



# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :

**BDIRINA Abdelhakim**

Le : .....

## Etude expérimentale du séchage de la viande blanche; Comparaison entre deux méthodes de séchage.

---

### Jury :

Pr.	Noureddine Moumi	Pr	Université de Biskra	Président
Pr.	Adnane Labeled	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Fouzi Guellai	MCA	Université de Biskra	Co-encadreur
Pr.	Foued Chabane	MCA	Université de Biskra	Examineur

# *Remerciements*

*Au terme de ce travail, nous devons remercier tout d'abord dieu qui nous a donné la force et le courage de suivre nos études et d'arriver à ce stade.*

*Un grand merci à mes encadreurs **Pr.LABED.Adnnane et Dr. Guellai.Fouzi** qui m'avais aidé, soutenu et permis d'arriver à ce niveau-là et pour leurs excellents conseils et surtout pour le temps alloué à ce travail et leurs patience et leurs confiance, sans eux je n'aurais pas pu réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens aussi à remercier les membres de jury : **Noureddine Moumi, Adnane Labeled , Fouzi Guellai et Foued Chabane** qui m'ont fait honneur d'examiner ce travail.*

*Enfin, mes remerciements à ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser ce travail sans oublier les enseignants qui ont contribués à ma formation.*

# *Dédicace*

*Merci .....*

*Mon dieu de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :*

*A ma mère celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.*

*A mon père, écolle de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager à me donner l'aide et à me protégé.*

*A mes frères et mes sœurs, je vous souhaite un avenir plein de joie de bonheur de réussite et de sérénités, je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.*

*A tous les membres de ma famille, petite et grande.*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

# Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux Nomenclature

Introduction générale ..... 1

## **Chapitre I : Généralités sur le séchage**

I.1 Introduction ..... 3

I.2 Définition du séchage ..... 4

I.3 Théories descriptives du phénomène de séchage ..... 4

I.3.1 La théorie diffusion ..... 4

I.3.2 Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929)..... 5

I.3.3 La théorie de Luikov (1934) ..... 5

I.3.4 Théorie capillaire (1937)..... 5

I.3.5 La théorie de Krischer –Berger et Pei (1938)..... 6

I.3.6 Théorie de Philip et De Vries (1957) ..... 6

I.4 Les Formes D'eau dans Les aliments..... 6

I.4.1 Eau d'hydratation..... 6

I.4.2 Eau de constitution..... 7

I.4.3 Vapeur d'eau ..... 7

I.5 Activité de L'eau ..... 7

I.6 Principes de séchage ..... 7

I.6.1 séchage par Ebullition ..... 7

<i>I.6.2 Séchage par entraînement</i> .....	8
<i>I.7 Séchage et qualité</i> .....	9
<i>I.7.1 Types de modification de la qualité</i> .....	9
<i>I.8 Quelques exemples de produits carnés séchés dans les Pays En Développement</i> .....	11
<i>I.8.1 Le Biltong</i> .....	11
<i>I.8.2 Le Charqui</i> .....	13
<i>I.8.3 Le Kilichi</i> .....	14

## **Chapitre II: protocole expérimentale**

<i>II.1 Introduction</i> .....	17
<i>II.2 Banc d'essais et Instruments de Mesure</i> .....	17
<i>II.2.1 Mesure des dimensions</i> .....	17
<i>II.2.2 Mesure du poids</i> .....	18
<i>a. Balance électronique</i> .....	18
<i>b. Balance Numérique portable OHAUS CS5000P</i> .....	19
<i>II.2.3 Thermomètre digital à infrarouge</i> .....	20
<i>II.2.4 Anémomètre numérique (modèle PCE-TA30)</i> .....	20
<i>II.2.5 Thermomètre modèle TPM-10</i> .....	21
<i>II.2.6 Étuve de séchage de type Nabertherm</i> .....	21
<i>II.3 Protocole expérimentale</i> .....	27

## **Chapitre III: Résultats et Discussion**

<i>III.1 Introduction</i> .....	35
<i>III.2 La perte de masse en fonction du débit massique (1, 3 et 4 g/s)</i> .....	35
<i>III.3 Teneur en eau à base sèche Xs en fonction du débit massique (1, 3 et 4 g/s)</i> .....	38
<i>III.4 Vitesse de séchage</i> .....	41
<i>III.5 Conclusion</i> .....	44
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	45

## Liste des Figures

### Chapitre I : Généralités sur le séchage

<b>Figure I.1</b> : Séchage isenthalpique par entraînement .....	9
<b>Figure I.2</b> : Effets mécaniques du séchage.....	11
<b>Figure I.3</b> : Photo du produit carné Biltong.....	13
<b>Figure I.4</b> : Photo du produit carné Charqui.....	14
<b>Figure I.5</b> : Photo du produit carné Kilichi.....	15
<b>Figure I.6</b> : Procédé de séchage du Kilichi.....	15
<b>Figure I.7</b> : Schéma de principe de la modélisation à l'échelle procédé.....	16

### Chapitre II: protocole expérimentale

<b>Figure II.1</b> : Pied à coulisse.....	18
<b>Figure II.2</b> : Balances électronique Sartorius .....	19
<b>Figure II.3</b> : Balance Numérique portable OHAUS CS5000P.....	19
<b>Figure II.4</b> : Thermocouple numérique type ECM TD 8891 -200 ~ 1372 ° C.....	20
<b>Figure II.5</b> : Anémomètre numérique (modèle PCE-TA30).....	21
<b>Figure II.6</b> :Un thermomètre modèle (TPM-10).....	21
<b>Figure II.7</b> : L'étuve de séchage Nabertherm.....	22
<b>Figure II.8</b> : Etuve de séchage Naberterm utilisé pour l'expérience.....	23
<b>Figure II.9</b> : Contrôleur de débit d'air sur l'étuve de séchage Naberterm ( 30-3000°C).....	23
<b>Figure II.10</b> :Un ventilateur d'extraction d'air chaud de l'intérieur du Etuve de séchage Naberterm (30_3000°C).....	24
<b>Figure II.11</b> : Ventilateur d'admission d'air à l'intérieur de l'Etuve de séchage Naberterm ( 30- 3000°C).....	24
<b>Figure II.12</b> : Capteur solaire utilisé pour l'expérience de séchage solaire .....	25
<b>Figure II.13</b> : Moteur d'aspiration d'air.....	25
<b>Figure II.14</b> : Représente de pyranomètre modèle (AMPROBE SOLAR-100) .....	26
<b>Figure II.15</b> : Représente de la chamber de séchage utilisé pour le séchage solaire.....	26
<b>Figure II.16</b> : Schémas du protocole expérimental suivi .....	27
<b>Figure II.17</b> : Tranches de viande blanche (poulet) de 4 mm d'épaisseur avant le séchage...28	
<b>Figure II.18</b> : Des échantillons avant et après séchage à (T=40°C) de 4mm d'épaisseur a même teneur en NaCl et a (Qm=1g/s; 3g/s; 4g/s).29	
<b>Figure II.19</b> : Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve (T=40°C et débit 0,001 Kg/s).....	29

<b>Figure II.20:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=40^{\circ}\text{C}$ et débit $0,003\text{Kg/s}$ ).....	30
<b>Figure II.21:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=40^{\circ}\text{C}$ et débit $0,004\text{Kg/s}$ ).....	30
<b>Figure II.22:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=50^{\circ}\text{C}$ et débit $0,001\text{Kg/s}$ ).....	31
<b>Figure II.23:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=50^{\circ}\text{C}$ et débit $0,003\text{Kg/s}$ ).....	31
<b>Figure II.24:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=50^{\circ}\text{C}$ et débit $0,004\text{Kg/s}$ ).....	32
<b>Figure II.25:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=60^{\circ}\text{C}$ et débit $0,001\text{Kg/s}$ ).....	32
<b>Figure II.26:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=60^{\circ}\text{C}$ et débit $0,003\text{Kg/s}$ ).....	33
<b>Figure II.27:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=60^{\circ}\text{C}$ et débit $0,004\text{Kg/s}$ ).....	33
<b>Figure II.28:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par séchage solaire (débit $0,024\text{Kg/s}$ ).....	34
<b>Figure II.29:</b> Des échantillons de poulet humides et séchées par séchage solaire (débit $0,032\text{Kg/s}$ ).....	34

### **Chapitre:III Résultats et discussion**

<b>Figure III.1 :</b> Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit dans séchage par étuve en fonction du temps de séchage à une température $40^{\circ}\text{c}$ .....	36
<b>Figure III.2:</b> Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit dans séchage par étuve en fonction du temps de séchage à une température $50^{\circ}\text{c}$ .....	36
<b>Figure III.3 :</b> Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit dans séchage par étuve en fonction du temps de séchage à une température $60^{\circ}\text{c}$ .....	37
<b>Figure III.4 :</b> Evolution de la perte de masse de poulet en fonction du temps dans un séchoir solaire avec débit $0.024\text{kg/s}$ .....	37
<b>Figure III.5:</b> Evolution de la perte de masse de poulet en fonction du temps dans un séchoir solaire avec débit $0.032\text{kg/s}$ .....	38

<b>Figure III.6</b> : Effet du débit d'air sur la teneur en eau à base séché ( $X_s$ ) en séchage par étuve du produit en fonction du temps de séchage ( $T= 40^{\circ}c$ ) .....	39
<b>Figure III.7</b> : Effet du débit d'air sur la teneur en eau à base sèche ( $X_s$ ) en séchage par étuve du produit en fonction du temps de séchage ( $T=50^{\circ}c$ ) .....	39
<b>Figure III.8</b> : Effet du débit d'air sur la teneur en eau à base sèche ( $X_s$ ) en séchage par étuve du produit en fonction du temps de séchage ( $T=60^{\circ}c$ ) .....	40
<b>Figure III.9:</b> variation de la teneur en eau à base sèche $X_s$ en séchage solaire de en fonction du temps de séchage avec débit d'air fort (0,032kg/s).....	40
<b>Figure III.10:</b> variation de la teneur en eau à base sèche $X_s$ en séchage solaire de en fonction du temps de séchage avec débit d'air fort (0,024kg/s).....	41
<b>Figure III .11:</b> variation de la vitesse de séchage par étuve pour différents débits ( $T= 40^{\circ}C$ ).....	42
<b>Figure III .12:</b> variation de la vitesse de séchage par étuve pour différents débits d'air ( $T= 50^{\circ}c$ ).....	42
<b>Figure III.13</b> variation de la vitesse de séchage par étuve pour différents débits d'air ( $T= 60^{\circ}c$ ).....	43
<b>Figure III.14:</b> variation de la vitesse de séchage solaire en fonction de temps avec débit d'aire 0,024kg/s.....	43
<b>Figure III.15:</b> variation de la vitesse de séchage solaire en fonction de temps avec débit d'aire 0,032kg/s.....	44

## Liste des tableaux Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
Q	Le debit	Kg/s
$c_p$	Capacité calorifique	kJ/kg.K
T	Température	K
G	Rayonnement solaire	W/m <sup>2</sup>
S	Surface	m <sup>2</sup>
$\eta$	le rendement de capteur solaire	%
$H_a$	Humidité absolue	kg eau / Kg (as)
$M_a$	Masse du gaz	Kg
$M_e$	Masse de l'eau	Kg
$H_r$	Humidité relative	kg eau/Kg (as)
$P_v$	pression de vapeur	Pascal
$P_s$	Pression de saturation	Pascal
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / Kg (MS)
$M_h$	Masse humide du produit	Kg
$M_s$	Masse sèche du produit	Kg
$X_r$	Teneur en eau du produit à base humide	kg eau / Kg (Mh)
dt	Le temps pris	h
dx	L'humidité du produit au début et à la fin de l'opération	Kg/ Kg <sub>as</sub>
-dx/dt	Vitesse de séchage du produit	Kg / Kg <sub>s</sub> .h

# *Introduction générale*

## ***Introduction générale***

*Depuis* l'Antiquité, le séchage des produits agro-alimentaires est une technique largement connue et utilisée dans de nombreuses civilisations et cultures, couvrant divers aspects de la vie. Par exemple, certaines sociétés anciennes pratiquaient l'enterrement d'aliments séchés aux côtés des défunts, croyant ainsi leur assurer une existence dans l'au-delà, conformément à leurs croyances. De même, d'autres civilisations avaient recours à l'embaumement des corps pour empêcher leur décomposition, parfois en utilisant des méthodes impliquant le séchage, afin de préserver les restes mortels pour des raisons religieuses ou culturelles.

Au fil des années, plusieurs défis ont surgi, affectant le processus de séchage ainsi que la qualité des produits. Parmi ces défis figurent notamment [1] :

- Temps pris (long).
- La propagation d'insectes nuisibles sur le produit.
- Incapacité à contrôler la qualité des produits.
- Météo instable dans certaines régions.

Au milieu du XIXe siècle, une révolution industrielle s'est déployée à travers le monde, affectant tous les secteurs, notamment celui du séchage des aliments tels que les légumes et les fruits. Grâce à des recherches approfondies, les scientifiques et les chercheurs ont développé des appareils et des machines industriels qui assurent un séchage optimal des aliments. Ces dispositifs utilisent diverses sources d'énergie telles que les combustibles fossiles, le gaz, l'électricité et même l'énergie solaire. L'efficacité de ces appareils repose sur leur capacité à contrôler précisément la température et le débit d'air utilisé pour le processus de séchage, ce qui influe directement sur le taux de séchage et la qualité finale du produit [2].

Le but principal de cette étude est d'analyser le processus de séchage d'un produit agroalimentaire considéré comme essentiel dans la cuisine algérienne. Pour ce faire, nous avons entrepris deux méthodes de séchage : le séchage industriel à l'aide d'un séchoir électrique et le séchage solaire. Ces expériences ont été menées au sein du Hall technologique de l'Université Mohamed Kheider de Biskra.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

## ***INTRODUCTION***

---

- dans le premier chapitre nous présentons les notions fondamentales du séchage et l'activité de l'eau dans milieu poreux.
- Le deuxième chapitre décrit les étapes du processus expérimental et les différents instruments de mesure utilisés.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats expérimentaux issus de cette étude.

***Chapitre I :***  
***Généralités sur le séchage***

**I.1 Introduction :**

Le séchage des produits agricoles, tels que les légumes et les fruits, est une méthode de conservation alimentaire ancienne et efficace, reconnue pour son impact positif sur la qualité des produits séchés. L'objectif principal du processus de séchage est de diminuer la teneur en humidité à un niveau qui permet un entreposage sécurisé sur une durée prolongée. En conséquence, cela entraîne une réduction du poids et du volume, ce qui contribue à minimiser les coûts liés à l'emballage, au stockage et au transport [3].

Le séchage des fruits, des légumes et de la viande représente l'un des processus les plus gourmands en énergie de l'industrie alimentaire, mais il demeure le moyen le plus efficace de réduire les coûts et les pertes après la récolte. Le séchage solaire, une pratique ancienne, est largement utilisé à travers le monde depuis des siècles en exposant les produits à l'air libre.

De nombreux chercheurs se sont penchés sur la modélisation du séchage solaire des produits agricoles, ainsi que sur la simulation des performances des séchoirs solaires et le comportement de divers légumes et fruits, en se concentrant sur leur cinétique de séchage. Divers auteurs ont examiné les principes fondamentaux, les méthodes variées de séchage et les différents types de séchoirs [4].

L'objectif de ce chapitre est d'explorer la notion de séchage, en examinant ses divers types et méthodes. Nous chercherons à comprendre les mécanismes et les principes qui sous-tendent son fonctionnement.

**I .2 Définition du séchage :**

Le processus de séchage consiste à éliminer l'eau d'une substance humide par évaporation. Dans le secteur agroalimentaire, cette méthode est utilisée pour transformer des produits périssables en produits stables en réduisant l'activité de l'eau ( $a_w$ ). Le séchage présente plusieurs avantages:

- Prolongation de la durée de conservation des produits tels que la viande, le poisson, les fruits et les légumes.
- Simplification de la conservation en réduisant l'activité de l'eau.

Cependant, il présente également des inconvénients :

- ✓ Modification de la forme, de la texture, du goût et des qualités du produit, ce qui est souvent perçu comme un inconvénient.
- ✓ Coût élevé, en particulier en termes d'énergie. Il est donc essentiel de comprendre les facteurs influençant le séchage, notamment la vitesse de séchage, afin de réduire les coûts de cette opération. [5]

**I.3 Théories descriptives du phénomène de séchage :**

Plusieurs chercheurs ont formulé des théories afin d'expliquer le processus de séchage, se penchant sur le transfert de masse et de chaleur vers le produit. Ces théories sont discutées dans la suite de ce document [6].

**I.3.1 La théorie diffusion :**

En 1830, Gram Hammer a réalisé une expérience sur la diffusion, où il a déduit que le flux de matière causé par la diffusion est directement lié à la concentration dans le milieu.

Peu de temps après, Vik, ayant réalisé des avancées significatives dans ce domaine, a observé une symétrie entre la diffusion et la conductivité thermique. Il en a déduit les lois mathématiques correspondantes, telles que la célèbre loi de Fourier.

Il convient de noter que la loi de Fick décrit le processus de diffusion de la vapeur d'eau depuis une région de forte concentration vers une région de faible concentration de la substance, c'est-à-dire du centre vers l'extérieur du produit en cours de séchage.

La loi de Fick est applicable uniquement à certains types d'aliments et ne s'applique pas universellement à tous les produits alimentaires. Cette théorie a été critiquée pour avoir omis de prendre en compte le gradient thermique et le coefficient de diffusion constant d'un solide, ce qui rend son application inadaptée à tous les produits.

La diffusivité est influencée par divers facteurs tels que la composition du solide, le degré d'humidité, le taux d'humidité et la température [2].

Coefficient de Diffusion Continue :

-betterave à sucre  $5 \times 10^{-11}$ .

- blé  $7,2 \times 10^{-11}$ .

-maïs (2,6 à 8,2)  $\times 10^{-11}$ .

- pomme  $3,6 \times 10^{-9}$ .

- pomme de terre (0,9 à 1,5)  $\times 10^{-10}$ .

- feuilles de tabac  $7,8 \times 10^{-13}$ .

### **I.3.2 Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929) :**

Selon cette théorie, la loi de Fick dicte le déplacement de l'eau vers la surface d'un solide. Cela se traduit par la migration de la vapeur d'eau depuis une zone de forte concentration vers une zone de faible concentration, avec une autre perspective selon laquelle l'eau se déplace de l'intérieur du matériau à sécher vers sa surface, où elle s'évapore sous l'effet d'une énergie externe [7].

### **I.3.3 La théorie de Luikov (1934) :**

Selon cette théorie sur la diffusion thermique de l'humidité, l'un des facteurs contribuant au transfert d'humidité est le gradient de température.

### **I.3.4 Théorie capillaire (1937) :**

Cette théorie repose sur l'idée que le déplacement de l'eau à travers les pores est causé par un potentiel de succion, dont le mécanisme a été étudié en particulier par Jurin. Lorsqu'un

capillaire est plongé dans une cuve remplie d'eau, on observe une montée du liquide dans le tube par rapport au niveau de la cuve. Cette théorie est appliquée aux produits poreux ou granulaires.

Ceaglske et Hougen ont démontré que dans le séchage d'un solide granulaire, le flux d'eau est entièrement gouverné par les forces capillaires, indépendamment de la concentration. Krischer a montré que la phase initiale du séchage est contrôlée par la capillarité, une observation confirmée expérimentalement par Gorling sur la pomme de terre. [7], [8],[9]

### **I.3.5 La théorie de Krischer –Berger et Pei (1938) :**

Selon Krischer, le déplacement du fluide est provoqué par les forces capillaires par rapport à l'humidité sous forme liquide.

Selon Berger et Pei, le gradient de concentration résulte de la diffusion de vapeur induite par le gradient de pression de vapeur, en relation avec l'humidité sous forme de vapeur.

Krischer introduit une nouvelle théorie qui suppose que l'humidité peut se déplacer par une combinaison de transport capillaire pour la phase liquide et diffusif pour celle de la vapeur. Cette approche combine les mécanismes de transport des phases liquide et vapeur, offrant ainsi une vision plus complète du processus de séchage, surtout pour les matériaux où les deux mécanismes peuvent intervenir simultanément.

### **I.3.6 Théorie de Philip et De Vries (1957) :**

Selon cette théorie, le déplacement de l'eau est attribué aux capillaires et à la diffusion de la vapeur. Elle offre une description du transfert d'humidité et de chaleur au sein des matériaux poreux en se fondant sur l'établissement d'un ensemble d'équations. Le séchage se traduit par une combinaison de gradient de température et d'humidité en tenant compte en plus de l'effet de la pesanteur, modèle illustré à partir d'études sur les transferts de chaleur et de masse au niveau des sols [10].

### **I.4 Les Formes D'eau dans Les aliments :**

L'eau contenue dans un aliment peut généralement adopter trois états différents :

**I.4.1 Eau d'hydratation :**

L'eau humide peut se trouver soit sous forme d'une fine couche adhérant à la surface externe de la substance solide, soit dans les pores par capillarité. Cette eau, appelée « eau libre », est relativement facile à sécher.

De manière plus cohérente, elle peut également être retenue par des forces de cohésion plus fortes avec la matrice solide et/ou avec d'autres molécules d'eau ; cette forme d'eau est désignée comme « eau liée ».

**I.4.2 Eau de constitution :**

Dans la constitution d'un solide, l'eau peut faire partie intégrante de la structure moléculaire, comme c'est le cas pour l'eau présente dans les gels, par exemple. Son élimination peut être plus complexe et risque d'altérer la structure et la qualité du produit, ce qui ne correspond pas à notre objectif lors du processus de séchage.

**I.4.3 Vapeur d'eau :**

Il s'agit de la quantité d'eau qui passe de l'état liquide à l'état gazeux et qui se combine avec une quantité d'air sec.

**I.5 Activité de L'eau :**

L'activité de l'eau, notée  $A_W$ , est une mesure traditionnelle utilisée pour évaluer la susceptibilité d'un produit à se détériorer d'un point de vue biologique dans une atmosphère donnée. Elle représente le rapport entre la pression de vapeur d'eau de l'aliment (c'est-à-dire la pression de vapeur d'eau à sa surface) et la pression de vapeur d'eau pure à la même température.  
[11]

$$\Delta W = \frac{\text{pression partielle de l'eau dans l'aliment à } \theta_0}{\text{pression partielle de l'eau pure à } \theta_0}$$

**I.6 Principes de séchage :**

L'idée la plus instinctive pour sécher un produit est souvent de le chauffer jusqu'à ce que l'eau qu'il contient s'évapore, en le portant à la température d'ébullition. Toutefois, dans la pratique, cette méthode n'est pas la plus courante. On préfère généralement utiliser l'air comme agent de séchage à une température plus modérée.

**I.6.1 séchage par Ebullition :**

L'ébullition d'un liquide se produit lorsque sa température atteint un point où la pression de vapeur de l'eau dans ce liquide égale la pression atmosphérique totale environnante  $P_t$ . ( $P=P_t$ ).

- Pour l'eau pure, à pression atmosphérique, la température nécessaire est 100°C.
- Pour des corps aqueux, la pression de vapeur d'eau est abaissée par la présence des corps dissous ; la température nécessaire est donc supérieure à 100 °C.
- Pour des solides humides enfin, les phénomènes sont analogues ; selon l'état de l'eau dans le produit, celle-ci bout à 100°C ou plus haut.

Dans toutes les situations, la température d'ébullition est également influencée par la pression, étant plus basse sous vide. Dans les industries alimentaires et pharmaceutiques, cette méthode est couramment utilisée, impliquant le traitement sous vide de produits préalablement congelés.

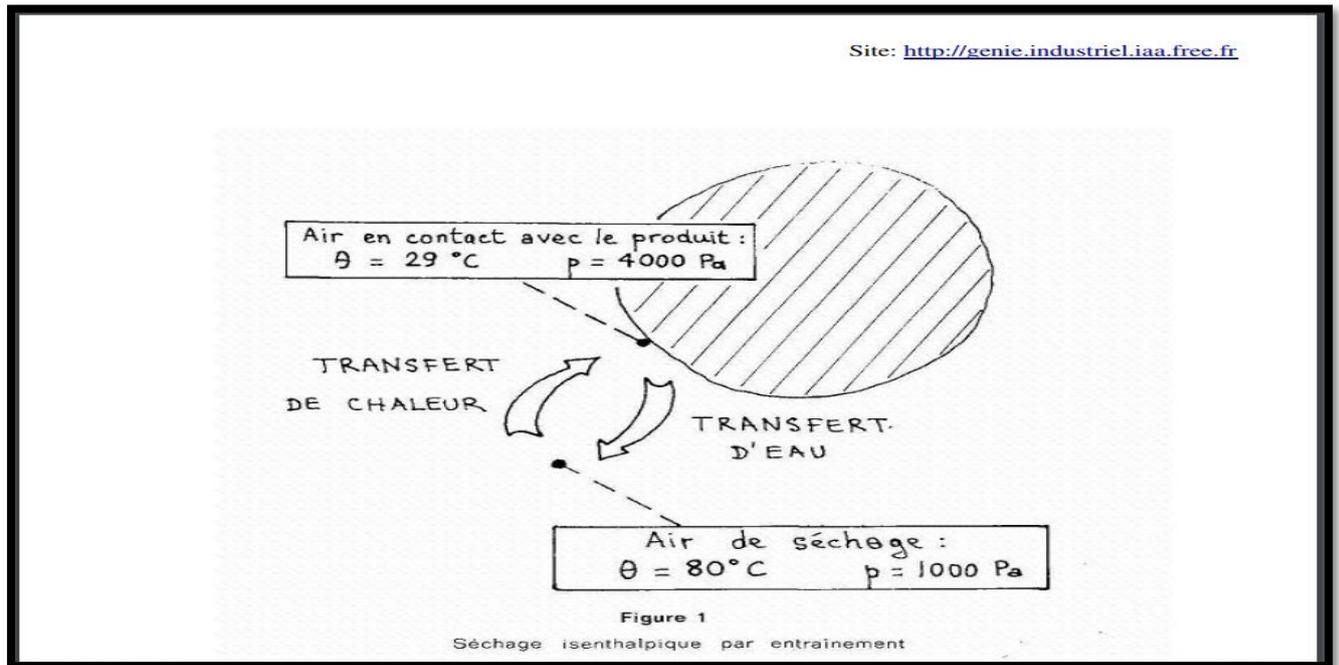
**I.6.2 Séchage par entraînement :**

Lorsqu'un produit humide est exposé à un courant d'air chaud, on observe une disparité de température et de concentration de la substance humide :

- La chaleur est transférée de l'air au produit sous l'influence de la différence de température.
- L'eau se déplace dans la direction opposée en raison de la différence de concentration d'eau dans l'air.

La figure ci-dessous représente un produit très hydraté. Les concentrations d'eau dans l'air sont exprimées en pressions partielles d'eau ( $P_a$  = Pascal).

Le processus de séchage est équilibré lorsque l'énergie requise pour évaporer l'eau est équivalente à celle fournie par l'air chaud. Il est à noter que l'air agit à la fois comme source de chaleur et comme vecteur pour transporter les matériaux humides [12].



**Figure I.1 :** Séchage isenthalpique par entraînement.

## I.7 Séchage et qualité :

La destination alimentaire du produit rend nécessaire une attention particulière à la qualité du produit fabriqué.

### I.7.1 Types de modification de la qualité :

#### I.7.1.1 Modifications biochimiques dues à la température :

L'exposition à une température élevée pendant une période prolongée entraîne des altérations sur les produits biologiques, généralement perçues comme indésirables, parmi lesquelles les principales sont les suivantes :

- Les réactions de Maillard représentent un brunissement non enzymatique résultant de l'interaction entre les protéines et les glucides. Outre ce brunissement, ces réactions entraînent une diminution de la valeur nutritionnelle, notamment en lysine.
- L'oxydation des matières grasses conduit au rancissement.
- La dégradation des vitamines survient.

- La dénaturation des protéines diminue leur capacité à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altère leur capacité de liaison ou de formation de mousse (comme dans le cas de l'utilisation d'additifs protéiques en charcuterie ou en pâtisserie).

- Les réactions enzymatiques surviennent : si les enzymes n'ont pas été neutralisées par un traitement préalable ou par la température pendant le processus de séchage, elles produisent leurs effets : brunissement des polyphénols, hydrolyse des liquides, etc.

### **I.7.1.2 Pertes d'arômes :**

Le séchage est un processus de séparation basé sur la volatilité. Il est courant que non seulement l'eau, mais aussi d'autres composés volatils soient éliminés du produit. Cela inclut les arômes naturellement présents dans les produits biologiques destinés à l'alimentation. Cependant, en pratique, la perte d'arômes est généralement moins importante que ce que l'on pourrait prévoir en se basant uniquement sur leur volatilité.

### **I.7.1.3 Modifications physiques et mécaniques :**

En plus de l'évaporation des arômes, le processus de séchage entraîne diverses transformations physiques et mécaniques, notamment :

- Fusion et migration de matières grasses.
- Les solides peuvent se rétracter (comme les morceaux de légumes) ou se fissurer (comme les pâtes alimentaires), et ces altérations ne sont généralement pas réversibles lors de la réhydratation. C'est là l'avantage majeur de la lyophilisation : elle permet de conserver la forme et les dimensions du produit, facilitant ainsi grandement sa réhydratation [13].

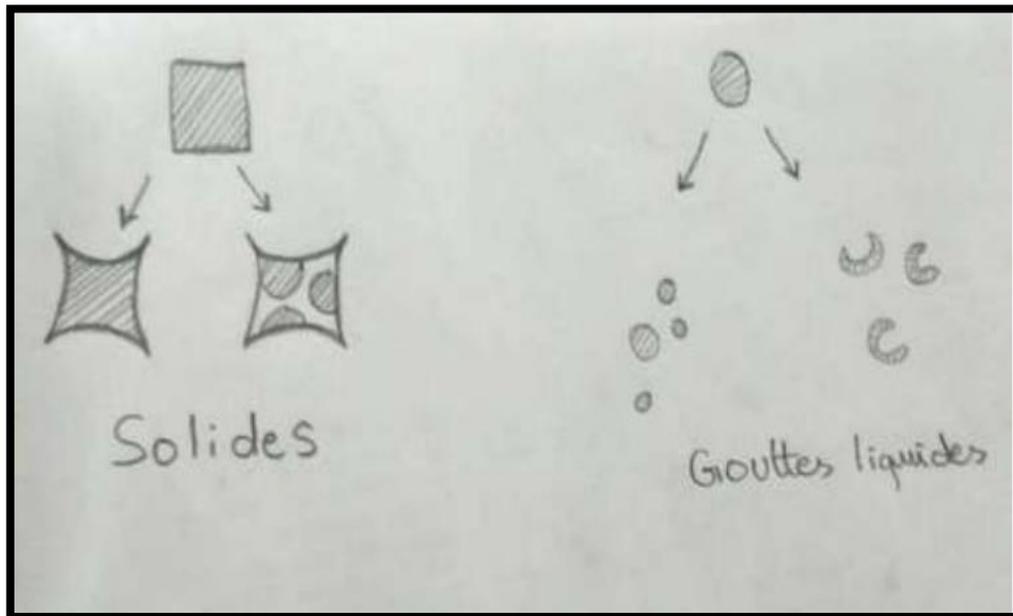


Figure I.2: Effets mécaniques du séchage.

## I.8 Quelques exemples de produits carnés séchés dans les pays en développement :

La viande est un produit très périssable et donc difficile à conserver sans traitement spécifique. Le séchage est la première méthode de conservation des aliments utilisée par les humains et reste encore utilisée dans certaines régions, bien que de nouvelles méthodes aient été développées pour maintenir la viande fraîche (congélation, utilisation de produits chimiques, etc.). L'objectif du séchage des produits carnés est non seulement d'augmenter leur durée de conservation, mais aussi de leur conférer de nouvelles propriétés organoleptiques appréciées par les consommateurs.

Plusieurs produits traditionnels à base de viande séchée sont développés à travers le monde, notamment dans les pays chauds. Les produits à base de viande séchée les plus connus sont le Biltong en Afrique du Sud, le Charqui en Amérique du Sud et le Kilichi en Afrique centrale et de l'Ouest. [14]

### I.8.1 Le Biltong :

Le biltong (Fig. 1.3) est un produit carné sud-africain préparé à partir de lanières de viande séchée, salée et assaisonnée avec des épices telles que le poivre, l'ail, l'anis et la coriandre. Le procédé traditionnel de fabrication consiste à découper la viande en lanières d'une

épaisseur de 1 à 2 cm, puis à les enrober dans une solution contenant un mélange de sel et d'épices. Les lanières sont ensuite disposées en couches dans un récipient légèrement aspergé de vinaigre et bien tassées. Après un maximum de 12 heures de trempage dans la saumure, les lanières sont ensuite plongées dans un mélange d'eau chaude et de vinaigre. Le Biltong est ensuite séché au soleil pendant une journée avant de terminer son séchage à l'ombre. [15] Les morceaux tendres des carcasses de bœuf relativement jeunes et maigres sont préférés pour la fabrication du Biltong.

Le produit final se caractérise par une teneur en eau comprise entre 15 % et 50 % (sur une base sèche) et une activité de l'eau comprise entre 0,6 et 0,85 [16]. Le Biltong est généralement considéré comme microbiologiquement stable en raison de son activité de l'eau, de sa teneur en sels non négligeable et de sa faible valeur de pH, qui varie de 4,8 à 5,8. Des études ont été menées sur la qualité microbiologique des échantillons de Biltong à base de bœuf, d'antilope et de gazelle en utilisant la méthode TPC (Total Plaque Count) pour dénombrer la flore microbienne totale. Les résultats ont montré que le Biltong avait un TPC inférieur à 10<sup>7</sup> unités formant colonie (UFC/g), ce qui respecte les normes de qualité hygiénique définies par la Food Standard Agency (Agence de contrôle de qualité des produits alimentaires du Royaume-Uni).

Bien qu'il soit à l'origine consommé comme source de protéines, le Biltong est devenu au fil des années un produit de consommation courante. En 2003, la valeur annuelle du marché du Biltong était estimée entre 40 et 70 millions d'euros. Plus récemment, la production à grande échelle du Biltong s'est développée et il est facilement disponible dans les supermarchés sud-africains ou les magasins spécialisés. [17]



**Figure I.3:** Photo du produit carné Biltong.[18]

### **I.8.2 Le Charqui :**

Le Charqui (Fig. 1.5) est un produit carné traditionnel brésilien défini par le Ministère de l'Agriculture de ce pays comme de la viande de bœuf séchée dont la teneur en eau est inférieure à 45 % (sur une base sèche) avec moins de 15 % de résidus minéraux. Le Charqui est consommé par les Brésiliens depuis le 19<sup>ème</sup> siècle, et son processus de préparation a fait l'objet de plusieurs études. [19]

Le Charqui est préparé à partir de viande de bœuf découpée en morceaux d'environ 5 cm d'épaisseur maximum. Ces morceaux sont immergés pendant environ une heure dans des cuves contenant une solution saline, puis étalés sur des lattes ou des étagères pour s'égoutter. La viande peut être salée à sec et retournée toutes les huit heures. Le processus de salaison est répété pendant cinq jours, puis les morceaux de viande sont rapidement lavés pour éliminer l'excès de sel adhérent à leur surface. Ils peuvent également être pressés pour éliminer l'excès d'humidité et prendre une forme plate. Ensuite, ils sont étalés sur des lattes de bambou ou des rayonnages en bois pour un séchage au soleil d'une durée de 4 à 6 heures. Pour éviter des températures supérieures à 40°C et assurer un séchage uniforme, la viande est exposée au soleil le matin et retirée l'après-midi, pendant 4 à 5 jours. Après chaque période d'exposition, les lots sont recouverts d'une toile imperméable pour les protéger de la pluie, du vent et retenir la chaleur absorbée. Le produit final a une activité de l'eau comprise entre 0,7 et 0,75 et peut être stable pendant 6 mois dans des conditions de stockage ambiantes [20].



**Figure I.4:** Photo du produit carné Charqui. [18]

### **I.8.3 Le Kilichi :**

Le Kilichi (Fig. 1.5) est un produit carné généralement fabriqué à partir de viande de bœuf découpée en fines lanières (2 à 4 mm), séchée, assaisonnée avec des épices locales et de la pâte d'arachide, puis rôtie au feu. Il est très connu dans les zones sahéliennes d'Afrique centrale et de l'Ouest. Le procédé traditionnel consiste à sécher les tranches de viande au soleil (à l'air libre), puis à les mélanger avec une pâte d'arachide ou de la farine de soja (50 %), de l'eau (30 %), de l'ail (10 %), des cubes de bouillon (5 %), du sel (2 %) et des épices telles que le poivre, le gingembre et l'oignon. L'ajout de piment rouge (*Capsicum frutescens*) (1 % à 3 %) à ces ingrédients donne du Kilichi épicé. Le produit humide est ensuite exposé à nouveau au soleil pour être séché jusqu'à ce qu'il atteigne une teneur en eau finale comprise entre 10 % et 20 % (base sèche). Les tranches de viande sont finalement rôties sur un feu ardent pendant environ cinq minutes. Cette torréfaction détruit certains microorganismes et améliore la saveur. Lorsque l'ensoleillement est faible, certains producteurs préfèrent sauter l'étape du deuxième séchage au soleil et passer directement à la torréfaction, ce qui leur permet de gagner du temps, mais la qualité du produit n'est pas meilleure. En effet, la deuxième étape du séchage confère au produit des qualités organoleptiques appréciées par les consommateurs. La figure 1.6 récapitule le processus de fabrication du Kilichi [21].



Figure I.5: Photo du produit carné Kilichi [18].

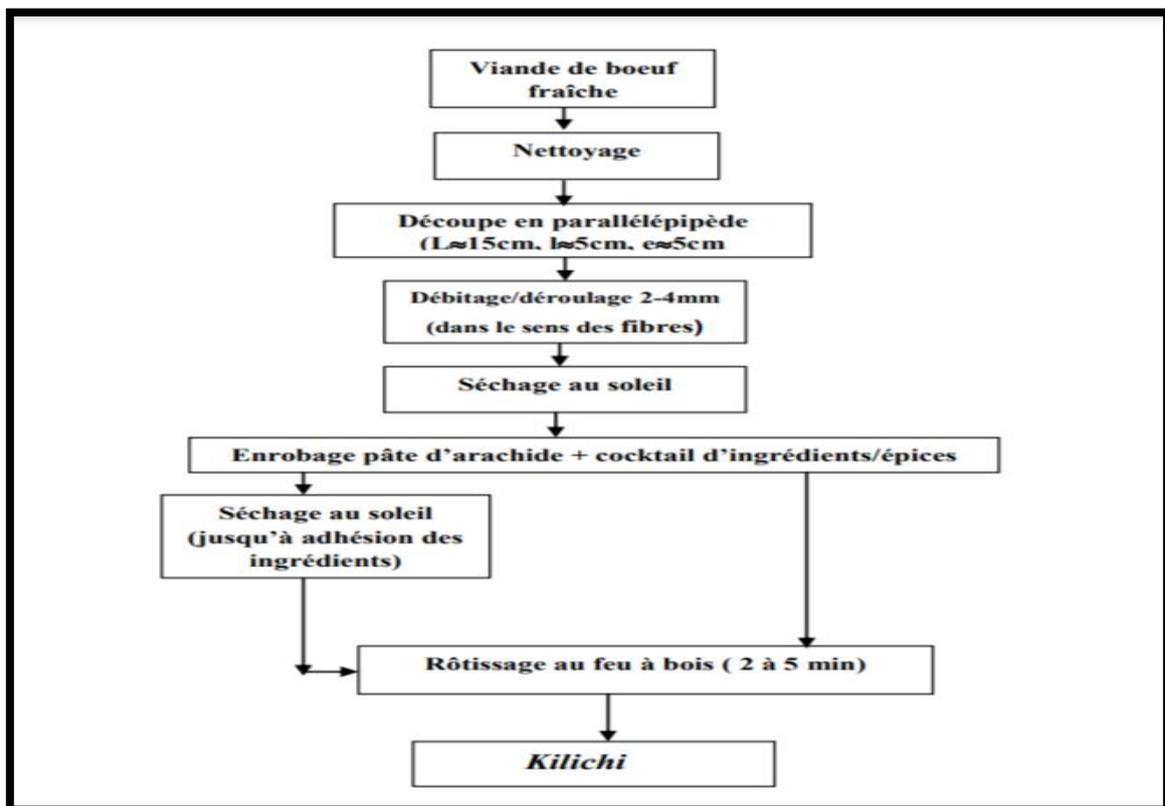


Figure I.6: Procédé de séchage du Kilichi [15].

La modélisation d'un procédé de séchage solaire amène à faire intervenir les conditions météorologiques dans le modèle. En effet celles-ci varient pendant le procédé de séchage et dépendent de la localité géographique et des saisons. On utilise généralement des modèles empiriques pour déterminer l'ensoleillement dans une localité et une date données. En plus des

caractéristiques hygroscopiques du produit et des conditions météorologiques, le modèle à l'échelle du procédé prend en compte le comportement thermique du séchoir. La figure 4.1 présente le schéma de principe de la modélisation à l'échelle du procédé. [15]

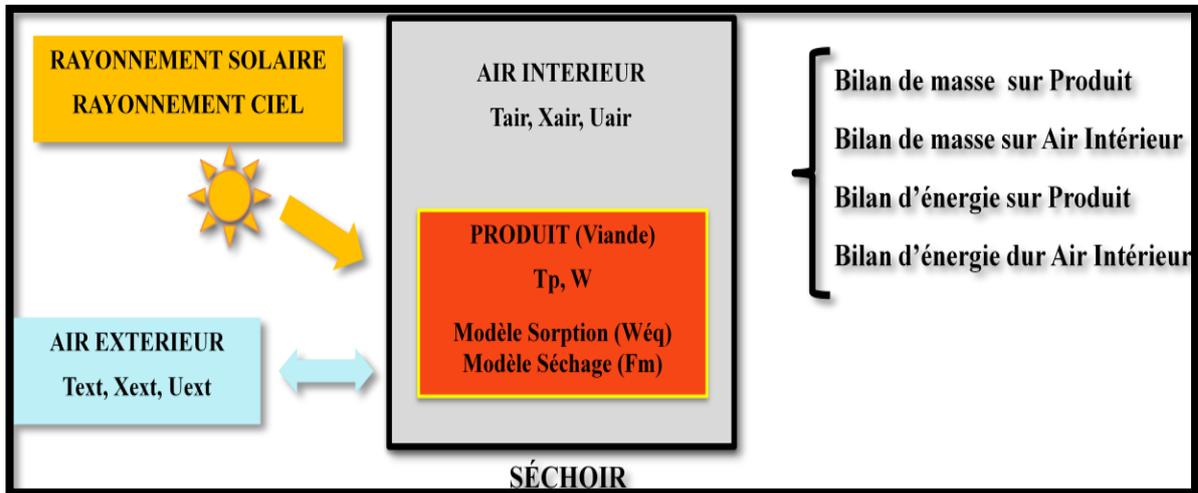


Figure I.7: Schéma de principe de la modélisation à l'échelle procédé. [15]

***Chapitre II :***  
***Protocole expérimentale***

## **II.1 Introduction :**

Le séchage est une procédure visant à réduire partiellement ou complètement le niveau d'humidité d'un matériau humide en évaporant l'eau qu'il contient. Cette opération permet à la chaleur fournie de modifier l'état de l'eau liquide en vapeur, facilitant ainsi le transfert de masse du liquide imprégné dans le solide à l'état de vapeur par l'action de l'air asséchant.

Ce procédé se distingue en deux catégories : le séchage forcé et le séchage naturel. Le séchage forcé est contrôlé par une force extérieure, comme par exemple l'utilisation d'un courant d'air chaud dans une chambre de séchage, tandis que le séchage naturel ne requiert aucune force.

## **II.2 Banc d'essais et Instruments de Mesure :**

L'étude consiste à ajouter du sel NaCl sous forme de poudre directement comme traitement préalable avant le processus de séchage, afin de bénéficier de son impact sur la vitesse de séchage du poulet en fonction de la température et du débit de l'air asséchant.

Pour cela des échantillons de poulet ont été choisis de la Boucheries de Biskra-Algérie (produit locale), amenait au laboratoire pédagogiques des travaux pratiques du département de génie mécanique de l'Université Mohamed Kheider Biskra –Algérie.

### **II.2.1 Mesure des dimensions :**

Les échantillons sont ensuite découpés en tranches de couches minces de formes rectangulaires, avec une largeur de 1 cm et une épaisseur de 4 mm. Les échantillons sont découpés à l'aide d'une découpeuse en acier inoxydable, puis mesurés à l'aide d'un pied à coulisse (voir Fig.II.1). Des claies de dimensions 25x25 cm ont été choisies pour poser les échantillons en couches minces d'une épaisseur de 4 mm. Après avoir découpé les échantillons en formes rectangulaires d'une largeur de 1 cm à l'aide de la découpeuse en acier inoxydable, ils ont été mesurés à l'aide d'un pied à coulisse (voir Fig. ( II .1).



**Figure II.1 :** Pied à coulisse

### **II.2.2 Mesure du poids :**

Les claires étaient pesées sur une balance électronique avant de recevoir les échantillons pour établir leur poids initial (poids net) , puis pesées à nouveau avec les échantillons pour évaluer la perte d'humidité à chaque intervalle de 1 heure par rapport au taux d'humidité initial.

Pendant cette expérience, des difficultés ont été rencontrées ce qui a entraîné la répétition la de préparation des échantillons pour quelque essais. Ces problèmes étaient liés à la découpe de tranches fines de poulet afin d'atteindre les dimensions et l'épaisseur souhaitées avec précision (forme identique).

Pour mesurer le poids des échantillons nous avons utilisé deux types de balances :

#### **a Balance électronique :**

Balance électronique utilisé pour les mesures de la concentration en poids de l' Na Cl dans chaque expérience :



Figure II.2 : Balances électronique Sartorius .

- -Précision d'affichage 10 mg.
- -Temps de stabilisation pour la 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.

**b 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



Figure II.3 : Balance Numérique portable OHAUS CS5000P.

### II.2.3 Thermomètre digital à infrarouge :

Les températures sont mesurées à l'aide d'un thermocouple calibré du modèle ECM TD 8891 a quatre canaux thermomètre numérique capable de mesurer des températures allant de -200°C à 1372°C. (Voir Figure (II-2)).

Le premier mesure s'effectue avant d'entamer au séchage par l'injection direct de la sonde de température a cœur la entré et la sortie de capteur.

la deuxième fonction de mesure de cet appareil par la lecture direct sur l'écran du thermocouple.



Figure II.4 : Thermocouple numérique type ECM TD 8891 -200 ~ 1372 ° C.

### II.2.4 Anémomètre numérique (modèle PCE-TA30) :

Un anémomètre numérique avec une précision de lecture de 0,01 m/s a été employé pour évaluer la vitesse de l'air entrant et sortant de l'étuve grasse à travers le contrôle de la ventilation afin de calculer le débit d'air physique pour chaque essai.

Nous avons également utilisé cet appareil afin de mesurer la vitesse de l'aire ambient dans les expressions de séchage solaire.



**Figure II.5:** Anémomètre numérique (modèle PCE-TA30).

### II.2.5 Thermomètre modèle TPM-10 :

Contrôleur TPM-10 (voir la figure), a été placé dans la position dans la chambre de séchage pour mesurer la température. Il existe d'autres modèles qui mesurent ensemble la température et l'humidité.



**Figure II.6 :**Un thermomètre modèle (TPM-10).

### II.2.6 Étuve de séchage de type Nabertherm :

Les expériences ont été menées dans une étuve de séchage de type Nabertherm. Cette étuve se compose d'une enceinte hermétique en acier inoxydable, offrant une ventilation interne pour assurer une distribution thermique uniforme dans la chambre. La ventilation est ajustable pour

s'adapter aux besoins spécifiques de chaque expérience. Un flux d'air horizontal garantit une homogénéité de température avec une variation maximale de  $\pm 5$  °C.

L'évacuation continue de l'air est située sur la paroi arrière avec un contrôle de réglage à l'avant. La régulation des paramètres de séchage est assurée par un microprocesseur PID avec système d'autodiagnostic. La température maximale atteignable est de 300 °C, avec une plage de fonctionnement allant de +30 °C au-dessus de la température ambiante jusqu'à 300 °C. Le chargement des échantillons peut être effectué sur plusieurs niveaux.



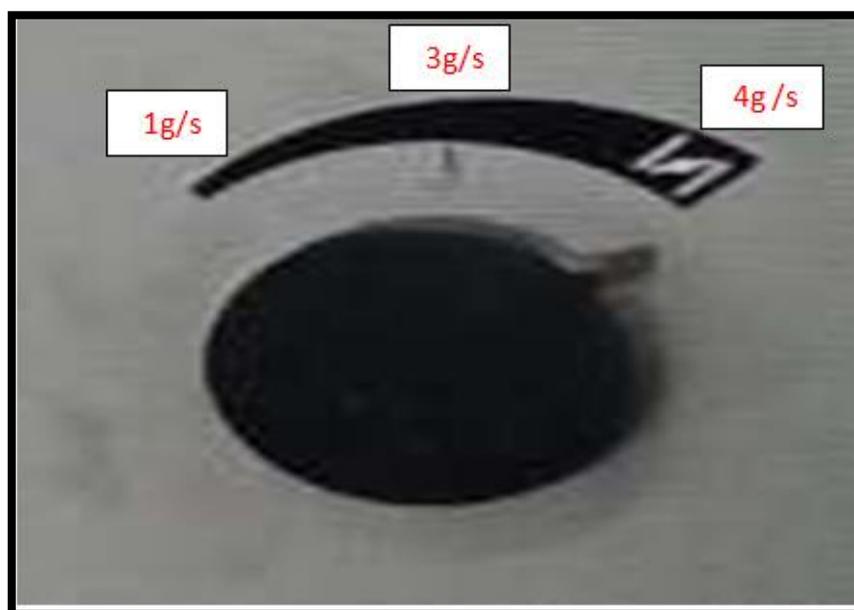
**Figure II.7:** L'étuve de séchage Nabertherm.



**Figure II.8 :** Etuve de séchage Naberterm utilisé pour l'expérience.

Etuve de séchage Naberterm Sur laquelle l'expérience a été réalisée caractérisé par:

- 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 .



**Figure II.9 :** Contrôleur de débit d'air sur l'étuve de séchage Naberterm ( 30-3000°C ).



**Figure II.10 :** Un ventilateur d'extraction d'air chaud de l'intérieur du Etuve de séchage Naberterm (30\_3000°C).



**Figure II.11 :** Ventilateur d'admission d'air à l'intérieur de l'Etuve de séchage Naberterm ( 30-3000°C ).



**Figure II.12** : Capteur solaire utilisé pour l'expérience de séchage solaire .

Le Moteur d'aspiration d'air qui permet au flux forcé de convertir la température chaude dans le capteur solaire vers la chambre de séchage :



**Figure II.13**: Moteur d'aspiration d'air.

Un pyranomètre de modèle (AMPROBE SOLAR-100) appareil facile à utiliser pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire par unité de  $W / m^2$  comme le montre la figure.



**Figure II.14:** Représente de pyranomètre modèle (AMPROBE



**Figure II.15 :** Représente de la chamber de séchage utilisé pour le séchage solaire.

II.3 Protocole expérimentale :

Le plan spécifique pour cette expérience a été exécutée en conformité avec le protocole qui a été schématisé comme suit :

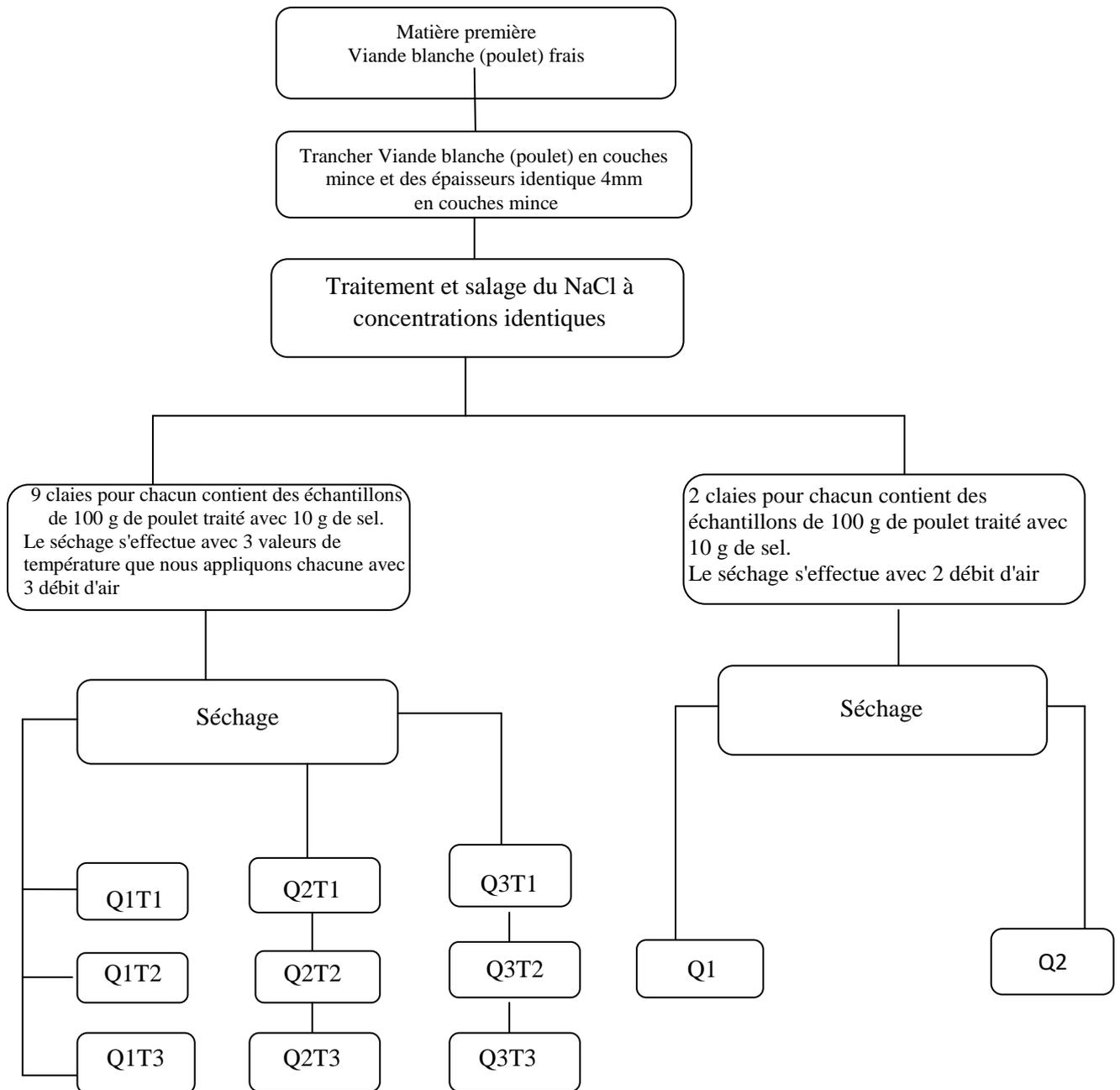


Figure II.16 : Schémas du protocole expérimental suivi .

Des échantillons de même épaisseur ont été sélectionnés pour chaque expérience. En fixant l'épaisseur des échantillons et la concentration de sel NaCl et en basant sur l'effet de la température et le débit d'air fourni.

Douze claies charger des échantillons pour chaque une des mêmes épaisseurs et à des mêmes concentrations en sel poudre pulvériser sur la surface de chaque échantillon après avoir pesé ces concentrations sur une balance électronique 'Sartorius' de haute précision. (voir Fig (II.2)).

Les claies ont été placées dans l'étuve à une température et à un débit d'air constant pour chaque essai. Afin d'étudier l'influence de la température et du débit d'air sur le processus de séchage des viandes blanche (poulets), nous avons regroupé toutes les températures et les vitesses de débit d'air utilisées pour cette étude. Les températures sélectionnées étaient de 40°C, 50°C et 60°C, tandis que les débits d'air choisis étaient de 1 g/s, 3 g/s et 4 g/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 1heure jusqu' à la stabilisation du poids des échantillons sur chaque claie.

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

Les Figures (II.17) et (II.18) présentent un exemple des expériences de séchage des tranches de poulet effectuées avant et après le processus de séchage dans l'étuve :



**Figure II.17 :** Tranches de viande blanche (poulet) de 4 mm d'épaisseur avant le séchage.



**Figure II.18 :** Des échantillons avant et après séchage à ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ) de 4mm d'épaisseur a même teneur en NaCl et a ( $Q_m=1\text{g/s}$ ;  $3\text{g/s}$ ;  $4\text{g/s}$ ).



**Figure II.19:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=40^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m= 0,001\text{ Kg/s}$ ).



**Figure II.20:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=40^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m=0,003\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.21:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=40^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m=0,004\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.22:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=50^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m=0,001\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.23:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=50^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m=0,003\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.24:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=50^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m=0,004\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.25:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=60^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m=0,001\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.26:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=60^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m=0,003\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.27:** Des échantillons de poulet humides et séchées par étuve ( $T=60^{\circ}\text{C}$  et  $Q_m=0,004\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.28:** Des échantillons de poulet humides et séchées par séchage solaire (  $Q_m=0,024\text{Kg/s}$  ).



**Figure II.29:** Des échantillons de poulet humides et séchées par séchage solaire (  $Q_m= 0,032\text{Kg/s}$  )

***Chapitre III:***  
***Résultats et discussion***

**III.1 Introduction :**

Les recherches menées dans le cadre de ce travail ont permis d'étudier le comportement de la viande blanche après avoir observé le processus de séchage à l'aide d'un séchoir ventilé alimenté par l'électricité, et de répondre à des questions fondamentales visant à expliquer et comprendre ce processus. Nous avons ainsi, essayé de tracer les courbes décrivant la cinétique de séchage du produit et de les représenter en se basant sur la perte de masse, la variation de la teneur en eau et la vitesse de séchage lors du processus de séchage.

**III.2 La perte de masse :**

Les figures ci-dessous (III-1) (III-2) (III-3) montrent les courbes d'évolution de la perte de masse en fonction du temps, à différentes températures (40, 50, 60 °C), avec trois débits d'air différents (0,001, 0,003, 0,004 kg/s). On observe une augmentation de la perte de masse pendant le temps de séchage, puis elle se stabilise au bout d'un certain temps jusqu'à la fin de séchage.

Sur la figure (III-1), une augmentation de la perte de masse jusqu'à 65 g peut être observée. En fin de séchage, le temps est de 8 h 00 min avec un débit d'air de 0,001 kg/s, 7 h 00 min avec un débit d'air de 0,004 kg/s, et 7 h 40 min avec un débit d'air de 0,003 kg/s, entraînant respectivement des pertes de masse de 62 g, 65 g et 60 g.

Sur la figure (III-2), on observe la perte de masse à une température de 50 °C, où l'on constate qu'avec un débit d'air de 0,001 et 0,003 kg/s, le temps le plus long est de 8 h 00 min avec une masse de 60 g, et avec un débit d'air de 0,004 kg/s, le temps est de 7 h 00 min.

Sur la figure (III-3), nous présentons la courbe de la perte de masse à une température de 60 °C, où l'on constate qu'avec un débit d'air de 0,003 kg/s, le temps le plus long est de 8 h 00 min avec une masse de 64 g, et avec un débit d'air de 0,004 kg/s, le temps est de 7 h 00 min.

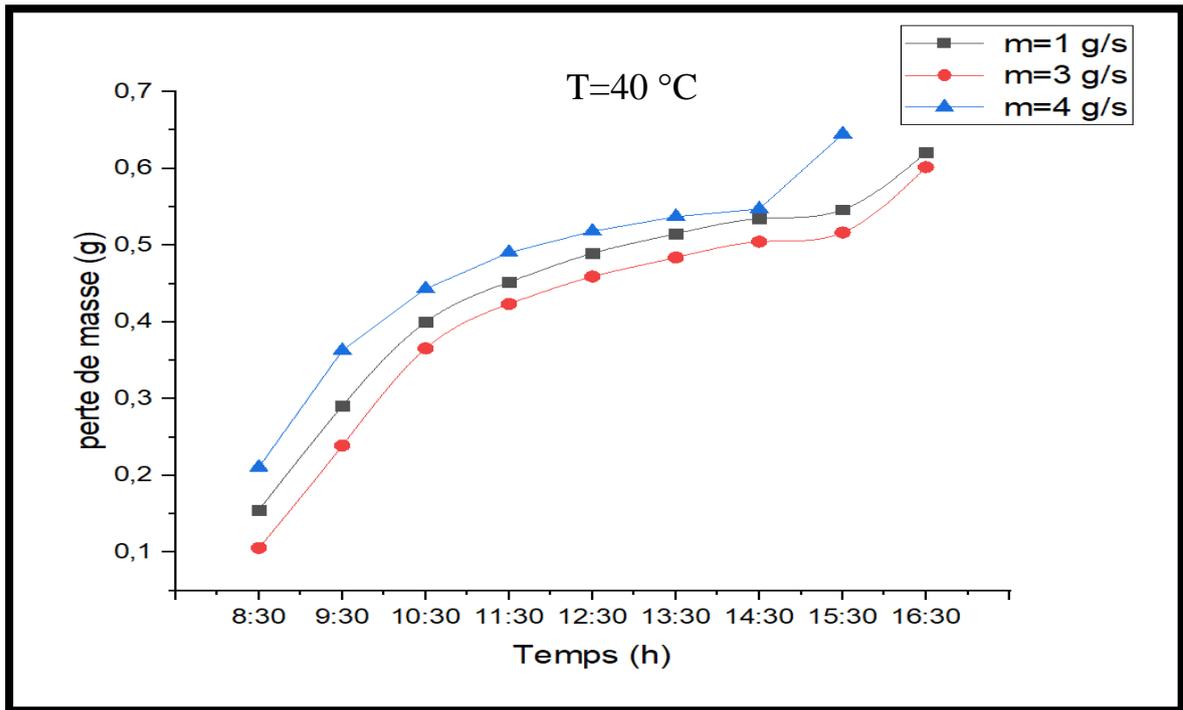


Figure III-1 : Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit lors du séchage par étuve en fonction du temps de séchage (T=40°C).

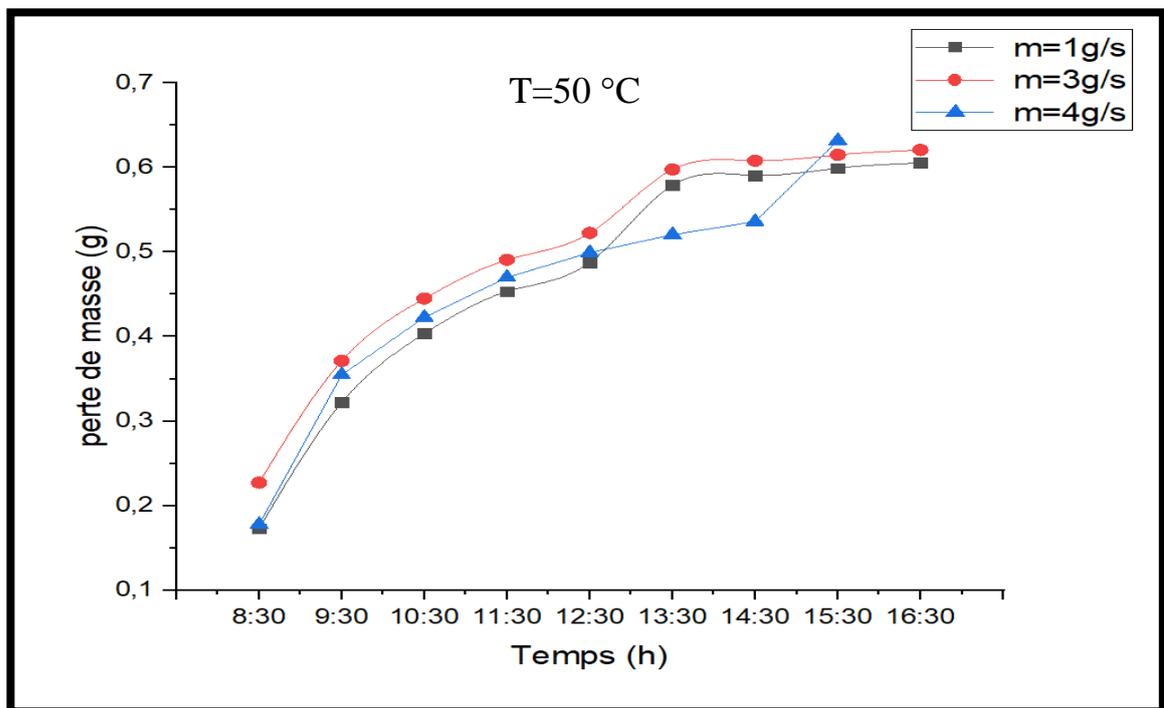
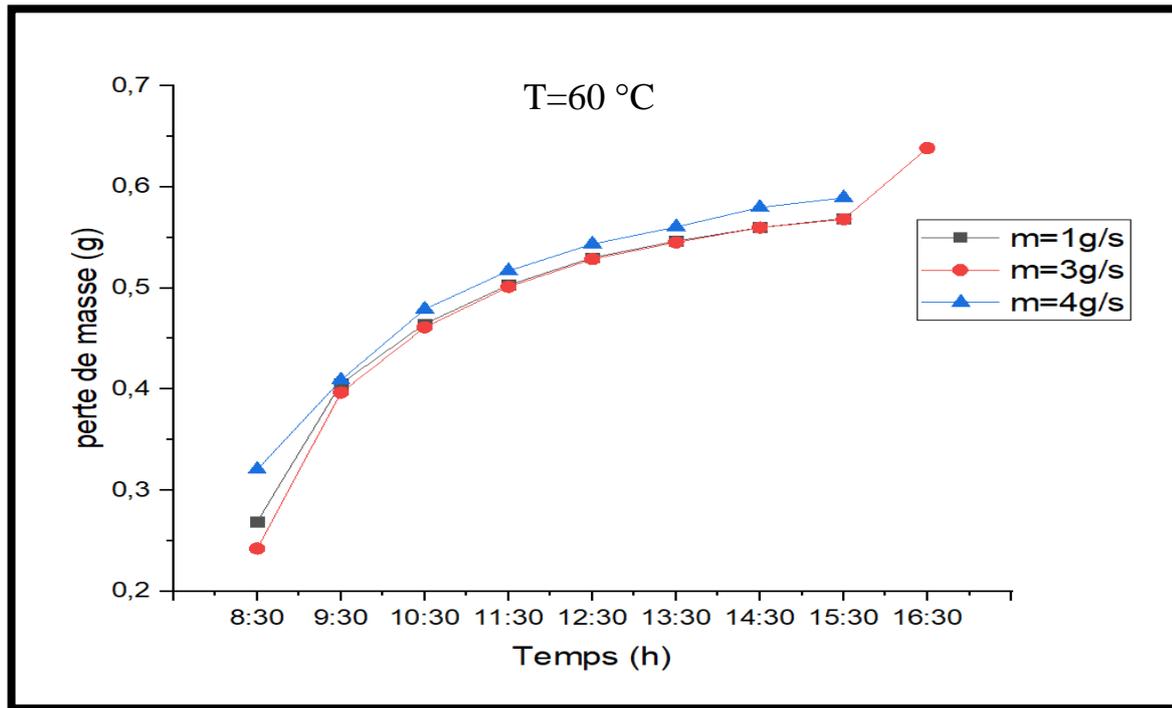
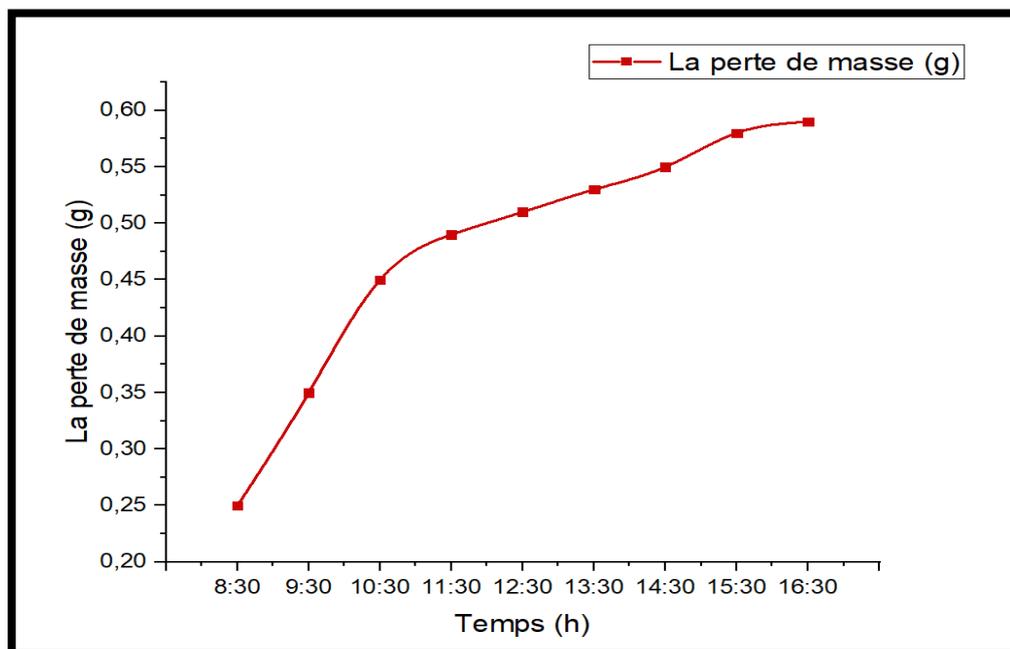


Figure III-2: Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit lors du séchage par étuve en fonction du temps de séchage (T=50°C).

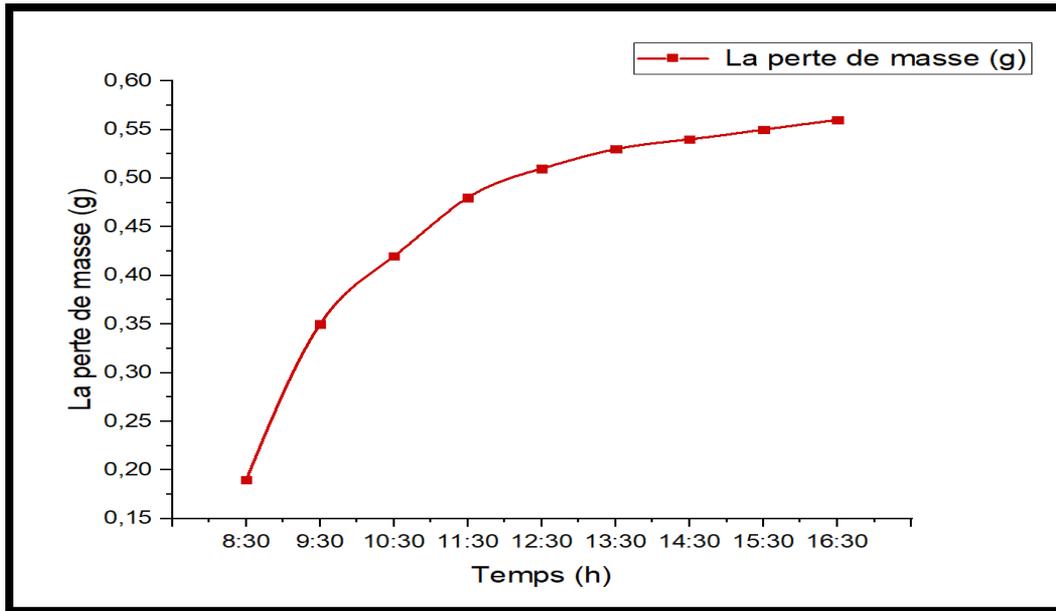


**Figure III-3 :** Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit lors du séchage par étuve en fonction du temps de séchage ( $T=60^{\circ}\text{C}$ ).

La perte de masse dans un séchoir solaire est présentée dans les figures (III-4) et (III-5), où l'on constate que le temps de séchage atteint (08 heures et 00 minutes) avec une masse de 59 et 56 g.



**Figure III-4 :** Evolution de la perte de masse de poulet en fonction du temps lors du séchage dans un séchoir solaire ( $Q_m= 0.024\text{kg/s}$ ).



**Figure III-5 :** Evolution de la perte de masse de poulet en fonction du temps dans un séchoir solaire ( $Q_m=0.032\text{kg/s}$ ).

### III.3 Teneur en eau à base sèche $X_s$ en fonction du débit massique (1, 3 et 4 g/s) :

Les figures (III-6), (III-7) et (III-8) présentent la variation de la teneur en eau (teneur en eau à base sèche  $X_s$ ) en fonction du temps de séchage. Initialement, la teneur en eau était de 1,6 kg d'eau/kg. Ce processus de séchage s'est poursuivi jusqu'à ce que la teneur en eau atteigne sa valeur finale, située entre 0,19 et 0,27 kg d'eau/kg, après un maximum de 8 heures de séchage. Il est important de noter que la teneur en eau diminue de manière continue tout au long du processus de séchage, et elle décroît sans interruption avec le temps de séchage.

À mesure que le débit d'air de séchage augmente, le temps nécessaire pour atteindre une certaine teneur en eau à partir de la teneur en eau initiale diminue. Par exemple, à une température de 40 °C, le temps de séchage le plus long pour atteindre une teneur en eau de 0,19 kg d'eau/kg est de 8 heures avec un débit d'air initial de 0,001 kg/s. Ce temps de séchage diminue à 8 heures avec un débit d'air de 0,003 kg/s et à 7 heures avec un débit d'air de 0,004 kg/s.

Dans la figure (III-7) à une température de 50 °C, une teneur en eau de 0,19 kg d'eau/kg est atteinte avec un temps de séchage minimum de 5 heures 30 minutes avec un débit d'air de 0,003 kg/s, tandis qu'un temps de séchage de 7 heures 30 minutes est atteint avec un débit d'air de 0,001 et 0,004 kg/s.

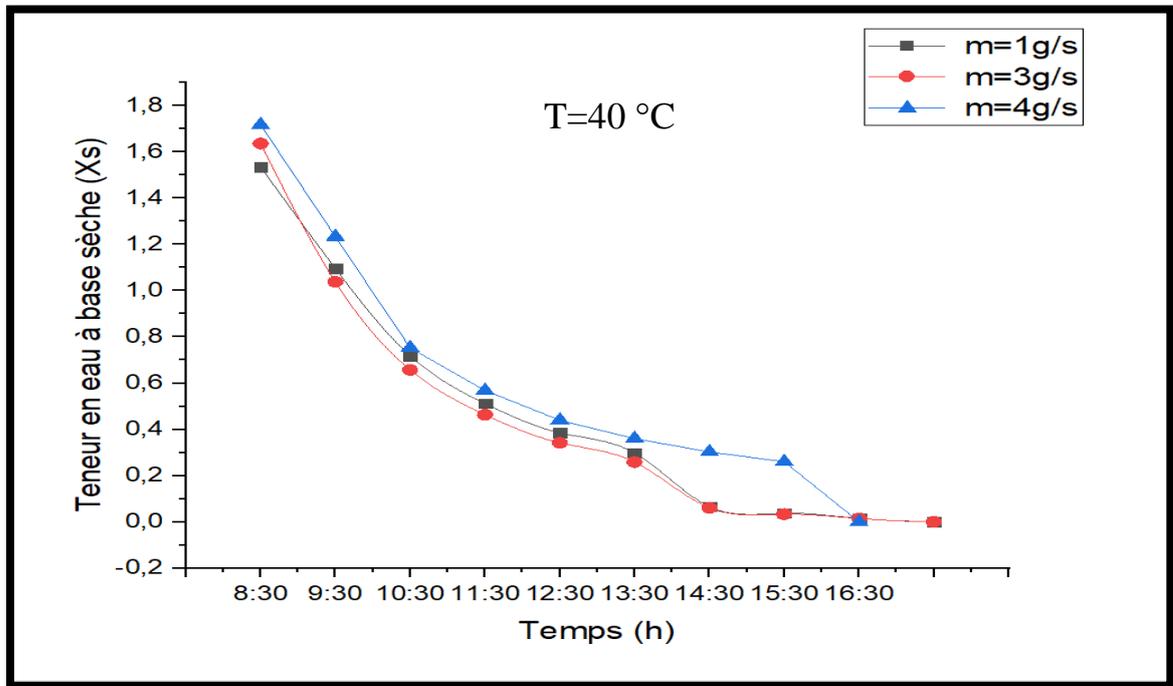


Figure III-6 : Effet du débit d'air sur la teneur en eau à base séché ( $X_s$ ) lors du séchage par étuve du produit en fonction du temps de séchage ( $T= 40^\circ\text{c}$ ).

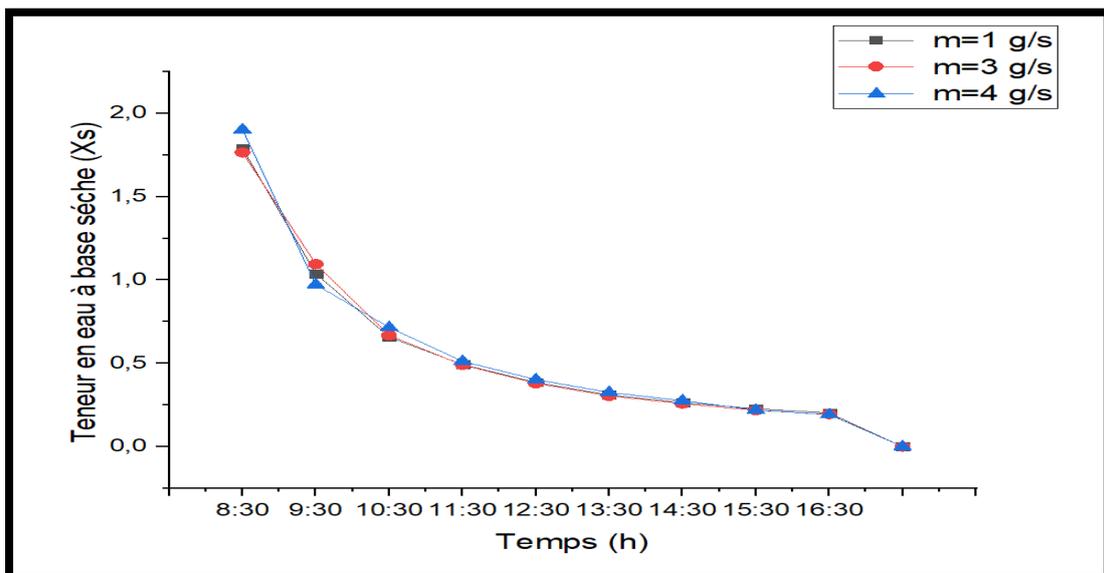
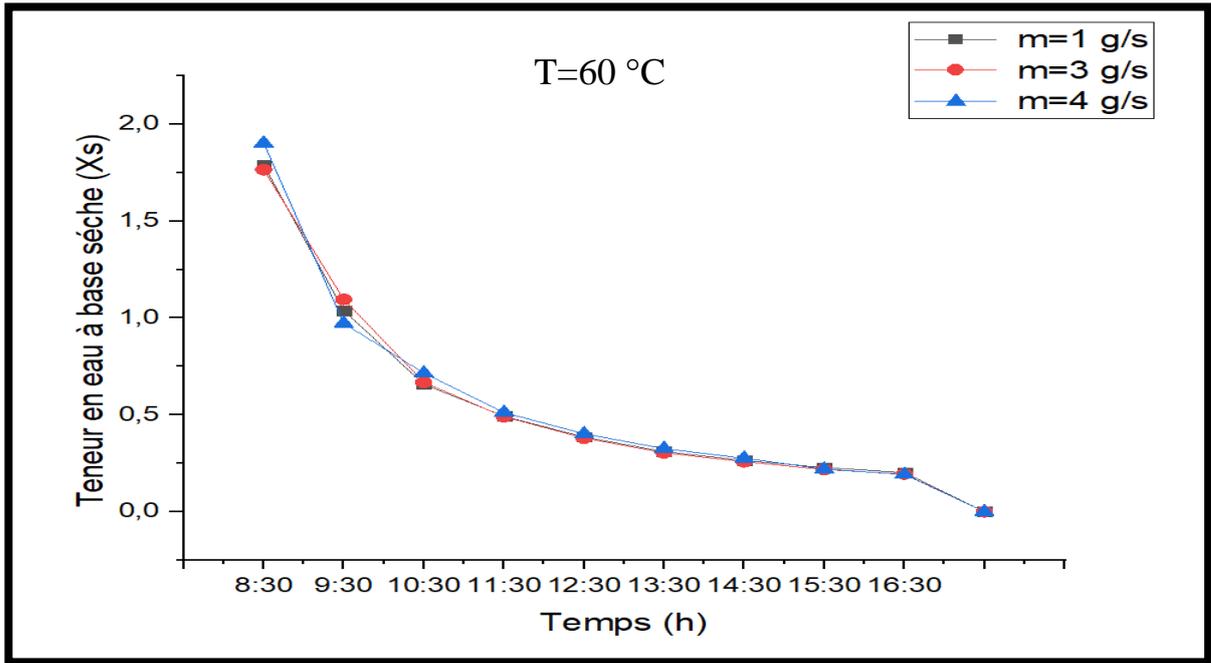
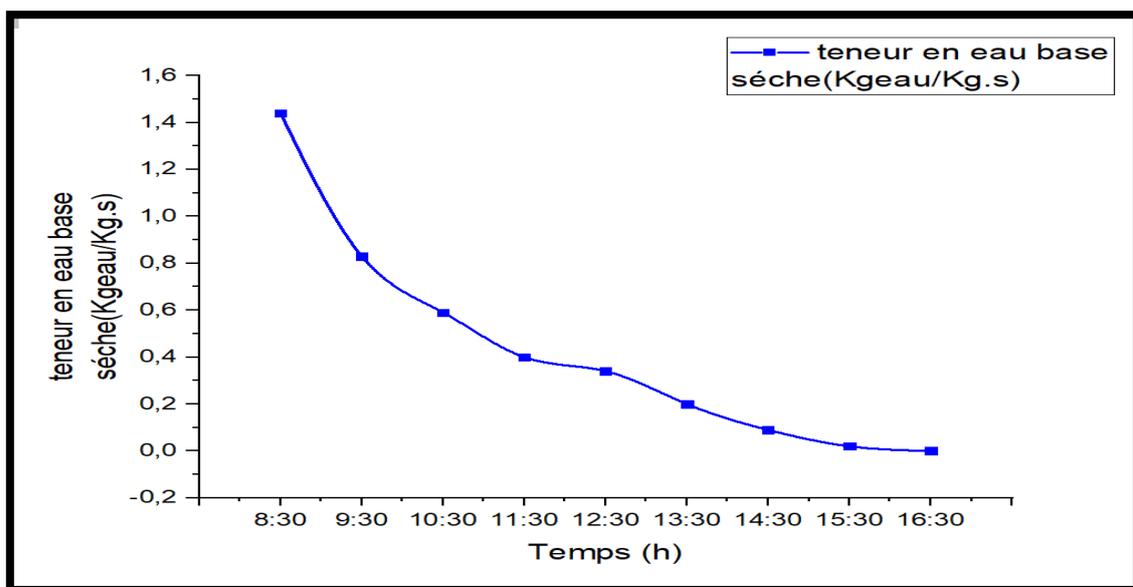


Figure III-7 : Effet du débit d'air sur la teneur en eau à base sèche ( $X_s$ ) en séchage par étuve du produit en fonction du temps de séchage ( $T=50^\circ\text{c}$ ).

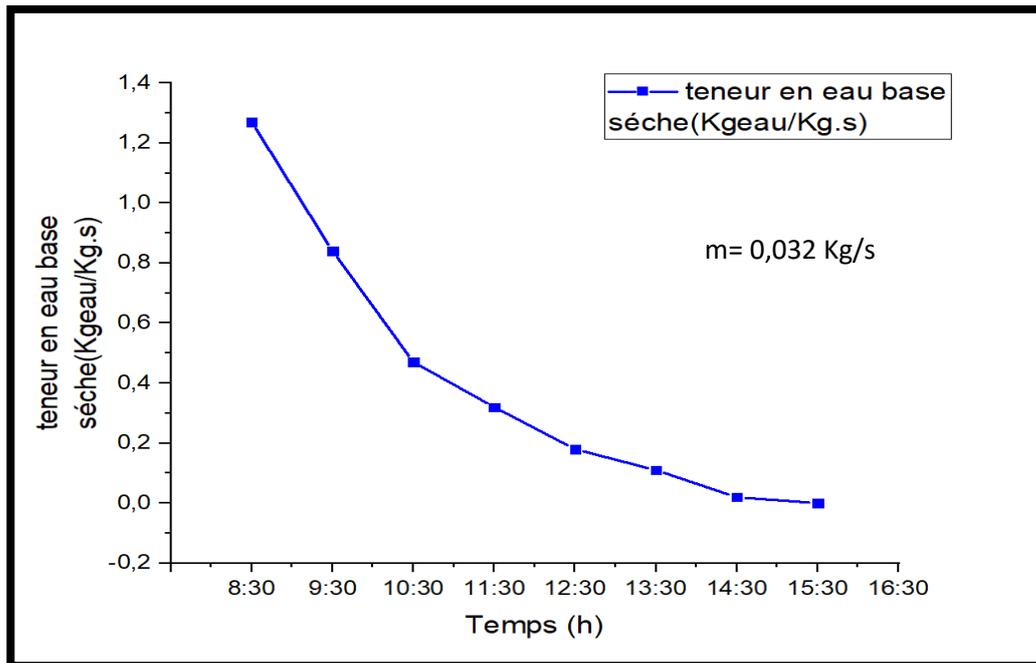


**Figure III-8** : Effet du débit d'air sur la teneur en eau à base sèche ( $X_s$ ) en séchage par étuve du produit en fonction du temps de séchage ( $T=60^\circ\text{C}$ ).

Les figures (III-9) et (III-10) représente l'évolution de la teneur en eau (à base sèche  $X_s$ ) en fonction du temps de séchage dans un séchage solaire, où l'on observe que le temps de réduction de la teneur en eau est de 8 h 00 min à fort débit d'air :



**Figure III-9:** variation de la teneur en eau à base sèche  $X_s$  en séchage solaire de en fonction du temps de séchage ( $Q_m= 0,032\text{kg/s}$ ).



**Figure III-10:** variation de la teneur en eau à base sèche  $X_s$  en séchage solaire de en fonction du temps de séchage ( $Q_m = 0,024 \text{ kg/s}$ ).

### III.4 Vitesse de séchage:

Les figures ci-dessous (III-11), (III-12) et (III-13) présentent la variation de la vitesse de séchage (à base sèche) en fonction du temps de séchage à trois températures différentes : 40, 50 et 60 °C. Pour chaque température, trois débits d'air différents ont été utilisés : 0,001, 0,003 et 0,004 kg/s.

Dans la figure (III-11), on observe une fluctuation de la vitesse de séchage pour les différents débits d'air au cours des 3 premières heures, et elle est plus élevée avec un débit d'air de 0,004 kg/s jusqu'à la fin de l'expérience.

Dans la figure (III-12), on constate que la vitesse de séchage est initialement élevée avec un débit d'air de 0,004 kg/s, mais au milieu de l'expérience (vers 5 heures), elle devient plus élevée avec un débit d'air de 0,001 kg/s.

Dans la figure (III-13), la vitesse de séchage est plus élevée avec un débit d'air de 0,004 kg/s. Après environ 5 heures, elle devient presque similaire pour les débits d'air de 0,001 et 0,003 kg/s.

Il est important de noter que la courbe de vitesse de séchage ne présente pas distinctement les phases d'augmentation et de stabilité habituellement observées. Elle part directement de sa valeur initiale et diminue jusqu'à sa disparition, sans présenter de périodes de montée et de stabilité.

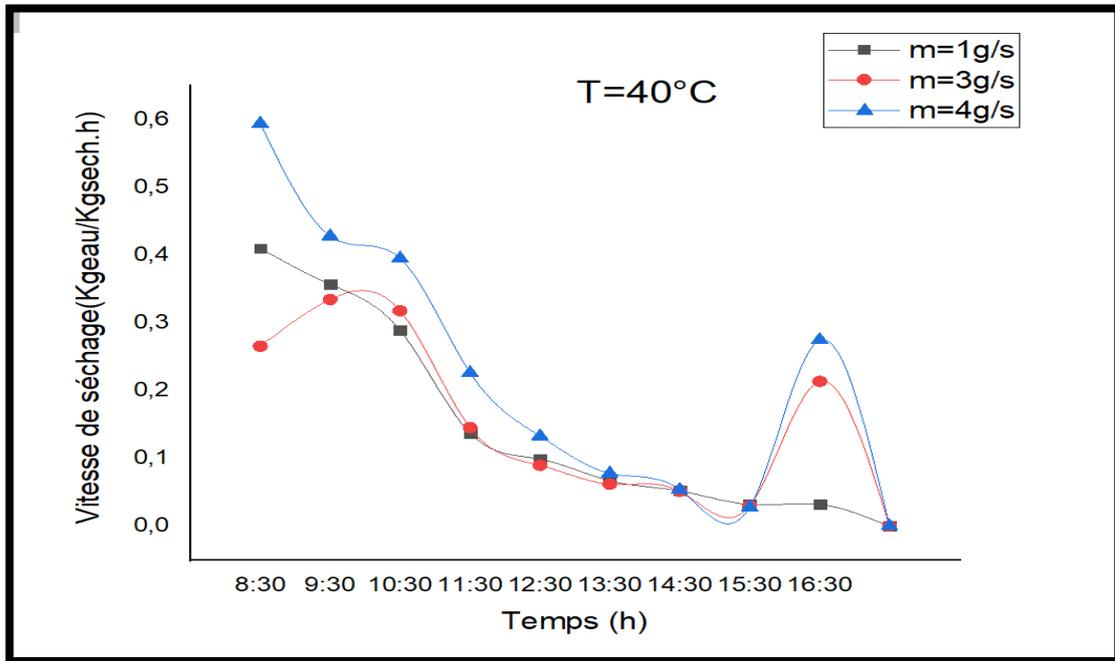


Figure III -11: variation de la vitesse de séchage par étuve pour différents débits ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ).

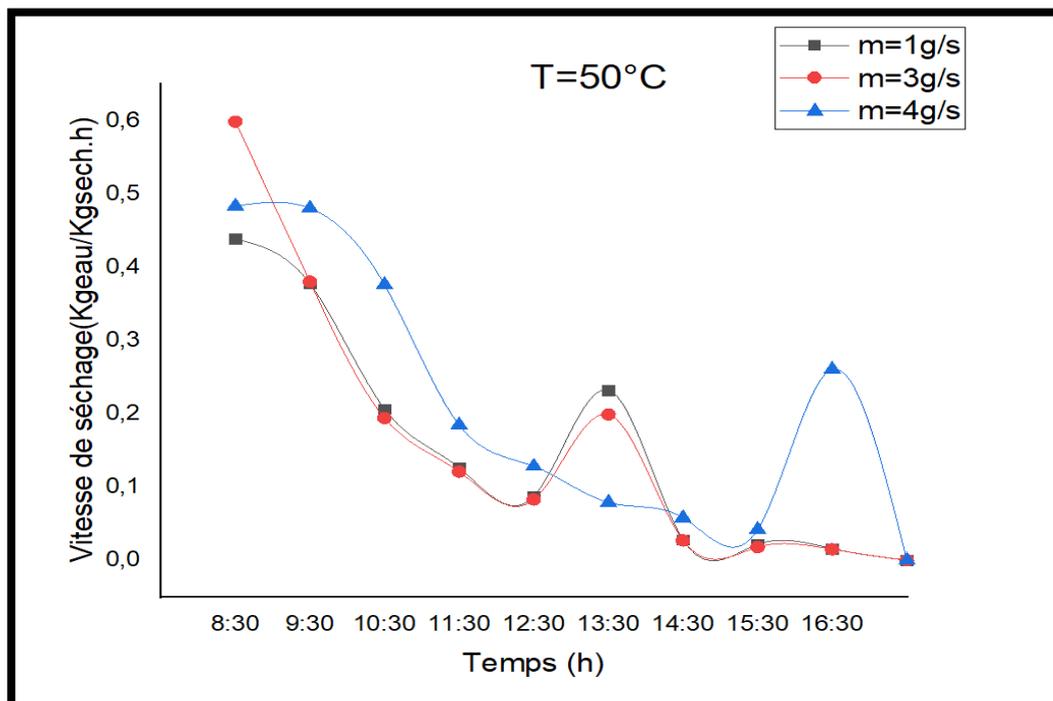


Figure III -12: variation de la vitesse de séchage par étuve pour différents débits d'air ( $T=50^{\circ}\text{C}$ ).

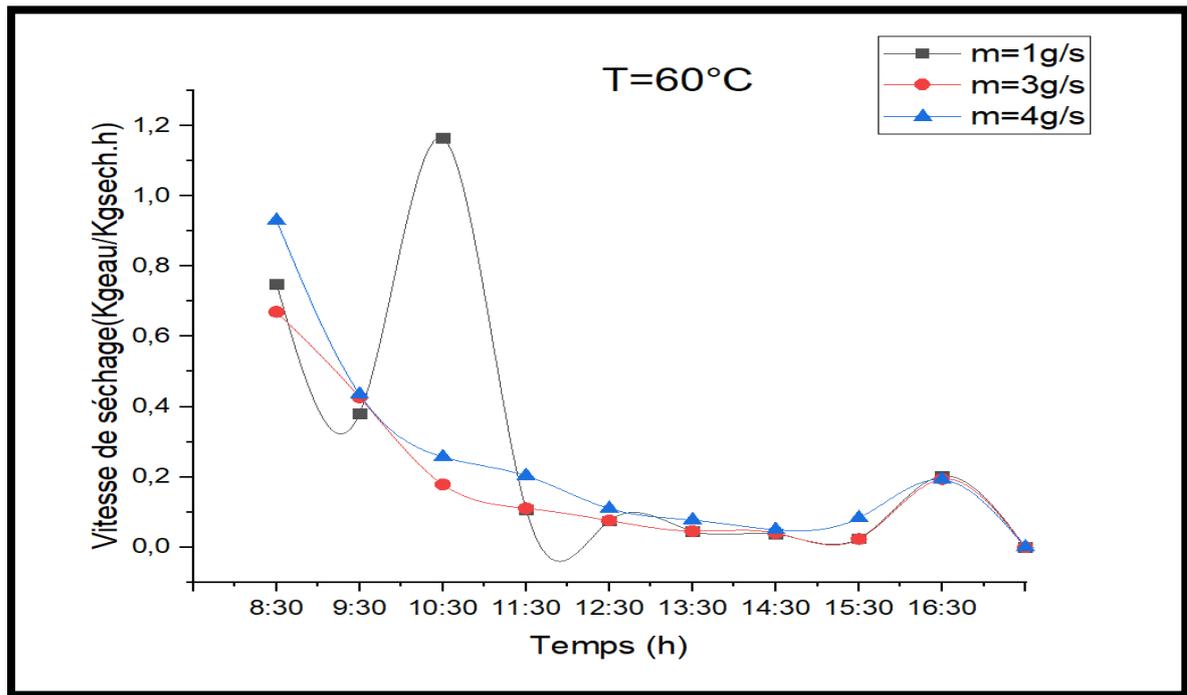


Figure III-13: variation de la vitesse de séchage par étuve pour différents débits d'air(T= 60°c ).

Les figures (III-14) et (III-15) représentent l'évolution de la vitesse de séchage dans un séchoir solaire sur un débit de 0,024 kg/s et 0,032 kg/s où l'on constate une fluctuation de la vitesse de séchage.

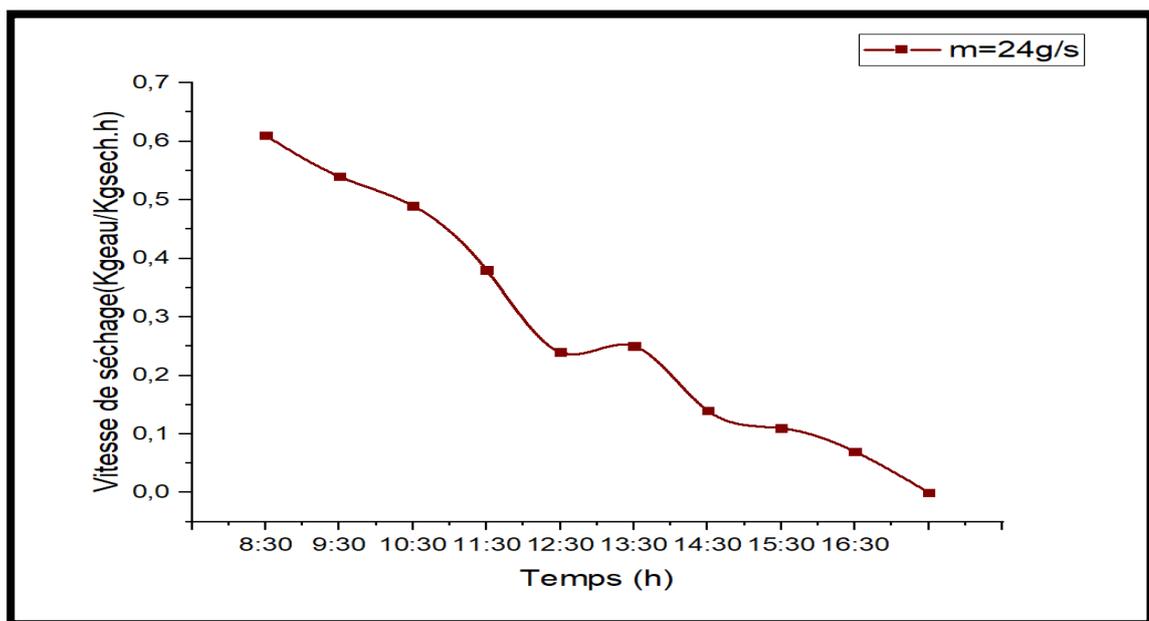
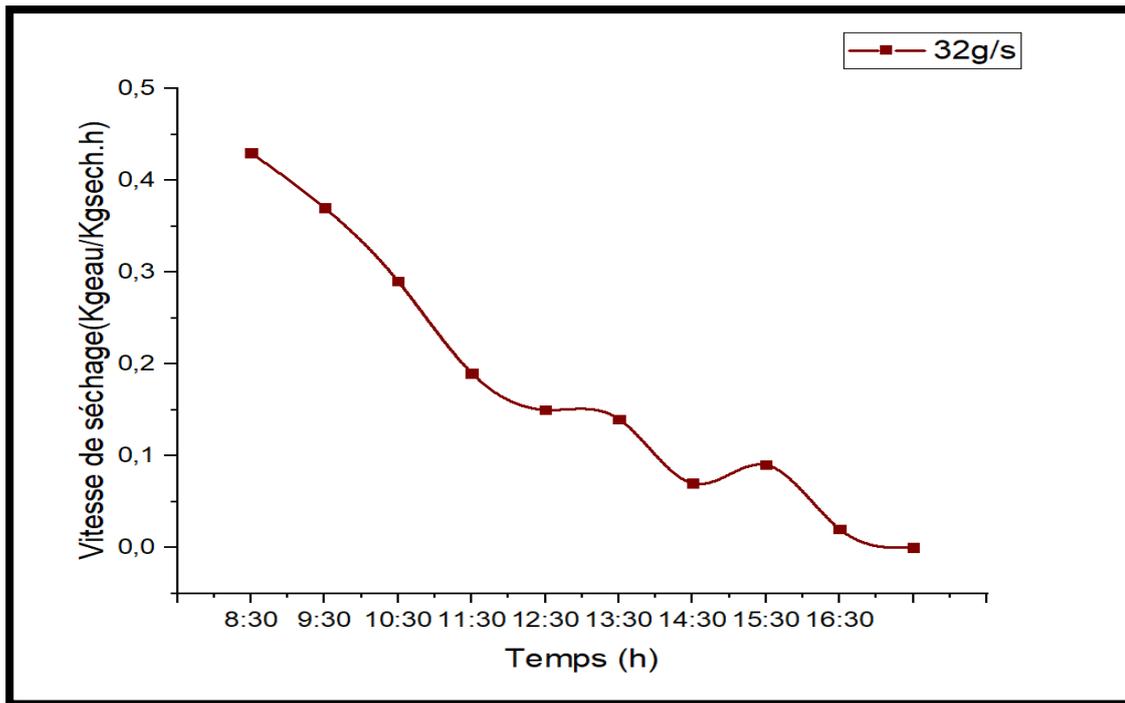


Figure III-14: variation de la vitesse de séchage solaire en fonction de temps(Qm=0,024kg/s).



**Figure III-15:** variation de la vitesse de séchage solaire en fonction de temps ( $Q_m=0,032\text{kg/s}$ ).

### III.5 Conclusion :

Dans l'ensemble, nos résultats montrent que la teneur en eau diminue de manière continue tout au long du processus de séchage, quel que soit le débit d'air utilisé. De plus, nous avons constaté que l'augmentation de la température et du débit d'air accélère le processus de séchage, réduisant ainsi le temps nécessaire pour atteindre une teneur en eau donnée.

Il convient de souligner que les courbes de vitesse de séchage ne présentent pas les phases distinctes d'augmentation et de stabilité généralement observées, mais plutôt une diminution continue de la vitesse jusqu'à sa disparition.

***CONCLUSION  
GENERALE***

## ***CONCLUSION GENERALE :***

---

### **CONCLUSION GENERALE :**

Le séchage est l'un des processus de conservation les plus utilisés dans l'industrie agroalimentaire pour prolonger la durée de stockage des produits. Ce travail de recherche visait à étudier les propriétés influençant le processus de séchage et à comparer les performances de l'étuve de séchage avec ceux du séchoir solaire. Nous avons examiné la sensibilité de la cinétique de séchage des tranches de poulet prétraitées par salage dans différentes conditions, telles que la température et le débit d'air, en utilisant un four ventilé Nabertherm et un séchoir solaire.

L'étude de la cinétique de séchage des tranches de poulet a révélé une particularité intéressante : l'absence totale des étapes distinctes de montée et de stabilité, observées couramment dans le séchage de la plupart des produits agricoles. Au lieu de cela, la courbe de séchage des tranches de poulet montrait une diminution continue de la teneur en eau, sans phases de plateau.

Nos résultats ont démontré que la température de l'air de séchage et le débit d'air ont un impact significatif sur la teneur en eau et la vitesse de séchage des tranches de poulet. L'augmentation de la température de l'air réduit le temps de séchage et accélère la vitesse de séchage. Bien que la vitesse d'air a également influencé ces paramètres, son impact était relativement faible par rapport à celui de la température. Cela est probablement dû au refroidissement du produit provoqué par l'augmentation de la vitesse de l'air de séchage.

Sur la base de nos résultats expérimentaux, les conditions optimales de séchage des tranches de poulet ont été déterminées, avec une température de 60°C et un débit d'air de 0,004 kg/s. De plus, nous avons constaté que le séchage en étuve était préférable au séchage solaire en raison de sa stabilité et de son indépendance vis-à-vis des conditions climatiques variables.

En conclusion, cette étude a fourni des informations précieuses sur le processus de séchage des tranches de poulet prétraitées par salage. Ces résultats contribuent à l'amélioration des processus de séchage dans l'industrie agroalimentaire. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour approfondir notre compréhension et explorer d'autres variables pertinentes dans le domaine du séchage des produits alimentaires.

*Références*  
*Bibliographiques*

### **Références Bibliographique**

- [1] Saf,A., & Reddam,S.Mémoire Technologies de séchage. Etude de cas : séchage de deux matrices végétales par étuve. Soutenu le : 20 juin 2018.
- [2] Boutalbi,A., & Mokrani,E. Mémoire Etude expérimentale du séchage des petits pois. Soutenu le : 27 juin 2022.
- [3] HELDMAN, D.R ., LUND,D.B.,& SABLIOV,C. Cleaning and Sanitation. In: Handbook of Food Engineering. CRC Press, 2006. p. 941-988.
- [4] LAHMARI, N., FAHLOUL, D.,& AZANI,I. Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra). Journal of Renewable Energies, 2012, 15.2.P: 285-295.
- [5] BONAZZI.C.,&BIMBENET,J.J.Séchage des produits alimentaires: Appareils et applications. Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire, 2008, 2.F3002.
- [6] Boussalia,A."Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux".Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Climatique, Alger (2010).
- [7] Bondil ,A., &Hrabovsky,J. Isolation thermique, tome ,edition Eyrolles Cité par N. Chalal.
- [8] SHERWOOD,T. K. The drying of solids—I. Industrial & Engineering Chemistry, 1929, 21.1: 12-16.
- [9] KRICHER, O.,& KROLL,K. Technique de séchage, 2 e édition de «Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstecnik. 1963.
- [10] LUIKOV,A.V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies. In: Advances in heat transfer. Elsevier, 1964. p. 123-184.
- [11] Boughali,S. Etude et optimisation du séchage solaire des produits agroalimpntaires dans les zones arides et désertiques. 2010. université Hadj lakhder BATNA 2.
- [12]BONAZZI,C., DUMOULIN,E.,& BIMBENET,J.J.Le séchage des produits alimentaires. Industrie Alimentaire Agricole, 2008, 125.03-04: 12-22.
- [13] BENAMMAR, R ., GOURI, K .Mémoire Séchage Solaire des Produits Agricoles. Soutenu le : 05 juin 2018.
- [14] TORRES, E. A. F.D. S., et al. Parameters determining the quality of charqui, an intermediate moisture meat product. Meat Science, 1994, 38.2: 229-234.

## ***Références Bibliographique***

---

[15] TOM, A. Contribution au séchage solaire des produits carnés: Modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux. 2015. PhD Thesis. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM; Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU.

[16] MUGA, F. C., WORKNEH, T. S., & MARENIA, M. O. Modelling the thin-layer drying of beef biltong processed using hot air drying. *Journal of Biosystems Engineering*, 2020, 45: 362-373.

[17] PETIT, T., et al. Physicochemical and microbiological characteristics of biltong, a traditional salted dried meat of South Africa. *Meat science*, 2014, 96.3: 1313-1317.

[18] <https://www.google.com>.

[19] SHIMOKOMAKI, M., et al. Brazilian charqui meats. *Traditional Foods: General and Consumer Aspects*, 2016, 291-294.

[20] RATSIMBA, A. I. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques du kitoza de boeuf. 2012. PhD Thesis. Université d'Antananarivo.

[21] Collignan, S., & Kaliloqab A. "Optimizing the Traditional Processing of Beef into Kilishi."

## ملخص :

في هذه الدراسة التجريبية، قمنا بمتابعة عملية التجفيف لمنتج غذائي، تحديداً لحم الدجاج الأبيض، باستخدام فرن تجفيف في مختبر جامعة بسكرة. كان هدفنا الرئيسي هو تحليل تأثير عاملين، وهما تدفق الهواء ودرجة الحرارة، على سرعة التجفيف. قمنا بتغيير شروط التجفيف حتى درجة حرارة 60 درجة مئوية وتدفق هواء بلغ 0.004 كج/ثانية.

أظهرت النتائج أن سرعة التجفيف تتأثر مباشرة بتغير تدفق الهواء ودرجة الحرارة. لعبت هذه العوامل دوراً حاسماً في سرعة إزالة الماء من المنتج أثناء عملية التجفيف.

تحليل المنحنيات بين أن التجفيف في الفرن الكهربائي كان أسرع من التجفيف في المجفف الشمسي كما اثبت استقراراً و تحكماً في ظروف التجفيف.

**الكلمات المفتاحية :** التجفيف، مجفف شمسي، سرعة التجفيف ، درجة حرارة.

## Résumé :

Dans cette étude expérimentale, nous avons examiné le processus de séchage d'un produit alimentaire, en l'occurrence de la viande blanche (poulet), à l'aide d'une étuve dans le laboratoire de l'Université de Biskra. Notre objectif principal était d'analyser l'influence de deux facteurs, à savoir le débit d'air et la température, sur la vitesse de séchage. Nous avons sélectionné des conditions finales de séchage avec une température de 60 °C et un débit d'air de 0,004 kg/sec.

Les résultats obtenus ont révélé que la cinétique de séchage était directement influencée par la variation du débit d'air et de la température. Ces facteurs ont joué un rôle crucial dans la vitesse à laquelle l'eau était éliminée du produit pendant le processus de séchage.

L'analyse des courbes de séchage a montré que le temps de séchage dans l'étuve était plus court que celui dans le séchoir solaire. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour optimiser les conditions de séchage et améliorer l'efficacité de ce procédé dans l'industrie alimentaire. De plus, il était plus stable et indépendant vis-à-vis les conditions climatiques variables.

**Les mots clés :** séchage, séchoir solaire, vitesse de séchage, température.

**Abstract:**

Our experimental study aimed to investigate the drying behavior of a food product using an oven located in the laboratory of the University of Biskra. This study concerns the drying of a certain quantity of white meat (chicken), and we are interested in the influence of the factors (change of airflow and temperature) on the drying rate. The main objective of this work is to study the drying behavior through the influence of some previously mentioned factors. Final conditions were chosen for drying rate, temperature of 60°C and air flow of 0.004 kg/sec. The results showed that the drying kinetics depend on the evolution of the air flow and the temperature.

**Keywords:** Drying, solar dryer, drying speed, temperature.