

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITE DE BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Génie chimique**

Paramétrage et modélisation du séchage de *Salvia officinalis* L.

Présenté par :

*Mme. Hannachi Fella.*

Encadré par :

*Pr. Boutoumi Hocine*

2024/2025

## *Dédicaces*

*À ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour*

*À ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments les plus difficiles*

*Et ceux à qui je dois tant*

*À mes chers parents pour leur amour, soutien et patience.*

*Je les remercie d'autant que je ne remercie personne j'espère qu'un jour mon bon dieu l'occasion de les honorer et rendre ce qu'ils méritent.*

*À mes sœurs Malak et Yasmine*

*À mes frères Mustapha et Fateh*

*À toute ma famille*

*Ceux que j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie*

*À vous mes amies Mounia, Meriem et Samah*

## **REMERCIEMENTS**

*Avant toute chose, je tiens à remercier Dieu le tout puissant, pour m'avoir  
données la force, la patience et la persévérance  
Tout au long de ce travail.*

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier tout d'abord et infiniment mon  
encadreur Mr Boutoumi Hocine  
Qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail, sa compétence et ses conseils  
pertinents ont été pour moi un solide repère et réconfort  
Dans tous les moments.*

*Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude à Dr Boutahraoui Issam, pour  
son aide précieuse, sa disponibilité et son accompagnement dans la  
réalisation de ce travail*

*Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont  
aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.*

## الملخص

يهدف هذا العمل إلى نمذجة عملية تجفيف أوراق الميرمية *Salvia officinalis* L. بالهواء الساخن باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (RNA).

تم إجراء دراسة تجريبية لتحليل حركية التجفيف من خلال تتبع تطور المحتوى المائي المخفض ( $X^*$ ) وسرعة التجفيف (DR) تحت ظروف تشغيل مختلفة (درجات حرارة 40، 50، 60 °C وسرعات هواء 0.5، 1، 2 م/ثا).

استخدمت البيانات المحصلة لتدريب نموذج RNA باستخدام برنامج MATLAB، حيث أظهر النموذج دقة عالية مع معامل ارتباط  $R = 0.9995$  ومعامل خطأ  $MSE = 0.00009233$ ، مما يؤكد فعاليته في التنبؤ بسلوك التجفيف وتحسين شروطه مع الحفاظ على جودة النبات

الكلمات المفتاحية : التجفيف الحراري، النمذجة، الميرمية، الشبكات العصبية الاصطناعية، حركية التجفيف، محتوى الماء.

## Résumé

Ce travail vise à modéliser le séchage des feuilles de *Salvia officinalis* L. à l'air chaud à l'aide des réseaux de neurones artificiels (RNA).

Une étude expérimentale a été menée pour analyser la cinétique de séchage, en suivant l'évolution de la teneur en humidité réduite ( $X^*$ ) et du taux de séchage (DR) sous différentes conditions (températures de 40, 50, 60 °C et vitesses d'air de 0.5, 1, 2 m/s).

Les données obtenues ont permis d'entraîner un modèle RNA sous MATLAB. Le réseau optimisé a montré une précision élevée avec un coefficient de corrélation  $R = 0.9995$  et  $MSE = 0.00009233$ , confirmant son efficacité pour prédire le comportement du séchage et optimiser les paramètres tout en préservant la qualité du produit.

Mots clés : Séchage convectif, Modélisation, *Salvia officinalis*, Réseau de Neurones Artificiels, cinétique de séchage, humidité réduite.

**Abstract**

This study aims to model the hot air-drying process of *Salvia officinalis* L. leaves using Artificial Neural Networks (ANN).

An experimental investigation was conducted to analyze the drying kinetics, monitoring the evolution of the reduced moisture content ( $X^*$ ) and drying rate (DR) under different conditions (temperatures: 40, 50, 60°C; air velocities: 0.5, 1, 2 m/s).

The collected data were used to train an ANN model in MATLAB. The optimized network demonstrated high accuracy, with a correlation coefficient  $R = 0.9995$  and  $MSE = 0.00009233$ , confirming its effectiveness in predicting drying behavior and optimizing conditions while preserving product quality.

**Keywords:** Convective drying, Modeling, *Salvia officinalis*, Artificial Neural Network, drying kinetics, reduced moisture content.

# Table des matières

*Introduction Générale* ..... 1

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

I.1 Introduction ..... 3

I.2 Terminologie de séchage ..... 3

    I.2.1 Séchage ..... 3

    I.2.2 Humidité..... 6

    I.2.3 Cinétique de séchage..... 10

    I.2.4 Les modèles mathématiques de cinétiques : ..... 14

Conclusion : ..... 16

## *Chapitre II : Modélisation par les réseaux de neurones artificiels*

II.1 Introduction à la modélisation : ..... 17

II.2 Historique des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) ..... 18

II.3 Analogies entre le neurone biologique et le neurone artificiel ..... 19

    3.1 Le neurone biologique ..... 19

    3.2 Le neurone artificiel ..... 19

II.4 Structure d'un réseau de neurones artificiels..... 20

    4.1 Architecture d'un réseau de neurones ..... 20

    4.2 Perceptron multicouche (PMC) ..... 21

*Couche d'entrée (Input Layer)* ..... 21

*Couches cachées (Hidden Layers)* ..... 21

*Couche de sortie (Output Layer)* ..... 21

II.5 Processus d'entraînement des réseaux de neurones .....	22
5.1 Le Machine Learning .....	22
5.2 Le Deep Learning .....	24
5.3 Choisir entre le Machine Learning et le Deep Learning .....	25
II.6 Algorithme d'apprentissage .....	25
6.1 Algorithme de propagation avant (forward propagation).....	25
6.2 Algorithme de rétropropagation .....	26
II.7 Fonction d'activation .....	26
II.8 Conception du réseau de neurone artificielle : .....	27
II.9 Analyse statistique .....	28
II.10 Révolution des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) dans l'Agroalimentaire .....	29
Conclusion.....	29

***Chapitre III: Généralités sur Salvia officinalis L.***

III.1 Introduction .....	30
III.2 Présentation de Salvia officinalis L.....	31
III.3 Description : .....	31
III.4 Noms vernaculaires .....	32
III.5 La classification botanique.....	32
III.6 La composition de Salvia Officinalis .....	33
6.1 La partie utilisée : .....	33
III.7 La sauge officinalis : de la pharmacie à la cuisine et aux soins beauté.....	33
7.1 Propriétés Pharmacologiques .....	33
7.2 Applications Thérapeutiques .....	33
7.3 Application en cuisine et cosmétique .....	34

III.8 Conservation de la Salvia Officinalis.....	34
8.1 Séchage à l'air libre .....	34
8.2 Séchage au four .....	34
8.3 Stockage et durée de conservation .....	35
8.4 Pourquoi sécher la sauge .....	35
Conclusion.....	35

## *Chapitre IV : Étude expérimentale*

IV.1 Introduction.....	36
IV.2 Expérience de séchage .....	36
IV.2.1 Mode opératoire .....	36
IV.2.2 Cinétique de séchage .....	38
Conclusion.....	42
IV.3 Modélisation de la cinétique de séchage par RNA .....	44
IV.3.1 Méthodologie .....	44
IV.3.2 Résultats de modélisation.....	49
Conclusion.....	53
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>54</b>

### ***Références bibliographiques***

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : transfert de chaleur et de masse entre l'air et la surface du produit. ....	5
<b>Figure I.2</b> : état de l'eau dans un matériau. ....	7
<b>Figure I.3</b> : isotherme d'adsorption-désorption .....	9
<b>Figure I.4</b> : courbe de vitesse de séchage .....	11
<b>Figure I.5</b> : courbe de séchage. ....	11

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : (a) Modèle d'un neurone biologique (b) Modèle d'un neurone artificiel .....	20
<b>Figure II.2</b> : Exemple d'architecture d'un PMC.....	21
<b>Figure II.3</b> : technique d'apprentissage. ....	22
<b>Figure II.4</b> : Illustration de l'apprentissage supervisé. ....	23
<b>Figure II.5</b> : Illustration de l'apprentissage non supervisé. ....	23
<b>Figure II.6</b> : apprentissage supervisé et non supervisé. ....	24
<b>Figure II.7</b> : fonctionnement de l'intelligence artificiel. ....	25
<b>Figure II.8</b> : Représentation de l'architecture d'un réseau de neurones typique. ....	28

## Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Aspect de la plante <i>Salvia officinalis</i> .....	31
<b>Figure III.2</b> : Planche botanique de <i>Salvia officinalis</i> .....	32

## Chapitre IV

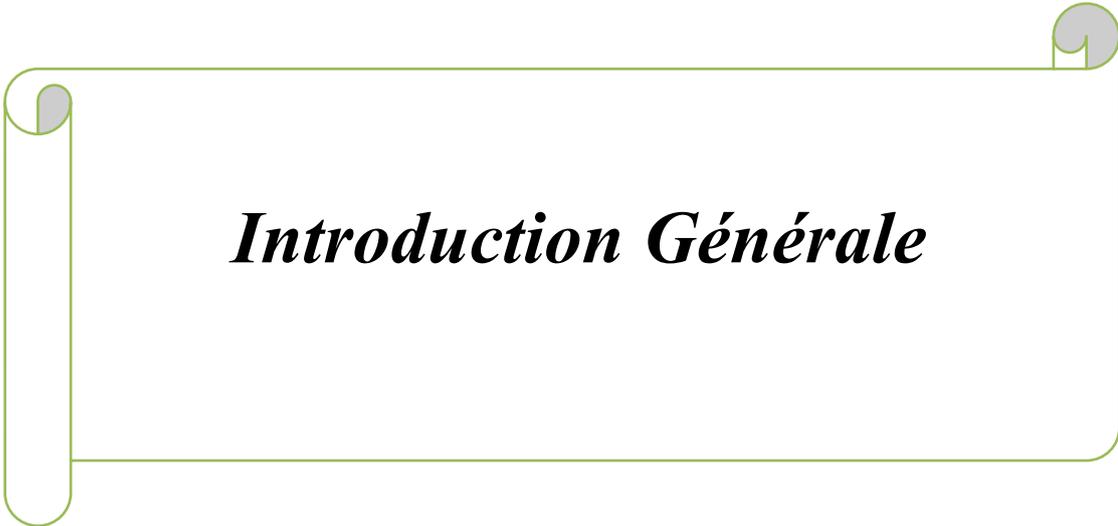
<b>Figure IV.1</b> : Photographie de la phase de blanchiment par la vapeur d'eau .....	37
<b>Figure IV.2</b> : photographies de l'équipement utilisé. ....	38
<b>Figure IV.3</b> : Évolution de la teneur en eau réduit en fonction du temps et de la température à une vitesse de 0.5 m/s .....	39

<b>Figure IV.4:</b> Évolution de la teneur en eau réduit en fonction du temps et de la température à une vitesse de 1 m/s .....	40
<b>Figure IV.5:</b> Évolution de la teneur en eau réduit en fonction du temps et de la température à une vitesse de 2 m/s. ....	40
<b>Figure IV.6 :</b> Évolution du taux de séchage au cours du temps à 0.5 m/s. ....	41
<b>Figure IV.7 :</b> Évolution du taux de séchage au cours du temps à 1 m/s.....	42
<b>Figure IV.8:</b> Évolution du taux de séchage au cours du temps à 2 m/s.....	42
<b>Figure IV.9:</b> Méthodologie de calcule par réseaux de neurones .....	44
<b>Figure IV.10:</b> Architecture optimale du réseau de neurones artificiels.....	47
<b>Figure IV.11 :</b> courbe de corrélation linéaire avec architecture de (3- 15-5-1).....	49
<b>Figure IV.12 :</b> Courbe de régression linéaire du $X^*$ prédite avec $X^*$ exp (all).....	50
<b>Figure IV.13:</b> comparaison entre $X^*$ expérimentales et $X^*$ prédites pour 0.5 m/s .....	51
<b>Figure IV.14:</b> comparaison entre $X^*$ expérimentales et $X^*$ prédites par RNA pour 1m/s ....	51
<b>Figure IV.15:</b> comparaison entre $X^*$ expérimentales et $X^*$ prédites par RNA pour 2 m/s...	52

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Quelques modèles mathématiques utilisés pour décrire les cinétiques de Séchage.....	15
<b>Tableau II.1 :</b> comparaison de deux modèles de réseau neuronale .....	20
<b>Tableau II.2 :</b> différentes fonctions d'activation .....	27
<b>Tableau III.1:</b> Classification botanique de la sauge .....	32
<b>Tableau IV.1:</b> Dimensions de la matrice. ....	46
<b>Tableau IV.2 :</b> Les différents éléments structurels du réseau utilisé dans la modélisation .....	48
<b>Tableau IV.3:</b> analyse statistique du modèle optimisé. ....	50



A decorative graphic of a scroll with a light green border and grey circular accents at the corners. The text is centered within the scroll.

# ***Introduction Générale***

Depuis les débuts de l'humanité, les plantes ont joué un rôle fondamental dans la vie de l'homme : elles ont servi à se nourrir, se soigner, se vêtir, se chauffer, et même à se parfumer. Parmi elles, les plantes médicinales et aromatiques occupent une place privilégiée en raison de leurs multiples vertus thérapeutiques et de leur large utilisation dans les domaines de l'agroalimentaire, de la cosmétique, de la parfumerie et de la pharmacie. [1-2]

Cependant, la disponibilité de ces plantes n'est pas constante tout au long de l'année, ce qui impose la nécessité de méthodes de conservation efficaces. Le séchage représente l'un des procédés les plus anciens et les plus utilisés à cet effet. Il permet de réduire l'activité de l'eau dans le produit, prolongeant ainsi sa durée de conservation, tout en limitant les dégradations enzymatiques, microbiologiques et chimiques. Toutefois, ce processus peut également entraîner des pertes de qualité, notamment en termes de texture, de couleur ou de teneur en composés bioactifs.[3]

D'un point de vue scientifique, le séchage est un procédé complexe mettant en jeu des transferts de chaleur et de masse. D'un point de vue industriel, il vise à assurer la stabilité, la qualité et la transportabilité des produits finis. Cependant, ce processus peut altérer certains composés sensibles, tels que les huiles essentielles, les flavonoïdes ou encore la couleur des plantes. D'où la nécessité d'optimiser les conditions opératoires afin de garantir un bon équilibre entre efficacité de séchage et préservation des propriétés organoleptiques et thérapeutiques des plantes.[4]

Dans ce contexte, les récentes avancées dans le domaine de l'intelligence artificielle, notamment les réseaux de neurones artificiels (RNA), offrent de nouvelles perspectives pour la modélisation et l'optimisation du séchage. Ces modèles prédictifs, capables d'apprendre à partir de données expérimentales, permettent de simuler avec précision le comportement de systèmes non linéaires et d'identifier les paramètres influents du processus.[5]

Le présent travail s'intéresse au séchage des feuilles de *Salvia officinalis* L. une plante médicinale aux propriétés reconnues dans le but d'en modéliser le comportement à l'aide des RNA. L'objectif est de déterminer les conditions opératoires optimales permettant de préserver au mieux les composés actifs de la plante tout en réduisant le temps de séchage et les pertes de qualité.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

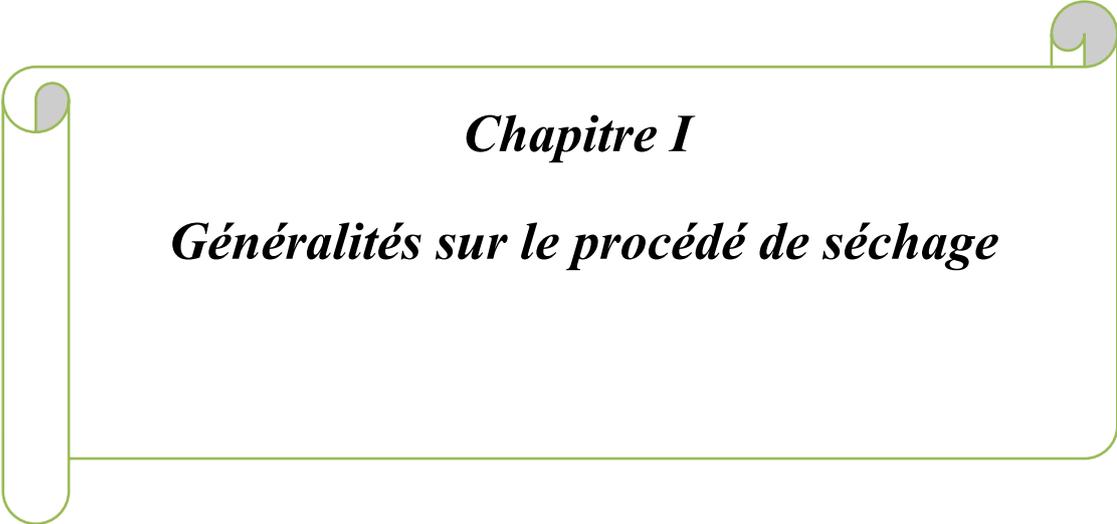
Chapitre I : Présentation générale du procédé de séchage, de ses mécanismes fondamentaux et de son impact sur la qualité des produits végétaux.

Chapitre II : Introduction théorique aux réseaux de neurones artificiels et à leur application dans la modélisation des procédés physiques.

Chapitre III : Étude botanique et chimique de *Salvia officinalis* L., ainsi que ses utilisations médicinales et ses méthodes de conservation.

Chapitre IV : Étude expérimentale du séchage de la sauge officinale, suivie de la modélisation de la cinétique de séchage à l'aide des RNA et de l'analyse des performances du modèle développé.





***Chapitre I***

***Généralités sur le procédé de séchage***

## **I.1 Introduction :**

Le séchage est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus utilisées généralement pour la conservation des plantes médicinales car il abaisse l'activité de l'eau, prolonge la durée de conservation, ralentissant la croissance microbienne, l'activité enzymatique, et la réaction chimique. L'utilisation de diverses méthodes de séchage est pour une meilleure conservation de ces paramètres [6].

## **I.2 Terminologie de séchage**

### **I.2.1 Séchage**

#### **I.2.1.1 Définition**

Il est défini comme séparation thermique visant à éliminer tout ou une partie d'un liquide imprégnant (eau dans la plupart des cas) un corps dit « humide » par vaporisation de ce solvant. Le produit final est un solide, qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle [7]

Le matériau à traiter est supposé fait de deux constituants :

- La matière sèche : c'est la partie du produit à conserver, soit parce qu'elle a de la valeur, soit pour la traiter séparément du liquide.
- La matière humide : elle se vaporise et quitte le produit sous forme de vapeur [8]

#### **I.2.1.2 Objectifs du séchage**

Le séchage est largement utilisé dans l'industrie alimentaire et chimique. Il se pratique dans plusieurs cas [9]:

- ❖ Le liquide résiduel est incompatible avec l'utilisation ultérieure du produit pour des raisons chimiques ou physiques.
- ❖ Il permet de réduire l'activité microbienne et enzymatique, empêchant ainsi la dégradation.
- ❖ Il permet également de préserver les composés bioactifs (huiles essentielles, flavonoïdes... etc.)
- ❖ Le produit humide se conserve mal, qu'il subisse une dégradation chimique ou aspect physique soit modifier.

- ❖ Le coût du transport est plus élevé en présence de liquide résiduel, même si ce dernier ne gêne pas l'application
- ❖ Le séchage permet outre l'élimination du liquide, la création de modifications de la structure interne du solide soit par exemple l'apparition d'une structure poreuse.

Cependant, le séchage peut aussi altérer certains paramètres de qualité, comme la couleur, la texture et la teneur en principes actifs.

### **I.2.1.3 Types du séchage**

En général, on distingue plusieurs types de séchages [10]:

- *Séchage mécanique* : C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation, compression, décantation et filtration).
- *Séchage chimique* : C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants pour extraire l'eau.
- *Séchage thermique* : Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une activation de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur.

### **I.2.1.4 Principes physiques du séchage**

Pour évaporer l'eau d'un produit, deux mécanismes peuvent être mise en œuvre : l'ébullition et l'entraînement.

#### **4.1 Séchage par ébullition :**

Le séchage par ébullition consiste à transmettre au produit amené à sa température d'ébullition un flux thermique au travers une surface d'échange de chaleur latente. L'évaporation de l'eau est directement proportionnelle à l'apport d'énergie (chaleur latente de vaporisation). En pratique cet apport est effectué par conduction au travers de La surface d'échange au contact du produit par de la vapeur dont la température est comprise entre 130 et 150°C.

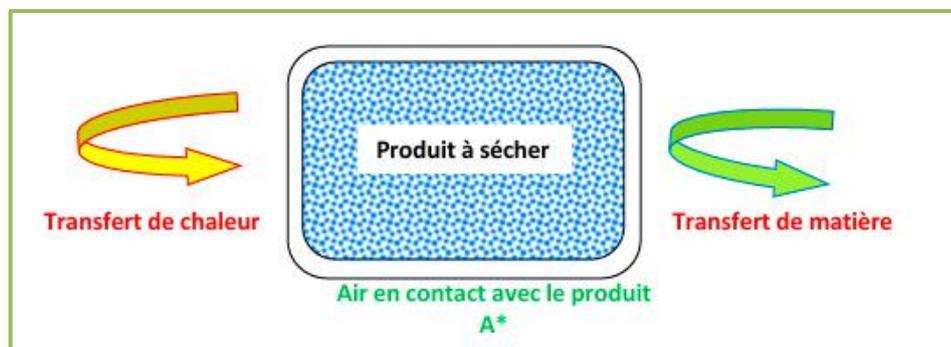
Selon la loi de Fourier, le transfert de chaleur s'effectue de façon proportionnelle à la différence de température entre le fluide caloporteur et le liquide en ébullition à la pression considérée.

**4.2 Séchage par entraînement :** Il existe plusieurs méthodes pour la déshydratation des produits agricoles. Toutefois le séchage par convection, appelé aussi par entraînement, demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée [11]

Le séchage par entraînement consiste à placer un corps humide dans un courant d'air (ou autre gaz) suffisamment chaud et sec. Dans ces conditions, il s'établit spontanément entre le corps et le gaz un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

-Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit, sous l'effet de la température.

-Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de la pression partielle d'eau entre l'air et la surface du produit.



*Figure I.1 : transfert de chaleur et de masse entre l'air et la surface du produit.*

### 1.2.1.5 Différentes méthodes de séchage

#### 5.1 Séchage naturel

Ce procédé est l'un des plus anciens et utilise des sources naturelles comme l'air et le soleil [11].

*A. Séchage à l'air libre :* Les plantes sont disposées sur des surfaces bien ventilées, à l'ombre ou sous un abri.

*B. Séchage solaire :* Utilisation d'un séchoir solaire passif (indirect) ou actif (direct) pour accélérer le séchage.

#### 5.2 Séchage conventionnel ou classique :

Ces méthodes utilisent une source de chaleur contrôlée pour accélérer l'élimination de l'eau.

*A. Séchage à l'air chaud (convectif) :* Utilisation d'un four ou d'un séchoir à flux d'air chaud (30-70°C selon la plante).

*B. Séchage sous vide* : Le séchage se fait dans une chambre sous pression réduite, diminuant ainsi le point d'ébullition de l'eau.

*C. Lyophilisation* (séchage par congélation) : Le produit est congelé à -50°C à -80°C, puis l'eau est éliminée par sublimation sous vide.

### **5.3 Techniques modernes de séchage**

*A. Séchage par micro-ondes* : Application de micro-ondes pour chauffer rapidement l'eau contenue dans la plante.

*B. Séchage infrarouge* : Utilisation de rayons infrarouges pour transférer la chaleur aux molécules d'eau.

### **I.2.2 Humidité**

#### **I.2.2.1 Définition**

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage,[12].

Elle est caractérisée sur un plan quantitatif global par la teneur en eau (X), Cette quantification ne permet cependant pas d'évaluer les différentes formes que peut prendre l'eau dans un solide. Dans cet ordre d'idée, l'activité de l'eau affine un peu la description, [13].

#### **I.2.2.2 Notions d'humidité dans le cadre de séchage**

##### **2.2.1 La teneur en humidité X (teneur en eau)**

La teneur en eau X est définie comme le rapport entre la masse d'eau et la masse de solide sec à laquelle elle est associée, elle permet de suivre l'évolution du séchage d'un produit, [12] :

$$\text{Sur base sèche : } X = \frac{me}{ms} = \frac{(mh-ms)}{ms} \quad (\text{I.1})$$

Avec X : la teneur en eau (%);                      me : la masse d'eau (g);  
ms : la masse sèche (g);                              mh : la masse humide (g).

##### **2.2.2 Taux d'humidité (titre en eau)**

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre. Elle permet également de caractériser les performances des sècheurs, [12].

Il est exprimé en pourcentage par :

$$\text{Sur base humide : } H = \frac{me}{mt} * 100 = \frac{me}{me+ms} * 100 \quad (I.2)$$

Où : H : taux d'humidité (%) ; me : masse d'eau(g)  
 mt : masse totale du produit(g) ; ms : masse sec(g)

On passe de la teneur en humidité au taux d'humidité est donnée par la relation suivante :

$$H = \frac{X}{1+X} \quad (I.3) \quad X = \frac{H}{1-H} \quad (I.4)$$

### 2.2.3 Taux d'humidité à l'équilibre

Le taux d'humidité à l'équilibre désigne l'humidité d'un produit en équilibre avec la vapeur contenue par l'agent de séchage. C'est le taux minimum d'humidité auquel un matériau peut théoriquement être séché à des conditions données, [14].

### 2.2.4 L'eau dans un matériau

L'eau titrable dans un matériau existe sous trois états comme le rappellent Nadeau :

- *L'eau libre* elle se trouve dans les espaces libres existents à l'intérieur de la structure elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire et la quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu (La plus grande partie de l'eau contenue dans un matériau se présente sous l'état libre).
- *L'eau liée* elle est adsorbée sur la surface interne et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leur constituants.
- *La vapeur d'eau* elle occupe en mélange avec de l'air sec les espaces vides non saturés par l'eau liquide, [14].

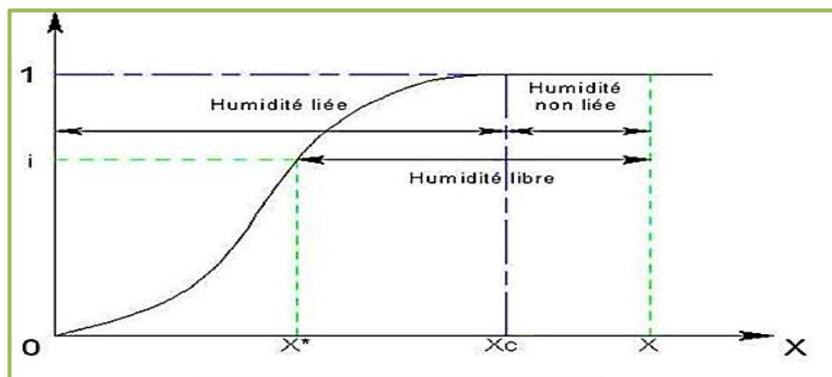


Figure I.2 : l'état de l'eau dans un matériau.

### 2.2.6 Hygroscopicité

C'est la capacité d'un corps à absorber la vapeur d'eau contenu dans l'air par adsorption ou absorption.

Un produit est dit hygroscopique lorsqu'il absorbe et retient facilement l'humidité de l'air.

Un produit est dit non hygroscopique lorsqu'il ne fixe pas naturellement les molécules d'eau présentes sous forme de vapeur dans l'air, [14].

### I.2.2.3 Isothermes de sorption

Une isotherme de sorption (adsorption ou désorption) représente à l'équilibre, et pour une température déterminée, la relation entre la teneur en eau du produit et l'humidité relative de l'atmosphère qui l'entoure. Elle est habituellement décrite par une courbe rapportant la quantité d'eau adsorbée en fonction de l'activité. Les courbes de sorption ont le plus souvent des allures de sigmoïdes particulièrement pour des produits biologiques. Pour une même valeur de l'activité de l'eau, elles peuvent différer selon qu'elles correspondent à une adsorption ou à une désorption exprimant alors un phénomène d'hystérésis, [13].

### 2.3.1 Activité en eau d'un produit

L'eau contenue dans le matériau n'est ni "pure" au sens qu'elle contient souvent des solutés, ni "libre" au sens qu'elle est plus au moins liée à la matière sèche (forces capillaires, liaisons hydrogènes, forces de Van der Waals, liaisons polaires, solvations des ions, ...).

Tous ces phénomènes créent une liaison entre l'eau et la matière sèche dite aussi "sorption". Cette liaison peut être évaluée par l'activité de l'eau, notée  $ae$  ou  $aw$ .

L'activité de l'eau est définie comme le rapport de la pression partielle de la vapeur en équilibre avec l'eau du produit,  $P_v$  est à la tension de vapeur saturante  $P_s$  pour une même température  $T$ , [13].

$$ae = \frac{P_v}{P_s} = \frac{Hr}{100} \quad (I.5)$$

Avec  $ae$ : l'activité de l'eau.  $P_v$ : la pression partielle de la vapeur en équilibre.  
 $P_s$ : la pression de vapeur saturante.  $Hr$ : l'humidité relative.

En cas :  $ae = 1$  :

- L'eau qui peut migrer librement est sous forme liquide.
- L'eau dans le produit est dite "eau libre".

- C'est cette eau qui est éliminé en premier pendant le séchage.

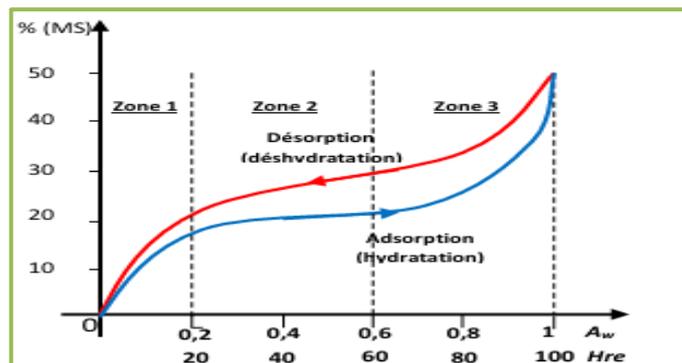
$ae < 1$  : ce qui correspond à une :

- Eau dite liée.
- Energie de liaison élevée comparée à celle de l'eau libre.
- Demande d'énergie plus élevée pour passer à l'état vapeur.

Au cours du séchage l'eau libre part en premier, puis l'eau est de plus en plus liée, Il ne reste à la fin qu'une eau résiduelle très liée, [13].

L'activité de l'eau  $ae$  dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température, la courbe qui représente la variation de la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau est appelé :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminé expérimentalement en portant d'un produit sec.
- Isotherme de désorption si elle a été déterminé expérimentalement en portant d'un produit saturé en eau, [15].



*Figure 1.3: isotherme d'adsorption-désorption*

### 2.3.2 Modélisation d'isotherme de sorption

Les isothermes de sorption sont généralement obtenus expérimentalement. Par ailleurs, il existe plusieurs modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques qui ont été proposés pour présenter les courbes d'équilibres. Toutefois, deux modèles sont plus particulièrement utilisés par les chercheurs, [16] :

- Le modèle de BET (Brunauer-Emmert-Teller) :

$$X = \frac{X_m \cdot C_{BET} \cdot aw}{(1 - aw) \cdot (1 + (C_{BET} - 1) \cdot aw)} \quad (I.6)$$

Où  $X_m$  et  $C_{BET}$  sont des paramètres ajustables ;

➤ Le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) :

$$X = \frac{X_m \cdot C_{GAB} \cdot k_{GAB} \cdot a_w}{(1 - k_{GAB} \cdot a_w) \cdot (1 + (C_{GAB} - 1) \cdot k_{GAB} \cdot a_w)} \quad (I.7)$$

Avec  $X_m$ ,  $C_{GAB}$  et  $K_{GAB}$  comme paramètres ajustables.

### I.2.3 Cinétique de séchage

La cinétique de séchage désigne l'évolution de la teneur en eau d'un produit en fonction du temps lorsqu'il est exposé à un agent de séchage, généralement de l'air chaud. Elle permet de caractériser la vitesse à laquelle l'humidité est extraite du produit et constitue un élément essentiel dans l'optimisation des procédés de séchage.

La teneur en eau, exprimée sur base sèche, est généralement utilisée pour suivre cette évolution. À partir de cette grandeur, on définit le taux de séchage comme la dérivée de la teneur en eau par rapport au temps, [16] :

$$DR = -\frac{dX}{dt} \quad (I.8)$$

Où : DR : taux de séchage (temps<sup>-1</sup>). X : teneur en eau (kg eau / kg matière sèche)

#### I.2.3.1 Teste de séchage

Simultanément en jeu une évaporation à la surface du solide et un flux interne de Liquide, par diffusion ou capillarité, de l'intérieur vers la surface. Le processus de séchage comporte donc deux étapes fondamentales, à savoir, [17] :

- L'échange thermique, c'est-à-dire la transmission de la chaleur pour l'évaporation du liquide ;
- Le transfert de masse ou le transfert de liquide dans le solide et sous forme vapeur à partir de la surface du solide.

La vitesse de séchage spécifique est définie comme le rapport entre la quantité d'humidité enlevée du produit à sécher par unité de temps et de surface de séchage :

$$v = -ms \frac{dX}{dt} = k(ps - pv) \quad (I.9)$$

Avec

X : Le taux d'humidité du produit (en kg eau/kg matière anhydre).

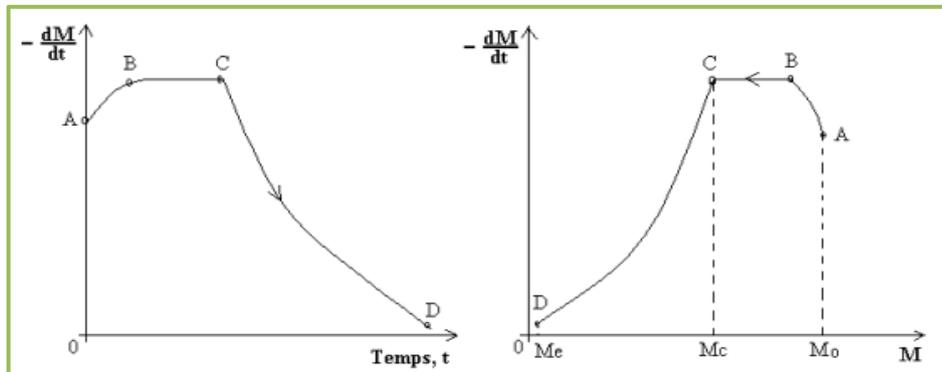
K : Le coefficient global de transfert de matière qui peut être déterminé expérimentalement ou évalué par relations faisant intervenir les critères de similitude.

ms : La masse de solide à sécher.

(ps - pv): La différence entre la pression des vapeurs saturées dans la couche d'air à la surface du produit humide et la pression partielle des vapeurs dans l'air en circulation.

Un processus de séchage peut être illustré par différents diagrammes :

- Diagramme taux d'humidité/temps de séchage (courbe de séchage).
- Diagramme débit de séchage/taux d'humidité (courbe de la vitesse de séchage).



**Figure 1.4 :** courbe de vitesse de séchage

Ces deux types de représentation, mettent en évidence l'existence de plusieurs phases, pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables, [12].

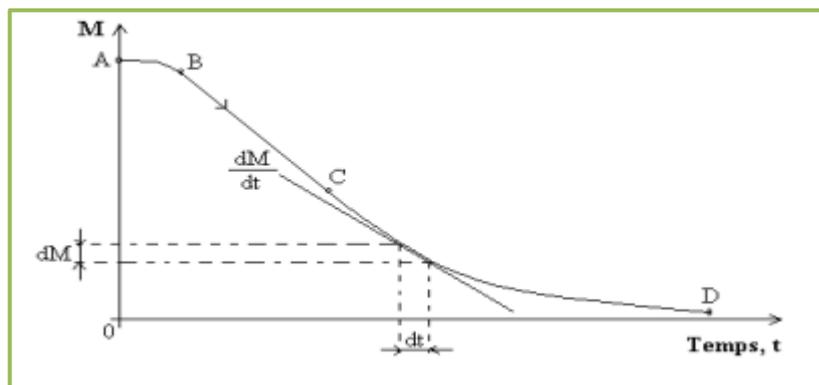
Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

AB : La phase transitoire de mise en température du produit à sécher.

BC : La phase à vitesse de séchage constante.

CD : La phase à vitesse de séchage décroissante.

C : Le point critique du séchage.



**Figure 1.5:** courbe de séchage.

La courbe de séchage typique présente deux phases principales : une période à taux de séchage constant, dominée par l'évaporation de l'eau libre en surface, suivie par une période à taux de séchage décroissant, où l'eau restante migre lentement depuis l'intérieur du produit vers la surface.

### I.2.3.2 Durée de séchage

Étant donné la forme de la courbe de séchage, le temps de séchage doit être déterminé séparément pour les deux phases de séchage.

La durée de séchage pendant la phase à vitesse constante (première période) peut être calculée, pour un sécheur fonctionnant en continu, en effectuant un bilan sur un élément de l'appareil,[18] :

$$t = \frac{m_s}{Sk_{ev}}(x_i - x_f) \quad (I.10)$$

Avec

$m_s$  : masse du produit à sécher ;  $S$  : surface soumise à séchage ;  $K$  : vitesse d'évaporation

### I.2.3.3 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique :

La cinétique de séchage est fortement influencée par plusieurs facteurs [19] :

**La température de l'air :** L'augmentation de la température de l'air entraîne une élévation de sa capacité à retenir l'humidité. Par conséquent, plus l'air est chaud, plus il est capable d'extraire rapidement l'eau présente dans le produit. Cela se traduit par une augmentation du taux de séchage et une réduction du temps nécessaire pour atteindre une certaine teneur en eau. Cependant, il est essentiel de contrôler cette température, car des valeurs trop élevées peuvent détériorer la qualité du produit sèche par la dégradation des composés thermosensibles (huiles essentielles, principes actifs...).

**La vitesse de l'air :** La vitesse de l'air joue un rôle dans le renouvellement de la couche limite autour du produit. Un air plus rapide évacue plus efficacement la vapeur d'eau dégagée, maintenant un gradient de concentration favorable au transfert de masse. Cela permet d'accélérer le séchage, bien que son impact soit généralement moins important que celui de la température. L'effet de la vitesse est surtout perceptible à des vitesses modérées à élevées.

**L'humidité relative de l'air :** un air sec, avec une faible humidité relative, peut absorber davantage d'eau du produit. Cela favorise un gradient de pression de vapeur plus élevé entre le produit et l'air ambiant, accélérant l'évaporation. A l'inverse, un air déjà humide ralentit le processus.

**L'épaisseur :** l'épaisseur du produit est un paramètre physique qui influence directement la distance que doit parcourir l'eau pour migrer vers la surface avant de s'évaporer. Plus le produit est épais, plus le transfert de masse interne est lent. Une réduction de l'épaisseur

permet donc un séchage plus rapide et plus uniforme, à condition de ne pas compromettre l'intégrité physique ou la valeur commerciale du produit.

#### **I.2.3.4 Importance de la cinétique de séchage :**

L'étude de cette cinétique est cruciale pour, [18] :

*Optimisation de processus de séchage* : comprendre la cinétique permet d'ajuster les paramètres (température, vitesse, durée) pour un séchage plus rapide et efficace.

*Réduction des coûts énergétiques* : en identifiant les conditions idéales, on peut minimiser la consommation d'énergie.

*Choix du modèle de séchage* : elle permet de sélectionner ou de développer un modèle mathématique adapté à la description du processus.

*Préservation de la qualité du produit* : une cinétique bien maîtrisée évite la dégradation des propriétés organoleptiques, pharmaceutiques (couleur, arômes, ...).

#### **I.2.3.5 Qualité des produits séchés**

Le séchage d'un produit biologique entraîne différentes modifications dont il faut tenir compte, [20] :

##### ***Modification biochimique:***

- ❖ Oxydations des matières grasses et des vitamines.
- ❖ Dénaturation des protéines.
- ❖ Réaction enzymatique au cas où les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable : oxydation des polyphénols qui entraîne par exemple un brunissement des produits séchés.

##### ***Pertes d'arôme:***

L'expérience montre cependant qu'au cours du séchage, la diffusivité de l'eau décroît moins vite que celles de arômes de sorte qu'il est possible de conserver ceux-ci. De plus, la rétention d'arômes est autant plus forte qu'au départ le produit est concentré d'où l'intérêt de l'enrichir en glucides avant de le sécher.

Dans la plupart des cas il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation.

### ***Pertes de la couleur du produit:***

L'étude de noircissement des feuilles de certaines plantes pendant le séchage a révélé que la couleur verte de ces feuilles est maintenue à condition que le séchage s'effectue à une température inférieure ou égale à 45°C.

### ***Modifications physiques et mécaniques des produits séchés:***

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

- ❖ Migration des solutés vers la surface conduisant à une accumulation des sucres et d'autres solutés au niveau de la surface du produit. Cette accumulation est pernicieuse à la qualité du produit qui doit être consommé réhydrater,
- ❖ Fusion et migration des matières grasses,
- ❖ Modifications de la forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui-même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permet d'obtenir un produit de même volume mais d'une autre structure poreuse

### **I.2.4 Les modèles mathématiques de cinétiques :**

La modélisation mathématique permet de décrire la cinétique de séchage à l'aide d'équations empiriques ou semi-empiriques. Ces modèles établissent une relation entre le taux d'humidité réduit  $X^*$  et le temps  $t$ , parfois en tenant compte des conditions de :

#### **Modèles semi-théoriques ou semi-empiriques**

Les modèles semi-théoriques peuvent être classés en fonction de leur dérivation comme suit, [21] :

- Loi de refroidissement de Newton : ce sont les modèles semi-théoriques dérivés par des analogues de la loi de Newton sur le refroidissement. :

$$\frac{dm}{dt} = -k(M - Me) \quad (I.11)$$

Où  $k$  : constante de séchage ( $s^{-1}$ )

- Deuxième loi de diffusion de Fick : Les modèles de ce groupe sont les modèles semi théoriques dérivés de la deuxième loi de diffusion de Fick. Cette dernière décrit l'origine des mouvements moléculaires par l'équation suivante:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \Delta(D \cdot \Delta x) = \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad (\text{I.12})$$

Avec:

D : est le coefficient de diffusion (m<sup>2</sup>/s) ; X : Teneur en eau du produit

Sur le tableau ci-dessous sont consignés les modèles couramment utilisés :

**Tableau I.1:** Quelques modèles mathématiques utilisés pour décrire les cinétiques de Séchage.

<i>Modèle</i>	<i>Équation du modèle</i>	<i>Référence</i>
<b>Newton</b>	$X^* = \exp(-kt)$	W. k. Lewis, 1921
<b>Henderson et Pabis</b>	$X^* = a \cdot \exp(-kt)$	Henderson et Pabis 1961
<b>Page</b>	$X^* = \exp(-kt^n)$	Page 1949
<b>Logarithmique</b>	$X^* = a \cdot \exp(-kt) + b$	Yaldiz et Erketin, 2004
<b>Midilli et all modified</b>	$X^* = \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et all. 2002
<b>Modified page</b>	$X^* = \exp(-kt)^n$	D. D. Overhults & al., 1973
<b>Two-term modele</b>	$X^* = a \cdot \exp(-k_1 t) + b \cdot \exp(-k_2 t)$	S. M. Henderson, 1974

Où X\* est un rapport sans unité qui exprime la proportion d'humidité restant par rapport à l'humidité initiale, il est donné par la formule suivante :

$$X^* = \frac{Xt - Xeq}{X0 - Xeq} \quad (\text{I.13})$$

Avec X\*: taux d'humidité réduit ; Xt : teneur en eau à l'instant t

X0 : teneur en eau initiale ; Xeq : teneur en eau à l'équilibre

Ce rapport a été simplifiée par l'équation (I.14) car Xeq est relativement négligeable comparativement à Xt et X0.

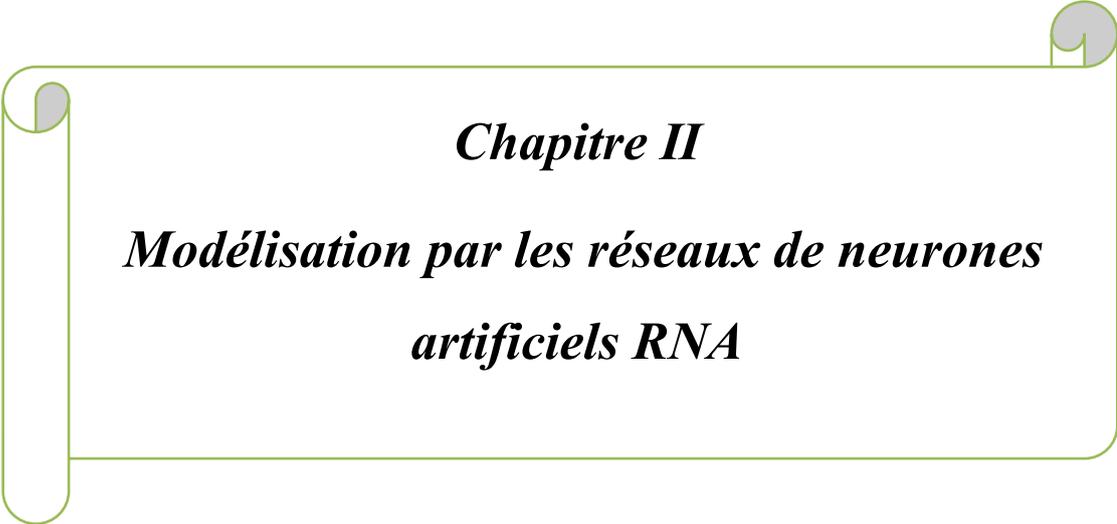
$$X^* = \frac{Xt}{X0} \quad (\text{I.14})$$

**Conclusion :**

A travers ce chapitre, nous avons mise en évidence l'importance de séchage dans la préservation des produits végétaux, en mettant en lumière l'importance des modèles mathématiques pour prédire le comportement du produit. Ces bases théoriques sont essentielles pour la modélisation du séchage des plantes médicinales et aromatiques.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons le modèle biologique, la modélisation par réseau de neurones artificiels RNA, une approche clé pour la modélisation de séchage.



A decorative scroll frame with a light green border and rounded corners. The frame is open on the left and right sides, with the top and bottom edges curving inward to form a scroll-like shape. The text is centered within this frame.

*Chapitre II*

*Modélisation par les réseaux de neurones  
artificiels RNA*

## **II.1 Introduction à la modélisation :**

Les réseaux de neurones sont des modèles mathématiques qui s'inspirent du fonctionnement du cerveau humain. Le développement de ces modèles a largement bénéficié des avancées dans la compréhension des mécanismes cérébraux. Grâce aux progrès réalisés aussi bien sur le plan théorique que le pratiques, ces modèles sont devenus des outils incontournables dans de nombreux domaines tels que l'industrie, l'agriculture, la finance ou encore les services. Néanmoins, ils continuent de susciter un fort intérêt chez les chercheurs, notamment dans le but d'améliorer leur efficacité et d'étendre leurs champs d'application, [22].

L'une des propriétés fondamentales des RNA, et leur capacité d'approximation globale parcimonieuse, ce qui les rend particulièrement utile pour la modélisation non linéaire, qu'elle soit statique ou dynamique. Bien que l'utilisation de fonction d'activation sigmoïdes ait été initialement inspirée de la biologie, cette approche a aujourd'hui évolué vers des choix plus adaptés aux exigences des systèmes traitement de données complexes, [23].

Ce chapitre vise à fournir une présentation générale des réseaux de neurones artificiels. Nous commencerons par définir quelques concepts clés liés à la modélisation neuronale, en expliquant les différents types de réseaux existants, ainsi que les étapes nécessaires à la construction et à l'entraînement d'un modèle de RNA. Enfin, nous accorderons une attention particulière à leur application dans le domaine de séchage des plantes médicinales et aromatiques, où ils se révèlent être des outils performants de séchage et la compréhension du comportement des produits végétaux soumise à différents traitements thermiques.

## **II.2 Historique des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)**

L'idée des réseaux de neurones artificiels (RNA) trouve ses origines dans la volonté de reproduire le fonctionnement du cerveau humain à l'aide de modèles mathématiques. Depuis les années 1940, cette approche a connu plusieurs étapes marquantes, entre périodes de fort développement et moments de stagnation.

### ***Les débuts (années 1940 – 1950)***

Le premier modèle formel de neurone artificiel a été proposé en 1943 par McCulloch et Pitts, qui ont introduit une unité de traitement binaire simulant le comportement d'un neurone biologique. En 1958, Frank Rosenblatt développe le Perceptron, considéré comme le premier RNA opérationnel. Il s'agit d'un réseau à une seule couche, capable d'apprendre à partir d'exemples. [24].

### ***Le déclin (années 1960 – 1970)***

En 1969, Marvin Minsky et Seymour Papert publient une critique du perceptron dans leur ouvrage *Perceptrons*, démontrant ses limites théoriques, notamment son incapacité à résoudre des problèmes comme la fonction XOR. Cela provoque une perte d'intérêt pour les RNA pendant près de deux décennies. [25].

### ***La renaissance (années 1980)***

Un tournant majeur survient en 1986 avec les travaux de Rumelhart, Hinton et Williams, qui remettent en lumière l'algorithme de la rétropropagation de l'erreur (backpropagation). Cet algorithme permet d'entraîner efficacement des réseaux multicouches, capables d'approcher des fonctions complexes non linéaires. [26]

### ***Vers le Deep Learning (années 1990 – 2000)***

Durant les années 1990, les RNA sont intégrés dans plusieurs secteurs industriels, bien que leur performance soit encore limitée par les ressources informatiques disponibles. Dans les années 2000, les recherches se poursuivent, notamment sur les réseaux profonds (deep neural networks), sans pour autant percer à grande échelle à cette époque, [26].

### ***L'explosion du Deep Learning (depuis 2010)***

L'essor du big data, l'accès à des unités de calcul puissantes (GPU), et le perfectionnement des algorithmes ont permis aux réseaux de neurones profonds de s'imposer dans de nombreux domaines. Des architectures comme les réseaux convolutifs (CNN), les réseaux récurrents (RNN) et leurs variantes comme les LSTM ont vu le jour,

rendant possible des applications dans la vision par ordinateur, la traduction automatique, la reconnaissance vocale, le diagnostic médical ou encore les véhicules autonomes, [26].

### II.3 Analogies entre le neurone biologique et le neurone artificiel.

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) s'inspirent directement du fonctionnement du cerveau humain, en particulier de la cellule nerveuse appelée neurone biologique. Bien que le modèle artificiel soit largement simplifié, il existe des analogies intéressantes entre les deux types de neurones.

**3.1 Le neurone biologique :** Un neurone biologique est une cellule spécialisée dans la transmission des signaux nerveux. Il est composé de plusieurs parties [27] :

*Dendrites :* reçoivent les signaux provenant d'autres neurones.

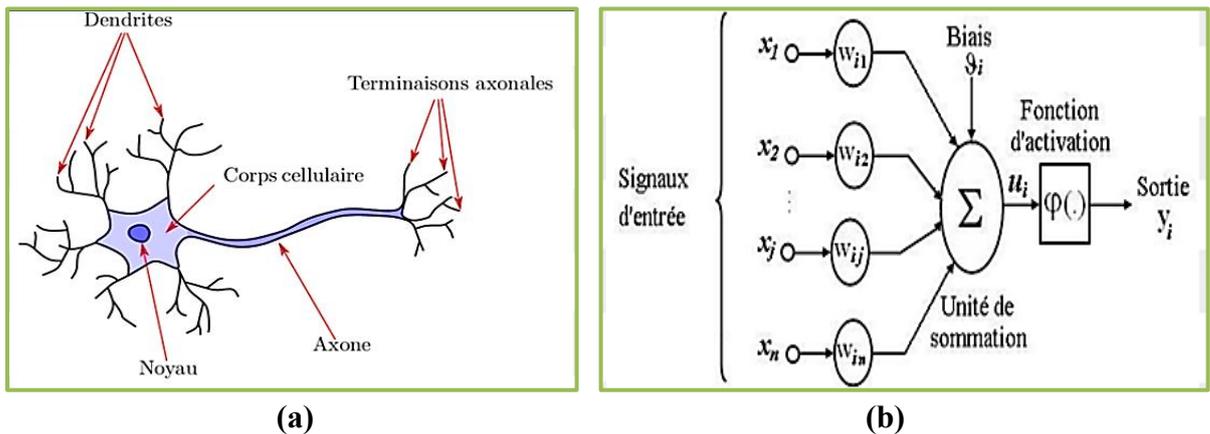
*Corps cellulaire (soma) :* intègre les signaux reçus.

*Axone :* transmet le signal nerveux vers d'autres neurones.

*Synapses :* jonctions par lesquelles les signaux passent d'un neurone à un autre.

Le neurone décide de transmettre ou non un signal électrique (appelé potentiel d'action) selon la somme pondérée des signaux reçus.

**3.2 Le neurone artificiel :** Un neurone artificiel est une unité de calcul modélisée mathématiquement. Il reçoit des entrées, associées à des poids, effectue une somme pondérée, applique une fonction d'activation, et génère une sortie, [27].



**Figure II.1 :** (a) Modèle d'un neurone biologique (b) Modèle d'un neurone artificiel

Le tableau ci-dessous illustre la comparaison des deux modèles neuronaux dont nous avons discuté.

**Tableau II.1 : comparaison de deux modèles de réseau neuronale**

<i>Neurone biologique</i>	<i>Neurone artificiel</i>
<b>Dendrite</b>	Entrées
<b>Synapse</b>	Poids
<b>Soma</b>	Fonction de sommation
<b>Potentiel d'action</b>	Fonction d'activation
<b>Axone</b>	Sortie

Malgré sa simplicité, le neurone artificiel reproduit les grandes lignes du comportement du neurone biologique : réception, intégration et transmission d'un signal. Cette analogie a permis de construire des réseaux capables d'apprendre des tâches complexes, à l'image du cerveau humain.

## **II.4 Structure d'un réseau de neurones artificiels**

### **4.1 Architecture d'un réseau de neurones**

Un RNA est formé d'un ensemble de neurones formels interconnectés. Deux grands types d'architectures peuvent être distingués:

**Les réseaux de neurones non bouclés :** Les réseaux de neurones non bouclés réalisent une ou plusieurs fonctions algébriques des entrées, par composition des fonctions réalisées par chaque neurone. Les réseaux de neurones non bouclés sont des outils statiques, utilisés principalement pour effectuer des tâches d'approximation de fonctions non linéaires, de modélisation de processus statiques non linéaires.

**Les réseaux de neurones bouclés :** Les réseaux de neurones bouclés constituent quant à eux un système dynamique "à temps discret", régi par une ou plusieurs équations aux différences non linéaires, résultant de la composition des fonctions réalisées par chacun des neurones et des retards associés à chacune des connexions [28].

## 4.2 Perceptron multicouche (PMC)

Le PMC est un réseau de neurones non bouclé caractérisé par une structure bien particulière. La figure (II.2) illustre la structure de ce type de réseau. Ses neurones sont organisés en couches successives où les informations circulent dans un seul sens, de la couche d'entrée vers la couche de sortie. Les neurones d'une même couche ne sont pas interconnectés. Un neurone ne peut envoyer son résultat qu'à un neurone situé dans une couche postérieure à la sienne. Le réseau est formé de plusieurs couches, qui s'appellent, par convention, [28] :

### *Couche d'entrée (Input Layer)*

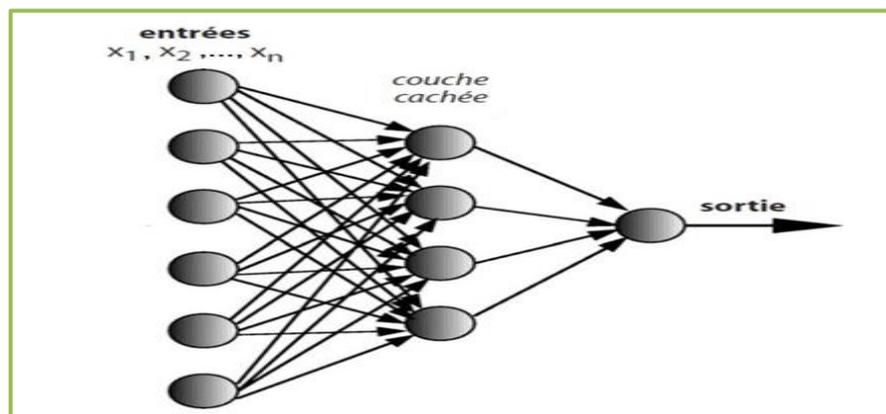
Elle reçoit les données d'entrée du modèle. Chaque neurone dans cette couche représente une variable d'entrée du problème à modéliser (exemple : le temps, la température, la vitesse de l'air...), [28].

### *Couches cachées (Hidden Layers)*

Ces couches traitent les données en effectuant des combinaisons pondérées des entrées, suivies de l'application d'une fonction d'activation. Le nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chaque couche influencent fortement la performance du réseau. Un réseau à une seule couche cachée est souvent suffisant pour modéliser la plupart des fonctions continues [28].

### *Couche de sortie (Output Layer)*

Elle fournit le résultat final du réseau (résultat prédit).



*Figure II.2 : Exemple d'architecture d'un PMC*

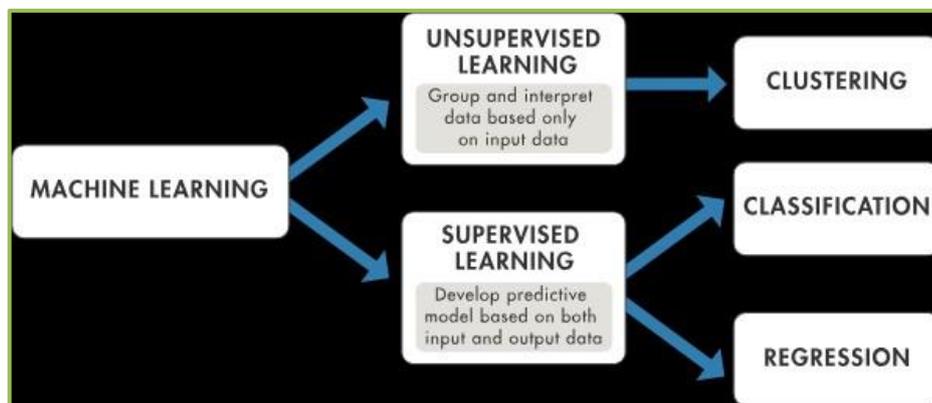
## II.5 Processus d'entraînement des réseaux de neurones

L'entraînement d'un réseau de neurones artificiel (RNA) consiste à ajuster les poids des connexions entre les neurones afin que le modèle puisse apprendre à effectuer une tâche spécifique, comme la classification, la régression ou la prédiction. Ce processus repose sur des méthodes d'apprentissage appelées « Machine Learning ».

### 5.1 Le Machine Learning

L'apprentissage automatique (Machine Learning) est une technique d'intelligence artificielle qui permet aux ordinateurs d'apprendre par l'expérience. Les algorithmes de Machine Learning utilisent des méthodes informatiques pour « apprendre » directement à partir de données, sans s'appuyer sur une équation prédéterminée servant de modèle. Les algorithmes améliorent leurs performances de manière adaptative à mesure qu'augmente le nombre d'échantillons disponibles pour l'apprentissage. Le Deep Learning est une forme spécifique de Machine Learning.

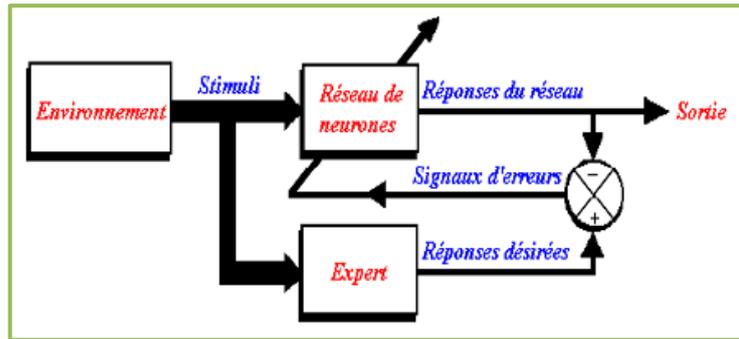
Le Machine Learning fait appel à deux types de techniques : l'apprentissage supervisé, qui entraîne un modèle sur des données d'entrée et de sortie connues afin de prédire les résultats futurs, et l'apprentissage non supervisé, qui identifie des patterns cachés ou des structures intrinsèques dans les données d'entrée, [29].



*Figure II.3 : la technique d'apprentissage.*

#### *L'apprentissage supervisé*

Dans l'apprentissage supervisé, le réseau de neurones apprend à partir d'un ensemble de données étiquetées, c'est-à-dire que chaque exemple d'entrée est associé à une sortie désirée connue. [30] :



**Figure II.4 :** Illustration de l'apprentissage supervisé.

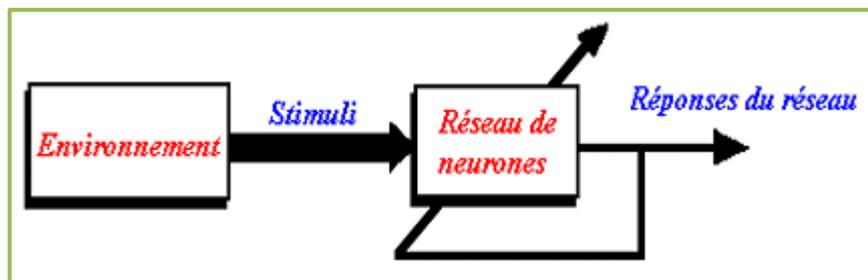
Cet apprentissage est le plus utilisé dans la modélisation des phénomènes physiques et biologiques, comme le séchage des plantes médicinales.

### ***L'apprentissage non supervisé (regroupement)***

Dans l'apprentissage non supervisé, les données ne sont pas étiquetées. Le réseau doit trouver des structures ou des regroupements dans les données par lui-même, [30].

Objectifs typiques :

- Regrouper (clustering) les données similaires.
- Réduire la dimensionnalité des données
- Découvrir des corrélations cachées



**Figure II.5 :** Illustration de l'apprentissage non supervisé.

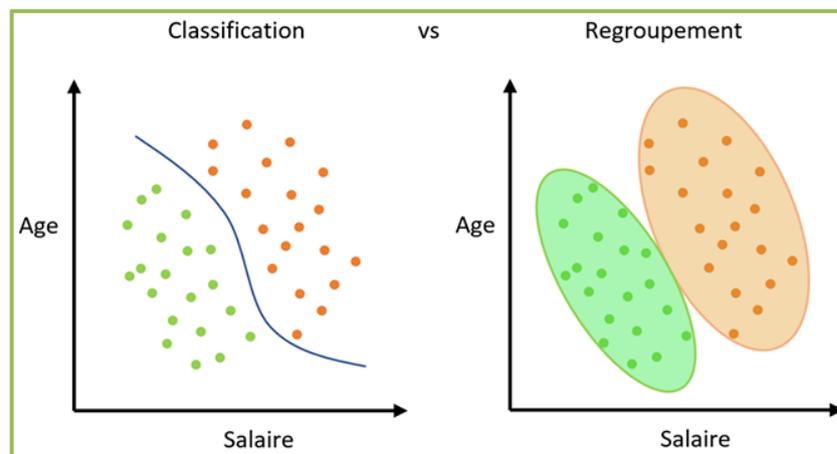
L'apprentissage non supervisé est utilisé pour l'analyse exploratoire, la compression de données, ou encore la détection d'anomalies.

### ***L'apprentissage semi-supervisé et par renforcement***

*Apprentissage semi-supervisé :* Ce type d'apprentissage est moins classique que les deux derniers (ils sont les principaux), il combine un petit ensemble de données étiquetées avec un grand ensemble non étiqueté. Il est utile quand l'étiquetage est coûteux.

*Apprentissage par renforcement :* le modèle apprend par essai-erreur, recevant des récompenses ou pénalités selon les actions entreprises, [31].

Le choix de la technique d'apprentissage dépend principalement de la nature des données disponibles. Dans le cadre de la classification, il est nécessaire de disposer de données bien triées et annotées avec des étiquettes précises, ce qui peut représenter une tâche lourde et chronophage. Un autre critère déterminant réside dans le type de sortie attendu. Par exemple, en apprentissage non supervisé comme le regroupement (clustering), il peut être difficile d'évaluer objectivement la qualité des résultats obtenus, notamment en présence de biais ou de structures complexes dans les données.

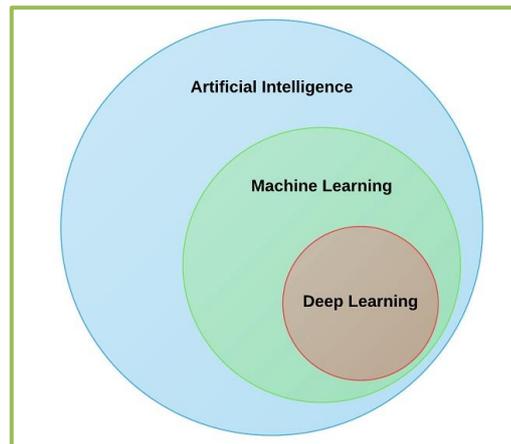


*Figure II.6 : l'apprentissage supervisé et non supervisé.*

## 5.2 Le Deep Learning

L'apprentissage profond (Deep Learning) est une branche du Machine Learning qui utilise des réseaux de neurones pour apprendre aux ordinateurs à faire ce qui semble naturel aux humains : apprendre à partir d'exemples. Dans ce domaine, un modèle apprend à effectuer des tâches de classification ou de régression directement à partir de données telles que des images, du texte ou du son. Les modèles de Deep Learning peuvent atteindre une précision remarquable, dépassant souvent les performances humaines [32].

Les modèles de Deep Learning sont fondés sur des architectures de réseaux de neurones. Un réseau de neurones, inspiré de celui d'un cerveau humain, est constitué de nœuds ou de neurones interconnectés dans une infrastructure en couches qui relie les entrées aux sorties souhaitées. Les neurones situés entre les couches d'entrée et de sortie d'un réseau de neurones sont appelés couches cachées. Le terme « Deep » fait généralement référence au nombre de couches cachées dans le réseau de neurones. Les modèles de Deep Learning peuvent comporter des centaines, voire des milliers de couches cachées [32].



*Figure II.7: fonctionnement de l'intelligence artificiel.*

### **5.3 Choisir entre le Machine Learning et le Deep Learning**

Le Machine Learning propose une variété de techniques et de modèles que vous pouvez choisir en fonction de l'application envisagée, du volume de données que vous avez à traiter et du type de problème que vous souhaitez résoudre. Une application de Deep Learning réussie nécessite de très grands volumes de données (des milliers d'images) pour entraîner le modèle, ainsi que des GPU, ou unités de traitement graphique, pour traiter rapidement vos données [32].

### **II.6 Algorithme d'apprentissage**

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui ajuste les poids des connexions afin d'atteindre une solution permettant au réseau d'exécuter la tâche souhaitée. L'apprentissage constitue une approche d'identification paramétrique qui vise à optimiser les valeurs des poids du réseau. Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être appliqués, parmi lesquels se distingue [29] :

#### **6.1 Algorithme de propagation avant (forward propagation)**

La propagation avant, appelée aussi phase de calcul direct, constitue la première étape de du traitement dans un réseau de neurones. Elle consiste à faire circuler l'information depuis la couche d'entrée jusqu'à la couche de la sortie, en passant par les couches cachées.

Chaque neurone reçoit une combinaison linéaire pondérée des sorties des neurones de la couche précédente. Cette combinaison est ensuite transformée par une fonction d'activation non linéaire, qui permet au réseau de modéliser des relations complexes entre les données.

Formellement :

$$z = \sum w_i \cdot x_i + b \quad (\text{II.1})$$

$$y = f(z) \quad (\text{II.2})$$

Où  $z$  : valeur d'activation ;  $x_i$  : entrées ;  $w_i$  : poids synaptiques ;

$b$  : biais(bias) ;  $y$  : sortie de neurone ;  $f$  : fonction d'activation.

## 6.2 Algorithme de rétropropagation

L'entraînement des réseaux multicouches est généralement supervisé. Pour ajuster les poids, on utilise l'algorithme de rétropropagation du gradient. Les algorithmes de rétropropagation sont employés avec succès dans de nombreuses applications nécessitant des mappages d'entrée/sortie non linéaires. La capacité à approcher des fonctions non linéaires continues confère aux réseaux de rétropropagation d'excellentes performances en matière de cartographie (prédiction). Cet algorithme repose sur la descente de gradient maximale autorisée pour chaque couche du réseau, suivant des règles de chaînage.

$$E = \frac{1}{2}(y - \hat{y})^2 \quad (\text{II.3})$$

Où  $E$  : est l'erreur de la sortie ;  $y$  : sortie cible ;  $\hat{y}$  : sortie prédite.

Les algorithmes de rétropropagation implantés actuellement dans les logiciels de RNA varient en fonction de la méthode d'optimisation utilisée. Ils appartiennent à une des cinq classes suivantes [33]:

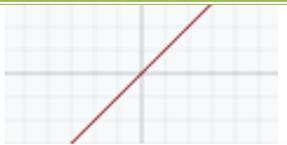
- Descente du gradient ;
- Descente des gradients conjugués ;
- Quasi-Newton ;
- Levenberg-Marquardt ;
- Régularisation.

## II.7 Fonction d'activation

En général, les neurones peuvent adopter des états binaires, mais ils peuvent également avoir des valeurs discrètes ou continues. La fonction d'activation a pour but d'introduire de la non-linéarité dans le fonctionnement du neurone. Contrairement aux neurones biologiques qui ont des états binaires, la plupart des fonctions de transfert sont continues, offrant ainsi un nombre infini de valeurs dans l'intervalle  $[0, +1]$  ou  $[-1, +1]$ . Nous

pouvons identifier certains des types de fonctions de transfert les plus couramment utilisés. [33].

**Tableau II.2 : différentes fonctions d'activation**

<i>Nom de fonction</i>	<i>Nom Matlab</i>	<i>Équation</i>	<i>Graphique</i>
Identité	Purelin	$f(x) = x$	
Heaviside	Hardlim	$f(x) = \{0, x < 1; x \geq 0\}$	
Logistique	Sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
Tangente hyperbolique	tanh	$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	
Rectified linear unit ReLU	Poslin	$f(x) = \max(0, x)$	

Chaque fonction a ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépend souvent du type de problème à résoudre.

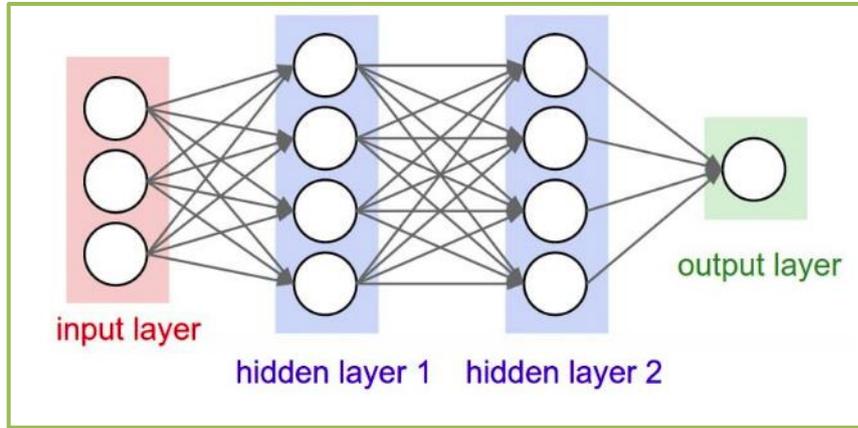
## II.8 Conception du réseau de neurone artificielle :

Les neurones artificiels sont arrangés en couches, où la couche d'entrée reçoit des signaux d'entrée ( $u_i$ ) du monde expérimental et chaque couche successive reçoit les sorties pondérées ( $w_{ij}$ ) de la couche précédente comme son entrée résultante ainsi en un RNA de type feedforward (cas de Multi-Layer Perceptron MLP), dans lequel chaque sortie d'une couche est alimentée en avant à la couche qui la succède où elle est traitée. Les sorties de la dernière couche constituent les sorties prédites par le modèle de RNA.

Dans un tel RNA de type feedforward un neurone, dans une couche cachée ou une couche de sortie, a deux tâches : Il additionne le biais aux entrées pondérées de plusieurs connexions et applique ensuite une fonction d'activation (dite aussi fonction de transfert ou encore fonction de seuillage) à cette somme comme donnée par l'équation (II.4)

$$u_p = [\sum_{k=1}^l w_{pk} \cdot [\sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot [\sum_{i=1}^n w_{ji} \cdot u_i + b_j] + b_k] + b_p] \quad (\text{II.4})$$

Chaque architecture a été répétée n fois (époque) afin d'éviter la convergence vers un minimum local. Le nombre optimal de neurones cachés est défini comme le nombre pour lequel la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est minimale. A la fin les meilleurs résultats en termes d'erreur sont sauvegardés [34].



**Figure II.8 :** Représentation de l'architecture d'un réseau de neurones typique.

## II.9 Analyse statistique

L'analyse statistique est une branche fondamentale des sciences qui vise à collecter, organiser, décrire, interpréter et analyser des ensembles de données afin d'en extraire des informations pertinentes. Elle permet de comprendre les tendances, de détecter les relations entre variables et de tirer des conclusions basées sur les observations.

La fiabilité et la précision des modèles développés à partir des méthodes d'intelligence artificielle, reposent sur divers indices statistiques. L'évaluation des modèles mathématiques a été organisée à l'aide de huit critères de performances statistiques afin de tester le pouvoir prédictif. Les indices d'évaluation couramment utilisés comprennent les équations suivantes [34] :

$$\text{l'erreur quadratique moyenne : } MSE = \frac{1}{n} * \sum (Y - Y_{cal})^2 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{La racine de l'erreur quadratique moyenne : } RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum (Y_{cal} - Y)^2} \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Le coefficient de corrélation : } R = \frac{\sum ((Y-Y) * (Y_{cal}-Y_{cal}))}{\sqrt{\sum (Y-Y)^2 * \sum (Y_{cal}-Y_{cal})^2}} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Le coefficient de détermination : } R^2 = 1 - \left( \frac{\sum (Y - Y_{cal})^2}{\sum (Y - Y)^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

Où  $Y$  sont les données observées,  $\bar{Y}$  est la moyenne arithmétique des données observées  $Y_{cal}$  sont les valeurs calculées,  $\bar{Y}_{cal}$  est la moyenne arithmétique des données prédites et " $n$ " est la taille de la base de données (le nombre des données).

## **II.10 Révolution des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) dans l'Agroalimentaire**

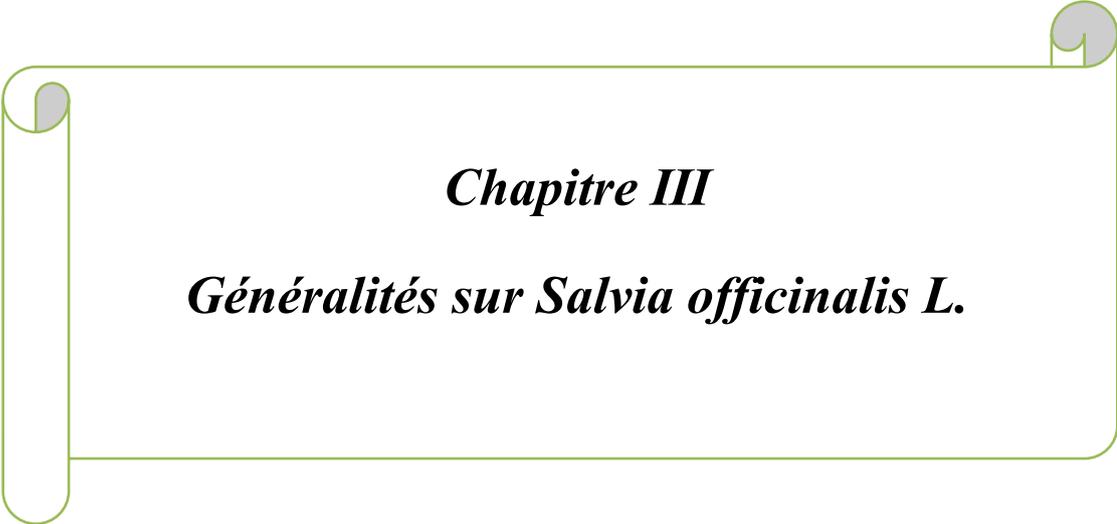
Les réseaux de neurones artificiels (RNA) se sont imposés comme une technologie clé dans l'optimisation des procédés agroalimentaires, notamment dans le domaine du séchage des plantes médicinales et aromatiques. Grâce à leur capacité à modéliser des relations non linéaires entre plusieurs paramètres (température, humidité relative, vitesse de l'air, etc.), les RNA permettent de prédire avec précision les cinétiques de séchage et d'optimiser les conditions opératoires. Cela permet non seulement de réduire le temps de séchage, mais aussi de préserver les composés bioactifs essentiels à la qualité des plantes.

Par exemple, Keskes et al. (2020) [5] ont utilisé des RNA pour modéliser le séchage de la menthe, démontrant une amélioration significative dans la prédiction de la teneur en humidité résiduelle. De même, Benaouda et al. (2014) [35] ont appliqué cette méthode pour optimiser le séchage de plantes médicinales en préservant les huiles essentielles, soulignant l'efficacité des RNA face aux méthodes traditionnelles. Ces travaux illustrent l'intérêt croissant pour des approches intelligentes et adaptatives dans le secteur des plantes aromatiques, souvent sensibles aux conditions thermiques.

Malgré leur potentiel, l'adoption des RNA reste freinée par le besoin en volumes de données conséquents pour l'entraînement des modèles et par leur manque d'interprétabilité, ce qui pose des défis en matière de validation réglementaire et de confiance des utilisateurs.

### **Conclusion**

Les réseaux de neurones artificiels offrent des solutions efficaces pour modéliser des procédés complexes comme le séchage des plantes médicinales. Leur succès dépend toutefois d'une bonne connaissance des produits étudiés. C'est pourquoi le chapitre suivant s'intéresse à *Salvia officinalis*, plante médicinale aux nombreuses propriétés, afin de mieux adapter les outils d'intelligence artificielle à ses spécificités.



***Chapitre III***  
***Généralités sur Salvia officinalis L.***



### III.1 Introduction

La *Salvia officinalis*, couramment appelée sauge officinale, est une plante aromatique bien connue pour ses propriétés médicinales et culinaires. Depuis l'Antiquité, cette plante de la famille des Lamiacées a été utilisée pour ses vertus thérapeutiques, sa capacité à stimuler la mémoire et son rôle dans les rituels spirituels. Riches en antioxydants, en huiles essentielles et en flavonoïdes, les feuilles de sauge sont prisées pour leurs effets bénéfiques sur la santé digestive, la gestion du stress et la réduction des inflammations. [36-37]

L'une des étapes clés pour préserver les qualités de cette plante est le séchage. Le processus de séchage permet non seulement de prolonger la conservation de la sauge, mais aussi de concentrer ses principes actifs, notamment les huiles essentielles responsables de ses propriétés médicinales et aromatiques. Toutefois, un séchage inapproprié peut altérer les qualités organoleptiques et les effets thérapeutiques de la plante. Ainsi, il est crucial de comprendre les différentes méthodes de séchage de *Salvia officinalis* et leurs impacts sur la préservation de ses propriétés. [38]

Ce chapitre se propose d'explorer en détail les multiples aspects de cette plante : ses caractéristiques botaniques, ses bienfaits pour la santé, ainsi que ses applications dans les médecines traditionnelles et modernes. Nous examinerons également son importance dans les traditions culturelles et les pratiques phyto-thérapeutiques, ainsi que les recherches récentes qui valident ses propriétés.

### III.2 Présentation de *Salvia officinalis* L.

Le terme *Salvia* provient du mot latin "Salvare", qui signifie : guérir, sauver. C'est une plante aux propriétés magiques capable de sauver des vies humaines. [39]

Le genre *Salvia* (Sauge) fait partie des genres les plus significatifs de la famille des Lamiacées, comprenant près de 900 espèces réparties dans le monde entier. L'Algérie abrite vingt-trois espèces du genre *Salvia* [40]. Ce genre comprend des espèces annuelles, bisannuelles ou vivaces. Les tiges sont généralement quadrangulaires et inclinées, comme celles des autres membres de la famille des Lamiacées. Les feuilles sont généralement entières, mais peuvent parfois être dentées ou pennées. Les hampes florales portent de petites bractées inégales. Cette sauge se présente comme un arbrisseau vivace très ramifié, de couleur gris bleuté, due aux poils qui la recouvrent entièrement. [41]



*Figure III.1 : Aspect de la plante Salvia officinalis*

### III.3 Description :

C'est une plante annuelle et vivace appartient à la famille des Labiées [42]. Elle se développe en un petit sous-arbrisseau de 50 cm à 80 cm de haut à racine ligneuse, brunâtre, et fibreuse.

**La tige** est ligneuse à la base, formant un buisson dépassant parfois 60 cm, avec des rameaux verts, blanchâtre, quadrangulaire et velus [43].

**Les feuilles** opposées et elliptiques, sont pétiolées pour les inférieures, ovales, rugueuses, épaisses, à bord dentelé, réticulées, et pubescentes de couleur grisâtre ou verte. [44]

**Les fleurs** de la sauge officinale sont bleu-violacé en épis terminaux lâches, disposées par groupe de 3 à 6 en verticilles espacés et visibles de mai à août. Elles sont grandes et se trouvent à la base des feuilles supérieures.

**Le fruit** en forme de tétrakènes brunâtre, se compose de quatre petites coques indéhiscentes, chacune renfermant une graine, entourées par le calice persistant.

### III.4 Noms vernaculaires

Noms Communs [45-46]:

- ✓ Herbe sacrée, thé de Grèce, herbe sage.
- ✓ Nom scientifique : *Salvia Officinalis*
- ✓ Nom vernaculaire : Sâlniya, Mirameya
- ✓ Nom français : Sage
- ✓ Nom anglais : Garden sage
- ✓ Nom arabe : الميرمية ، سواك عنابي



**Figure III.2 :** Planche botanique de *Salvia officinalis*

### III.5 La classification botanique

La sauge fait partie d'un genre botanique varié et riche. Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques spécifiques de *Salvia officinalis*. [44]

**Tableau III.1:** Classification botanique de la sauge

Règne	Végétal (plante)
Embranchement	Cormophytes
Classe	Magnoliopsida
Sous classe	Asteridae
Ordre	Lamiales
Famille	Lamiacées
Genre	Salvia
Espèce	<i>Salvia officinalis</i> L

### **III.6 La composition de *Salvia Officinalis***

La sauge contient essentiellement de nombreux composés poly-phénolique qui sont les meilleurs antioxydants : flavonoïdes et acides phénoliques (acide caféique, acide chlorogénique, acide rosmarinique, etc.). Elle contient également un acide di-terpénique (la salvine) et triterpénique (acide ursolique, acide oléanolique) qui lui donne ses vertus bactéricides, un principe amer (la picrosalvine), une huile essentielle contenant une cétone terpénique (la thuyone, camphre, cinéole) [47].

#### **6.1 La partie utilisée :**

La sauge dégage un parfum balsamique puissant [47]. Les parties exploitées sont les sommités fleuries et les feuilles, qui doivent être récoltées avant la floraison. Elles produisent une huile volatile jaune pâle, contenant un huitième de camphre ainsi qu'un hydrolat très odorant [48].

### **III.7 La sauge officinalis : de la pharmacie à la cuisine et aux soins beauté**

La sauge officinale est une plante médicinale majeure, utilisée depuis l'Antiquité pour ses multiples vertus. Riche en composés actifs qui lui conférant des diverses propriétés [49]:

#### **7.1 Propriétés Pharmacologiques**

- Activité Antimicrobienne et Antifongique
- Effets Anti-inflammatoires et Antioxydants
- Effets sur le Système Nerveux
- Effets Digestifs

#### **7.2 Applications Thérapeutiques**

A. Usage Traditionnel et Clinique : Troubles digestifs, Infections buccales, ..., etc. [50]

B. Formes Galéniques et Dosages

- Infusion : digestion, transpiration excessive [51]
- Huile essentielle : antiseptique (usage externe dilué, jamais pure).

### **7.3 Application en cuisine et cosmétique**

En cuisine : La sauge est utilisée pour aromatiser les plats gras, grâce à ses propriétés digestives. Ses feuilles, riches en antioxydants, aident aussi à la conservation des aliments [52]

En cosmétique : L'extrait de sauge et son huile essentielle (diluée) sont employés pour leurs bienfaits sur la peau (anti-âge, antibactérien) et les cheveux (antipelliculaire, fortifiant) [53].

Cette plante polyvalente allie tradition et science, que ce soit en médecine, gastronomie ou soins naturels. Son utilisation doit respecter les dosages recommandés en raison de la présence de thuyones.

En Algérie, la sauge officinale est utilisée, en médecine folklorique, comme agent naturel antidiabétique, anti hypertensif, contre l'obésité et pour traiter l'eczéma [54].

### **III.8 Conservation de la *Salvia Officinalis***

Cette plante se conserve fraîche quelques jours dans le tiroir à légumes du réfrigérateur. Et pour une durée de conservation plus longue, nous utilisons un processus de séchage, Après la récolte, la sauge doit être séchée immédiatement pour éviter la dégradation enzymatique et la perte des composés volatils. Il est conseillé de secouer délicatement les pousses afin d'en retirer les insectes et les impuretés, sans les laver, car le rinçage provoque l'évaporation des huiles essentielles [55].

#### **8.1 Séchage à l'air libre**

Le séchage à l'air libre est une méthode traditionnelle douce, qui permet de préserver les arômes et les constituants volatils de la plante. Les pousses doivent être nouées en petits bouquets et suspendues la tête en bas dans un endroit sombre, sec et bien ventilé. Les feuilles individuelles peuvent être disposées sur un tissu ou un tamis en bois recouvert de gaze. Ce procédé prend généralement de 10 à 14 jours, en fonction des conditions ambiantes. Durant le séchage, les bouquets se desserrent à mesure que l'humidité s'évacue ; il est donc conseillé de resserrer les liens au besoin [55].

#### **8.2 Séchage au four**

Le séchage au four est une méthode plus rapide, mais qui nécessite des précautions pour ne pas altérer la qualité de la plante. Les pousses doivent être étalées en une seule couche

sur une plaque recouverte de papier sulfurisé. Cette méthode permet une déshydratation efficace tout en minimisant la perte des arômes si elle est bien maîtrisée [55].

### **8.3 Stockage et durée de conservation**

Une fois le séchage complet, les pousses ou les feuilles de *Salvia officinalis* doivent être stockées dans des contenants hermétiques, de préférence en verre teinté ou en métal, afin de limiter l'exposition à l'air, à l'humidité et à la lumière. Ces facteurs sont connus pour accélérer la dégradation des huiles essentielles et des composés phénoliques, éléments clés des propriétés thérapeutiques et aromatiques de la sauge [56].

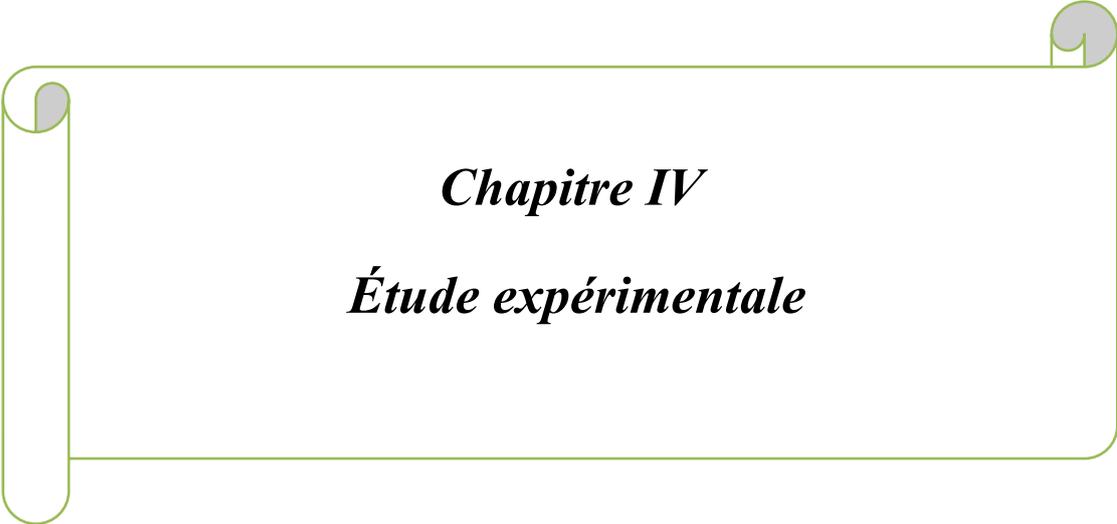
Il est recommandé de stocker la sauge dans un endroit frais, sec et sombre, comme un placard ou une armoire fermée, à l'abri de la lumière directe du soleil. La conservation peut se faire sous forme de feuilles entières ou émietées, mais les feuilles entières tendent à mieux préserver leurs qualités organoleptiques et médicinales, car elles limitent l'oxydation des huiles essentielles volatiles.

### **8.4 Pourquoi sécher la sauge**

Le séchage de la sauge officinale permet de préserver et de concentrer ses précieux composés actifs tout en prolongeant sa durée de conservation. Cette technique ancestrale offre de multiples avantages : en éliminant l'eau, elle stabilise les principes médicinaux comme l'acide rosmarinique et les thuyones tout en intensifiant ses arômes camphrés caractéristiques. Pratique et économique, la sauge séchée se conserve jusqu'à deux ans dans un contenant hermétique, contrairement à la version fraîche qui se fane rapidement. Son utilisation s'en trouve simplifiée, que ce soit pour préparer des infusions digestives, aromatiser des plats culinaires ou formuler des soins cosmétiques maison [56].

## **Conclusion**

À travers ce chapitre, nous avons présenté *Salvia officinalis* L. dans ses dimensions botaniques, chimiques et médicinales, en soulignant son importance en tant que plante aromatique et médicinale. Le séchage de la sauge permet de conserver ses bienfaits tout au long de l'année, en maintenant son intensité aromatique, tout en évitant le gaspillage, une méthode simple, écologique et économique, validée tant par la tradition que par les recherches modernes [51]. Ces connaissances fondamentales constituent une base essentielle pour mieux comprendre les enjeux du séchage, qui seront explorés dans le cadre de la partie expérimentale suivante.



*Chapitre IV*  
*Étude expérimentale*



## **Chapitre IV : Étude expérimentale**

### **IV.1 Introduction**

La partie pratique de ce mémoire s'articule autour de deux sections complémentaires et interdépendants. La première partie est consacrée à une étude expérimentale approfondie de la cinétique de séchage, visant à caractériser le comportement de *Salvia officinalis* sous différentes conditions opératoires. Cette phase permet d'identifier les paramètres clés influençant le processus de séchage à l'air chaud et de générer une base de données fiable nécessaire à l'étape suivante.

Dans la seconde partie, les résultats expérimentaux obtenus sont exploités dans le cadre d'une modélisation par Réseaux de Neurones Artificiels (RNA). Cette approche de type apprentissage automatique permet de simuler le comportement du système, de prédire les valeurs des paramètres de séchage en fonction des conditions d'entrée, et d'évaluer la performance du modèle par rapport aux données expérimentales. L'intégration de la modélisation par RNA offre ainsi une meilleure compréhension des phénomènes complexes liés au séchage, et constitue un outil pertinent pour l'optimisation du procédé.

### **IV.2 Expérience de séchage**

#### **IV.2.1 Mode opératoire**

##### **Préparation des échantillons :**

Pour les expériences de séchage, des feuilles fraîches de *Salvia officinalis* ont été récoltées dans la région de KEF EL HMAM (Blida, Algérie) durant le mois d'Avril. Les plantes ont été conservées dans des sacs plastiques hermétiques à 4°C jusqu'aux expériences de séchage. Elles ont été récoltées à un même stade de maturité, triées puis pesées avec précision afin d'enregistrer la masse initiale, et ensuite ont été soumises à un :

##### **A. Prétraitement par blanchiment à la vapeur d'eau**

Le blanchiment est utilisé à diverses fins. Il s'agit d'un traitement thermique doux appliqué aux tissus (généralement plantes) utilisé pour inactiver les enzymes avant le séchage [57].

- ✓ La fonction principale du blanchiment est l'inactivation des enzymes.
- ✓ Les enzymes peuvent provoquer un changement rapide de couleur, de saveur et de valeur nutritive de ces produits alimentaires.

- ✓ Le blanchiment comme prétraitement avant le séchage présente de nombreux avantages.
- ✓ Il aide à nettoyer le matériau et à réduire la quantité de micro-organismes présents à la surface.

#### **Méthodes de blanchiment :**

Le blanchiment est une étape de traitement délicate. Il nécessite une surveillance attentive du temps, de la température et des conditions ambiantes. Il existe principalement deux méthodes typiques de blanchiment en fonction du type de moyen de chauffage, à savoir le blanchiment à l'eau chaude et le blanchiment à la vapeur, qui ont été utilisés dans cette étude, en utilisant respectivement l'eau chaude et la vapeur comme moyen de chauffage.

Dans notre cas le blanchiment à la vapeur a été utilisé, les produits alimentaires sont directement exposés à la vapeur, ce qui évite la perte de solides alimentaires (arômes, vitamines, acides, etc.). Le blanchiment à la vapeur est avantageux car il entraîne moins de pertes de constituants hydrosolubles, moins de déchets et est facile à nettoyer et à stériliser. Mais il présente certains inconvénients. Tels que des coûts d'investissement plus élevés, un blanchiment inégal et une faible efficacité [57].

#### **Matériel utilisé :**

Feuilles fraîches de *Salvia* ; Plaque chauffante ; L'eau ;  
Papier aluminium perforé ; Cristallisoir ; Congélateur.

#### **Protocole de blanchiment :**

Les feuilles ont été exposées à la vapeur d'eau pendant 1 minute, en les plaçant sur un support perforé au-dessus de l'eau bouillante, couvert hermétiquement avec du papier aluminium. Elles ont ensuite été refroidies rapidement au congélateur pendant 1 minute, puis essuyées avec du papier absorbant avant séchage.



*Figure IV.1: Photographie de la phase de blanchiment par la vapeur d'eau*

## B. Séchage à l'air chaud (convectif)

Avant chaque expérience de séchage, la teneur en humidité initiale des feuilles a été déterminée par séchage au four à 100°C pendant 24 heures. Elle a ensuite été calculée à l'aide de l'équation :

$$\text{A base sèche : } X0 = \frac{me}{msec} = \frac{m0 - msec}{msec}$$

$$\text{À base humide : } H = \frac{me}{mt} * 100 = \frac{m0 - msec}{m0} * 100$$

Cette valeur de X0 a été ensuite utilisée pour le calcul du teneur en eau réduit X\* durant les différentes étapes de séchage.

### Matériel utilisé

Le matériel utilisé comprend :

Une étuve à ventilation forcée avec régulation de température ;

Une balance électronique de précision (0,001 g) ;

Un thermomètre digital ; Un chronomètre ;

Un anémomètre, ainsi que des récipients et fiches de suivi.

### Protocole de Séchage :

Après blanchiment, 60 g d'échantillons ont été disposées en une couche fine sur un plateau et introduites dans l'étuve préchauffée à la température (40, 50 et 60°C), et à la vitesse souhaitée (0.5, 1 et 2 m/s) [60]. La masse des échantillons a été relevée régulièrement jusqu'à obtention d'un poids constant. Tous les paramètres (température, temps, masse, vitesse de l'air) ont été systématiquement notés.



(a)



(b)



(c)

*Figure IV.2 : photographies des équipements utilisé : a) étuve b) feuilles de Salvia c) balance électronique.*

#### IV.2.2 Cinétique de séchage

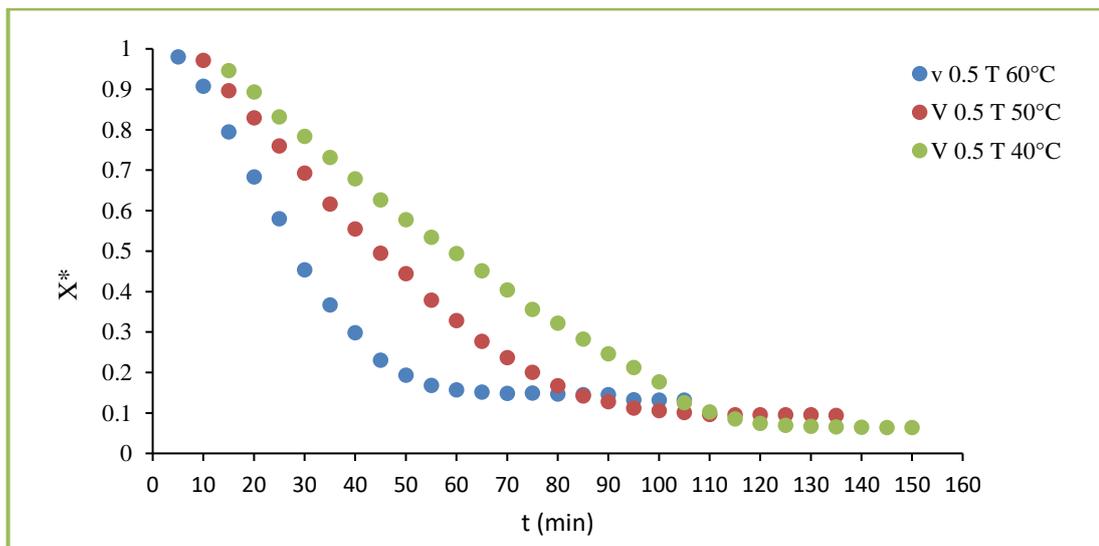
Après avoir présenté le mode opératoire, il est essentiel d'analyser l'évolution de la teneur en eau au cours du temps afin de caractériser la cinétique de séchage. Cette étape permet de mieux comprendre les mécanismes de transfert de masse intervenant durant le processus de séchage, et constitue une base indispensable pour toute modélisation ultérieure.

Dans ce qui suit, nous allons exploiter les données expérimentales obtenues pour déterminer la teneur en eau à différents paramètres de séchage, calculer la teneur en eau réduit  $X^*$  et le taux de séchage DR, puis analyser leur évolution en fonction du temps.

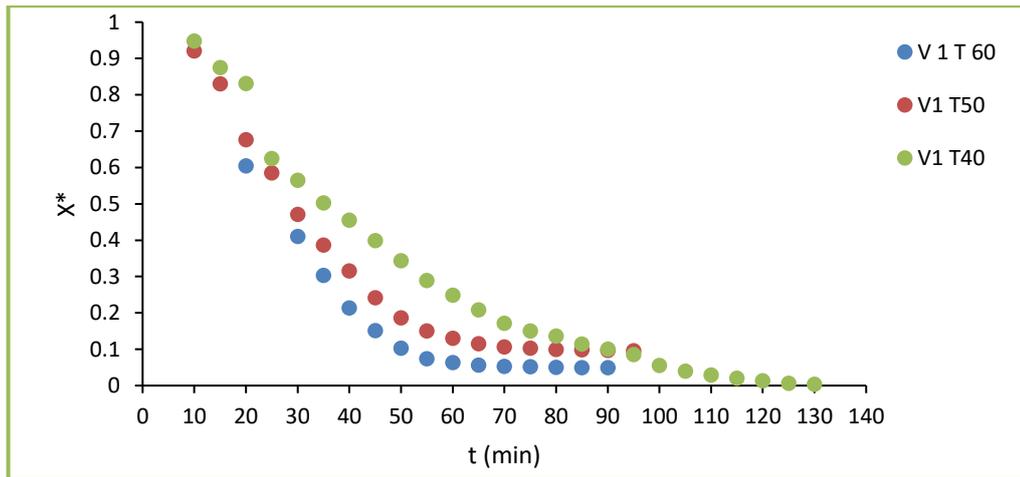
##### 2.2.1 Influence de paramètres de l'air

###### a) Sur la teneur en eau réduit ( $X^*$ )

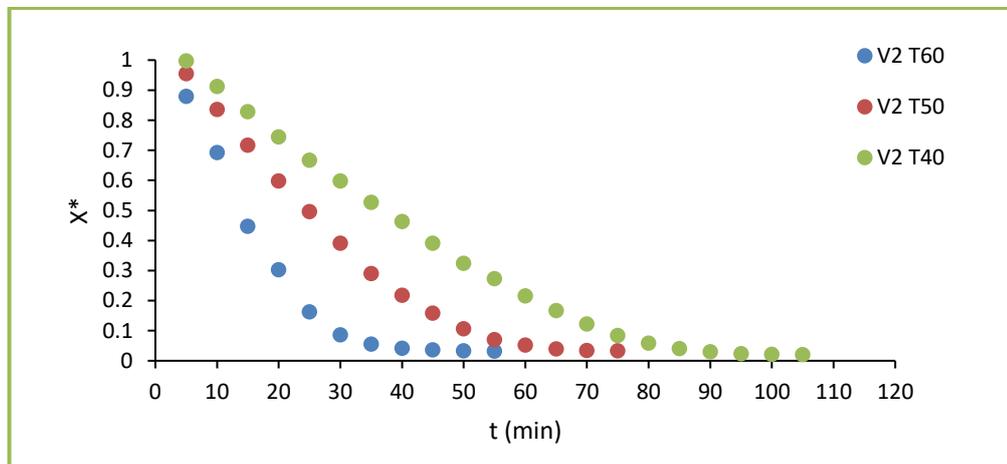
Les résultats de l'évolution de la teneur en eau réduit des échantillons de *Salvia officinalis* séchés à l'étuve à différents niveaux de température et de ventilation sont présentés dans les figures suivantes :



**Figure IV.3:** Évolution de la teneur en eau réduit en fonction du temps et de la température à une vitesse de 0.5 m/s



**Figure IV.4:** Évolution de la teneur en eau réduit en fonction du temps et de la température à une vitesse de 1 m/s



**Figure IV.5:** Évolution de la teneur en eau réduit en fonction du temps et de la température à une vitesse de 2 m/s.

### Interprétation des résultats

Les courbes de teneur en eau réduit ( $X^*$ ) en fonction du temps montrent une diminution continue et rapide de l'humidité au début, suivie d'un ralentissement progressif. Vela indique deux phases principales [58] :

*Phase de séchage rapide* : où l'eau libre s'évapore facilement de la surface des feuilles. Cette phase est plus marquée à hautes températures et vitesses d'air élevées, car l'énergie disponible pour l'évaporation est plus importante.

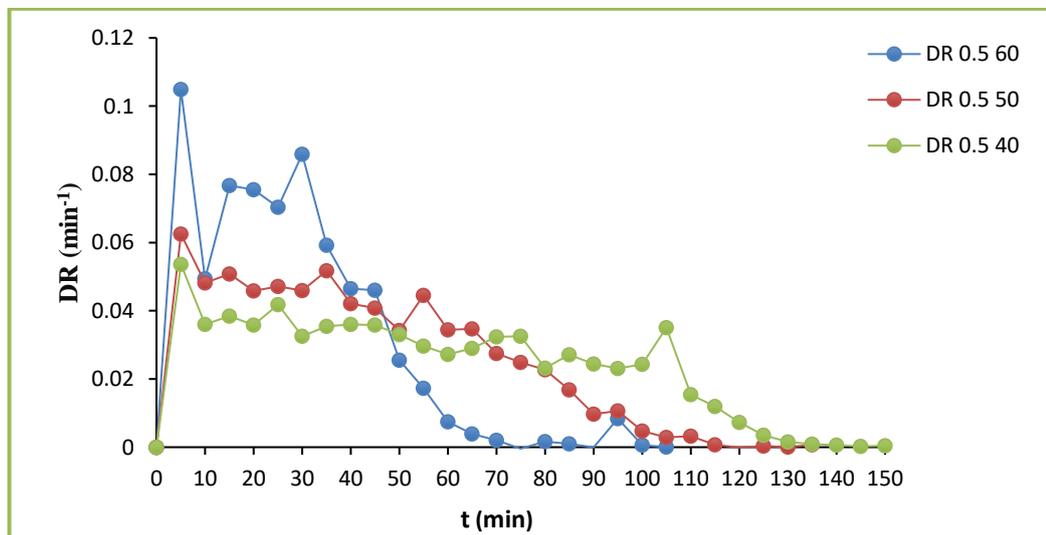
*Phase de séchage lent* : l'eau restante est liée à l'intérieur de la structure végétale, ce qui ralentit le transfert. Dans cette phase, l'influence de température et de la vitesse est encore présente, mais le séchage devient plus diffusif que convectif.

Les résultats expérimentaux obtenus mettent en évidence l'influence significative de la température et de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage :

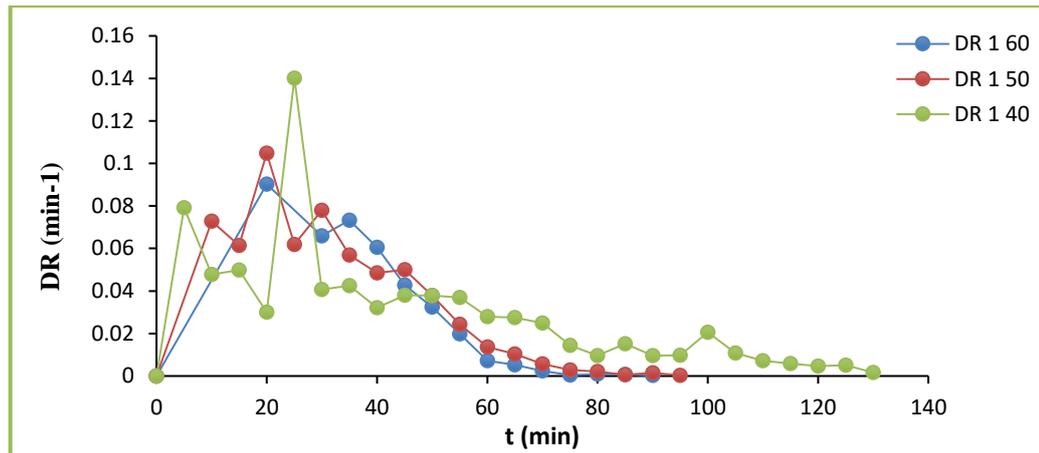
- ✓ Pour une vitesse d'air de 2 m/s, le séchage est le plus efficace. À 60 °C, une perte rapide en eau est observée, avec une phase de stabilisation atteinte dès 60 minutes. À 50 °C, cette phase intervient vers 80 minutes, et à 40 °C, elle est retardée jusqu'à 100 minutes.
- ✓ À une vitesse de 1 m/s, la vitesse de séchage diminue légèrement. La stabilisation est observée entre 70 et 100 minutes selon la température.
- ✓ Lorsque la vitesse est réduite à 0,5 m/s, le séchage devient nettement plus lent. À 60 °C, la stabilisation n'est atteinte qu'après 90 minutes, et au-delà de 130 à 150 minutes pour des températures plus faibles.

Bien que la température de 60°C avec une vitesse d'air de 2 m/s permet un séchage rapide, elle risque d'altérer certaines propriétés sensibles de la plante. En revanche, une température modérée (40°C) avec une vitesse réduite (0.5 m/s) permet une meilleure préservation des composés bioactifs, bien que le temps de séchage soit plus long. Le choix optimal dépend donc de la finalité visée (qualité et rendement).

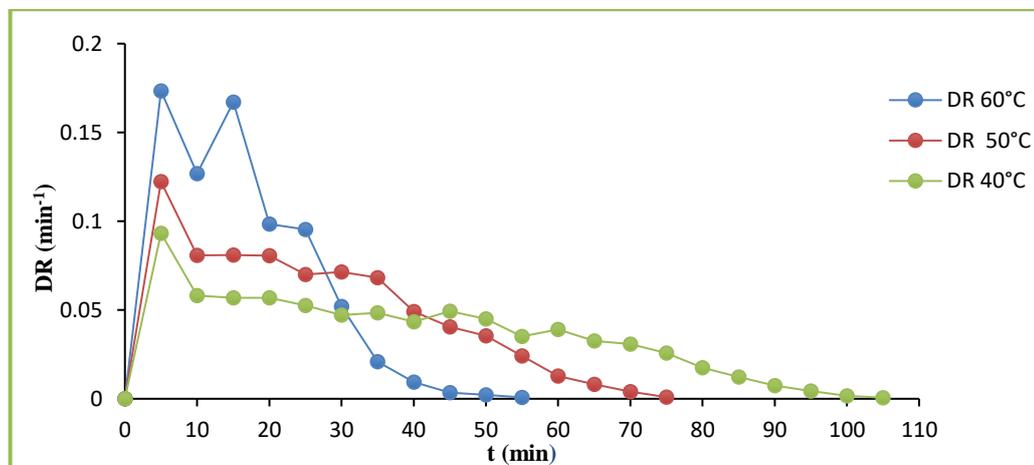
#### b) Sur le taux de séchage (DR)



*Figure IV.6 : Évolution du taux de séchage au cours du temps à 0.5 m/s.*



**Figure IV.7 :** Évolution du taux de séchage au cours du temps à 1 m/s.



**Figure IV.8 :** Évolution du taux de séchage au cours du temps à 2 m/s.

Les figures illustrent l'évolution de taux de séchage des feuilles de sauge à différentes températures. On observe, dans les trois cas, que le taux de séchage augmente rapidement au début du processus, atteignant un pic, avant de diminuer progressivement avec le temps. Cette tendance s'explique par la forte évaporation de l'humidité libre présente à la surface des feuilles durant les premières minutes du séchage. Ensuite, le transfert d'humidité devient plus lent, car il dépend de la diffusion de l'eau à l'intérieur des tissus végétaux vers la surface.

La comparaison entre les courbes montre que la température de séchage a un effet significatif sur la cinétique de séchage. En effet, à une température plus élevée (60 °C), le séchage est plus rapide, ce qui se traduit par un pic de taux de séchage plus élevé et un temps global de séchage plus court. À des températures plus basses (par exemple 40 °C), le processus est plus lent, mais peut permettre une meilleure préservation de certaines propriétés thermosensibles.

Ce comportement est caractéristique du séchage des plantes aromatiques, qui passent généralement par une phase initiale de séchage rapide suivie d'une phase de ralentissement. Les courbes obtenues sont donc cohérentes avec la littérature et confirment l'impact majeur de la température sur l'efficacité du séchage.

### **Conclusion**

L'étude de la cinétique de séchage confirme que la combinaison d'une température élevée et d'une vitesse d'air importante permet de réduire significativement le temps de séchage. À l'inverse, à basse température et faible vitesse, le processus est beaucoup plus long. Donc il est important de trouver un compromis entre la rapidité du séchage et la qualité finale du produit. Une température et une vitesse modérées peuvent s'avérer plus appropriées pour préserver les composés actifs, les huiles essentielles ainsi que la couleur naturelle de *Salvia officinalis*. Cela souligne l'importance d'optimiser ces deux paramètres afin d'assurer un séchage à la fois efficace et respectueux des propriétés des produits alimentaires.

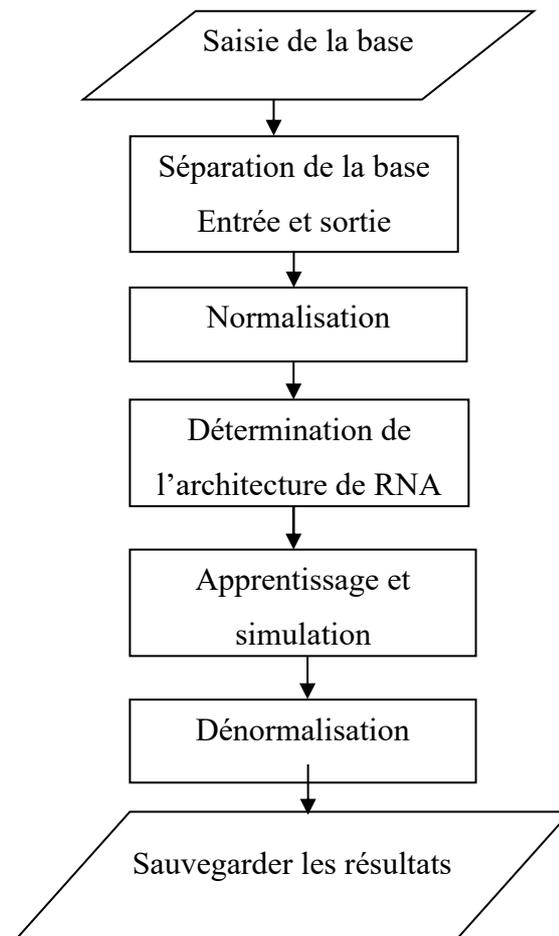
### IV.3 Modélisation de la cinétique de séchage par RNA

#### IV.3.1 Méthodologie :

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le logiciel MATLAB R2009a.

##### 1. Conception de la topologie de RNA :

La méthodologie choisie peut être schématisée conformément à l'organigramme de la figure suivante :



*Figure IV.9: Méthodologie de calcul par réseaux de neurones*

## 2. Étapes de modélisation de la cinétique de séchage par RNA

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB, en utilisant les réseaux de neurones artificiels. Les différentes étapes suivies pour atteindre les résultats finaux de R et RMSE seront détaillées dans ce qui suit :

*Ouvrir le logiciel MATLAB;* dans l'interface neural Network Data Manager, importer la matrice des entrées (T, t et V) et la matrice de sortie ( $X^*$ ).

*Dans la fenêtre de commande;* entrer nntool (neural network tool), sélectionnez les entrées comme Input et la sortie comme Target.

*Création d'un réseau;* cliquer sur New Network, choisir le type de réseau (feed-forward backpropagation), l'algorithme d'apprentissage, spécifier le nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chaque couche, choisir les fonctions de transfert et valider en cliquant sur create.

*Entraînement du réseau;* dans la fenêtre nntool, sélectionner le réseau et cliquer sur Train Network.

*Évaluation des performances;* une fois l'entraînement terminé, les résultats s'affichent : le graphique performance qui montre l'erreur et le graphique de régression permet d'évaluer le coefficient de corrélation R.

### a) Base de données :

L'objectif principal de ce travail est de construire une base de données suffisante pour entraîner un réseau de neurones artificiel capable de prédire un paramètre de sortie à partir de trois paramètres d'entrée.

Choix des entrées et des sorties

- Couche d'entrée : trois neurones tel que :

Température = (40,50 et 60°C).

Vitesse de l'air = (0.5, 1 et 2 m/s).

Temps de séchage varie entre [5 et 150] minutes.

- Couches cachées : 2 couches cachées.
- Couche de sorties : 1 neurone pour la teneur en eau réduit  $X^*$  varie entre 1 et 0.

Ces données sont organisées en quatre colonnes correspondant aux variables expérimentales : T, t, V et X\*. Le tableau ci-dessous présente les résultats expérimentaux recueillis dans le cadre de notre étude, et constitue la base de données sur laquelle repose le développement du modèle prédictif.

**Tableau IV.1: Dimensions de la matrice.**

<i>Phase</i>	<i>Paramètres étudiés</i>	<i>Dimension de la matrice de la base des données</i>
<b>Entrées</b>	Température	[183,1]
	Temps	[183,1]
	Vitesse	[183,1]
<b>Sortie</b>	X*	[183,1]

#### **b) Normalisation de la base des données**

La normalisation est une étape importante dans le processus de l'élaboration des données. Elle devient dans la plupart des cas, une exigence pour les matrices des inputs, du fait qu'on utilise souvent des fonctions de transfert bornées de type sigmoïdes dans les modélisations statiques. Dans notre travail, on a utilisé la base de données qui est représentée comme l'indique le tableau précédent. Les valeurs numériques ont été normalisées afin d'améliorer l'optimisation. La normalisation se fait par ligne par la méthode des min et des max : « code premnmx en Matlab » illustrée par l'équation (IV.1)

$$x_{in} = \frac{2(x_i - \min(x_i))}{\max(x_i) - \min(x_i)} - 1 \quad \text{IV.1}$$

Pour la dénormalisation nous utilisons la fonction MATLAB de code « postmnmx » illustrée par l'équation (IV.2).

$$x_i = 0.5 (x_{in} + 1)(\max(x_i) - \min(x_i) + \min(x_i)) \quad \text{IV.2}$$

#### **c) Mise en forme des données**

À cette étape, les données sont réparties en trois ensembles :

- Un ensemble d'apprentissage représentant 70 % de la base, soit 128 échantillons.
- Un ensemble de validation représentant 15 % de la base, soit 27 échantillons.
- Un ensemble de test représentant également 15 % de la base, soit 27 échantillons.

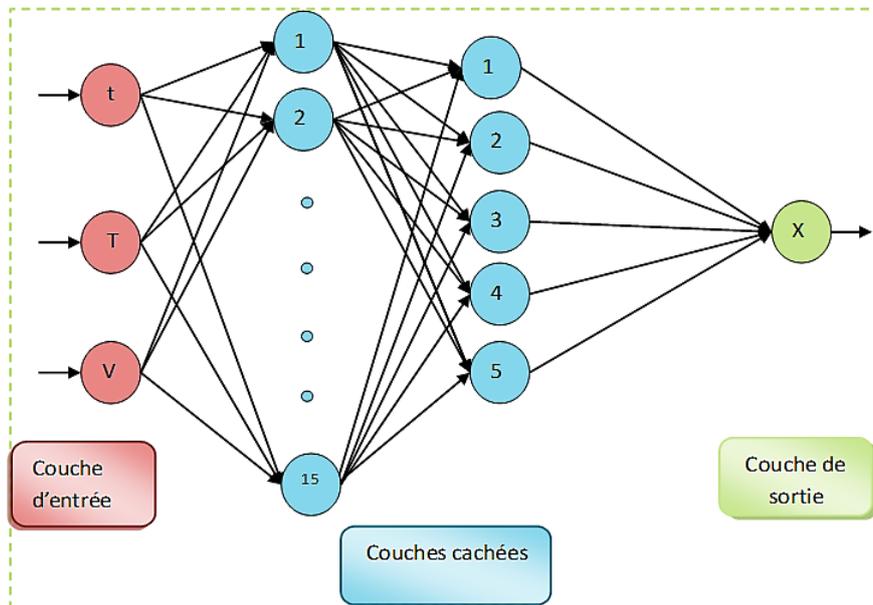
#### d) Prétraitement :

##### Modélisation avec le Perceptron multicouches (PMC)

Pour la modélisation d'un perceptron, nous avons choisi un Perceptron Multicouche à rétropropagation du gradient. Ce réseau comporte une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie. Le choix de la méthode d'apprentissage dépend du type de données disponibles et des objectifs du modèle. Dans le cas de la modélisation du séchage, où les données d'entrée sont bien connues (temps, température, vitesse de l'air) et la sortie aussi ( $X^*$ ), l'apprentissage supervisé est le plus approprié.

##### Méthodes et configuration du réseau

Il n'existe pas de règle pour le choix du nombre de neurones dans la couche cachée [59]; mais Pour obtenir la meilleure structure neuronale, le nombre de neurones sur les couches cachées a été optimisé. Dans cette étude, on a commencé par une couche cachée en variant le nombre de neurones cachée de 1 à 20, puis on a testé un RNA avec deux couches cachées où le nombres de neurones dans la première couche a été varié de 5 à 20 et la deuxième couche de 1 à 10 neurones, La figure IV.8 représente l'architecture optimale du réseau de neurones artificiels.



**Figure IV.10:** Architecture optimale du réseau de neurones artificiels

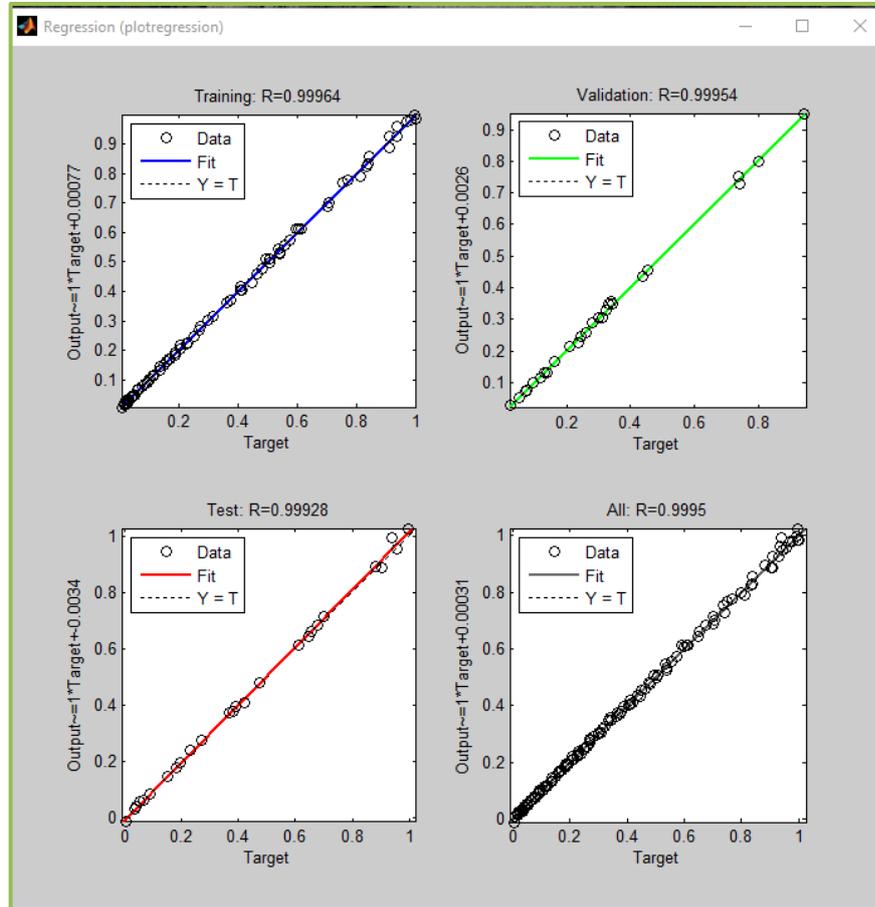
Le tableau IV.2, récapitule les différents éléments structurels du réseau de neurones utilisé dans la modélisation de la teneur en humidité.

**Tableau IV.2 :** les différents éléments structurels du réseau utilisé dans la modélisation

Couche	Nombre de neurones	Fonction d'activation
Couche d'entrée	3	----
1 <sup>ère</sup> couche cachée	15	Sigmoïde tangent (tansig)
2 <sup>ème</sup> couche cachée	5	Sigmoïde tangent (tansig)
Couche de sortie	1	Linéaire (purelin)
Algorithme d'apprentissage	Levenberg -Marquardt (trainlm)	

### IV.3.2 Résultats de modélisation

La corrélation linéaire entre les valeurs de la teneur en eau expérimentales et prédites par RNA pour l'apprentissage, la validation, le test et les ensembles de données globaux est illustrée à la figure IV.11.

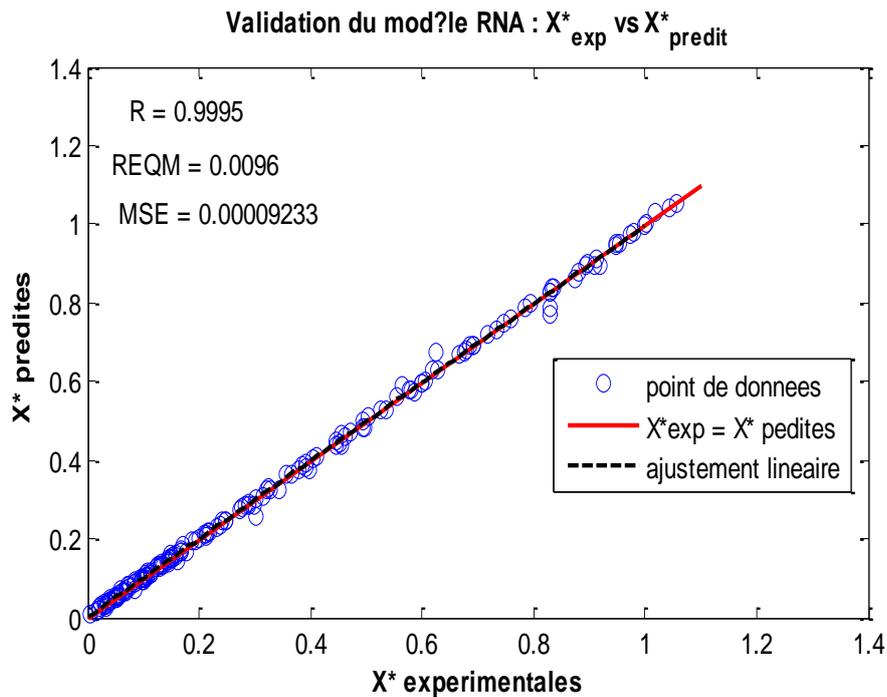


*Figure IV.11 : courbe de corrélation linéaire avec architecture de (3- 15-5-1)*

Les résultats obtenus montrent une excellente corrélation entre les valeurs expérimentales de  $X^*$  et celles prédites par le réseau de neurones artificiels RNA. Soit pour l'apprentissage, la validation, le test et l'ensemble de données globaux

#### 3.2.1 Interprétation de résultats :

La figure suivante montre la courbe de régression linéaire de la teneur en eau réduite  $X^*$  calculée par le RNA optimisé avec la teneur en eau expérimentale pour toute les phases apprentissage, teste et validation. Les paramètres de la régression linéaire ont été calculés directement, obtenus à l'aide de la fonction MATLAB "postreg"



**Figure IV.12 :** Courbe de régression linéaire du  $X^*$ prédite avec  $X^*$ exp (all)

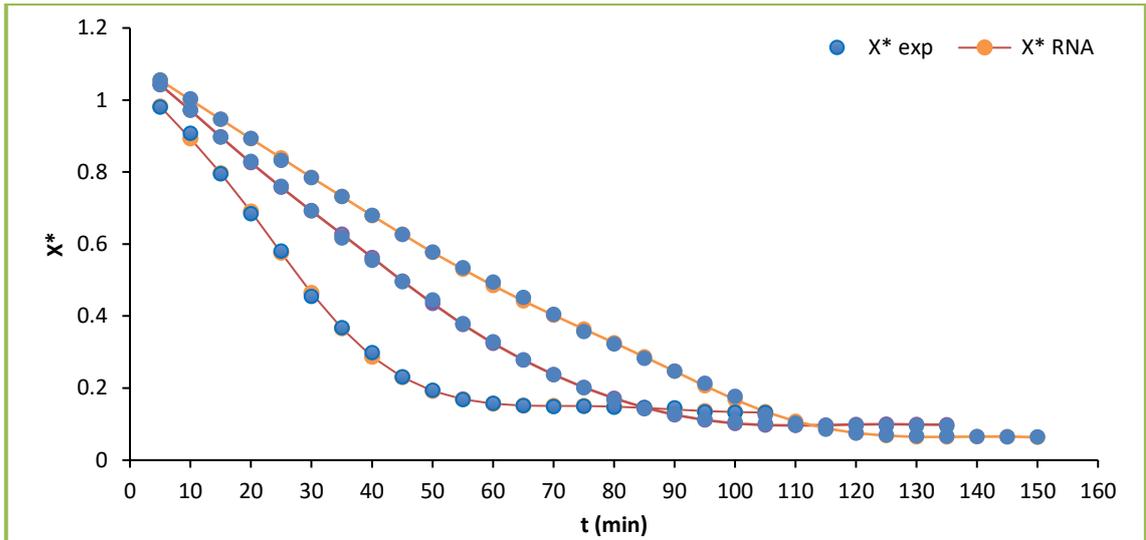
Le modèle de réseau de neurones artificiels (RNA) a été entraîné à l'aide des données expérimentales de température, vitesse de l'air et de temps comme entrées, et le taux de teneur en eau réduite  $X^*$  comme sortie. Après l'entraînement, on a obtenu les résultats suivants :

**Tableau IV.3:** l'analyse statistique du modèle optimisé.

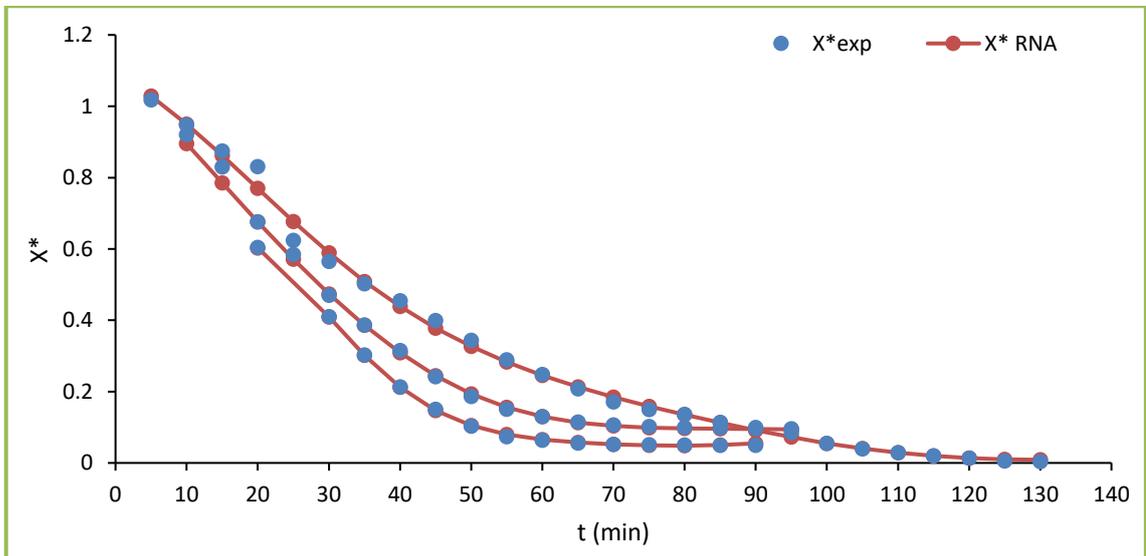
<i>L'analyse statistique du modèle RNA optimisé</i>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>MSE</b>	<b>RMSE</b>
	0.9995	0.999	0.00009233	0.0096

Le bon ajustement entre les courbes expérimentales et celles issues du réseau figure **IV.12** confirme le choix judicieux du nombre de neurones dans la couche cachée. En effet, après plusieurs essais, la structure retenue a permis de minimiser l'erreur quadratique moyenne MSE tout en maximisant le coefficient de corrélation R, traduisant ainsi une excellente capacité de généralisation du modèle.

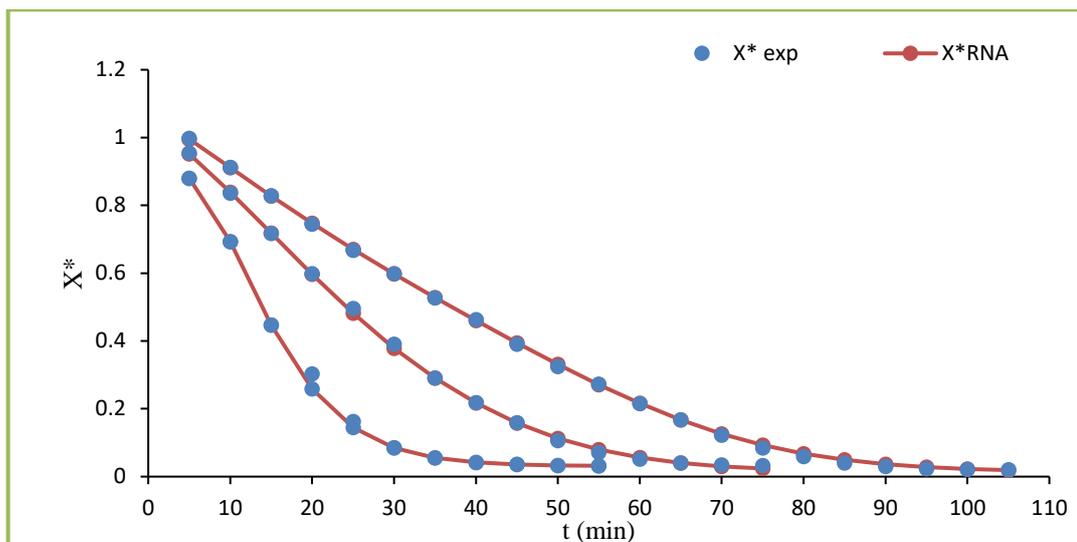
Ce résultat illustre que le réseau est parvenu à apprendre la dynamique du séchage sans surajuster les données, ce que valide la pertinence des paramètres choisis lors de la phase d'entraînement.



*Figure IV.13: comparaison entre  $X^*$  expérimentales et  $X^*$  prédites pour 0.5 m/s*



*Figure IV.14: comparaison entre  $X^*$  expérimentales et  $X^*$  prédites par RNA pour 1m/s*



**Figure IV.15:** comparaison entre  $X^*$  expérimentales et  $X^*$  prédites par RNA pour 2 m/s.

On observe une excellente concordance entre les données expérimentales du teneur en eau réduit  $X^*$  et les prédictions du modèle RNA. La courbe générée par le réseau suit de très près les points expérimentaux, ce qui reflète la capacité du réseau à modéliser fidèlement la cinétique de séchage de *Salvia officinalis*.

Cette performance est également confirmée par les indicateurs statistiques R et RMSE. Ce résultat illustre que le réseau est parvenu à apprendre la dynamique du séchage sans surajuster les données, ce que valide la pertinence des paramètres choisis lors de la phase d'entraînement.

### 3.2.2 Application du modèle RNA : vers une alternative à l'expérimentation

L'une des principales contributions de ce travail réside dans la mise en place d'un modèle prédictif performant basé sur les réseaux de neurones artificiels RNA, capable de simuler avec précision la cinétique de séchage de *Salvia officinalis* en fonction des paramètres opératoires (température, temps, vitesse de l'air).

Une telle approche ouvre la voie à une réduction significative du recours aux expérimentations physiques en laboratoire, souvent longues, coûteuses et parfois destructives pour les échantillons.

Grâce à ce modèle, il devient possible : de prédire, d'optimiser et de simuler le comportement du produit sous diverses conditions de séchage (T, V, t) non testées au laboratoire sans avoir besoin de tests répétitifs.

Ainsi, ce modèle RNA pourrait progressivement compléter voire remplacer certaines étapes expérimentales, en servant de base à des décisions techniques, économiques et environnementales dans le domaine du séchage agroalimentaire.

### **Conclusion**

La modélisation de la cinétique de séchage de *Salvia officinalis* par les réseaux de neurones artificiels a montré une excellente capacité prédictive. Grâce à l'utilisation de l'outil nntool de MATLAB, il a été possible de construire un modèle performant, capable de prédire avec précision l'évolution du teneur en eau réduit  $X^*$  en fonction du temps, de la température et de la vitesse de l'air.

Les indicateurs statistiques tels que le coefficient de corrélation élevé ( $R= 0.9995$ ) et la faible erreur quadratique moyenne ( $MSE = 0.00009233$ ) confirment la qualité d'ajustement. Cela suggère que les RNA constituent un outil puissant et fiable pour la modéliser des processus complexes comme le séchage des plantes médicinales et aromatiques.





***Conclusion Générale***



Ce travail s'est inscrit dans le cadre de la valorisation des plantes médicinales locales, en particulier *Salvia officinalis* L., par l'étude du séchage comme technique de conservation et d'optimisation de la qualité. L'objectif principal de ce mémoire était de modéliser la cinétique de séchage de cette plante aromatique en utilisant une approche basée sur les réseaux de neurones artificiels (RNA).

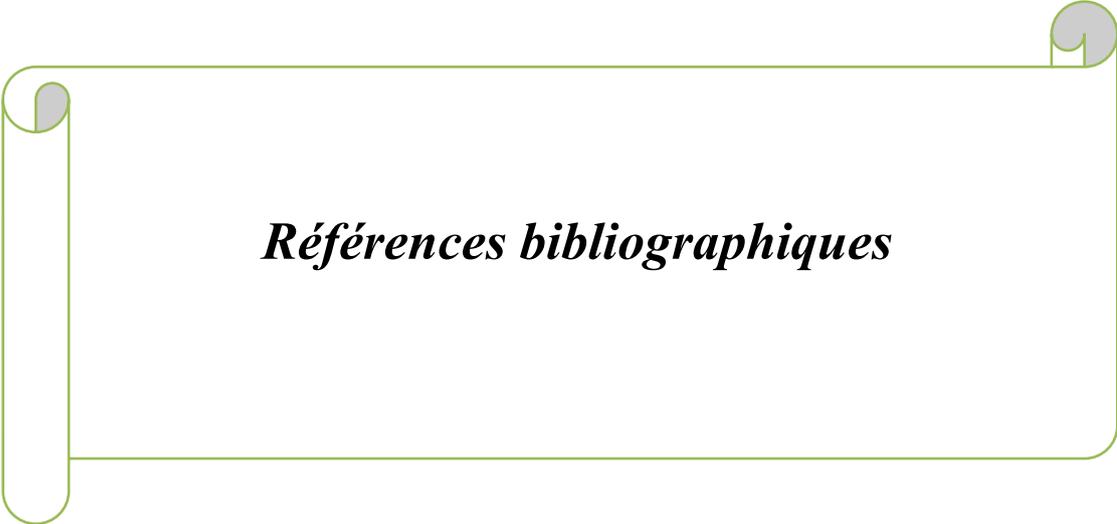
Dans une première étape, nous avons présenté les fondements théoriques du procédé de séchage, ses mécanismes physiques, les paramètres influents ainsi que les différents modèles mathématiques classiquement utilisés pour décrire la cinétique de perte d'humidité. Ensuite, une attention particulière a été portée aux réseaux de neurones artificiels, outils puissants de modélisation non-linéaire, dont l'architecture, le fonctionnement et les applications ont été exposés.

La partie expérimentale a permis d'évaluer l'influence de la température et de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage de *Salvia officinalis*, en déterminant les profils de teneur en eau réduite ( $X^*$ ) en fonction du temps. Les résultats ont montré que l'augmentation de la température et de la vitesse de l'air améliore considérablement la vitesse de séchage, tout en nécessitant une attention particulière à la préservation des composés actifs de la plante.

Enfin, les données expérimentales ont été exploitées pour entraîner un réseau de neurones de type Perceptron Multicouche sous MATLAB. Le modèle développé a montré une bonne capacité prédictive, avec des valeurs satisfaisantes du coefficient de corrélation ( $R=0.9995$ ) et de l'erreur quadratique moyenne ( $MSE=0.00009233$ ), confirmant l'efficacité de cette méthode dans la simulation de processus de séchage.

Ainsi, la modélisation par RNA constitue un outil pertinent et prometteur pour optimiser les procédés de transformation des plantes médicinales, en permettant d'adapter les conditions opératoires aux propriétés spécifiques de chaque produit. Des travaux futurs pourraient explorer d'autres architectures de réseaux, élargir la base de données ou intégrer d'autres paramètres de qualité comme la couleur ou la teneur en huiles essentielles.





***Références bibliographiques***

## Références bibliographiques

- [1] Naouel, O. “*Etude chimique et biologique des huiles essentielles de coriandre, de fenouil et de persil*”, Thèse de Doctorat. Université AHMED BEN BELLA. Oran 1. 2015.
- [2] Bruneton, J. « Pharmacognosie », Plantes médicinales, Ed. Lavoisier, Techniques et Documentation, Paris 1999.
- [3] Lahmari N, Fahloul D et Azani I. “*Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra)*”, Revue des Energies Renouvelables. 15(2) :285 – 295.2012.
- [4] Heldman, D. R., D. B. Lund, et al. Handbook of food engineering, CRC press.2006.
- [5] Keskes, S., Hanini, S., Hentabli, M., and Laidi, M. “*Artificial Intelligence and Mathematical Modelling of the Drying Kinetics of Pharmaceutical Powders*”. Kem. U Ind. Časopis Kemičara Kem. Inženjera Hrvat. 69, 137–152. 2020.
- [6] Samoticha, J., Wojdyło, A., & Lech, K. “*The influence of different the drying methods on chemical composition and antioxidant activity in chokeberries*”. LWT-Food Science and Technology, 66, 484-489. 2016.
- [7] Arlabosse, P., Séchage industriel. Technique de l’ingénieur.2008.
- [8] Djerroud, D., “*Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation*”. Dr. Diss. 1–181.2010.
- [9] Koller, E., Aide-mémoire de Génie chimique, 3rd edition. Paris.2009.
- [10] Seghier, A., Rouas, S., “*Étude du retrait au cours du séchage des fruits Soutenu*”. Thèse de Master, Université Kasdi Marbah Ouargla.2016.
- [11] Touati B., “*Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (Mentha viridis)*”. Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen.2008.
- [12] Cavailé, R., Charreau, A., Séchage: théorie et calculs. Génie des procédés..Tech. De’Ingénieur.1995. Charreau, A., Cavaille, R., Séchage théorie et pratique. Tech. De’Ingénieur.1991
- [13] Trichaiyaporn, S., “*Contribution à l’étude du séchage en discontinu de sucre cristallisé en lit fluidisé*”. Thèse de Doctorat.1991.

- [14] Mennouche, D., "*Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par le procédé de séchage solaire*". Thèse de Magistère, Université Kasdi Marbah Ouargla. 2006.
- [15] Jannot, Y., Isothermes de sorption : modèles et détermination. Solutions 1–16. 2008.
- [16] S. MOKRETAR, "*contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir solaire de type serre. Application à la détermination de la cinétique de séchage des prunes*"., Mémoire de Magister, USTHB, 2009.
- [17] BECHERAIR M. TRIKI H., "*Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage par micro-ondes des agrumes en couche mince*"., Université Yahia Fares Médéa. 2019.
- [18] Mujumdar, A. S. Handbook of industrial drying (4<sup>th</sup> ed.). CRC Press. ISBN: 9781466596654. 2014.
- [19] DEGLA.A, SIOUED.R. "*Séchage Solaire Des Dattes Deglet-Nour : Simulation Numérique*"., Mémoire de Master, Université Kasdi Marbah Ouargla. 2015.
- [20] Mouafki, A. "*Modélisation-Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe*", Mémoire de Magister, Université de Ouargla. 2004.
- [21] NOGBOU, Arsène, D. C. AKMEL, Kouakou BROU, and Nogbou Emmanuel ASSIDJO. "*Sechage Des Feves De Cacao Par Des Modeles Semi-Empiriques Et Par Un Reseau De Neurones Artificiels Recurrent: Cas Du Sechage Microonde Par Intermittence.*" European Scientific Journal 11(9): 118–33. 2015.
- [22] Oussar, Y. "*Réseaux d'ondelettes et Réseaux de Neurones pour la Modélisation Statique et Dynamique de Processus*" Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI. 1998.
- [23] Sontag, E.D. Neural Networks for Control. In Essays on Control. Springer, pp. 339–380. 1993.
- [24] McCulloch.W. S and Pitts. W, "*A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*", Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 5, no. 4, pp. 115–133, Dec. 1943.
- [25] Minsky. M, Papert. S, "Perceptrons". Massachusetts Institute of Tech. Press, Cambridge, USA, 1969.

- [26] Lecun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.2015.
- [27] Fenineche. H. "*Application des réseaux de neurones artificiels au diagnostic des défauts des machines tournantes*". Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas – setif. 2018.
- [28] Hamadache. M. "*Modélisation en vue de la prédiction ou la corrélation de l'active toxicologique à partir de la structure moléculaire.*" Thèse de Doctorat, université de Médéa, Algérie, 2014.
- [29] Djaballah, M. A. "*Prédiction de la consommation d'énergie par Deep Learning*", Mémoire de Master, Université de Guelma.2021.
- [30] Hassoun M. H. "Fundamentals of artificial neural networks." Mit Press, Massachusetts, USA. 1995.
- [31] Rahmoune M. "*Diagnostic des défaillances d'une turbine à gaz à base des réseaux de neurones artificiels pour l'amélioration de leur système de détection des vibrations*". Thèse de doctorat, Université Ziane Achour de Djelfa, 2017.
- [32] Selvi, K. Ç., Alkhaled, A. Y., & Yildiz, T. "*Application of artificial neural network for predicting the drying kinetics and chemical attributes of linden (Tilia platyphyllos Scop.) during the infrared drying process*". *Processes*, 10(10), 2069.2022.
- [33] SI MOUSSA. C, "*Modélisation des équilibres de phases à pressions élevées par les réseaux de neurones artificiels.*" thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique.2010.
- [34] Laidi, M, Hanin, S. Optimal Solar COP prédiction of a solar-assisted adsorption refrigeration system working with activated carbon/methanol as working pairs using direct and inverse artificial neural network. *Int. J. Refrig.* 36, 247-257, 2013.
- [35] Benaouda, N. E., Bennamoun, L., & Khellaf, A. "*Empirical and Artificial Neural Network Approach for Determination of Constant Drying Rate Phase of Medicinal and Aromatic Plants*". *International Journal of Energy Engineering*.2014.
- [36] Brindisi, M., Bouzidi, C., Frattaruolo, L., Loizzo, M. R., Cappello, M. S., Dugay, A., Deguin, B., Lauria, G., Cappello, A. R., & Tundis, R. "*New insights into the antioxidant and anti-inflammatory effects of Italian Salvia officinalis leaf and flower extracts in*

*lipopolysaccharide and tumor-mediated inflammation models*". *Antioxidants*, 14(1), 123.2025.

[37] Wang, Y., et al. "*Effects of Salvia officinalis on cognitive function: A systematic review and meta-analysis.*" *Frontiers in Pharmacology*, vol. 12, 2021.

[38] Houghton, P. J., & Raman, A. "*Herbal medicine: A guide for health-care professionals*". Pharmaceutical Press.2005.

[39] Fellah, S., Romdhane, M., Abderraba, M. "*Extraction et étude des huiles essentielles de la Salvia officinalis cueillie dans deux régions différentes de la Tunisie*", *Journal de la Société Algérienne de Chimie*, 16(2) :193-202.2006.

[40] Quezel, P., & Santa, S. "*Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*". Ed, CNRS. Paris. Tom. 2: 793p.1963.

[41] Scully, R., "*Key to lamiaceae of Colorado (MintFamily)*". Colorado, USAUniv Colorado Press.2008.

[42] GOUTIER. J., "*L'herbier des jardins collection de plantes vivrières aromatiques médicinales et ornementales*". La Maison Rustique Flammarion.2009.

[43] VERBOIS. S., "*Plantes et herbes aromatique saveurs et vertus*", Fernande Lanore, 234p.2003.

[44] HANS. D., KOTHE.W., "*1000 Plantes aromatiques et médicinales*", Terres Edition.2007.

[45] Ghourri Mohamed., Zidane Lahcen&Douira Allal. "*Usage des plantes médicinales dans le traitement du Diabète Au Sahara marocaine (Tan-Tan)*", *Journal of Animal & Plant Sciences*, 17 :1, 2388-2411.2013.

[46] MADI. A., "*Caractérisation et comparaison du contenu polyphénolique de deux plantes médicinales (Thym et Sauge) et la mise en évidence de leurs activités biologiques*", mémoire de magister, à l'Université Mentouri Constantine.2010.

[47] GILLY. G., "*Les plantes aromatiques et huiles essentielles à grasse : Botanique, Culture, Chimie Production et Marché*", Edition l'Harmattan.2005.

[48] AOUDHI. S., "*Atlas des risques de la phytothérapie traditionnelle a étude de 57 plantes recommandées par les herboristes*", mémoire de master, à la faculté de médecine de Tunis.2010.

- [49] Baricevic et al. "*Journal of Ethnopharmacology*.", (activité anti-inflammatoire). 2001.
- [50] Bommer et al. "*Advances in Therapy*.", (effet sur les bouffées de chaleur).2011.
- [51] EMA. "*European Union Herbal Monograph on Salvia officinalis*".2016.
- [52] Shan, B., et al. "*Antioxidant capacity of 26 spice extracts and characterization of their phenolic constituents.*" *Journal of Agricultural and food Chemistry*, 53(20), 7749-7759.2005.
- [53] Máthé, A. "*Essential Oils in Food and Cosmetics*". Medicinal and Aromatic Plants of the World.2015.
- [54] Boudjelal, A., HENCHIRI, C., SARI, M., SARRI, D., HENDEL, N., BENKHALED, A., RUBERTO, G. "*Herbalists and wild medicinal plants in M'Sila (North Algeria): An ethnopharmacology survey*". *Journal of Ethnopharmacology*148, 395-402.2013.
- [55] Sellami, I. H., WANNES, W. A., BETTAIEB, I., et al. "*Qualitative and quantitative changes in the essential oil of Salvia officinalis L. leaves under drying process.*" *Industrial Crops and Products*, 34(3), 1086–1092.2011.
- [56] Bahramsoltani, R., et al. "*Salvia officinalis L. (Sage): A review of its phytochemical and pharmacological properties.*" *Journal of Ethnopharmacology*, 175, 13–30.2015.
- [57] Dadda, M., & Mejourri, A. "*Séchage et qualité des aliments par le procédé de séchage solaire*". Université de Ouargla.2020.
- [58] Wickramasinghe, Yasara W. H., Indira Wickramasinghe, and Isuru Wijesekara. "*Effect of Steam Blanching, Dehydration Temperature & Time, on the Sensory and Nutritional Properties of a Herbal Tea Developed from Moringa oleifera Leaves.*" *International Journal of Food Science*, Article ID 5376280,2020.
- [59] Laïdi, M., Hanini, S., "*Approche neuronale pour l'estimation des transferts thermiques dans un fluide frigoporteur diphasique*". *Rev. Des Energies Renouvelables* 15, 513–520.2012.
- [60] Jebri, M. et al. "*Drying of Salvia officinalis L. by hot air and microwaves: dynamic desorption isotherms, drying kinetics and biochemical quality*" *Heat and Mass Transfer* 55:1143–1153.2018.

