

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département de Génie mécanique

N° :...../2023

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: Génie Mécanique

SPECIALITE : Energétique

Thème

Etude expérimentale d'un séchoir destiné aux produits agro-alimentaires

Présenté Par : Djamaa Lazhar

Bouanika Nadia

Encadré Par : Mme. Ghalleb Amel

Date de soutenance : 03/07/2023

Jury de Soutenance

Président : Mr. Djimli Samir

Grade MCA

Univ MSB Jijel

Encadreur : Mme. Ghalleb Amel

Grade MCB

Univ MSB Jijel

Co-encadreur : Mr. Boutalba Ismail

Grade.....

Univ MSB Jijel

Examineur 1: Mr. Bourouis Abderrahim

Grade MCA

Univ MSB Jijel

Promotion : 2022 /2023

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le Courage, la volonté, la patience et la Santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail peut être réalisé.

Nous tenons d'exprimer notre remerciement et gratitude à notre encadreur Madame : Ghellab Amel qui nous a aidés pour rendre à travail effectif.

Nous profondes reconnaissances vont à monsieur Boutelba Ismaïl pour l'aide et le temps que nous ont offert.

Notre remerciement aussi au département de mécanique de l'université de Jijel et à tous les enseignants qui nous enseignent durant les années du cursus.

En fin nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

A tous, un grand merci.



DEDICACES

Je dédie ce noble travail...

*A ma mère et mon père qui m'ont soutenu et encouragé dans
les moments les plus difficiles.*

A mon frère adorable Yakoub et sa femme Amira

A mon petite frère Yahia et ma petite sœur Meriem

Que Dieu me les garde

A mon binôme dans le travail "Lazhar".

A toute ma famille et à tous mes amis.

Nadia



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A ma mère et mon père qui m'ont soutenu et encouragé dans les moments les plus difficiles.

A mes frères Chams Eddine, Anis et à mes sœurs Manar

et Safa, Marwa et mon amie Marwa.

Sans oublier mon binôme Nadia.

A toutes ma famille et mes amies.

A tous ceux que j'aime.

Lazhar

Sommaire

Liste des acronymes	I
Liste des figures	III
Liste des tableaux	VI

Table de matière

Chapitre I : Généralité sur le séchage

Introduction générale.....	1
I.1.Introduction.....	3
I.2.But de séchage	3
I.3.Domains d'utilisation.....	3
I.4.Les différents modes de séchage.....	4
I.4.1. Mode mécanique	4
I.4.2. Mode chimique.....	4
I.4.3. Mode thermique	4
I.5. Phénomènes de transfert.....	5
I.5.1. Isotherme de désorption.....	5
I.5.2. Quelques modèles empiriques des isothermes de désorption.....	7
I.5.3. Cinétique de séchage.....	7
I.6. Types de séchoirs	9
I.6.1. Séchoir direct : (par convection)	9
I.6.1.1. Sécheur tunnel.....	9
I.6.1.2. Tambour rotative.....	10
I.6.1.3. Séchoir silo	11
I.6.2. Séchoirs indirects : (par conduction)	12
I.6.2.1. Sécheur à palette / vis	12
I.6.2.2. Lyophilisation.....	12
I.6.2.3. Etuve de séchage.....	13
I.6.3. Séchoirs mixtes.....	14
I.7. Différents produits du séchage.....	15
I.8. Conclusion	15

Chapitre II : Partie expérimentale et analytique

II.1. Introduction	16
II.2. Description de l'unité	16
II.2.1. Les parties principales de l'unité	16
II.2.1.1. Une chambre séchage.....	16
II.2.1.2. Une partie de Traitement d'air	16
II.2.1.3. Une partie d'acquisition et de contrôle	16
II.2.2. Caractéristiques de l'unité	17
II.3. Principe de fonctionnement	18
II.4. Pratiques disponibles	18
II.5. Générateur de vapeur (TGV)	18
II.5.1. Identification des éléments	19
II.5.2. Installation de l'unité TGV	19
II.5.3. Service de la manipulation	20
II.6. Modèle produit (La fraise)	21
II.6.1. Historique sur la fraise	21
II.6.2. Description de la fraise	22
II.6.3. Culture de fraise dans l'Algérie	22
II.7. Analyse de la cinétique de séchage	23
II.7.1. Protocole expérimentale.....	23
II.7.2. Essai préliminaire	24
II.7.3. Essais principaux	25
II.8. Evaluation de la cinétique de séchage	28
II.8.1. Modèle diffusif.....	28
II.8.1.1 L'activité de l'eau	29
II.7.2. Modèle semi-empiriques	29
II.9. Couplage d'une pompe à chaleur au séchoir.....	30
II.10. Conclusion.....	31

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction	32
III.2. Essai préliminaire	32
III.3. La cinétique de séchage.....	33
III.3.1. Reproductibilité de l'essai 1	34
III.3.2. L'influence des différentes conditions sur le cinétique de séchage	35
III.3.2.1. L'influence de la vitesse de l'air.....	35
III.3.2.2. L'influence de la Température d'air	36
III.3.2.3. Influence de l'humidité d'air	37
III.3.2.4. Influence de l'épaisseur de la fraise	38
III.3.2.5. Influence de nombre des claies	39
III.3. Calcul du coefficient de diffusion.....	40
III.4. Calcul de la teneur en eau.....	42
III.4.1. Calcul de la teneur en eau réduite	43
III.5. Conclusion	46
Conclusion générale	47
III.5. Liste des références.....	48

Liste acronymes

Symboles

A

a_w Activité de l'eau du produit.

C

C Concentration volumique ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{m}^{-3}$).

H

H_r Humidité relative [%]

M

M_b Poids du bol métallique [g].

M_ϵ Poids de l'étagère [g].

$M_{\epsilon f}$ Poids de la fraise avec le poids d'étagère [g].

M_s Poids de l'échantillon après l'avoir sortie [g].

M_m Poids mélange (sable + l'eau) [g].

P

P_{sat} Vapeur saturante à la température de surface de produit [Pa].

P_v Pression partielle [Pa].

P_{vp} Vapeur a la surface de produit [Pa].

T

T Température de l'air [C°].

T_{ar} Température de la fraise dans l'arrière de l'étagère [C°].

T_{av} Température de la fraise dans l'avant de l'étagère [C°].

T_c Température dans le centre du produit [C°].

T_m Température dans le milieu de l'étagère [C°].

T_s Température de la surface de sable [C°].

t Temps (min).

V

V Vitesse de l'air [m/s].

X

X Teneur en eau [$\text{kg}_e \cdot \text{kg}_{ms}$].

X_0 Teneur en eau initiale [$\text{kg}_e \cdot \text{kg}_{ms}$].

XR Teneur en eau réduite [$\text{kg}_e \cdot \text{kg}_{ms}$].

Abréviation

PAC Pompe a chaleur.

PID Régulateur Proportionnel, intégrale, Dérivé.

TGV Générateur de vapeur.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Quelques produits pour l'industrie de séchage	4
Figure I.2. Différentes phases dans un milieu solide.....	5
Figure I.3. Courbe classique d'une isotherme de sorption	5
Figure I.4. Schéma du passage de l'air dans SBANC	6
Figure I.5. Courbe de vitesse de séchage	8
Figure I.6. Courbe de Kircher.....	8
Figure I.7. Sécheur tunnel	9
Figure I.8. Tambour rotatif	10
Figure I.9. Sécheur silo.....	11
Figure I.10. Sécheur à palette / vis	12
Figure I.11. Lyophilisation	13
Figure I.12. Sécheur étuve à claie	14

Chapitre II

Figure II.1. Schéma présentatif du l'unité expérimental.....	17
Figure II.2. Générateur de vapeur au niveau du laboratoire énergétique, université de Jijel	19
Figure II.3. Les principaux boutons de SBANC	20
Figure II.4. La fraise (Sabrina).....	22
Figure II.6. Matériel de l'essai	25
Figure II.7. Placement du bol en métal dans l'unité de séchage	26
Figure II.8. Capteur de température	26
Figure II.9. Le sable après la fin de l'essai.....	26
Figure II.10. L'étagère	27
Figure II.11. L'échantillon du frais à 3mm	27

Figure II.12. La position des captures	27
Figure II.13. L'échantillon de la fraise à 5mm.....	27
Figure II.14. Couplage à pompe à chaleur	30

Chapitre III

Figure III.1 Evolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps	33
Figure III.2. Evolution de la température de fraise en fonction du temps	33
Figure III.3. Evolution de la masse du produit en fonction du temps.....	33
Figure III.4. Evolution de la masse du produit en fonction du temps.....	34
Figure III.5. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps	34
Figure III.6. Evolution de la température du produit en fonction du temps	35
Figure III.7. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de temps essai 1 et essai 3	35
Figure III.8. Evolution de la température du produit en fonction de temps essai 1 et essai 3	36
Figure III.9. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de temps essai 1 et essai 4	36
Figure III.10. Evolution de la température du produit en fonction de temps essai 1 et essai 4	37
Figure III.11. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de temps essai 1 et essai 5	37
Figure III.12. Evolution de la température du produit en fonction de temps essai 1 et essai 5	38
Figure III.13. Evolution teneur en eau du produit en fonction de temps essai 1 et essai 6....	38
Figure III.14. Le changement de la température du produit en fonction de temps essai 1 et essai 6	39
Figure III.15. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de temps	39
Figure III.16. Evolution de la température du produit en fonction de temps.....	40
Figure III.17. Variation du coefficient de diffusion du produit en fonction de la teneur en eau du produit	41

Figure III.18. Variation du coefficient de diffusion du produit en fonction de l'épaisseur du produit.....	41
Figure III.19. Variation du coefficient de diffusion du produit en fonction dans les trois claies en fonction teneur en eau du produit	42
Figure III.20. Relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau de la fraise.....	42
Figure III.21. Evolution teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul	44
Figure III.22. Relation entre la teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul	44
Figure III.23. Evolution teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul 4	44
Figure III.24. Evolution teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul essai 5	45
Figure III.25. Evolution teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul essai 6	45

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Modèles empiriques des isothermes de désorption.....	7
Tableau I.2. Type de produit	9
Tableau I.3. Exemples d'applications	10
Tableau I.4. Avantages et inconvénients de séchoir direct	11
Tableau I.5. Avantages et inconvénients de séchoir indirect	14
Tableau I.6. Avantages et inconvénients de séchoir mixte [4].....	15
Tableau I.7. Quelques travaux sur le séchage	15

Chapitre II

Tableau II.1. Illustrant l'identification des différents capteurs	17
Tableau II.2. Description des abréviations	19
Tableau II.3. Quelques types de fraisière cultivés dans l'état de Jijel et leur caractéristique	23
Tableau II.4. Conditions moyennes pour différentes expériences.	24
Tableau II.5. Modèles empiriques de cinétique de séchage.....	29

Chapitre III

Tableau III.1. Résultats statistiques pour les trois modèles empiriques.....	43
---	----

Introduction générale

De nos jours, les trois principales tendances : la durabilité, la santé et la commodité ont un impact croissant sur la consommation du séjour. La durabilité s'accompagne d'une prise de conscience croissante de l'expansion de l'agriculture biologique et de la santé soulevée par le nombre d'aliments liés à l'alimentation des maladies telles que le diabète, l'obésité, les allergies, la commodité liée à la facilité de consommation comme les plats cuisinés et la durée de conservation prolongée. Le séchage servait donc à conserver les aliments.

La lumière du soleil est encore largement utilisée comme source dans l'antiquité, lorsque l'homme utilisait le rayonnement solaire pour sécher les céréales, les légumes, les fruits, le poisson et la viande. Avec le progrès de la technologie, de nouvelles méthodes de séchage des aliments ont été développées rapidement et efficacement avec un meilleur niveau de qualité.

Le séchage est particulièrement important pour les aliments à forte teneur en humidité et a durée de conservation définie que les fruits et les légumes. L'objectif principal du séchage est d'éliminer l'eau libre à un niveau ou de réduire la reproduction des micro-organismes incapables de se développer et de se reproduire dans des environnements plus secs.

Le moyen le plus courant de conserver les aliments est le séchage à l'air chaud. Cependant, en raison des périodes de séchage et de température utilisées, ce processus entraîne de graves dommages à la saveur du produit et aux nutriments. Pour résoudre ces problèmes, des processus de séchage plus rapides et plus efficaces peuvent être considérés.

Ce mémoire se compose de trois chapitres, en plus d'une introduction et d'une conclusion générale. Les expériences ont été menées au laboratoire de génie mécanique (énergétique) de l'université de Jijel.

Le premier chapitre traite des généralités sur le séchage en présentant d'abord le concept, les objectifs, les domaines d'utilisation, les différents modes de séchage puis les phénomènes de transport, ainsi que quelques types de séchoirs utilisés.

Le deuxième chapitre traite des composants de la machine, du principe de fonctionnement et des travaux à effectuer. Le produit utilisé pour mener les expériences est présenté (fraise Sabrina). Les expériences ont été menées dans diverses conditions atmosphériques pour mieux comprendre le comportement hydro-thermique et enfin d'une pompe à chaleur pour récupérer et réutiliser l'énergie perdue.

Le troisième chapitre traite la présentation des résultats expérimentaux, du calcul du coefficient de diffusion et calcul du teneur en eau réduite par l'utilisation des quelques modèles empiriques.

Chapitre I
Généralité sur le séchage

I.1. Introduction

Le séchage est un processus qui consiste à éliminer l'humidité d'un matériau solide, liquide, ou gazeux en utilisant différentes méthodes telles que l'exposition à l'air chaud, l'utilisation d'un ventilateur, l'application de chaleur.

Ce chapitre présente les aspects théoriques du processus de séchage (type, technique, caractéristique) et aussi se porte sur les traitements thermiques des produits agro-alimentaires, car la disponibilité des denrées alimentaires tout au long de l'année est une des exigences humaines nécessaire pour continuer à vivre.

I.2. But de séchage

Le séchage est utilisé pour atteindre plusieurs objectifs notamment :

- ✓ Le séchage est couramment utilisé pour prolonger la durée de conservation des aliments.
- ✓ Réduction de taille et de poids
- ✓ Amélioration de la qualité de certains matériaux.
- ✓ Préparation de produits
- ✓ Stockage et transport.

I.3. Domaines d'utilisation

Il peut être utilisé dans des nombreux domaines pour différents objectifs :

- ✓ Industrie alimentaire
- ✓ Industrie chimique
- ✓ Industrie pharmaceutique
- ✓ Industrie textile
- ✓ Industrie papetière
- ✓ Industrie de bois
- ✓ Industrie céramique

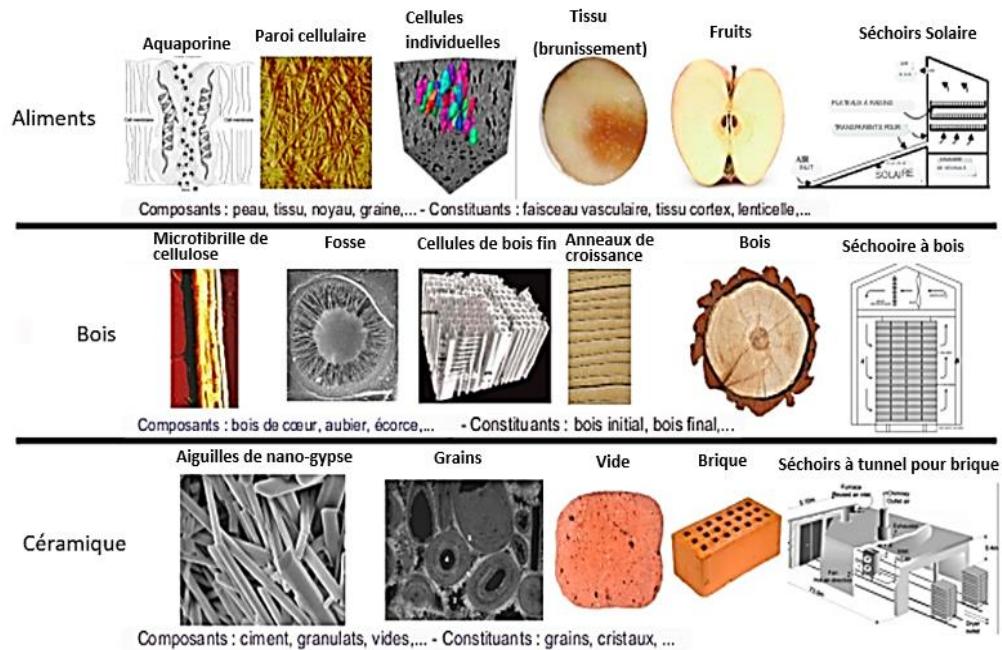


Figure I.1. Quelques produits pour l'industrie de séchage [1]

I.4. Les différents modes de séchage

Il y a trois modes de séchage peuvent être distingués :

I.4.1. Mode mécanique

C'est une opération qui utilise la force mécanique pour but d'éliminer humidité d'un matériau, le principal avantage un séchage rapide et efficace ce qui réduit les couts de production et le temps d'arrêt des machines.

I.4.2. Mode chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation des produits déshydratants pour extraire de l'eau, comme l'acide sulfurique, l'acide phosphorique...etc.

I.4.3. Mode thermique

Le séchage thermique est un processus qui utilise la chaleur ; cette opération nécessite de contrôler la température et la vitesse de l'air et de l'humidité relative d'environnement de séchage.

I.5. Phénomènes de transfert

La plupart des procédures de séchage comprennent l'élimination de l'eau d'un matériau, ce qui le déshydrate. Trois étapes peuvent être utilisées pour créer ce matériau (Figure I.2).

- Phase solide, elle représente la substance sèche car il peut s'agir de glace, comme dans le cas de la lyophilisation.
- La phase liquide, qui peut être dans l'un des trois états suivants : non liée (libre), physiquement liée (adsorbée) ou liée chimiquement.
- Phase gazeuse, y compris l'air sec et la vapeur d'eau ainsi que d'autres gaz. [2]

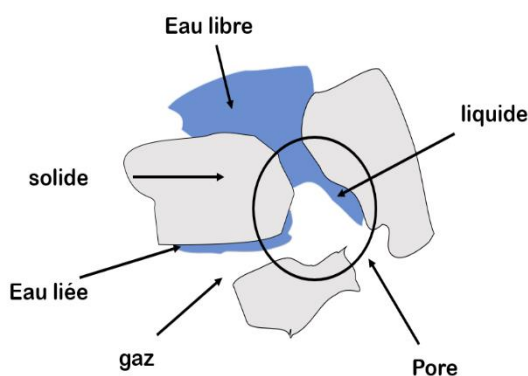


Figure I.2. Différentes phases dans un milieu solide

I.5.1. Isotherme de désorption

L'isotherme de désorption est une courbe qui trace la teneur en eau à l'équilibre du produit (X_e), en fonction de l'humidité relative de son environnement (H_r).

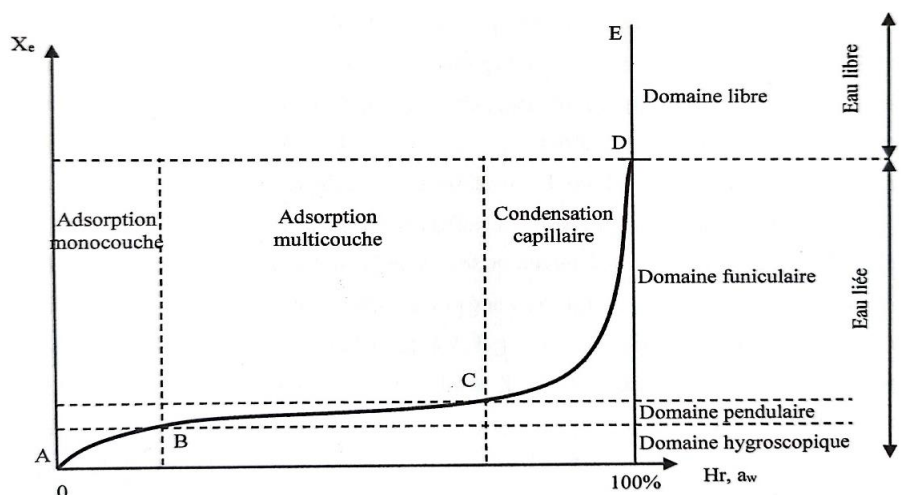


Figure I.3. Courbe classique d'une isotherme de sorption [2]

En divisant la pression de la vapeur saturée P_{sat} par la pression de la vapeur P_{vp} (à la surface du produit), on peut déterminer l'activité de l'eau dans un corps humide, ou « a_w ».

Le corps est en équilibre hygroscopique avec l'air environnant, lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre le produit et l'air, on aura une égalité entre la pression P_{vp} et la pression partielle P_v dans l'air, dans ce cas l'activité de l'eau du produit est égale à l'humidité relative de l'air ($a_w = Hr$).

Les quatre zones suivantes mettent à part les isothermes de sorption sous forme de courbes

AB : C'est un exemple de dominance hygroscopique, dans laquelle une seule couche de molécules d'eau adsorbées recouvre la surface solide. Les forces d'interaction sont brèves et assez fortes. [2]

BC : est une représentation du domaine pendulaire, où les molécules d'eau sont maintenues en plusieurs couches sur une surface solide. Des forces moins puissantes interagissent les unes avec les autres. [2]

CD : représente le domaine funiculaire, où les couches de molécules d'eau se rassemblent et sont faiblement liées par des forces capillaires dans les micropores du solide. [2]

DE : La teneur eau libre peut être estimée à $a_w = 1$; Cependant, en raison des difficultés expérimentales liées au choix d'un nombre élevé d'humidité relative ou (activité de l'eau correspondante), cette conclusion n'est généralement pas exacte. [2]

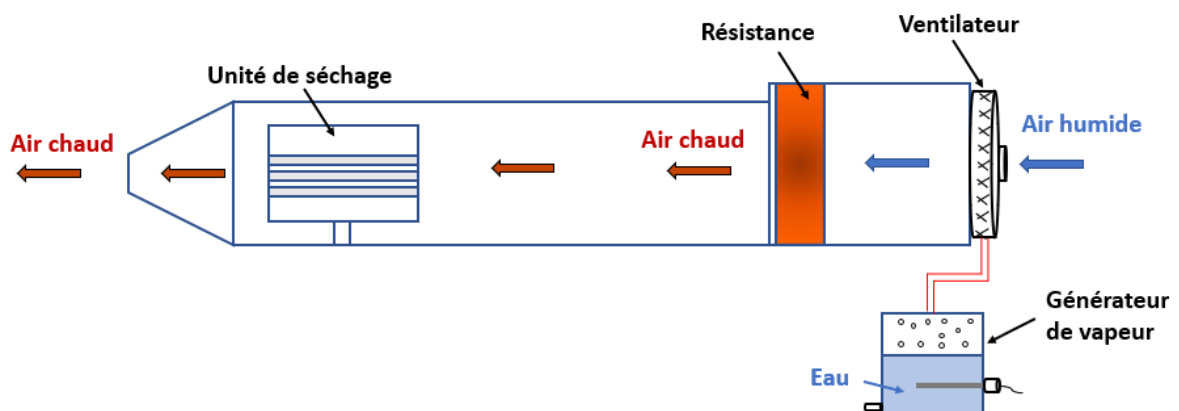


Figure I.4. Schéma du passage de l'air dans SBANC

Il est possible de prédire quels microbes seront des causes probables de détérioration et de maladie en évaluant l'activité de l'eau des aliments. [2]

I.5.2. Quelques modèles empiriques des isothermes de désorption

Tableau I.1. Modèles empiriques des isothermes de désorption [2]

Modèle	Equation
Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T, 1938)	$X_e = \frac{X_{mc} C a_w}{[(1+a_w)+(C-1)(1-a_w)a_w]} \quad (I.1)$
Oswin modifié (1943)	$X_e = (A + BT) \left(\frac{a_w}{(1-a_w)} \right)^C \quad (I.2)$
Helsey modifié (1948)	$X_e = \left(- \frac{\ln \ln (A+BT)}{\ln \ln a_w} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (I.3)$
Henderson modifié (1952)	$X_e = \left(- \frac{\ln \ln (1-a_w)}{(T+B)} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (I.4)$
Chung-Pfost (1967)	$a_w = \exp \exp \left[- \frac{A}{T+B} \exp \exp (-C X_e) \right] \quad (I.5)$
Chen (1971)	$a_w = \exp \exp [A - B \exp(-C X_e)] \quad (I.6)$
Iglesias-Chirif (1976)	$\ln \left(X_e + \sqrt{(X_e^2 + X_{1/2})} \right) = Z_1 a_w + Z_2 \quad (I.7)$
Guggenheim-Anderson-de Boer (G.A.B)	$X_e = \frac{C K X_{mc}}{(1-K a_w)(1-K a_w + K a_w)} \quad (I.8)$

(A, B, C, K, Z₁ et Z₂ : sont des constants qui dépendent généralement de la température de l'air,

X_{mc} : humidité absolue d'une monocouche en (kg_{eau}/kg_{mc})

I.5.3. Cinétique de séchage

Les recherches sur les cinétiques de séchage permettront d'identifier plus facilement les meilleures tactiques de séchage, de réguler et d'améliorer les procédés. Ce qui pourrait remplacer l'exigence d'une expérience coûteuse et approfondie pour déterminer les conditions de séchage appropriées. Afin de créer un modèle de séchage, il est nécessaire d'avoir une compréhension approfondie du taux de séchage. En conséquence, le processus d'élimination de l'humidité et sa relation avec les variables du processus sont représentés à l'aide de la cinétique de séchage.

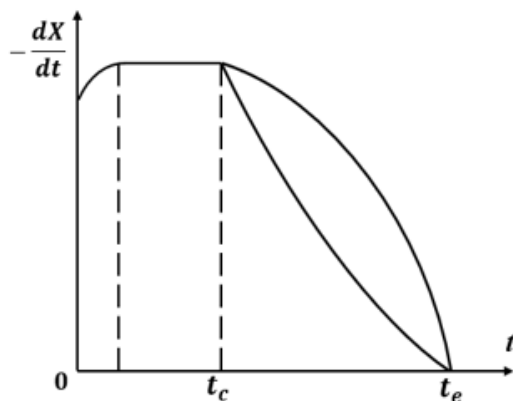


Figure I.5. Courbe de vitesse de séchage [2]

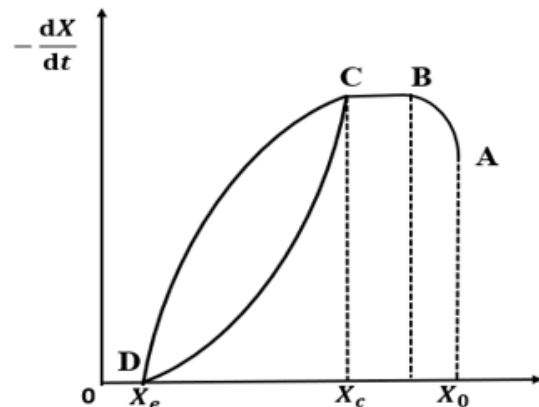


Figure I.6. Courbe de Kircher [2]

a/Période de préchauffage (A-B) :

En raison de la chaleur transportée par l'air, la température du produit augmente jusqu'à ce qu'il atteigne la température de bulbe humide de l'environnement tout en évaporant une quantité d'eau spécifique. Ce n'est que lorsqu'un produit est particulièrement volumineux ou lorsqu'il existe une différence de température importante entre le produit et l'air que cette période devient apparente. Il est également réputé pour être succinct.

b/Période à vitesse constante (B-C) :

La température du produit est constante et correspond toujours à la température de bulbe humide de l'air. Dans la couche limite, presque toutes les résistances de transfert existent. Par conséquent, en plus de la surface à sécher et de la pression, d'autres facteurs (circonstances externes) qui affectent la vitesse de séchage comprennent l'humidité, la température et la vitesse de l'air, et consommé grande quantité d'énergie.

c/Période de ralentissement (C-D)

En général, les solides hygroscopiques et non hygroscopiques présentent deux périodes de ralentissement. Le modèle à mouvement frontal et le modèle à surface mouillée sont les deux modèles les plus utilisés. [2]

I.6. Types de séchoirs

Il existe 03 types de séchoirs dont la technologie est liée au mode de transfert de l'énergie :

I.6.1. Séchoir direct : (par convection)

I.6.1.1. Sécheur tunnel

Dans un séchoir tunnel, le produit à traiter circule longitudinalement d'un bout à l'autre de l'enceinte à l'intérieur d'une enceinte fixe. Le produit initial peut être placé près de l'entrée du tunnel à l'aide d'une machinerie appropriée, telle qu'un tapis oscillant, une vis d'étalement, un distributeur vibrant ou une boudineuse. La plupart du temps, le produit est chauffé à l'aide d'un fluide de séchage (circulation d'air chaud). La chaleur peut être transférée de nombreuses façons. [3]

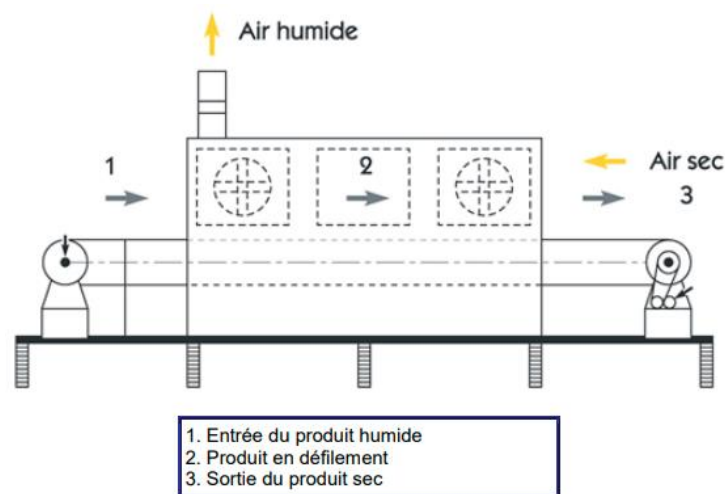


Figure I.7. Sécheur tunnel [3]

Tableau I.2. Type de produit [3]

Produit pâteux
Produit pulvérulent, granulaire, fibreux
Produit plan, en forme, en morceaux

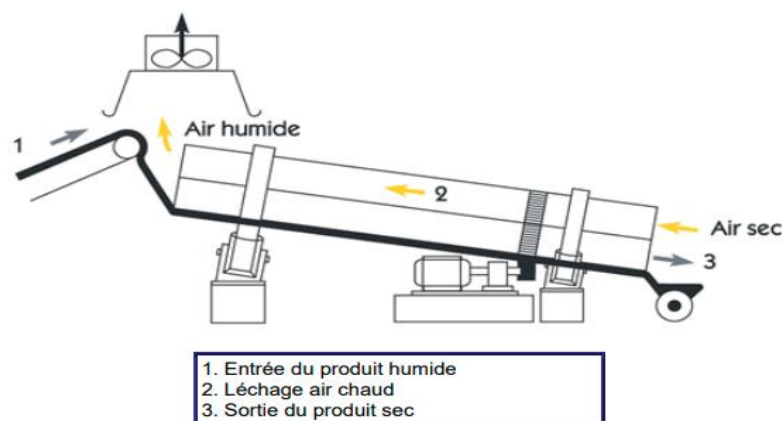
Tableau I.3. Exemples d'applications [3]

Teneur en eau	Gélatine	Laine en bourre	Fruits et légumes	Briques et tuiles
Initiale	70 %	35 - 40 %	80 - 90 %	20 %
Finale	10 %	0,1 - 15 %	5 %	3 %

I.6.1.2. Tambour rotative

Un long tambour (cylindre) tourne lentement autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontale dans ce séchoir. Le produit humide est introduit dans la partie supérieure à l'aide soit d'un tapis, soit d'une vis d'Archimède. Le produit avance par gravité et les grains s'empilent les uns sur les autres. Il y a deux types de tambour.

- **Séchoir tambour convectif :** Dans certains cas, la paroi intérieure du cylindre est recouverte d'ailettes, ce qui fait monter et descendre le produit comme de la pluie lorsque la machine tourne. En augmentant la surface entre le produit et l'air, cette méthode réduit considérablement le temps de séchage.
- **Séchoir tambour conductif :** La paroi du cylindre est chauffée extérieurement par les gaz de combustion. Le produit humide reçoit de la chaleur par conduction depuis l'intérieur du cylindre. Il doit y avoir un flux d'air pour extraire la vapeur d'eau. Des exemples de produits qui peuvent être utilisés comprennent le sable, la pulpe de betterave, les pâtes et d'autres choses. [3]

**Figure I.8.** Tambour rotatif [3]

I.6.1.3. Séchoir silo

L'article humide est placé au-dessus de la sécheuse, où la gravité le pousse vers le bas. Le flux de grains peut être régulé en ouvrant et en fermant fréquemment les vannes.

L'air chaud est irrigué sur la couche de grain via des gaines ou des dièdres dans la zone de séchage. Ces conduits assurent que le grain recevra l'énergie dont il a besoin pour sécher et que l'air vicié sera évacué. L'air froid est soufflé à travers les conduits inférieurs du séchoir, ramenant la température du grain à la température ambiante. L'air de la partie basse du sécheur est recyclé soit dans la partie haute du sécheur soit en amont de l'installation, au niveau du générateur d'air chaud. [3]

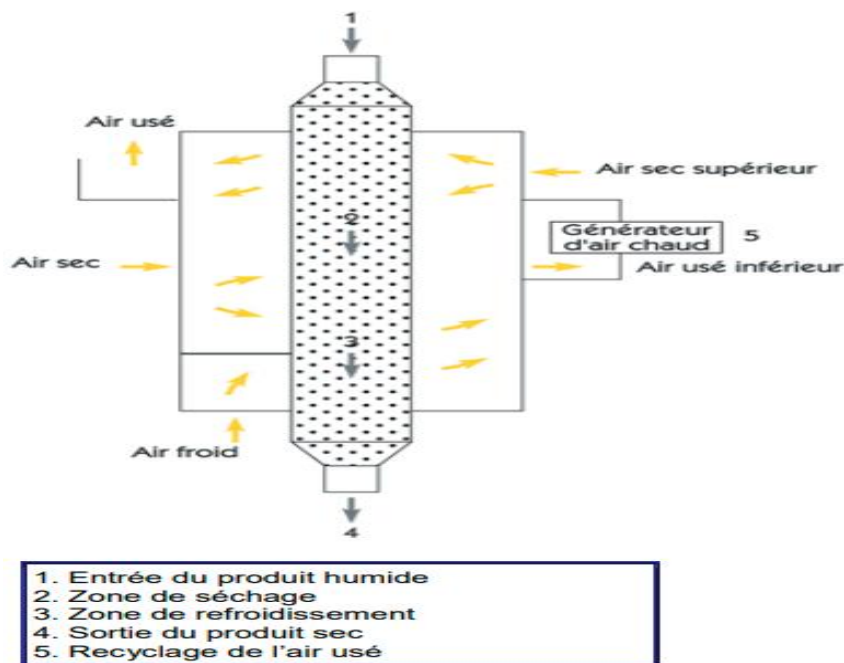


Figure I.9. Sécheur silo [3]

Tableau I.4. Avantages et inconvénients de séchoir direct [4]

Séchoir direct	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Conception simple • Souplesse d'adaptation aux variations de siccité en entrée. • Capacités importantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité de buées à épurer. • Grande taille des installations de traitement des odeurs. • Moins rentable pour les petites installations.

I.6.2. Séchoirs indirects : (par conduction)

I.6.2.1. Sécheur à palette / vis

Le séchoir à pales est constitué d'une lame fixe à chaque extrémité d'un corps cylindrique horizontal (stator) qui tourne autour d'un arbre (rotor) fixé à des bras. Au lieu d'utiliser un bras et une pelle, des segments de disque radiaux sont utilisés pour traiter les produits pâteux.

Il peut y avoir un arbre avec des contre-lames pour garantir un nettoyage plus efficace de l'arbre principal. L'enveloppe extérieure est chauffée à l'aide de gaz chauds ou d'un fluide thermique. L'arbre et les pales peuvent tous deux être traversés par un fluide thermique.

Il existe d'autres variantes de la technique standard (séchoir à vis). Voir boues de peinture organiques et boues de peinture solubles dans l'eau pour des exemples d'application. [3]

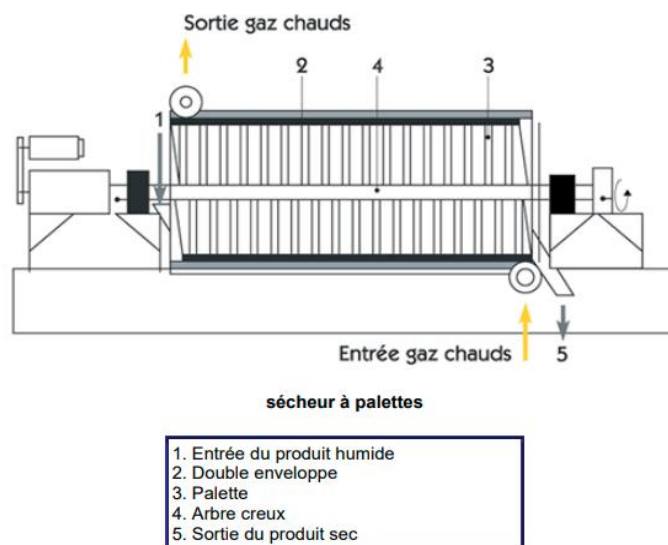
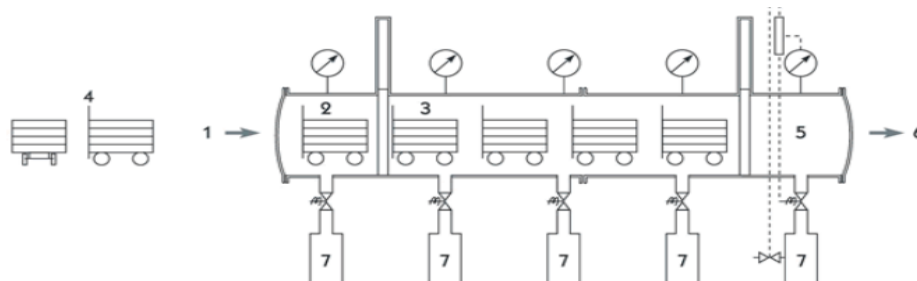


Figure I.10. Sécheur à palette / vis [3]

I.6.2.2. Lyophilisation

Ce procédé combine les effets du froid et du vide en provoquant la sublimation de l'eau qui passe directement de l'état congelé à l'état vapeur sans passer par la phase liquide. Une procédure de séchage en trois étapes est appelée lyophilisation : le produit est congelé à basse température (-30 à -50 °C), après la glace est sublimée en plaçant le produit congelé dans une chambre de séchage fonctionnant sous un vide poussé. (Pression absolue : 100 Pa). Ce

qui entraîne alors l'évaporation de l'eau. Vient ensuite la désorption finale de l'eau liée, qui permet d'éliminer toute eau accumulée dans les micro capillaires ou devenue absorbante. La technique de base (chariots sécheurs, atomisation plus lyophilisation) se décline sous différentes formes. Les fraises et les champignons sont deux exemples d'applications. [3]



lyophilisation (séchateurs à chariots)

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Entrée du produit humide 2. Mise en dépression 3. Chariot mobile (avec surface chauffante) 4. Plaque de condensation de vapeur 5. Remise en pression 6. Sortie du produit sec 7. Chambre de condensation |
|---|

Figure I.11. Lyophilisation [3]

I.6.2.3. Etuve de séchage

L'article est placé dans un espace clos où l'air chaud circule pour fournir l'énergie nécessaire au séchage. A l'intérieur de ce conteneur, le solide peut être réparti en couches minces sur de nombreux casiers empilés. Les condenseurs assèchent l'air humide qui est extrait de la chambre de séchage, qui est ensuite injecté dans la zone de séchage. L'une des variantes courantes de la procédure est le séchoir à chariot. Des exemples d'utilisations incluent le bois, les plaques de plâtre et les bobines de textile. [3]

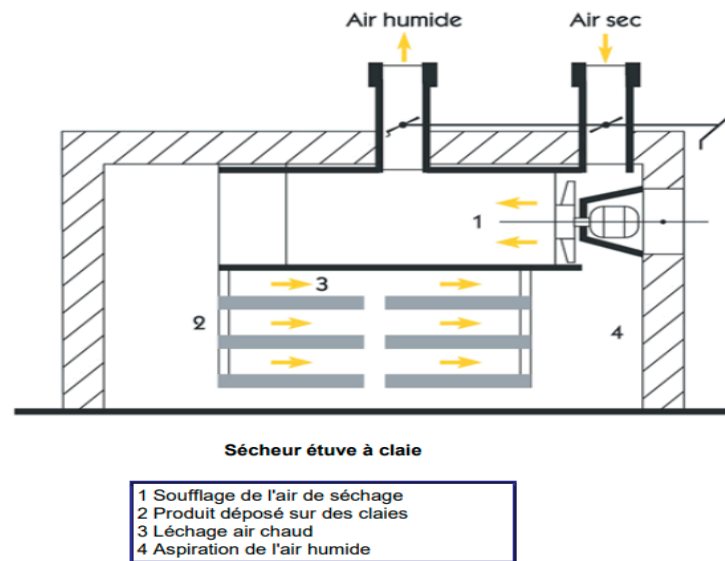


Figure.I.12. Sécheur étuve à claie [3]

Tableau I.5. Avantages et inconvénients de séchoir indirect [4]

Séchoir indirect	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Quantité de gaz à épurer faible. • Possibilité de traitement des incondensats au niveau du brûleur. • Risques d'explosion et d'inflammation faibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Construction compliquée. • Usure/Maintenance. • Inertie thermique.

I.6.3. Séchoirs mixtes

Une installation de séchage hybride est constituée de deux sécheurs placés l'un après l'autre, utilisant chacun un mode de séchage différent, et utilisant la sortie du premier sécheur comme entrée du second sécheur. Un sécheur combiné combine deux modes de séchage convectif et conducteur. Il y a encore peu de gens qui utilisent ce type de chirurgie. [5]

Tableau I.6. Avantages et inconvénients de séchoir mixte [4]

Séchage mixte	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure efficacité thermique. • Durée de séjour réduite. • Produit sec non obligatoirement recyclé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité de phase gaz importante. • Grande taille des installations de traitement des odeurs.

I.7. Différents produits du séchage

Tableau I.7. Quelques travaux sur le séchage [2]

Produit alimentaire		
Produit	Références	Méthode
Aubergine	Russo et al (2013)	Séchoir direct
Carotte	Madiouli et al (2012)	Séchoir direct
Pomme de terre	Marcelo et al (2011), Hassani et al (2015)	Séchoir direct
Produit non-alimentaire		
Boue	Louarn et al (2014)	Séchoir mixte
Produit biologiques	Minea et al (2013)	Séchoir direct
Tuile en terre cuite	Vasic et al (2014)	Séchoir mixte

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, ont été présentées les informations de base concernant le séchage, nous avons commencé avec une définition et but et domaines d'utilisation de séchage. Ensuite nous avons étudié les phénomènes de transfert et enfin nous avons cite les différents types de séchage et quelques travaux sur le séchage.

Chapitre II
Partie expérimentale et analytique

II.1. Introduction

Cette étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire d'énergétique à l'université de Jijel. Les expériences ont été menées à l'aide d'une unité développée par "EDIBON", qui est l'une des méthodes de séchage les plus courantes, afin d'étudier la cinétique de séchage des tranches de fraises. Il s'agit d'envoyer le flux d'air dans le sens de la matière à sécher.

II.2. Description de l'unité

II.2.1. Les parties principales de l'unité

L'unité représente un séchoir conventionnel à air forcée qui se compose essentiellement de 3 parties :

II.2.1.1. Une chambre séchage

Où sont placés les contenants d'échantillons de fraises. Une porte transparente vous permet de voir et même d'influencer l'expérience dans cette chambre.

II.2.1.2. Une partie de Traitement d'air

Cette partie assure le conditionnement d'air.

II.2.1.3. Une partie d'acquisition et de contrôle

Cette partie, permet de contrôler la température, l'humidité, et la vitesse d'air asséchant à l'entrée de la chambre. La (figure II.1), donne la disposition des principaux capteurs dans l'appareil.

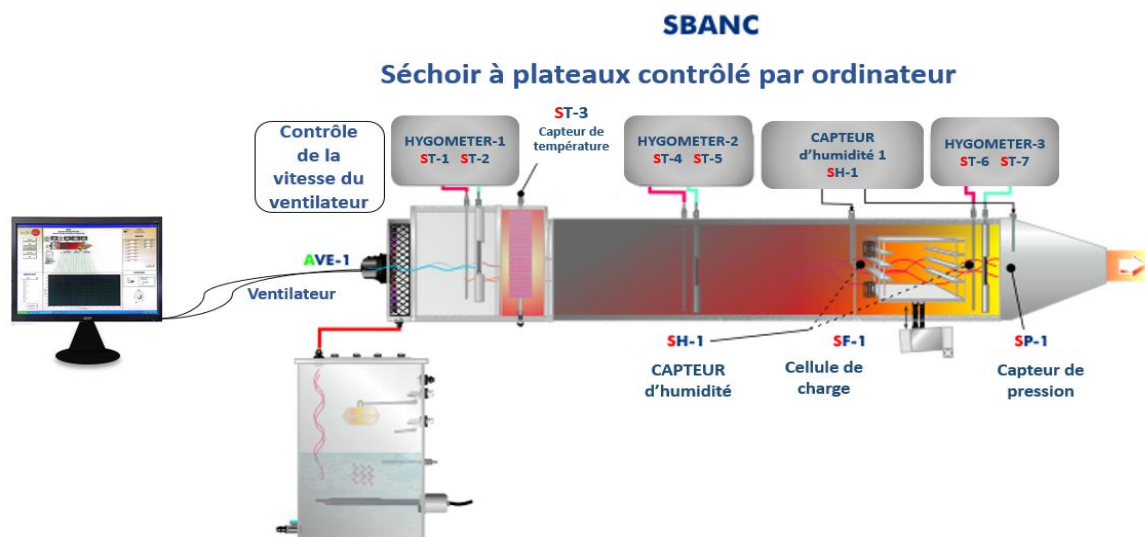


Figure II.1. Schéma présentatif de l'unité expérimental [5]

Tableau II.1. Illustrant l'identification des différents capteurs [5]

Identification	Description
ST-1	Capteur de température (bulbe, sec)
ST-2	Capteur de température (bulbe, humide) ; Hygromètre 1
ST-3	Capteur de température, résistance électrique
ST-4	Capteur de température (bulbe, sec) ; Hygromètre 2
ST-5	Capteur de température (bulbe, humide) ; Hygromètre 2
ST-6	Capteur de température (bulbe, sec) ; Hygromètre 3
ST-7	Capteur de température (bulbe, humide) ; Hygromètre 3
SP-1	Capteur de pression différentielle (bulbe, sec) ; Débitmètre d'air.
SF-1	Cellule de charge
SH-1	Capture d'humidité
AR-1	Chauffage (3000KW)
AVE-1	Ventilateur triphasé

II.2.2. Caractéristiques de l'unité

Comme le séchage a une résistance de 3,5 kW, il nécessite une source d'alimentation 210–220 V/monophasée avec une fréquence de 50–60 Hz. L'unité a les dimensions

suivantes : 2000×1320×400 mm, volume d'emballage de 1,5 m³, poids net de 190 kilogrammes et poids brut de 230 kg.

❖ Composants spéciaux de l'unité

L'unité est construite par une conduite régulière en inox (1000×320×320mm) qui comprend un support avec une porte (360×275mm), et une buse carré (300 mm de longueur). A l'intérieur de ce conduit se trouve un ventilateur à hélice blindée et un protecteur de ventilateur. [5]

II.3. Principe de fonctionnement

Le ventilateur axial est situé à l'entrée du tunnel de séchage. Il envoie de l'air préalablement humidifié dans le tunnel. Le tube de Pitot peut être utilisé pour déterminer la vitesse de l'air. Les résistances électriques à côté du ventilateur, qui chauffent l'air, contrôlent sa température.

A chaque extrémité du tunnel de chauffage/séchage se trouvent des sondes de température et d'humidité. Pour mesurer l'humidité, un hygromètre ou un tableau psychométrique doit être utilisé. Ce n'est qu'en cas de besoin que des sondes et un hygromètre seront proposés. Placez les solides qui passeront par le processus de séchage sur les bancs. [5]

II.4. Pratiques disponibles

- Pratique 1 : détermination de l'efficacité de la résistance à l'échauffement.
- Pratique 2 : effet de l'échauffement dans une installation.
- Pratique 3 : obtention de séchage courbe.
- Pratique 4 : influence sur la taille de la particule.
- Pratique 5 : influences sur la vitesse de l'air.
- Pratique 6 : influences sur la température de l'air.
- Pratique 7 : application de la psychométrie au séchage.[5]

II.5. Générateur de vapeur (TGV)

Tout équipement sous pression où l'énergie thermique est délivrée à un liquide, à de la vapeur ou à de l'eau surchauffée pouvant atteindre des températures supérieures à 110°C pour l'utilisation interne de l'énergie et éventuellement du fluide lui-même.



Figure II.2. Générateur de vapeur au niveau du laboratoire énergétique, université de Jijel

II.5.1. Identification des éléments

Le tableau II.2 répertorie les différentes abréviations affichées sur l'appareil.

Tableau II.2. Description des abréviations [5]

Identification	Description
ST-1	Capteur de Température
AN-1	Commutateur de niveau
AR-1	Resistance
AP-1	Pressostat
1	Sortie de l'eau
2	Arrivée d'eau
3	Sortie de vapeur

II.5.2. Installation de l'unité TGV

La mise en route d'une unité TGV est facile et nécessite de commencer par remplir d'abord le réservoir d'eau, de le connecter à la source d'alimentation, puis d'installer le capteur de température ST-1. Mettre en place le détecteur de niveau, puis brancher le manomètre basse pression. Connecter le chauffage. Il est à noter que le radiateur ne fonctionnera pas si l'une de ces éléments n'est pas connectée. L'unité est équipée d'un manomètre, il doit être réglé à 2 bars. Il est important de se rappeler que lorsque les sorties

de vapeur sont fermées, la pression augmente et le manomètre coupe le réchauffeur. Cet appareil comprend un système de sécurité avec de nombreux capteurs montés, espacés et connectés à un micro-ordinateur. Le commutateur de niveau ne laisse pas l'appareil fonctionner si le réservoir n'a pas assez d'eau, dans ce cas le réservoir doit être rempli. Le manomètre basse pression a pour rôle d'éteindre la résistance si la pression dans le réservoir n'est pas adéquate, dans ce cas la quantité de vapeur dans l'unité doit être réduite. Le contrôle de la température est programmé pour avoir une température maximale de 120°C. Le contrôleur est programmé avec toutes les mesures de sécurité requises mais le seul paramètre modifiable est le réglage de la température qui s'effectue par appuyer sur le bouton mode puis sélectionner la température avec les boutons ∇ Δ lorsque la température est réglée, il est recommandé pour fixer la température au maximum 120°C, pour générer suffisamment de vapeur.[5]

II.5.3. Service de la manipulation

✓ Les principaux bouton

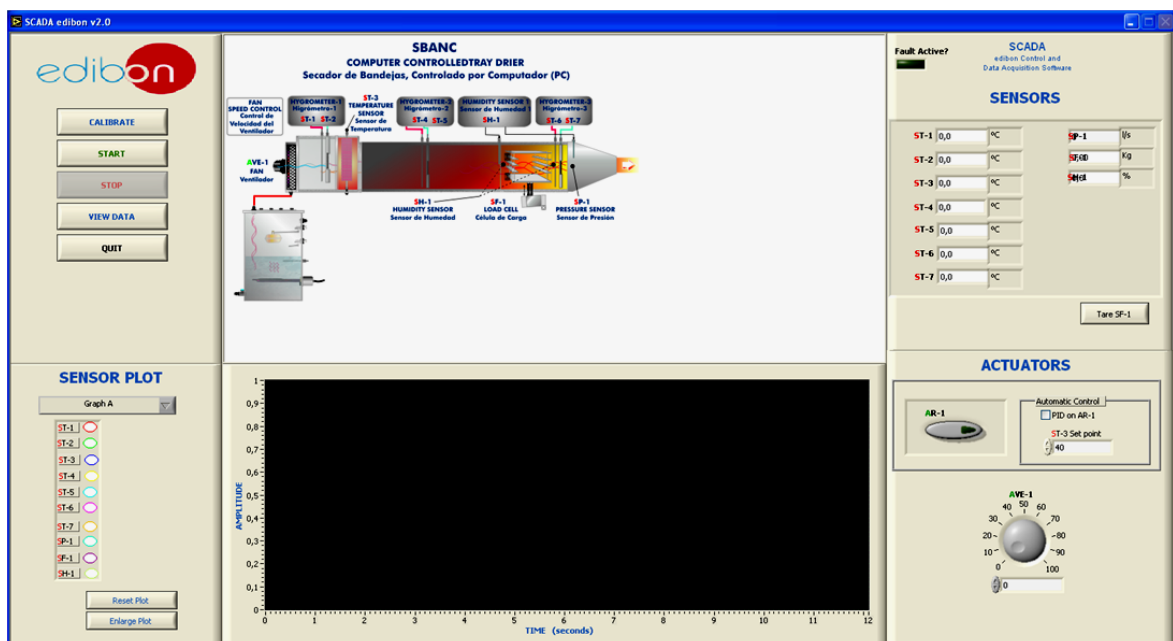


Figure II.3. Les principaux boutons de SBANC [5]

START : Tout d'abord, il faut designer le nom du fichier pour enregistrer les données. Après de l'avoir introduit, le processus d'acquisition démarre les indicateurs affichent et montrent l'évolution des signaux acquis en temps réel.

STOP : Ce bouton n'est disponible que s'il y'a une acquisition en cours.

START SAVING/STOP SAVING : L'enregistrement des données dans le fichier de stockage démarre/ s'arrête, le temps entre le contenu enregistré peut être configuré par l'utilisateur. Afin que nous puissions ouvrir ce fichier plus tard on utilise l'outil " afficher les données " du logiciel de l'unité. Le logiciel n'enregistre pas les données c'est-à-dire qu'il faut appuyer sur le bouton " Démarrer l'enregistrement " pour démarrer le processus d'enregistrement.

VIEW DATA : Ce bouton ouvrira une nouvelle fenêtre de représentation graphique, ou précédemment valeurs acquises et enregistrées peuvent être analysées, ces données ont besoin d'un certain temps pour être chargées en fonction de la taille de fichier. Pour terminer appuyer sur "**DONE**".

- ✚ Après avoir terminé l'expérience les résultats peuvent être représentées avec l'option "Afficher les données" de l'écran principal, cette option sera uniquement activée lorsque le logiciel est arrêté.
- ✚ Différents capteurs peuvent être ajoutés au graphique pour visualiser ce qui se passe chaque capteur à chaque instant. D'autre part, le graphe peut être diviser en deux parties de sorte que des capteurs de même nature places dans chacune de ces parties, par exemple des capteurs de températures peuvent être affichés d'un côté et des capteurs de pression de l'autre pour ce faire, il suffit d'utiliser le curseur ("B graphes/A graphe").
- ✚ Un **PID** contrôleur permet de corriger la valeur "Set point" avec plus de précision, en corrigeront les erreurs stationnaires dans le temps et évitant les perturbations dans le système avec des réponses instantanées.

II.6. Modèle produit (La fraise)

II.6.1. Historique

Depuis l'Antiquité, la fraise est cultivée en Amérique, en Asie et dans les régions subalpines d'Europe occidentale. Toutes les fraises, qu'elles soient sauvages ou cultivées, appartiennent au genre *Fragaria*, qui fait partie de la famille des Rosacées et remonte à l'an 1300. [6]. Il existe aujourd'hui environ 600 variétés différentes de fraisiers, qui varient les unes des autres de plusieurs manières (taille, texture, saveur, couleur, résistance aux maladies, abondance de la production, etc. [7]

II.6.2. Description de la fraise

La fraise est un fruit très riche en eau 90% et relativement peu chargé en glucide charge [8]. De plus, il contient des calories et est riche en vitamines, dont la plus intrigante est la vitamine C, essentielle à de nombreux processus corporels.

Ainsi que les vitamines de classe B (B8 biotine) qui aide à prévenir la chute des cheveux ; B9 acide folique qui agit sur la croissance et la division cellulaire de plus un apport en oligo-éléments et macronutriments. [9]



Figure II.4. La fraise (Sabrina)

II.6.3. Culture de fraise dans l'Algérie

Les wilayas de Jijel, Skikda Beskra et Tipaza sont les premiers producteurs de fraises d'Algérie, avec Sidi Abdelaziz et les communes d'Oued adjoul, Elancer et Zياما mansouria au premier rang pour cette production, selon la direction des services agricoles. À Jijel, la culture de la fraise a été introduite pour la première fois à titre expérimental en 2001-2002.

Tableau II.3. Quelques types de fraisière cultivés dans l'état de Jijel et leur caractéristique. [10]

Usage	Durabilité et cohésion	Douceur	Gout	La taille des fruits	Étiqueter
Consommation commerciale et domestique	Mono filament	Bonne action	Bonne saveur	Grand	Camarosa
Consommation commerciale et domestique	Moyen	Bien	Très bonne saveur	Du moyen au grand	Camille
Consommation commerciale et domestique	Moyen	Bien	Très bonne saveur	Du moyen au grand	Sabrina
Industries manufacturière	Simple	Mono filament	Bonne saveur	Moyen	Sahara
Industries manufacturière	Simple	Mono filament	Bonne saveur	Moyen	Cristal
Industries manufacturière	Simple	Mono filament	Bonne saveur	Moyen	Roucheva
Industries manufacturière	Simple	Mono filament	Bonne saveur	Moyen	Sandrias
Industries manufacturière	Simple	Mono filament	Bonne saveur	Moyen	Savane
Industries manufacturière	Simple	Mono filament	Bonne saveur	Moyen	Estival

II.7. Analyse de la cinétique de séchage

II.7.1. Protocole expérimentale

Lorsque le sécheur est allumé et que les conditions de fonctionnement de l'air sont respectées (température, humidité relative et vitesse de l'air), le ventilateur fait circuler l'air dans le tunnel. Les fraises sont préparées et coupées en échantillons avant d'être placées dans la chambre de séchage une fois la qualité de l'air soit stabilisée. L'étape suivante consiste à surveiller la perte de masse de l'échantillon et à l'enregistrer du début à la fin de l'expérience, c'est-à-dire jusqu'à ce que la masse de l'échantillon ne change pas. Dans ce contexte,

plusieurs expériences ont été réalisées afin de déterminer le comportement macroscopique des propriétés de séchage. Ces expériences ont été réalisées sur des échantillons épais de 3mm et 5mm mesurée par un pied à coulisse. Les différentes conditions expérimentales sont listées dans le tableau (II.2).

Tableau II.4. Conditions moyennes pour différentes expériences.

Numéro d'essai	Température de l'air Ta (°C)	Vitesse de l'air Va (m/s)	Humidité relative de l'air Hr (%)	Epaisseur ép (mm)	Nombre des claies
Les mêmes conditions					
1	55	0.97	17	3mm	1
2	55	0.97	17	3mm	1
Les différents conditions					
3	55	1.5	17	3mm	1
4	60	0.97	17	3mm	1
5	55	0.97	31	3mm	1
6	55	0.97	17	5mm	1
7	55	0.97	17	3mm	3

II.7.2. Essai préliminaire

Dans cet essai, nous avons séché du sable pour évaluer l'efficacité du séchage et la précision de banc d'essai par rapport au catalogue proposé par le fournisseur de l'appareil.


 **Le matériel et les outils utilisés** : une balance sensible, un bécher, un bol en métal et une étuve.



Figure II.6. Matériel de l'essai

❖ **Mode d'action**

Il est à noter qu'il faut suivre les étapes suivantes lors des tests.

- 1) Le poids du bol métallique vide, représente $M_b = 494$ g.
- 2) Placer le bol en métal avec le sable dans l'étuve 100°C pendant 25min pour diminuer l'humidité situé dans le sable (épaisseur 0.5cm).
- 3) Peser l'échantillon après l'avoir sortie $M_s = 797$ g et mélangée l'eau avec le sable, puis placer dans l'unité de séchage avec $M_m = 836$ g.
- 4) Les conditions opératoires de l'air ($T = 50^\circ\text{C}$, $V = 1.47\text{m/s}$, $\text{Hr} = 17\%$).
- 5) Chaque 10min nous mesurons la température de sable (T_c , T_s), en plus de prendre le poids du sable chaque 15min.

Pour déterminée la teneur en eau nous utilisons cette équation :

$$X = \frac{M_0 - M_f}{M_f} = \frac{(M_m - M_b) - (M_s - M_b)}{(M_s - M_b)} \quad (\text{II. 1})$$



Figure II.7. Placement du bol en métal dans l'unité de séchage



Figure II.8. Capteur de température



Figure II.9. Le sable après la fin de l'essai

II.7.3. Essais principaux

On a apporté des modifications à l'appareil où l'étagère a été fabriqué au niveau de l'atelier de l'université, cette étagère a été réalisé par un contour de contreplaqué entourer d'un fil en plastique figure II.10. Et pour les Essai 1 et 2 : on a placé une quantité de fraise pesant (Mfr), l'épaisseur de l'échantillon et de 3mm, cette fraise était étalée sur l'étagère. Le séchoir est réglé dans des conditions de fonctionnement de l'air ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0,97\text{m/s}$, $H_r=17\%$). On a mesuré le poids de l'étagère vide qui est (M_e) et mesurer le poids de l'étagère avec la fraise (M_{ef}). Puis on a placé cette quantité dans l'unité de séchage. Chaque 10min nous mesurons la température de la fraise (T_{av} , T_{ar} , T_m), en plus on a pris le poids de la fraise chaque 15min.

Tandis que dans le troisième essai, nous suivons les mêmes étapes de l'essai précédente, l'exception est le changement dans les conditions de fonctionnement de l'air ($T=60^{\circ}\text{C}$, $V=0,97\text{m/s}$, $\text{Hr}=17\%$). Mais pour l'essai 4, nous suivons les mêmes étapes de l'essai précédent, l'exception est le changement dans les conditions de fonctionnement de l'air ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=1.5\text{m/s}$, $\text{Hr}=17\%$). On a utilisé le générateur de vapeur dans l'essai 5, afin de varier la condition de l'humidité relative avec les mêmes conditions et les mêmes étapes de les essais précédent ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{m/s}$, $\text{Hr}=31\%$). Pour le sixième essai, nous avons changé l'épaisseur de la fraise à 5mm, tout en maintenant les mêmes conditions et en suivant les mêmes étapes de réalisation des essais précédent ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{m/s}$, $\text{Hr}=17\%$).



Figure II.10. L'étagère



Figure II.11. L'échantillon du frais à 3mm



Figure II.12. La position des captures de température

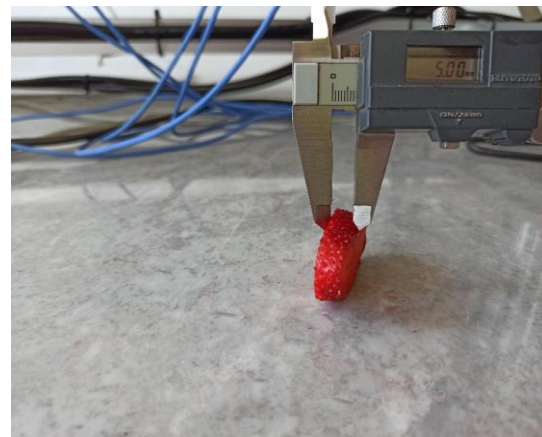


Figure II.13. L'échantillon de la fraise à 5mm

II.8. Evaluation de la cinétique de séchage

Comme pour les fraises, le transfert de masse dans les produits alimentaires est parfois considéré comme un phénomène diffusif. Il est donc important de connaître l'ordre de grandeur du coefficient effectif de diffusion massique du produit. Il est possible d'estimer ce coefficient car la deuxième règle des solutions analytiques de Fick et la cinétique de séchage sont combinées (éq II.2).

Pour suivre la cinétique de séchage, un certain nombre de modèles mathématiques ont été publiés dans la littérature. Il existe trois types de modèles différents pour le séchage des produits alimentaires : le modèle diffusif basé sur la deuxième loi de Fick [11], le semi-empirique [12][13], et des équations empiriques [14][15] qui considère uniquement la résistance externe au transfert de masse entre le produit et l'air.

Pour la modélisation des différentes cinétiques de séchage, on utilise la grandeur réduite XR, exprimé par :

$$XR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (\text{II.2})$$

Avec X_t , X_0 et X_e respectivement la teneur en eau à l'instant t , la teneur en eau initiale et la teneur en eau à l'équilibre.

II.8.1. Modèle diffusif

La diffusion interne régule le transport de masse lors du séchage. Le gradient de concentration volumétrique de l'eau C ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{m}^{-3}$) et le flux de matière F_m ($\text{Kg}_{\text{eau}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) au sein d'un volume de produit sont liés linéairement par la seconde loi de Fick :

$$\overrightarrow{F}_m = -D_{eff} \overrightarrow{\text{grad}} C \quad (\text{II.3})$$

D_{eff} Est la diffusivité de l'eau dans le matériau ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

Pour un temps de séchage suffisamment long ($t > 10\text{s}$), le coefficient de diffusion s'écrit alors :

$$D_{eff} = -\frac{4e^2}{\pi^2 t} \ln\left(\frac{\pi^2 \times XR}{8}\right) \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient diffusion peut être évalué par deux méthodes :

1- La méthode de demi- monté :

$$D_{eff} = \frac{e^2}{t_{0.5}} \times \ln\left(\frac{16/\pi^2}{\pi^2}\right) \approx 0,049 \times \frac{e^2}{t_{0.5}} \quad (\text{II.5})$$

2- La méthode de la pente :

$$\ln\left(\frac{\pi^2 xR}{8}\right) = fct(t), \text{ donnée par l'équation : } D_{eff} = \frac{4e^2}{\pi^2} \times Pente \quad (\text{II.6})$$

II.8.1.1 L'activité de l'eau

Pour calculer l'activité de l'eau on utilisons le modèle Guggenheim, Anderson et de Boer (GAB) (I.8) :

$$X = \frac{X_0 CK a_w}{(1 - K a_w)(1 + (C - 1) K a_w)} \quad (\text{II.8})$$

Avec : C et K sont des constantes.

X_0 : Teneur en humidité monocouche sur base sèche.

a_w : Activité de l'eau.

X : Teneur en eau (kg_{eau}/kg_{ms}). [16]

II.7.2. Modèle semi-empiriques

Dans de nombreux travaux concernant le séchage des agroalimentaires, des modèles semi-empiriques de la forme $XR=fct(t)$ sont proposés afin de prédire la cinétique de séchage. Le tableau suivant regroupe les modèles les plus utilisés pour le séchage de la fraise sachant que k, n, a, c, b : sont des constantes déterminées expérimentalement.

Tableau II. 5. Modèles empiriques de cinétique de séchage. [17]

Modèle	Equation	
Lewis	$XR = \exp(-kt)$	(II.7)
Page	$XR = \exp(-k t^n)$	(II.8)
Wang & Singh	$XR = 1 + a + b t^2$	(II.9)
Logarithmic	$XR = a \exp(-kt) + c$	(II.10)
Henderson & Pabis	$XR = a \exp(-kt)$	(II.11)

II.9. Couplage d'une pompe à chaleur au séchoir

Le séchage est considéré comme une étape très consommatrice d'énergie et même un mauvais séchage peut augmenter cette consommation car il peut en résulter un produit de qualité inférieure. Le besoin de techniques de séchage économes en énergie dans le secteur alimentaire a augmenté en raison de la hausse des coûts de l'énergie [2]. Cependant, pour récupérer la chaleur perdue dans les applications de l'industrie alimentaire, les pompes à chaleur ont un énorme potentiel.

Les principaux objectifs de la technologie des pompes à chaleur sont la conservation de l'énergie et même un contrôle efficace des conditions de séchage, y compris la température, l'humidité, la vitesse de l'air et le temps de séchage [18][19]. Afin d'améliorer les performances thermiques globales et d'assurer un contrôle efficace des conditions d'air à l'entrée du sécheur, le but du couplage de la pompe à chaleur à un séchoir est de récupérer la chaleur latente et la chaleur sensible de l'air évacué en sortie de séchoir, comme il est aussi possible d'humidifier l'air en le refroidissant au niveau de l'évaporateur puis en le réchauffant avant qu'il ne revienne dans l'atmosphère.

La figure suivante représente un exemple sur le couplage de pompe à chaleur :

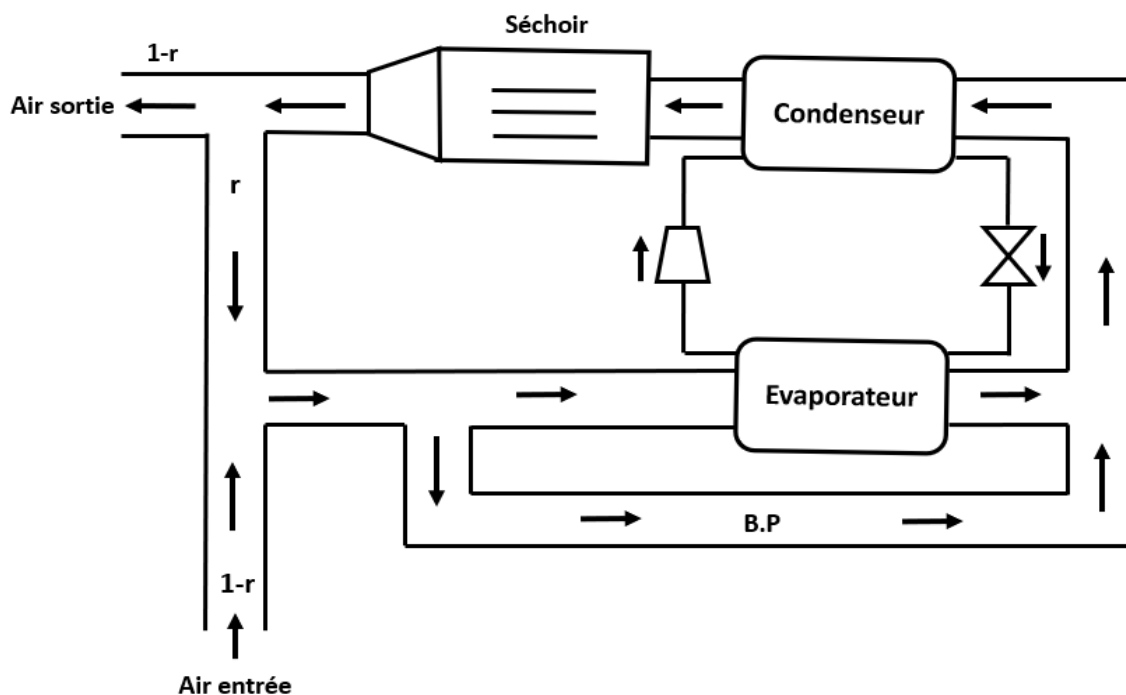


Figure II.14. Couplage à pompe à chaleur

II.9. Conclusion

Les éléments fondamentaux d'une unité de séchage ont été abordés dans ce chapitre tels que : les exigences, la taille et poids, les composants spéciaux de l'unité. Ensuite, nous avons décrit l'idée de fonctionnement et les fonctionnalités qu'il a fournies. Une brève analyse historique du produit choisi pour l'étude : la fraise, une autre partie a été faite sur le calcul du coefficient de diffusion et la teneur en humidité puis on a achevé le chapitre par un bref aperçu sur le nécessité du couplage du séchoir à une pompe à chaleur.

Chapitre III
Résultats et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats expérimentaux ainsi le calcul du coefficient de diffusion. Comme cité au chapitre précédent, l'unité d'acquisition a été d'abord mise en fonctionnement tandis que les conditions de travail de l'air (température, humidité relative et vitesse de l'air) dans la chambre de séchage sont imposées, cet air est mis en circulation par un ventilateur. Comme test final, la vapeur du générateur de vapeur a été chauffée et ajoutée à l'air pour fournir de l'humidité. Les échantillons de fraises sont coupés une fois que les conditions de test se sont stabilisées et ont atteint un état stable. Depuis le début de l'expérience jusqu'à sa fin, ou jusqu'à ce que de masse reste constante soit atteint, la perte de masse de l'échantillon 1 est suivie et enregistrée. Les échantillons de chaque expérience sont pesés à la fin.

Il est nécessaire d'imposer quelques hypothèses afin d'avoir des résultats approchés du phénomène de séchage :

- ✓ Le temps d'ouverture de la porte est négligé
- ✓ Le poids des échantillons sur lesquels des capteurs ont été posés n'est pas pris en compte.
- ✓ Les pressions de saturations sont négligées

III.2. Essai préliminaire

Les expériences préliminaires sur le sable ont été menées afin d'apprécier l'impact des conditions de séchage sur les mesures de cinétique et l'efficacité du système de régulation. Les résultats de ces expériences étaient présentés sur les figures III.1, III.2, III.3 où on a tracé respectivement l'évolution de la teneur en eau, de la température et de la masse en fonction du temps. On observe que la teneur de l'eau et la masse du produit diminuent au cours du temps, On remarque aussi que les température (T_s , T_c) augmentent avec le temps.

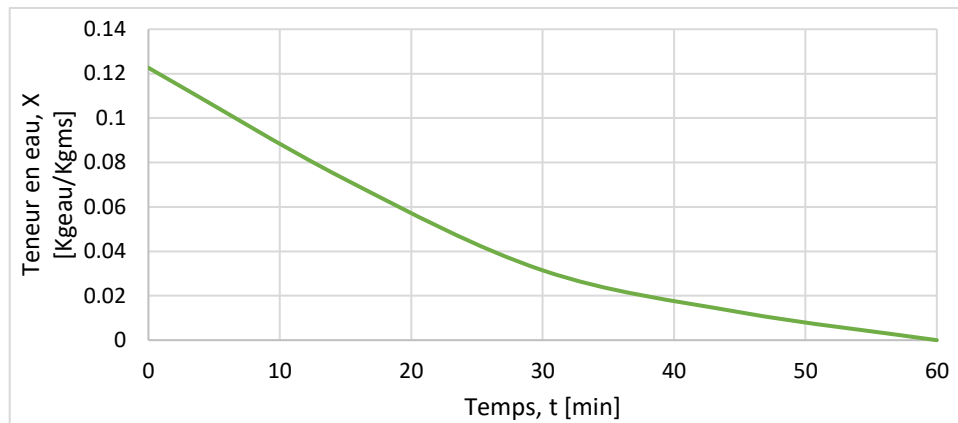


Figure III.1 Evolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps

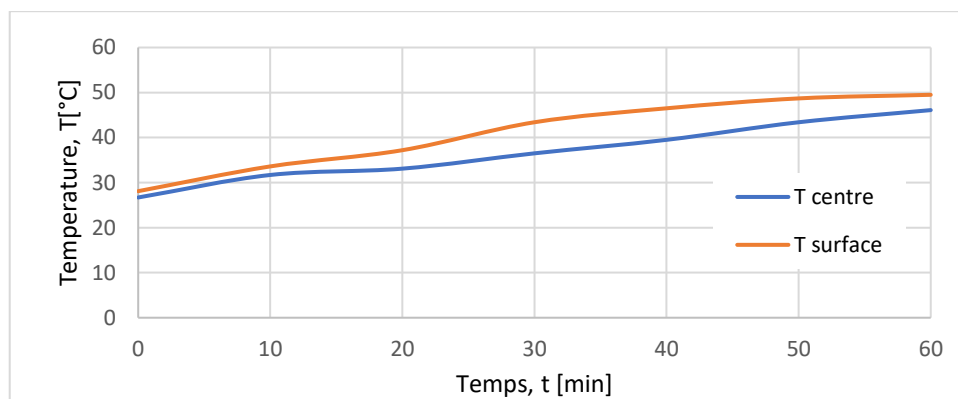


Figure III.2. Evolution de la température du produit en fonction du temps

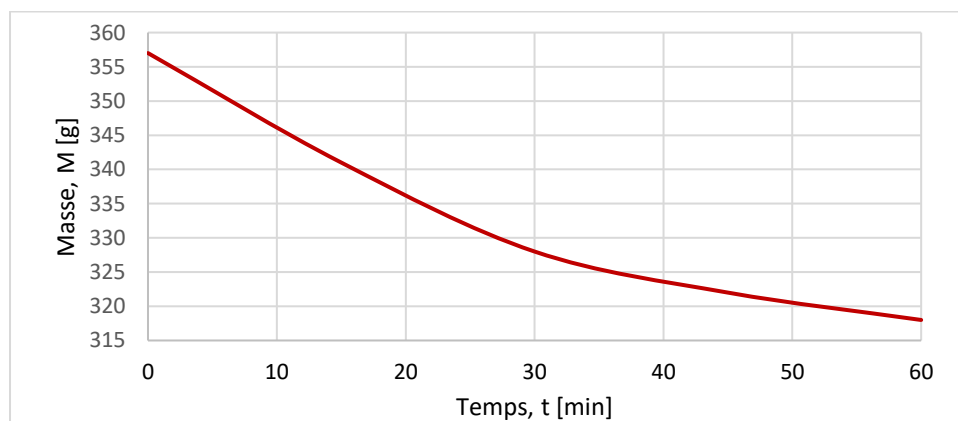


Figure III.3. Evolution de la masse du produit en fonction du temps

III.3. La cinétique de séchage

Dans cette section, nous allons étudier quelques cinétiques de séchage à partir des expérimentations menées sur des tranches de fraise étalées sur des claies, présentées dans le tableau (II.4). L'objet de cette étude expérimentale est de définir l'influence des paramètres thermo-aérodynamiques sur la perte de masse et la température du produit.

III.3.1. Reproductibilité de l'essai 1

Les figures III.4, III.5 et III.6 illustrent l'évolution de la teneur en eau, la perte de masse et la température de produit en fonction du temps. Après avoir répété l'expérience dans les mêmes conditions ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$). Nous avons obtenu quasiment les mêmes résultats. Cela reflète une bonne reproductibilité des mesures réalisées.

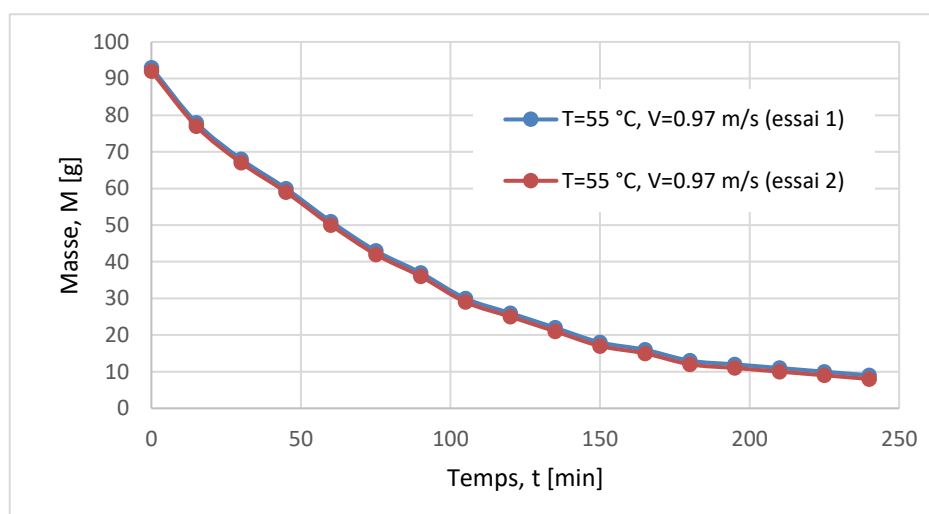


Figure III.4. Evolution de la masse du produit en fonction du temps

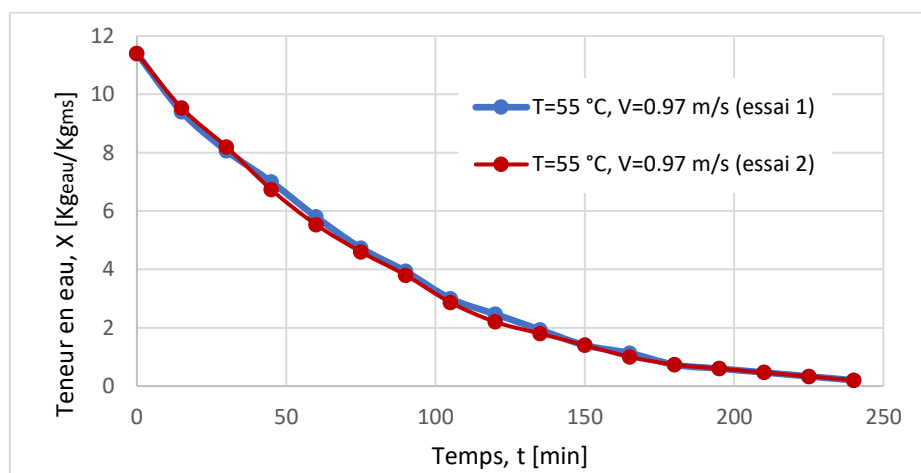


Figure III.5. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps

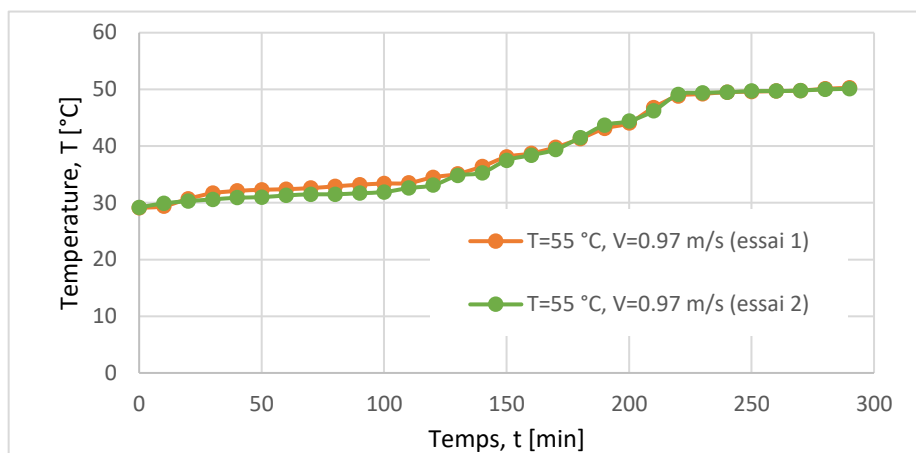


Figure III.6. Evolution de la température du produit en fonction du temps

III.3.2. L'influence des différentes conditions sur le cinétique de séchage

III.3.2.1. L'influence de la vitesse de l'air

Les figures (III.7 et III.8) présentent l'effet de la vitesse d'air sur la cinétique de séchage. Lors où nous remarquons de la vitesse d'air croissante à ($V= 1.5$ m/s), la vitesse de séchage est rapide que la vitesse d'air ($V= 0.97$), ceci est dû à l'effet de la vitesse d'air sur le transfert d'eau à la surface de la fraise, par cet effet, une petite couche d'eau se forme au niveau de la surface du produit début du séchage, d'autre part le coefficient de transfert convectif augment et le coefficient de transfert de masse peut également augmenter. Ce dernier conclut que la vitesse d'air a un rôle efficace dans l'impact sur la vitesse de séchage.

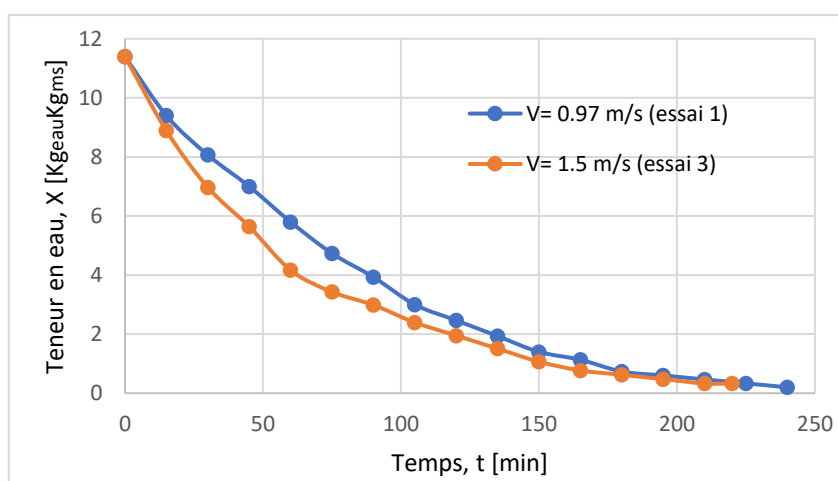


Figure III.7. Evolution de la teneur en eau du produit la fonction de temps essai 1 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97$ m/s, $H_r=17\%$) et essai 3 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=1.5$ m/s, $H_r=17\%$)

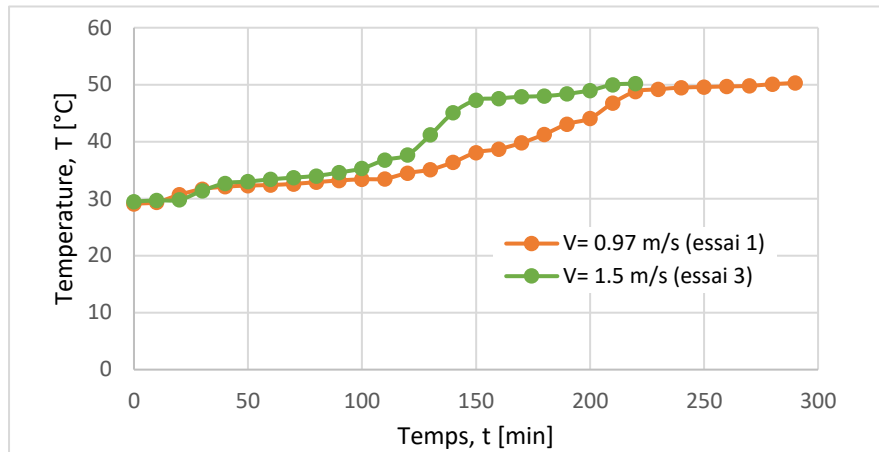


Figure III.8. Evolution de la température du produit en fonction de temps essai 1 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$) et essai 3 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=1.5\text{ m/s}$, $Hr=17\%$)

III.3.2.2. L'influence de la Température d'air

Les figures (III.9 et III.10) présentent une confrontation des cinétiques de séchage des essais 1 et 4, on observe une diminution de temps de séchage avec l'augmentation de la température. En effet, une augmentation de température de séchage de 5°C réduit le temps de séchage d'environ 50 min (figure III.9). On ce qui concerne la température du produit, on observe une première palliée de températures qui est proche de la température humide de l'air ça durée est inversement proportionnelle à la température de séchage (temps plus long pour l'essai 1). Enfin la température du produit croît plus rapidement avec des températures plus élevées jusqu'à tendre une température proche de celle de séchage.

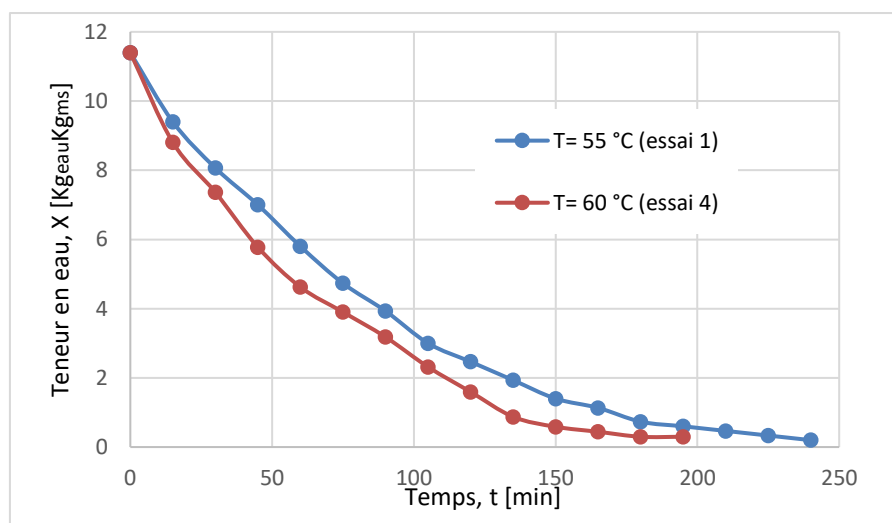


Figure III.9. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de temps essai 1 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$) et essai 4 ($T=60^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$)

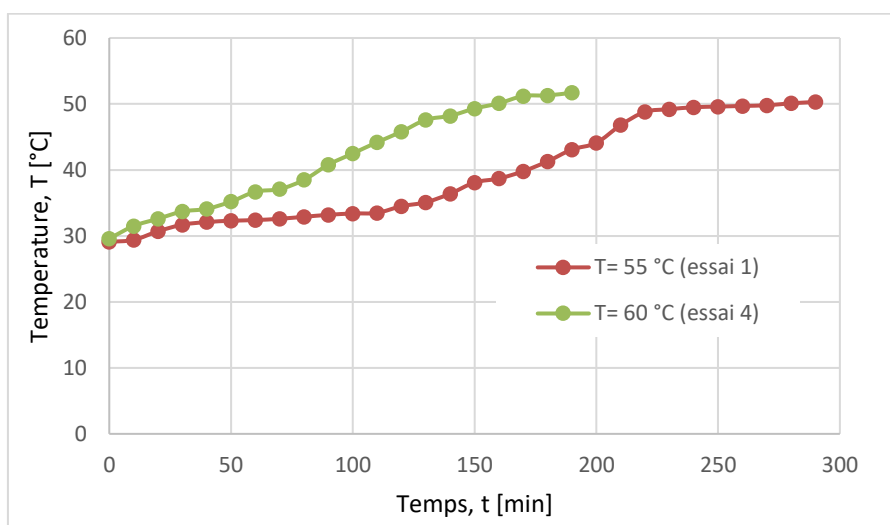


Figure III.10. Evolution de la température du produit en fonction de temps essai 1 (T=55°C, V=0.97 m/s, Hr=17%) et essai 4 (T=60°C, V=0.97 m/s, Hr=17%)

III.3.2.3. Influence de l'humidité d'air

Les figures III.11 et III.12 mettent en avant l'influence de l'humidité relative sur les cinétiques de séchage. On note un pouvoir évaporateur qui évolue dans le sens contraire de l'humidité relative cela reflète une vitesse de séchage moins élevée pour l'essai 5 (figure III.11). Aussi, on constate une augmentation de la teneur en eau d'équilibre avec l'humidité. Concernant la température du produit, on observe une quasi évolution.

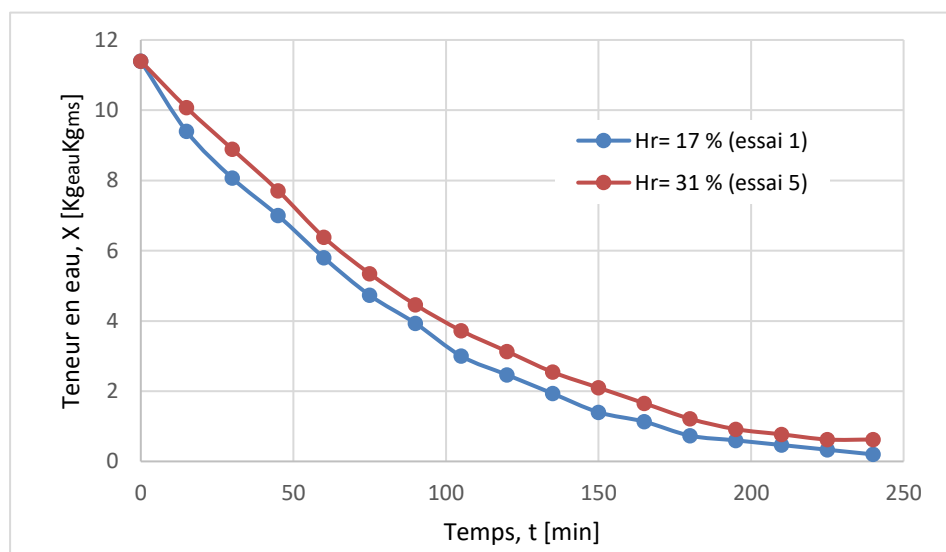


Figure III.11. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de temps essai 1 (T=55°C, V=0.97 m/s, Hr=17%) et essai 5 (T=55°C, V=0.97 m/s, Hr=31%)

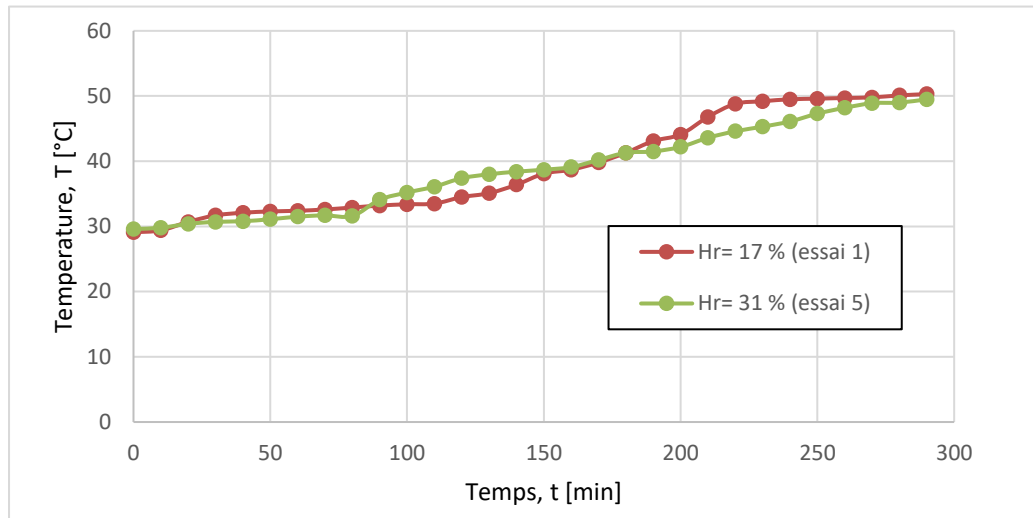


Figure III.12. Evolution de la température du produit essai 1 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$) et essai 5 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=31\%$)

III.3.2.4. Influence de l'épaisseur

Les figures III.13 et III.14 montrent l'évolution de la teneur en eau ainsi que la variation de la température en fonction du temps respectivement. Afin de mettre évidence l'influence de l'épaisseur sur la cinétique de séchage on a comparé l'essai 1 ($E_p=3\text{ mm}$) et l'essai 6 ($E_p=5\text{ mm}$). On constat que le temps de séchage augment avec l'épaisseur (Figure III.13) alors que l'évolution de la température au sein du produit est quasiment la même (Figure III.14).

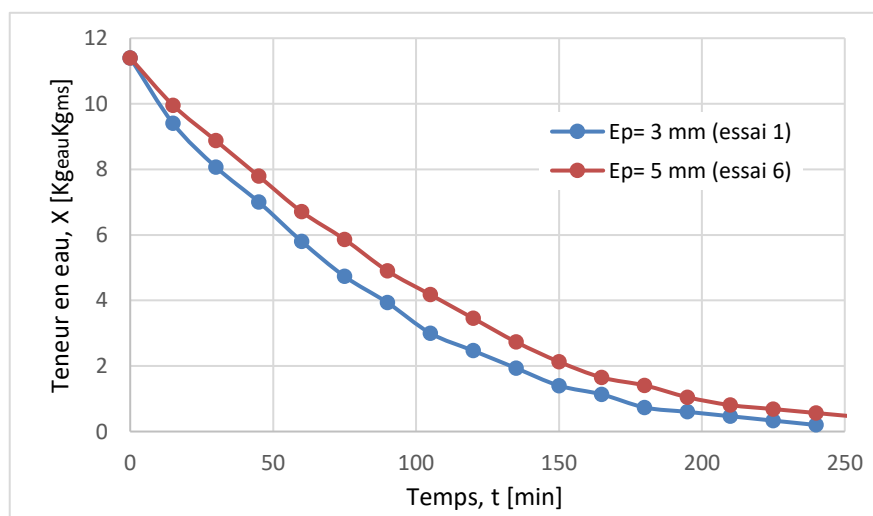


Figure III.13. Evolution teneur en eau du produit en fonction de temps essai 1 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$, $E_p=3\text{ mm}$) et essai 6 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=31\%$, $E_p=5\text{ mm}$)

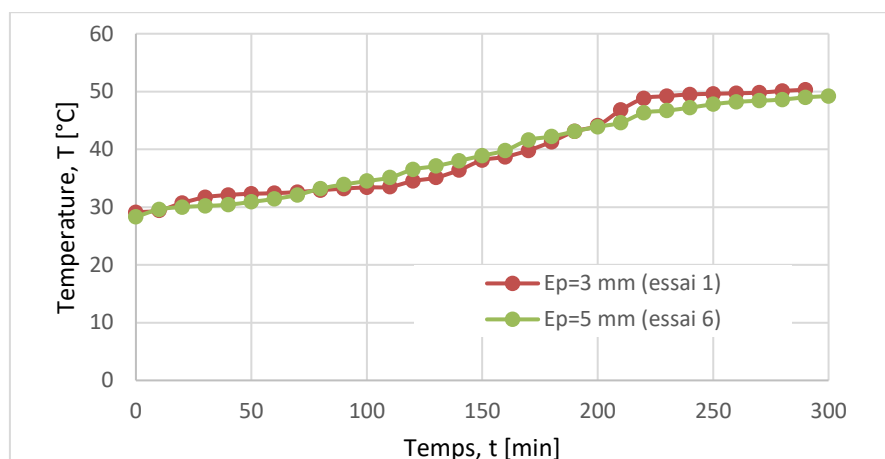


Figure III.14. Le changement de la température du produit en fonction de temps essai 1 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$, $E_p=3\text{ mm}$) et essai 6 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=31\%$, $E_p=5\text{ mm}$)

III.3.2.5. Influence de nombre des claies

La figure III.15 et III.16 représentent l'évolution de la teneur en eau ainsi que la température du produit dans les trois claies du séchoir respectivement. On remarque que le temps de séchage du produit est sensiblement plus long dans la claie milieu par rapport à celles du bas et haut (Figure III.15) car l'air chaud se sature en eau au passage entre les claies dû à l'évaporation de l'eau de produit. Cette évaporation traduit une diminution de température au niveau de la claie milieu (Figure III.16).

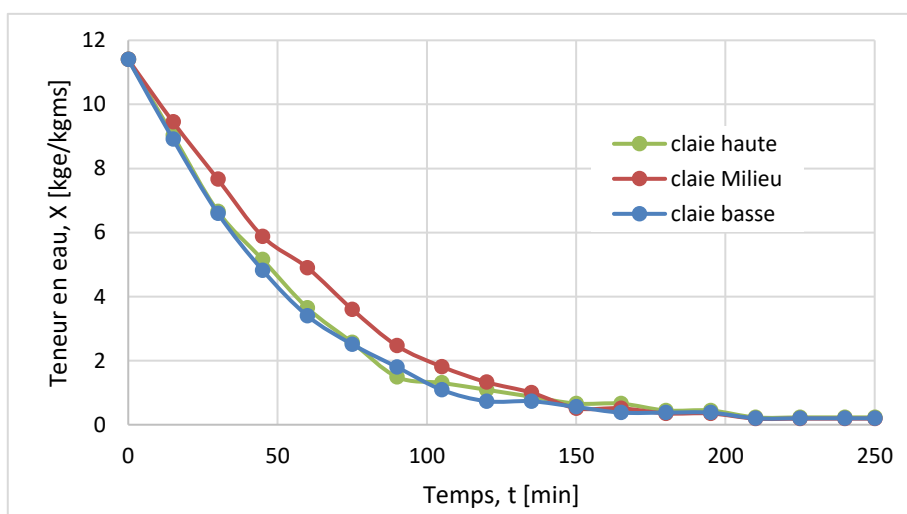


Figure III.15. Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de temps

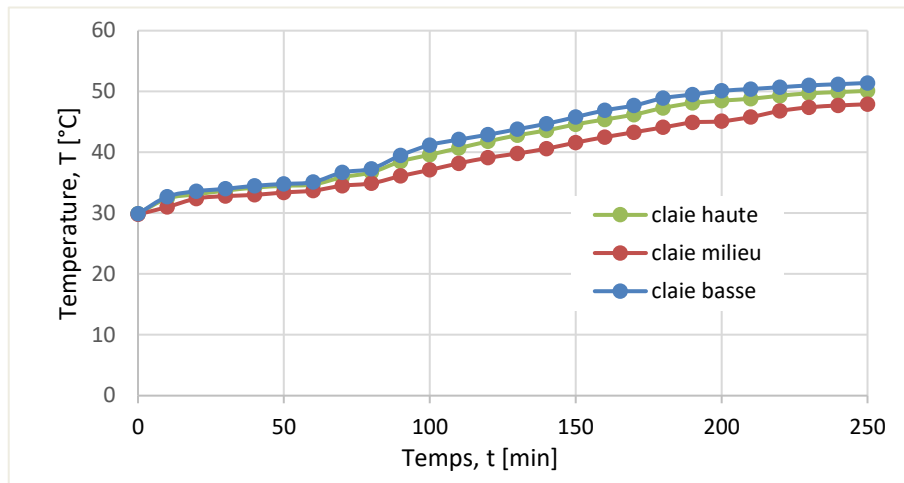


Figure III.16. Evolution de la température du produit en fonction de temps

III.3. Calcul du coefficient de diffusion

La figure III.17 présente l'évolution du coefficient de diffusion en variant les conditions suivantes : essai 1 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$, $Ep=3\text{ mm}$), essai 3 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=1.5\text{ m/s}$, $Hr=17\%$, $Ep=3\text{ mm}$) et essai 4 ($T=60^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$, $Ep=3\text{ mm}$), essai 5 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=31\%$, $Ep=3\text{ mm}$) et essai 6 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=31\%$, $Ep=5\text{ mm}$). On observe que le coefficient de diffusion est élevé dans la première période de chaque essai car c'est une période de préchauffage, qui fait monter la température ; après cette période, on entre dans la période de stabilité, qui maintient la vitesse constante ; la dernière période est la période de ralentissement, qui se décompose en trois ralentissements lorsque le coefficient de diffusion est réduit, et enfin, on observe que le test de vitesse $V=1.5\text{ m/s}$ a un coefficient de diffusion important par rapport aux autres tests car la température est augmentée pendant cette période. Les mêmes résultats étaient approuvés par [2] lors de l'évaluation de ce coefficient pour le cas de la pomme de terre.

La variation du coefficient de diffusion en fonction de l'épaisseur est montrée dans la figure III.18. Dans cette figure on observe que la coefficient diffusion est plus grand pour une épaisseur de fraise égale à 5mm, en raison qu'il y a une relation directe entre le coefficient de diffusion et l'épaisseur, donc plus l'épaisseur du produit est grande, plus quantité à l'intérieur est importante. Cela a été confirmé par les résultats de l'expérience sur la pomme de terre, où l'épaisseur du produit joue un rôle en influençant sur le coefficient diffusion. [21]

Aussi la figure III.19 donne la variation de ce coefficient au niveau des trois claies, On remarque que la coefficient diffusion dans la claie basse est grand par rapport aux deux autres claies. La claie du bas affiche la température la plus élevée tel que montré en (Figure III.16), en la comparant aux températures issues des deux autres claies. Il est connu que le coefficient de diffusion est maximal lorsqu'il est exposé à des températures élevées.

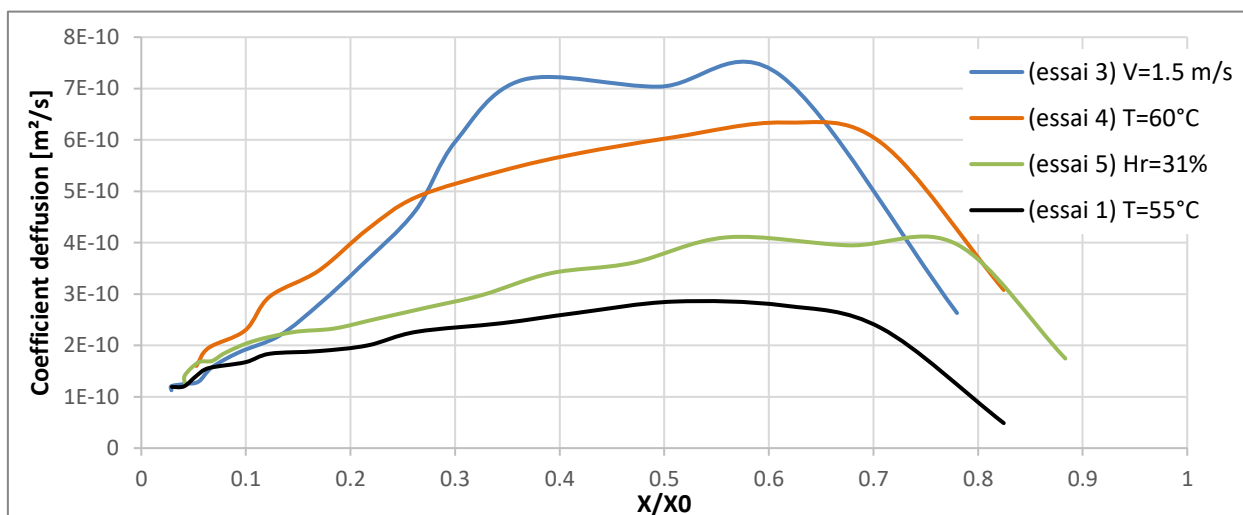


Figure III.17. Variation du coefficient de diffusion du produit en fonction de la teneur en eau du produit

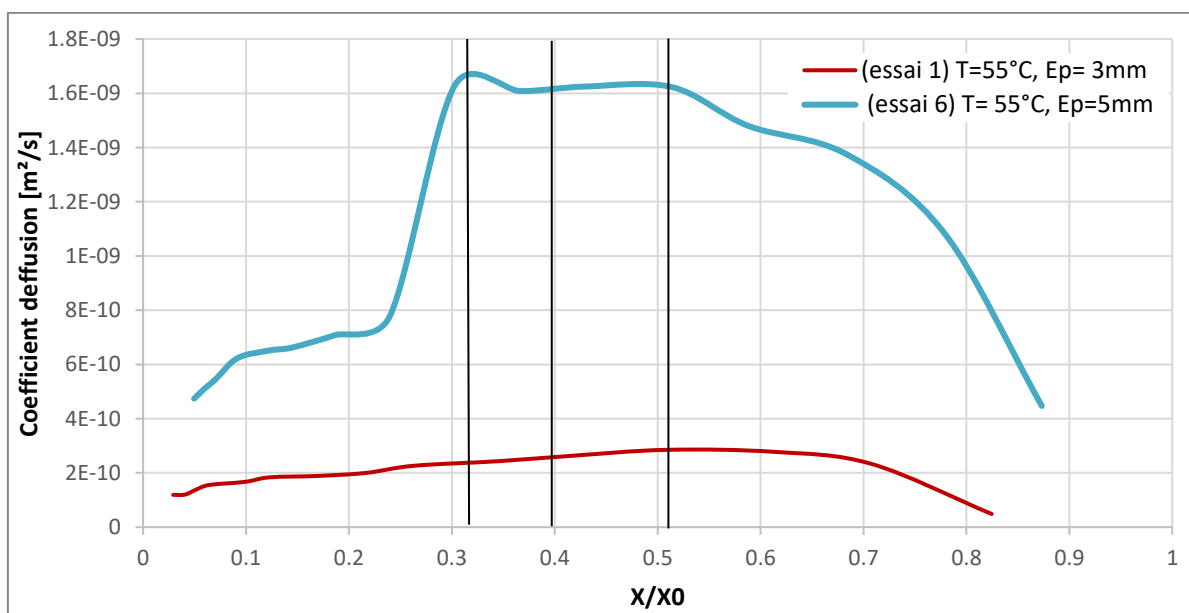


Figure III.18. Variation du coefficient de diffusion du produit en fonction de l'épaisseur du produit

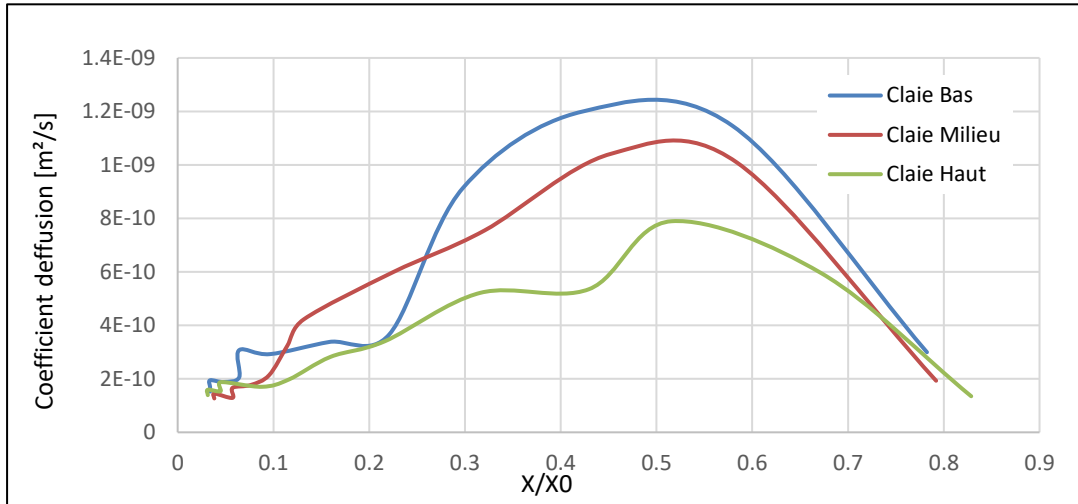


Figure III.19. Variation du coefficient de diffusion du produit dans les trois claies en fonction teneur en eau du produit

III.4. Calcul de la teneur en eau

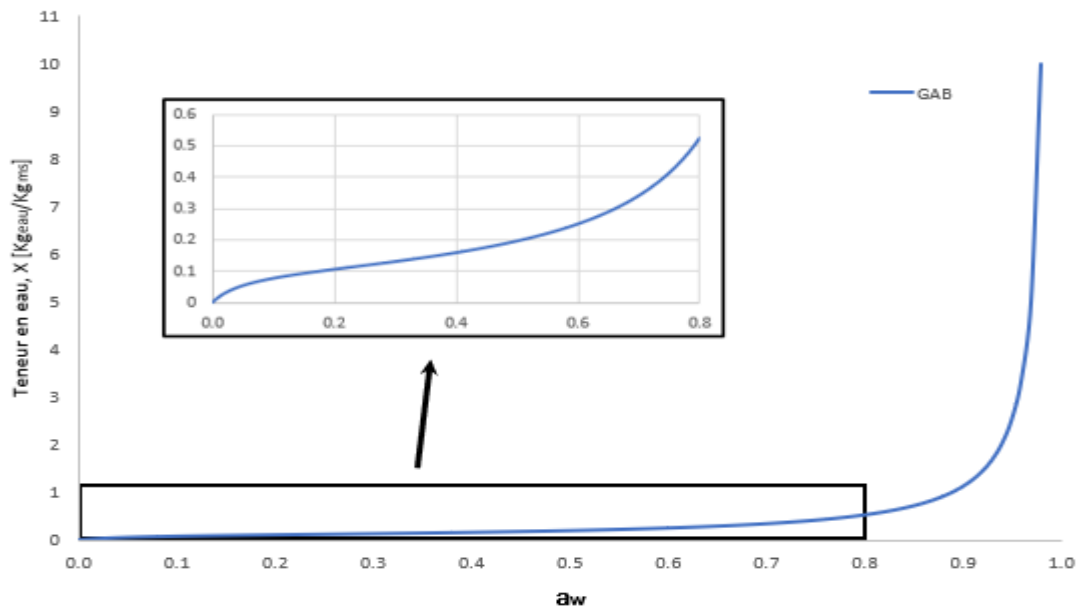


Figure III.20. Relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau de la fraise

Les constantes tirées de l'article [19] sont utilisées pour calculer la teneur en eau réduite : $C=18.81$, $K=1.01$, $X_0=0.102$ (g eau / g solide) Pour la figure (III.20), elle donne la variation de la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau. Cette figure est divisée en quatre zones, dont trois sont visibles dans la plus grande partie. La première zone est connue sous le nom de zone d'adsorption monocouche, suivie de la multicouche [0,2-0,6] et de la zone de condensation capillaire [0,6-0,8]. Lorsque le processus de séchage commence, la première

zone nécessite beaucoup d'énergie pour se déplacer vers la deuxième zone, et dans la deuxième et la troisième zone, nous voyons que la teneur en eau a changé avec l'activité de l'eau. A la suite de ces zones, il reste une quatrième zone [0,8-1], où l'on constate que la teneur en eau augmente rapidement en fonction de l'activité de l'eau.

III.4.1. Calcul de la teneur en eau réduite

Le tableau III.1 donne les valeurs des coefficients indicatifs de l'évolution de la teneur en eau réduite en utilisant des modèles différents de calcul. Le coefficient de détermination R^2 raisonnablement élevé pratiquement pour chaque situation où l'on doit ajuster les conditions nous amène à conclure que le modèle de Page est le plus représentatif, cette remarque a été mentionnée en littérature par plusieurs auteurs. Afin de déterminer la valeur de la teneur en eau réduite, des calculs ont été effectués à l'aide des modèles répertoriés dans le tableau III.1 pour des températures de 55°C et 60°C, respectivement. Ces calculs ont abouti à la création des courbes (III.21) et (III.22), (III.23) qui caractérisent aussi que le modèle de Page donne une tendance satisfaisante de la teneur même en variant la température de 55 à 60 °C.

Tableau III.1. Résultats statistiques pour les trois modèles empiriques

Conditions	Modèle	R^2	X^2	RMSE
T=55°C	Lewis	0.987551831	0.001220136	0.033887513
	Page	0.99596231	0.000395764	0.019299828
	Henderson & Pabis	0.989463859	0.001032724	0.031176528
T=60°C	Lewis	0.99270481	0.00070531	0.0255917
	Page	0.99559668	0.00042572	0.0198825
	Henderson & Pabis	0.99331751	0.00064608	0.02449344
V=1.5 m/s	Lewis	0.998223726	0.000151908	0.011933715
	Page	0.99851305	0.00012716	0.010918648
	Henderson & Pabis	0.99580313	0.00014095	0.01149529
Ep=5mm	Lewis	0.981456	0.00182608	0.04179337
	Page	0.99676523	0.00031854	0.01745531
	Henderson & Pabis	0.98632277	0.00134684	0.03589259
Hr= 31%	Lewis	0.9905106	0.000890375	0.029153096
	Page	0.999337504	6.21609E-05	0.007702946
	Henderson & Pabis	0.993712459	0.000589949	0.023730436

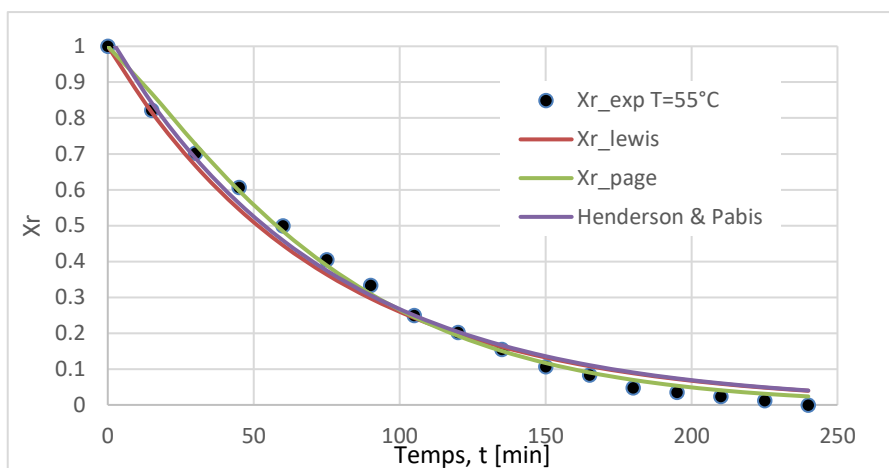


Figure III.21. Evolution teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul essai 1 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $H_r=17\%$, $E_p=3\text{ mm}$)

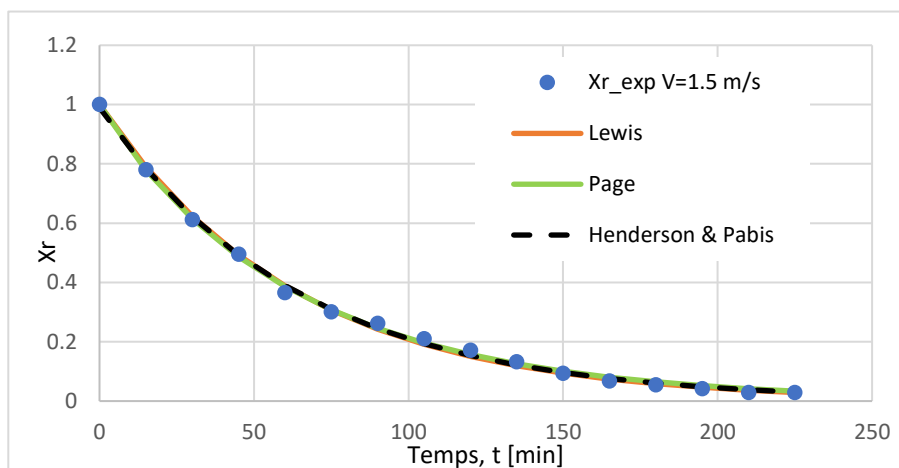


Figure III.22. Relation entre la teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul essai 3 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=1.5\text{ m/s}$, $H_r=17\%$, $E_p=3\text{ mm}$)

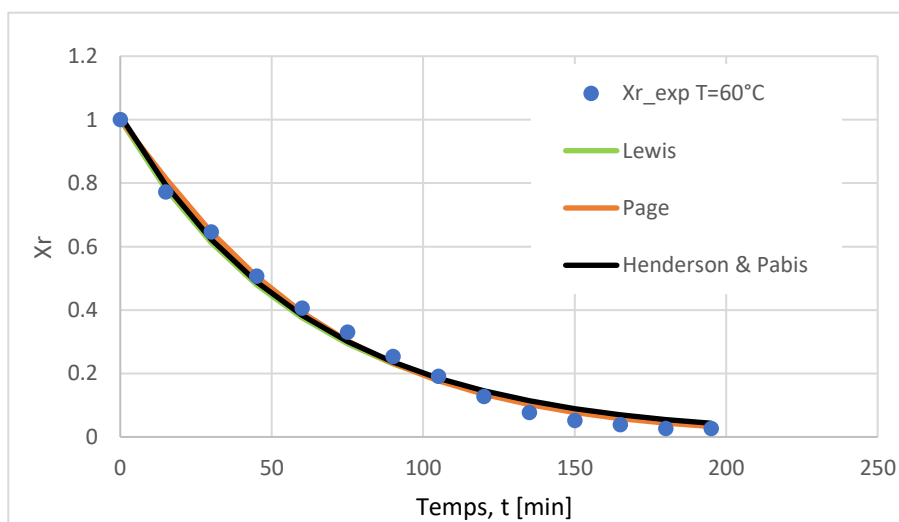


Figure III.23. Evolution teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul essai 4 ($T=60^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $H_r=17\%$, $E_p=3\text{ mm}$)

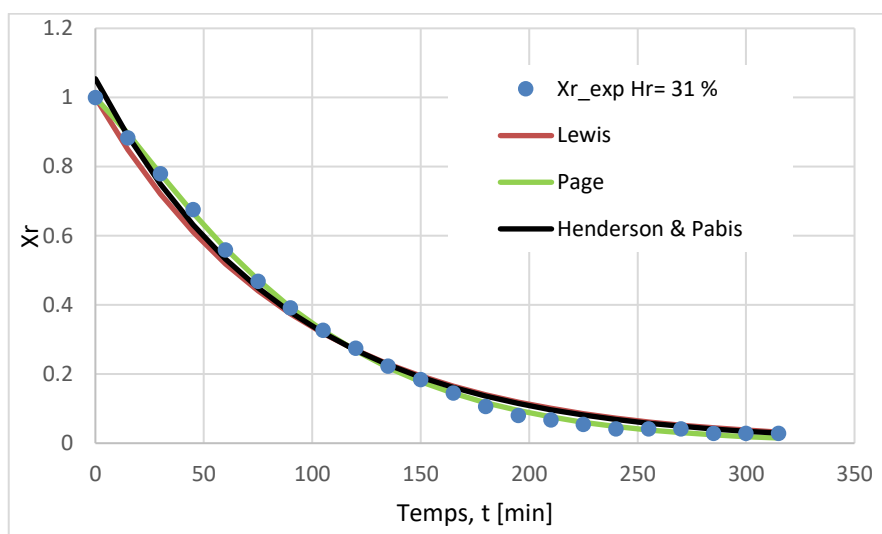


Figure III.24. Evolution teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul essai 5 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=31\%$, $Ep=3\text{ mm}$)

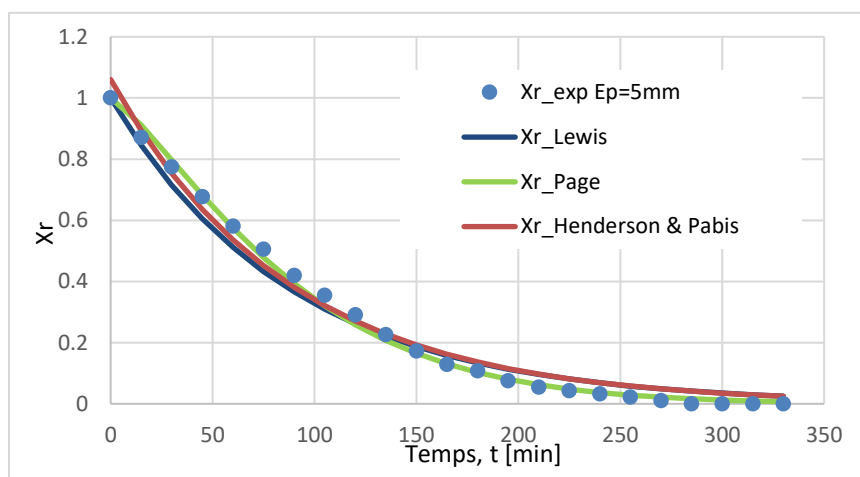


Figure III.25. Evolution teneur en eau réduite du produit en fonction du temps pour différents modèles de calcul essai 6 ($T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{ m/s}$, $Hr=17\%$, $Ep=5\text{ mm}$)

Les courbes (III.24 et III.25) représentent le modèle le plus proche des résultats obtenus lors de la modification des conditions de l'essais ($Hr=31\%$ et $Ep=5\text{ mm}$) respectivement, où nous avons remarqué que le modèle le plus proche est un modèle de Page.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les résultats issus de notre expérimentation et des calculs analytiques effectués sur l'obtention du coefficient de diffusion ainsi que la teneur en eau réduite. On a remarqué que la variation des conditions de séchage tels que la température, la vitesse et l'humidité affectent le séchage. Et le modèle qui peut être choisis pour l'estimation de la teneur en eau réduite est celui de Page.

Conclusion générale

Dans la wilaya de Jijel, les fraises sont les fruits les plus populaires à cultiver et à apprécier, mais comme elles sont si délicates lorsqu'elles sont séchées, seules les variétés les plus fermes et les plus sucrées doivent être utilisées.

Le but de cette recherche est d'examiner la cinétique de séchage, l'impact des quelques conditions comme la température et la vitesse de l'air, l'humidité et l'épaisseur du produit car l'influence dans chacune de ces variables n'est pas appropriée pour le processus de séchage et chacun a son propre impact. Les conditions idéales pour le séchage des fraises sont $T=55^{\circ}\text{C}$, $V=0.97\text{m/s}$ $H_r=17\%$, et ce d'après les résultats issus du banc d'essai qui se trouve au niveau du laboratoire énergétique à l'université de Jijel.

Les températures suivantes (55 et 60°C) offrent à la fraise les meilleures conditions de séchage, selon les données de l'expérience. De plus, l'augmentation de la température et l'épaisseur du produit a un impact sur le coefficient de diffusion.

En influençant le produit avec divers facteurs tels que la vitesse de l'air de séchage, l'épaisseur du produit et l'humidité de l'air de séchage, nous avons constaté que l'accroissement de la température d'air et l'augmentation dans sa vitesse a un effet positif sur la vitesse de séchage, car l'accroissement de la température d'air entraîne une diminution de l'humidité et par conséquent, le temps de séchage est rapide. D'autre part, l'accroissement de l'épaisseur de produit et l'augmentation de l'humidité de l'air entraînent un retard important dans la vitesse de séchage.

De plus, nous pouvons conclure des résultats de l'analyse qu'il est préférable d'utiliser un ventilateur qui crée un flux d'air séché de bas en haut.

Comme perspectives à ce travail, suite à ce qui a été mis à la fin du chapitre II, l'utilisation d'une pompe à chaleur pour la récupération d'énergie en sortie de machine est conseillée.



- [1] Defraeye T., Advanced Computational Modeling for Drying Processes-Review Applied Energy 131, 323-344.
- [2] Boutelba, I., Zid, S., & Glouannec, P. (2019). Modélisation et optimisation énergétique de procédés (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1).
- [3]
http://koudia.farm.free.fr/documentation/fichiersPDF/www.ademe.fr/sechage_thermique.pdf.
- [4] https://www.doc-developpement-durable.org/file/Fabrications-Objets-Outils-Produits/Gestion-dechets/sechage_boues.pdf.
- [5] Guide de SBANC 2010.
- [6] Darrow, G. M. (1966). The Strawberry. *The Strawberry*.
- [7] Hebbache, I., Ouchemoukh, S. E., & Sebki, S. (2013). Teneurs en antioxydants et activités antioxydantes de quelques variétés de confitures industrielles.
- [8] Garcia, M. G., Ontivero, M., Diaz Ricci, J. C., & Castagnaro, A. (2002). Morphological traits and high resolution RAPD markers for the identification of the main strawberry varieties cultivated in Argentina. *Plant Breeding*, 121(1), 76-80.
- [9] Souci, S. W., Fachmann, W., & Kraut, H. (1981). Food composition and nutrition tables 1981/82. *Food composition and nutrition tables 1981/82.*, (Ed. 2).
- [10] Information de la chambre d'agriculture de la province de Jijel.
- [11] Hassini, L., Azzouz, S., Peczalski, R., & Belghith, A. (2007). Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 47-56.
- [12] Özdemir, M., & Devres, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42(4), 225-233.
- [13] Falade, K. O., & Solademi, O. J. (2010). Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. *International journal of food science & technology*, 45(2), 278-288.
- [14] Midilli, A. D. N. A. N., Kucuk, H. A. Y. D. A. R., & Yapar, Z. İ. Y. A. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying technology*, 20(7), 1503-1513.

- [15] Zhu, A., & Shen, X. (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 345-351.
- [16] de Bruijn, J., & Borquez, R. (2014). Quality retention in strawberries dried by emerging dehydration methods. *Food Research International*, 63, 42-48.
- [17] Doymaz, I. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), 914-919.
- [18] Colak, N., & Hepbasli, A. (2009). A review of heat pump drying: Part 1–Systems, models and studies. *Energy conversion and management*, 50(9), 2180-2186.
- [19] Goh, L. J., Othman, M. Y., Mat, S., Ruslan, H., & Sopian, K. (2011). Review of heat pump systems for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4788-4796.
- [20] Boutelba, I., Zid, S., Glouannec, P., Youcef-Ali, S., Magueresse, A., & Kimouche, N. (2019). Thermo-hydrous behavior of dried un-blanched potato samples. *Journal of Food Engineering*, 240, 160-170.

Résumé

Ce travail se concentre sur une étude expérimentale et analytique sur le séchage des agro-alimentaires.

La machine d'essai de séchage EDIBON a commencé à fonctionner au laboratoire d'énergie de l'université de Jijel pour étudier la cinétique de séchage des fraises. Cette étude expérimentale était basée sur le séchage thermique de la charge, ce qui a entraîné un écoulement horizontal d'air chaud sur le produit.

Sabrina est le nom des fraises choisies en raison de leur grande disponibilité à cette période de l'année et dans la ville de Jijel.

De plus, il était important de déterminer les effets de certains facteurs, dont l'épaisseur, la température, la vitesse de l'air et l'humidité. Les résultats de nos expériences au moyen de courbes cinétiques de séchage ont montré à quel point ces facteurs influent sur les propriétés des fraises et la vitesse de séchage. L'augmentation de la vitesse et de la température de l'air de séchage réduit la durée de séchage du produit et vice versa en augmentant l'humidité de l'air et l'épaisseur du produit. Ces courbes ont été arrondies par divers modèles expérimentaux existants et le modèle plus simple a également été choisi pour calculer le coefficient de diffusion.

Mots clés : Fraises, conditions stables, température, activité de l'eau, coefficient de diffusion.

Abstract

This work focuses on an experimental and analytical study on the drying of food products.

The EDIBON drying test machine began operating at the Jijel University Energy Laboratory to study the drying kinetics of strawberries. This experimental study was based on the thermal drying of the charge, which resulted in a horizontal flow of hot air on the product.

Sabrina is the name of the strawberries chosen because of their great availability at this time of year and in the city of Jijel.

In addition, it was important to determine the effects of certain factors, including thickness, temperature, air velocity and humidity. The results of our experiments with kinetic drying curves showed how these factors affect the properties of the cutters and the drying speed. Increasing the speed and temperature of the drying air reduces the drying time of the product and vice versa by increasing the humidity of the air and the thickness of the product. These curves were rounded by various existing experimental designs and the simpler model was also chosen to calculate the diffusion coefficient.

Keywords: strawberries, stable conditions, temperature, water activity, diffusion coefficient.

الملخص

يركز هذا العمل على دراسة تجريبية وتحليلية على تجفيف المواد الغذائية الزراعية.

تم تشغيل آلة اختبار تجفيف "أديبون" في مختبر الطاقة بجامعة جيجل لدراسة حركية تجفيف الفراولة، استندت هذه الدراسة التجريبية على التجفيف بالحمل الحراري، مما أدى إلى تدفق الهواء الساخن أفقياً على المنتج.

صابرينا هو اسم الفراولة التي تم اختيارها بسبب توافرها الكبير في هذا الوقت من العام وفي مدينة جيجل.

بالإضافة إلى ذلك، كان من المهم تحديد تأثيرات بعض العوامل بما في ذلك السماكة ودرجة الحرارة وسرعة الهواء والرطوبة أظهرت نتائج تجاربنا من خلال منحنيات حركية التجفيف مدى تأثير هذه العوامل على خصائص الفراولة وعلى سرعة تجفيفها حيث تؤدي زيادة سرعة هواء التجفيف ودرجة حرارته لتقليل مدة تجفيف المنتج والعكس عند زيادة رطوبة الهواء وزيادة سمك المنتج، وتم تقريب هذه المنحنيات بواسطة النماذج التجريبية المختلفة الموجودة وتم أيضاً اختيار النموذج الأبسط لحساب معامل الانتشار.

الكلمات الرئيسية: الفراولة، الطحن، الظروف المستقرة، درجة الحرارة، النشاط المائي، معامل الانتشار.