



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté de Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté et soutenu par:

Djouama Mohamed Hamza et Djeridi Abd Errahmane

Le : 26 juin 2022

Amélioration de la cinétique du séchage industriel de l'agro- alimentaire par ajout du NaCl

Jury:

Mr.	Moummi Abdelhafid	Pr	Université de Biskra	Président
Mr.	Chabane Foued	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mr.	Kamel Aoues	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021- 2022

الله أكبر

DÉDICACES

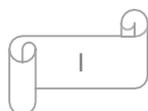
*Ce travail est le fruit d'une forte aventure
expérimentale et un
aboutissement d'une sérieuse formation
universitaire.*

*Je le dédie à mon épouse qui avait patientait à
mes côtés pour que je puisse l'accomplir.*

Je le dédie à mon encadreur,

*Ma sœur et mon partenaire qui mont Servaient
et leur aide a été très bénéfique, a la famille et
a tous qui nous ont aimés un jour, à leurs
mémoires.*

Djouama Med Hamza



DÉDICACES

Je dédie ce travail

A mes chers parents

A ma chère sœur

A mes chers frères (R, Faris. Assem. Djamal.

Z, Sifou. M, Djihad. M, Soufian)

À mes superviseurs, Dr. Chabane Foued et

Mr. Teguaia Salah

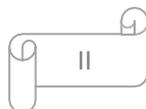
A tous mes collègues et tous mes amis

A tous ceux qui m'ont aidé et encouragé dans

mon travail

Et mes études et tous ceux qui me sont chers.

Djeridi abd errahmane



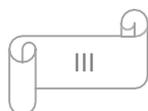
REMERCIEMENT

Je remercie ALLAH qui nous a aidé à accomplir ce travail et arrivé à un stade avancé sur ce niveau académique

*Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, le **Dr. Chabane Foued***

Son humilité, sa générosité et ses sacrifices pour mener à bien ce travail.

*Je tiens à remercier les membres du jury, **Dr. Aoues Kamel** et **Pr. Moummi Abdelhafid**, d'avoir accepté de discuter de ce travail.*

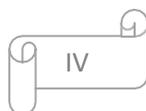


SOMMAIRE

Dédicace.....	I
Remerciement	III
Sommaire.....	IV
Liste des photos.....	VII
Liste des tableaux.....	XII
Nomenclature	XIII
Introduction générale.....	1

Chapitre I : généralités sur la technique de séchage

I.1 : Introduction	2
I.2 : Généralités sue séchage	2
I.3 : Méthodes de séchage.....	2
I.3.1 : Séchage mécanique	3
I.3.2 : Séchage chimique.....	3
I.3.3 : Séchage thermique.....	3
I.4 : Types de séchage.....	4
I.4.1 : Séchage a l'air chaud.....	4
I.4.2 : Séchage au soleil.....	4
I.4.3 : Séchage des contacts	5
I.4.4 : Séchage à l'infrarouge.....	6
I.4.5 : Lyophilisation.....	6
I.4.6 : Séchage en lit fluidisé.....	7
I.4.7 : Séchage diélectrique	7
I.5 : Etuve de séchage	8



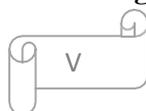
I.5.1 : Etuve de séchage à convection naturelle.....	8
I.5.2 : Etuve de séchage à convection forcée.....	8
I.6 : Principe de procédé	9
I.6.1: Chargement et séchage du produit	9
I.6.2: Recirculation de l'air humide	9
I.6.3: processus de séchage.....	9
I.6.4: transport diffusif.....	9
I.7 : Lois de fick.....	10
I.8 : L'humidité relative d'équilibre(HRE).....	10
I.9 : L'activité de l'eau	11
I.10 : Salage dans le séchage des produits alimentaire.....	12
I.11 : Périodes de taux de séchage	13
I.12 : Conclusion	14
Référence	

Chapitre II : recherche bibliographique

II.1 : Introduction.....	16
II.2 : Etude bibliographique	16
II.3 : Conclusion.....	40
Référence	42

Chapitre III: Etude expérimental et théorique

III.1 : introduction.....	43
<i>III.2 : Etude expérimentales</i>	<i>43</i>
III.2.1 Méthode expérimentale	44
III.2.1.1 : Thermomètre digital à infrarouge	45



III.2.1.2 : hygromètre (modèle TPM-10)	45
III.2.1.3: hygromètre (KT908).....	46
III.2.1.4 : Anémomètre numérique (modèle PCE-TA30).....	46
III.2.1.5 : Étuve de séchage Nabertherm	47
III.2.2 : Plan de l'expérience	57
III.2.2.1 : Balance électronique.....	51
III.2.2.2 : Balance Numérique portable OHAUS CS5000P	51
III.2.2.3 : Wattmètre prise	52
III.2.2.4 : Etuve Nabertherm utilisé pour l'expérience.....	52
<i>III.3 : Etude théorique</i>	54
III.3.1 : Calculs des diffusivités effectives.....	55
III.4 : Conclusion	55
Références	56

Chapitre IV: Résultats et discussion.

IV.1 : Interdiction.....	57
IV.2 : Teneur en eau MR selon les débits massique (1, 3 et 4 g/s).....	57
IV.3 : Teneur en eau MR selon les épaisseurs de produit séché (2, 3 et 4 mm)	62
IV.4: Effet de la température sur l'humidité relative	66
IV.5: Évolution de la température en fonction du temps	69
IV.6: Conclusion	76
Référons	77
Conclusion général	80
Résumé.....	84

LISTE DES PHOTOS

Chapitre I : généralités sur la technique de séchage

Fig. (I-1): Séchage à l'air chaude.....	4
Fig. (I-2): Méthode de séchage solaire.....	5
Fig. (I-3): Méthode de séchage des contacts.....	5
Fig. (I-4): Méthode de séchage à l'infrarouge	6
Fig. (I-5): Processus de lyophilisation	7
Fig. (I.6) : schéma pratique illustrant le séchage en lit fluidisé	7
Fig. (I-7): Etuve de séchage	7
Fig. (I-8): Etapes de transmission diffuse	8
Fig. (I-9): Activité de l'eau	10
Fig. (I.10) : Schéma illustrant l'emplacement de l'eau dans les produits agro-alimentaires	11
Fig. (I-11): Séchage et conservation du fromage.....	11
Fig. (I-12): Séchage et conservation de la viande	12
Fig.(I.13): Périodes de taux de séchage	13

Chapitre II : recherche bibliographique

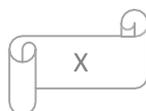
Fig. (II-1): Courbes typiques du taux d'élimination de l'humidité des tranches de pommes de terre séchées à une épaisseur constante de 5 mm	16
Fig. (II-2): Courbes de séchage d'échantillons de pommes de terre en tranches avec ou sans prétraitements	17
Fig. (II-3): Séchoir réutilisé pour l'expérience, fabriqué à L'API & PASILAC Limited de Carlisle.....	17

Fig. (II-4): des tranches de pommes de terre après séchage à 65 ° c (a) témoin, (b) sablé à l'eau chaude à 80 ° c et (c) prétraité avec une solution d'acide citrique.....	18
Fig. (II-5): Séchoir à gaz Attesta ; (B) : Tranches d'oignons séchés ; (C) : Oignon râpé séché	18
Fig. (II-6): Schéma de principe du sécheur à air chaud utilisé dans les expériences	19
Fig. (II-7): Courbes de séchage représentatives de tranches de kiwi vert avec une vitesse de l'air de 0,20 m/s à humidité ambiante et à différentes températures.....	20
Fig. (II-8): Déshydrater convectif a l'air chaud.....	20
Fig. (II-9): Les valeurs moyennes et les écarts-types de l'énergie d'activation aux températures de séchage (35, 50, 70 °C) et à l'épaisseur (3, 5, 8 mm) des tranches de pomme de terre de déshydratation convective en couche mince.....	21
Fig. (II-10): Histogramme de la répartition des couleurs d'une tranche de pomme de terre (épaisseur de 3 mm après et avant séchage)	22
Fig. (II-11): Courbe de taux de déshydratation d'une seule étape de traitement post-trempage pour le saccharose 50 % et le NaCl 10 %, et les échantillons de contrôle.....	23
Fig. (II-12): Variation de la perte en eau en fonction du temps.....	24
Fig. (II-13) : Effet du séchage sur le diamètre, l'épaisseur et le retrait volumique des pommes de terre blanchies pendant 2 mm	24
Fig. (II-14) : Variations de la vitesse de séchage en fonction du temps pour le séchage par micro-ondes de tranches de pomme de terre	25.
Fig. (II-15) : principe d'un séchoir à micro-ondes	25
Fig. (II-16) : Etuve à convection naturelle à l'air chaud (type Memmert, Germany)	26
Fig. (II-17) : Etuve de séchage (type Jouan).....	27
Fig. (II-18) : Evolution de la teneur en eau fonction du temps pour les trois découpes à T=55°C	28
Fig. (II-19) : Séchoir à bande continue	28
Fig. (II-20) : Schéma sécheur à air chaud... ..	29

Fig. (II-21) : Courbes de séchage (MR/t) des tranches de champignons à T=50°C et L= 5 mm.....	29
Fig. (II-22) : Schéma de micro-ondes	31
Fig. (II-23) : Photos (a, b, c, d, e) de pommes de terre séchées aux micro-ondes	31
Fig. (II.24) : courbes de séchage (MR/t) des tranches de pomme de terre prétraitées à la puissance de 900 W à différentes concentrations osmotique de micro-onde	32
Fig. (II.25) : courbes de séchage (MR/t) des tranches de pomme de terre prétraitées à la puissance de 360 W à différentes concentrations osmotique de micro-onde.....	32
Fig. (II.26) : Schéma de la soufflerie aérothermique à atmosphère contrôlée	33
Fig. (II-27) : Principe de séchage d'une couche mince	33
Fig. (II-28) : Variation de la vitesse de séchage des échantillons de la tomates pour les différentes conditions de l'air asséchant.....	33
Fig. (II-29) : Schéma du séchoir pilot des couches minces	35
Fig. (II-30) : Schéma du séchoir sel-up.....	37
Fig. (II-31) : Variation du taux d'humidité des tranches de pomme avec le temps aux différentes températures de l'air.....	37
Fig. (II-32) : Evaluation de la perte différentielle de masse des tranches de mangue au cours duséchage à différentes températures	37
Fig. (II-33) : Système de séchage sous vide infrarouge.....	38
Fig. (II-34) : Consommation d'énergie dans le séchage infrarouge sous vide de tranches de pomme de terre	38
Fig. (II-35) : Effet de la température et du temps de séchage sur le pourcentage de perte d'humidité d'échantillons sucrés de forme rectangulaire non blanchis de 4 mm d'épaisseur.....	39
Fig. (II-36) : Effet du traitement de séchage, de l'épaisseur de l'échantillon et de la durée sur le % de perte d'humidité des tranches de patates douces de forme rectangulaire séchées au four à 90°	39

Chapitre III: Etude expérimental et théorique

Fig. (III-1): Un pied coulisse.....	44
Fig. (III-2) : Thermomètre digital à infrarouge de type ECM TD 8891 a quatre canaux Thermomètre numérique -200 ~ 1372 ° C	45
Fig. (III-3) : hygromètre de contrôle (modèle TPM-10).....	46
Fig. (III-4) : hygromètre (KT908)	46
Fig. (III-5) : anémomètre numérique (modèle PCE-TA30).....	46
Fig. (III-6) : une étuve de séchage Nabertherm.....	47
Fig. (III-7) : Schémas du protocole suivi lors de l'expérience	48
Fig. (III-8) : Tranches de pomme de terre humides séchées de 4 mm d'épaisseur, 40mm de diamètre, le débit 1 g /s.....	50
Fig. (III-9) : Des échantillons de l'expérience avant et après séchage a différentes (débit / température / épaisseur)	50
Fig. (III-10) : Sertorius Balances de précision Entris™	51
Fig. (III-11) : Balance Numérique portable OHAUS CS5000P	51
Fig. (III-12) : wattmètre prise	52
Fig. (III-13) : Etuve de séchage Naberterm Sur laquelle l'expérience a été réaliser.....	52
Fig. (III-14) : Controleur de débit d'air sur l'étuve de séchage Naberter (30-3000°C)	53
Fig. (III-15) : Ventilateur d'extraction d'air humide de l'intérieur du Etuve de séchage Naberterm (30_3000°C)	53
Fig. (III-16) : Ventilateur d'admission d'air à l'intérieur de l'Etuve de séchage Naberterm (30- 3000°C).....	54



Chapitre IV : Résultats et discussion

Fig. (IV-1) : Teneur en eau et en NaCl selon le débit massique à la température 40°C...57	57
Fig. (IV-2) : Teneur en eau et en NaCl selon le débit massique à la température 60°C..... 59	59
Fig. (IV-3): Teneur en eau et en NaCl selon le débit massique à la température 70°C 61	61
Fig. (IV-4): Teneur en eau et en NaCl selon l'épaisseur de produit à la température 40°C 63	63
Fig. (IV-5): Teneur en eau et en NaCl selon l'épaisseur de produit à la température 60°C . 64	64
Fig. (IV-6): Teneur en eau et en NaCl selon l'épaisseur de produit à la température 70°C.65	65
Fig. (IV-7): Humidité relative selon le débit massique a une température et épaisseur fixé (60°C) et (2 mm).....66	66
Fig. (IV-8): Humidité relative selon le débit massique a une température et épaisseur fixé (60°C) et (3 mm).....67	67
Fig. (IV-9): Humidité relative selon le débit massique a une température et épaisseur fixé (60°C)et (4 mm).....68	68
Fig. (IV-10) : Variation de la température ambiante à l'intérieure de l'étuve, la sortie de la chambre et le produit selon l'épaisseur (2mm) et le débit massique a T = 60°C 70	70
Fig. (IV-11) : Variation de la température ambiante à intérieure de l'étuve, la sortie de la chambre et le produit selon l'épaisseur (3mm) et le débit massique a T = 60°C 73	73
Fig. (IV-12) : Variation de la température ambiante à l'intérieure de l'étuve, la sortie de la chambre et le produit selon l'épaisseur (4mm) et le débit massique a T = 60°C 75	75

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : recherche bibliographique

Tableau (II-1): Coefficients de régression du SOP (RSM) du temps de déshydratation, de la consommation d'énergie, de la diffusivité effective de l'humidité et de l'énergie d'activation des tranches de pomme de terre de déshydratation par convection en couche mince	21
Tableau (II-2) : Estimation de la diffusivité et l'énergie d'activation en fonction des conditions opératoire	27
Tableau (II-3): Estimation de la diffusivité effective de l'humidité dans différentes conditions de sécheur d'air	35
Tableau (II-4): Énergie d'activation estimée et constante de diffusivité de l'humidité dans différentes	

NOMENCLATURE

D_{eff} : Diffusivités efficaces

e : Epaisseur du produit (mm)

h : Coefficient de transfert de chaleur ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

M : Masse de produit (kg)

Q : Débit massique d'air (g/s)

θ_h : La température du thermomètre humide ($^\circ\text{C}$)

M_0 : teneur en humidité initiale (% , base humide)

M_{eq} : Teneur en humidité d'équilibre (% , base humide)

MR: Taux d'humidité (%)

M_t : Teneur en humidité à tout moment de séchage (% , base humide)

RH: humidité relative (%)

T: Température du produit ($^\circ\text{C}$)

X : La teneur en eau sèche moyenne (kg/kg)

Introduction générale :

Le plus souvent, les fruits et légumes sont consommés frais, dans ce cas la valeur nutritionnelle de leurs produits est élevée durant certaines saisons. Les fruits et légumes sont de saison mais il est très utile de les conserver pour pouvoir les utiliser hors saison ou le plus longtemps possible. Par conséquent, ils doivent être stockés pour une utilisation en dehors de la saison de récolte. Pour cela, l'industrie a utilisé un certain nombre de méthodes pour assurer la conservation des fruits et légumes ; La mise en conserve, la congélation et le séchage sont les trois méthodes les plus importantes.

Le séchage est une méthode de conversion de produits agricoles et alimentaires biodégradables en produits stables et utiles pendant longtemps en réduisant l'activité de l'eau (a_w) à moins de 0,5. Ces produits sont conservés à température ambiante mais présentent toujours un risque de détérioration ou de moisissure avant d'être réhydratés pour une utilisation ultérieure. Par conséquent, nous avons entraîné de nombreuses pertes matérielles dans notre vie quotidienne, en raison de l'abondance sur les marchés qui dépassait les besoins du citoyen. Pour le conserver, il existe plusieurs méthodes de séchage, dont :

Séchage électrique au moyen d'un four électrique équipé d'un ventilateur qui nous fournit un flux d'air chaud. Le débit et la température sont contrôlés dans la chambre de séchage pour obtenir un produit selon les normes requises.

Dans ce mémoire, nous aborderons les types et méthodes de séchage modernes et traditionnels. Pour le côté pratique, nous aborderons le processus de séchage à l'aide d'une étuve de séchage à convection forcée et par l'ajout de chlorure de sodium (NaCl) sur la surface du produit à sécher (salage à sec). En vue d'accélérer le processus de séchage, en modifiant la quantité de sel ajoutée à chaque étape pour voir l'effet du chlorure de sodium sur le séchage.

Le premier chapitre présente un aperçu général du séchage et ses techniques.

Le deuxième chapitre consiste en une étude bibliographique et présente de nombreuses études antérieures qui ont des objectifs communs avec nos travaux.

Le troisième chapitre décrit les étapes de l'expérience et illustre tous les outils de mesure et matériaux nécessaires pour assurer l'expérience du séchage de pomme de terre.

Le dernier chapitre explique les résultats expérimentaux obtenus qui ont été traduits en courbes, des comparaisons sont données entre les modèles utilisés.

Chapitre I

*Généralité le
séchage*

I.1 Introduction :

Le séchage est l'un des procédés les plus anciens utilisés dans la conservation des produits agricoles par l'homme, grâce à l'utilisation de multiples moyens et de diverses méthodes

Dans ce premier chapitre, nous aborderons les généralités du séchage en présentant des différentes méthodes et techniques de séchage et leurs principes de fonctionnement.

I.2 généralités sur le séchage :

Le processus de séchage est l'une des plus anciennes méthodes de conservation d'une large gamme d'aliments. Il s'agit d'un procédé de séparation thermique qui consiste à vaporiser un solvant pour éliminer tout ou partie d'un liquide imprégnant un corps appelé humide. Même s'il contient de l'humidité résiduelle, le produit final est considéré comme un solide sec. Le but est d'éliminer l'eau des aliments afin d'inhiber les micro-organismes, d'arrêter les réactions enzymatiques et de préserver les caractéristiques biochimique et biologique de ces aliments. Elle permet également une réduction du poids et du volume des produits à transporter, ainsi que pour des coûts de stockage minimiser.

Le principe de séchage dans le domaine de l'industrie est basé sur deux méthodes, séchage par entraînement ou séchage par ébullition

Le processus de séchage est défini comme un transfert bidirectionnel de chaleur et de masse. La méthode de séchage la plus courante dans l'industrie alimentaire est l'entraînement par l'air à des températures inférieures à celle de l'ébullition, l'air chaud donne au produit sa chaleur et reçoit l'humidité qui en est éjectée.

La compréhension des phénomènes agissantes sur ce procédé se base principalement sur les équilibres air-produit ; et les cinétiques de séchage et de transformation du produit [1].

I.3 Méthodes de séchage :

Les méthodes de séchage traditionnelles aboutissent à des techniques de conservation complexes. Les zones arides ou semi-arides sont les endroits idéals pour le séchage au soleil, les conditions climatiques sont bien favorables: une saison sèche a un fort ensoleillement,

moins de pluie et un faible taux d'humidité. Le séchage s'effectue sur des zones parfaitement exposé au soleil sur des tamis ou même sur des dalles rocheuses plats, ou bien sur les toits des maisons. Les résultats de ce système de séchage sont loin à la perfection car les produits sont souillés de sable et de poussière. Aussi vulnérable à être infecté par des insectes et contaminé par des micro-organismes. Les pertes sur le plan de coûts et qualité seront importantes. De plus, la durée de conservation de ces produits est courte et ne satisfait pas les besoins économiques, ils s'abîment, sèchent trop ou pas assez, ce qui dégrade fortement leur qualité. Il est important de connaître l'expérience et les capacités qui nous ont permis de nous adapter et de contourner les facteurs environnementaux. L'amélioration des pratiques et des équipements de séchage est toujours réalisable afin de mieux répondre à l'évolution des exigences de qualité des produits. Ils existent des différentes méthodes utilisées selon le besoin ou à l'aspect du produit a séché [2]:

I.3.1 Séchage mécanique :

Consiste à l'élimination du liquide en exerçant des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation, décantation et filtration)

I.3.2 Séchage chimique :

C'est un procédé basé sur le traitement chimique (solution osmotique) et l'utilisation de produits déshydratants (chlorure de calcium...) pour extraire l'eau.

I.3.3 Séchage thermique :

Le séchage thermique consiste à déshumidifier l'aliment par l'extraction d'une partie de son eau par l'évaporation ce qui nécessite le besoin d'énergie, Cette forme de fonctionnement est un transfert de masse qui nécessite l'activation de l'eau par une quantité particulière d'énergie fournie par un transfert de chaleur.

Les deux transferts se manifestent en une phase externe et une phase interne :

Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.

Transfert de chaleur externe, de la surface vers le cœur du produit.

Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.

Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur.

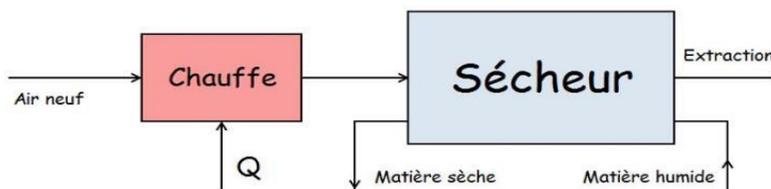
I.4 Types de séchage :

Le processus de séchage utilise des différentes nombreuses méthodes. Parmi les plus courantes on trouve les méthodes suivantes :

I.4.1 Séchage à l'air chaud :

Le séchage à l'air chaud est la méthode de séchage la plus courante à l'heure actuelle voir **Fig. (I.1)**. Elle est simple et efficace pour les produits industriels et alimentaires solides et constitue une solution peu coûteuse.

Cependant, cette technique a le potentiel de déshydrater complètement la surface du produit, entraînant des fissures ou un résultat hétérogène. Il peut également s'agir d'une procédure lente, en fonction du produit et de la température de séchage acceptable.



Ou :

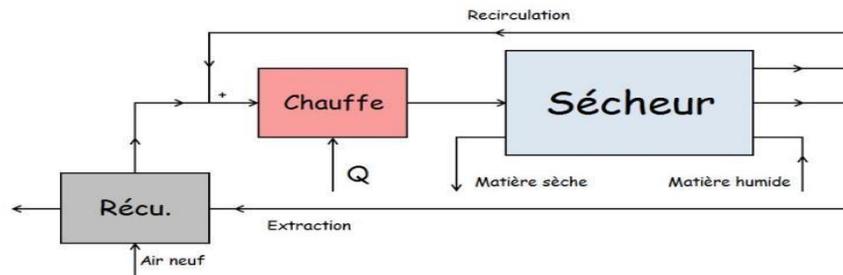


Fig. (I.1) : Séchage à l'eau chaude.

I.4.2 Séchage au soleil :

Le séchage par exposition au soleil est la solution la plus ancienne adaptée au séchage des fruits et légumes traditionnels dans les régions reculées, comme les abricots (voir **Fig.**

(I.2)) et les tomates, bien qu'elle ne préserve pas toutes les propriétés et les vitamines du produit. C'est une technique économique, mais cette méthode nécessite beaucoup d'espace et de temps, et offre moins de contrôle du processus [3].



Fig. (I.2) : méthode de séchage solaire [3].

I.4.3 Séchage des contacts :

Cette méthode consiste à passer le produit dans un tambour rotatif chauffé et le processus de séchage se fera par le contact direct du produit aux parois conductrices chauffées du tambour et sa rotation offre une meilleure homogénéité (voir **Fig. (I.3)**). C'est une technique destinée surtout pour le séchage industriel massif.

Cependant, le contact direct du produit avec les parois chaudes peut entraîner la dénaturation du produit séché, et l'homogénéité du processus n'est pas garantie [4].



Fig. (I.3) : méthode de séchage des contacts.

I.4.4 Séchage à l'infrarouge :

Le séchage par infrarouge (voir **Fig. (I.4)**) permet d'évaporer l'eau ou le solvant à haute température. Il peut également être couplé à l'air chaud et est utilisé lorsque l'effet de séchage doit être concentré sur la surface du produit traité pour obtenir également un effet de torréfaction.

Cette solution est loin d'être idéale pour les produits qui ne doivent pas être exposés à des températures élevées [5].

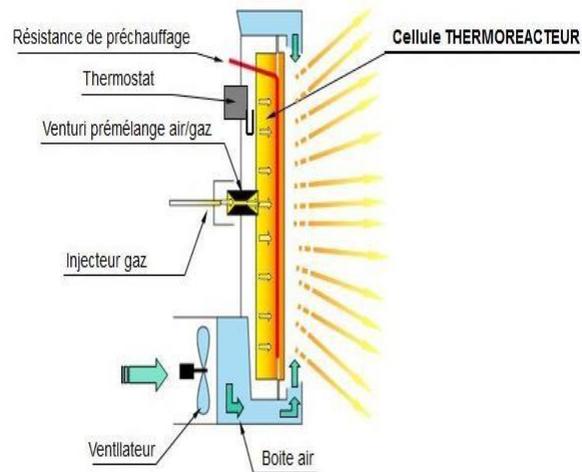


Fig. (I.4) : méthode de séchage à l'infrarouge.

I.4.5 Lyophilisation :

Le procédé de lyophilisation est basé sur l'effet de sublimation de l'eau dans un environnement à basse température (en dessous de -20°C et puis amené à très basse pression, la glace va passer à l'état vapeur sans passer par l'état liquide). Il est souvent recommandé pour le séchage des produits alimentaires sensibles à la température, car il préserve la plupart des propriétés organoleptiques voir **Fig. (I.5)**, [6].

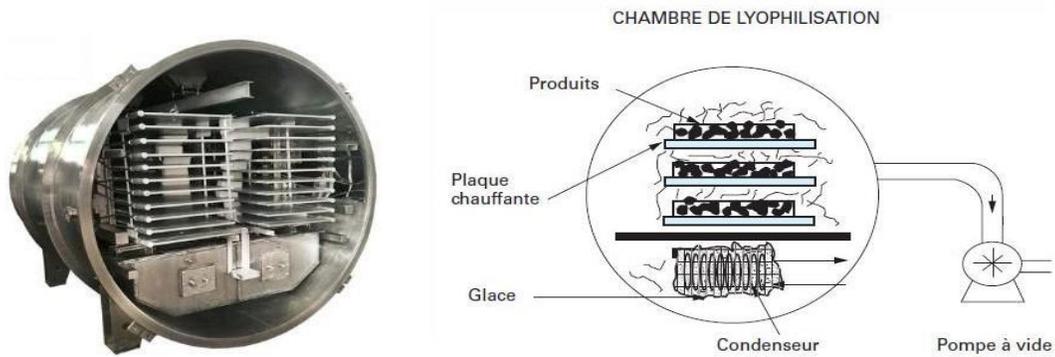


Fig. (I.5) : processus de lyophilisation[6].

I.4.6 Séchage en lit fluidisé :

Cette technique se base sur la mixture de l'air avec des particules solides afin de bénéficier d'un mélange qui se comporte comme un fluide. Cette méthode est très utile et rapide pour sécher les graines ou les matériaux granuleux voir Fig. (I.6).

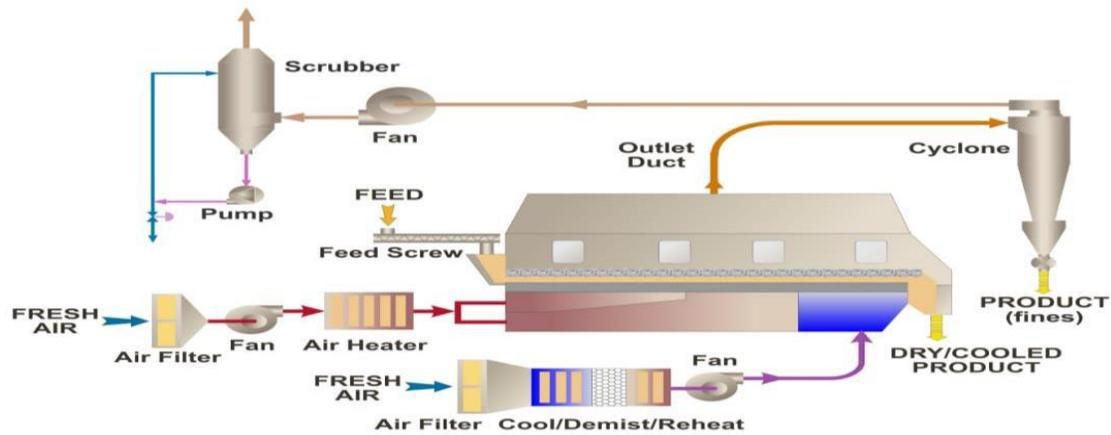


Fig. (I.6) : schéma pratique illustrant Séchage en lit fluidisé [7].

I.4.7 Séchage diélectrique :

Enfin, le séchage par micro-ondes et radiofréquences est basé sur la technologie du séchage diélectrique. En chauffant simultanément tout le volume du produit dans une chambre à vide par un champ à haute fréquence qui le traverse, une technique particulièrement recommandée dans les applications où un séchage homogène et doux est requis.

Cette solution est la plus adaptée pour sécher les produits thermosensibles dans le domaine alimentaire, industriel et médical, afin de préserver toutes leurs propriétés[8].

I.5 Étuve de séchage :

Les étuves de séchage disposent d'un vaste domaine d'utilisation. Elles sont utilisées pour toutes les tâches de séchage ou de stérilisation, Une étuve de séchage doit pouvoir effectuer des tâches variées et doit pouvoir être intégrée sans problème et de manière personnalisée dans chacun des processus de test. Les appareils sont disponibles avec convection forcée ou naturelle [9] :

I.5.1 Étuve de séchage à convection naturelle :

Lors d'un séchage ou une stérilisation particulièrement rapide sont requis, il convient idéalement d'utiliser des étuves de chauffage à convection naturelle. Elles garantissent un séchage rapide et homogène. Les étuves sont utilisées jusqu'à 300 °C pour les tâches routinières de séchage et stérilisation et conviennent pour un large domaine d'utilisation.

I.5.2 Étuve de séchage à convection forcée :

Dans une étuve de séchage à convection forcée, tous les processus thermiques s'effectuent de manière très efficace grâce à l'échange d'air important. Grâce à la répartition thermique homogène et la réponse dynamique rapide, cette étuve de chauffage (voir **Fig. (I.6)**) économise un temps de travail précieux. Elle doit en outre être équipée d'un ventilateur puissant.



Fig. (I.7) : Étuve de séchage.

Avec leur température de travail maximum de 300°C et la circulation d'air forcée, les étuves et les séchoirs a chambre obtiennent une excellente homogénéité dans la répartition de la Température. Ils peuvent être utilisés dans de nombreuses taches telles que le séchage, la stérilisation et le maintien de la chaleur.

I.6 Principe du procédé :

I.6.1 Chargement et séchage du produit :

Le produit se place dans une enceinte fermée ou l'apport énergétique du séchage se fait par la circulation de l'air chaud.

Cette enceinte peut comporter une série de claies superposées sur les quelle le solide est répartie en couches mince [10].

I.6.2 Recirculation de l'air humide :

L'air chargé de l'humidité est aspiré hors de la chambre de séchage par un système de ventilation forcée et l'envoi de l'air sec de nouveau vers la chambre de séchage [11] .

I.6.3 Processus de séchage :

Le processus de séchage se compose en plusieurs étapes inclus un transfert de chaleur et de masse ainsi que des changements physiques et chimiques. Les changements géométriques (rétrécissement), le gonflement, la cristallisation et les transitions vitreuse sont toutes des altérations physiques possibles. Des réactions chimiques ou biologiques souhaitables ou indésirables peuvent se produire, entraînant des changements de couleur, de texture, d'odeur ou d'autres qualités.

Le processus de séchage est obtenu en fournissant au corps humide de la chaleur pour convertir cette humidité de l'état liquide en vapeur d'eau, comme indiqué précédemment, cette chaleur peut être apportée par convection, conduction ou rayonnement [12].

I.6.4 Le transport diffusif :

La diffusion est le phénomène de transport de matière incontournable comme l'est la conduction et l'écoulement visqueux en transfert de matière et mécanique des fluides respectivement. La diffusion est le mécanisme de transport des zones concentrées en matière vers les zones moins concentrées voir **Fig. (I.8)**.

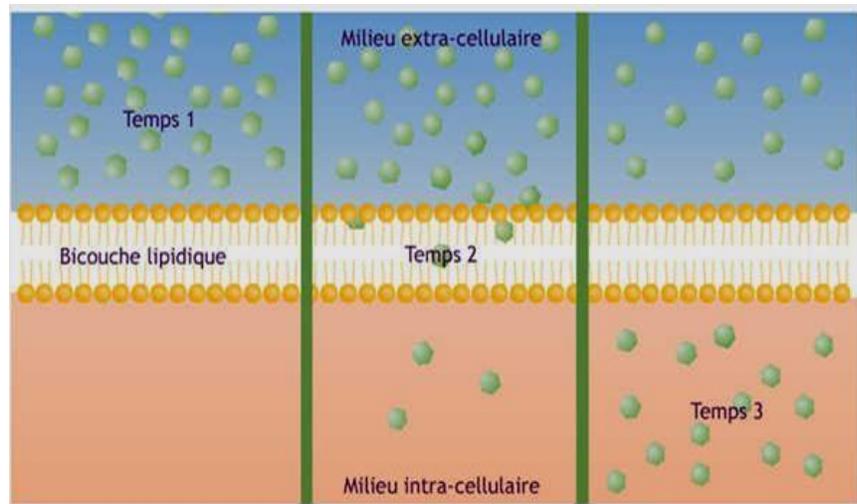


Fig. (I.8) : étapes de la transmission diffuse.

Par la différence de concentration que ce phénomène peut se produire, il se produit spontanément et inévitablement (phénomène dispersif) conduisant à un équilibre. La cinétique du phénomène est quantifiée par la diffusivité ou coefficient de diffusion. Le flux de matière engendré par ce phénomène de transport est d'après la loi de Fick proportionnel au gradient de concentration par l'intermédiaire du coefficient de diffusivité [13].

I.7 Lois de Fick :

Les lois de Fick sont d'une importance considérable dans le domaine énergétique. Elles sont employées pour l'étude des cinétiques de libération de substances actives contrôlées par diffusion. La 1^{re} loi s'applique notamment à la diffusion d'une espèce à travers une membrane, alors que la 2^e permet de décrire la libération d'une substance à partir d'un système matriciel [14].

I.8 L'Humidité Relative d'Equilibre (HRE) :

L'humidité relative est un terme qui définit le pourcentage de vapeur d'eau à une température Θ donnée par rapport à la saturation [1].

$$\text{HRE} = \frac{\text{pression partielle de la vapeur d'eau de l'aliment à la température } \theta}{\text{pression partielle de la vapeur d'eau saturante à la température } \theta} \times 100 \quad (\text{I-1})$$

I.9 L'activité de l'eau :

La détérioration du produit alimentaire est principalement causée par l'activité des micro-organismes, ainsi que par l'activité indésirable de certaines enzymes qui composent l'aliment lui-même voir **Fig. (I.9)**.



Fig. (I.9) : L'activité de l'eau sur les pommes.

L'activité de l'eau a_w ou (A_w pour Activité water) représente l'eau libre dans le produit (voir **Fig. (I.10)**). Il ne s'agit pas de la teneur exacte en eau d'un aliment, mais plutôt d'une eau susceptible d'interférer avec des réactions chimiques, biochimiques ou microbiologiques, Elle évolue dans une gamme comprise entre 0 et 1 ; elle est encore plus faible lorsque les forces d'attraction sont fortes, et elle a tendance à s'unir à mesure que l'eau se rapproche de son état naturel. Elle rechigne les changements physicochimiques, les activités enzymatiques et la propagation des micro-organismes. Les bactéries et levures ne peuvent se développer qu'à des concentrations supérieures à 0,91, 0,88 respectivement .L'activité de l'eau est définie comme le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau d'un produit et de la pression de vapeur saturante de l'eau pure à la même température [15].

$$A_w = \frac{P_w}{P_{w0}} = \frac{HRE}{100} \quad (\text{I-2})$$

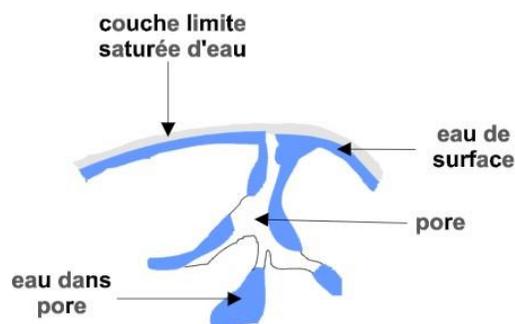


Fig. (I.10) : Schéma illustrant l'activité de l'eau.

I.10 Le salage dans le séchage des produits alimentaire :

Dès les débuts de l'agriculture, le sel a permis à l'homme de conserver de la viande, des poissons et des légumes.

Depuis des millénaires l'homme ne cesse à imaginer des façons de conserver ses produits alimentaires, il a inventé plusieurs méthodes de préservation physiques et chimiques comme le sel, le sucre et le vinaigre se sont des additifs alimentaires utilisés pour conserver sa nourriture.



Fig. (I.11) : Séchage et conservation du fromage

La teneur en eau des aliments peut favoriser la croissance de micro-organismes, rendant les aliments plus cassants. Des méthodes chimiques, telles que l'utilisation d'agents de conservation naturels comme le sucre et le sel, peuvent être utilisées pour réduire l'eau disponible et ainsi empêcher la prolifération des micro-organismes.

Deux techniques utilisées pour la conservation de l'aliment, l'une de ces deux se fait à l'aide d'un sel sec. Emettant directement du sel sur la surface de l'aliment (salage à sec).

Pour obtenir une bonne déshydratation et ainsi réprimer le développement de bactéries ou de micro-organismes,

Pour obtenir une bonne déshydratation et ainsi réprimer le développement de bactéries ou de micro-organismes, la deuxième appelé saumurage consiste à immerger l'aliment dans une solution saline (saumure) pour une durée de temps prolongé, La saumure agit par osmose, une partie du sel migre dans l'aliment et la concentration en sel dans l'aliment s'équilibre avec celle de la saumure. Cette technique est utilisée en charcuterie et en fromagerie.



Fig. (I-12): Séchage et conservation des poissons.

L'eau contenue dans les aliments peut être plus ou moins disponible, et peut être liée ou non à d'autres molécules. Plus cette disponibilité en eau est importante, plus les micro-organismes peuvent se développer et l'aliment sera donc en risque de s'abîmer. La protection des aliments se fait par la réduction de la quantité d'eau disponible pour réprimer l'activité des micro-organismes ces derniers se développent au milieu ayant une A_w plus de 0,90. L'ajout de sucre ou de sel a le même effet. Ils se lient à l'eau présente dans les aliments. Le sel, à une concentration de 10 %, inhibe la croissance de plusieurs germes et agit sur le pH des protéines [16].

I.11 Périodes de taux de séchage :

En raison de la large gamme de produits nutritionnels et biologiques, il est nécessaire d'étudier la cinétique de séchage d'un aliment à l'aide des mesures expérimentales de température, d'humidité et de la vitesse de séchage après avoir équilibré le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé en plus l'enregistrement régulier de l'évolution de sa masse dans le temps voir **Fig.(I.13)**.

L'évolution du produit durant le séchage est caractérisé par deux courbes :

La teneur en eau sèche moyenne (X) du produit, en fonction du temps (t) obtenue directement à partir de l'enregistrement de la masse au cours du temps, connaissance de la teneur en eau initiale du produit ;

La vitesse de séchage (dx/dt) en fonction de la teneur en eau base sèche (X).

Les courbes théoriques, obtenues pour des produits non hygroscopiques et peu déformables comme, par exemple, la cellulose, permettent classiquement de distinguer trois périodes

- une période 0 de mise en température du produit, qui disparaît pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de particules ou de feuilles ;

- une période 1 de séchage à vitesse constante, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, l'activité de l'eau A_w dans le produit en surface reste proche de 1, et le séchage est contrôlé par les transferts externes.

Durant toute cette période, la température du produit est uniforme et égale (par définition) à la température du thermomètre humide (θ_h) de l'air, c'est-à-dire la température de l'air de séchage. À la fin de cette période 1, la teneur en eau critique du produit peut être déterminée, une période 2 de séchage à vitesse décroissante où la surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique, l'eau en surface du produit est inférieure à 1 et les transferts internes de matière deviennent limitant. La température du produit augmente à partir de sa surface. La teneur en eau base sèche du produit diminue jusqu'à atteindre une valeur limite (X_{lim}) qui dépend des conditions de l'air de séchage (température et humidité relative) [17].

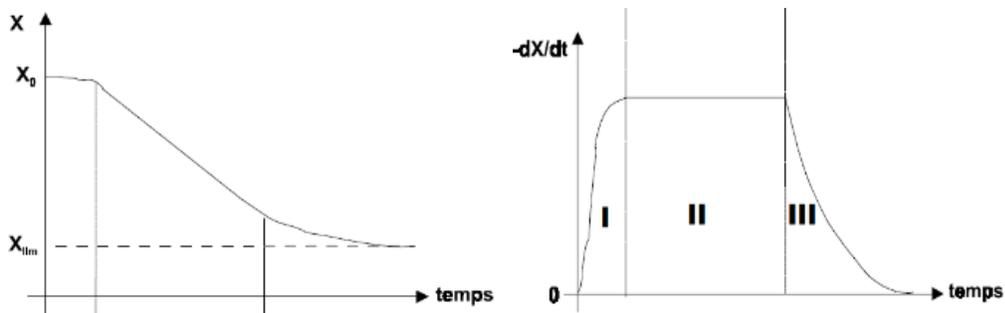


Fig.(I.13): Périodes de taux de séchage.

Conclusion :

Ce premier chapitre nous a permis d'avoir une idée générale sur le séchage sous multiples aspects, c'est un protocole efficace pour conserver nos produits agricoles.

Afin de réaliser notre étude sur le séchage il fallait s'appuyer sur plusieurs techniques et de multiples outils pour nous faciliter notre expérience de séchage.

Référence :

- [1] Romdhane, K. (juin 2015). " Le Séchage". Université de Lille - Sciences et Technologies. https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/co/publiweb_Sechage.html.
- [2] Bilal, H. (juin 2015). "Séchage 1 _ M1 ener _ Mouheb.". Université de Bretagne Sud. https://tel.arvhive_ouvertes.fr/tel_01297965.
- [3] messaoudi, r., baadi, h., & manaa, s. (2021). etude theorique du sechage solaire directe (doctoral dissertation, universite ahmed draia-adrar).
- [4] Maione, R. (2017). Modélisation d'un système de pyrogazéification de la biomasse (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [5] M. HEMATI, (14 novembre 2007). synthese et dépôt de nanoparticules metalliques dans un support poreux par impregnation en voie seche dans un lit fluidise : elaboration de catalyseurs supportes.
- [6] Dumortier, B. (1997). Traité du Grand Attracteur. FeniXX.
- [7] Younes, R. (1993). Elaboration d'un modèle de connaissance du moteur diesel avec turbocompresseur à géométrie variable en vue de l'optimisation de ses émissions (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lyon).
- [8] Detomi De Albuquerque, C. (2019). Etude des effets thermiques et non-thermiques au cours d'un procede de pasteurisation d'une matrice alimentaire par micro-ondes: approches numérique et experimentale (Doctoral dissertation, Nantes, Ecole nationale vétérinaire).
- [9] www.google.com . (Utilisation des étuves de séchage : définition, applications et critères de sélection). Etuve de séchage.
- [10] Rivier, M., Méot, J. M., Ferré, T., & Briard, M. (2009). Le séchage des mangues (p. 112). Éditions Quae.
- [11] Jourdan, J. P. (2006). Cultivez votre spiruline. Edt. Antenna Technologie: 146p <http://www.antenna.ch/documents/manuelJourdan2061.pdf>.
- [12] Bahrani, S. A. (2012). Modification des propriétés physico-chimiques de l'amidon par procédés hydrothermiques: Contribution à l'étude des transferts couplés chaleur-masse (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- [13] Dormieux, L., & Lemarchand, É. (2000). Modélisation macroscopique du transport diffusif. Apport des méthodes de changement d'échelle d'espace. Oil & Gas Science and Technology, 55(1), 15-34.
- [14] Agbangla, C., Dumargue, P., Humeau, P., & Morin, M. F. (1981). Etude de la validite de la loi de Fick pour le transfer de matiere dans un fluide viscoelastique. Electrochimica Acta, 26(11), 1575-1586.
- [15] www.google.com. Génie alimentaire. L'activité de l'eau.2022/06/15.
- [16] www.alimentarium.org . Le salage dans le séchage des produits alimentaire.15/06/15.
- [17] tech-alim.univ-lille.fr.cinétique de séchage. Périodes de taux de séchage.

Chapitre II:

Recherche

bibliographique

II.1 Introduction :

La méthode classique de séchage industriel entrainer par chauffage et ventilation se réalise par l'emplacement du produit dans une enceinte étanche et à faire élever progressivement la température de l'air ambiant. Jusqu'à ce que la température du milieu interne augmente, l'air qui circule autour de ce produit va absorber de plus en plus d'humidité de ce dernier. Lorsqu'une certaine température et humidité relative sont atteintes par le chauffage, une partie de l'air chaud et humide est extraite par évaporation et transporter hors de la pièce ou précisément du bâtiment chauffé par l'ouverture des portes ou par des ventilateurs d'extraction, tandis qu'une quantité similaire d'air frais est aspirée en raison de la dépression induite. Cela a pour effet d'abaisser l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment et de permettre au produit de continuer à perdre de l'humidité dans l'air lorsque l'opération est répétée [1].

II.2 : Etude bibliographique :

D. Hadi et Hoseini [2], ont appuyées sur l'analyse de l'impact de nombreux facteurs sur le comportement du séchage des tranches de pomme de terre dans une micro-onde domestique (LG MG-4012, Corée), tels que la puissance des micro-ondes, la variation d'épaisseur d'échantillons, la diffusivité de l'humidité et l'énergie consommée par le produit étudié. Après avoir sélectionné des épaisseurs de 3.5, 5, 7 et 9 mm, les échantillons ont été séchés à quatre densités de puissances différentes (200, 400, 600 et 800 W).

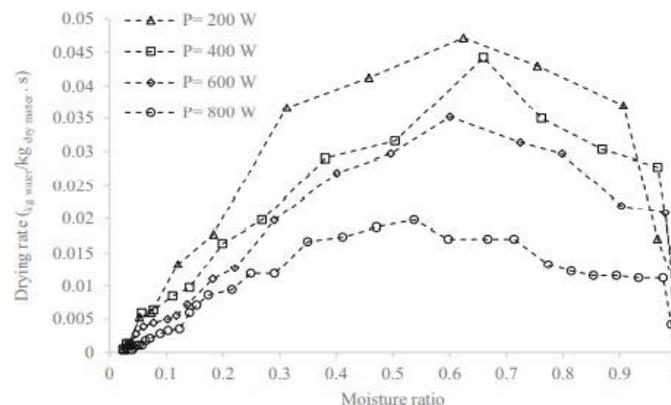


Fig. (II.1): Courbes typiques du taux d'élimination de l'humidité des tranches de pommes de terre séchées à une épaisseur constante de 5 mm.

Le résultat obtenu montre que la diffusivité de l'humidité effective augmente avec l'élévation de l'épaisseur d'échantillon et la puissance des micro-ondes par contre l'énergie d'activation diminue à l'augmentation des épaisseurs étudiées, il est conclu que l'abaissement de l'épaisseur d'échantillon entraîne une moindre consommation d'énergie et diminue le temps de séchage.

D. I'brahim [3], a réalisé pour définir l'effet du prétraitement sur les caractéristiques du séchage des tranches de pomme de terre. L'essai a été effectué dans une armoire de séchage, conçue et fabriquée à l'API & PASILAC Limited de Carlisle, Cumbria, Royaume-Uni, à une température de (65°C) et une vitesse de séchage de 2.0m/s pour des échantillons de 8mm d'épaisseur prétraités en différentes solutions d'acide citrique et d'autre blanchi à l'eau. Les résultats de cette expérience montrent que les taux de séchage et de réhydratation les plus élevés ont été obtenus pour les échantillons prétraités d'une solution d'acide citrique. De plus, ils ont trouvé une meilleure apparence générale et une meilleure couleur que les autres. Le processus de séchage s'est produit pendant la période de taux de chute et aucune période de séchage à vitesse constante n'a été observée. I'BRAHIM DOYMAZ ne déduit que la diffusion dans le mécanisme physique dominant le mouvement de l'humidité dans les échantillons.

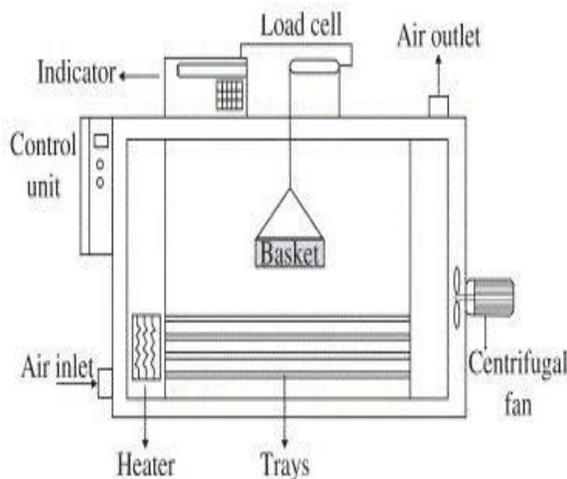


Fig. (II.3): Séchoir réutilisé pour l'expérience, fabriqué à l'API & PASILAC Limited de Carlisle.

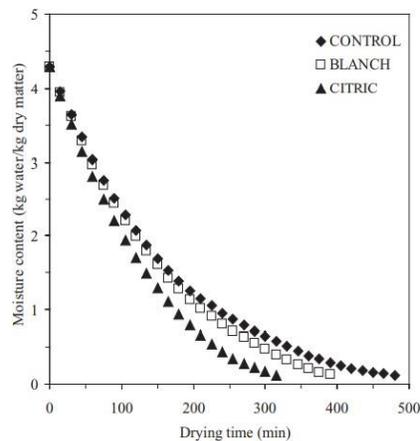


Fig. (II.2): Courbes de séchage d'échantillons de pommes de terre en tranches avec ou sans prétraitements.

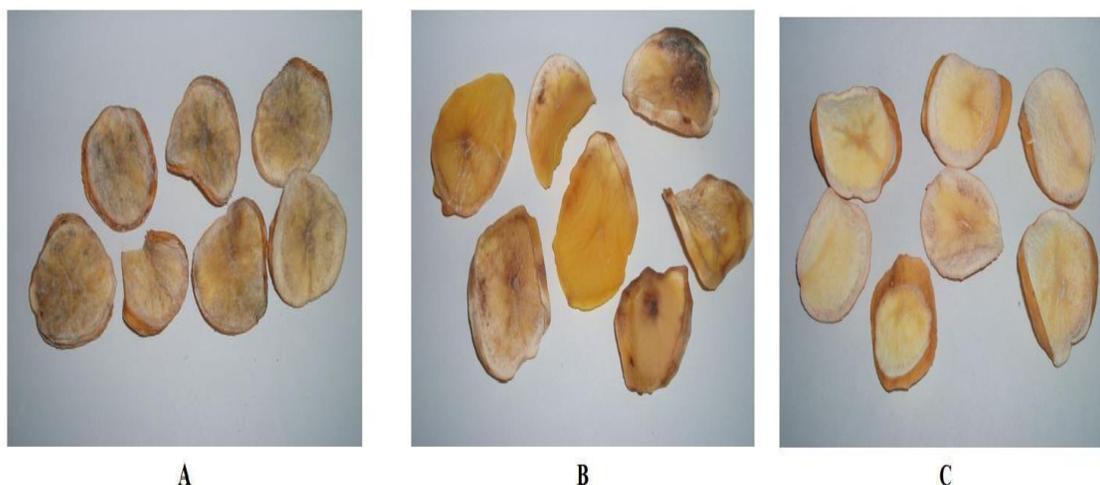


FIG. (II.4): Des tranches de pommes de terre séchées après séchage à 65 ° C (A) Témoin, (B) sablé à l'eau chaude à 80 ° C et (C) prétraité avec une solution d'acide citrique.

C. Hamidou et al [4], ont étudié l'effet du prétraitement au sel NaCl sur l'oignon durant le séchage, le prétraitement été fait on deux méthodes : par trempage dans une solution salée de 5% NaCl pour les bulbes d'oignon tranchés de 7mm, et par frottement de bulbes râpés dans NaCl 5% en poudre.



Fig. (II.5): Séchoir à gaz Attesta ;(B): Tranches d'oignons séchés ; (C): Oignon râpé séché.

En comparaison avec des échantillons témoin des deux côtés Le séchage s'est effectué dans un séchoir à gaz Attesta qui utilise le gaz comme source d'énergie a une température de 60-65°C pendant 12 heures suivie d'une série d'analyses physico-chimiques, nutritionnelles et

microbiologiques. Le résultat obtenu montre que le prétraitement de l'oignon à l'NaCl provoque une influence sur la qualité nutritionnelle et qu'elle permet de préserver la qualité sanitaire de l'oignon séché.

L'expérience de **M. Durand et al [5]**, consiste à sécher des kiwis dans un séchoir à four modifié avec une vitesse d'air de 0,2 m/s et des températures allant de 60°C à 80°C pour chaque test. L'objectif est d'étudier les coefficients de séchage CRP/FRP et la première teneur en humidité critique CMC sous l'influence de la température de séchage. Le séchage de deux types de Kiwis correspondait à deux vitesses de séchage : l'une constante CRP et l'autre décroissante FRP. Pour les deux variétés, la première teneur en eau critique (CMC) et la teneur en eau d'équilibre dynamique diminuent avec la température de séchage. Cependant, la deuxième CMC pour les segments de kiwi vert et jaune n'est pas affectée par les températures de séchage. Les valeurs de saturation des kiwis verts séchés ont augmenté, tandis que les valeurs de saturation des kiwis rouges séchés ont diminué à mesure que la température augmentait par rapport aux échantillons frais. Sous les températures de 80°C et 80°C, il n'y avait pas de différence perceptible dans l'angle de teinte des deux variétés de kiwis, ni dans la teneur en acide ascorbique, mais une réduction de 19% de la teneur en acide ascorbique a été observée sur les tranches vertes et dormantes séchées à 100°C.

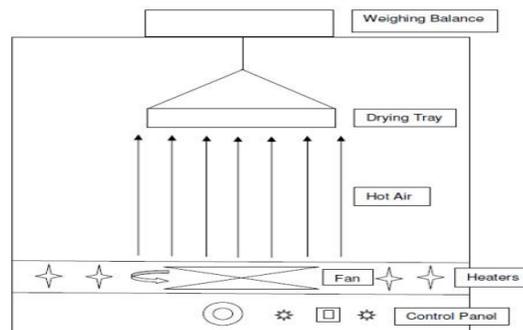


Fig. (II.6): Schéma de principe du séchoir à air chaud utilisé dans les expériences.

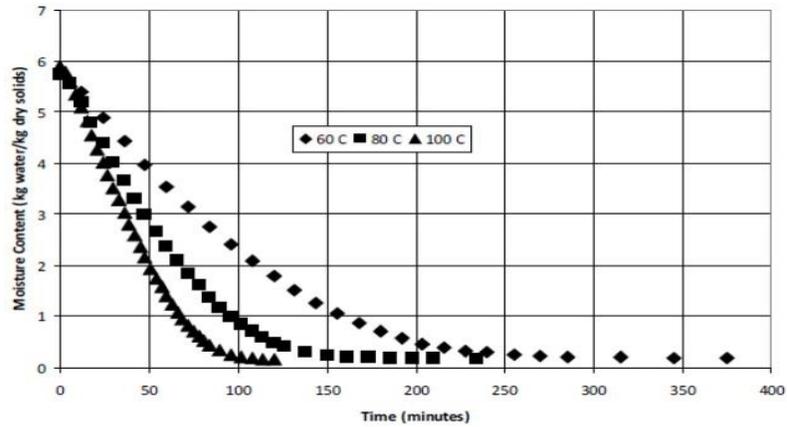


Fig. (II.7): Courbes de séchage représentatives de tranches de kiwi vert avec une vitesse de l'air de 0,20 m/s à humidité ambiante et à différentes températures.

On raison de déterminer l'efficacité d'un déshydrater convectif pour une couche mince de pomme de terre et d'estimer l'efficacité énergétique ; **P. Marko et al [6]**, dans cette expérience ont étudié le séchage des tranches d'épaisseur de 3,5 et 8 mm à des températures de 30, 50 et 70°C dans un déshydrater à convection à air chaud.



Fig. (II-8): Déshydrater convectif à l'air chaud.

Il a été découvert qu'en augmentant la température de dessiccation et l'épaisseur de l'échantillon tout en diminuant la masse de charge, la diffusivité effective de l'humidité augmente tandis que l'énergie d'activation diminue. La résistance la plus significative au transfert de masse et la diffusivité efficace maximale de l'humidité ont été trouvées dans la déshydratation des tranches les plus épaisses à 70°C, et le même modèle de déshydratation a été utilisé

pour montrer la plus faible énergie d'activation par rapport à la plus grande énergie d'activation maximale pour le plus petit échantillon à la plus basse température de 35 °C avec la même charge massique, quand la charge massique est réduite, la diffusivité effective de l'humidité diminue et l'énergie d'activation augmente. Les modèles mathématiques développés de la déshydratation des tranches de pomme de terre ont montré une bonne corrélation entre les résultats mesurés et calculés, permettant la création d'une base de données pour optimiser le processus de déshydratation.

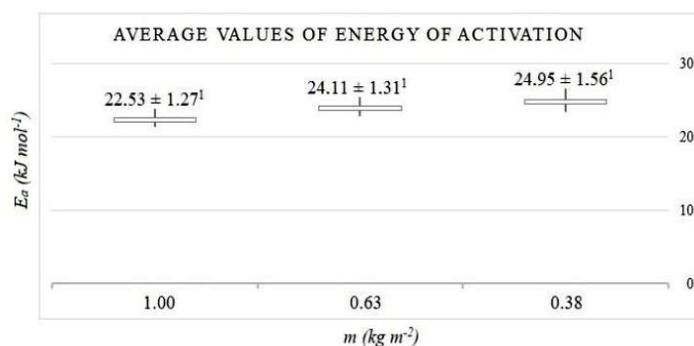
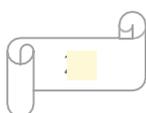


Fig. (II.9): Les valeurs moyennes et les écarts-types de l'énergie d'activation aux températures de séchage (35, 50, 70 °C) et à l'épaisseur (3, 5, 8 mm) des tranches de pomme de terre de déshydratation convective en couche mince.

Tableau (II.1): Coefficients de régression du SOP (RSM) du temps de déshydratation, de la consommation d'énergie, de la diffusivité effective de l'humidité et de l'énergie d'activation des tranches de pomme de terre de déshydratation par convection en couche mince.

	T	E	<i>D_{eff}</i>	<i>E_a</i>
β₀	978.219	-7.468*	1.883× 10 ⁻⁷ *	38.208*
β₁	-54.885*	0.275	6.982× 10 ⁻⁹ *	-0.382*
β₁₁	0.627*	0.002	5.464× 10 ⁻¹¹ *	0.003*
β₂	1014.630	2.121	4.751× 10 ⁻⁸	-2.232
β₂₂	329.892	-0.47	4.878× 10 ⁻⁸	-1.451
β₃	208.730	0.048	-1.603× 10 ⁻⁹	3.544× 10 ⁻⁷
β₃₃	-13.993	0.014	8.988× 10 ⁻¹⁰	-7.798× 10 ⁻⁷



β_{12}	-29.340*	0.010*	-1.5614×10^{-9} *	0.0260*
β_{13}	-1.148	0.001*	3.6724×10^{-10} *	-5.256×10^{-7}
β_{23}	115.119*	0.072*	-1.5265×10^{-8} *	-1.237×10^{-7}

L'objectif de **N. Hafezi et al [7]** était de déterminer l'effet des conditions de séchage sur le changement de couleur et la distribution des tranches de pomme dans un système de séchage infrarouge maintenu sous vide. La recherche s'est concentrée sur la rétraction volumétrique de tranches de pomme d'épaisseurs de 1,2 et 3 mm sous l'influence de différentes puissances de rayonnement IR (100, 150 et 200 w). Les changements de couleur ont été mesurés à l'aide d'une analyse d'image. L'analyse montre que lorsque l'épaisseur de l'échantillon augmente, le rétrécissement augmente. Selon le calcul du pourcentage de changement, le plus grand changement de couleur était de 3 mm d'épaisseur et le plus petit changement était de 1 mm d'épaisseur. Il a été découvert que ni l'épaisseur ni la puissance IR n'avaient d'effet.

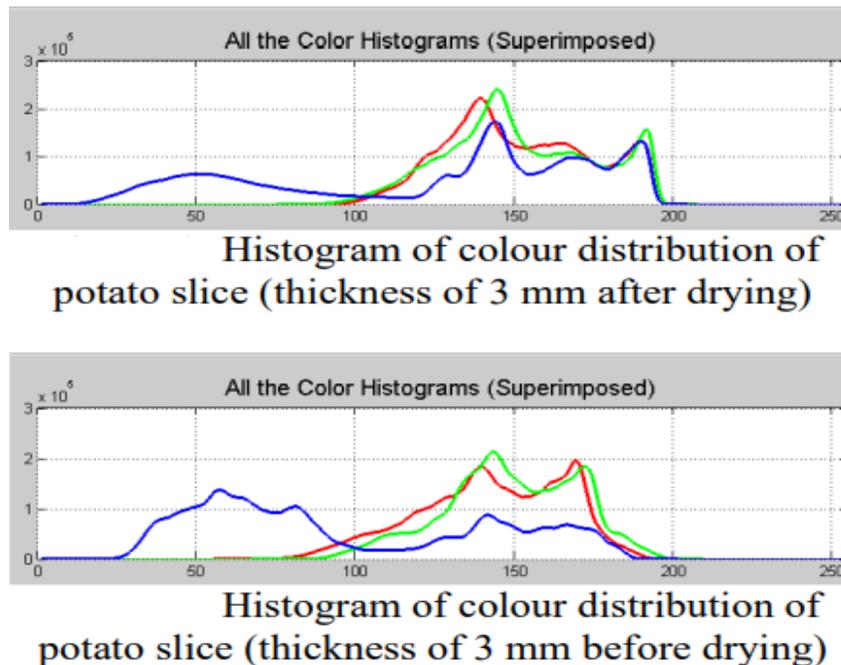


Fig. (II.10) : Histogramme de la répartition des couleurs d'une tranche de pomme de terre (épaisseur de 3 mm après et avant séchage).

WMFW. Mokhtar et al [8] voulus exploité par cette étude pour l'analyse et compréhension de mécanisme de perte d'eau (WL) lors de la déshydratation des tranches de pomme de terre sous l'effet d'une solution osmotique. Pour cette mesure ils ont utilisés des différente méthodes d'immersion dans des solution sucré et saler a des variables concentrations, ce processus appeler post-trempage. la technique été de préparer des échantillons de tranche de pomme de terre et de les trempé dans des solution saline de (5-15%) et sucré de (30-50%) sur deux modes par trempage successive et par étapes répétitif et en étudier l'influence du le temps d'immersion et le temps d'égouttage a la température ambiante avant d'être sécher. Le résultat obtenu montre que La teneur en humidité des tranches pourrait être réduite ainsi de 475 ± 47 % à $225,65 \pm 15,10$ % dans une heure, sans dépense d'énergie importante et la perte d'eau était trois fois plus élevé par rapport au séchage à l'air naturel.

Des chercheurs ont utilisé une nouvelle technique pour étudier le mécanisme de perte d'eau lors de la déshydratation des tranches de pomme. Ils se sont immergés dans des solutions sucrées et ont mesuré des concentrations de variables, une procédure connue sous le nom de post-trempage. À la suite des résultats, la teneur en humidité des tranches pourrait être réduite à une courte durée, sans dépense d'énergie importante et la perte d'eau était trois fois plus élevé par rapport au séchage à l'air naturel.

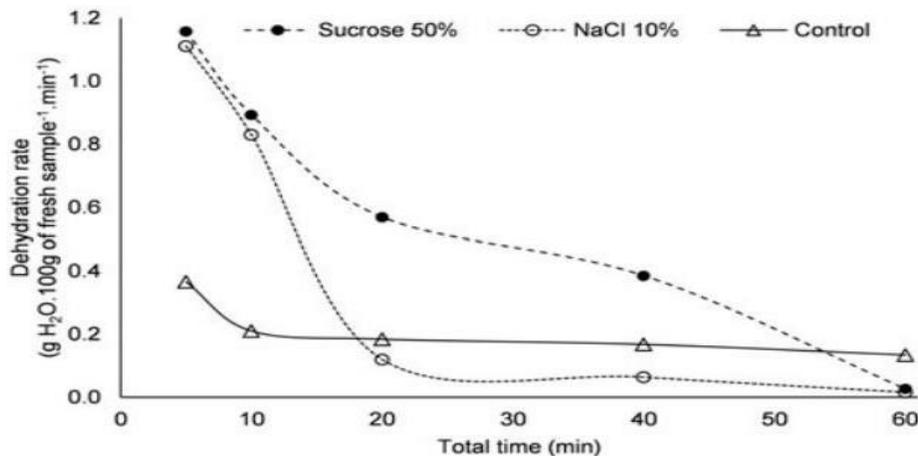


Fig. (II.11) : Courbe de taux de déshydratation d'une seule étape de traitement post-trempage pour le saccharose 50 % et le Na Cl 10 %, et les échantillons de contrôle.

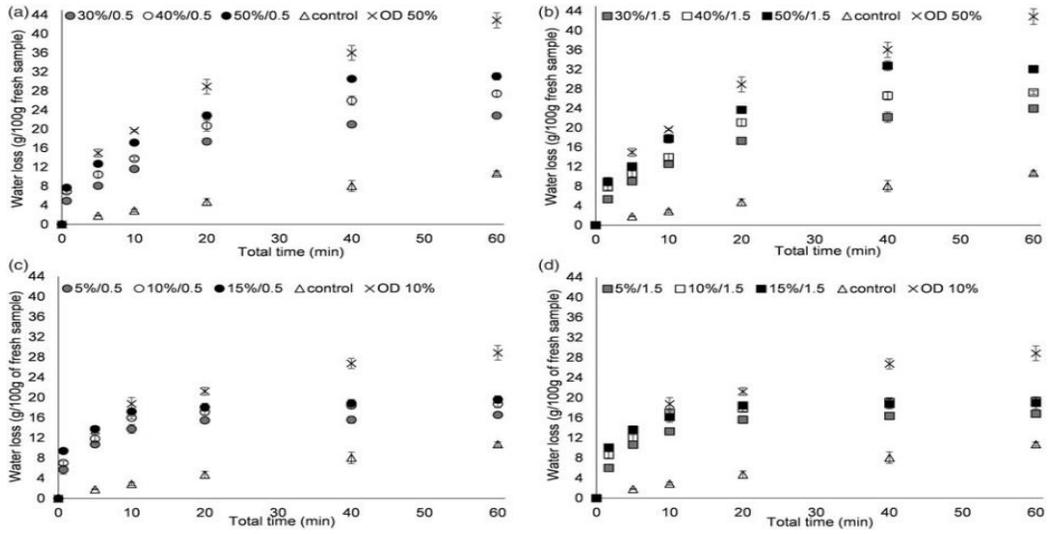


Fig. (II.12) : Variation de WL en fonction du temps.

Le travail de C. Quartaert et al [9] se concentre sur l'effet du blanchiment sur la qualité structurale des tranches de pomme de terre qui ont été séchées à l'intervalle de 2 heures et 30 min à 48°C dans un séchoir à air convectif. Les propriétés mécaniques des échantillons ont été surveillées pendant le blanchiment, en tant qu'indicateurs de changements structurels. Le blanchiment favorise l'entraînement d'un affaiblissement de structure de la pomme de terre. La gélatinisation, qui s'est produite pendant les 2 premières minutes, n'a pas provoqué un affaiblissement immédiat du tissu de pomme de terre.

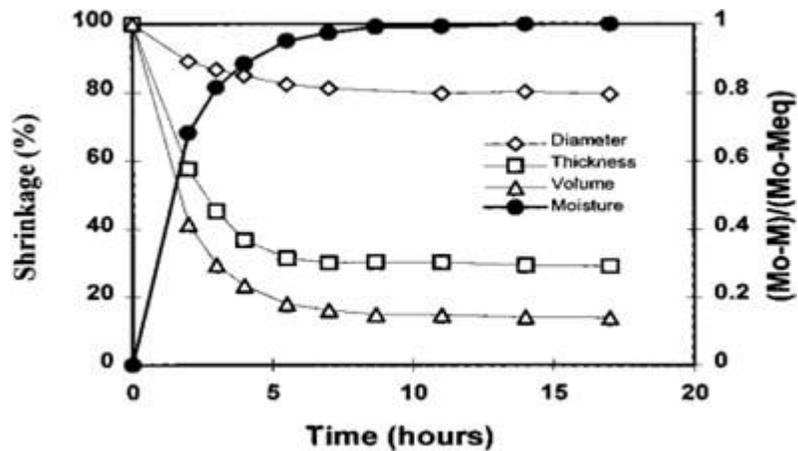


Fig. (II.13): Effet du séchage sur le diamètre, l'épaisseur et le retrait volumique des pommes de terre blanchies pendant 2 mm.

Plus de 80 % des modifications des propriétés mécaniques se sont produites au cours des 30 premières minutes de blanchiment. Les résultats ont indiqué que les changements survenus au cours des 2 premières minutes de blanchiment avaient une influence beaucoup plus grande sur la qualité structurale des pommes de terre séchées que les changements survenus entre 2 et 30 minutes de blanchiment.

D. Hosain et al. [10], vise par leur recherche à étudier les caractéristiques et les besoins énergétiques pour le séchage par micro-ondes des tranches de pomme de terre qui ont été rapportés à quatre densités de puissance micro-ondes de type (M945, Samsung Electronics Insu), soit 5, 10, 15 et 20 W/g sur des échantillons de tranche de pomme de terre d'épaisseur de 5mm. Au cours des expériences, les échantillons ont été séchés à la teneur en humidité finale de 0,08 à partir de 2,294(kgH₂O/kg sec).

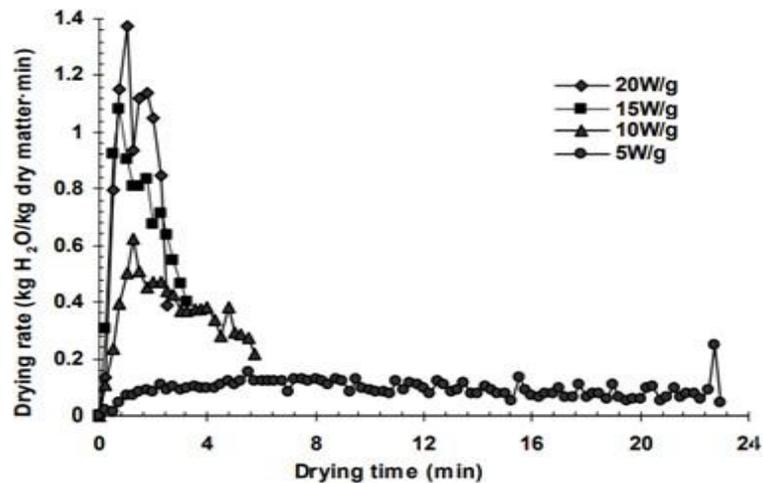


Fig. (II.14): Variations de la vitesse de séchage en fonction du temps pour le séchage par micro-ondes de tranches de pomme de terre.

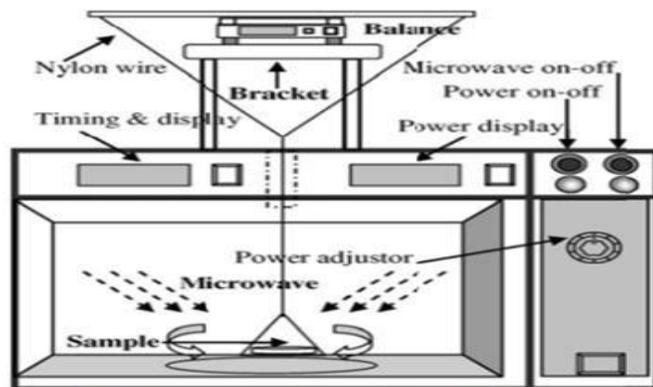


Fig. (II.15) : Principe d'un séchoir à micro-ondes.

Les données expérimentales ont été ajustées à six modèles de séchage : linéaire, Lewis, Henderson et Pabis, Wang et Singh, Page et Midilli et coll. des modèles. Les modèles ont été comparés à l'aide du coefficient de détermination, de l'erreur quadratique moyenne et du chi carré réduit. Le Midilli et al. Modèle décrit la meilleure courbe de séchage des tranches de pomme de terre.

M. Amal et F. Djamel [11], par leur présente étude visent à estimer les paramètres physico-chimiques (teneur en eau, poids, rapport de qualité), diffusivité massique et énergie d'activation.

La cinétique de séchage des dattes et pour deux découpes (entière et moitié) qui ont été analysé pour déterminer le coefficient de diffusion pour quatre températures de séchage (40, 50, 60 et 70°C) dans une étuve à convection naturelle à l'air chaud (type Memmert, Germany) jusqu'à le poids soit constant. Les résultats ont montré que la perte de poids des fruits et des teneurs en humidité est influencée par la variation de la température et de la découpe, le coefficient de diffusion varie avec l'augmentation de température, pour les dattes entières et moitiés.

L'équation d'Arrhenius donne une valeur de l'énergie d'activation de 12,00 et 9,54 (KJ/mol), pour les dattes entières et moitiés respectivement, cette dernière diminue avec la diminution de l'épaisseur.



Fig. (II.16) : Etuve à convection naturelle à l'air chaud (type Memmert, Germany).

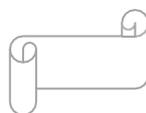


Tableau (II.2) : Estimation de la diffusivité et l'énergie d'activation en fonction des conditions opératoires.

Découpe	T (°C)	D ($m^2 s^{-1}$)	E_a (kJ/mole)	R^2
Entière	40	2.6×10^{-9}	12.00	0.9962
	50	3.08×10^{-9}		
	60	3.6×10^{-9}		
	70	3.99×10^{-9}		
Moitié	40	6.73×10^{-10}	9.54	1
	50	7.53×10^{-10}		
	60	8.38×10^{-10}		
	70	9.26×10^{-10}		

D. Fahloul1 et al [12], en réaliser ce travail pour l'étude de l'influence de la température de (55, 65, 75 °C), de la pression (20, 40, 60 cm Hg) et de la découpe (rondelle, cubique, bâtonnet) surla cinétique de séchage sous vide d'une étuve (type Jouan Ev100) de la pomme de terre, ainsi que l'estimation du coefficient de diffusivité massique et de l'énergie d'activation pendant le séchage sous vide. Les résultats ont montré que la température est la variable la plus importante lors du séchage des pommes de terre. La pression a un effet moins important. la forme rondelle est la plus appropriée pour le séchage avec une surface d'échange plus importante. Les valeurs de la diffusivité massique augmentent avec l'augmentation de la température et l'énergie d'activation diminue avec l'abaissement des pressions. Après un test organoleptique (aspect, texture, couleur et saveur) le couple optimal du séchage température-pression (65 °C et 20 cm Hg).

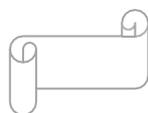




Fig. (II.17) : Etuve de séchage (type Jouan Ev100).

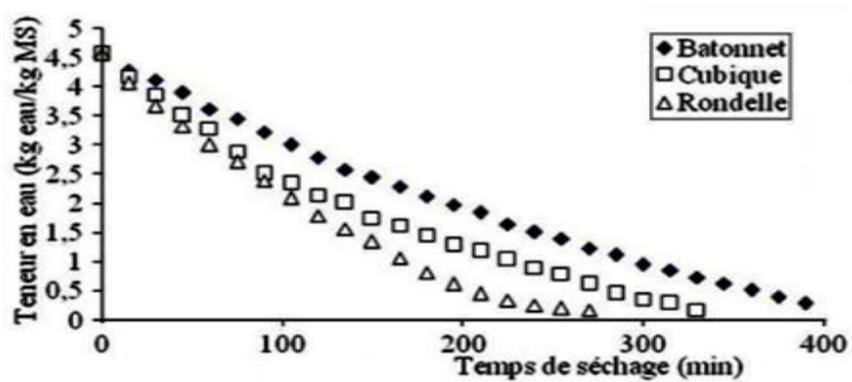


Fig. (II.18): Evolution de la teneur en eau fonction du temps pour les trois découpes à $T=55^{\circ}\text{C}$.

K. Mohammad et al [13], voulez on arrivé par cette étude à présenté une modélisation mathématique du processus de séchage des tranches d'aubergine dans un séchoir à bande continue. Les expériences de séchage des tranches d'aubergine ont été menées à trois niveaux de température de l'air de 45, 60 et 75 °C, et à des vitesses d'entrée d'air de 1, 1,5 et 2 m/s et des vitesses linéaires de bande de 2,5, 6,5 et 10,5 mm/s. Pour estimer la cinétique de séchage des tranches d'aubergine, différents modèles mathématiques ont été utilisés pour s'adapter aux données empiriques du séchage en couche mince. Les modèles ont été comparés en fonction de leurs coefficients de détermination (R^2), des Chi carrés réduits (χ^2) et des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) entre les taux d'humidité (MR) expérimentaux et prédits. Les résultats obtenus montrent que. Comparaison des résultats ANN avec modèles mathématiques ont révélé que la modélisation mathématique donne une meilleure précision pour prédire la teneur en humidité et taux de séchage de l'aubergine.

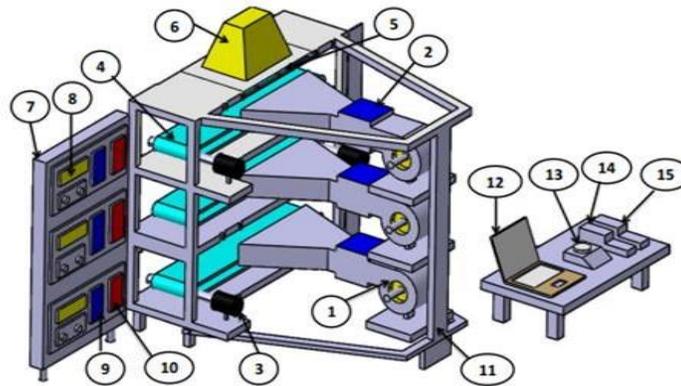


Fig. (II.19) : Séchoir à bande continue.

L'objectif principal de la présente étude de **G. Davoudet al [14]**, était de réaliser une étude expérimentale et théorique du séchage des tranches de champignons et de déterminer les caractéristiques de transfert de masse des échantillons séchés en différentes conditions. Les tranches de champignons de deux épaisseurs de 3 et 5 mm ont été séchées à des températures de l'air de 40, 50 et 60 °C et des débits d'air de 1 et 1,5 m s⁻¹, dans un séchoir à air chaud illustré à la Fig. 1. Il a été observé que l'ensemble du processus de séchage a eu lieu dans la période de taux de séchage décroissant. La diffusivité effective de l'humidité et le coefficient de transfert augmentait avec l'augmentation de la température de l'air, du débit d'air et de l'épaisseur des échantillons .

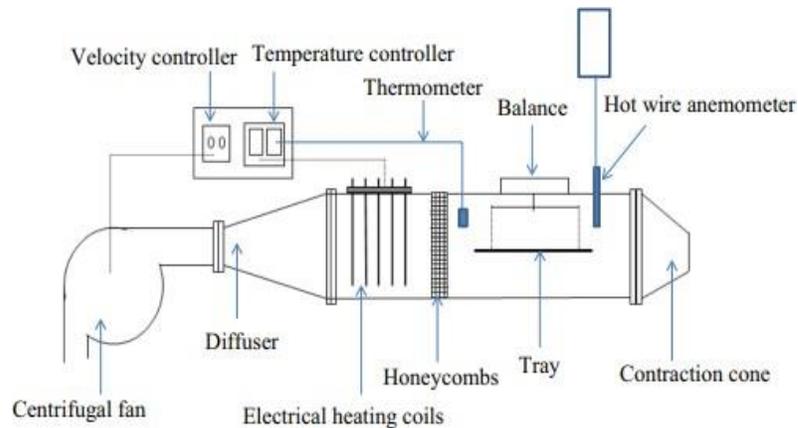


Fig. (II.20) : schéma séchoir à air chaud.

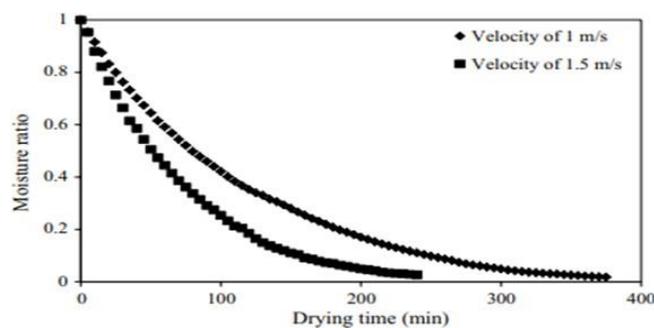


Fig. (II.21) : courbes de séchage (MR/t) des tranches de champignons à T=50°C et L= 5 mm.

L'étude de **D. Jalal et al [15]**, agisse sur la démonstration de la fiabilité de l'application du séchage micro-onde intermittent combiné à l'air chaud asséchant sur des échantillons de tranche de pomme de terre cubiques sous un prétraitement dans des solutions de saccharose différentes. L'astuce a été de fixer la température et la vitesse du séchage et en jouer sur le rapport d'impulsion de la micro-onde et l'augmentation de la concentration osmotique. Les résultats de cette expérience montrent qu'une combinaison d'un prétraitement à l'aide de ce processus réduit le temps du séchage à 54% et génère une consommation d'énergie **moins élevée**.

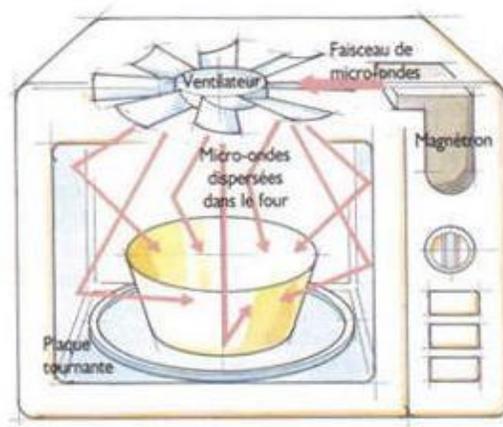


Fig. (II.22) : Schéma montrant le micro-ondes.

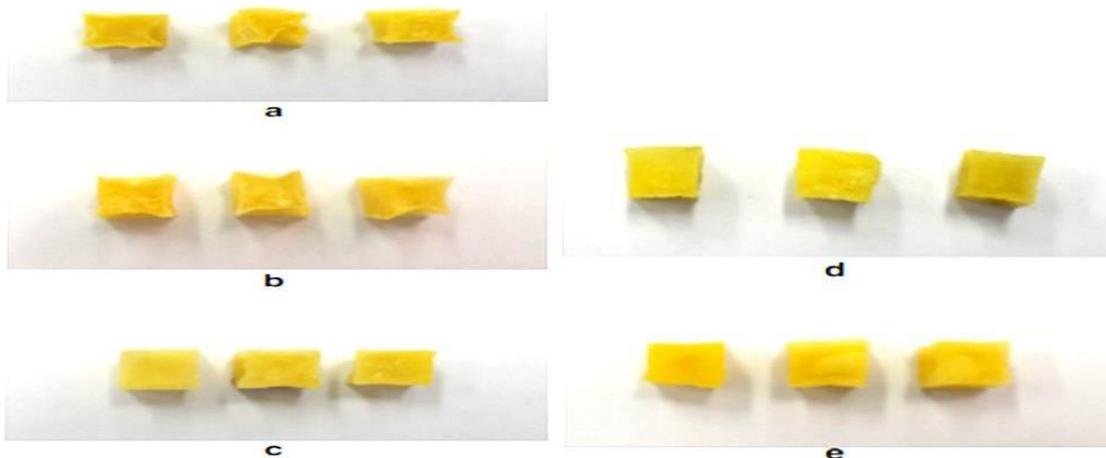


Fig. (II.23): Photos (a, b, c, d, e) de pommes de terre séchées aux micro-ondes.

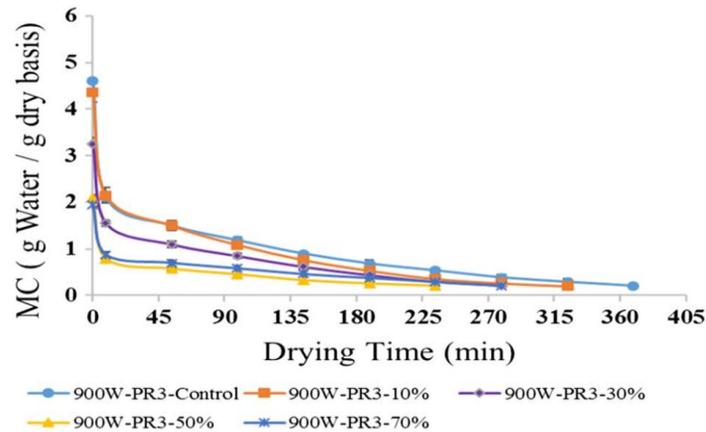


Fig. (II.24) : courbes de séchage (MR/t) des tranches de pomme de terre prétraitées à la puissance de 900 W à différentes concentrations osmotique de micro-onde

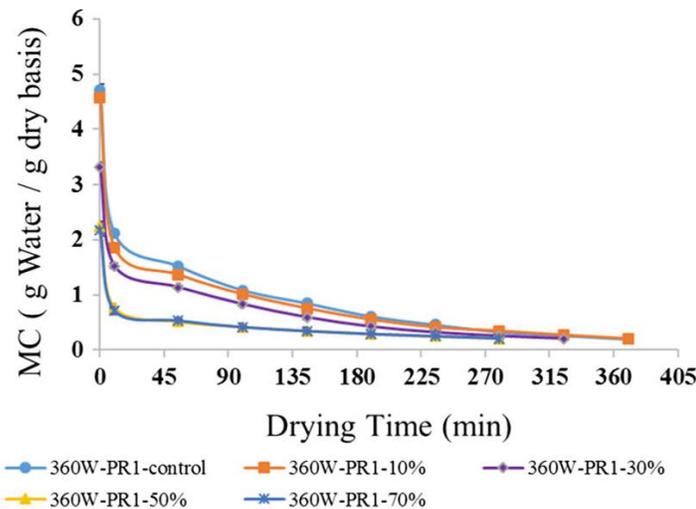


Fig. (II.25) : courbes de séchage (MR/t) des tranches de pomme de terre prétraitées à la puissance de 360 W à différentes concentrations osmotique de micro-onde

Les expériences de séchage de **B. Sana et al [16]**, ont été réalisées dans différentes conditions de vitesse, de température et de l'air asséchant afin d'obtenir la courbe de séchage caractéristique pour étudier les cinétiques de séchage à travers une soufflerie a

convection forcée en couches hachées de la tomate. Les résultats de cette expérience ont été synthétisés à l'aide de deux approches : une cinétique comparative de courbe de séchage et des équations empiriques ou semi-théoriques permettant de décrire l'évolution de la teneur réduite en eau au cours du temps.

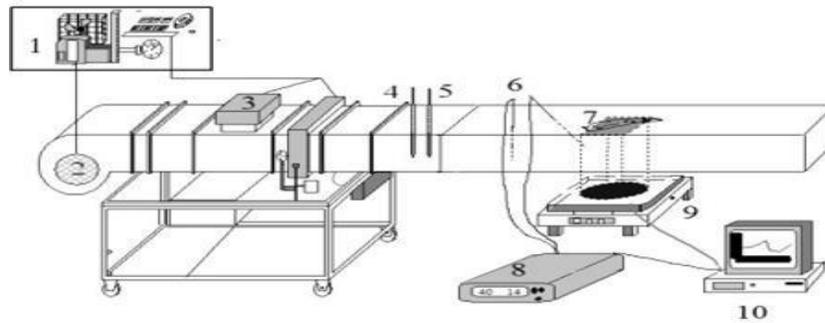


Fig. (II.26) : Schéma de la soufflerie aérothermique à atmosphère contrôlée.

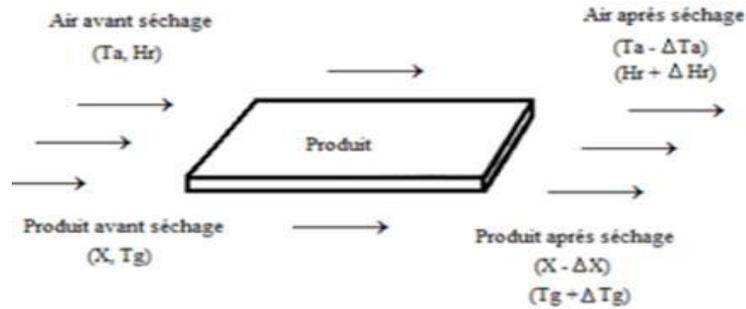


Fig. (II.27) : Principe de séchage d'une couche mince.

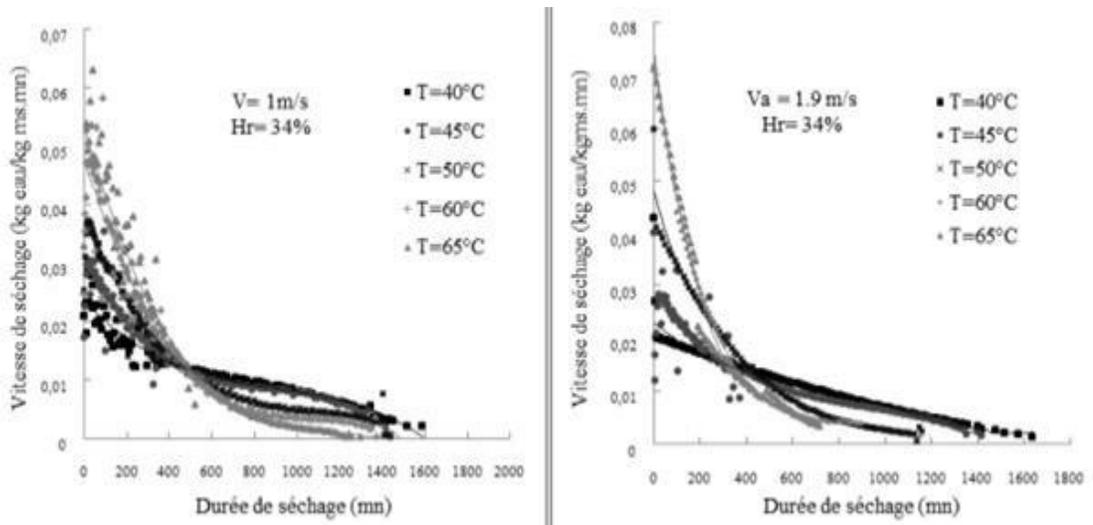


Fig. (II.28) : Variation de la vitesse de séchage des échantillons de tomates pour les différentes conditions de l'air asséchant.

B. Sana et al [16], ont confirmé que La température a une influence plus importante que la vitesse et l'humidité de l'air asséchant sur les cinétiques de séchage. Le modèle Approche Diffusion et le modèle Exponentiel à deux termes sont les plus appropriés pour la description de ce processus.

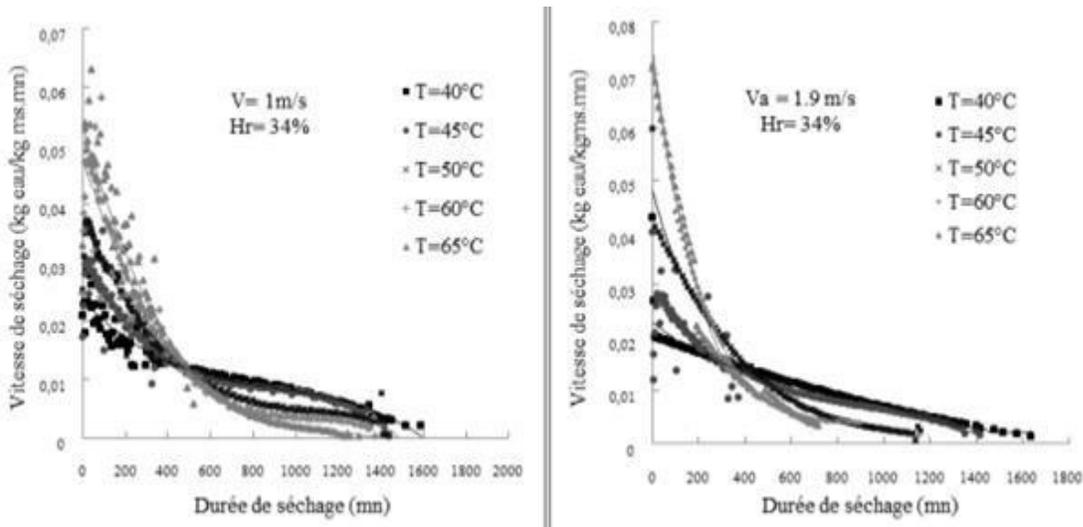


Fig. (II.28) : Variation de la vitesse de séchage des échantillons de tomates pour les différentes conditions de l'air asséchant.

T. Amin et al [17], ont voulu rapporter les valeurs de la diffusivité et l'Energie d'activation déterminer à partir du cinétique de séchage d'une expérience qui a été menée à étudier le séchage des tranches minces de tomate sous des températures de (40,50,60,70 et 80°C) en combinant à deux vitesses de l'air et trois niveaux d'humidité relative. Les résultats montrent que le séchage a eu lieu dans la période de taux de chute, le transfert d'humidité a été décrit par l'application du modèle de diffusion de Fick pour les températures utilisés et les valeurs de l'Energie d'activation et la valeur constant de diffusivité obtenues à partir d'une relation d'Arrhenius montre l'effet de la température de l'air de séchage, de la vitesse de l'air et de l'humidité relative sur la diffusivité. Cela implique que l'élimination de l'humidité du produit était régie par le phénomène de la diffusion.

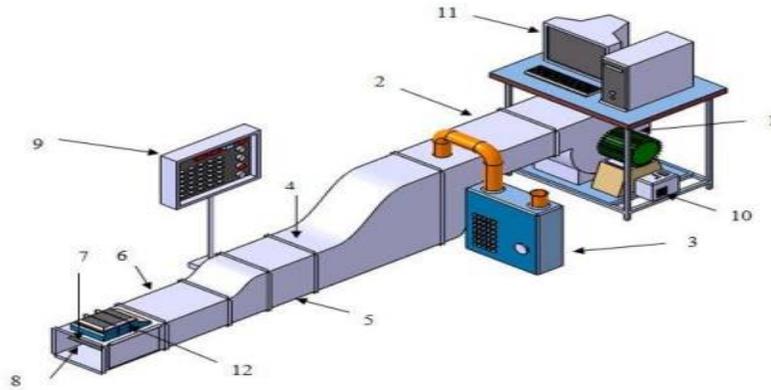


Figure 1: Pilot thin-layer drying

1-Fan 2- dehumidifier 3- humidifier 4- relative humidity sensor 5- heaters 6- Straightener 7- temperature sensor 8- Tray 9- control board 10- inverter 11- computer 12- digital balance

Fig. (II.29) : Schéma du séchoir pilote des couches minces : 1-ventilateur 2- déshumidificateur 3- humidificateur 4-detecteur d'humidité 5-chauffage 6-lit 7-detecteur de température 8- ouverture 9-moniteur 10-convertisseur 11-ordinateur 12-balance digitale

Tableau (II.3): Estimation de la diffusivité effective de l'humidité dans différentes conditions de sécheur d'air.

Air Vélocité (m/s)	Relative Humidity %	Diffusion coefficient (m^2/s)				
		80°C	70°C	60°C	50°C	40°C
1.5	20	5.8354×10^{-9}	3.7099×10^{-9}	2.6425×10^{-9}	2.2227×10^{-9}	1.4708×10^{-9}
2	20	6.4037×10^{-9}	3.5491×10^{-9}	2.4151×10^{-9}	1.736×10^{-9}	2.1556×10^{-9}
1.5	40	6.3449×10^{-9}	3.5673×10^{-9}	2.701×10^{-9}	1.7135×10^{-9}	1.2383×10^{-9}
2	40	5.2563×10^{-9}	3.2624×10^{-9}	2.2845×10^{-9}	1.5456×10^{-9}	1.221×10^{-9}
1.5	60	5.5372×10^{-9}	3.7127×10^{-9}	1.8525×10^{-9}	1.6652×10^{-9}	9.9119×10^{-10}
2	60	5.1497×10^{-9}	2.6688×10^{-9}	2.918×10^{-9}	1.5291×10^{-9}	1.2667×10^{-9}

Tableau (II.4): Énergie d'activation estimée et constante de diffusivité de l'humidité dans différentes.

Relative humidity (%)	Air velocity (m/s)	D_0 (m^2/s)	E_a ($\frac{KJ}{mol}$)	R^2
20	1.5	1.7695×10^{-4}	33.3299	0.975
20	2	3.831×10^{-3}	37.5474	0.887
40	1.5	1.28765×10^3	41.737	0.978
40	2	2.3563×10^{-4}	38.1615	0.986
60	1.5	3.09156×10^{-2}	43.2287	0.981
60	2	1.2208×10^{-3}	39.6889	0.934

B. Mohsen et al [18], ont travaillé sur l'étude des caractéristiques de déshydratation et qualité des tranches de pomme dans un séchoir à l'air chaud, sous des températures de 50, 60 et 70°C à un débit d'air fixe (1.5m/s). **B. Mohsen** a remarqué que la température avait un effet significatif sur le temps de séchage sur les échantillons étudiés et le processus de séchage n'était pas visuel à la période de vitesse constante avec toutes les températures des essais seulement à des vitesses décroissantes que le processus apparut. Entre huit modèles mathématiques choisis pour simuler l'expérience le modèle Midilli a été considéré comme le meilleur modèle décrivant les courbes de séchage, suivi du modèle logarithmique. La température de séchage a eu un effet significatif sur la diffusivité effective des échantillons, et elle n'a pas un effet direct et évident sur le rétrécissement des échantillons séchés, à mesure que la température de séchage augmentait de 50 à 70 °C, le facteur de changement de couleur total diminuait de manière significative.

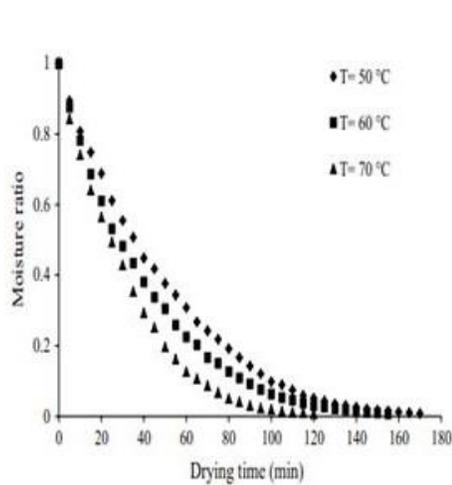


Fig. (II-31): Variation du taux d'humidité des tranches de pomme avec le temps aux différentes températures de l'air.

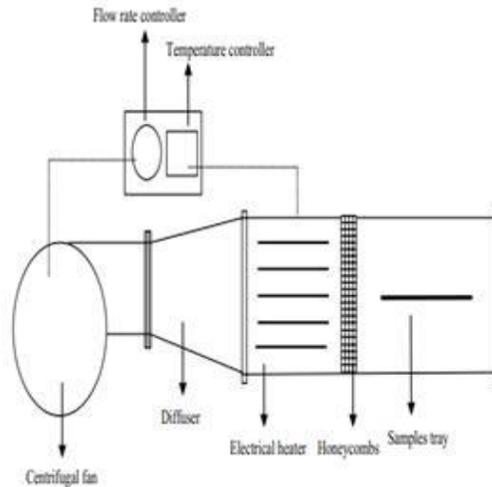


Fig. (II-30): Un schéma du séchoir sel_up.

F. nAlhassane et al [19], ont travaillé sur la valorisation du processus de séchage de tranches de mangue en différentes épaisseurs (1.5, 1mm) et températures (40,50 et 60°C) dans un four à moufle (thermo-scientifique), huit modèles mathématiques ont été adoptés pour l'ajustement des valeurs expérimentales. Les résultats obtenus montrent que les vitesses de séchage sont plus importantes pour les températures élevées et pour la petite épaisseur.

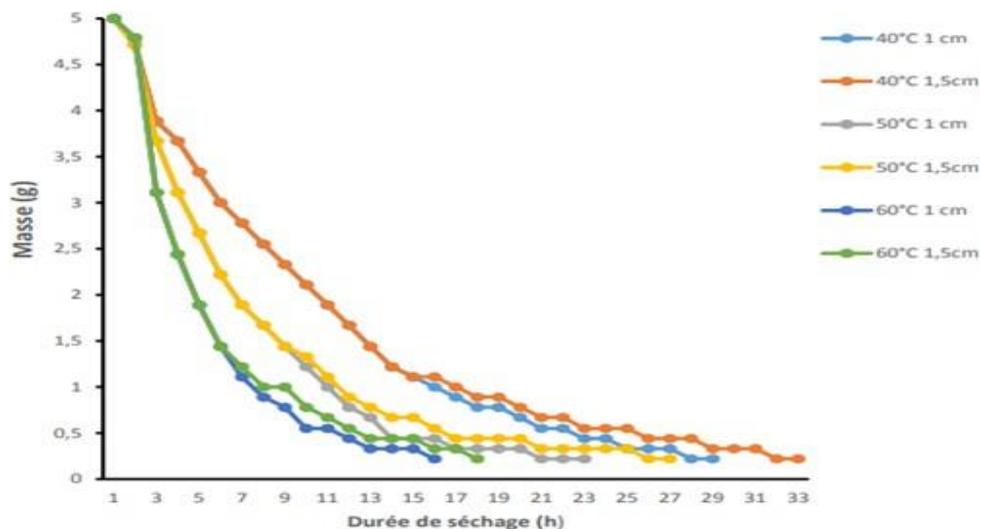


Fig. (II-32) : Evaluation de la perte différentielle de masse des tranches de mangue au cours du séchage à différentes températures.

J. Mohammad et al [20], se base sur l'étude de la consommation d'Energie du séchage des tranches de pomme de terre par infrarouge sous vide. Pour des puissances infrarouges de 100,150 et 200W combinaient à des niveaux de vide (0,20,80 et 140mm [Hg]) sur des épaisseurs de (1,2 et 3mm), Le résultat obtenu montre que la consommation d'Energie diminue en réduisant l'épaisseur d'échantillon, et L'application du vide au séchage infrarouge réduit le temps de séchage conformément à la réduction de la consommation d'Energie. Cette combinaison accélère le temps de séchage et augmente la consommation d'Energie par rapport du séchage au rayonnement infrarouge simple.

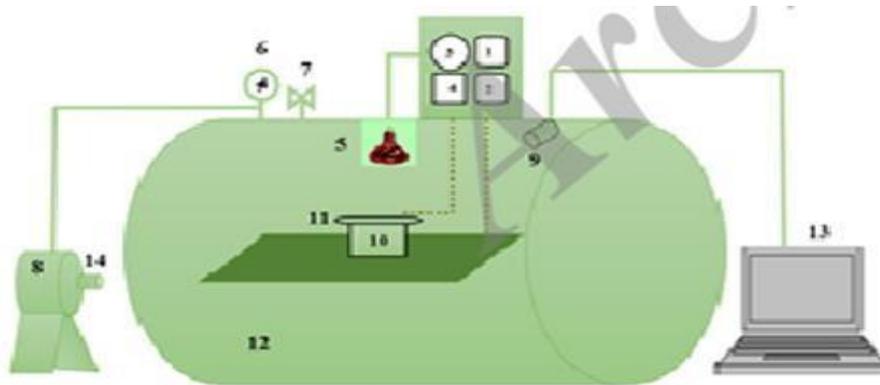


Fig. (II-33) : Système de séchage sous vide infrarouge.

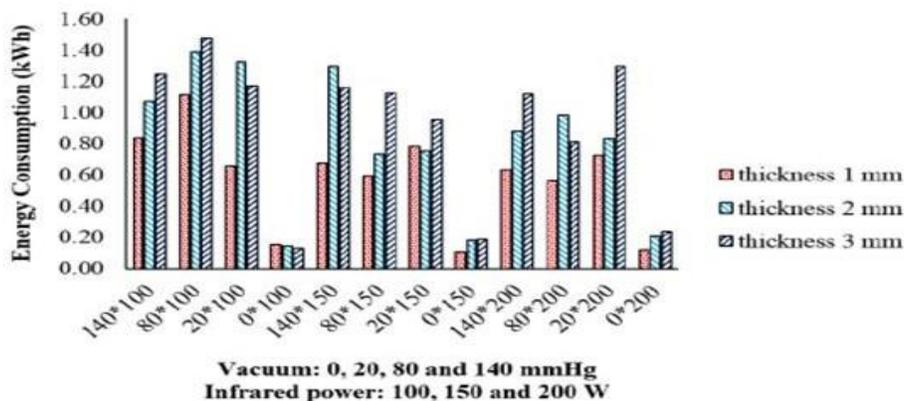


Fig. (II-34) : Consommation d'énergie dans le séchage infrarouge sous vide de tranches de pomme de terre.

Le but de travail de **T. Afolabi Morakinyo [21]**, s'articule sur des variables conditions du séchage sur les propriétés physiques des tranches de pomme de terre douce. L'essai s'est effectué sur des coupes rectangulaire et cylindrique d'épaisseur de 4 et 6mm blanchies sous l'eau à 90°C plus des échantillons témoin (non blanchies), séchés à l'étuve a des températures de (50, 70 et 90°C) et d'autres par exposition direct au soleil durant 6h à 50°C pendant 3 jours. Le changement de dimension et la densité apparent plus que la perte d'humidité a été visait sur cette expérience. Les résultats montrent que la température influe directement sur la perte d'humidité et le % de rétrécissement, les échantillons de 4 mm d'épaisseur ont perdu plus d'humidité avec un pourcentage de rétrécissement plus élevé que les échantillons de 6 mm d'épaisseur, mais pas significativement ($P>0,05$), l'épaisseur avait plus d'influence sur le rétrécissement que les échantillons non blanchis et ce dernier n'a u au qu'un effet sur la densité apparente. Les équations logarithmiques ont donné le meilleur ajustement de la perte d'humidité avec le temps aux différentes températures.

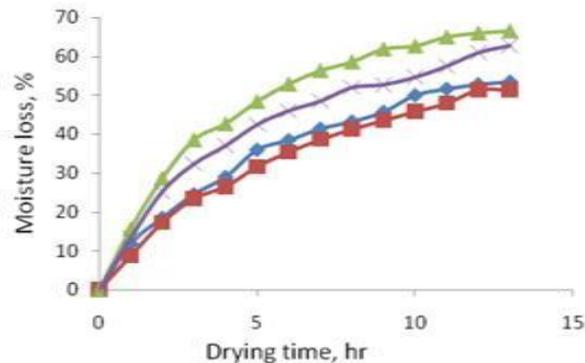


Fig. (II-35) : Effet de la température et du temps de séchage sur le pourcentage de perte d'humidité d'échantillons sucrés de forme rectangulaire non blanchis de 4 mm d'épaisseur.

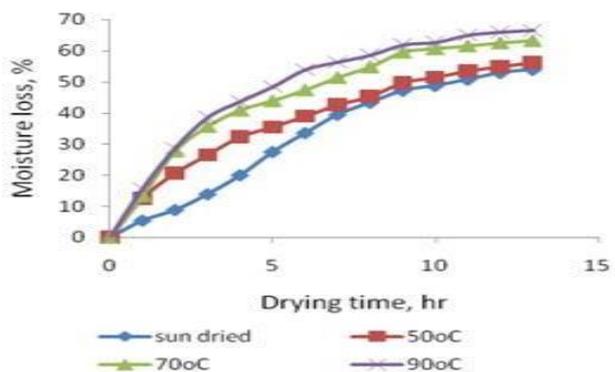


Fig. (II-36) : Effet du traitement de séchage, de l'épaisseur de l'échantillon et de la durée sur le % de perte d'humidité des tranches de patates douces de forme rectangulaire séchées au four à 90°C.

Conclusion:

Après avoir pris connaissance de ces études antérieures (séchage des produits agricoles). Nous pouvons dire que ces études peuvent être développées et améliorées en utilisant autant de technique nécessaire adaptées par les chercheurs , ils s'appuient également sur plusieurs modèles mathématiques pour comparer leurs études avec des études antérieures, et le but de tout cela est d'obtenir la meilleure qualité et de réduire le temps de séchage.

Reference:

- [1] Dryden, I. G. C. (1982). Chapter 9-Drying, conditioning, and industrial space heating. *The Efficient Use of Energy*, 2nd ed.; Dryden, IGC, Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 166-198.
- [2] Azimi-Nejadian, H., & Hoseini, S. S. (2019). Study the effect of microwave power and slices thickness on drying characteristics of potato. *Heat and Mass Transfer*, 55(10), 2921-2930.
- [3] Doymaz, I. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices. *Journal of Food processing and preservation*, 33, 145-160.
- [4] Compaore, C. S., Compaore, H., Inoussa, G. O., & Sawadogo-Lingan, H. (2020). Impact du prétraitement au sel (NaCl) et du séchage sur les caractéristiques nutritionnelles et microbiologiques de l'oignon bulbe. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(3), 685-697.
- [5] Petković, M., Lukyanov, A., Rudoy, D., Kurćubić, V., Mileti, N., & Safarov, J. (2021, June). Potato thin layer convective dehydration model and energy efficiency estimation . In *E3S Web of Conferences*.
- [6] Marko, P & Alexander, L (January 2021). Potato thin layer convective dehydration model and energy efficiency estimation. 273:07028.
- [7] Hafezi, N., Sheikhdavoodi, M. J., & Sajadiye, S. M. (2015). The effect of drying kinetic on shrinkage and colour of potato slices in the vacuum-infrared drying method. *International Journal of Agricultural and Food Research*, 4(1).
- [8] Mokhtar, W. M. F. W., Ghawi, S. K., & Niranjana, K. (2019). Dehydration of potato slices following brief dipping in osmotic solutions: Effect of conditions and understanding the mechanism of water loss. *Drying Technology*, 37(7), 885-895.
- [9] Mate, J. I., Quartaert, C., Meerdink, G., & Van't Riet, K. (1998). Effect of blanching on structural quality of dried potato slices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(2), 676-681.
- [10] Darvishi, H. (2012). Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14(1), 94-102.
- [11] MESSAOUDI, A., & FAHLOUL, D. Estimation de la diffusivité massique et cinétique de séchage à l'air chaud des dattes (Variété sèche).

- [12] Fahloul, D., Benmadi, F., & Boudraa, S. (2009). Estimation de la diffusivité massique et cinétique de séchage sous vide de la pomme de terre (variété Spunta). *Journal of Renewable Energies*, 12(4), 655-665.
- [13] Kaveh, M., Amiri Chayjan, R., & Nikbakht, A. M. (2017). Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. *Heat and Mass Transfer*, 53(6), 2045-2059.
- [14] Ghanbarian, D., Baraani Dastjerdi, M., & Toriki-Harchegani, M. (2016). Mass transfer characteristics of bisporus mushroom (*Agaricus bisporus*) slices during convective hot air drying. *Heat and Mass Transfer*, 52(5), 1081-1088.
- [15] Dehghannya, J., Bozorghi, S., & Heshmati, M. K. (2018). Low temperature hot air drying of potato cubes subjected to osmotic dehydration and intermittent microwave: Drying kinetics, energy consumption and product quality indexes. *Heat and Mass Transfer*, 54(4), 929-954.
- [16] Mariem, S. B., & Mabrouk, S. B. (2010). Cinétique de séchage et Courbe caractéristique de séchage d'une couche mince de tomate.
- [17] Taheri-Garavand, A., Rafiee, S., & Keyhani, A. (2011). Effective moisture diffusivity and activation energy of tomato in thin layer dryer during hot air drying. *International Transaction Journal of Engineering, Management and Applied Sciences & Technologies*, 2(2), 239-248.
- [18] Beigi, M. (2016). Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Science and Technology*, 36, 145-150.
- [19] Fofana, A., N'guessan, Y. D., & Assidjo, N. E. (2020). Modélisation mathématique du séchage dans un four (air chaud) de tranches de mangue (*Mangiféra indica* L.). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(7), 2476-2490.
- [20] Hafezi, N., Sheikhdavoodi, M. J., & Sajadiye, S. M. (2015). Study of energy consumption of potato slices during drying process. *Acta Technologica Agriculturae*, 18(2), 36-41.
- [21] Afolabi, M. T., Black, A. G., & Adekunbi, T. K. (2016). The influence of drying on the physical properties of sweet potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(1), 301-313.

Chapitre III

*Etude expérimentale
et théorique*

III.1 Introduction :

Le séchage est un processus qui tient à éliminer partiellement ou totalement l'eau contenu dans un corps humide par l'évaporation de cette eau. Ce processus permet à l'apport de chaleur de changer la phase du liquide et de transférer la masse (liquide imprégné dans le solide passe à l'état de vapeur par l'air asséchant).

Ce procédé est divisé en deux parties le séchage forcé et le séchage naturel :

Séchage forcé, maîtrisé par une force extérieure, comme par exemple l'apport d'un courant d'air chaud dans la salle de séchage, contrairement au séchage naturel qui n'implique aucune force.

III.2 Etude expérimentale :

Le séchage est la procédure physique la plus couramment utilisée pour assurer la sécurité et la longévité des aliments. La déshydratation est l'un des processus unitaires clés dans une variété d'industries. En raison de la forte teneur en humidité, il est difficile de stocker en toute sécurité les produits agricoles fraîchement récoltés. Le procédé peut également avoir une large gamme d'utilisations.

Les séchoirs à air chaud conventionnels sont les systèmes les plus largement utilisés pour sécher les produits agricoles et alimentaires. L'utilisation de séchoirs pour déshydrater les matières, en revanche, est une mauvaise utilisation présente plusieurs défauts graves. Une faible conductivité thermique produit un transfert de chaleur limité de l'air chaud vers les parties internes des matériaux. Concernant les produits agricoles ou alimentaires, une température élevée peut provoquer un effet néfaste sur la qualité physique (la forme, géométrie) et chimique (saveur, arôme et qualité nutritionnelle) du produit. Une température de moins peut causer la dégradation totale du produit par la propagation des moisissures.

La puissance de l'étuve a été introduite et surveillée pour tenter de remédier aux inconvénients. Cette dernière, par rapport à celle du séchage solaire, favorise un meilleur transfert de chaleur et plus homogène, ce qui se traduit par une procédure d'élimination de l'humidité plus rapide grâce à la possibilité du maintien et du contrôle de la température. La masse du produit est chauffée d'une manière volumétrique pendant le séchage par étuve, ce qui entraîne une déshydratation rapide et uniforme.

Bien que diverses études sur le séchage par étuve été publiées dans la littérature ouverte, peu entre eux ont examiné l'impact de l'ajout de sel ou poudre à la surface d'échantillons, leurs épaisseurs sur l'efficacité du séchage et la consommation d'énergie. En conséquence, les principaux objectifs de l'étude étaient d'explorer et illustré les courbes de séchage par étuve de séchage des tranches de pomme de terre, et d'estimer l'impact des paramètres de séchage sur les caractéristiques d'élimination de l'humidité des tranches et la consommation d'énergie du processus.

III.2.1 Méthode expérimentale :

L'étude est menée à introduire du sel NaCl par addition en poudre directement comme prétraitement avant le procédé du séchage et analyser son effet sur la vitesse du séchage par rapport à l'épaisseur de tranche de pomme de terre.

Pour cela des pommes de terre ont été choisies de la variété spaunta récolte d'El Oued-Algérie, amenaient au laboratoire pédagogiques pour soutenir les travaux appliqués au département de génie mécanique de l'Université Mohamed Kheider Biskra -Algérie, lavée puis pelé à la main puis découpée a des tranches de diamètre de 4 cm et en couches minces a des épaisseurs de 2 et 3 et 4 mm à l'aide d'une découpeuse inox puis mesurées par un à pied coulisse (voir Fig. (III-1)) afin d'assurer les épaisseurs désirer. Des claies en étaient choisies de dimension de (25x25cm) pour inclure 9 échantillons pour chaque une.



Fig. (III-1): Un pied coulisse.

Les claies étaient pesées à la balance électronique avant d'accueillir les échantillons pour déterminer leur poids net, puis pesé une autre fois avec les échantillons au départ afin de déterminer l'élimination de l'humidité à chaque prise après 15min par rapport au taux d'humidité initial.

Chaque essai a nécessité une journée entre la préparation et les suivis jusqu'à la stabilisation du poids des échantillons pour chaque claie durant le séchage. Des problèmes en été affronté

pendant cette expérience qui ont coûté la répétition de la préparation des échantillons de quelque essais lié à la difficulté de découpage des tranches fines de pomme de terre pour ont arrivé à l'exactitude et aux épaisseurs voulus.

Des expériences de 27 jours ont été assister pour finir ce sujet expérimental a un intervalle de 8 à 10 heures pour chaque essai plus un suivi permanent par des prises de mesures chaque 15 minutes.

III.2.1.1 : Thermomètre digital à infrarouge :

Les mesures de la température en été effectuer à l'aide d'un thermocouple calibrés de type ECM TD 8891 a quatre canaux Thermomètre numérique -200 ~ 1372 ° C. (voir Fig. (III-2)).

Une première mesure s'effectue avant d'entamer au séchage par l'injection direct de la sonde de température au cœur de l'échantillon, puis une mesure instantané chaque 15min durant le séchage par la lecture direct sur l'écran du thermocouple.



Fig. (III-2) : Thermocouple numérique type ECM TD 8891 -200 ~ 1372 ° C.

III.2.1.2 : Hygromètre (modèle TPM-10) :

Un Hygromètre (modèle TPM-10) (voir **Fig. (III-3)**) a été placé au sein de l'étuve et un autre dans la cheminé pour contrôler en permanence le taux d'humidité suivant la circulation d'air chaud entrainer par le système de ventilation.



Fig. (III-3) : Hygromètre de contrôle (modèle TPM-10).

Ce modèle d'hygromètre est aussi équipé par un thermomètre digital pour vérifier parallèlement le taux d'humidité et la température au même lieu.

III.2.1.3: Hygromètre (KT908):

Un troisième hygromètre de type (KT 908) (voir **Fig. (III-4)**) a été placé devant l'étuve pour mesurer l'humidité et la température à l'air ambiant.

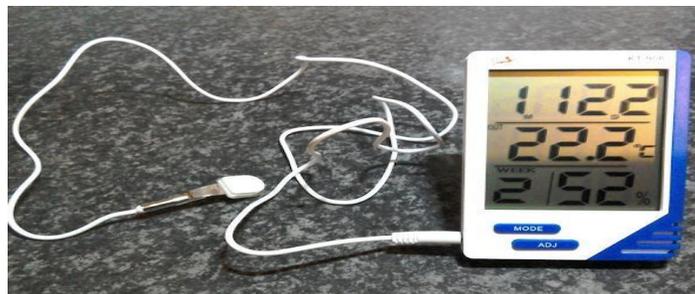


Fig. (III-4) : hygromètre (KT908).

III.2.1.4 : Anémomètre numérique (modèle PCE-TA30) :



Fig. (III-5) : anémomètre numérique (modèle PCE-TA30).

Un anémomètre numérique (voir (Fig. (III-5)), ayant une lisibilité de 0,01 m/s, a été utilisé pour mesurer la vitesse de l'air admit et à l'échappement de l'étuve grasse à la commande de contrôle de la ventilateur a pouvoir calculer le débit d'air physique pour chaque essai.

III.2.1.5 : Étuve de séchage Nabertherm :

Les expériences ont été effectuées sous une étuve de séchage Nabertherm de type elle est constituée d'une enceinte close et étanche, couverte en acier inoxydable, c'est une étuve ventilée qui permet d'obtenir une meilleure homogénéité thermique dans la chambre. La ventilation est ainsi réglable permettant une action personnalisée en fonction de la cuve. La circulation horizontale de l'air assure une uniformité de la température avec une variation de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ maximum, L'échappement continu dans la paroi arrière avec commande de réglage à l'avant. La régulation des paramètres de séchage par microprocesseur PID avec système d'autodiagnostic. La température maximale est de $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$, la plage de températures de fonctionnement de $+ 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ au-dessus de la température ambiante jusqu'à $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le chargement s'effectue sur plusieurs niveaux.



Fig. (III-6) : une étuve de séchage Nabertherm.

III.2.2 : Plan de l'expérience :

Le plan adapté sur cette expérience a été suivi selon le protocole schématisé comme suite :

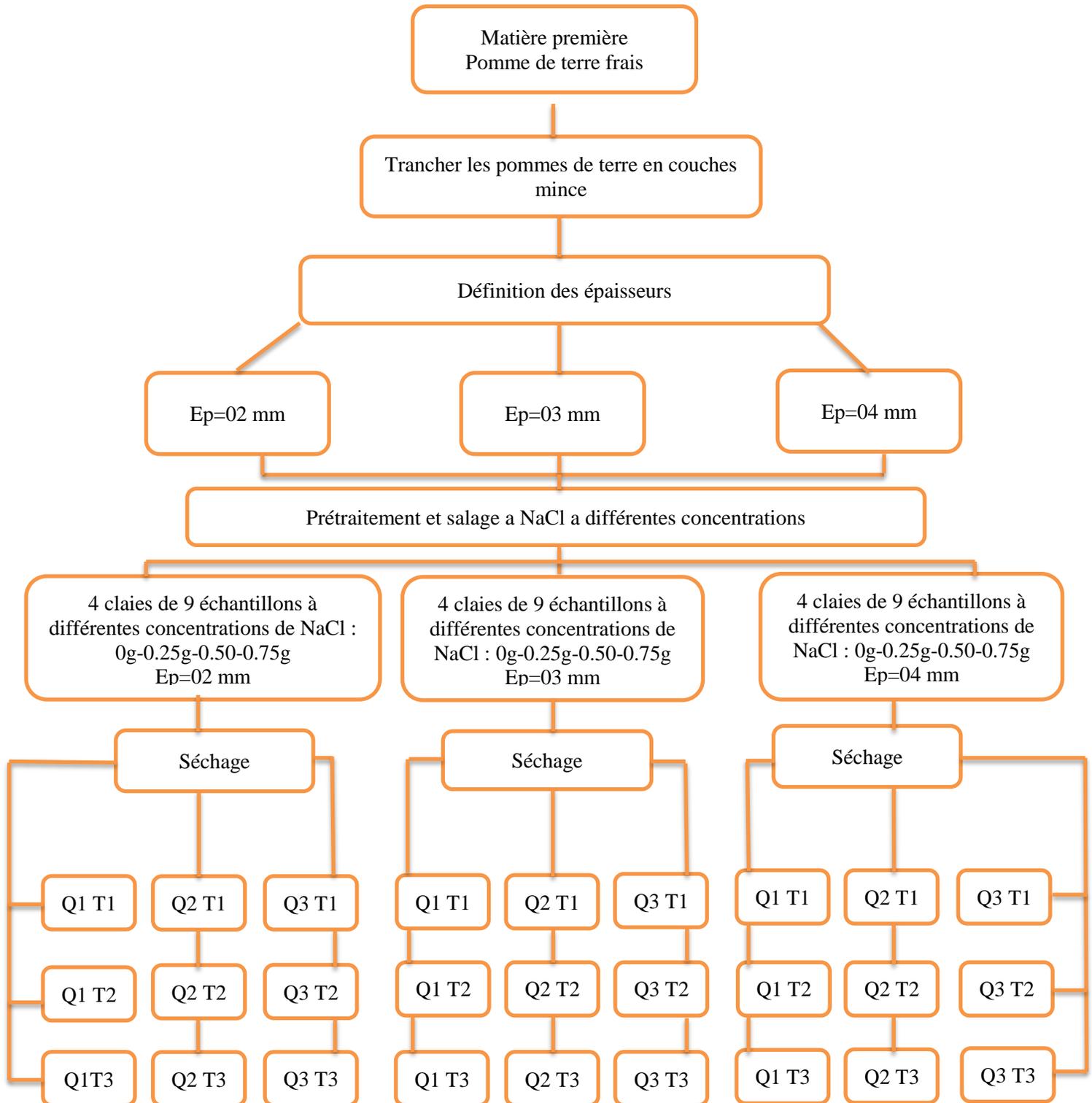


Fig. (III-7) : Schémas du protocole suivi lors de l'expérience

Des échantillons ayant les mêmes épaisseurs en été choisis pour chaque expérience. En fixant l'épaisseur et en se basant sur l'effet de la concentration du NaCl, la température et le débit d'air fourni.

Quatre claies charger de neufs échantillons pour chaque une des mêmes épaisseurs soumissent à des différentes concentrations en sel poudre pulvériser sur la surface de chaque échantillon après avoir pesé ces concentrations sur une balance électronique Sertorius de haute précision (voir Fig. (III-9)).

Des concentrations de (0.25g, 0.50g et 0.75 g) plus une claie pour des échantillons témoin sans prétraitement afin de comparer les résultats.

Les quatre claies en été placer à chaque essai à l'étuve a une température et un débit d'air fixe Pour chaque expérience en raison d'étudier l'influence de température et de débit d'air sur le séchage de pomme de terre nous avons combiné tous les températures et les débits d'air menées pour cette étude. Les températures et les débits d'air choisis pour notre sujet sont (40°, 50° et 70°C) et (1, 2 et 3 kg/s) respectivement.

Des mesures de température et de l'humidité à l'intérieur de l'étuve et a l'air ambiant plus que la température et le poids des échantillons ont été relevée et enregistrer chaque 15 min jusqu' à la stabilisation du poids des échantillons sur chaque claie.

La différence de poids signifie la masse d'eau extrait de l'échantillon ce qui justifie directement la teneur en eau évaporée pendant n'importe quelle période de temps.

La Fig. (III-7) et Fig. (III-8) montrent un exemple pour les expériences de séchage des tranches de pomme de terre réalisées avant et après le séchage à l'étuve :

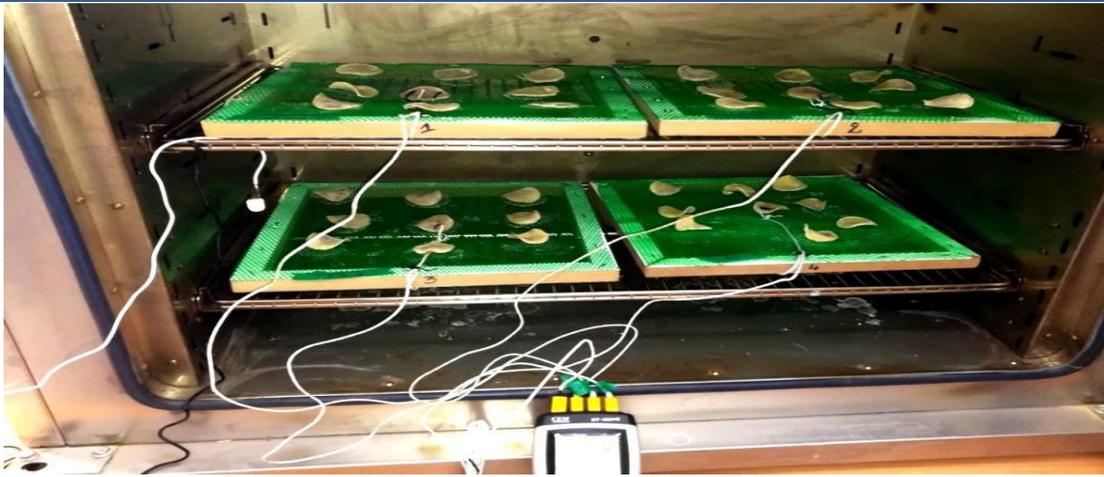


Fig. (III-8) : Tranches de pomme de terre de 4 mm d'épaisseur et à 40mm de diamètre séchées à un débit d'air massique de 1 g/s

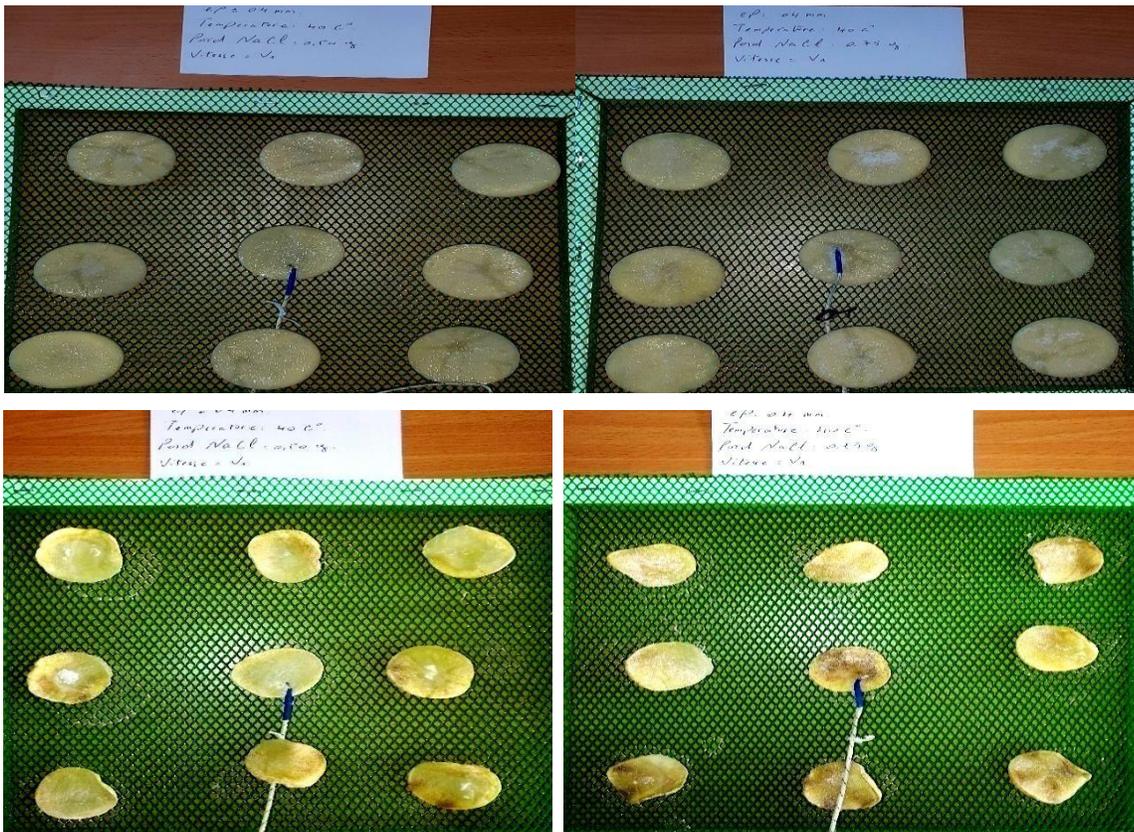


Fig. (III-9) : Des échantillons avant et après séchage à (40°C - 1 g/s) de 3mm d'épaisseur a différents teneur en NaCl (0g/0.25g/0.50g/0.75g)

III.2.2.1 : Balance électronique:

Balance utilisé pour les mesures de la concentration en poids de l' Na Cl



Fig. (III-10) : Sartorius Balances de précision Entris™.

- -Précision d'affichage 10 mg.
- -Temps de stabilisation pour ma lecture 1.1 sec.
- -Capacité 320g
- Balance utiliser pour les mesures du poids des échantillons avec claies afin de déterminer la teneur en eau après chaque 15 min de séchage jusqu'à la stabilisation du poids final.

III.2.2.2 : Balance Numérique portable OHAUS CS5000P :

Balance utilisé pour les mesures des claies vide et avec les échantillons de tranche de pomme de terre.

Maximum capacité 2000g / Lisibilité de 1 g



Fig. (III-11) : Balance Numérique portable OHAUS CS5000P.

III.2.2.3 : Wattmètre prise :

Ce dispositif nous permet de mesurer la consommation de l'électricité instantané durant le fonctionnement de l'étuve [1].



Fig. (III-12) : wattmètre prise.

III.2.2.4 : Etuve de séchage Naberterm:



Fig. (III-13) : Etuve de séchage Naberterm utilisé pour l'expérience.

- Etuve de séchage Naberterm Sur laquelle l'expérience a été réalisée
- une plage de température de 30-3000°C
- Couverture extérieur châssis/intérieur inox

- Moniteur Numérique réglable avec des températures de consigne
- System de ventilation contrôlé
- Volume 125 L



Fig. (III-14) : Contrôleur de débit d'air sur l'étuve de séchage Naberterm (30-3000°C).

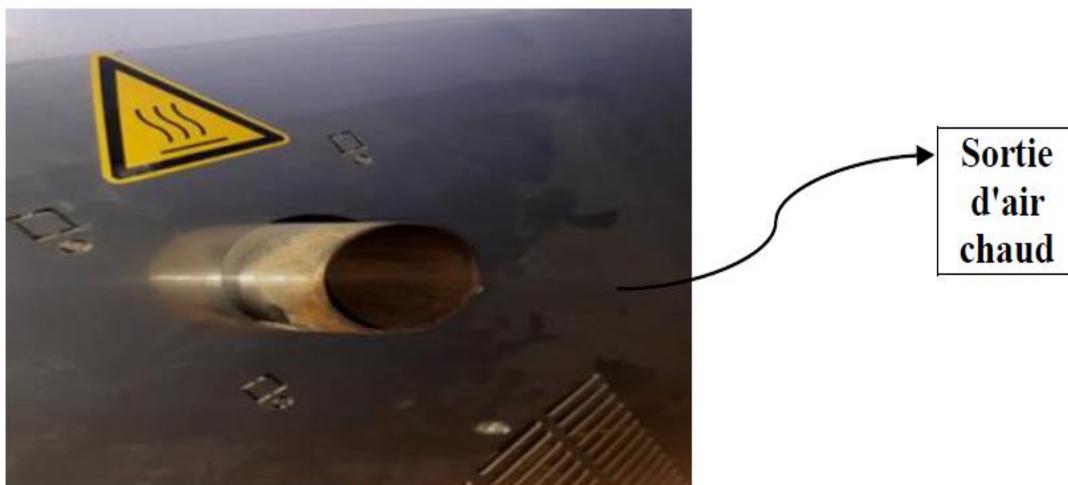


Fig. (III-15) : Un ventilateur d'extraction d'air chaud de l'intérieur du Etuve de séchage Naberterm (30_3000°C).

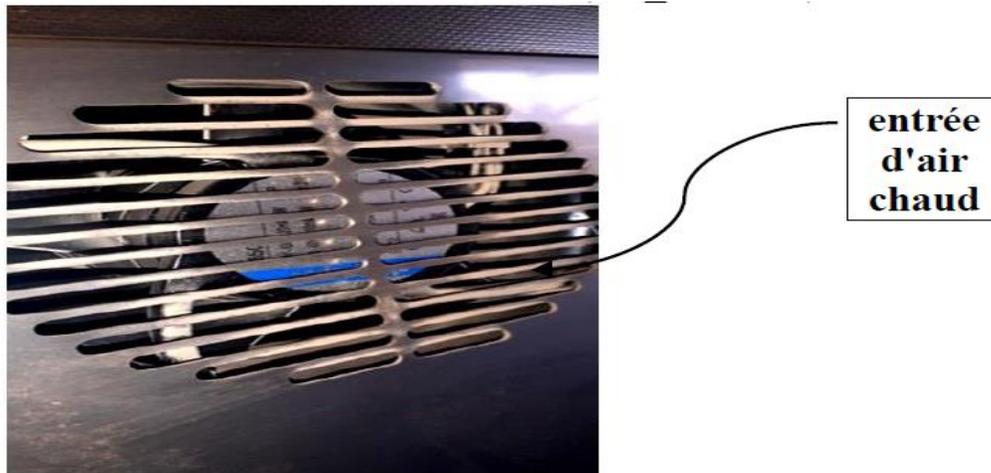


Fig. (III-16) : Ventilateur d'admission d'air à l'intérieur de l'Étuve de séchage Naberterm (30-3000°C).

III.2 Etude théorique :

Les modèles de séchage en couche mince décrivant les courbes de séchage des produits agricoles sont principalement divisées en trois catégories différentes, théoriques, semi théoriques et expérimentales. Le modèle théorique prend en compte la résistance interne au flux d'humidité tandis que les modèles semi-théoriques et expérimentaux prennent en compte la résistance externe au flux d'humidité entre le produit et l'air de séchage. Le taux d'humidité des échantillons pendant le séchage a été exprimé par l'équation (III-1):

$$MR = \frac{Mt - Meq}{M0 - Meq} [2]. \quad (III.1)$$

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

III.2.1 : Calcul des diffusivités effectives:

Il a été admis que les caractéristiques de séchage des produits biologiques dans la période de vitesse de chute peuvent être décrites en utilisant l'équation de diffusion de Fick.

La solution de la loi de Fick pour une dalle était, selon l'équation (III-2) [3].

$$MR = \frac{Mt - Meq}{M0 - Meq} \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2n+1} \right) \exp\left(- (2n + 1)^2 \pi^2 \frac{Deff t}{4H^2}\right) \quad (III.2)$$

Pour une longue période de séchage, l'équation (III-2) peut être encore simplifiée au seul premier terme de la série [4], Cette équation (III-2) est écrite sous une forme logarithmique selon l'équation (III-3):

$$\ln(MR) = \ln \frac{Mt - Meq}{M0 - Meq} = \ln \left(\frac{8}{\pi} \right) - \left(\pi^2 \frac{Deff}{4H^2} \right) t \quad (III.3)$$

Les diffusivités sont généralement déterminées en traçant les données de séchage expérimentales en termes de Ln (MR) en fonction du temps de séchage t dans l'équation (III- 3), car le graphique donne une ligne droite avec une pente selon l'équation (III-4) [5].

$$k_0 = \left(\pi^2 \frac{Deff}{4H^2} \right) \quad (III.4)$$

Conclusion :

Ce chapitre nous sert à apprendre à étudier le séchage avec le sens d'analyse et d'apprendre comment réaliser et suivre une expérience professionnelle spécialement avec les séchoirs four où nous choisissons à mener notre expérience pour mieux étudier le séchage par ses avantages et inconvénients sur les produits agricoles.

Référons :

[1] www.google.com.fr.wikipedia.org. "wattmètre prise".2022/0615

[2] : V. Shanmugam, E. N. (2006). Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer Renewable Energy31,.

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

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

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

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1 : Introduction :

Les études fondamentales et expérimentales menées au cours de ce travail permis de visualiser le procédé de séchage par un séchoir ventilé et alimenté par de l'électricité, et l'effort de chercher la capacité de répondre à des questions de base pour expliquer et comprendre le processus.

Ce mémoire n'est cependant que le début d'une large étude qui vise à arriver un jour de trouver une issue qui rapproche à comprendre les phénomènes liés à ce sujet.

IV.2 : Teneur en eau MR en fonction du débit massique (1, 3 et 4 g/s) :

D'après l'illustration graphique des courbes **Fig. (IV-1)** en fixant la température du séchage à 40°C, l'épaisseur d'échantillon à 2 mm et en jouant sur la vitesse de l'air asséchant et la teneur en sel NaCl :

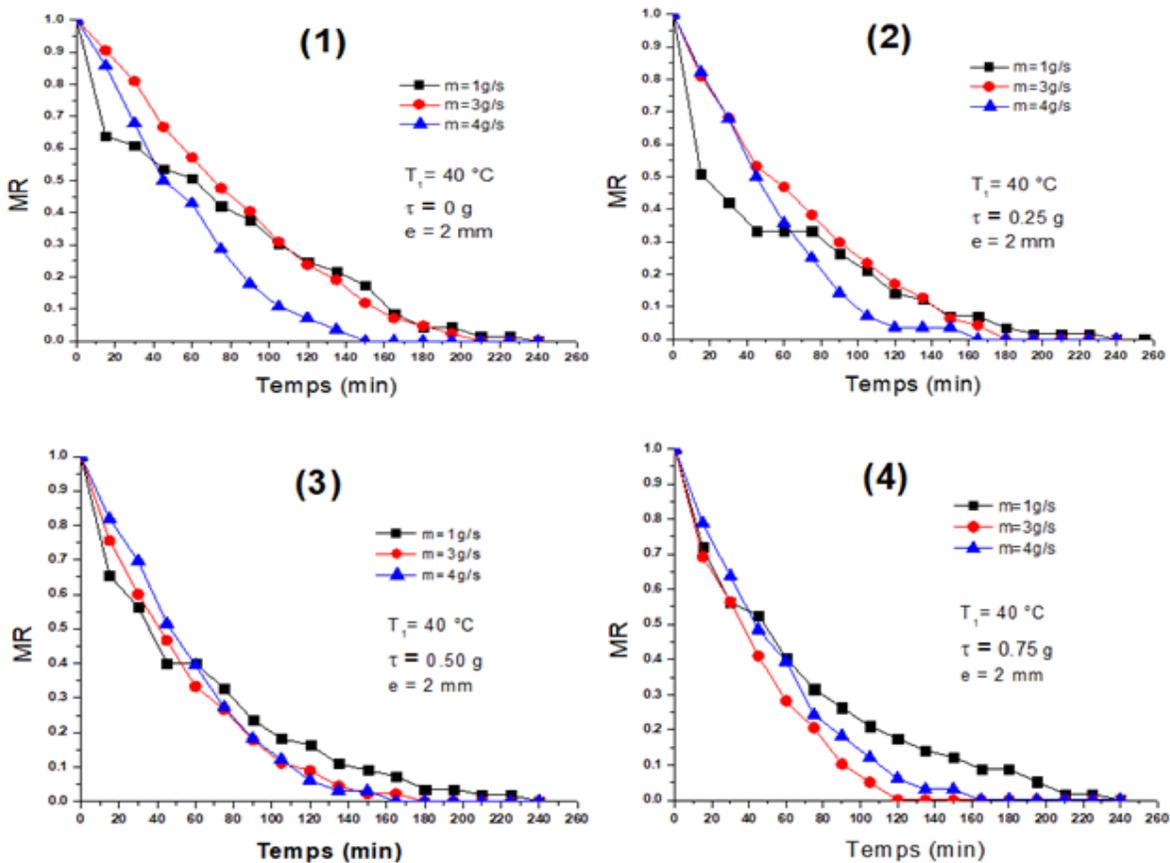


Fig. (IV-1) : Teneur en eau selon le débit massique et teneur de NaCl à température 40°C.

En voit clairement pour les échantillons non traité a l'**NaCl** sur le **Fig. (IV-1) : N°1** que l'augmentation du débit d'air agis proportionnellement sur la vitesse du séchage et le plus faible et le plus faible débit mène à la durée la plus lente du séchage. Le débit d'air de 1g/s accélère la déshydratation au départ jusqu'à 35% à moins de 20 min, il ces apparu une période presque constante entre 20 à 45min puis il commence à ralentir jusqu'à la stabilisation du poids d'échantillons à 240 min.

La teneur en NaCl a 0.25g selon le **Fig. (IV-1) N°:2** à effectuer une légère accélération du processus de séchage vis-à-vis les trois débits d'air choisis avec un écart +/- de 30 min conformément au débit d'air de 3 g/s et de 40 min pour le débit d'air de 1g/s par rapport à la cinétique du séchage des échantillons non traitée, tondît qu'une dégradation remarquer suite au 5débit d'air de 4 g/s en comparatif avec les mêmes échantillons non traités.

La chute du teneur en eau par excitation du faible débit d'air de 1 g/s est considérable par rapport à (3 et 4 g/s) jusqu'à 50% a un délai de 15 min, suivi par une période a une teneur en eau constant jusqu'à 40 min (de 40 à 80 min du départ) puis le processus recommence à une vitesse de séchage dégradé jusqu'à stabilisation du poids à 195 min, une durée de 45 min gagner qu'au échantillons non traités avec la même vitesse de l'air asséchant. Cette période de stagnation est lié à la formation de gel d'amidon base d'amylose contenu dans les cellules sous l'effet de la température d'après (Zobel et al.,1988a; Donovan, 1979) ce qui favorise son absorption d'eau libre puis systématiquement les grains ce gonflent en formant du gel et cela mène à une autre apparition de forme de grain qui agis sur la déformation des structure des pores (S.Bahrani 2013.et Biliaderis, 1992). La teneur en eau influence la température de gélatinisation D'après (S.Bahrani 2013), (Spigno et De Faveri 2004) ont montré que les énergies d'activation de la réaction de gélatinisation diminuent lorsque la teneur en eau dans le système augmente, et se stabilisent à partir de 60% d'eau. (S.Bahrani 2013).

Aussi d'après (Nguyan 2015. et Rizvi 2005.) [3], Les aliment structurer là où le mouvement du liquide est contrôler par les forces internes (capillarité, forces de gravité) ils ont constaté l'existence d'une phase constante.

D'autre auteurs parlent du phénomène de cémentation ou appeler aussi croutage agissant sur certains aliments suite à un séchage trop rapide durant la première phase caractériser par la formation d'une couche dure à la surface du produit pendant le séchage ce qui ralentie le transport de l'humidité vers l'extérieur et même provoque le développement de moisissure (

K.Moon et al 2020).

L'augmentation de La teneur en NaCl à 0.50g **Fig. (IV-1) N° :3** n'a agis qu'a inversement proportionnelle sur le séchage par le débit d'air de 1 g/s ce qui fait retarder son séchage jusqu' à240 min, par contre aucun effet enregistré sur le temps du séchage par les débits d'air de 3 et 4 g/s.

La cinétique du séchage par la conduite du débit d'air de 3 m/s sur le **Fig. (IV-1) N°:3** tente à forcer la déshydratation précisément à l'intervalle du temps entre (60 à 165min).

La teneur en NaCl de 0.75g **Fig. (IV-1) N° :4** n' à montrer aucun effet sur la vitesse du séchage par les deux débits d'air (1 et 4 g/s), mais elle a une remarquable influence sur le séchage conduit par le débit d'air de 3 g /cette concentration en chlorure de sodium a fait rétrécis la durée de séchage des échantillons jusqu' à 90 min.

D'après l'illustration graphique Fig. (IV-2) en fixant la température du séchage à 60°C , l'épaisseur d'échantillon a 2 mm et en examinant les échantillons a travers les différents débits d'air asséchant et teneurs en sel NaCl :

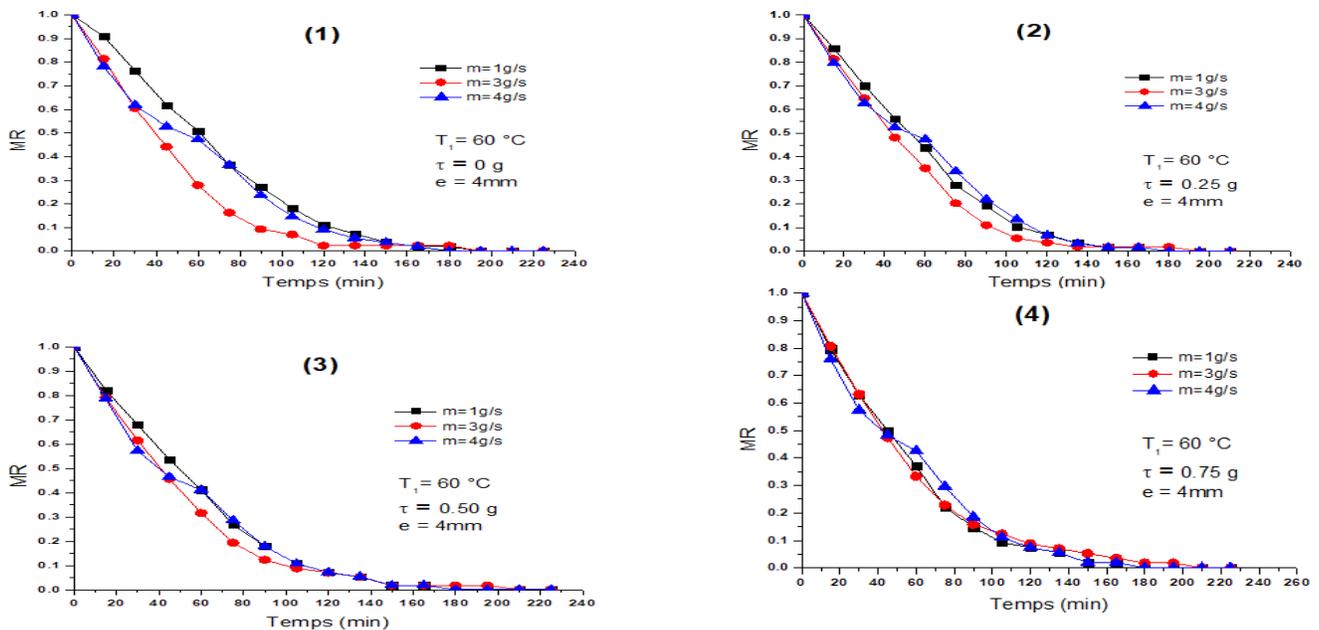


Fig. (IV-2) : Teneur en eau selon le débit massique et teneur de NaCl à température 60°C.

Les échantillons non traités exposés **Fig. (IV-2) N° :1** à 60°C ont la même allure que ceux exposés à 40°C et 0.75 g d'NaCl **Fig. (IV-2) N° :4**, sauf qu'il est bien évident que l'augmentation de la température diminue le temps du séchage (Krokida et al., 2003). l'augmentation du débit d'air fait accélérer le temps du séchage mais un écart de 1g/s entre les débits d'air de 3 et 4 g/s) n'a pas fait une différence significative sur le temps du séchage en arrivant jusqu'à la stabilisation du poids des échantillons à 120 min .

A la teneur en NaCl de 0.25g **Fig. (IV-2) N° :2** le temps du séchage a diminué de 15 min les échantillons conduits par les débits d'air (3 et 4 g/s) et de 30 min pour ceux qui ont été séchés sous faible débit d'air à 1 g/s. Le temps du séchage selon les trois débits d'air sous 0.25 g NaCl été identique 105 min.

L'ajout de 0.50g **Fig. (IV-2) N° :3** du NaCl montre que la cinétique du séchage suivant les débits d'air de (1 et 2 g/s) été très proche jusqu'à 105 min. Le temps du séchage des débits d'air (3 et 4 g/s) et identique à 120 min ce qui déduit que l'augmentation de la teneur en NaCl n'a aucun effet sur la vitesse du séchage suivants ces trois débits d'air, par contre en remarque une légère prolongation de temps du séchage suivant le faible débit d'air de 1 g/s de 15 min.

Par l'ajout de 0.75 g **Fig. (IV-2) N° :4** du NaCl n'a pas influencée le régime de séchage sous la température de 60°C suivant les trois débits d'air consacré.

L'allure de la courbe du débit d'air de 4m/s montrer un ralentissement de déshydratation avec les teneurs en NaCl de (0.5g et 0.75g) en comparaison avec le traitement de 0.25g de NaCl.

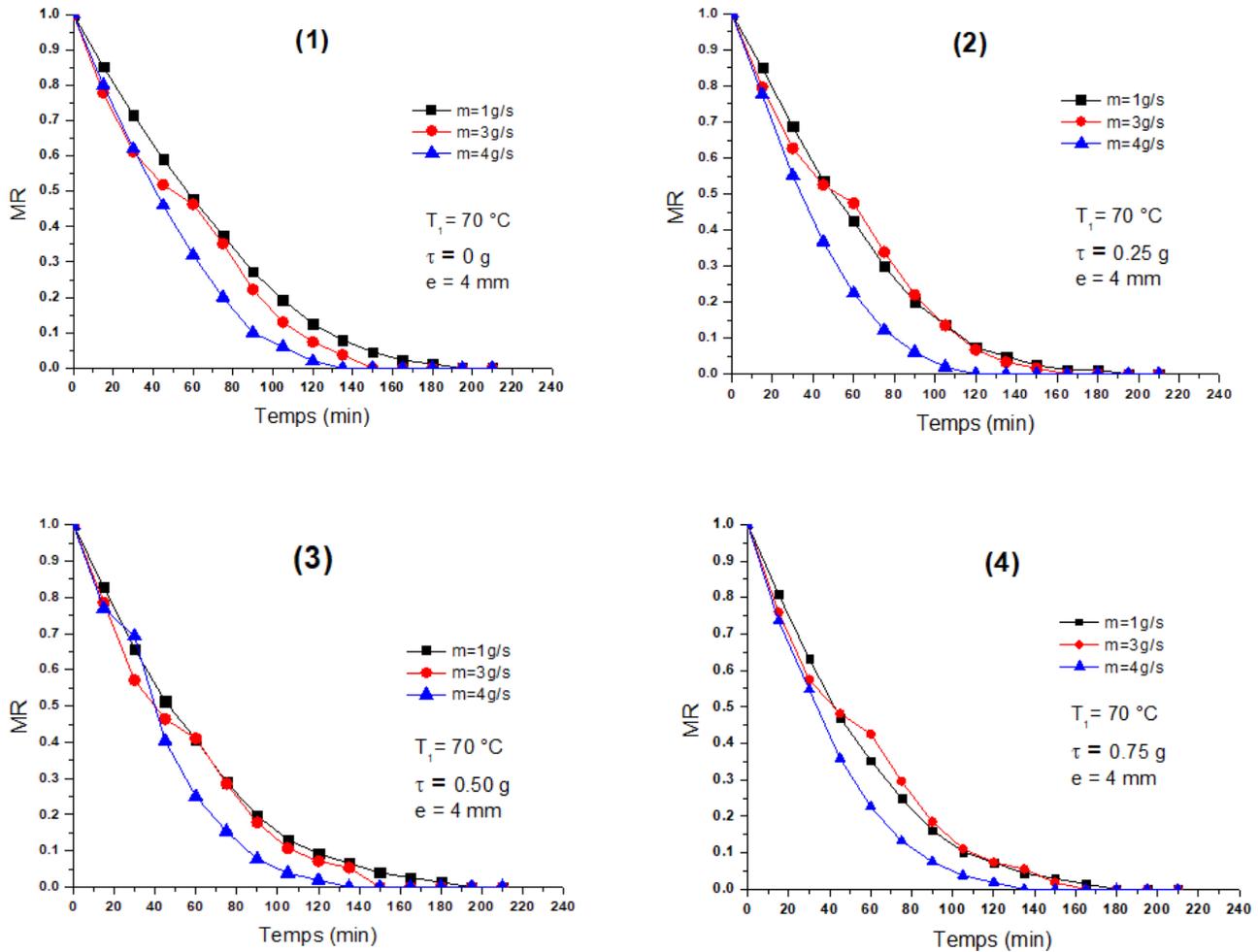


Fig. (IV-3): Teneur en eau selon le débit massique et teneur de NaCl à température 70°C

L'illustration graphique sur la **Fig. (IV-3)** démontre l'augmentation de la température du séchage à 70°C , avec des épaisseurs d'échantillon fixées à 2 mm et en jouant sur la vitesse de l'air asséchant et la teneur en sel NaCl :

A la température de 70°C selon les deux graphes **Fig. (IV-3) N° :1** et **Fig. (IV-3) N° :2** l'augmentation du débit d'air agit positivement sur la vitesse du séchage tandis que l'ajout de NaCl de 0.25 g n'influence que le débit d'air de 4 g/s, une légère diminution du temps de

séchage enregistré de 15 min.

L'augmentation de la teneur en NaCl jusqu'à 0.25g **Fig. (IV-3(2))** n'a pas d'importance sur cinétique du séchage selon les débits d'air de (1 et 3 g/s) à 70°C.

Les **Figure (IV-3)N° :3 et (IV-3)N° :4**, l'allures des courbes est presque semblable à un temps de séchage de 120 min, ce qui indique que l'élévation en teneur d' NaCl de 0.25g à 70°C n'a pas d'effet sur la cinétique du séchage, et le séchage des échantillons suivant le débit massique de 4 g/s tend de se redresser autant que le même processus suivant le débit d'air de 3 g/s l'augmentation de la teneur en NaCl de 0.50 g **Fig. (IV-3)N° :3** de la partir 0.25 g fait ralentir le processus de déshydratation suivant le débit d'air de 4 g/s jusqu'à 60 min.

IV.3 : Teneur MR selon l'épaisseur de produit séché (2, 3 et 4 mm) :

En fixant la température de séchage et le débit d'air asséchant pour analyser leurs effets sur les épaisseurs des échantillons : On constate à partir de la figure **Fig. (IV-4)** présente la teneur en eau des tranches de pomme de terre en différentes épaisseurs de 2, 3 et 4 mm. On peut noter que l'augmentation de l'épaisseur entraîne une augmentation du temps du séchage et la teneur en eau sera plus élevée, cela s'explique par le fait que la migration de l'humidité de l'intérieur du produit vers sa surface doit parcourir un trajet plus long pour l'épaisseur de 4mm et 3 mm que celle dans le cas d'un épaisseur de 2 mm. L'expérience réaliser montre que moins que l'épaisseur est épaisse le temps du séchage diminue.

Par l'ajout de 0.25 g NaCl la courbe indiquant l'épaisseur 2mm a enregistré la chute en teneur d'eau jusqu'à 50% en 15 min du départ du processus suivis par une période de stagnation de presque 30 min après avoir retiré jusqu'à 70% de sa teneur en eau cela est due à la gélifications de l'amidon contenue sous l'effet de la chaleur puisque le transfert de mass est contrôlé par les forces internes et suite au gonflement des cellules due à l'absorption de l'eau par l'amidon qui se transforme en gel. L'extraction d'eau affronte des contraintes de plus que la capillarité ce qui justifie l'arrêt de la déshydratation parfois D'après (Sayed.A et al), mais aucun avancement du temps n'a été remarquer à la fin du séchage par rapport au séchage des échantillons non traités. Pour les épaisseurs 3 et 4mm l'ajout de 0.25 g de NaCl n'a pas influencé la vitesse du séchage.

Les courbes illustrer sur la **Fig. (IV-4(3))** montrent que l'augmentation de la teneur en NaCl a

0.50g ne rapporte aucun avancement sur les trois épaisseurs, sauf que la courbe indiquant le séchage des échantillons de 2mm d'épaisseur tente de se rapprocher à suivre le comportement des échantillons de 3 et 4 mm ce qui indique que l'augmentation de la teneur en sel provoque la rétention en eau mais le temps du séchage finis pareille au échantillons traité à 0.25 g NaCl et ceux non traités.

A la **Fig. (IV-4(4))**: l'élévation de la teneur en NaCl a 0.75g à diminuer le temps du séchage par rapport au trois épaisseurs d'une manière significatif, une progression de 30min pour les échantillon ayant l'épaisseur de 2mm , 50min pour ceux de 3mm et 75min pour ceux de 4mm d'épaisseur. Cela indique que plus que la teneur en sel est élevée ceci agis avec les échantillons les plus épais à cause de leur teneur élevé en eau et cela renforce l'extraction d'eau par l'extérieur due à la température de l'air chaud, son pouvoir évaporatoire et de l'intérieur (la nature et la taille du produit, sa capillarité et sa diffusion).

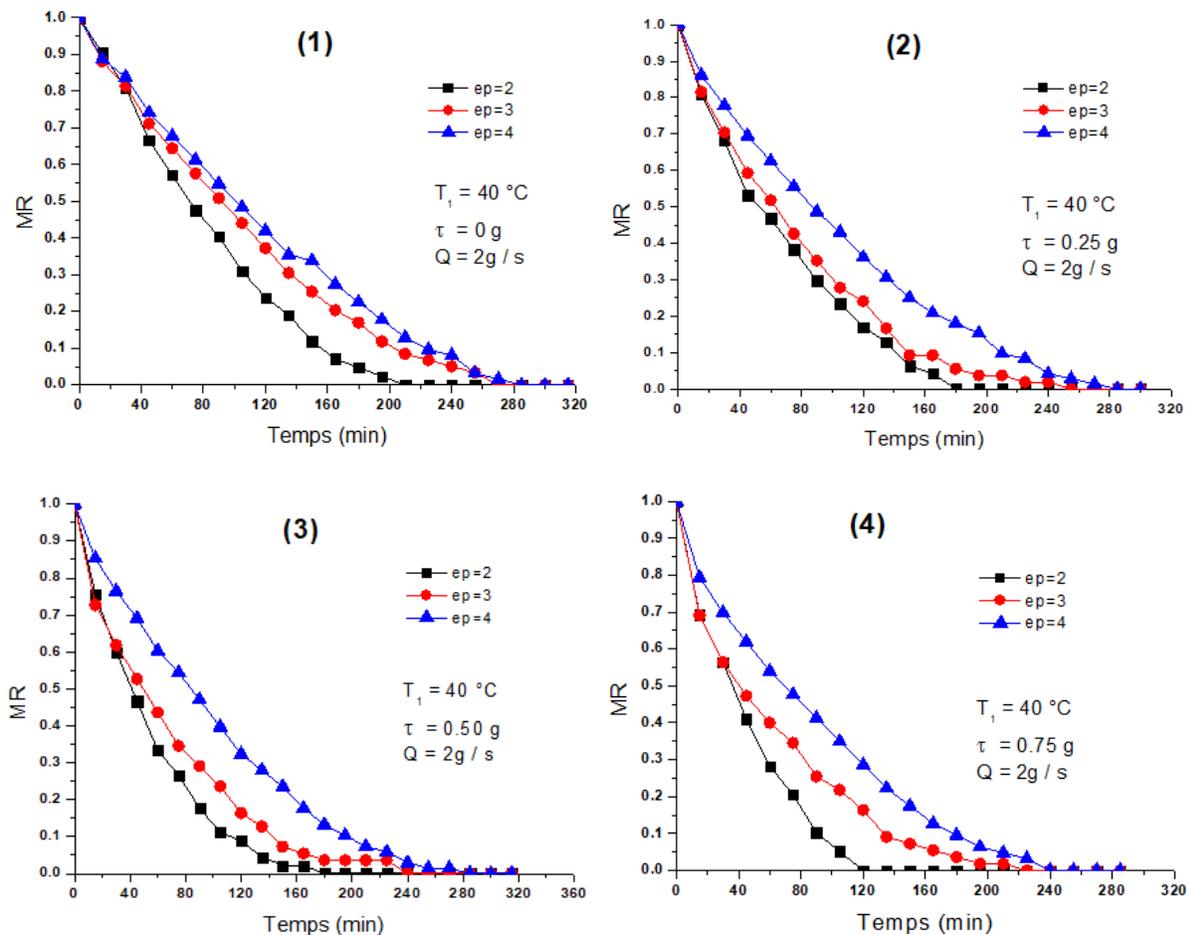


Fig. (IV-4): Teneur en eau selon l'épaisseur de produit et teneur de NaCl à température 40°C et un débit d'air de 1g/s.

La teneur en NaCl a une influence remarquable sur la variation des épaisseurs étudiées la température de 40°C suivant le débit d'air de 3 g/s, l'augmentation de la teneur en NaCl a 0.25g diminue le temps du séchage via les trois épaisseur 2,3 et 4mm, l'ajout du NaCl de 0.25 g à 0.50 g n'a pas influencé sur le processus, en continuant l'augmentation de la teneur en NaCl 0.75 g a augmenté la vitesse du séchage des trois épaisseurs utilisées

La figure **Fig. (IV-5)** confirme l'influence de l'épaisseur et la température sur la cinétique du séchage. L'augmentation de la température augmente la vitesse du séchage et plus que l'épaisseur épaisse plus le temps du processus augmente. Par contre la teneur de 0.25 g, 0.50g et 0.75g en NaCl à 60°C sous le débit d'air massique de 3 g/s n'a montré aucune influence sur la cinétique du séchage en comparant avec les échantillons non traités.

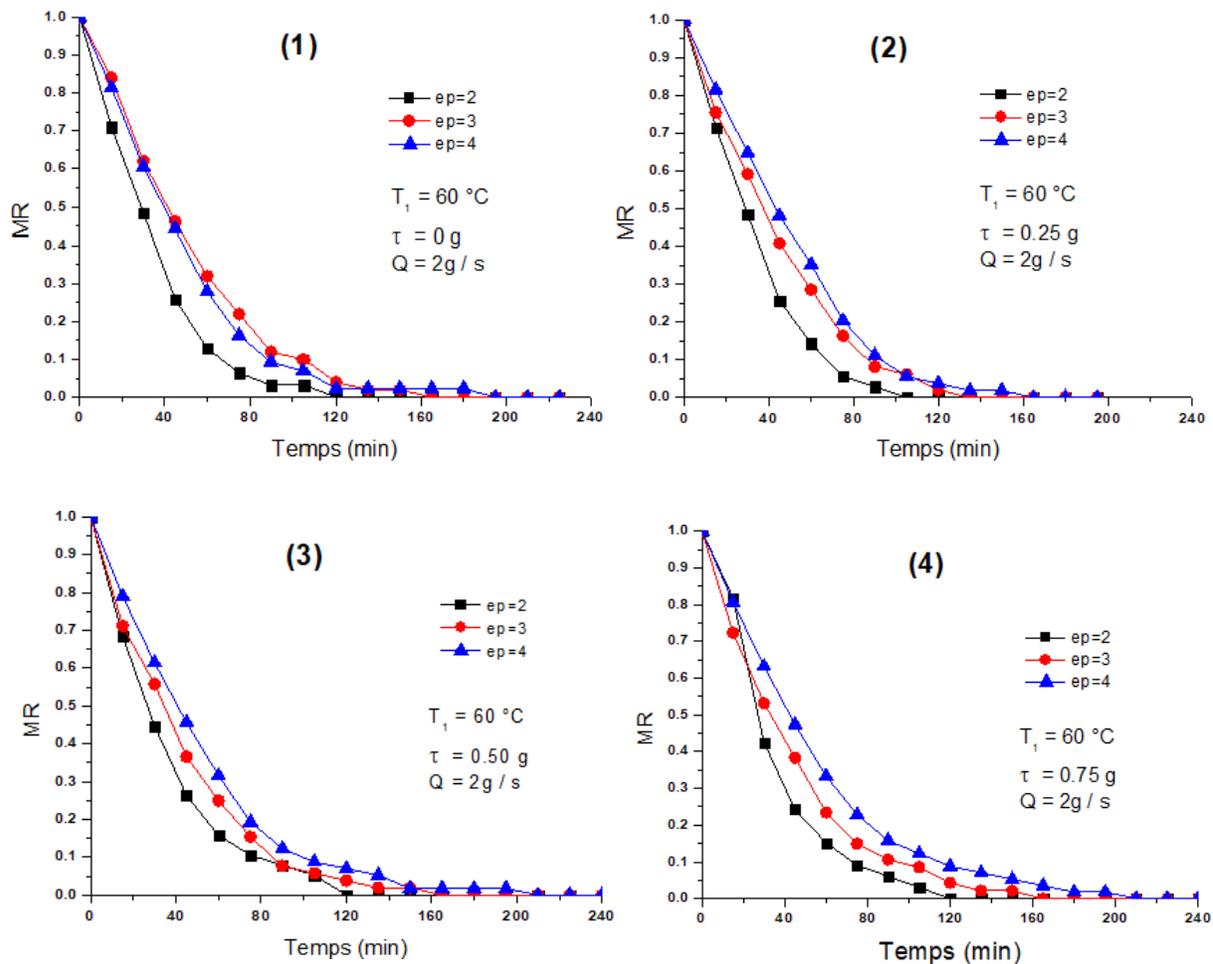


Fig. (IV-5): Teneur en eau selon l'épaisseur de produit et teneur de NaCl à température 60°C.

Les courbes illustrés sur la figure **Fig. (IV-6)** mettent en évidence l'effet positif de la température sur la vitesse du séchage et l'influence inversement proportionnel de l'épaisseur d'échantillon sur le même processus, suite une confirmation sur l'inefficacité du prétraitement par l'ajout d' NaCl a des teneurs de 0.25 g,0.50g et 0.75g a la température de 70°C et au débit de 3 g/s sur l'avancement du protocole. La cinétique du séchage n'est pas influencée par les teneurs en NaCl étudié et en précisant la comparaison de ces courbes aux précédents réaliser a 60°C et 40°C en peut noter qu'il est plus susceptible dire que les courbes illustrées sur les figures **Fig. (IV-4)** se traduisent par des erreur de mesures due à des mauvais pesages des claies portants les échantillons lors de l'essai ou a un mauvais étalonnage de la balance causer par la vitesse de prise de poids (après chaque 15 min il fallait noter l'humidité et la température al 'intérieur de l'étuve ,à l'évacuation , de l'air ambiant ainsi que la température d'échantillons de cartes claies plus la consommation électrique avec voltage, ampérage et tous sa pour le minimum du temps possible pour ne pas faire chuté la température de la chambre de séchage).

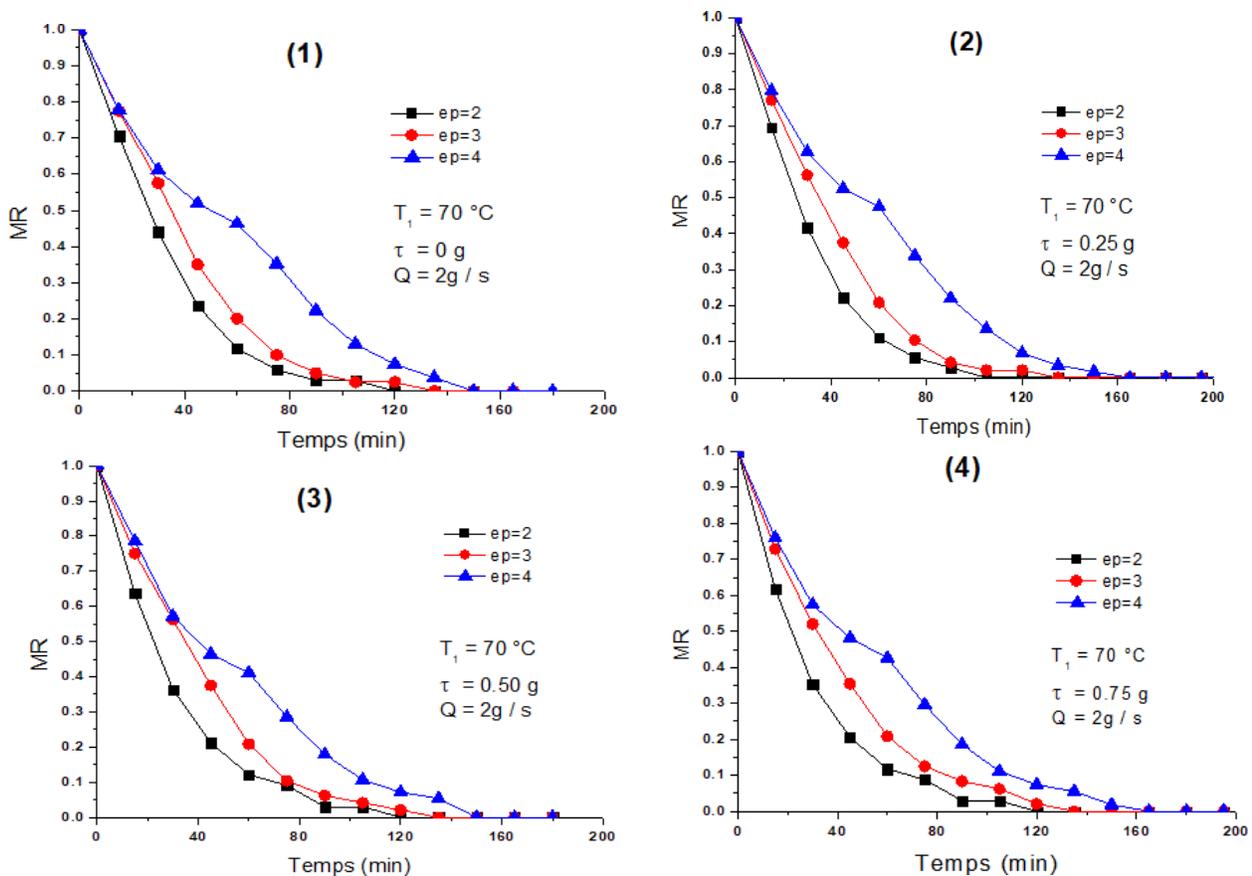


Fig. (IV-6): Teneur en eau selon l'épaisseur de produit et teneur de NaCl à température 70°C.

IV.4: Effet de la température sur l'humidité relative :

La figure **Fig. (IV-7)** présente la variation de humidités relative de l'air asséchant pour des mesures de trois niveaux (air ambiante, intérieur de l'étuve et la sortie du canal) pour la température de séchages de 60°C et a différents débits d'air et épaisseurs utilisées.

L'humidité à l'intérieur de la chambre de séchage au départ du processus est 10% puisque la température est à 60°C et la chambre de séchage est bien séché par contre l'humidité a la sortie du canal est plus élevé, cela est due au séchage de la quantité d'air ambiant contenu à l'intérieur de l'étuve le temps de mise à la température déconsigne. L'humidité a la sortie du canal augmente partiellement au départ du processus par rapport à la valeur de l'humidité a l'intérieur de l'étuve causé par les bouffés de vapeur d'eau venant de la surface du produit à sécher transmise de son milieu par la différence de pression osmotique de la vapeur d'eau suite à l'effet de la température du courant d'air chaud exercer durant le processus, l'humidité a la sortie du canal diminue légèrement et reste en stabilisation on comparaison a le taux d'humidité a l'intérieur de l'étuve mais avec un écart plus ou moins équilibré , c'est à cause de la quantité d'eau dégager du produit par évaporation récupérer par l'air asséchant

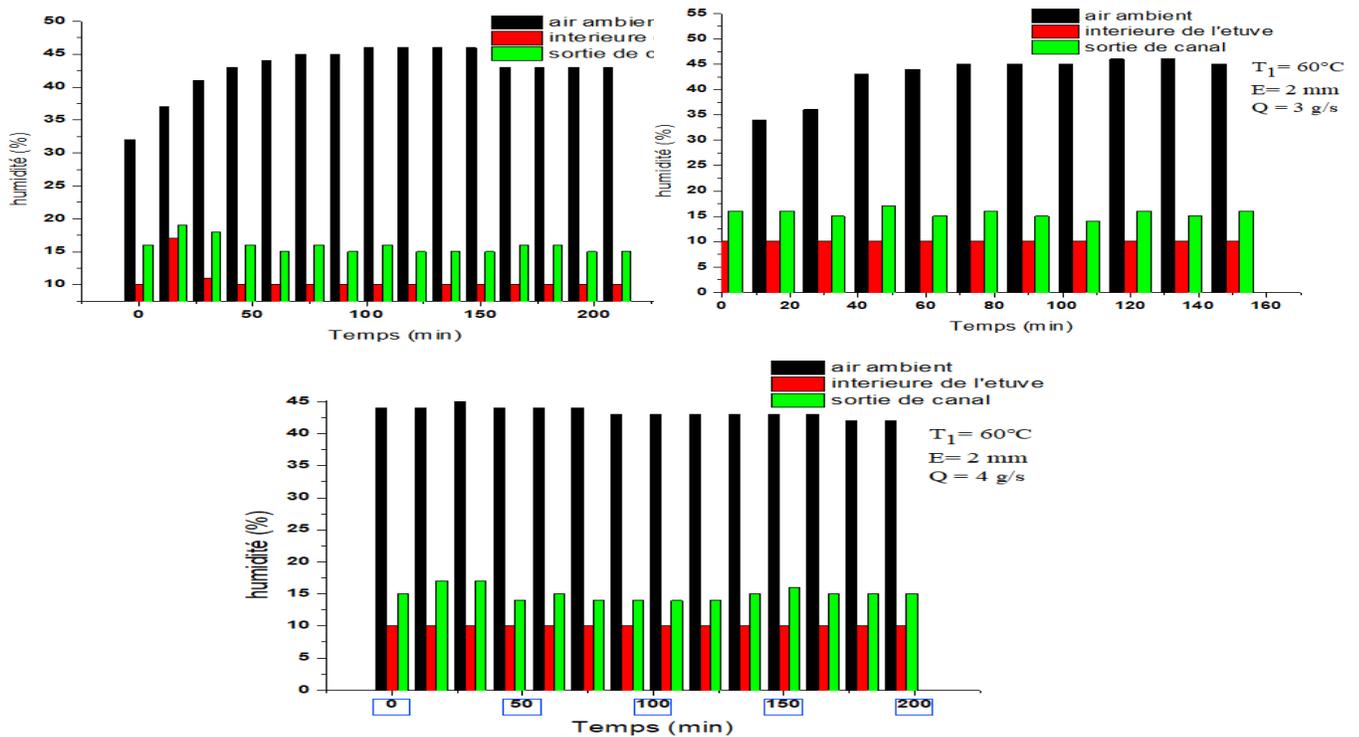


Fig. (IV-7): Evolution de l'humidité relative en fonction de débit massique a température et l'épaisseur fixé (60°C)et (2 mm)

Le changement du d'débit d'air asséchant selon les trois figures montre que sont effet est

presque négligeable, insensible entre 1 et 3 g/s est plus stable avec le débit du 4 g/s.

L'homogénéité de la distribution du courant d'air désigner pour le chauffage de l'étuve et l'extraction de l'humidité vers l'extérieur assure la minimum taux d'humidité à l'intérieur de la chambre de séchage au fur étameuse l'intervalle de 50 min.

Théoriquement l'humidité récupérée par l'air environnant diminue avec le temps ; puisqu'il y a de moins en moins d'eau à évaporer.

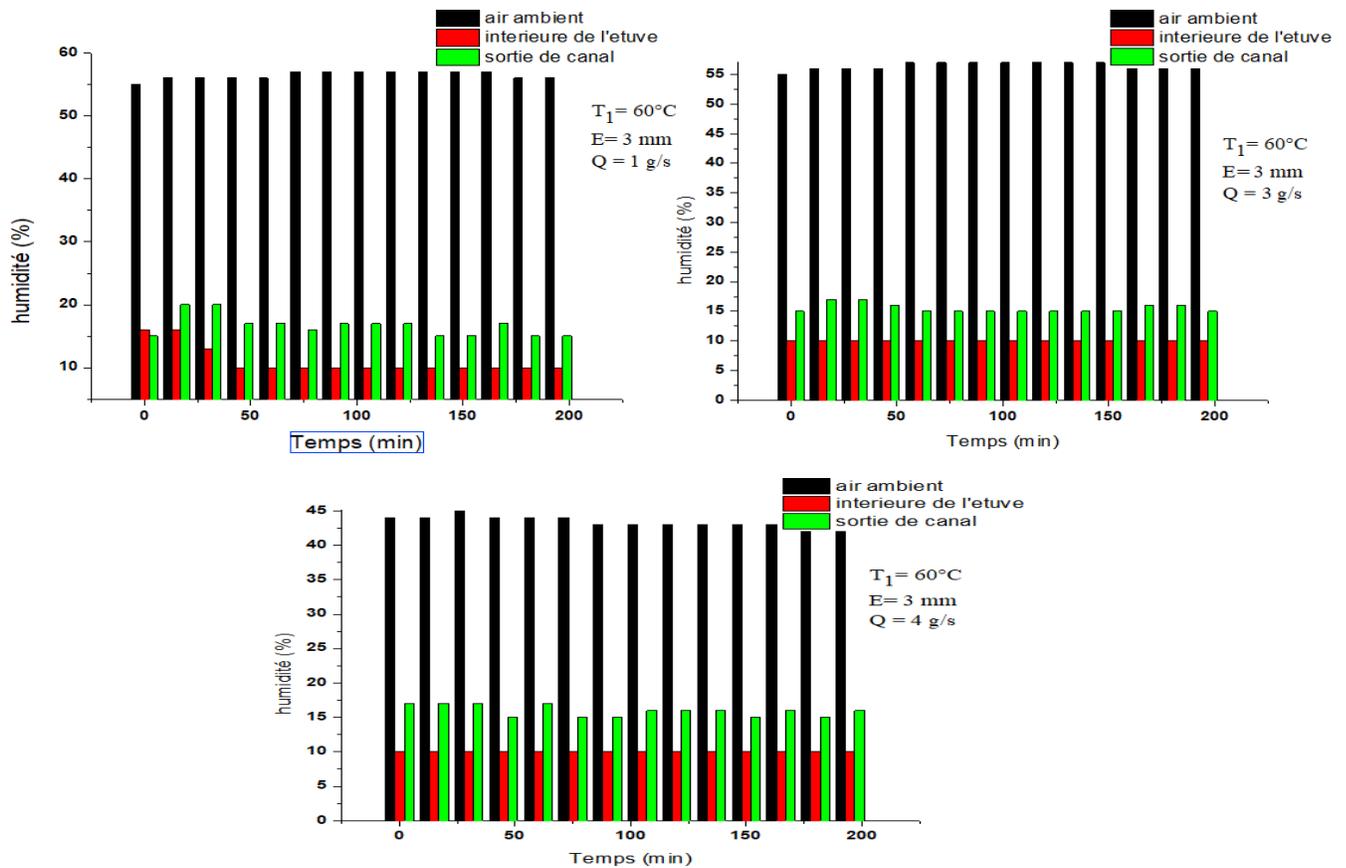


Fig. (IV-8): Evolution de l'humidité relative en fonction de débit massique a température et l'épaisseur fixé (60°C) et (3 mm).

Les figures (voir **Fig. (IV-8)**) montrent qu'il n'y a pas une différence significative sur la distribution de l'humidité suite au changement d'épaisseur en couche mince, seulement à l'exercice du débit de 1 g/s au départ du processus en remarque une légère augmentation de

l'humidité à l'intérieur de la chambre de séchage puisque le taux d'évaporation de l'humidité

accumuler sur la surface du produit est plus accélérer par rapport a un tel débit d'air faible cela est identique au même condition de séchage par rapport à l'épaisseur de 2mm **Fig. (IV-7)**.

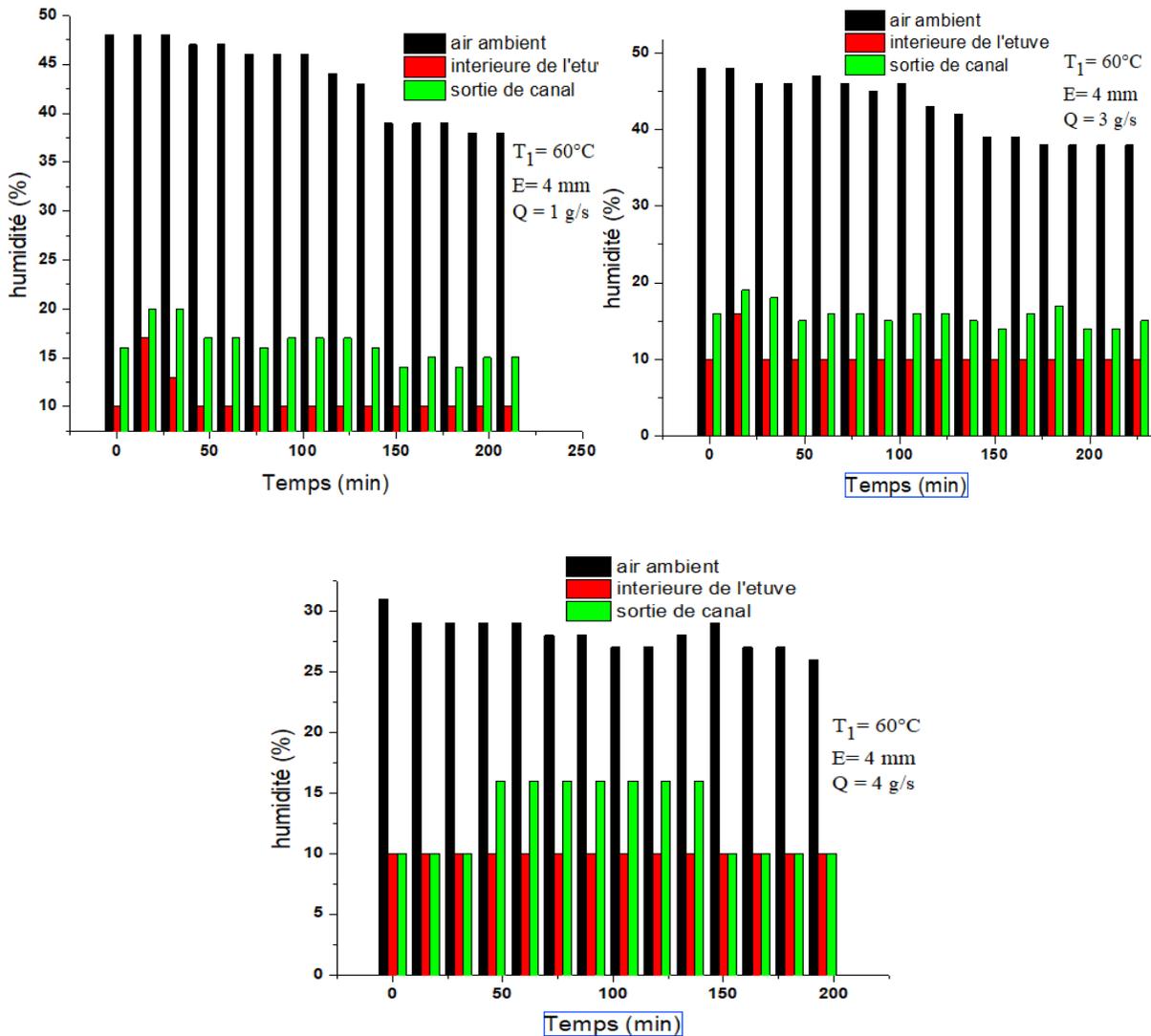


Fig. (IV-9): Evolution de l'humidité relative en fonction de débit massique a température et l'épaisseur fixé (60°C)et (4 mm).

Les figures (voir **Fig. (IV-9)**) illustrent la variation d'humidité en fonction du temps par rapport à l'épaisseur de 4mm, à l'application du débit d'air de 1 et 3 g/s en remarque un équilibre visuel entre l'humidité entre l'intérieur et à la sortie du canal de l'étuve avec une

légère perturbation des valeur de l'humidité du sortie de canal lié à perturbation de l'humidité

de l'air ambiant, L'activité de l'humidité à la sortie du canal est proportionnelle par rapport à celle de l'air ambiant puisque à la sortie du canal il se crée toujours un mélange de vapeur d'eau et les mesure hygroskopique s'effectue Just a la sortie du canal et l'hygromètre aura la possibilité de rattraper l'humidité de l'air ambiant.

A l'utilisation du débit de 4 g/s les valeurs mesuré de l'humidité de l'intérieur et la sortie de canal demeure identique et l'humidité est presque à sec sauf à l'intervalle de temps entre (50min du départ jusqu'à 150min) cela est due à l'abaissement de l'humidité de l'air ambiant ce qui favorise la préparation d'un milieu plus sec a un temps plus réduit, entre 50 min du départ du processus jusqu'à 150 min l'augmentation de l'humidité' a la sortie du canal est justifier par l'élévation de la température du produit progressive qui indique la compensation de la quantité d'eau évaporer par celle transférer de l'intérieur du produit par diffusion qui arrive à la limite.

IV.5: Évolution de la température en fonction du temps :

La figure **Fig. (IV-10)** illustrent les variations de températures mesurées durant le séchage des tranches de pomme de terre a différentes épaisseurs (2,3 et 4 mm) selon les débitsd'air de (1,3 et 4 g/s) a la température de séchage de 60°C.

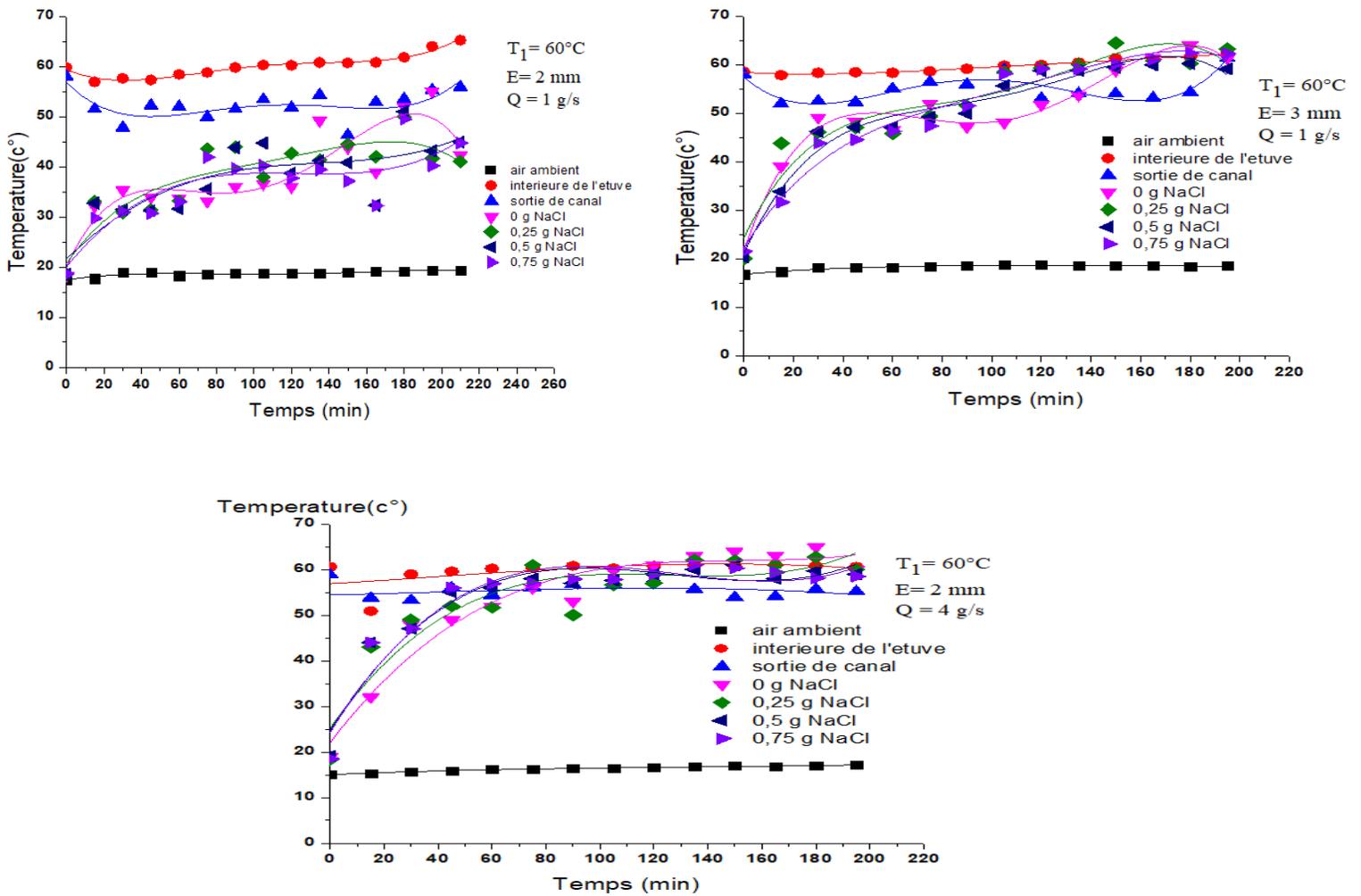


Fig. (IV-10) : Evolution de température ambiante, intérieure de l'étuve, la sortie de chambre et le produit en fonction du temps (l'épaisseur 2mm/ T = 60°C) à différentes teneurs en NaCl et débits d'air

Pour les tranches de 2 mm d'épaisseur suivant les trois débits d'air étudiés (1, 3 et 4 g/s) la température de l'air ambiant est uniforme durant l'opération, la température à l'intérieur de l'étuve débute à 60°C et rencontre une légère diminution durant les 25 premières minutes sous le débit de séchage de 1 g/s justifié par l'élévation du taux d'humidité sur les tranches étudiées, ce qui cause l'abaissement de la température de l'air chaud environnant puisque le courant d'air est assez faible pour transporter cet air humide vers l'extérieur, puis cette température continue à se redresser sur la valeur initiale durant toute la phase de séchage à allure constante puisque la migration d'eau contrôlée par la pression osmotique excitée par la chaleur compense partiellement le taux d'humidité à la surface du produit séché qui favorise la balance entre

l'évaporation d'eau en surface et la quantité d'eau libre migrante vers la surface ce qui justifier la stabilité partielle de la température de la chambre durant cette phase jusqu'à ce que le flux de chaleur échangé avec l'air ne devient plus composer par la chaleur latente provoque l'évaporation et on aura l'augmentation de température des échantillons jusqu'à la température

de consignée qui est illustré par la monté de la température à l'intérieur de l'étuve. (L'augmentation de la température hors de 60°C est suite à la programmation de la température de l'étuve qui serve à la maintenir à la température de consigne en aimantant celle si pour composer l'échappement due à l'ouverture de la porte de l'étuve pondant les mesures.

Les courbes illustrant la température de l'intérieur de l'étuve suivant les débits d'air de 3 et 4 g/s n'ont pas subites a une diminution au départ du processus ce fait est dû à l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant par rapport 1 g/s.

La température de la sortie du canal selon les débits d'air (1 et 3 g/s) se dégrade partiellement jusqu'à 60 min du départ du processus justifier par le taux d'humidité dégager par le produit et transporter vers l'évacuation ce qui fait abaissier la température, le taux d'humidité accumuler sur la surface du produit saturé en eau au début sera diminuer par le temps puisque la teneur en eau du produit demeure faible durant le séchage. Cette température reste en perturbation et inférieur à 60°C jusqu'à la fin du séchage là ou cette température joint a +/- 60°C la température de l'air environnant.

Cette perturbation citée précédemment est due au contact de l'air ambiant a l'air évacuer par la sortie du canal ce qui fait un mélange d'air influencer par les deux coté.

La température de la sortie du canal influencé par le débit d'air de 4 g/s enregistre des valeurs plus stables et une uniformité presque adaptée aux valeurs de la température à l'intérieur de l'étuve ce qui signifie que l'augmentation du débit d'air agis positivement sur le transport de l'humidité. (Kowalski, 2003). [1]

L'analyse de l'évolution de la température des courbes destinées pour les échantillons étudier sous les mêmes conditions de séchage pour les différentes teneurs en NaCl (0g, 0.25g, 0.50g et 0.75g) illustrent une période de préchauffage durant laquelle la teneur en humidité diminue rapidement et a ces moments la température des parois 'échantillons atteint la température d'évaporation. Pendant cette période en remarque que les échantillons témoins se réchauffent

rapidement par rapport aux échantillons prétraités, cela peut bien affirmer que le taux d'humidité accumuler sur les surfaces des échantillons prétraités entraîné par l'effet osmotique du a la salaison est supérieur par rapport au taux d'humidité qui se repose sur les surfaces des échantillons témoins ce qui justifier l'augmentation rapide de leur température. Tandis que la différence entre les échantillons prétraités à (0.25g, 0.50g et 0.75g) consternant la montée en température n'est pas significative sur les trois débits d'air destinés a séché l'épaisseur de 2mm.

La deuxième période selon la théorie est celle de flux continue durant laquelle toute l'énergie apportée par l'air environnant (air chaud) est utilisée pour servir à la vaporisation de l'eau liquide tant que les conditions (air chauffant et débit d'air) sont stables. (Lilia.M 2007).

Cette période n'est pas souvent visuelle et elle est caractériser par la vitesse du séchage constante mais elle est plutôt sensible. Selon (Nguyan 20015) et (bounazzi and bimbenet 2003) pour les produits alimentaires ou biologique on général cette phase passe inaperçu. Ce qui met en accord L'illustration des courbes de température des échantillons à différentes teneur en NaCl (0g,0.25g,0.50g et 0.75g) sous les mêmes conditions de séchage entre 50 min a compté du départ jusqu'à 150 min, les échantillons subit a un débit d'air de 4 g/s illustrent une stabilisation adéquate de température encours cette période.

Par conséquences les différentes teneurs en NaCl ne montrent aucune influence entre eux a part que leur gradient de température et plus excité par rapport au échantillons témoins qui montrent semblable stabilisation en cours de cette période.

La troisième période est la phase de flux décroissant qui se manifeste lorsque l'échantillon subi a une dégradation causée par leur déformation (déstructuration, rétrécissement, destruction des pores.) Analyse des mécanismes de transfert de fluide lord, la migration de l'eau du milieu du produit vers sa surface devient insuffisante, durant cette période la température des échantillons augmentent et puis elle stabilise à la température de l'air environnant. L'évolution de la température des échangions étudier durant cette période sont conforme avec la théorie sauf que la perturbation des valeurs finale sont due aux mauvaises prises de température durant l'essai.

En comparaison entre les débits d'air étudier sur ce même épaisseur 2 mm à 60°C en remarque que la température des échantillons séché a un débit d'air de 4 g/s atteint la température de l'air

chauffant.

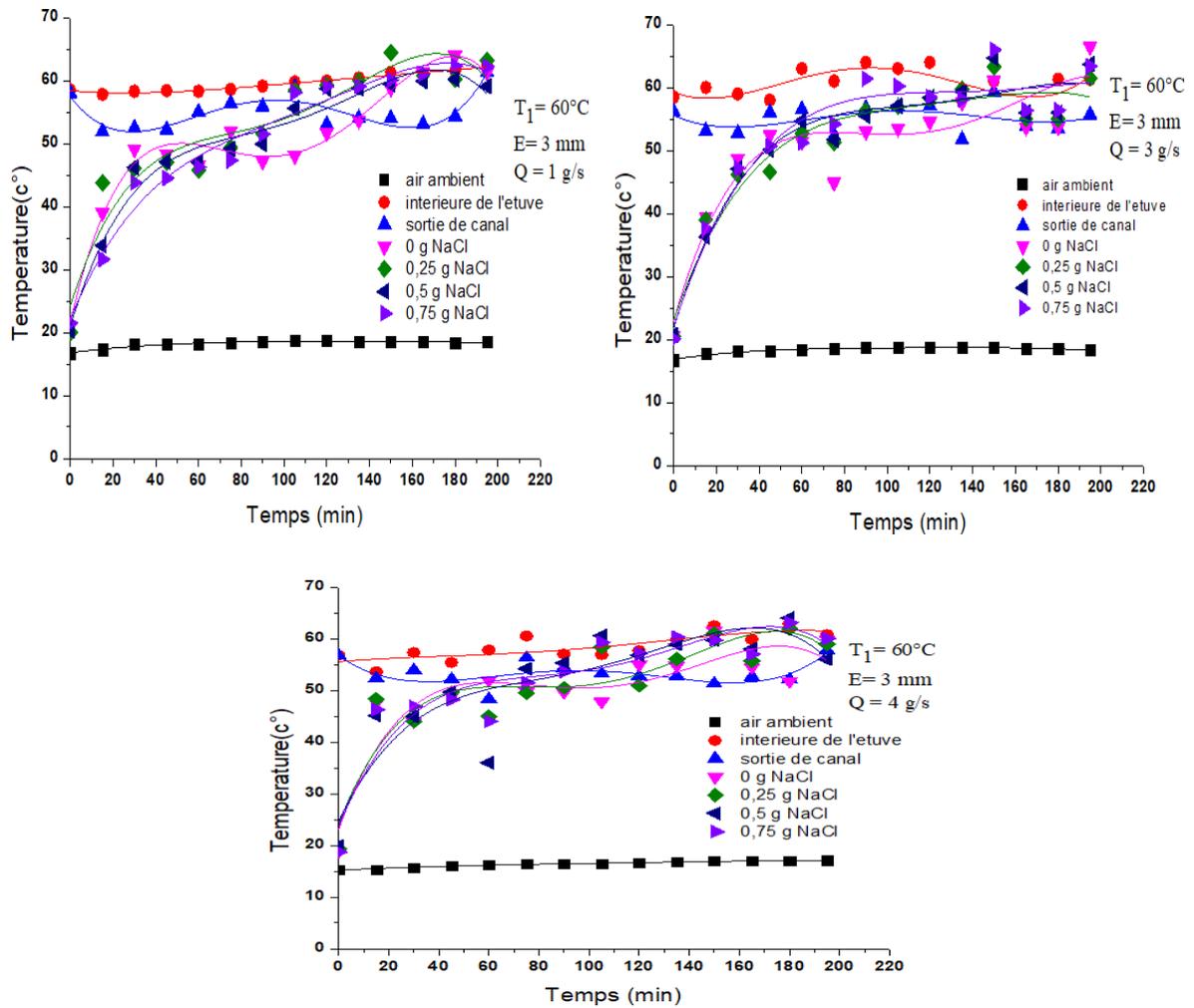


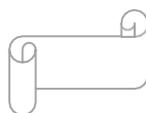
Fig. (IV-11) : Evolution des températures ambiante, intérieure de l'étuve, la sortie de chambre et le produit en fonction de temps (l'épaisseur 3mm/ T = 60°C) a différentes teneur en NaCl et débits d'air

Evolution de la température (air ambiant, intérieur de l'étuve, sortie du canal et des échantillons séchées à différente teneur en NaCl) $e_p = 0,3\text{mm}$ $T = 60^\circ\text{C}$:

En comparant les figures (T1 E=2mm Q=1/T1 E=3mm Q=1) on constate que la différence d'épaisseur n'a pas eu d'effet remarquablement en termes de température, l'évolution de la température apparaît identique à l'exception de l'effet de la température plus basse de l'air ambiant qui a servi à diminuer le temps de préchauffage des échantillons pendant la première période.

En comparant les figures (T1 E=2mm Q=2/T1 E=3mm Q=2), l'allure des courbes confirme que la température du produit à sécher est influencée par celle de l'air ambiant, et le changement de température des échantillons entre les deux figures après la période de mise en température illustre l'influence de l'épaisseur. Pour les échantillons à 2 mm d'épaisseur on remarque une augmentation de température plus rapide ce qui indique que le taux d'humidité devient insuffisant et que la migration de l'eau vers la surface des échantillons est plus difficile ce qui déclenche le commencement de la troisième période.

En comparant les figures (T1 E=2mm Q=3/T1 E=3mm Q=3), on montre la similarité de l'évolution de la température des échantillons mais l'intervalle de temps d'à partir de la mise en température des échantillons jusqu'à la fin de la période a une allure constante ce qui confirme que moins l'épaisseur est grande l'échange de température sera plus efficace.



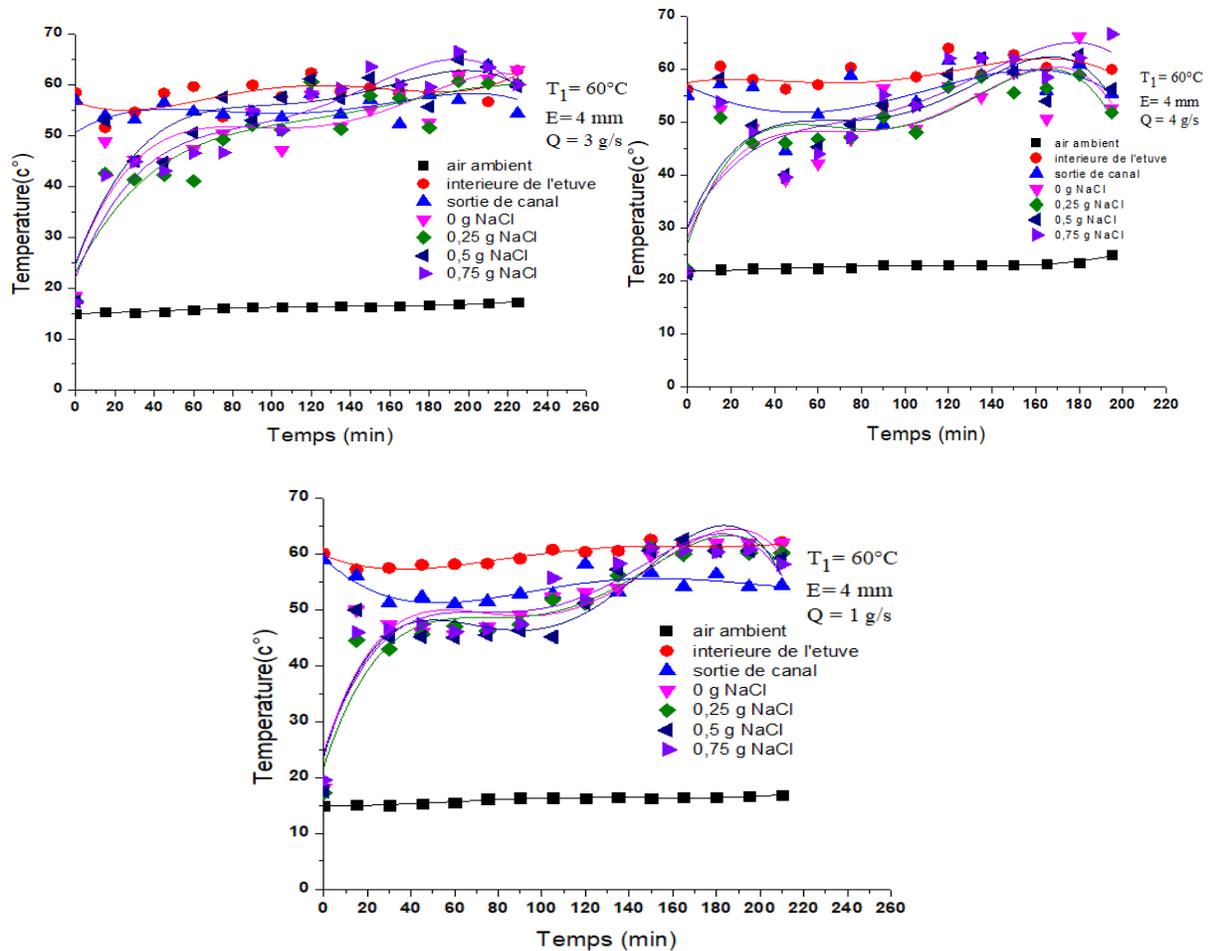


Fig. (IV-12) : température ambiante, intérieure de l'étuve, la sortie de chambre et le produit selon l'épaisseur (4mm) et le débit massique a $T = 60^{\circ}\text{C}$.

Evolution de la température (air ambiant, intérieure de l'étuve, sortie du canal et des échantillons séchées à différente teneur en NaCl) $ep = 04\text{mm}$ $T = 60^{\circ}\text{C}$:

En comparant les figures (T_1 $E=2\text{mm}$ $Q=1/T_1$ $E=4\text{mm}$ $Q=1$), les montés en températures des échantillon ayons un épaisseur de 2mm est moins élevé par rapport à ceux d'épaisseur de 4mm, ces dernier on retarder d'atteindre la température de vaporisation selon l'allure des courbes les échantillon de 2mm ont procédé a la deuxième période du séchage dans un temps plus court et le gradient de leurs températures est en avance de ceux ayons l'épaisseur de 4mm .on peut toujours déduire que l'augmentation d'épaisseur retard le procédé de séchage.

En comparant les figures (T1 E=2mm Q=2/T1 E=4mm Q=2), l'allure des courbes des températures confirme l'efficacité des couches mince sur le séchage et la taille d'échantillon joue un rôle important sur le processus e qui est en accord avec les résultats traduits par les figures précédentes. On remarque aussi sur ces deux figures que l'influence du débit d'air de 3 g/s en particulier agit mieux sur la migration d'eau vers l'extérieur du produit par rapport 1 et 4 g/s sur la même épaisseur.

En comparant les figures (T1 E=2mm Q=3/T1 E=4mm Q=3), on trouve ces courbes ne servent qu'à confirmer l'influence de l'épaisseur sur le transfert de masse et de chaleur durant le séchage pour les couches mince.

Concernant la teneur en NaCl , la comparatif de tous les courbes illustrant l'évolution de la température des échantillons prétraités par rapport à d'autres témoins suivant les trois débits d'air et selon les trois épaisseurs étudier l'influence de la teneur en NaCl es négligeable.

IV.6 : Conclusion :

Dans ce quatrième et dernier chapitre, nous avons vu un ensemble de courbes qui reflètent le plus l'un des facteurs importants affectant le processus de séchage électrolytique. L'objectif principal de ce chapitre était d'étudier les divers changements qui se produisent dans les fondamentaux facteurs depuis le début du processus de séchage jusqu'à sa fin et fournir des explications appropriées.

Il a été observé que ces facteurs s'influencent mutuellement, tels que le flux de chaleur, la température et l'épaisseur de l'échantillon, ce qui affecte directement et affecte également la vitesse de séchage, car plus le flux est important, plus l'épaisseur de l'échantillon est faible et plus la vitesse de séchage est élevée. la température, nous obtenons les meilleurs résultats en termes de qualité et de raccourcissement des délais.

Referents:

- [1] Coumans W.J., « Models for drying kinetics based on drying curves of slabs », *Chemical Engineering and Processing*, vol. 39, 2000, p. 53-68.
- [2] Akbay, C., Rizvi, S. A., & Shamsi, S. A. (2005). Simultaneous enantioseparation and tandem UV– MS detection of eight β -blockers in micellar electrokinetic chromatography using a chiral molecular micelle. *Analytical chemistry*, 77(6), 1672-1683.
- [3] Thuha, N. (21 apr 2016). Archive-ouvertes. (Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01297965>
- [4] Donovan, J. W. 1979 Phase transitions of the starch-water system. *Biopolymes*. 18, 263–275.
- [5] Zobel, H. F., Young, S. N. et Rocca, L. A. 1988a Starch gelatinization: an X-ray diffraction study. *Cereal Chem*. 65, 443–446.
- [6] Rizvi, S.S.H. 2005. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: *Engineering Properties of Foods*, (Eds.) M.A. Rao, S.S.H. Rizvi, A.K. Datta, CRC Press. Florida, United States, 239-326.
- [7] SAYED.B. (19 may 2013). Archive-ouvertes.(Modification des propriétés physico-chimiques de l'amidon par procédés hydrothermiques : Contribution à l'étude des transferts couplés chaleur-masse) <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00823904>
- [8] Spigno, G. & De Faveri, D. M. 2004 Gelatinization kinetics of rice starch studied by non-isothermal calorimetric technique: influence of extraction method, water concentration and heating rate. *J. Food Eng*. 62, 337–344.
- [9] Kyoung. M, Eun-Bin. K, Bonggi. L, and Choon .Y Recent Trends in Controlling the Enzymatic Browning of Fruit and Vegetable Products *Molecules* 2020, 25, 2754; doi:10.3390/molecules25122754
- [10] Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 391-403.
- [11] Kowalski S.J., *Thermomechanics of drying processes*, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Springer, 2003.

- [12] Lilia.M. (2007) L'effet des conditions variables de séchage sur la cinétique de séchage et la qualité de L'ail Département des sciences des aliments et de nutrition faculté des sciences de agriculture et de alimentation Université LAVAL QUEBEC
- [13] Bonazzi.C.Dumoulin.E.and Bimbenet.J (2008) Le séchage des produits alimentaires. *Industrie Alimentaire Agricole*.125,12-22
- [14] Coumans W.J., « Models for drying kinetics based on drying curves of slabs », *Chemical Engineering and Processing*, vol. 39, 2000, p. 53-68.
- [15] Akbay, C., Rizvi, S. A., & Shamsi, S. A. (2005). Simultaneous enantioseparation and tandem UV– MS detection of eight β -blockers in micellar electrokinetic chromatography using a chiral molecular micelle. *Analytical chemistry*, 77(6), 1672-1683.
- [16] Thuha, N. (21 apr 2016). Archive-ouvertes. (Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01297965>
- [17] Donovan, J. W. 1979 Phase transitions of the starch-water system. *Biopolymes*. 18, 263–275.
- [18] Zobel, H. F., Young, S. N. et Rocca, L. A. 1988a Starch gelatinization: an X-ray diffraction study. *Cereal Chem*. 65, 443–446.
- [19] Rizvi, S.S.H. 2005. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: *Engineering Properties of Foods*, (Eds.) M.A. Rao, S.S.H. Rizvi, A.K. Datta, CRC Press. Florida, United States, 239-326.
- [20] SAYED.B. (19 may 2013). Archive-ouvertes.(Modification des propriétés physico-chimiques de l'amidon par procédés hydrothermiques : Contribution à l'étude des transferts couplés chaleur-masse) <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00823904>
- [21] Spigno, G. & De Faveri, D. M. 2004 Gelatinization kinetics of rice starch studied by non-isothermal calorimetric technique: influence of extraction method, water concentration and heating rate. *J. Food Eng*. 62, 337–344.
- [22] Kyoung. M, Eun-Bin. K, Bonggi. L, and Choon .Y Recent Trends in Controlling the Enzymatic Browning of Fruit and Vegetable Products *Molecules* 2020, 25, 2754; doi:10.3390/molecules25122754
- [23] Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 391-403.

- [24] Kowalski S.J., Thermomechanics of drying processes, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Springer, 2003.
- [25] Lilia.M. (2007) Leffet des conditions variables de séchage sur la cinétique de séchage et la qualité de L'ail Departement des sciences des aliments et de nutrition faculté des sciences de agriculture et de alimentation Universté LAVAL QUEBEQ
- [26] Bonazzi.C.Dumoullin.E.and Bimbenet.J (2008) Le séchage des produits alimentaires.Industrie Alimentaire Agricole.125,12-22

Conclusion général

Le séchage est l'un des processus de conservation qui permet d'augmenter de la durée de stockage des produits agroalimentaire dans la production l'industrie, ce qui renforce l'utilisation des multiples techniques dans le secteur industriel, en fonction de la diversité des produits traités, une étape de séchage est nécessaire au conditionnement de la qualité finale du produit.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés par ce travail de suivre le comportement de certaines propriétés qui influencent le comportement du séchage afin de comprendre les phénomènes pouvant participer au développement de ce procédé par l'étuve de séchage et sa capacité à l'améliorer. Les performances aux quelle nous avons voulu étudier la sensibilité de la cinétique du séchage des couches minces de tranches de pommes de terre par prétraitement de salage à sec sous différentes conditions (multiples : épaisseurs, teneurs en sel et débits d'air) permettant de réduire significativement le temps de séchage par convection forcée à travers un four Nabertherm ventilé.

Notre travail a été consacré pour l'étude expérimentale du séchage industriel par étuve a convection forcée, et notre approche consisté à étudier l'influence de la salaison à sec du prétraitement de chlorure de sodium en différentes teneurs sur le séchage des tranches de pomme de terre en couches mince et analyser les combinaisons de certaines conditions et de voir leurs effets sur l'amélioration de la cinétique du séchage.

Après la réalisation des fréquents testes de séchage par combinaisons entre trois différentes teneurs en chlorure de sodium avec trois températures de séchage sur trois épaisseurs de tranches de pomme de terre en couches mince sur trois débits d'air chaud, l'issu de cet effort nous a mené à résumé tous ces concepts par des illustration graphique a l'aide du logiciel origine-8 lab.

Les résultats obtenus de ce travail sont conclus comme suite :

Le processus du séchage des produits agroalimentaire est difficile à contrôler vue leur structures botanique complexe, leurs natures poreuses et biochimique et leur classification par contenances organiques ou de point de vue physique (ART classification physique des aliments), en plus en peut compter l'écart la divergence de l'exactitude entre les prises des

Conclusion général

mesures lors des essais ou même du taux de performance des appareils de mesures utilisées vue la sensibilité du produit a testés.

La vitesse du séchage est performante lorsque l'échange de chaleur entre le produit et le milieu environnant et cela peut être dû à des différents facteurs :

La porosité du produit et sa constitution biologique ainsi que sa capacité à la rétention d'eau exprimée par la quantité d'eau pouvant être contenue au sein de ce produit.

La taille du produit et son épaisseur jouent un grand rôle sur la cinétique du séchage, plus que son diamètre est grand plus que la surface d'échange augmente, et la diminution de son épaisseur convient avec la minimum quantité d'eau inclus ce qui diminue le temps de sa déshumidification.

L'augmentation de la température du séchage agis positivement sur la diminution du temps du séchage par conséquences il y a des limites de températures exercer au séchage industriel puisque l'augmentation de la température au-delà de certaines valeurs peuvent engendrer des effets in digérable sur le produit a séché(forme, couleur, arôme et qualité nutritionnel.

L'abaissement de température de séchage sous la limite marginale peut lui aussi causé l'endommagement ou la dégradation du produit à sécher sous l'activité de l'eau par le déclenchement des réactions enzymatique et microbienne au sein du produit qui provoquent sa moisissure.(technologie des industries agro-alimentaire)./(l'effet des conditions variables de séchage sur la cinétique de séchage et la qualité de l'ail)

Le débit d'air chaud utiliser pour le séchage a une influence sur le séchage d'après les résultats obtenues par Nguyen 2015 [2]

Le débit d'air asséchant agis positivement pour certains produits sur la cinétique de séchage et l'empreinte du débit d'air apparait souvent au début de processus mais son effet reste toujours en fonction de la nature du produit à sécher et sa porosité, la ou Le transfert de matière et de l'énergie sont contrôlés par les forces internes les échange de chaleur et de masse entre le cœur du produit et sa surface deviennent régissantes en ce cas-là l'effet de la vitesse de l'air sur le processus de séchage s'affaiblie, ce qui se met en accord avec les résultats obtenues par notre étude sur les épaisseurs minces des tranches de pomme de terre.

Conclusion général

-L'étude de la cinétique du séchage des tranches de pomme de terre en couches mince dans à travers un séchoir étuve à convection forcé nous serve à analyser uniquement la période de séchage a allure décroissante l'absence de la phase a allure constante le de la monté de température, et cela est convenable avec les aliments agroalimentaires feuilletés.

Le prétraitement des tranches de pomme de terre en couche mince par salage à sec en chlorure de sodium a des différentes teneurs n'importe pas une influence significatif sur la cinétique du séchage, par contre son effet sur le brunissement enzymatique [1] , a été très remarquable avec tout les essais de notre étude pour les épaisseurs de 3 et 4 mm, les échantillons prétraité a L' NaCl ont subites un changement de couleur graduer de grise vers le noir sous forme de taches qui se propagent sur leurs surfaces relativement moins intense avec l'augmentation de la teneur en NaCl.

Le prétraitement au chlorure de sodium minimise le changement de couleur indice de détérioration et diminue le risque de dégradation des produits alimentaires causé par les activités enzymatiques.

Ce qui été aussi remarquable suivant tous les combinaisons de tests et spécialement à des températures basses (40°C) est que les échantillons sans prétraitement avaient la forme rétrécis et croustillante un aspect de croustage a été due au séchage trop rapide suite à la formation d'une couche durcis a la surface des échantillons(d'après croustage2),par contre les échantillons prétraités a l'NaCl en teneur de (0.25g,0.50g et 0.75g) ont gardaient leurs formes après déshumidification et apparaissaient plus élastique se qui signifie aussi que le prétraitement en chlorure de sodium handicape le séchage trop rapide des tranches de pomme de terre et les conservent contre phénomène de croustage. D'après nos résultats on constate que séchage des tranches minces de pomme de terre a l'état naturelle sèchent en avance on comparaison à l'autres prétraité au chlorure de sodium.

De toute évidence, ces expériences n'expliquent pas complètement les phénomènes associés au processus de séchage ; En effet, davantage d'expérimentations sur le dispositif expérimental utilisé doivent être menées, et une modélisation du comportement au séchage doit être réalisée à l'aide des résultats obtenus de ce mémoire. De plus, sur notre system de séchage, d'autres mesures peuvent être prises, comme la mesure de la consommation électrique nécessaire à une

Conclusion général

évaluation complète de l'utilisation de l'énergie et l'analyse microscopique des échantillons étudiés, et des améliorations peuvent être apportées en conséquence.

A la fin de notre mémoire en se basons sur les expériences menés par plusieurs chercheurs et les descriptions conclus pars plusieurs groupes d'auteur sur la cinétique de séchage et l'évolution de la température durant ce processus on pourra estimer que notre étude est à un moindre degré optimal de la performance pour décrire les phénomènes occupantes durant ce travail et nous suggérant de continuer par cette approche et de la appliquer sur d'autres produits alimentaires à titre comparatif afin d'arrivé à se rapprocher à comprendre les comportements des produits alimentaires et trouver les meilleurs moyens de les conservés.

Referents:

[1] Teisson, C. (1979). Le brunissement interne de l'ananas. I. Historique. II. Matériel et méthodes. *Fruits*, 34(4), 245-261.

[2] Nguyen, A., Yosinski, J., & Clune, J. (2015). Deep neural networks are easily fooled: High confidence pr

[3] tions for unrecognizable images. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 427-436).

Résumé:

Notre étude expérimentale vise à étudier l'effet du salage à sec sur les tranches minces de pomme de terre sous des différentes conditions influentes sur la cinétique du séchage, Le but été de valoriser l'efficacité de ce processus sur l'échelle industriel afin de pouvoir trouver un moyen d'améliorer la qualité des produits a séchée et d'arrivé à déterminer une solution pour minimiser le temps du séchage. Il a été constater que le post-traitement par salaison de couche mince des produits alimentaire ne peut être juger sur la cinétique du séchage a cause de la complexité des mécanismes de transfert de l'humidité sur ces dernier et son effet demeure variable par un system de séchage a convection forcé ,par conséquences l'effet du salaison a été bénéfique sur la forme et la couleur des tranches de pomme de terre sous le séchage convectif.

Abstract :

Our experimental study aims to study the effect of dry salting on thin slices of potatoes under different conditions influencing the kinetics of drying. The goal was to enhance the efficiency of this process on an industrial scale in order to be able to find a way to improve the quality of the products dried and to come up with a solution to minimize the drying time. It was noted that the post-treatment by salting of thin layer of food products cannot be judged on the kinetics of the drying because of the complexity of the mechanisms of transfer of the humidity on these last and its effect remains variable by a forced convection drying system, consequently the effect of salting was beneficial on the shape and color of potatoes slices under convective drying.