séchage à allure décroissante n'est pas bien connue. Le plus probable mécanisme qui contrôle le transfert de masse dans les produits agricoles est la diffusion (Diamente and Munro, 1993[18]). Ces résultats concordent avec les observations des chercheurs (Togrul and Pehlivan, 2004[53]; Lahsani et al. 2004; [43] Doymaz, 2004b[54]; Azharul and Hawlader, 2005[55]; Nguyen and price 2007[56]; Kalawole et al., 2007[57]).

4.3.2 modèles théoriques appropriés pour le processus de séchage

| Nom du model | Température | Constant du model | R ² | χ ² |
|----------------------------|-------------|--|----------------|----------------|
| Lewis | T=50 | K=0,19181 | 0,96474 | 0,00372 |
| | T=65 | K=0,31533 | 0,97041 | 0,00366 |
| | T=75 | K=0,5113 | 0,98217 | 0,0025 |
| Henderson and Pabis | T=50 | a=1,04567, K=0,20056 | 0,96781 | 0,0037 |
| | T=65 | a=1,05147, k=0,33032 | 0,97421 | 0,00365 |
| | T=75 | a=1,03141, K=0,52476 | 0,98356 | 0,00277 |
| Page | T=50 | K=0,11127, n=1,30564 | 0,98428 | 0,00181 |
| | T=65 | K=0,19489, n=1,36423 | 0,99356 | 0,00091 |
| | T=75 | K=0,38206, n=1,32314 | 0,99689 | 0,00052 |
| Modified page | T=50 | K=0,18599, n=1,309 | 0,98429 | 0,00181 |
| | T=65 | K=0,30155, n=1,36595 | 0,99356 | 0,00091 |
| | T=75 | K=0,48326, n=1,32377 | 0,99689 | 0,00052 |
| Logarithmic | T=50 | a=1,48169, K=0,09415, c=-0,49668 | 0,99741 | 0,00033 |
| | T=65 | a=1,36741, K=0,17951, c=-0,36155 | 0,99931 | 0,00011 |
| | T=75 | a=1,17726, K=0,36612, c=-0,17004 | 0,99816 | 0,00039 |
| Two-term-exponential | T=50 | a=1,80071, K=0,26949 | 0,98236 | 0,00203 |
| | T=65 | a=1,87511, K=0,45712 | 0,99109 | 0,00126 |
| | T=75 | a=1,85711, K=0,72516 | 0,99555 | 0,00075 |
| Approximation of diffusion | T=50 | a=1,34029, K=0,10659, b=-0,1041 | 0,99712 | 0,00036 |
| | T=65 | a=261,69236, K=0,10365, b=0,99503 | 0,99942 | 0,0001 |
| | T=75 | a=168,35622, K=0,22599, b=0,99503 | 0,99856 | 0,0003 |
| Verma et al | T=50 | a=1,34114, K=0,10654, g=-0,01099 | 0,99712 | 0,00036 |
| | T=65 | a=261,72002, K=0,10365, g=0,10314 | 0,99942 | 0,0001 |
| | T=75 | a=168,35573, K=0,22599, g=0,22487 | 0,99856 | 0,0003 |
| Two-term | T=50 | a=0,52282, K ₀ =0,20055, b=0,52282, K ₁ =0,20055 | 0,96781 | 0,00452 |
| | T=65 | a=0,52572, K ₀ =0,33032, b=0,52572, K ₁ =0,33032 | 0,97421 | 0,00511 |
| | T=75 | a=0,5157, K ₀ =0,52477, b=0,51571, K ₁ =0,52478 | 0,98356 | 0,00461 |
| Midilli et al | T=50 | a=0,99355, K=0,13237, n=0,94233, b=-0,02289 | 0,9974 | 0,00037 |
| | T=65 | a=0,99832, K=0,20853, n=1,11438, b=-0,0188 | 0,9995 | 0,0001 |
| | T=75 | a=0,99803, K=0,3862, n=1,18398, b=-0,0106 | 0,99907 | 0,00026 |

Tableau 4.1: Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes température d'air et à la vitesse 1.5 m/s

La régression linéaire au sens des moindres carrés a été employée pour évaluer les paramètres des différents modèles théoriques tableau (4.1) en utilisant le programme origine. La qualité de l'ajustement a été déterminée en utilisant les paramètres statistiques R² et χ²

(paramètres décrits dans 2.7.4 chapitre2). Le meilleur modèle est celui ayant un coefficient de corrélation maximum qui tend vers 1 et une erreur standard minimum qui tend vers 0.

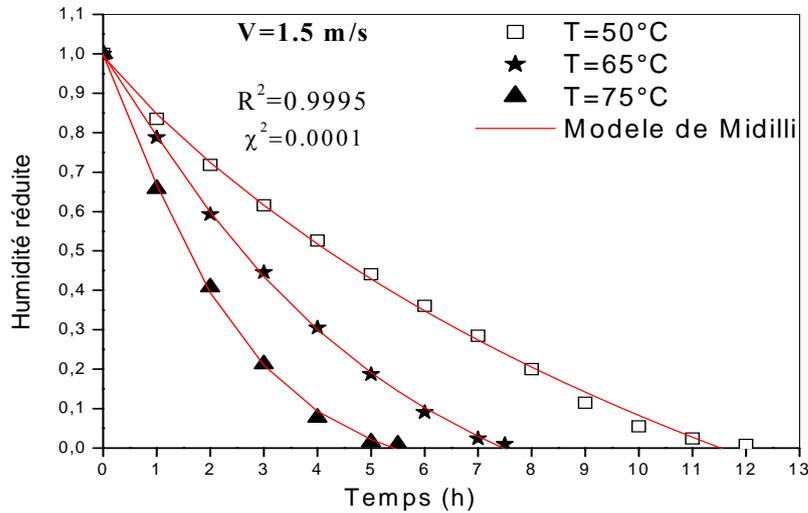


Fig. 4.11 Humidité absolue réduite expérimentale et simulée par le modèle de Midilli.

L'humidité absolue réduite expérimentale ($X_r = X/X_i$) est représentée en fonction du temps dans la figure (4.11) ci-dessus pour les différentes températures et puis adaptée au dix modèles mathématiques de séchage. Il est clair d'après le tableau (4.1) que le meilleur modèle ayant un R^2 maximum et un χ^2 minimum correspond bel et bien au modèle de Midilli. Par conséquent ce modèle est bien approprié pour représenter le comportement de l'humidité absolue réduite pour ce type de tranche de tomate dans ces conditions.

4.3.3. Influence de l'épaisseur des tranches de tomate sur la cinétique de séchage et sur l'humidité absolue réduite (X_r)

La figure ci-dessous figure (4.12) met en évidence l'influence des différentes épaisseurs de tranche de tomate sur les cinétiques de séchage. On constate la même allure des courbes, présence de la troisième phase seulement, pour les différentes épaisseurs; néanmoins, il y a un écart important en cinétique de séchage lorsque l'épaisseur des tranches de tomate prend les valeurs de 1 et 2cm et cela est du probablement au parcours plus long et aux résistances internes au transfert de la matière plus importantes pour les épaisseurs de 2cm par rapport aux épaisseurs de 1cm.

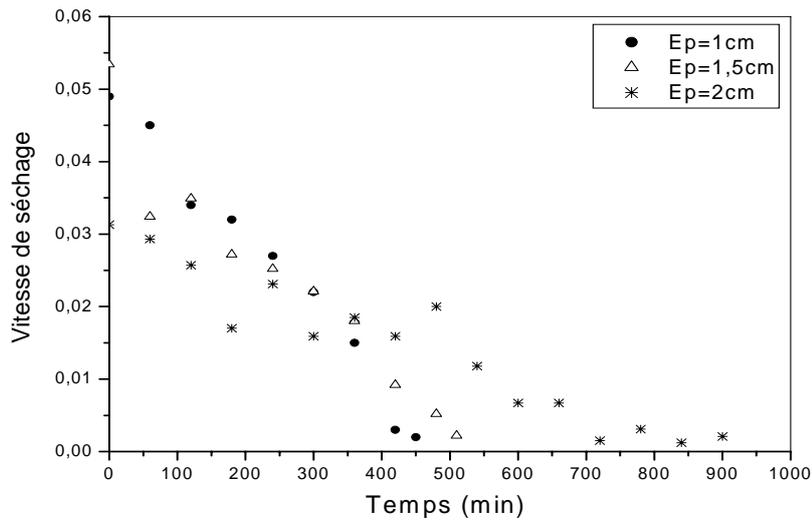


Fig4.12 vitesse de séchage des différentes épaisseurs de tranches de tomate en fonction du temps.

L'humidité réduite (X_r) obtenue expérimentalement à température et vitesse de l'air asséchant respectivement de 65°C et 1.5ms^{-1} pour les différentes épaisseurs de tranche de tomate (1, 1.5 et 2cm) figure (4.13) révèle que le temps de séchage diminue avec la diminution de l'épaisseur des tranches de tomate. L'humidité d'équilibre des tranches de tomate est atteinte après 7.5h, 9h et 15h pour les épaisseurs respectives de 1, 1.5 et 2cm. En comparant le temps de séchage par rapport à l'épaisseur de 1 cm, on remarque une augmentation de temps de séchage de 20% et 100%, respectivement pour les épaisseurs de 1.5 et 2 cm. Cette augmentation du temps de séchage avec l'augmentation de l'épaisseur de tranche était due d'une part à la distance importante que doit parcourir l'humidité pour atteindre la surface du produit et d'autre part à la résistance à la migration de l'humidité de l'intérieur du produit vers sa surface qui est relativement plus importante pour les tranches épaisses ce qui implique une diminution de la vitesse de séchage et par conséquent une augmentation du temps de séchage. Des résultats semblables ont été trouvés par (El-Beltagy et al.2007 [58], M. H. Nguyen and W. E. Price [56], K. Sacilik and A. K. Elicin [49]).

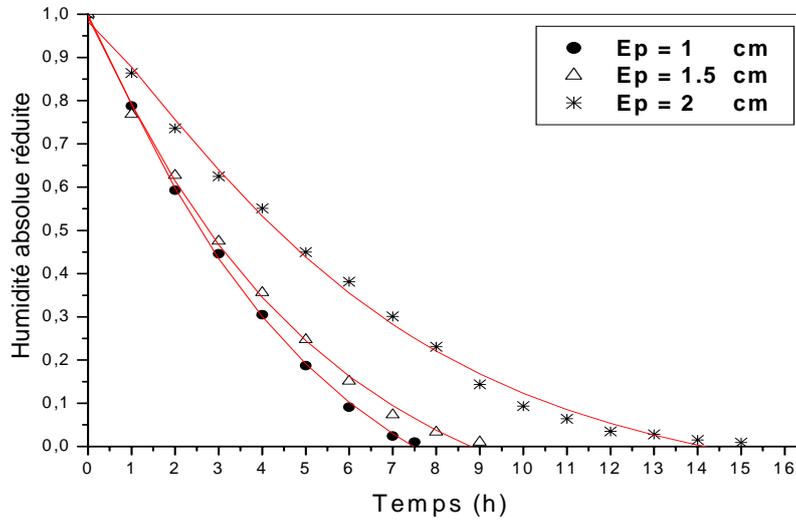


Fig.4.13 Humidité absolue réduite (X_r) expérimentale et calculée (modèle de Midilli -trait plein-) en fonction du temps de séchage pour les différentes épaisseurs des tranches de tomate.

4.3.4 Modèle théorique approprié pour les épaisseurs de 1, 1.5 et 2cm

L'inventaire des différents modèles mathématiques, traduisant le processus de séchage des tranches de tomate avec le calcul de leurs paramètres statistiques est illustré ci-dessous tableau (4.2). La qualité des différents modèles représentant convenablement les courbes expérimentales est déterminée à l'aide des paramètres statistiques R^2 et χ^2 .

On voit bien que le modèle de Midilli (trait plein) figure (4.13) épouse bel et bien l'allure expérimentale de l'humidité réduite (X_r) de ces tranches de tomate, par rapport aux autres modèles.

| Nom du model | Epaisseur (cm) | Constant du model | R ² | χ ² |
|----------------------------|----------------|--|----------------|----------------|
| Lewis | Ep=1 | K=0,31533 | 0,97041 | 0,00366 |
| | Ep=1,5 | K=0,28464 | 0,97858 | 0,00244 |
| | Ep=2 | K=0,1843 | 0,97265 | 0,00292 |
| Henderson and Pabis | Ep=1 | a=1,05147, k=0,33032 | 0,97421 | 0,00365 |
| | Ep=1,5 | a=1,03608, K=0,2944 | 0,98047 | 0,00251 |
| | Ep=2 | a=1,05898, K=0,19451 | 0,97689 | 0,00264 |
| Page | Ep=1 | K=0,19489, n=1,36423 | 0,99356 | 0,00091 |
| | Ep=1,5 | K=0,19535, n=1,26427 | 0,9923 | 0,00099 |
| | Ep=2 | K=0,102, n=1,31613 | 0,99243 | 0,00087 |
| Modified page | Ep=1 | K=0,30155, n=1,36595 | 0,99356 | 0,00091 |
| | Ep=1,5 | K=0,27484, n=1,26469 | 0,9923 | 0,00099 |
| | Ep=2 | K=0,17649, n=1,3172 | 0,99243 | 0,00087 |
| Logarithmic | Ep=1 | a=1,36741, K=0,17951, c=-0,36155 | 0,99931 | 0,00011 |
| | Ep=1,5 | a=1,24212, K=0,18527, c=-0,24528 | 0,99826 | 0,00025 |
| | Ep=2 | a=1,22226, K=0,12748, c=-0,2098 | 0,99543 | 0,00056 |
| Two-term-expontial | Ep=1 | a=1,87511, K=0,45712 | 0,99109 | 0,00126 |
| | Ep=1,5 | a=1,77341, K=0,39167 | 0,99137 | 0,00111 |
| | Ep=2 | a=1,82658, K=0,26 | 0,99061 | 0,00107 |
| Approximation of diffusion | Ep=1 | a=261,69236, K=0,10365, b=0,99503 | 0,99942 | 0,0001 |
| | Ep=1,5 | a=199,25084, K=0,11475, b=0,99503 | 0,99842 | 0,00023 |
| | Ep=2 | a=192,40202, K=0,07578, b=0,99503 | 0,99593 | 0,0005 |
| Verma et al | Ep=1 | a=261,72002, K=0,10365, g=0,10314 | 0,99942 | 0,0001 |
| | Ep=1,5 | a=199,2953, K=0,11475, g=0,11418 | 0,99842 | 0,00023 |
| | Ep=2 | a=192,25809, K=0,07578, g=0,07554 | 0,99593 | 0,0005 |
| Two-term | Ep=1 | a=0,52572, K ₀ =0,33032, b=0,52572, | 0,97421 | 0,00511 |
| | Ep=1,5 | K ₁ =0,33032 | 0,98047 | 0,00334 |
| | Ep=2 | a=0,82025, K ₀ =0,2943, b=0,21583, K ₁ =0,29471 a=0,86459, K ₀ =0,1945, b=0,19435, K ₁ =0,19444 | 0,97689 | 0,00308 |
| Midilli et al | Ep=1 | a=0,99832, K=0,20853, n=1,11438, b=-0,0188 | 0,9995 | 0,0001 |
| | Ep=1,5 | a=0,99314, K=0,20931, n=1,05663, b=-0,01414 | 0,99809 | 0,00033 |
| | Ep=2 | a=0,9834, K=0,10806, n=1,20714, b=-0,00492 | 0,9964 | 0,00048 |

Tableau4.2 Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes épaisseurs du produit.

4.4 EFFET DU PRE-TRAITEMENT SUR LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE DES TRANCHES DE TOMATES.

Le prétraitement a pour but d'améliorer la conservation, le goût ou l'apparence du produit. Il permet en particulier d'adapter les produits à la demande. Il se pratique de différentes manières (le blanchiment, la sulfuration, le sucrage, le salage, le fumage, etc.). La déshydratation osmotique, ou perte de l'eau par les membranes des cellules d'un produit immergé dans un soluté, procédé pouvant être utilisé pour réduire la teneur en eau initiale du produit et par conséquent d'avoir besoin de moins de temps de séchage. La déshydratation osmotique empêche également l'activité enzymatique, maintient la couleur initial et les arômes du produit pendant le séchage [59, 60].

Dans un processus osmotique de déshydratation plus la perte d'eau est importante plus le processus de déshydratation est meilleur. Les meilleures conditions de prétraitements sont employées avec une solution osmotique composée de 35% sucre et 5% sel (J.S. Souza.[60]).

4.4.1 Etape de préparation des tranches de tomates à sécher.

*Lavage

*Découpage de 1cm d'épaisseur

*Trempe dans une solution ternaire de 35 % sucre + 5 % sel de catégorie comestible avec l'eau distillée à la température ambiante pendant une période de 3 h.

* L'expérience a été également entreprise avec l'addition de 2 % de lactate de calcium.

Le calcium préserve la structure des parois des cellules du produit et joue également un rôle de normalisation dans divers processus qui affectent la fonction de cellules [59].

4.4.2 Cinétique de séchage des tranches de tomate traitées

Dans les conditions de température et de vitesse de l'air asséchant respectivement de 65 °C et 1.5m/s. Le processus de séchage dure 450 min pour les tomates non traitées et seulement 300min pour les tomates traitées figure (4.14). Le prétraitement peut diminuer le temps de séchage à environ 33,33%. Le traitement augmente la perméabilité des murs des cellules, de ce fait favorise une migration plus rapide de l'eau à la surface du produit et réduit le temps de séchage. Ceci est conforme aux résultats expérimentaux de certains auteurs (I. Doymaz 2004) [61], (P. P. Lewicki et al 2002) [62], (Ibrahim Doymaz 2004b) [54].

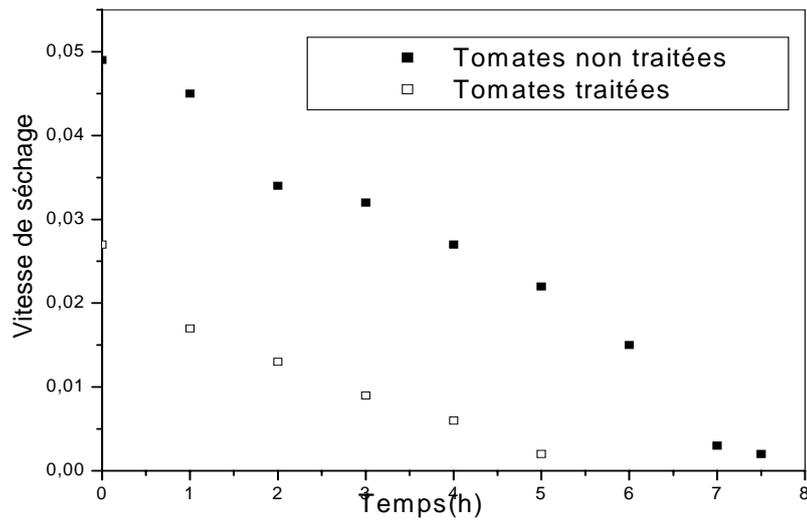


Fig.4.14. Variation de la vitesse de séchage avec le temps de séchage pour les tranches de tomate traitées et non traitées.

4.5 COMPARAISON DES RESULTATS DU MODELE NUMERIQUE ET DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

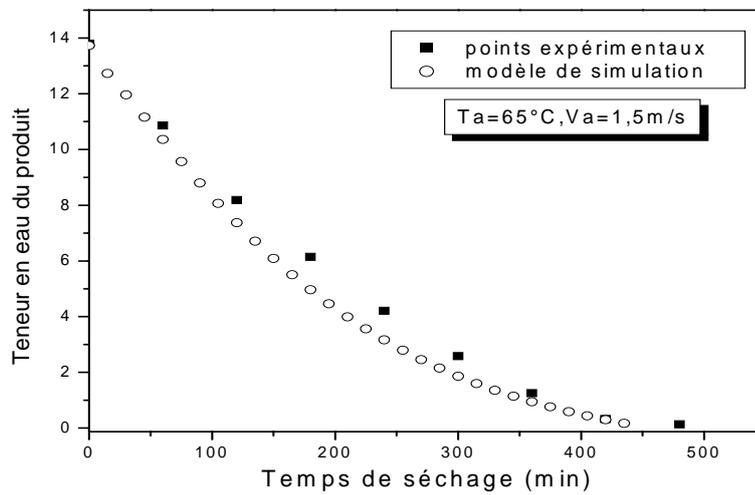


Fig.4.15 Teneur en eau simulée et expérimentale de la tomate

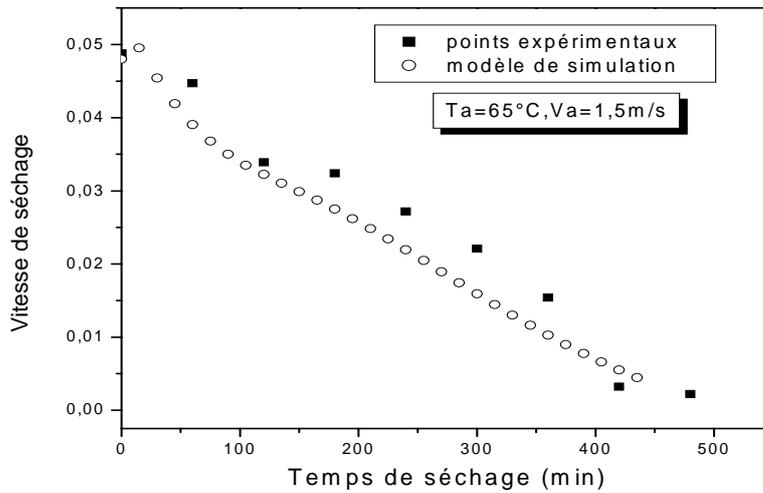


Fig.4.16 Vitesse de séchage simulée et expérimentale de la tomate

Les figures 4.15 et 4.16 ci-dessus montrent une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Il apparaît cependant un léger écart entre les résultats, probablement due à l'inertie du système, mais aussi aux conditions initiales imposées et à l'approche expérimentale utilisée; de même plusieurs facteurs peuvent causer cet écart entre autre : - les coefficients d'échanges convectifs de chaleur entre le produit et l'air asséchant sont fixes pour une vitesse de l'air donnée, mais devrait varier selon l'évolution de la température. – hypothèses simplificatrices (phénomène de conduction et de rayonnement négligés).

4.6 COEFFICIENT DE DIFFUSION DE L'HUMIDITE DE LA TOMATE.

4.6.1 Calcul du coefficient effectif de diffusion

Le coefficient de diffusion effectif de l'humidité de la tomate est déterminé expérimentalement à partir de la courbe donnant le logarithme de X_r en fonction de (t/L^2)

voir figure ci-dessous, tel que la pente est égale à $k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$ équation (3.9)

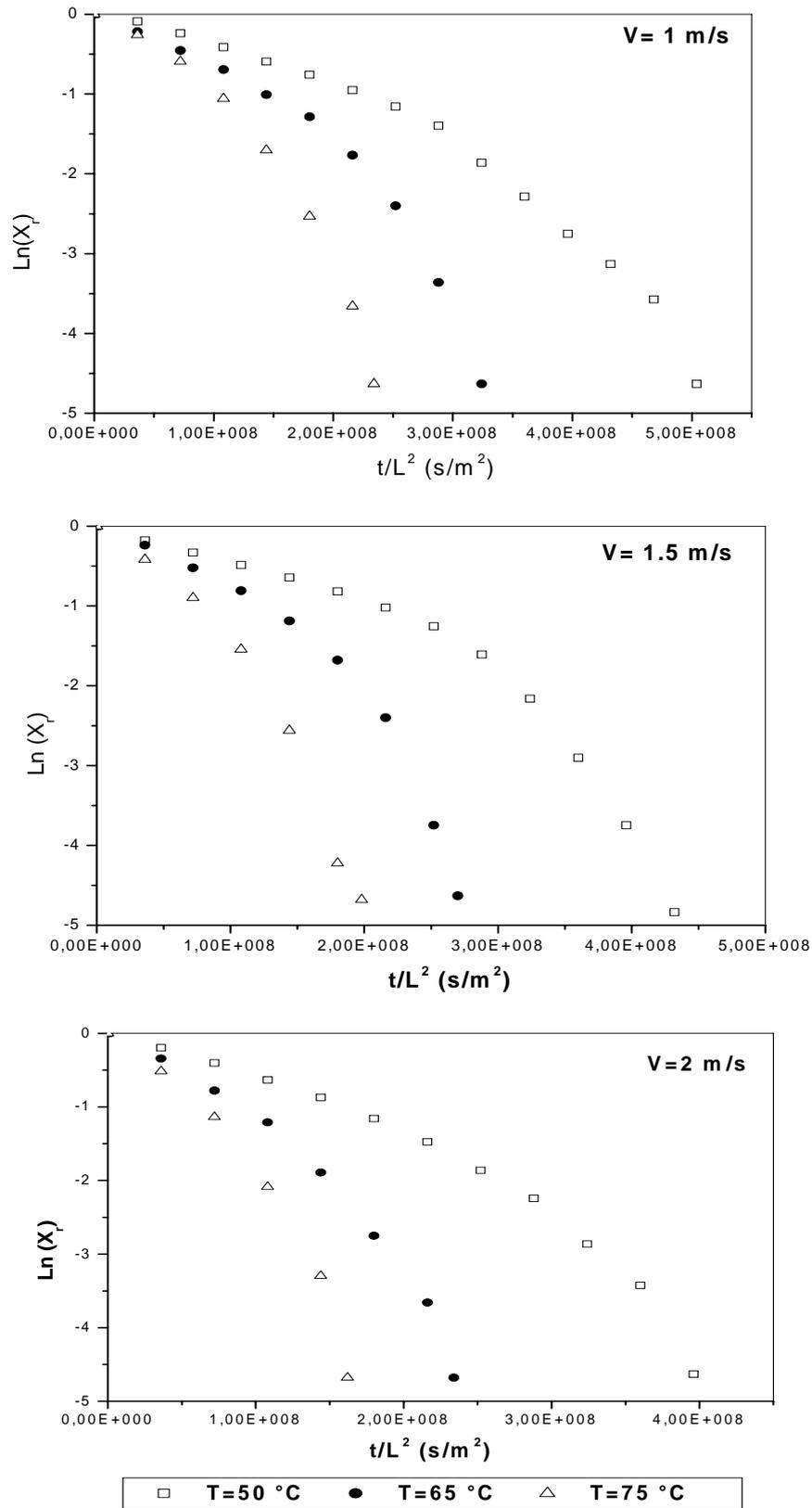


Fig. 4.17 Variation du logarithme du ratio d'humidité en fonction de t/L^2 de la tomate

On remarque que toutes les courbes ci-dessus représentent une non linéarité et cela est du probablement à nos précédentes hypothèses simplificatrices (chapitre3 paragraphe3.2.1.2 modèle de Whitaker), (distribution initiale d'humidité uniforme, coefficient de diffusion et température constante, rétrécissement du produit négligeable.).

Il est à noter que malgré que la température de l'air asséchant est constante, l'équilibre thermique entre le produit et l'air asséchant peut ne pas être atteint [90], de même le phénomène de rétrécissement de l'épaisseur (L) des tranches de tomate est très visible lors des expériences par rapport au rétrécissement radial, chose qu'on ne peut négliger.

L'augmentation de la température du produit augmente le coefficient de diffusion, alors que le phénomène de dureté et du rétrécissement le diminue [56]. Il y a donc un compromis entre ces deux grandeurs. La nature des courbes des figures (4.17) dépend des grandeurs de ces deux effets opposés. Si l'effet de rétrécissement est pris en compte en remplaçant l'épaisseur L par une autre épaisseur L', les courbes ci-dessus peuvent être remplacées par des droites (Hawladar et al. 1991) [47], de même la température de l'échantillon ainsi que le phénomène de rétrécissement sont corollés avec l'humidité de l'échantillon. En supposant que le diamètre de l'échantillon reste constant, l'épaisseur réduite de l'échantillon L'est donnée par l'équation suivante de (Uddin et al. 1990) [91]:

$$\frac{L'}{L} = \left(\frac{m_t}{m_0} \right)^n \quad (4.1)$$

Où m_t = masse de l'échantillon à l'instant t(g), m_0 = masse de l'échantillon initiale (g)

L = épaisseur initiale de l'échantillon (mm), Le nombre n est un facteur qu'on doit optimiser pour obtenir une ligne droite pour les données expérimentales de $\ln(X_r)$ en fonction de t/L^2 . Après plusieurs essais sur les graphes on est arrivé à la valeur optimum $n=0.14$ qui nous donne une allure droite voir figure (4.18).

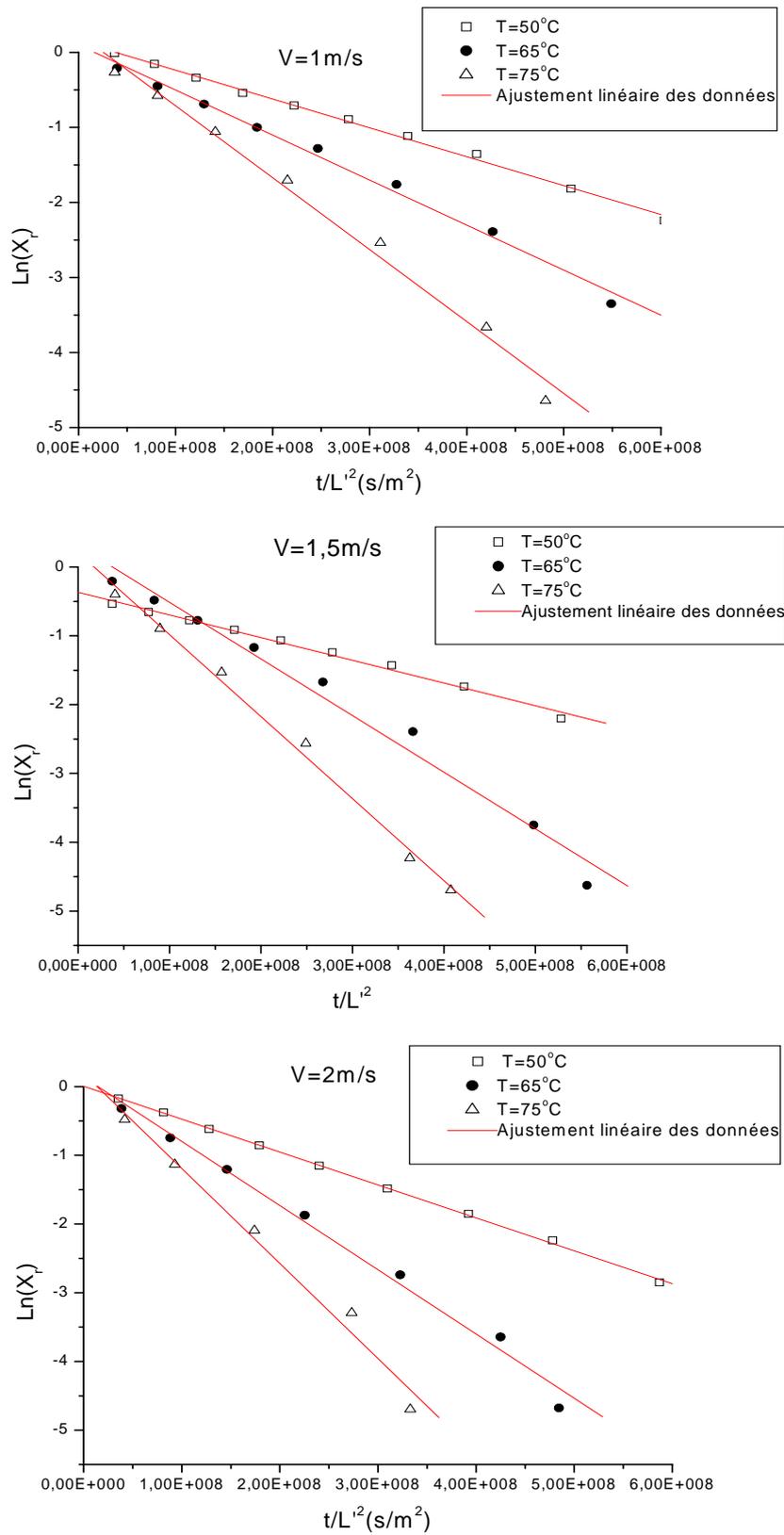


Fig. 4.18 Logarithme du ratio d'humidité en fonction de t/L^2 (rétrécissement pris en compte)

L'index $n=0,14$ représente probablement l'effet combiné entre la température du produit et son rétrécissement (Hawladar et al. 1991) [47]. L'index $n = 0 \Rightarrow L' = L \Rightarrow$ pas de rétrécissement

Et $n = 1 \Rightarrow \frac{L'}{L} = \left(\frac{m_t}{m_0} \right) \Rightarrow$ le volume rétrécie = volume d'eau perdu. On est entre les deux

limites extrêmes.

Les valeurs des coefficients de diffusion effectifs, calculés à partir des courbes ci-dessus pour les différentes températures et vitesses, sont représentées dans le tableau (4.3)

| T°(°C) | 50 | | | 65 | | | 75 | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V(ms ⁻¹) | 1 | 1,5 | 2 | 1 | 1,5 | 2 | 1 | 1,5 | 2 |
| D _{eff} 10 ⁺⁹ (ms ⁻²) | 1,708 | 2,049 | 2,146 | 2,743 | 3,243 | 3,755 | 3,788 | 4,701 | 5,445 |

Tableau (4.3) : Coefficients de diffusion effectif de la tomate pour différentes température et vitesse de l'air asséchant.

On remarque à partir du tableau ci-dessus que la valeur du coefficient de diffusion effectif augmente en fonction de l'augmentation des valeurs de températures et de vitesses. Dans notre cas le coefficient de diffusion varie de $1.708 \cdot 10^{-9}$ à $5.445 \cdot 10^{-9}$. Ces valeurs trouvées se trouvent bel et bien dans la plage de 10^{-12} - 10^{-8} (ms⁻²), relative aux produits agro-alimentaires (Zogzas et al. 1994, 1996) [92, 93], (Babalıs and Belessiotis, 2004) [94].

4.6.2 Calcul de l'énergie d'activation

L'énergie d'activation c'est l'énergie qu'il faut pour déclencher le phénomène de diffusion massique dans les produits agricoles (Mittal, 1999) [95]. Le coefficient de diffusion effectif (D_{eff}) est corollé à la température de séchage à partir de l'équation d'Arrhenius suivante:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.2)$$

Où D₀ = paramètre de diffusion d'Arrhenius (m²s⁻²), E_a = énergie d'activation (kJ/mole)
R = constante des gaz parfaits (8.314 J/mole. K), T = température absolue de l'air asséchant (K). L'énergie d'activation est calculée à partir de la pente du graphe Ln D_{eff} en fonction de 1/T. Le graphe représente une ligne droite figure (4.19). Les valeurs calculées de l'énergie d'activation sont reportées dans le tableau (4.4).

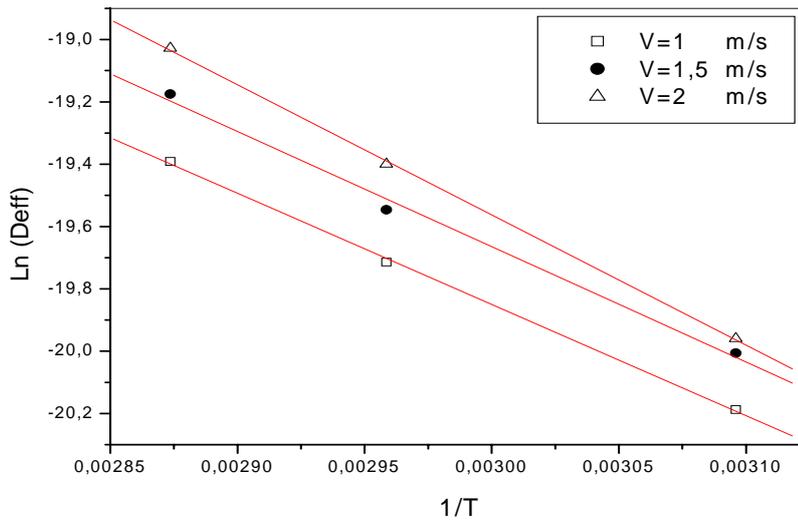


Fig. 4.19 Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion effectif.

| Produit | E_a (KJ/mol) | Références |
|----------------|----------------|------------------------------|
| Carotte | 28,36 | I.Doymaz (2004), [51] |
| Datte rouge | 35,17 | Falade and .Abbo (2007),[57] |
| Piment rouge | 41,95 | Gupta et al. (2002) [96] |
| Haricot verts | 35,43 | I.Doymaz (2005), [97] |
| Pomme de terre | 20 | J. Bon and al. (1997), [98] |
| Tomate | 32,94 | I.Doymaz (2007), [14] |
| Tomate | 29,672 | Travail actuel |
| | 30,741 | |
| | 34,713 | |

Tableau 4.4 Énergie d'activation pour le séchage de divers produits

4.6.3. Influence de l'épaisseur des tranches de tomate sur le coefficient effectif de diffusion

En utilisant l'équation (3.9) du chapitre (3) paragraphe (3.2.2), ainsi que le graphe de la figure (4.20) on calcule les coefficients de diffusivité effectif pour les différentes épaisseurs de tranche de tomate. Les coefficients de diffusion effectifs calculés pour les épaisseurs de 1, 1.5 et 2 cm sont égaux respectivement à $3,243.10^{-9}$, $6,04.10^{-9}$ et $6,737.10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$. On remarque que les coefficients de diffusion effectifs pour les épaisseurs de 1.5 et 2cm représentent respectivement presque le double et plus du double par rapport au coefficient de diffusion effectif pour une épaisseur de 1cm. Ce résultat est expliqué par le fait que l'effet de bord (diffusion latérale) est pris en considération dans les tranches de tomate moins minces (1.5 et 2cm); ce qui fait que le coefficient de diffusion effectif se trouve amplement amplifié.

Le modèle de diffusion choisi a supposé que la diffusion a eu lieu seulement dans une seule direction de l'intérieur vers la surface des tranches. Cette hypothèse est valide pour les tranches minces, dans lesquelles l'effet de bord est négligeable. Dans les tranches épaisses, la diffusion latérale est prise en compte. Ces résultats sont conformes aux résultats trouvés dans la littérature. (Ibrahim Doymaz, 2004a) [50], (M. H. Nguyen and W. E. Price 2007) [56],

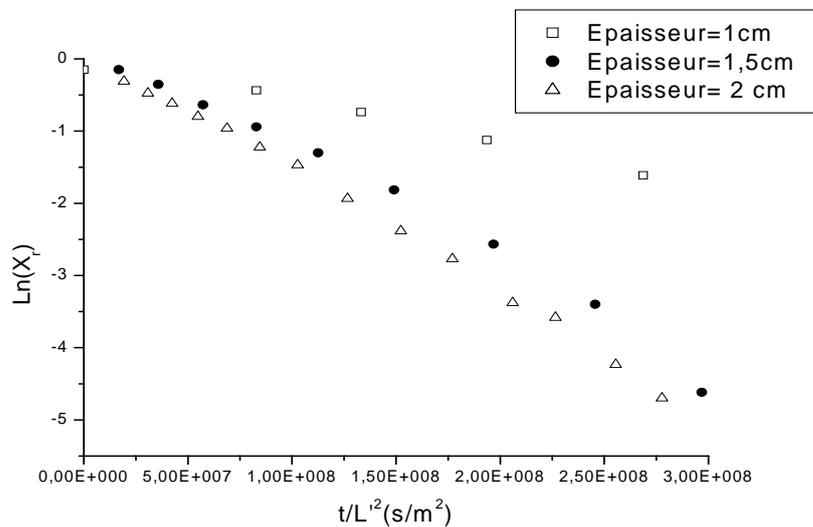


Fig.4.20. Logarithme népérien de l'humidité réduite ($\ln X_r$) en fonction de t/L^2 pour les différentes épaisseurs de la tomate

4.6.4. Influence du prétraitement des tranches de tomate sur le coefficient effectif de diffusion.

A partir du graphe de la courbe (4.21) on détermine les pentes des droites, d'où les coefficients de diffusion effectifs qui sont pour les tranches de tomate non traitées de $3,243 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ et celles des tomates traitées de $3,985 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. On remarque d'après les valeurs des coefficients de diffusion effectifs calculées que le transfert de masse se fait mieux avec les tranches de tomate traitées par rapport à celles non traitées.

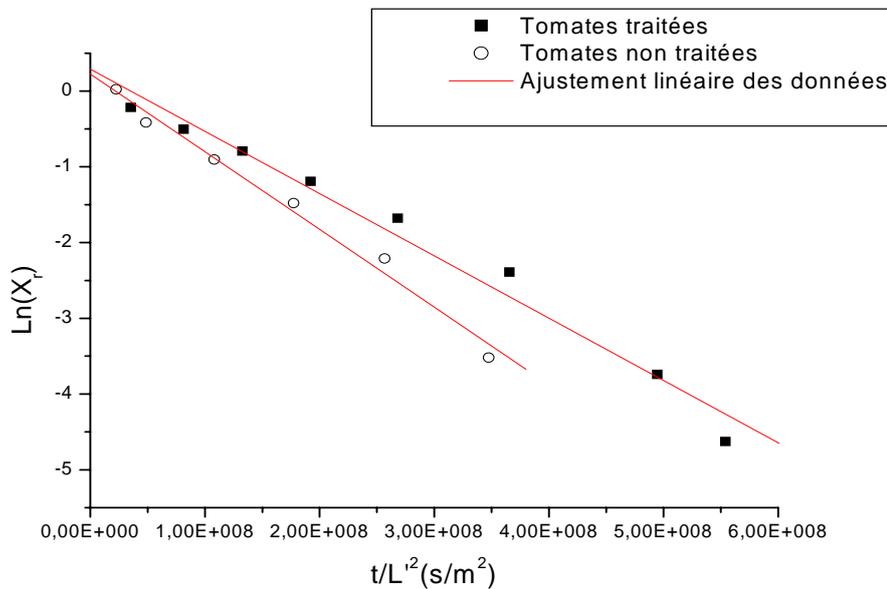


Fig. (4.21) Logarithme népérien de l'humidité réduite ($\text{Ln } X_r$) en fonction de t/L^2 pour les tranches de tomate traitées et non traitées

4.7 COMPORTEMENT THERMIQUE DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN A VIDE

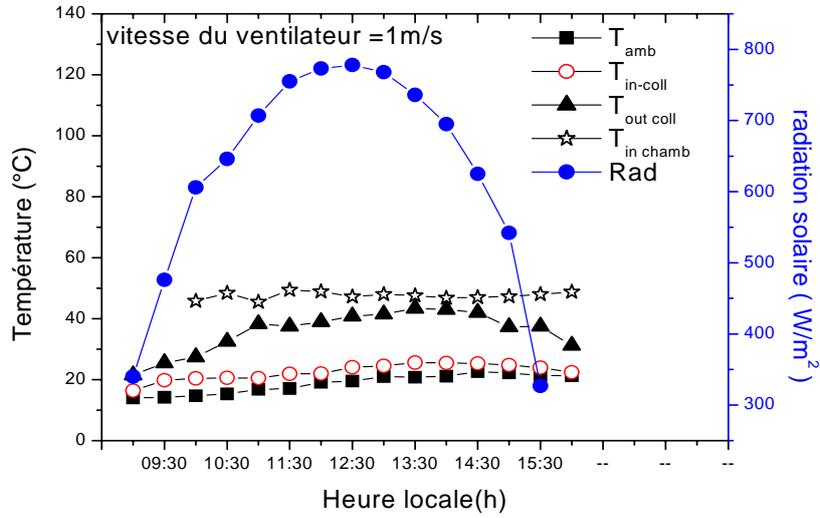


Fig.4.22 Radiation solaire et variation de la température pour les différents éléments du séchoir le 11/11/2007

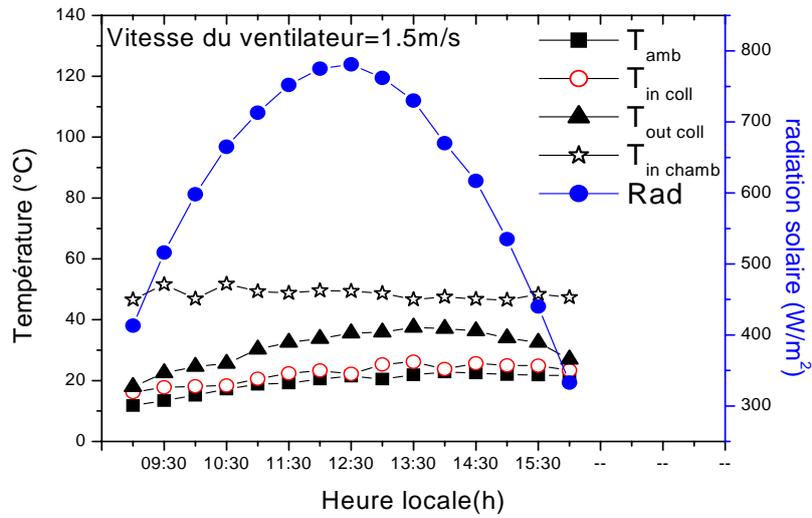


Fig.4.23 Radiation solaire et variation de la température pour les différents éléments du séchoir le 12/11/2007

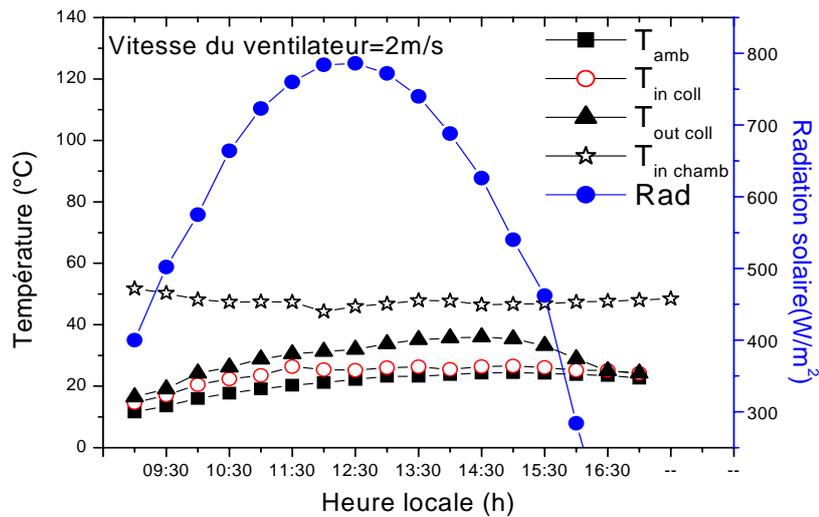


Fig.4.24 Radiation solaire et variation de la température pour les différents éléments du séchoir le 13/11/2007

Le comportement thermique du séchoir à vide est suivi pendant trois jours consécutif 11, 12 et 13 Novembre 2007 en période d'hiver période la plus défavorable pour le séchage. La connaissance du gradient de température entre l'entrée du capteur et sa sortie est une donnée très importante qui nous permet de déduire par la suite la température de sortie du capteur qui n'est entre autre que la température d'entrée de la chambre de séchage, paramètre le plus important pour les opérations de séchage. On voit bien d'après les figures (4.22, 4.23 et 4.24) que la température à la sortie du collecteur varie dans le même sens que le rayonnement solaire incident sur le capteur, et croît lorsque la vitesse de l'air caloporteur décroît. L'élévation de la température en hiver de l'air caloporteur traversant le capteur plan est insuffisante pour le séchage de la tomate. Par conséquent on a ajouté une résistance électrique avec un thermostat pour parer à ce manque énergétique. La deuxième source auxiliaire électrique intervient automatiquement dès que la température de sortie du collecteur est inférieure à la température de consigne. Il est à noter que dans ces conditions de l'expérience les résistances électriques de chauffe se sont arrêtées de fonctionner (le solaire seul peut ramener la température de sortie du collecteur à la valeur de consigne 50°C) seulement pour la vitesse du ventilateur $v=1\text{m/s}$ entre 13h30 et 14h30 figure (4.22) et fonctionne tout le long de l'expérience. L'expérience réalisée en hiver montre que le gradient moyen de température entre l'entrée du capteur et sa sortie pendant les heures de pic (13h30 - 14h30) est égale à 13°C (variation entre 8.35°C et 18.9°C) avec une vitesse moyenne à la sortie de la chambre de

séchage de 1.5m/s. Pour voir l'effet des différentes saisons sur la cinétique de séchage il est recommandé de répéter l'expérience pour les autres saisons de l'année.

4.8 EFFICACITE ENERGETIQUE

4.8.1 Efficacité énergétique du capteur solaire

L'étude de l'efficacité d'un capteur solaire nous permet d'évaluer la façon dans laquelle est alimentée en énergie la chambre de séchage sous certaines conditions.

Le rendement ou l'efficacité énergétique du capteur est défini comme étant le rapport de l'énergie sortant du capteur sur l'énergie entrant. [63, 64,65].

$$\eta_c = \frac{mc_p(T_{SC} - T_{EC})}{GA} \quad (4.3)$$

Avec

η_c : Rendement du collecteur

m : Flux massique de l'air à l'instant t (kg s^{-1})

C_p : Chaleur spécifique de l'air en (1007J/ kg. K)

T_{SC} : Température de sortie du collecteur ($^{\circ}\text{K}$)

T_{EC} : Température d'entrée du collecteur ($^{\circ}\text{K}$)

GA: est le rayonnement solaire global capté par la surface (A) du capteur en (KJ)

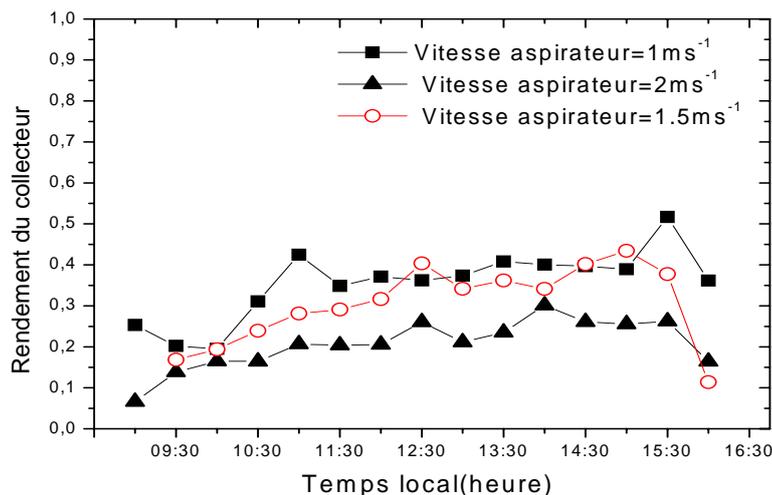


Fig. 4.25 Efficacité journalière du collecteur en fonction du temps local.

4.8.2 Efficacité énergétique du séchoir hybride

L'efficacité énergétique ou rendement d'un séchoir, représente le rapport énergétique entre l'énergie de vaporisation d'une masse m_e d'eau du produit à sécher sur l'énergie alimentant le séchoir [solaire+énergie auxiliaire (dans le cas d'un système hybride)].

Elle est défini comme suit: [34].

$$\eta_s = \frac{m_e L_V}{GA t + E_{RE} + E_V} \quad (4.4)$$

Avec: η_s : Rendement du séchoir

m_e : Masse d'eau évaporée du produit à l'instant t.

L_V : Chaleur latente de vaporisation de l'humidité (kJ/kg)

GA t: Energie solaire entrant au capteur (kJ) pendant le temps t.

E_{RE} : Energie des résistances électriques

E_V : Energie du ventilateur (kJ)

A : Surface du capteur (m^2)

Dans le cas ou on a un séchage à convection naturelle les expressions de E_{RE} et E_{CE} s'annulent.

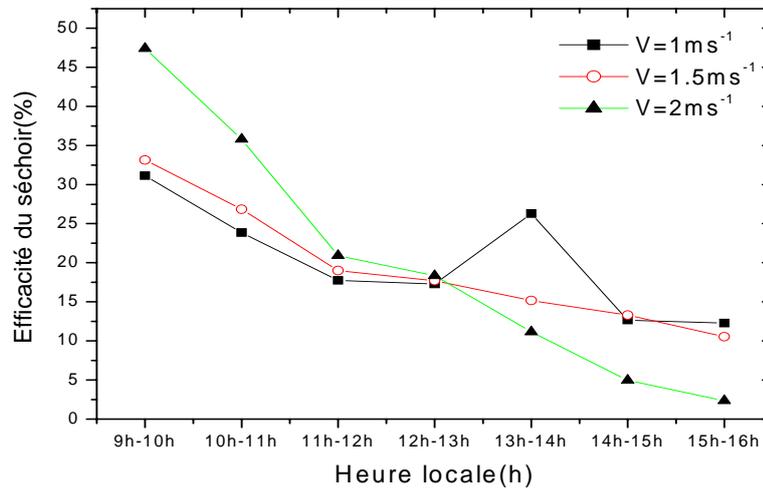


Fig.4.26 Efficacité journalière du séchoir en fonction du temps local.

D'après la figure (4.25) l'efficacité journalière du capteur plan varie de 0.194 à 0.516 pour un débit de $0.0405 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ ($v=1\text{ms}^{-1}$), 0.113 à 0.434 pour $0.0606\text{kg/m}^2 \text{ s}$ ($v=1.5\text{ms}^{-1}$) et 0.06 à

0.301 pour $0.0810\text{kg/m}^2\text{s}$ ($v=2\text{ms}^{-1}$) on peut donc conclure que l'efficacité énergétique du capteur pour le débit de $0.0405\text{kg/m}^2\text{s}$ est le meilleur par rapport aux autres flux. D'une façon générale on sait que l'efficacité d'un capteur augmente en fonction de l'augmentation du flux jusqu'à une valeur limite du flux de $0.056\text{kg/m}^2\text{s}$ où l'efficacité tend à la saturation après cette valeur limite du flux. (Karim and Hawlader, 2004)[66]. Suite à la relation linéaire reliant la vitesse au flux, Leon and Kumar(2007)[67] ont noté que l'efficacité d'un collecteur augmente rapidement pour les petites vitesses (entre 0.009 et 0.014ms^{-1}), mais légèrement pour les vitesses au-dessus de 0.014ms^{-1} et presque constante pour les vitesses au dessus de 0.03ms^{-1} . Kutscher et al. (1993) [68], ont aussi noté que l'efficacité est presque constante pour les vitesses dans le voisinage supérieur de 0.05ms^{-1} . D'après nos connaissances, il n' y a pas ou peu de travaux qui traitent les courbes d'efficacités dans le domaine des grands débits; à coté des travaux de (Belghit et al. 1997) [69].qui ont étudié l'efficacité du collecteur en fonction du débit massique pour différentes surfaces déclarent qu'au-dessus de 0.04kg/s l'efficacité du collecteur diminue lorsque le débit augmente. Nos résultats sont généralement conformes aux études précédentes.

Du moment où les paramètres climatiques de l'air ambiant et du rayonnement solaire ne sont pas constants au cours de l'année, l'efficacité énergétique du séchoir n'est pas uniforme. En été où l'insolation est maximale on n'aura probablement pas besoin des sources auxiliaires. L'efficacité du système dépend aussi du type de séchoir, produit à sécher et humidité finale d'équilibre. Dans la figure (4.26) on remarque une nette décroissance de l'efficacité énergétique en fonction du temps de séchage. L'efficacité totale du système de séchage se situe généralement entre 20-30% pour le séchage à convection forcée (Purohit et al. 2006) [70]. L'efficacité moyenne du système varie entre 13% et 31% pour $v=1\text{ms}^{-1}$, 12.5% et 33% pour $v=1.5\text{ms}^{-1}$ et 2.5% et 47.5% pour $v=2\text{ms}^{-1}$. Le pic pour $v=1\text{ms}^{-1}$ est dû à la température de sortie du capteur qui a atteint la température de consigne 50°C . D'après la figure (4.26) il apparaît clairement que l'efficacité du système pour $v=1\text{ms}^{-1}$ est meilleure par rapport aux autres vitesses et notamment dans la première demi journée. L'efficacité du système est très élevée dans les premières heures de séchage; cela est du probablement à la présence de l'humidité près ou à la surface du produit, ensuite elle décroît d'une façon continue jusqu'à la fin du séchage parce que l'humidité du produit elle aussi diminue. Donc il faut plus d'énergie pour extraire la même quantité d'humidité du produit. Il y a donc un compromis entre l'efficacité du capteur et celle du séchoir pour les différentes vitesses. Comme a été confirmé

par les travaux expérimentaux de Togrul and Pehlivan (2003) [78], Azzouz et al. (2002) [79], Sanjuan et al (2002) [80], Bennamoun and Belhamri(2006)[81]. Le paramètre vitesse est moins influençable pour le séchage que le paramètre température, en plus l'influence de la vitesse décroît au fur et à mesure que le séchage avance dans le temps. L'augmentation de la température de l'air asséchant donne à ce dernier un pouvoir évaporateur plus important; ce qui engendre un temps de séchage très écourtée. Cela nous amène à choisir une température admissible élevée et un débit plus ou moins faible.

4.9 CONTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE ET SOLAIRE DANS LE SECHOIR INDIRECT HYBRIDE

| T=65°C | Chauffage solaire de l'air caloporteur (kWh) | Fraction de l'énergie solaire utilisée (%) | Electrique (resistance+vent ilateur) (kWh) | Fraction de l'énergie électrique utilisée (%) | Total energie (kWh) |
|-----------------------------|--|--|--|---|---------------------|
| Vitesse (ms ⁻¹) | | | | | |
| 1 | 7,56 | 25,07 | 22,59 | 74,92 | 30,15 |
| 1,5 | 6,83 | 20,54 | 26,42 | 79,45 | 33,25 |
| 2 | 4,61 | 13,22 | 30,24 | 86,78 | 34,85 |

Tableau 4.5 : Contribution de l'énergie électrique et solaire dans le séchoir hybride indirect.

Le tableau (4.5) ci-dessus montre le quote-part de l'énergie solaire et celui de l'énergie électrique dans une opération de séchage avec ce type de séchoir hybride. Il apparaît clairement que si le débit de l'air asséchant augmente de 0.0405kg/m²s (v=1ms⁻¹) à 0.0810kg/m²s (2ms⁻¹) le pourcentage de contribution de l'énergie solaire pour chauffer l'air caloporteur décroît de 25.07% à 13.22%, par contre celui de l'énergie électrique augmente de 74.92% à 86.78%. Cette augmentation du pourcentage de contribution de l'énergie électrique est due au fait que pour les débits élevés la température de sortie du collecteur reste basse ce qui fait que les résistances électriques doivent fonctionner pour chauffer l'air caloporteur et

l'amener à la température de consigne. Il est préférable du point de vue économie de l'énergie, d'utiliser dans une opération de séchage des débits de l'air caloporteur faible qui ont une contribution de l'énergie solaire importante.

4.10 ANALYSE ECONOMIQUE DE L'AMORTISSEMENT DU SYSTEME:

La pratique courante aujourd'hui veut qu'on rende compte de l'économie d'un système ou d'un procédé par son temps de retour en combien de temps, l'investissement ou un surinvestissement est-il amorti compte tenu des économies réalisées. Ces critères de temps de retour d'investissement ainsi que celui du coût de possession sont des critères d'appréciations déterminants pour le client en plus des critères de qualité et du temps de séchage. Ce qui nous permettra par ailleurs de discriminer les architectures du séchoir suivant les besoins ou le cahier de charge du client.

Suite aux conditions climatiques du Sahara septentrional est Algérien qui nous permettront d'utiliser notre prototype de séchoir presque toute l'année (250 jours) et suite aux principaux paramètres économiques basés sur la situation économique de l'Algérie; un tableau (4.6) ci-dessous a été établi contenant les différents coûts d'investissements et de bénéfices du séchoir. En utilisant les données du tableau on peut déduire le temps de retour de l'investissement d'après la formule (4.5) ci-dessous (Neufville, 1990) [99]

$$\text{Retour d'investissement} = \frac{\text{Investissement Initial}}{\text{Benefice Net Annuel}} \quad (4.5)$$

Le retour de l'investissement c'est le temps nécessaire pour que la somme des bénéfices nets annuels réalisés soit égale au montant de l'investissement initial.

| | |
|---|---|
| Coût du séchoir | 80000.00 Da |
| Capacité du séchoir | 12 kg |
| Dépréciation | 8000.00 Da (10% du coût du séchoir) |
| Durée de vie du séchoir | 15 ans |
| Coût de maintenance | 2100.00 Da (2.5 à 2.65% du coût du séchoir) |
| Coût de la main d'œuvre 500*250 | 125000.00 Da |
| Coût de la consommation électrique. Da/an | 12219.25 Da |
| Coût de la tomate fraîche 15.00*12*250 | 45000.00 Da |
| Coût Total | 192319.25 Da |
| Revenu Total 85.00*12*250 | 255000.00 Da |
| Revenu net | 62680.75 Da |
| Retour d'investissement 80000.00/62680.75 | 1.27 ans |

Tableau 4.6 Amortissement du séchoir hybride solaire-électrique.

Dans ce type de cas, le temps de retour de l'investissement (1,27an) est très court comparativement à la durée de vie du séchoir estimé approximativement à 15ans; d'où l'intérêt d'utilisation de ce genre de séchoir.

L'approche de la conception du système de séchage solaire doit être optimisée du double point de vue technique et économique. En effet la construction d'un système de séchage solaire n'est intéressante que si, par rapport à une installation conventionnelle, il permet de réaliser des bénéfices.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Si les travaux ont été souvent consacrés à la modélisation, l'originalité de notre approche consiste en un recours systématique à l'expérimentation en concoctant deux prototypes de séchoirs solaires indirects; l'un à convection naturelle et l'autre hybride (solaire- électricité) à convection forcée, qui représentent un acquis important dans ce travail.

Suite à la non maîtrise de l'opération de séchage au niveau du séchoir à convection naturelle (vitesse d'écoulement et température de l'air asséchant dans le séchoir ne sont pas fixes et changent en longueur de journée suivant les conditions atmosphériques.) ce qui engendre un lent et mauvais écoulement dans le séchoir et apparition des zones de chauffe (échantillons se trouvant sur la périphérique de la claie grillés). Ce qui nous a amené à opter pour le séchoir à convection forcée.

Notre principal contribution dans ce travail c'est la réalisation d'un prototype de séchoir solaire hybride indirect de configuration originale, contrairement aux séchoirs ordinaires, l'air caloporteur rentre du haut du caisson de dessiccation et sort forcé par le bas à l'aide d'un aspirateur. Par ailleurs, suite à la nouvelle configuration de passage de l'air caloporteur, l'étude de l'efficacité du capteur solaire et du séchoir a été faite avec des gros débits de 0.04 à 0.08kg/m² s. Généralement, on sait que l'efficacité énergétique d'un collecteur solaire augmente en fonction du flux jusqu'à une valeur limite de saturation de 0.056kg/m² s. A notre connaissance il n'y a pas ou peu de travaux qui ont étudié la tendance de la courbe de l'efficacité énergétique du collecteur dans cette intervalle à part les travaux de (Belghit et al., 1997) qui ont étudié l'efficacité du collecteur en fonction du débit pour différentes surfaces, et ont noté qu' au dessus de 0.04 kg/m² s l'efficacité du collecteur décroît lorsque le flux croit. Chose conforme à nos résultats.

L'étude du profil de température à vide du séchoir forcé pour différents débits de l'air asséchant nous renseigne sur son comportement thermique où on remarque que pour les faibles vitesses ($v=1\text{ms}^{-1}$) la température de sortie du capteur solaire avoisine la température de consigne de la chambre de séchage et elle lui est égale juste dans la période entre 13h30 et 14h30 donc arrêt automatique des résistances de chauffés à l'aide d'un thermostat et le séchage durant cette période est totalement solaire.

L'étude du séchoir avec des tranches minces de tomate posées sur claie nous a permis d'obtenir un ensemble de courbes de séchage dans le but de déceler les paramètres

aérothermiques (débit et température) de l'air asséchant les plus influençant sur le processus de séchage du produit. Ces courbes présentent toutes une allure décroissante (phase c typique pour la majorité des produits agroalimentaires) et l'absence des phases a et b. On note également une réduction notable de la durée de séchage avec l'augmentation du débit et de la température de l'air asséchant. Cette amélioration est plus influencée par la température que par le débit d'air asséchant.

En travaillant en coordonnées réduites (teneur en eau réduite et vitesse de séchage normée), nous avons pu obtenir un bon regroupement des diverses courbes de séchage de la tomate autour de la courbe caractéristique de séchage qui tient compte des différentes conditions expérimentales du processus de séchage et qui représente en quelque sorte une carte d'identité du produit. L'analyse des résultats expérimentaux confrontés avec les modèles mathématiques existants, après avoir calculer les paramètres statistiques (R^2 et χ^2) nous montre que le modèle approprié pour décrire les courbes de séchage pour ce type de produit (tranche de tomate mince) dans ces conditions est le modèle de Midilli.

Le processus de séchage dure 450 minutes pour les tomates non traitées et seulement 300 minutes pour les tomates traitées. Le prétraitement augmente la perméabilité des parois des cellules, de ce fait favorise une migration plus rapide de l'eau à la surface du produit et réduit le temps de séchage dans notre cas de 33,33%. Le coefficient de diffusion calculé, en prenant en compte le rétrécissement du produit, augmente avec la température et le débit d'air asséchant, de même il augmente en fonction de l'augmentation de l'épaisseur des tranches de tomate (effet de bord non négligeable) et du prétraitement, favorisant ainsi les mécanismes de transfert thermique et massique qui gouvernent le processus de séchage du produit.

Cette opération consiste à optimiser à la fois la consommation de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché. Dans le souci d'économie d'énergie, et d'utilisation maximum d'énergie solaire gratuite un tableau dressant le quote-part de l'énergie solaire et celui de l'énergie électrique dans une opération de séchage avec ce type de séchoir hybride, nous montre que si le débit de l'air asséchant augmente de $0,0405\text{kg/m}^2\text{s}$ ($v=1\text{ms}^{-1}$) à $0,0810\text{kg/m}^2\text{s}$ (2ms^{-1}) le pourcentage de contribution de l'énergie solaire pour chauffer l'air caloporteur décroît de 25,07% à 13,22%, par contre celui de l'énergie électrique augmente de 74,92% à 86,78%. Il est donc conseillé dans une opération de séchage de travailler avec des faibles débits et avec des températures admises plus ou moins élevées.

Comme perspective à ce travail, on doit tester notre prototype tout le long de l'année pour apporter les modifications et les ajustements nécessaires ; afin d'améliorer son efficacité. Il est clair que pour que le prototype de séchoir soit complet il faut des réflexions complémentaires dans un domaine essentiel, celui de la connaissance spécifique des éléments nutritifs, vitamines, propriétés organoleptiques du produit et leur évolutions au cours du séchage; ce qui fait qu'on est obligé de faire appel et travailler en collaboration avec des biologistes et des agronomes. On souhaite refaire l'expérience en été (période la plus favorable pour le séchage et juste après la récolte), où probablement les résistances électriques de chauffe fonctionneront moins. On souhaite ajouter un système de régulation d'humidité (paramètre qu'on a pas pu réguler lors de nos expériences) et voir le comportement de notre séchoir ainsi que le quote-part de l'énergie solaire et électrique dans l'opération de séchage.

Dans le cadre de l'optimisation de l'opération de séchage et pour ne pas perturber les mécanismes de transfert de chaleur et de masse au niveau des claies de tomate, les méthodes de mesure employées devront être de préférence sans contact, et garder l'échantillon dans son intégralité (méthode de mesure non destructif); d'où la nécessité d'introduction d'une carte d'acquisition de donnée dans notre système.

En conclusion on peut dire que la majorité des auteurs ont étudié les cinétiques de séchage, température de séchage, et d'un degré moindre la consommation énergétique et le coût de l'opération de séchage ou période de l'amortissement de l'investissement ainsi que l'efficacité de séchage et la convenance de manipulation chose qui a été mis en exergue dans ce travail.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Michel Kapderou 1988. Atlas solaire de l'Algérie tome 1 –modèle théoriques et expérimentaux - volume2.
- [2] Ministère de l'énergie et des mines. www.mem.algeria.org
- [3] CDER Alger. www.cder.dz
- [4] J.P Nadeau , Puiggali J.R., Séchage: des processus physiques aux procédés industriels. Tec & Doc- Lavoisier, 1995.
- [5] Jean-jacques Bimbenet. 2002. Génie des procédés alimentaires RIA édition Dunod, Paris.
- [6] H.A. Iglesias, & J. Chirife., 1976b, On the local isotherm concept and modes of moisture binding in food products, Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol,24, 24-77.
- [7] C.R. Oswin, 1946, The kinetics of package life. III. Isotherm, Journal of Society of Chemical Industry, vol. 65, 419-421.
- [8] T.L. Thompson, & al., 1986, Mathematical simulation of corn drying a new model, Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, vol.11, 582-586.
- [9] Pfof & al., 1976, Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains, Society of Agricultural Engineers, Paper n^o 76-3520.
- [10] I. Langmuir, 1916, Journal of American Chemical Society, vol. 46, 1361-1362.
- [11] Peleg, 1993, Assessment of semi-empirical four parameter general model for sigmoid sorption isotherm, Journal of Food Processing Engineering, vol. 16(1), 21-37.
- [12] C. Van den Berg, 1984, Description of water activity of Food Engineering purposes by means of the GAB model of sorption, in: McKenna, B.M. (Ed), Engineering and Foods, New York: Elsevier, p.119.
- [13] A. Charreau et R. Cavaille., Séchage (théorie et calculs), technique de l'ingénieur, J2480, 1-23.
- [14] I. Doymaz., 2007. Air drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering 78, 1291-1297.
- [15] D.A Van Meel. 1957. Adiabatic convection batch drying with recirculation of air. Chem. Eng.Sc., 9, p.36.
- [16] W.K. Lewis, 1921, The rate of drying of solid materials. Journal of Industrial Engineering Chemistry 13, 427-432.

- [17] Q. Zhang, J.B. Litchfield, 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology* 9, 383-395.
- [18] L.M. Diamente, P.A. Munro, 1993. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51, 271-276.
- [19] D.D. Overhults, G.M. White, M.E. Hamilton, I.J. Ross, 1973. Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE* 16, 195-200.
- [20] A.Yagcioglu, A. Degirmencioglu, F. Cagatay, 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy Adana, Turkey*,. 565-569.
- [21] S.M. Henderson, 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE* 17, 1167-1172.
- [22] Y.I. Sharaf-Eldeen, J.L. Blaisdell, M.Y. Hamdy, 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE* 23, 1261-1271.
- [23] O.Yaldiz, C.Ertekin 2001. Thin layer solar drying some different vegetables. *Drying Technology* 19 (3), 583-596.
- [24] L.R. Verma, R.A. Bucklin, J.B. Endan, F.T. Wratten, 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE* 28, 296-301.
- [25] A.Midilli, H.Kucuk, Z.Yapar, 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology* 20 (7), 1503-1513.
- [26] A. Madhlope, S.A. Jones, and J.D. Kalenga Saka, 2001. A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration. *Renewable Energy*, 27, 27-37.
- [27] O. V. Ekechukwn, B. Norton, 1999. Review of solar energy systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40, 615-655.
- [28] T.K. Sherwood 1929. The drying of solids I and II. *Industrial Engineering Chemistry*, Volume 21, 12-16 and 976-980
- [29] O.A. Hougen, N.H. Ceaglske, 1937. Drying of granular solids. *Journal of Industrial Engineering Chemistry* 29, n^o7, 802-813.
- [30] O.Krisher, K. Kroll 1963. *Technique de sechage*, 2^{eme} edition de "Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag (1956). Traduite par le CETIAT, Orsay France.
- [31] A.V. Luikov, 1977. *Heat and Mass Transfer in capillary porous bodies*. Pergamon Press London.

- [32] D.A. Devries, 1987. The theory of heat and moisture transfer in porous media. *Journal of Heat and Moisture Transfer* 30, n°7, 1343-1350.
- [33] S. Whitaker, 1977. Simultaneous heat mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advances in heat transfer*, Academic Press, New-York volume 13,119-203.
- [34] M.A. Leon, S. Kumar, S.C. Bhattacharya, 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 367-393.
- [35] Takeoka, et al, 2001. Processing effects on lycopene content and antioxidant activity of tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.41, 2001, 67-70
- [36] S.K Clinton. lycopene : Chemistry,biology,and implications for human health and disease. *Nutrition Reviews*, 56, 1998, 5-51.
- [37] H Gerster, ,the potential role of lycopene for human health. *Journal of the American College of Nutrition*, 16, 1997, 109-126.
- [38] K. Sacilik, R. Keskin and A. K. Elicin, 2006 Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*.73, 231 - 238.
- [39] M.K. Krokida,et al. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*.59, 391-403
- [40] M. Kouhila, A. Belghit, M. Daguene, 2001. Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte. *Entropie* 233, 20-31.
- [41] A.O. Olorunda,et al, 1990. Up grading quality of dried tomatoes: effect of drying methods, conditions and pre-drying treatments. *Journal of Science of Food and Agriculture* 52, 447-454.
- [42] P. S. Madamba, R. H. Driscoll, K. A. Buckle. 1996 The thin-Layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*. 29. 75-97.
- [43] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A. Jamali, 2004. Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel. *Energy*. 29. 211 - 244.
- [44] S. J. Babalis, V. G. Belessiotis, 2004. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin- layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*. 65. 449-458.
- [45] A. Kaya, O. Aydin, C. Demirtas, M. Akgun, 2007. An experimental study on the drying kinetics of quince. *Désalination*. 212. 328-343.

- [46] A. Maskan, S. Kaya, M. Maskan, 2002. Hot air and sun drying of grape leather (pistil). *Journal of Food Engineering*. 54. 81– 88.
- [47] M.N.A.Hawlder, M.S.Uddin, J.C.Ho, A.B.W.Teng, 1991. Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 14. 259-268.
- [48] C. T. Akanbi, R. S. Adeyemi, A. Ojo, 2006. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*. 73. 157-163.
- [49] K. Sacilik, A. K. Elicin, 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*. 73. 281 - 289.
- [50] I.Doymaz,2004a. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineerig*, 61, 359-364.
- [51] I. Doymaz, 2005. Sun drying of figs: an experimental study, *Journal of Food Engineering* 71, 403-407.
- [52] Z. W. Cui, Z.W. Shi-Ying Xu, Z.W. Da-Wen Sun, 2004. Effect of microwave vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. *Drying Technology* 22 (3), 563-575.
- [53] I.T. Togrul, D. Pehlivan, 2004. Modeling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*65, 413-425.
- [54] I. Doymaz, 2004b. Pretreatment effect on sun drying kinetics of mulberry fruits. *Journal of Food Engineering* 65, 205-209.
- [55] M.K. Azharul, M.N.A. Hawlder, 2005. Mathematical modeling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 4914-4925.
- [56] M.H. Nguyen, W.E. Price, 2007. Air drying of banana. Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering* 79, 200-207.
- [57] O. Kalawole, Falade, Emmanuel, S. Abbo, 2007. Air drying and réhydration characteritics of date palm fruits. *Journal of Food Engineering* 79, 724-730.
- [58] A. El-Beltagy, G.R. Gamea, A.H. Amer Essa, 2007. Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78, 456-464.
- [59] A. Heredia, C. Barrerqm Andres. 2007 Drying of cherry tomato by combination of different dehydration techniques. *Journal of Food Engineering*. 80. 111-118.

- [60] J. S. Souza, M. F. D. Medeiros, M. M.A. Magalhaes, S. Rodrigues, F. A. N. Fernandes. 2007. Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying. *Journal of Food Engineering*. 83. 501-509.
- [61] I. Doymaz, 2004. Effect of dipping treatment on air drying of plums, *Journal of Food Engineering*, 64, 465-470.
- [62] P. P. Lewicki, Hoa Vu Le, W. 2002. Pomaranska-Lazuka. Effect of pre-treatment on convection drying of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 54. 141-146.
- [63] C. Tiris, N. Ozbalta. 1995. Thermal performance of new solar air heater. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 22, No. 3, 411-423.
- [64] P. Gbaha, H. Yobouet Andoha, J. Kouassi Sarakaa, B. Kame' nan Kouab, S. Toure. 1995. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. *Renewable Energy* 32 1817–1829.
- [65] E.J Khalil, Al-Juamily, Abdul Jabbar N. Khalifa, Tadahmun A. Yassen, 2007 Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq", *Energy Conversion and Management*. Desalination 209 (163–170)
- [66] M.A. Karim, M.N.A. Hawlader. 2004. Development of solar air collectors for drying application. *Energy Conversion and Management* 45, 329-344.
- [67] M.A. Leon, S. Kumar. 2007. Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. *Solar Energy* 81, 62-75.
- [68] C.F. Kutscher, C. Christensen, G. Barker. 1993. Unglazed transpired solar collectors: heat loss theory. *ASME Journal of Solar Engineering* 115 (3), 182-188.
- [69] A. Belghit, M. Belahmidi, A. Bennis, B.C. Boutaleb, S. Benet. 1997. Numerical study of a solar dryer in forced convection. *Revue General de Thermique* 36, 837-850.
- [70] P. Purohit, A., Kumar, T.C Kandpal, 2006. Solar drying vs. open sun drying: A framework for financial evaluation. *Solar Energy* 80, 1568-1579.
- [71] P.H Huang., Chetstone J.R., Symposium on moisture and humidity. Washington, 15-18 Avril 1985.
- [72] Tables de composition des aliments, Institut scientifique d'hygiène alimentaire, éditions Jacques Lanore, 1985, (ISBN 2-86-268-055-9)
- [73] I. Farkas, 2004. Solar drying of materials biological origin. In: Mujumdar, A.S. (Ed.), *Dehydration of products of biological origin*. Science Publisher, Inc., Enfield, USA, 317-368.

- [74] M.V. Ramana Murthy, 2009. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 835-844.
- [75] Atul Sharma, C.R. Chen, Nguyen Vu Lan, 2009. Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1185-1210.
- [76] C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroudis, M.D. Kouris, 1992. Drying kinetics of onion and pepper. *Drying Technology* 10, 995-1011.
- [77] Y. Chen, N.N. Barthakur, N.P. Arnold, 1994. Drying of potato slabs, *Journal of Food Engineering* 23, 107-119.
- [78] I.T. Togrul, and D.Pehlivan, 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering* 58, 23-32.
- [79] S. Azzouz, A. Guizani, W. Jomaa, A. Belghit, (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering* 55, 323-330.
- [80] N. Sanjuan, M. Lozano, G. Clemente, P. Garcia-Pascuala, & A.Mulet (2002). Drying kinetics of red peppers. *Drying* 1406–1412.
- [81] L. Bennamoun, A. Belhamri, 2006. Numerical simulation of drying under variable external conditions: Application to solar drying of seedless grapes. *Journal of Food Engineering* 76, 179-187.
- [82] M.A. Hossain, and B.K. Bala, 2007. Drying of hot chilli using solar tunnel drier. *Solar Energy* 81, 85-92.
- [83] B.Zanoni, C. Peri, R. Nani, V. Lavelli, 1999. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. *Food Research International* 31, 395-401.
- [84] J. Shi, M. le Maguer, Y. Kakuda, A. Liptay, F. Niekamp, 1999. Lycopene degradation and isomerisation in tomato dehydration. *Food Research International* 32, 15-21.
- [85] A.A. El-Sebaili, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, H.G. El-Gohary, 2002. Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables. *Energy* 27, 845-859.
- [86] M. Kouhila, N. Kechaou, M. Othmani, M. Fliyou, S. Lahsani, 2002. Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan eucalyptus globules. *Drying Technology* 20, 2027-2039.
- [87] J.D. Daudin, 1983. Calcul des cinetiques de sechage par l'air chaud des produits biologiques solides. *Science des Aliments* 3, 1-36.
- [88] J. Crank, 1975. *The mathematics of diffusion*. Oxford University, Press, London.

- [89] E. Akpınar, A. Midilli, Y. Bicer, 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44, 1689-1705.
- [90] I. Doymaz, N. Tugrul, M. Pala, 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering* 77, 559-565.
- [91] M.S. Uddin, M.N.A. Hawlader, M.S. Rahman, 1990. Evaluation of drying characteristics of pineapple in the production of pineapple powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 14, 375-391.
- [92] N.P. Zogzas, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, 1994. Moisture diffusivity methods of experimental determination: A review. *Drying Technology*, 12, 483-515.
- [93] N.P. Zogzas, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14, 2225-2253.
- [94] S.J. Babalis, and V.G. Belessiotis, 2004. Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65, 449-458.
- [95] G.S. Mittal, 1999. Mass diffusivity of food products. *Food Research International*, 15, 19-66.
- [96] P. Gupta, J. Ahmed, U.S. Shivhare, and G.S.V. Ragvhane, 2002. Drying characteristics of red chilli. *Drying Technology*, 20, 1975-1987.
- [97] I. Doymaz, 2005. Drying behavior of green beans. *Journal of Food Engineering*, 69, 161-165.
- [98] J. Bon, S. Simal, C. Rossello, & A. Mulet, 1997. Drying characteristics of hemispherical solids. *Journal of Food Engineering*, 34, 109-122.
- [99] R. Neufville, 1990. *Applied systems analysis*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, USA.
- [100] G. Prakash, 1997. *Solar energy fundamental and application*. New Delhi: Tata Mc Graw-Hill. Publishing Co. Ltd.
- [101] ASHRAE Standards 93-77. *Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors*. New York: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1977.

- [102] ASHRAE Std. 94-77. Methods of testing thermal storage devices based on thermal performance. New-York American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1977
- [103] ASHRAE Standards 95-81. Methods of testing to determine thermal performance of solar water heating systems. New-York: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1981.
- [104] SRCC Standard 200-82. Solar Rating and Certification Corporation, Washington DC. Test methods and minimum standards for certifying solar water systems, 1983.
- [105] MS. Soda, R. Chandra, 1994. Solar drying systems and their testing procedures: a review. *Energy Conversion and Management* 35 (3), 219-267.
- [106] M. Grupp, B. Hannelore, M. Owen-Jones, G. Schroder. Comparative tests of solar dryers. Technology Demonstration Center (TDC) Serial Report 2/95, Plataforma Solar de Almeria (PSA), Spain, August 1995.
- [107] T.A. Reddy, 1985. Testing procedures of solar components and systems: fundamental considerations. In: T.A. Reddy, Ph. Bouix, editors. *Proceedings of the fourth Asian School on Solar Energy Harnessing*, Decembre, 1985. Bangkok: Asian Institute of Technology; 1985.
- [108] G. Nonhebel. *Drying of solids in the chemical industry*. London: Butterworth & Co. Publishers Ltd, 1971.
- [109] WC. Swinbank. 1963. Long wave radiation from clear skies. *Q J Roy Meteor Soc* 89.
- [110] WH. McAdams. 1954. *Heat transmission*, 3rd ed. Mc Graw Hill, New York.
- [111] JF. Saccadura. 1978. *Initiation aux transferts thermiques*. Cast, Lyon, Technique et Documentation Lavoisier, Paris.
- [112] S.E. Charm. 1963. *Fundamental of food engineering*. Avi Pub Co, Westport, Connecticut, USA.

ANNEXE A1

| | 10 ⁰ C | 20 ⁰ C | 25 ⁰ C | 30 ⁰ C | 40 ⁰ C | 50 ⁰ C | 60 ⁰ C | 70 ⁰ C | 80 ⁰ C |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| LiBr | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| NaOH | | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | | |
| KOH | 0,12 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | |
| LiCl | 0,13 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| CaCl ₂ | | 0,33 | 0,30 | 0,22 | 0,19 | 0,17 | | | |
| MgCl ₂ | 0,34 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,32 | 0,31 | 0,29 | 0,28 | 0,26 |
| K ₂ CO ₃ | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | | 0,41 | 0,39 | 0,37 | 0,35 |
| Mg(NO ₃) ₂ | 0,57 | 0,54 | 0,53 | 0,51 | 0,48 | 0,45 | | | |
| NaNO ₃ | 0,78 | 0,75 | 0,74 | 0,73 | 0,71 | 0,69 | 0,67 | 0,65 | 0,63 |
| NaCl | 0,76 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,74 | 0,74 | 0,74 |
| KCl | 0,87 | 0,85 | 0,84 | 0,84 | 0,82 | 0,81 | 0,79 | 0,78 | 0,77 |
| BaCl ₂ | 0,92 | 0,91 | 0,90 | 0,90 | 0,89 | 0,88 | 0,87 | 0,86 | 0,85 |
| K ₂ SO ₄ | 0,98 | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 |

Tableau A1. Sels saturés utilisés pour la détermination des courbes de sorption/désorption (Huang, Chetstone, 1985) [75]

| Nom du model | Température | Constant du model | R ² | χ ² |
|-----------------------------------|-------------|--|----------------|----------------|
| Lewis | T=50 | K=0,17535 | 0,96378 | 0,00408 |
| | T=65 | K=0,271 | 0,97594 | 0,00277 |
| | T=75 | K=0,0.38105 | 0,96507 | 0,00479 |
| Henderson and Pabis | T=50 | a=1,08757, K=0,19013 | 0,97339 | 0,00323 |
| | T=65 | a=1,04595, k=0,28302 | 0,97904 | 0,00271 |
| | T=75 | a=1,05944, K=0,40085 | 0,9699 | 0,00482 |
| Page | T=50 | K=0,0803, n=1,41787 | 0,99598 | 0,00049 |
| | T=65 | K=0,1755, n=1,29944 | 0,99354 | 0,00084 |
| | T=75 | K=0,21978, n=1,48253 | 0,99748 | 0,0004 |
| Modified page | T=50 | K=0,16883, n=1,42015 | 0,99598 | 0,00049 |
| | T=65 | K=0,26204, n=1,30104 | 0,99354 | 0,00084 |
| | T=75 | K=0,35985, n=1,4837 | 0,99748 | 0,0004 |
| Logarithmic | T=50 | a=1,3363, K=0,11206, c=-0,30156 | 0,99601 | 0,00052 |
| | T=65 | a=1,29862, K=0,1677, c=-0,29548 | 0,99911 | 0,00013 |
| | T=75 | a=1,33561, K=0,23102, c=-0,31467 | 0,99532 | 0,0009 |
| Two-term-expontial | T=50 | a=1,93622, K=0,26442 | 0,99324 | 0,00082 |
| | T=65 | a=1,81685, K=0,3831 | 0,99211 | 0,00102 |
| | T=75 | a=1,9857, K=0,58054 | 0,99403 | 0,00096 |
| Approximation of diffusion | T=50 | a=258,26117, K=0,0589, b=0,99502 | 0,9952 | 0,00063 |
| | T=65 | a=227,67603, K=0,09984, b=0,99503 | 0,9924 | 0,00011 |
| | T=75 | a=249,98005, K=0,12862, b=0,99502 | 0,99534 | 0,00089 |
| Verma et al | T=50 | a=258,63824, K=0,0589, g=0,005861 | 0,9952 | 0,00063 |
| | T=65 | a=227,7458, K=0,09984, g=0,09935 | 0,99924 | 0,00011 |
| | T=75 | a=250,68922, K=0,12862, g=0,12798 | 0,99534 | 0,00089 |
| Two-term | T=50 | a=0,54379, K ₀ =0,19013, b=0,54379, K ₁ =0,19013 | 0,97339 | 0,00381 |
| | T=65 | a=0,52297, K ₀ =0,28302, b=0,52297, K ₁ =0,28302 | 0,97904 | 0,00362 |
| | T=75 | a=0,52969, K ₀ =0,40079, b=0,52969, K ₁ =0,40079 | 0,9699 | 0,00723 |
| Midilli et al | T=50 | a=0,999, K=0,09033, n=1,28576, b=-0,00516 | 0,99843 | 0,00022 |
| | T=65 | a=0,99715, K=0,19001, n=1,08149, b=-0,01494 | 0,99913 | 0,00015 |
| | T=75 | a=0,99526, K=0,22489, n=1,36621, b=-0,0081 | 0,99923 | 0,00019 |

Tableau A2. Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes températures d'air et à la vitesse 1 m/s

| Nom du model | Température | Constant du model | R ² | χ^2 |
|----------------------------|-------------|--|----------------|----------------|
| Lewis | T=50 | K=0,24176 | 0,98308 | 0,00184 |
| | T=65 | K=0,43175 | 0,98452 | 0,00201 |
| | T=75 | K=0,60917 | 0,98805 | 0,00179 |
| Henderson and Pabis | T=50 | a=1,04582, K=0,25239 | 0,98593 | 0,00168 |
| | T=65 | a=1,03546, K=0,4451 | 0,98625 | 0,00208 |
| | T=75 | a=1,02218, K=0,62036 | 0,98879 | 0,0021 |
| Page | T=50 | K=0,16088, n=1,25769 | 0,99694 | 0,00037 |
| | T=65 | K=0,31913, n=1,28771 | 0,99785 | 0,00033 |
| | T=75 | K=0,49267, n=1,29605 | 0,99865 | 0,00025 |
| Modified page | T=50 | K=0,23389, n=1,25858 | 0,99694 | 0,00037 |
| | T=65 | K=0,41189, n=1,28769 | 0,99785 | 0,00033 |
| | T=75 | K=0,57912, n=1,29641 | 0,99865 | 0,00025 |
| Logarithmic | T=50 | a=1,18971, K=0,17485, c= -0,1802 | 0,99912 | 0,00012 |
| | T=65 | a=1,15844, K=0,32291, c=-0,14812 | 0,99834 | 0,0003 |
| | T=75 | a=1,12245, K=0,48049, c=-0,11473 | 0,99914 | 0,00026 |
| Two-term-exponential | T=50 | a=1,78643, K=0,33549 | 0,99625 | 0,00045 |
| | T=65 | a=1,82705, K=0,60628 | 0,99698 | 0,00046 |
| | T=75 | a=1,84684, K=0,86161 | 0,99797 | 0,00038 |
| Approximation of diffusion | T=50 | a=173,46588, K=0,10697, b=0,99502 | 0,99935 | 0,00009 |
| | T=65 | a=157,13745, K=0,20078, b=0,99503 | 0,99866 | 0,00024 |
| | T=75 | a=138,33039, K=0,30676, b=0,99503 | 0,99818 | 0,00045 |
| Verma et al | T=50 | a=173,67576, K=0,10697, g=0,10644 | 0,99935 | 0,00009 |
| | T=65 | a=-157,11699, K=0,20078, g=0,19978 | 0,99866 | 0,00024 |
| | T=75 | a=137,81513, K=0,30676, g=0,30523 | 0,99818 | 0,00045 |
| Two-term | T=50 | a=0,52292, K ₀ =0,2524, b=0,52292, K ₁ =0,2524 | 0,98593 | 0,00211 |
| | T=65 | a=0,51776, K ₀ =0,44516, b=0,51776, K ₁ =0,44517 | 0,98625 | 0,00312 |
| | T=75 | a=0,51109, K ₀ =0,62037, b=0,51109, K ₁ =0,62037 | 0,98879 | 0,00421 |
| Midilli et al | T=50 | a=0,99546, K=0,1723, n=1,13087, b=-0,00665 | 0,99958 | 0,00006 |
| | T=65 | a=0,99891, K=0,3268, n=1,17631, b=-0,00746 | 0,9994 | 0,00014 |
| | T=75 | a=0,9987, K=0,49177, n=1,225, b=-0,00563 | 0,99928 | 0,00027 |

Tableau A3 Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes températures d'air et à la vitesse 2 m/s

ANNEXE A2

1. Le dispositif expérimental



Le séchoir solaire



Les claies de la chambre de séchage

2. Les instruments de mesures



Analyseur d'humidité



Balance électrique



Solarimeter (de type DS 120)



Appareil testo 445



Appareil testo 945



Appareil KIMO de type LV 110

3.Produit séché



Tomate séchée à $T=50^{\circ}\text{C}$, $V=1.5\text{ms}^{-1}$



Tomate séchée à $T=65^{\circ}\text{C}$, $V=1.5\text{ms}^{-1}$



Tomate séchée à $T=75^{\circ}\text{C}$, $V=1.5\text{ms}^{-1}$

RESUME

L'opération de séchage des produits agroalimentaires est simple dans son principe, mais très complexe dans son mécanisme. Devant cette complexité on sait intéresser à une approche expérimentale pour déterminer les courbes de séchage qui renferment la spécificité du produit ainsi que sa complexité. En effet deux prototypes de séchoir indirect ont été concoctés, l'un à convection libre ou naturelle et l'autre à convection forcée à l'aide d'un ventilateur. Suite à une bonne maîtrise de l'opération de séchage le prototype forcé a été choisi. On a étudié expérimentalement l'influence séparée des diverses paramètres aérothermiques (température et débit d'air asséchant) sur les courbes de séchage des tranches minces de tomate, puis confronté les résultats avec les modèles mathématiques existant dans la littérature. L'influence du prétraitement et de l'épaisseur des tranches de tomate sur la cinétique de séchage et sur le coefficient de diffusion a été étudiée. Dans le souci d'optimiser l'opération de séchage, une étude de l'efficacité énergétique et de l'analyse économique du prototype termine ce travail.

Mots clés: séchage solaire, efficacité énergétique, cinétique de séchage, tomate, modèle de séchage, coefficient de diffusion

The operation of drying of the agro alimentary products is simple in its principle, but very complex in its mechanism In front of this complexity we are interested in an experimental approach to determine the curves of drying which contain the specificity and the complexity of the product. Indeed two prototypes of indirect drier were constructed, one with free or natural convection and the other with convection forced using a fan. Following a good control of the drying operation the forced prototype was selected We studied experimentally the separate influence of various arothermic parameters (temperature and draining air flow) intervening in the process of drying thin tomato sections, then confronted the results with the mathematical models existing in the literature. The influence of the pretreatment and thickness of the tomato sections on the kinetics of drying and the coefficient of diffusion was studied. With the aim of optimize the operation of drying, a study of the energy effectiveness and economic analysis of the prototype complete this work.

Keywords: solar drying, energy efficiency, drying kinetic, tomato, drying model, coefficient of diffusion

عملية تجفيف المواد الزراعية بسيطة في المبدأ و لكن معقدة في آلياتها أمام هذا التعقيد التجأنا الاقتراب التجريبي لتعين منحنيات التجفيف التي تحتوي على خصوصيات و تعقيدات المنتج بحيث أنجزنا نموذجين لمشغفات احدهم طبيعي و الأخر قصري اخترنا النموذج الأخير أي القصري لسهولة التحكم في عملية التجفيف.

درسنا تجريبيا تأثير درجة الحرارة و سرعة الهواء المجفف في عملية تجفيف شريحة من الطماطم ثم قرنا النتائج مع النماذج النظرية الموجودة. درسنا تأثيرات المعالجة المسبقة وسمك شرائح الطماطم على حركية التجفيف و معامل انتشار. في إطار تحسين عملية التجفيف قمنا بدراسة حول كفاءة الطاقة و كذلك الجانب الاقتصادي لنموذج المجفف الكفاءة الطاقوية, حركية التجفيف, طماطم, نموذج التجفيف, معامل التجفيف, التجفيف الشمسي: الكلمات المفتاحية