

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

Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★



Faculté des Sciences et de la technologie

Département de la technologie

Mémoire de projet de fin d'études présenté en vue de l'obtention du Diplôme de

Master

Spécialité : Génie Mécanique

Option : énergétique

Thème

***Déshumidification d'air par
dessiccation solide***

Réalisé par :

AYAD Mohamed

Encadré par :

Dr. B. KHELIDJ

UDBKM

Co- Encadré par :

Dr. F. BOUZEFFOUR

UDES

Année Universitaire 2019/2020

Résumé

Ce mémoire représente le travail accompli dans le cadre du projet de fin d'études intitulé : déshumidification d'air par dessiccation solide. Le conditionnement d'air est l'action de maîtriser de façon volontaire la température et l'humidité d'un volume d'air pour satisfaire le confort thermique des utilisateurs. Afin d'apporter notre contribution à cet effort, nous nous sommes intéressés à la technique de déshumidification par dessiccation solide qui peut apporter des solutions durables pour la climatisation et le conditionnement d'air dans les zones chaudes et humides. L'objectif de ce projet est d'une part l'étude et la réalisation d'un prototype de déshumidificateur. D'autre part la modélisation et la simulation du fonctionnement de ce système, par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels. Les premiers tests réalisés sur notre prototype montrent que notre système fonctionne et que les résultats des essais sont pertinents.

Mots clés : Déshumidification, Dessiccation solide, Silica gel, Confort, Conditionnement d'air.

Abstract

This memoir represents the work accomplished within the framework of the end of studies project entitled: air dehumidification by solid drying. Air conditioning is the act of voluntarily controlling the temperature and humidity of a volume of air to satisfy the thermal comfort of users. In order to contribute to this effort, we looked at the solid desiccant dehumidification technique which can provide durable solutions for air conditioning and air conditioning in hot and humid areas. The objective of this project is on the one hand the study and the realization of a prototype of dehumidifier. On the other hand, the modeling and simulation of the functioning of this system, by applying the approach of artificial neural networks. The first tests carried out on our prototype show that our system works and that the test results are relevant.

Keywords: Dehumidification, Solid desiccation, Silica gel, Comfort, Air conditioning.

ملخص

تمثل هذه الرسالة العمل المنجز في إطار مشروع نهاية الدراسات بعنوان: تجفيف الهواء بواسطة التجفيف الصلب. إن تكييف الهواء هو التحكم الطوعي في درجة حرارة ورطوبة حجم الهواء لإرضاء الراحة الحرارية للمستخدمين.

من أجل تقديم مساهمتنا في هذا الجهد، نظرنا إلى تقنية التجفيف الصلبة المجففة التي يمكن أن توفر حلولاً دائمة لتكييف الهواء وتكييف الهواء في المناطق الحارة والرطبة. الهدف من هذا المشروع هو من ناحية دراسة وتحقيق نموذج أولي لمزيل الرطوبة. من ناحية أخرى، نمذجة ومحاكاة أداء هذا النظام، من خلال تطبيق نهج الشبكات العصبية الاصطناعية. تُظهر الاختبارات الأولى التي أجريت على نموذجنا الأولي أن نظامنا يعمل وأن نتائج الاختبار ذات صلة.

لكلمات المفتاحية: التجفيف، التجفيف الصلب، السيليكا جل، الراحة، التكييف.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

Tout d'abord à mes très chers parents en témoignage pour tout ce qu'ils ont sacrifié pour moi.

Ensuite à mes sœurs, mes frères et mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

AYAD Mohamed

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la force et le courage pour surmonter toutes les difficultés et terminer la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon directeur, de mémoire de Projet de Fin d'Etudes, le docteur B. KHELIDJ ainsi que mon co-directeur de mémoire le docteur F. BOUZEFFOUR, qui ont accepté d'être les promoteurs de mon projet.

Je leur exprime ici toute ma profonde gratitude pour la confiance, les encouragements et la liberté qu'ils m'ont accordé durant tout le temps de réalisation de mon mémoire et pour les idées et les critiques très constructives qu'ils m'ont fournies ainsi que pour leur disponibilité.

J'adresse aussi mes remerciements à tous mes professeurs des années précédentes et en particulier ceux du département de la technologie.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui de près ou de loin m'ont apporté leur aide.

Table des matières

Résumé	I
Dédicaces	II
Remerciements	III
Table des matières	IV
Listes des figures et des tableaux	V
Nomenclature	IX
Introduction générale	1
Chapitre I : Les systèmes de déshumidification	
I.1. Introduction	2
I.2. Etat de l'art	2
I.3. Déshumidification par dessiccation liquide	3
I.3.1 Conclusion sur la dessiccation liquide	4
I.4. Déshumidification par dessiccation solide	5
I.4.1 Types de déshumidification à dessiccation solide	6
I.5. Définitions de l'adsorption	9
I.5.1 Adsorption physique	10
I.5.2 Adsorption chimique	10
I.5.3 Thermodynamique de l'adsorption	11
I.5.4 Les adsorbants solides	13
I.6 Avantages et inconvénients d'un système à dessiccation solide	15
I.7. Propriétés de l'air humide	16
I.7.1 Pression de la vapeur saturante	16
I.7.2 Rapport d'humidité	17
I.7.3 Humidité relative	17
I.7.4 Température humide « Température de bulbe humide »	17
Chapitre II : Eléments de réalisation d'un système à dessiccant solide	
II.1. Introduction	18

Table des matières

II.2. Importance des conditions climatiques	18
II.2.1 Emplacement géographique	19
II.2.2 Les conditions climatiques de khemis miliana	19
II.3. Déshumidification par dessiccation solide	19
II.4. Description de l'installation	22
II.4.1 Les dimensions du prototype	22
II.4.2 Matériel et produit dessiccant	22
II.5. Mise en service de l'installation	26
Chapitre III : Modélisation par l'approche de réseaux de neurones artificiels	
III.1. Introduction	28
III.2. Matlab	28
III.3. Application des réseaux de neurones dans les systèmes de déshumidification solide	29
III.4. Principe d'un réseau neurone artificiel	30
III.5. Architecture des réseaux de neurones	32
III.6. Algorithme d'apprentissage	33
III.7. Identification des paramètres du modèle	34
III.7.1 Initialisation	35
III.7.2 Nombre de couches cachées et de neurones	35
III.7.3 Valeurs des poids	35
III.7.4 Algorithmes de formation	35
III.7.5 Fonctions de transfert	36
III.7.6 Evaluation du modèle neuronal	36
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1. Introduction	37
IV.2. Présentation du banc d'essais	37
IV.3. Résultats expérimentaux	38
IV.3.1 Evolution de la température et de l'humidité en fonction du temps	38
IV.3.2 Evolutions de la température et de l'humidité de l'air pour différentes vitesses	39
IV.3.3 Influence de la vitesse de l'air sur la température et l'humidité relative	41

Table des matières

IV.3.4 Influence de la masse du silicagel sur l'évolution de la température de l'air	41
IV.3.5 Influence de la masse du silicagel sur l'évolution de l'humidité relative de l'air	42
IV.4. Résultats de prédiction par les réseaux de neurones	43
IV.4.1 Modélisation de la température l'air à la sortie	46
IV.4.2 Modélisation de l'humidité relative de l'air à la sortie	48
IV.5. Comparaison des résultats expérimentaux et prédits	50
Conclusion générale	52
Références Bibliographiques	54
Annexe	56

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
Figure I.1	Technologie de climatisation par déshumidification	02
Figure I.2	Système à dessiccant liquide	03
Figure I.3	Tour dessiccante remplie de solide	06
Figure I.4	Lit horizontal tournant	07
Figure I.5	Lit vertical multiple	07
Figure I.6	Roue déshydratante rotative	08
Figure I.7	Processus de l'adsorption	09
Figure I.8	Représentations graphiques des différents équilibres d'adsorption A : (T= cste), B : (T= cste), C : (m= cste)	11
Figure I.9	Types d'isothermes d'adsorption	12
Figure I.10	Grains de charbon actif	13
Figure I.11	Gel de silice	14
Figure I.12	Digramme psychrométrique	19
Figure II.1	diffèrent climat en Algérie	18
Figure II.2	température et humidité de mois mai 2020	19
Figure II.3	température et humidité de l'année 2019	19
Figure II.4	Schéma représentatif du processus d'adsorption et de désorption	20
Figure II.5	Schéma du déshumidificateur à dessiccation solide expérimental	21
Figure II.6	Photographie de l'installation de déshumidificateur solide	21
Figure II.7	Eléments de l'installation de déshumidificateur solide	22

Liste des figures et des tableaux

Figure II.8	Photographie d'une soufflerie	23
Figure II.9	Matériau dessiccant (silicagel)	24
Figure II.10	Photographie d'un échantillon de silicagel	24
Figure II.11	Photographie d'un hygromètre	25
Figure II.12	Photographie d'un Anémomètre a affichage LCD	26
Figure II.13	Installation de déshumidification à dessiccation solide avec régulateurs	27
Figure III.1	l'interface du logiciel Matlab	28
Figure III.2	Réseau de Neurones Artificiels	29
Figure III 3	Schématisation d'un réseau neuronal biologique	31
Figure III 4	Modèle non linéaire d'un neurone	31
Figure III 5	Structure d'un perceptron multicouche	33
Figure III 6	Apprentissage supervisé	34
Figure.IV.1	Banc d'essais du prototype	37
Figure IV.2	Evolution de la température à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur ($v_1=1\text{m/s}$)	38
Figure IV.3	Evolution de l'humidité relative à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur ($v_1=1\text{m/s}$)	39
Figure IV.4	Evolutions de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur pour différent vitesse d'air	40
Figure IV.5	Evolutions de l'humidité relative à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur pour différent vitesse d'air	40
Figure IV.6	Influence de la vitesse de l'air sur la température et de l'humidité de l'air	41
Figure IV.7	Evolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur pour différentes masses de silicagel	42
Figure IV.8	Evolution de l'humidité relative à la sortie du déshumidificateur pour différentes masses de silicagel	44

Liste des figures et des tableaux

Figure IV.9	Variables d'entrées utilisées pour prédire la température d'air à la sortie	44
Figure IV.10	Structure du réseau de neurones pour prédire la température d'air à la sortie	44
Figure IV.11	Variables d'entrées utilisées pour prédire l'humidité relative à la sortie	45
Figure IV.12	Structure du réseau de neurones pour prédire l'humidité relative à la sortie	45
Figure IV.13	Erreur quadratique moyenne pour la formation, validation et test, (Tas)	47
Figure IV.14	Coefficient de régression obtenu lors de la formation, (Tas)	48
Figure IV.15	Erreur quadratique moyenne pour la formation, validation et test, (HRs)	49
Figure IV.16	Coefficient de régression obtenu lors de la formation, (HRs)	50
Figure IV.17	Comparaison des températures expérimentales et prédites	50
Figure IV.18	Comparaison des humidités relatives expérimentales et prédites	51

Liste des tableaux

Numéro	Titre	Page
Tableau I.1	Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique	10
Tableau I.2	Valeurs des constantes de l'équation	15
Tableau II.1	Caractéristique de la soufflerie	23

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
m	Masse	Kg
P	Pression	kPa
T	Température	°C
C	Coefficients	[-]
W	Humidité spécifique	Kg/kg
m_{ve}	Masse de vapeur d'eau	Kg
m_a	Masse d'air sec	Kg
Pa	Pression partielle de l'air sec	kPa
P_v	Pression partielle de la vapeur d'eau	kPa
P_{vs}	Pression de la vapeur d'eau sature	kPa
Pve	Pression de la vapeur d'eau	kPa
Patm	Pression atmosphérique	kPa
V	Volume	m ³
Φ	Humidité relative	(%)
x_m	Signaux d'entrée	[-]
v_k	Sortie du combineur linéaire due aux signaux d'entrée	[-]
b_k	Biais	[-]
y_k	Signal de sortie du neurone	[-]
MSE	Erreur quadratique moyenne	[-]
R	Coefficient de détermination	[-]
ma	Débit de l'air	Kg/s
Tae	Température d'air entrée	°C
Tas	Température d'air sortie	°C
HRe	Humidité relative à l'entrée	(%)
HRs	Humidité relative à la sortie	(%)



Introduction Générale



Introduction générale

Parmi les facteurs environnementaux influençant sur la qualité de l'air intérieur d'un édifice, on trouve le taux d'humidité relative. Il faut savoir qu'un taux d'humidité trop bas peut être à l'origine de troubles respiratoires et de maux de tête. L'inverse est tout aussi problématique, car un taux d'humidité trop élevé provoque l'apparition de moisissures et de champignons dans l'édifice et il peut également être la cause de bon nombre de maladies pulmonaires. A noter aussi que les occupants et leurs types d'activités peuvent également représenter des facteurs qui influent sur la qualité de l'air.

Afin d'assurer la qualité de vie et le confort dans une maison, de nombreuses études scientifiques ont prouvé que le taux idéal d'humidité relative de l'air doit être compris entre 40% et 60% pour 20°C.

L'humidité, dans la Wilaya de Aïn Defla comme dans beaucoup de régions en Algérie, peut varier entre 15% et 95% ce qui représente une vraie problématique car le confort dans de nombreux édifices publics et les habitations n'est pas assuré. Pour essayer apporter une réponse à la question « comment peut-on assurer durablement le confort dans un édifice ? » nous avons conçu et tester un prototype de déshumidification à dessiccation solide qui peut être dans l'avenir couplé à un panneau solaire afin de préserver et réduire la consommation énergétique des édifices.

Ce mémoire s'articule essentiellement autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les systèmes de déshumidification de l'air et ses diverses technologies.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les principaux éléments utilisés dans l'installation de déshumidification de l'air par dessiccant solide tel que le déshumidificateur qui porte les matériaux adsorbants (Silicagel). Nous accordons, une attention particulière à la fabrication et le montage du prototype de déshumidification par dessiccation solide.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du déshumidificateur à dessiccant solide à cycle ouvert par l'application de l'approche de réseaux de neurones Artificiels. Nous utilisons l'environnement de MATLAB Tools (Neural network toolbox), pour simuler la technique de déshumidification de l'air durant la période d'adsorption.

Dans le quatrième chapitre nous présentons l'essentiel des résultats expérimentaux et numériques qui comportent l'évolution de l'humidité relative et de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur en fonction du temps pour différentes masses de l'adsorbant (Silicagel) et pour différentes vitesses de l'air.

Introduction générale

Enfin nous terminons ce travail, sur la déshumidification de l'air par dessiccant solide, par une conclusion générale.



Chapitre I

Les systèmes de déshumidification



I.1 Introduction

La déshumidification par dessiccation liquide ou solide est une méthode efficace pour l'élimination de l'humidité de l'air est une technique respectueuse de l'environnement. Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur la technologie de la déshumidification de l'air par dessiccation et en particulier la déshumidification par dessiccation solide. Nous donnons un bref historique sur les systèmes de déshumidification par dessiccation solide et les différents adsorbants utilisés.

I.2 Etat de l'Art

La technologie de déshumidification de l'air par dessiccation liquide ou solide est un domaine attractif de recherche et de développement, car la demande de contrôle de l'humidité est très importante. La figure 1, présente les différents types de déshumidification par dessiccation.

On distingue généralement plusieurs applications des systèmes de déshumidification :

- Déshumidificateurs domestiques : déshumidification destinée à réduire l'humidité d'un espace à un niveau satisfaisant les exigences des occupants de bureaux, d'hôpitaux, de salles de réunion ou salles de spectacles.
- Déshumidificateurs industriels : déshumidification destinée à réduire l'humidité d'un espace à un niveau nécessaire à la fabrication comme dans l'alimentation, l'électronique, le textile, l'électromécanique ou le stockage des marchandises et/ou des matériaux.

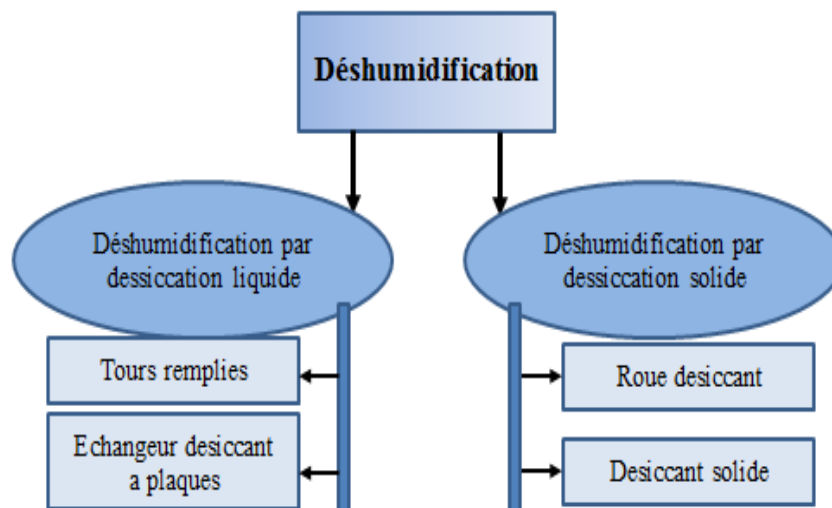


Figure I.1 : Technologie de climatisation par déshumidification

I.3 Déshumidification par dessiccation liquide

La déshumidification par solution liquide est une méthode efficace pour l'élimination de l'humidité de l'air. Les solutions liquides ayant un fort pouvoir hygroscopique sont des solutions ayant une pression partielle de vapeur saturante pour l'eau plus faible que l'eau liquide à une même température. Ces solutions liquides sont pulvérisées sur un substrat afin d'être mises en contact avec le flux d'air et capturent ainsi l'humidité de ce dernier en cas d'absorption, la relâchant en cas de désorption, ou régénération. Il existe quatre fluides dessiccants utilisés dans les applications de déshumidification. Ce sont le chlorure de lithium (LiCl) [1, 2], bromure de lithium (LiBr) [3, 4], chlorure de calcium (CaCl_2) [5,6] et Tri-éthylène Glycol (TEG) [7,8] à cause de leur capacité d'absorption élevée.

Dans le système de déshumidification par dessiccation liquide, la solution liquide circule entre un absorbeur et un régénérateur comme le montre la figure 2.

- L'air extérieur (1) entre dans l'absorbeur afin d'être déshumidifié. La chaleur d'absorption (réaction exothermique) est évacuée vers l'extérieur par la tour de refroidissement.
- L'air (2) traverse ensuite un humidificateur, afin d'être refroidi à la température souhaitée (3) puis est soufflé dans la pièce à rafraîchir,
- La solution diluée créée dans l'absorbeur est pulvérisée dans le désorbeur au-dessus de l'échangeur alimenté par la source chaude solaire (réaction endothermique)
- L'air ainsi chauffé (4) est humidifié et rejeté à l'extérieur (5). La solution concentrée obtenue est renvoyée vers le déshumidificateur pour un nouveau cycle.

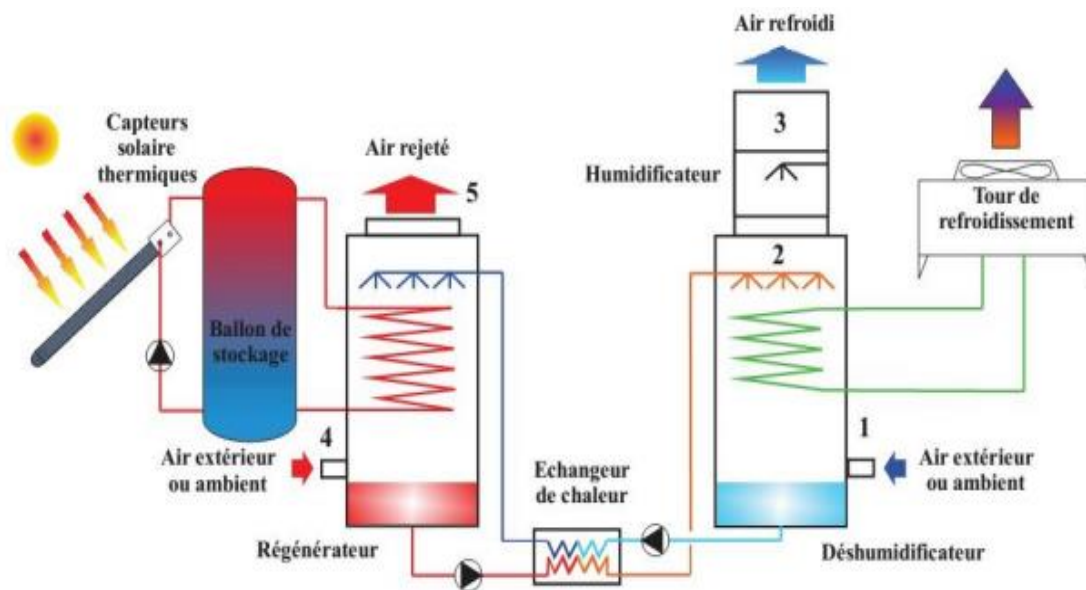


Figure I.2 : Système à dessiccant liquide [9].

I.3.1 Conclusion sur la dessiccation liquide

La dessiccation en phase liquide est encore actuellement au stade de développement. Chaque absorbeur présenté est un prototype développé par un laboratoire, et chaque système comprend ses propres spécificités. Les modèles prédictifs actuels ne permettent pas de calculer les performances de manière effective pour plusieurs absorbeurs. Dans l'optique d'une appréciation visant à optimiser le fonctionnement du cycle évaporatif à dessiccation, il n'est pas possible à l'heure actuelle de prendre en compte les systèmes utilisant la dessiccation liquide, car les technologies sont trop différentes pour appliquer des règles de fonctionnement ou de régulation pouvant s'appliquer à tous les systèmes.

Cependant, cette technologie est intéressante pour les raisons suivantes :

- Facilite le couplage avec un cycle à compression (séparation des charges latentes et sensibles).
- Composant intégré et compact.
- Possibilité de refroidir le processus d'adsorption pour augmenter la déshumidification et limiter l'échauffement de l'air de ventilation.
- La solution régénérée peut être stockée sous forme chimique. Cette forme de stockage ne se dégrade pas avec le temps, et d'après Kessling [98] il est possible de stocker jusqu'à 1300 MJ/m³ de solution stockée quand une masse d'eau dont la température augmente de 50 °C ne stocke que 209 MJ/m³.

I.4 Déshumidification par dessiccation solide

Les systèmes de déshumidification par dessiccation solide à cycle ouvert présentent l'avantage d'être absolument inoffensif pour l'environnement, car ils ont un potentiel d'appauvrissement de l'ozone, et de réchauffement climatique nul. Aussi ce système est basé sur le principe de phénomène adsorption-désorption. Plusieurs systèmes de déshumidification par dessiccation solide ont été conçus avec succès, construits et testés avec différents matériaux d'adsorbant.

Dans ce qui suit on donne une brève revue de la littérature récente et importante sur les systèmes de déshumidification par dessiccation solide. Kadoma et al. [10] ont étudié l'impact de la vitesse des roues dessiccantes, de la vitesse de l'air et de la température de régénération sur le COP. Les auteurs ont montré l'existence d'une vitesse optimale et ont établi que le COP diminuait lorsque le débit d'air augmentait et, au contraire, la température de régénération et la

capacité de refroidissement avaient la même tendance d'évolution. Techajunta et al. [11] ont utilisé du gel de silice comme adsorbant et ont étudié sa régénération avec l'énergie solaire simulée dans laquelle des ampoules électriques à incandescence ont été utilisées pour simuler l'irradiation solaire. Le taux de régénération s'est révélé être fortement dépendant de l'intensité du rayonnement solaire tandis que sa dépendance à l'égard du débit d'air s'est avérée faible. JIA et al. [12] ont étudié un système de refroidissement à dessiccant solide rotatif à haute performance utilisant une nouvelle roue à dessiccant composé. La caractéristique unique de la roue déshydratante est qu'elle peut bien fonctionner sous une température de régénération inférieure et avoir une capacité de déshumidification plus élevée en raison de l'apport des nouveaux matériaux déshydratants composés de silicagel. Leurs résultats expérimentaux indiquent que la nouvelle roue de dessiccant en fonctionnement pratique peut éliminer plus d'humidité de l'air de traitement d'environ 20 à 40 % par rapport à la roue de dessiccateur utilisant du silicagel ordinaire et le nouveau dessiccant composite est plus hygroscopique et plus facilement régénéré. M.A. Mandegari et H. Pahlavanzadeh [13] ont étudié expérimentalement le fonctionnement d'un système de déshumidification de la roue déshydratante. Les conditions expérimentales comprennent différents climats (chaud sec et chaud humide) à différents paramètres de fonctionnement (température de régénération et vitesse des roues). Toutes les expériences montrent que l'enthalpie de l'air de processus de sortie est notablement plus élevée que celle de l'air d'entrée. Cet événement a conclu que les dessiccants solides sont très prometteurs et produisent un degré de déshumidification plus élevé. T.S. Ge et al [14] ont étudié expérimentalement les performances d'un nouveau système de refroidissement par dessiccation en rotation à deux étages. Un dessiccant composé, nouvellement développé (gel de silice – haloïdes) a été utilisé dans le système. Les performances du système ont été calculées en termes d'élimination de l'humidité et du coefficient thermique de performance. De plus, les effets de certains paramètres de fonctionnement importants, tels que la température d'entrée, le taux d'humidité de l'air et le procédé de régénération, sur les performances du système ont été également discutés.

Plusieurs dessiccants liquides sont disponibles dans le commerce : le triéthylène glycol (TEG), l'éthylène glycol et les saumures telles que le chlorure de calcium, le chlorure de lithium, le bromure de lithium et le bromure de calcium sont utilisés seuls ou en combinaison. À ce stade, les dessiccants couramment utilisés dans le système de refroidissement de

dessiccant sont des solutions aqueuses de chlorure de lithium, de chlorure de calcium, de mélanges de ces solutions et de TEG.

I.4.1 Types de déshumidification à dessiccation solide

Dans les systèmes de déshumidification solides, l'air circule à travers le dessiccateur de matériau absorbant comme le gel de silice ou la zéolite. Lorsque l'air humide traverse le dessiccateur, il absorbe de la vapeur d'eau par le matériau solide (gel de silice ou la zéolite). Le dessiccant saturé est ensuite chauffé. Cela libère de l'humidité dans un flux d'air différent, séchant le dessiccateur afin qu'il puisse être réutilisé. Il existe actuellement quatre types généraux de systèmes de dessiccation solide. ils sont appelés : Tour remplie solide, Lit horizontal rotatif, Lit vertical multiple et Roue déshydratante rotative.

I.4.1.1 Tour remplie de solide

Le système de déshumidification, illustré à la figure I.3, se compose de deux caisses cylindriques côte à côte remplis de dessiccant solide. Le flux d'air à traiter passe à travers un dessiccateur sec dans l'un des récipients, tandis qu'un flux d'air chauffé passe sur le dessiccateur humide dans l'autre. L'adsorption a lieu dans le premier récipient, la désorption dans l'autre récipient et le refroidissement se produit dans le refroidisseur de dessiccant.

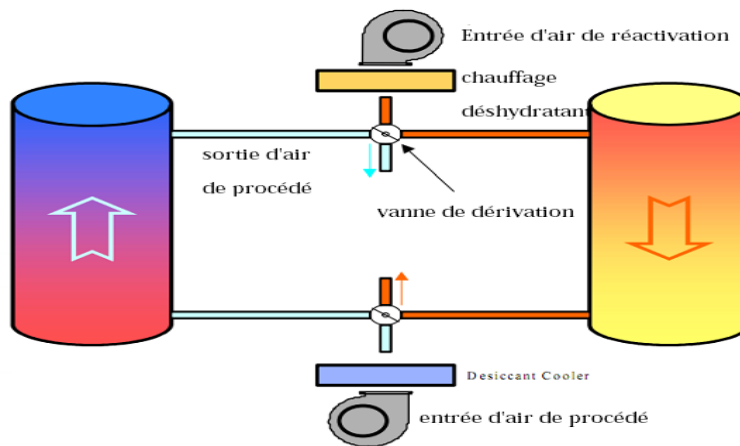


Figure I.3. Tour dessiccante remplie de solide

I.4.1.2 Lit horizontal rotatif

Un déshumidificateur à dessiccateur solide rotatif typique est illustré à la figure 4. Dans ce dispositif, le déshydratant sec et granulaire est contenu dans un lit rotatif plat et

segmenté qui tourne en continu entre les flux d'air de traitement et de régénération. Lorsque le lit tourne dans l'air de traitement, le dessiccant adsorbe l'humidité. Ensuite, le lit tourne dans le flux d'air de régénération, qui chauffe le dessiccant, augmentant sa pression de vapeur et libérant l'humidité dans l'air.

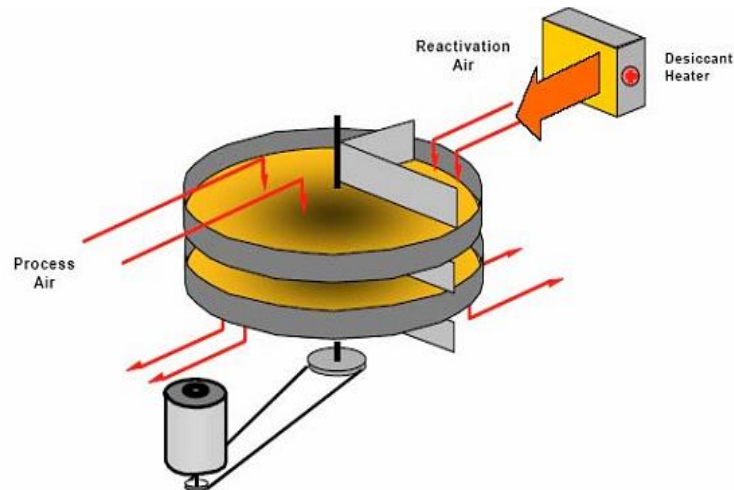


Figure I.4. Lit horizontal tournant

I.4.1.3 Lit vertical multiple

La conception à lit vertical multiple est un concept ``assez nouveau'', il est bien adapté aux applications de déshumidification à pression atmosphérique, comme le montre la figure.5. La tour simple ou double est remplacée par un carrousel circulaire avec plusieurs lits verticaux (tours) qui tournent, au moyen d'un système d'entraînement, entre les flux d'air de processus et de régénération.

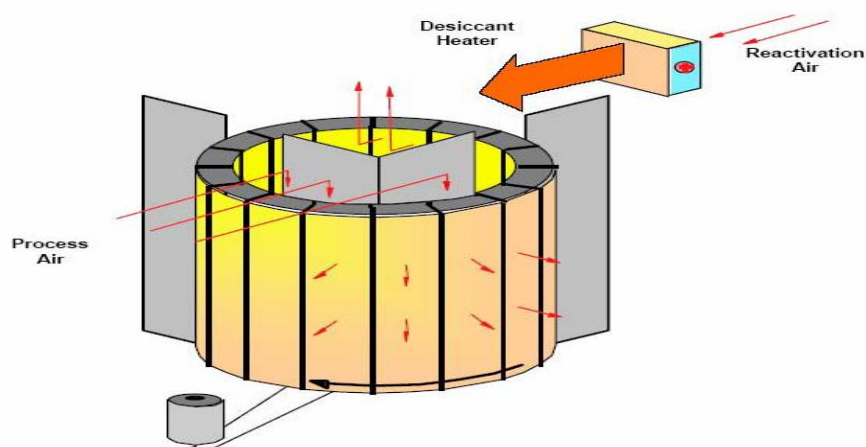


Figure I.5. Lit vertical multiple

I.4.1.4 Roue déshydratante rotative

Un déshumidificateur à dessiccateur solide rotatif est illustré à la figure 6. Contrairement au fonctionnement intermittent des tours remplies, les déshumidificateurs à dessiccateur rotatif utilisent une roue qui tourne en continu et fournit de l'air à des niveaux d'humidité constants. Le flux de traitement s'écoule à travers les canaux d'un segment, tandis que le flux de régénération (ou de réactivation) circule à travers l'autre segment.

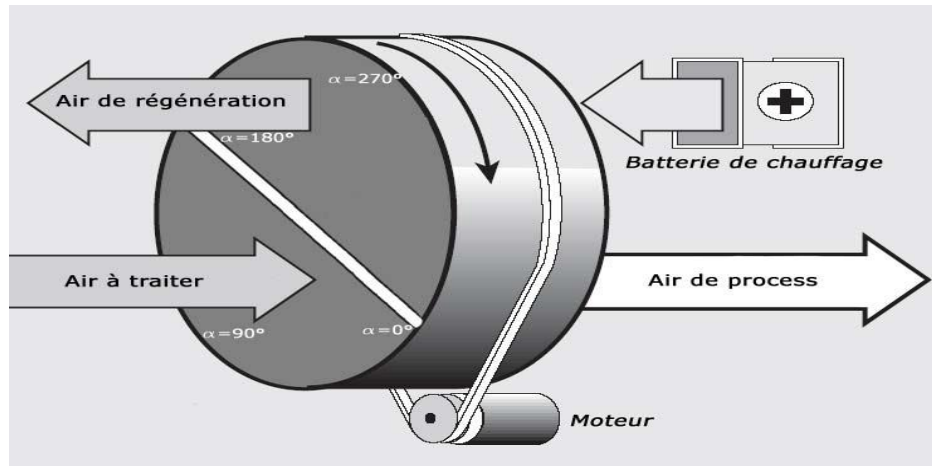


Figure I.6. Roue déshydratante rotative

Quelques considérations pour la sélection des roues déshydratantes sont :

- ✓ Matériaux déshydratants appropriés
- ✓ Grand contenu déshydratant
- ✓ Profondeur de roue et taille de flûte
- ✓ Taille et coût

Les performances réelles dépendent de plusieurs facteurs supplémentaires qui doivent être adressés. Ceux-ci incluent :

- ✓ Température et humidité de l'air du processus d'admission
- ✓ Humidité de l'air désirée pour le processus de sortie
- ✓ Entrée et réactivation de la température et de l'humidité de l'air
- ✓ Vitesse frontale des deux courants d'air
- ✓ Taille du segment de régénération

I.5 Définitions de l'adsorption

L'adsorption est le processus au cours duquel des molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé « adsorbat », viennent se fixer sur la surface d'un solide appelé « adsorbant ». Par la surface du solide, on sous-entend les surfaces externes et internes engendrées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur de l'adsorbant [15].

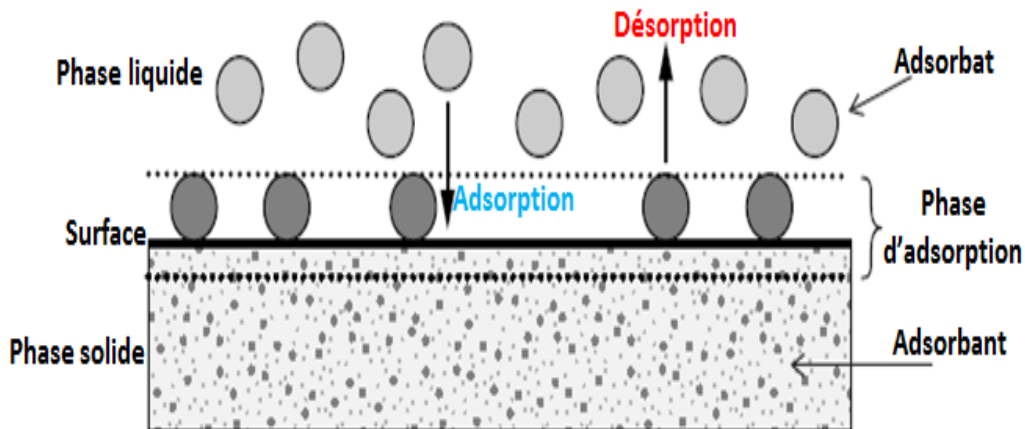


Figure I.7. Processus de l'adsorption

- L'adsorption est un processus exothermique qui se produit donc avec un dégagement de chaleur, ce qui peut conduire à un échauffement du solide et à une réduction de la quantité adsorbée [15].
- La vitesse, la capacité et la chaleur d'adsorption diminuent lorsque la charge (fraction adsorbée) de l'adsorbant augmente [15].
- Lorsqu'un adsorbant atteint la saturation, on procède généralement à sa régénération. À l'inverse de l'adsorption, cette opération de désorption est favorisée par des températures comprises entre 90 °C et 140 °C ainsi que par de faibles concentrations d'adsorbat.

I.5.1 Adsorption physique

L'adsorption d'un gaz (adsorbat) par un solide se traduit par une augmentation de la densité du gaz à l'interface des deux phases. L'adsorption est dite adsorption physique lorsqu'elle est due à des forces d'interactions physiques entre les atomes, ou groupements d'atomes du solide et les molécules de gaz [15]. Ces interactions sont importantes entre molécules polaires ou ioniques. La polarisation des molécules du gaz à l'intérieur du champ électrique de la surface du solide produit un potentiel d'interaction très important. Ce potentiel

dépend de l'intensité du champ électrique à la surface de l'adsorbant et de la polarisabilité des molécules de gaz. Ce type d'interactions se rencontre dans le cas des adsorbants contenant des ions (zéolites). L'adsorption physique se produit sans modification de la structure moléculaire et elle est parfaitement réversible (les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées).

I.5.2 Adsorption chimique

Dans le cas de l'adsorption chimique, il y a création de liaisons entre les atomes de la surface et les molécules de l'adsorbat. Les énergies d'adsorption peuvent être de l'ordre 200 kJ/mole [15] (~20 kJ/mole dans le cas de l'adsorption physique). Ce type d'adsorption intervient dans le mécanisme des réactions catalytiques hétérogènes, où le catalyseur crée des liaisons fortes avec les gaz adsorbés. Dans le cas de la formation d'une liaison chimique spécifique, on peut envisager différents types de liaisons [15] :

- Soit une liaison purement ionique dans laquelle l'atome ou l'ion joue le rôle de donneur ou d'accepteur d'électron.
- Soit une liaison covalente.

Le tableau.1 donne les principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique [16].

Adsorption physique	Adsorption chimique
- faible chaleur d'adsorption	- forte chaleur d'adsorption
- non spécifique	- spécifique
- monocouche ou multicouche	- monocouche seulement
- rapide, réversible, non active	- active, irréversible, lente
- pas de transfert d'électrons	- transfert d'électrons

Tableau I.1 : Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique

I.5.3 Thermodynamique de l'adsorption

L'état thermodynamique d'un couple adsorbant-adsorbat est caractérisé par une relation entre trois grandeurs : masse, pression et température (m, P et T) [17]. La détermination de la forme de cette relation est relatée dans la littérature traitant de la thermodynamique de l'adsorption.

L'équilibre d'adsorption est représenté par les courbes suivantes :

- isotherme d'adsorption $(m, P)_T$.
- isobare d'adsorption $(m, T)_P$.
- isotherme d'adsorption $(P, T)_m$.

Les représentations graphiques des différentes données de l'équilibre d'adsorption sont listées dans la figure 8.

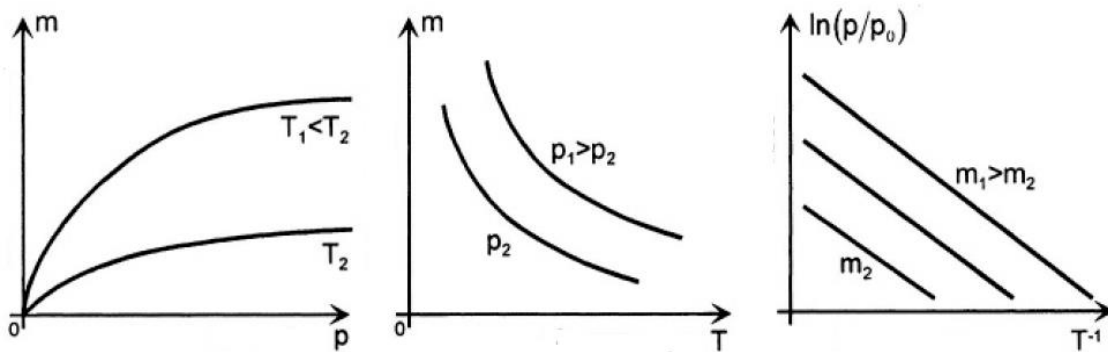


Figure I.8 : Représentations graphiques des différents équilibres d'adsorption A : ($T = \text{cste}$), B : ($T = \text{cste}$), C : ($m = \text{cste}$)

De façon pratique, pour l'étude des systèmes frigorifiques à adsorption, on utilise les isothermes d'adsorption, qui représentent, en fonction de la pression de vapeur, la quantité de gaz adsorbée par kilogramme d'adsorbant à la température (T). Les isothermes d'adsorption présentées ont des formes variables et peuvent être regroupées en six types [17], comme le montre la figure 9.

- Les isothermes de type I sont typiques d'une adsorption en monocouche, ou correspondant au remplissage de micropores avec saturation lorsque le volume à disposition est totalement rempli. Ce type d'isothermes est caractéristique pour l'adsorption sur le charbon micropores et les zéolites.
- Les isothermes de type II, au contraire, correspondant en générale à l'adsorption multicouche sur des surfaces ouvertes.
- L'isotherme de type III est relativement rare, elle représente le cas où l'interaction adsorbant/adsorbant est faible par rapport aux interactions adsorbant/adsorbant, mais suffisante pour accroître la tendance des molécules à s'accumuler à la surface de l'adsorbant.

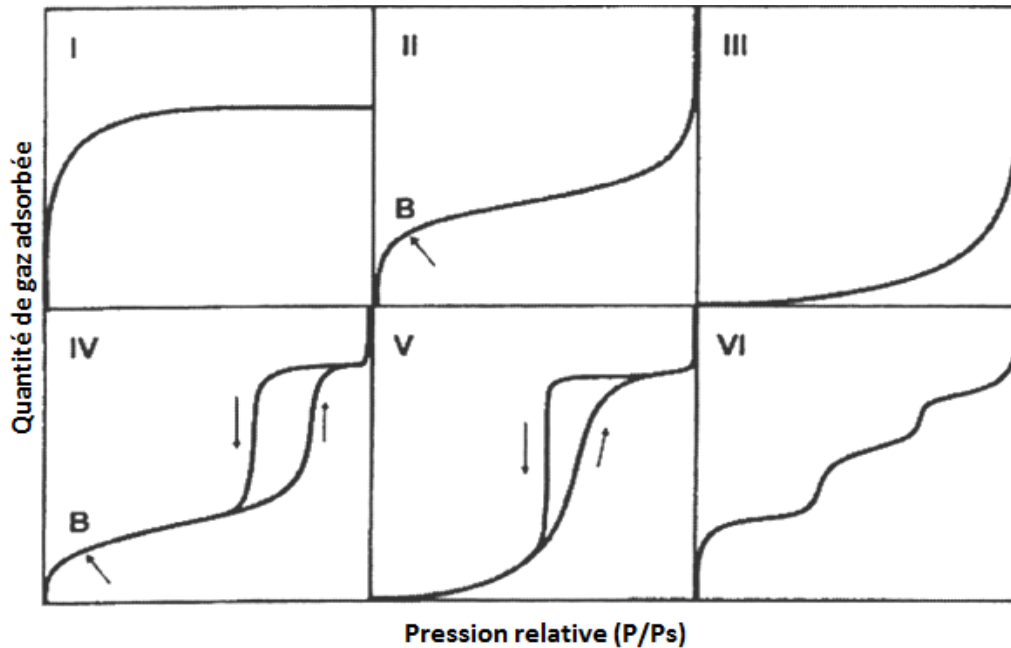


Figure I.9. Types d'isothermes d'adsorption [17]

- L'isotherme de type IV peut résulter de la formation de deux couches successives d'adsorbât à la surface du solide quand les interactions entre les molécules du fluide frigorigène et la surface solide sont plus fortes que les interactions entre les molécules adsorbées. Dans ce cas, les sites d'adsorption de la seconde couche ne commencent à se remplir que quand la première couche est à peu près complète.
- L'isotherme de type V traduit l'existence de plus fortes interactions intermoléculaires que les forces d'interaction entre les molécules du fluide frigorigène et le solide.
- Les isothermes de type VI présentent des marches caractéristiques d'adsorption multicouche sur une surface non poreuse très homogène.

I.5.4 Les adsorbants solides

I.5.4.1 Charbon actif

Les charbons actifs sont largement utilisés dans les applications industrielles qui comprennent : la récupération des solvants, la purification, le traitement de l'eau, le contrôle des composés organiques volatils, etc....

Les charbons actifs sont obtenus par la décomposition thermique de différents matériaux carbonés (bois, charbon, noix de coco, résidus pétrolier, etc...). Les grains et la structure du charbon actif sont présentés respectivement sur la figure 10.



Figure I.10 : Grains de charbon actif

1.5.4.2 Zéolithe

Les zéolithes sont également des matériaux adsorbant microporeux. Le nom de zéolithe lui-même est dérivé de la capacité de conserver les molécules d'eau bien au-delà de la température d'ébullition.

1.5.4.3 Gels de silice

Les gels de silice ($SiO_2.nH_2O$), comme le montre la figure 11, peuvent être obtenus par précipitation de silice en faisant réagir une solution de silicate de sodium avec un acide minéral (sulfurique ou chlorhydrique). Le gel obtenu est ensuite lavé, séché et activé.

La structure des pores est créée par l'agglomération des microparticules sensiblement sphérique de dimension à peu près uniforme et comprise entre 2 et 20 nm. Les principales propriétés physiques de gels de silice sont données dans le tableau 2.

Les utilisations principales des gels de silice sont le séchage, la séparation des composés aromatiques, le traitement du gaz naturel, déshumidification etc....



Figure I.11. Gel de silice

I.5.4.4 Alumines activées

Les alumines activées sont obtenues par déshydratation thermique du tri-hydrate d'alumine. Comme les gels de silice, les alumines activées sont très hydrophiles et sont couramment utilisées pour le séchage.

I.5.4.5 Adsorbant à base de polymères

Les adsorbants à base de polymères organiques ont des applications pour l'élimination des composés organiques, la purification des eaux ou la fabrication de médicaments. Les polymères de base sont des polystyrènes, des esters polyacryliques ou des résines phénoliques.

I.6 Avantages et inconvénients d'un système à dessiccation solide

La consommation d'électricité, pour un système à dessiccation solide, peut être jusqu'à 20 fois inférieure à celle d'un système classique à compression.

Il permet également de réduire les émissions de dioxyde de carbone, car il utilise l'énergie solaire.

Il est peu performant dans les climats chauds et humides.

La roue à dessiccation solide nécessite de la maintenance.

D'autre part le choix de l'adsorbant dépend principalement des facteurs suivants :

- Une capacité d'adsorption et de désorption, pour atteindre un effet de refroidissement haut ;
- Une bonne conductivité thermique, afin de raccourcir le temps de cycle ;
- Une faible chaleur spécifique ;
- Une compatibilité chimique avec le fluide frigorigène choisi ;
- Un faible coût et être largement disponible.

I.7 Propriétés de l'air humide

La connaissance des propriétés psychrométriques est l'exigence de base pour les mesures environnementales. La compréhension des propriétés thermodynamiques et physiques d'un mélange air-vapeur d'eau nécessite l'utilisation d'un abaque appelé diagramme psychrométrique comme le montre la figure I.12.

Les équations présentées dans cette section permettent de calculer tout ou partie des propriétés psychrométriques.

I.7.1 Pression de la vapeur saturante

La pression de saturation en vapeur d'eau (Pws) est nécessaire pour déterminer un certain nombre de propriétés de l'air humide, principalement le taux d'humidité saturante. La pression de saturation en eau liquide pour la plage de température de 0 à 200 C est donnée par ASHRAE [18].

$$\ln(Pvs) = \frac{C1}{T} + C2 + C3.T + C4.T^2 + C5.T^3 + C6.lnT \tag{1}$$

Avec ;

T : est la température de l'air en (K)

C1...6, sont des coefficients.

Constante	Valeur
C1	-5.800 220 6 E+03
C2	1.391 499 3 E+00
C3	-4.864 023 9 E-02
C4	4.176 476 8 E-05
C5	-1.445 209 3 E-08
C6	6.545 967 3 E+00

Tableau I.2 : Valeurs des constantes de l'équation (1)

I.7.2 Taux d'humidité

Le taux d'humidité (W) d'un volume d'air humide donné est défini comme le rapport de la masse de vapeur d'eau (m_{ve}) à la masse d'air sec (m_a) contenue dans le même volume.

$$W = \frac{m_{ve}}{m_a} = \frac{\left(\frac{P.V}{R.T}\right)_{ve}}{\left(\frac{P.V}{R.T}\right)_a} = \frac{P_{ve}R_a}{P_a R_{ve}} = \frac{0.62198 \times P_{ve}}{P_{atm} - P_{ve}} \quad (2)$$

P_a : pression partielle de l'air sec, (Pa)

P_{ve} : pression partielle de la vapeur d'eau, (Pa)

P_{atm} : pression atmosphérique ($P_a + P_{ve}$), (Pa) (Pa)

R_a / R_{ve} : rapport des masses molaires d'air et de l'eau (0.62198).

V : volume, (m^3).

Le taux d'humidité saturante (W_s) est le taux d'humidité de l'air humide saturé par rapport à l'eau à la même température T et pression P est donnée par l'équation. (3).

$$W_s = \frac{0.62198 \times P_{vs}}{P_{atm} - P_{vs}} \quad (3)$$

I.7.3 Humidité relative

L'humidité relative (ϕ) est le rapport de la pression de vapeur d'eau réelle à la pression de vapeur d'eau de saturation à la même température :

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (4)$$

I.7.4 Température humide « Température de bulbe humide »

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air. De façon pratique c'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un coton hydrophile humidifié. Ce thermomètre est placé dans un flux d'air relativement rapide.

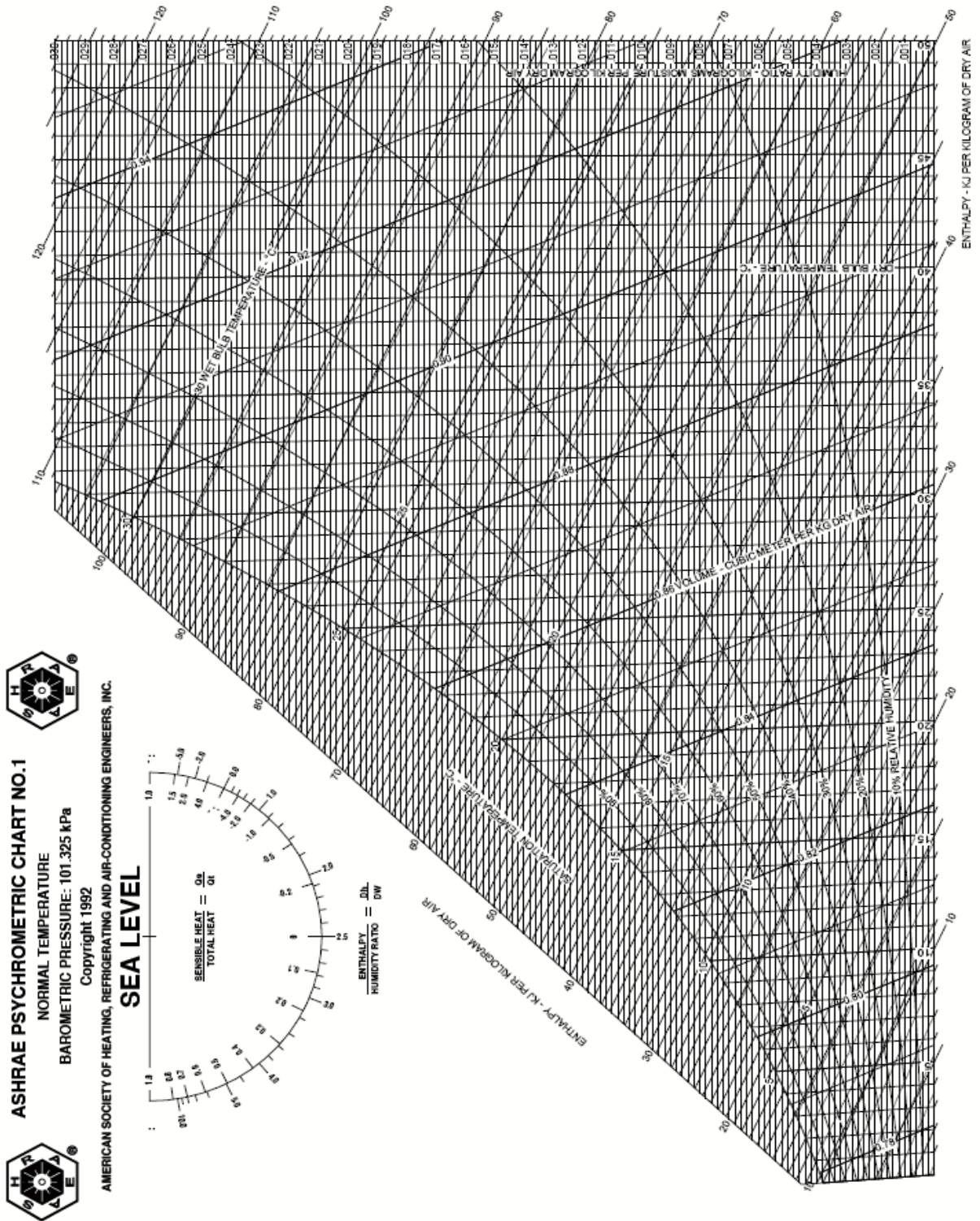


Figure I.12 : Digramme psychrométrique



Chapitre II

**Éléments de réalisation d'un système à
dessiccant solide**



II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux éléments utilisés dans la réalisation d'un système de déshumidification de l'air humide par dessiccation solide tel que le dessiccateur qui porte les matériaux adsorbants. Nous accordons une attention particulière à la fabrication et au montage de notre prototype de déshumidification par dessiccation solide fonctionnant avec un matériau appelé silicagel.

II.2 Importance des conditions climatiques

Les performances de ce système dépendent fondamentalement des conditions de fonctionnement à cette fin. La prise en compte du climat est un élément très important dans la sélection et le dimensionnement des appareils. De plus, la capacité de refroidissement de la configuration traditionnelle dans tout air frais diminue significativement avec l'augmentation de l'humidité.

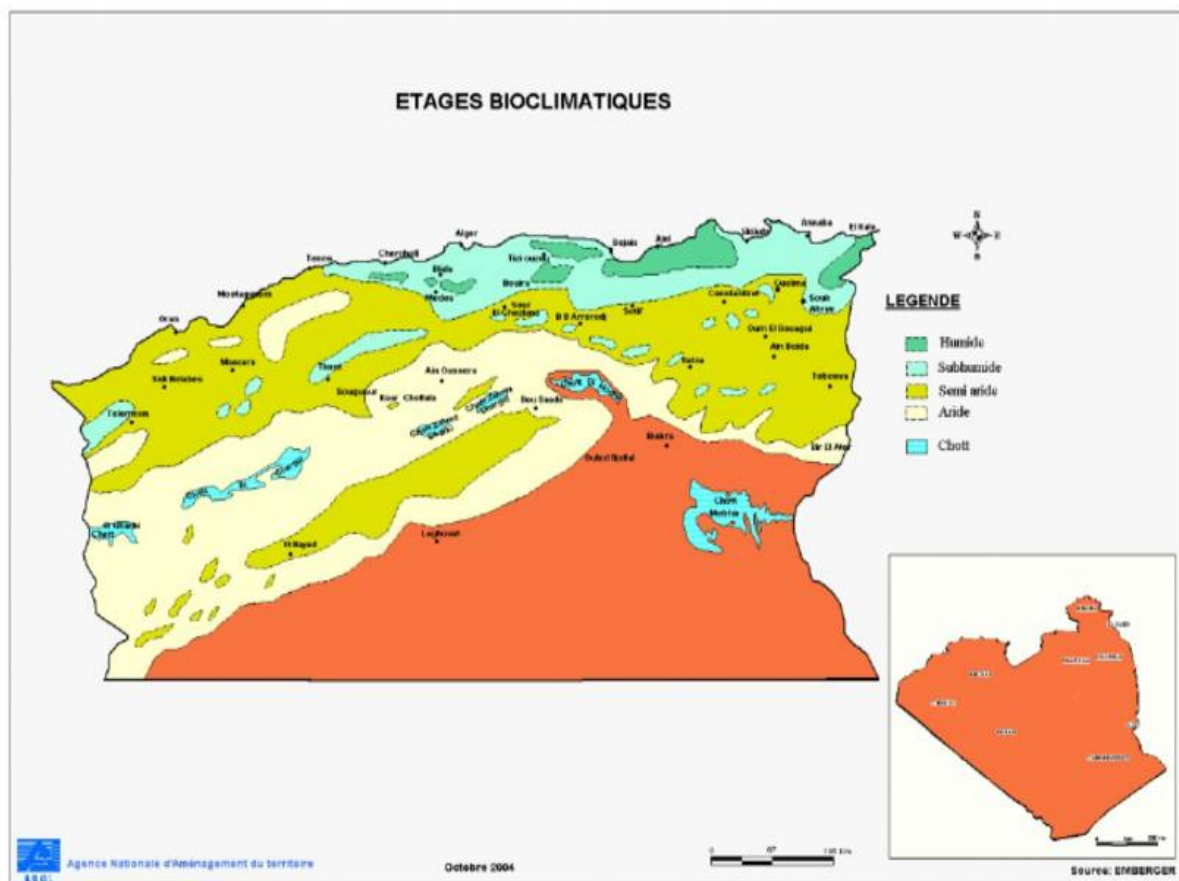


Figure II.1 : Différents climats en Algérie

II.2.1 Emplacement géographique

La Wilaya de Ain defla est située au Nord-Ouest de l'Algérie à une altitude de 300 m, une latitude de 36° 16' N et une longitude de 2° 12' E. Elle bénéficie d'un climat méditerranéen montagneux. Elle a une superficie de 4 897 km² et elle est située à l'Est de la wilaya de Chlef et à 100 km à l'Ouest d'Alger.

II.2.2 Les conditions climatiques de Khemis-Miliana

La région de Khemis-Miliana (Wilaya de Ain defla) a un climat Méditerranéen. Les hivers sont doux voire frais et les étés sont très chauds. Nous allons donc commencer par fixer les conditions climatiques de base. Pour cela, nous nous sommes basés sur les informations données par un site web spécialisé (MSN météo [06]) dans la météorologie. Nous avons pris comme journées types : la période du 17 / 05 / 2020 au 31 / 05 / 2020 comme le montre la figure II.2. Les relevés de température et d'humidité, de 2019, sont données sur la figure II.3.

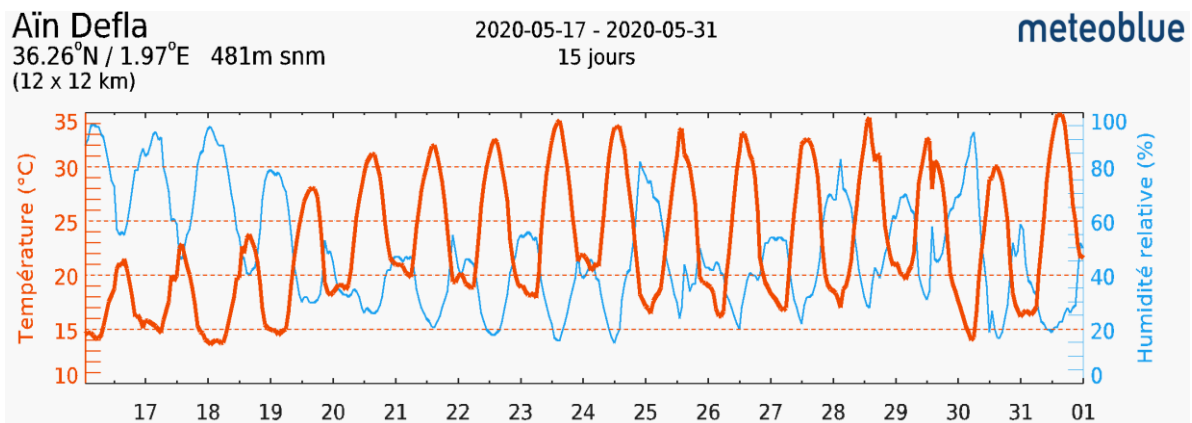


Figure II.2 : Température et humidité de 15 jours sur le mois mai 2020

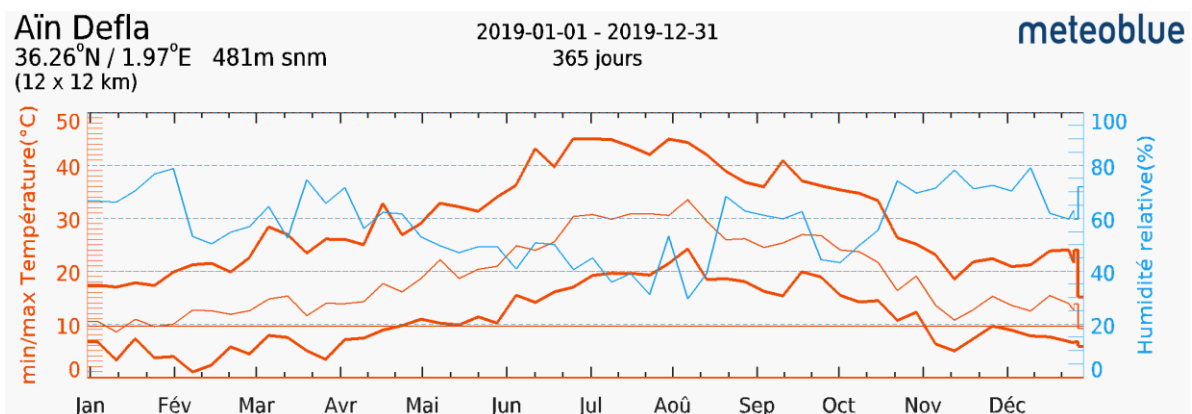


Figure II.3 : Température et humidité de l'année 2019

II.3 Déshumidification par dessiccation solide

Dans un système de dessiccation, l'humidité (charge latente) de l'air est éliminée par un matériau dessiccant dans un déshumidificateur, puis la température (charge sensible) de l'air de process séché est réduite aux conditions de confort souhaitées par des refroidisseurs sensibles (par exemple, échangeurs de chaleur, refroidisseurs par évaporation...).

Dans les systèmes déshydratants solides, l'air passe à travers un lit de matériau adsorbant. L'air est séché et l'humidité est adsorbée par le dessiccant solide sous le processus d'adsorption. Lorsque le dessiccant est saturé, l'air chaud traverse le lit, libérant l'humidité comme sous l'inverse de processus d'adsorption qui s'appelle la désorption, comme le montre la figure II.4.

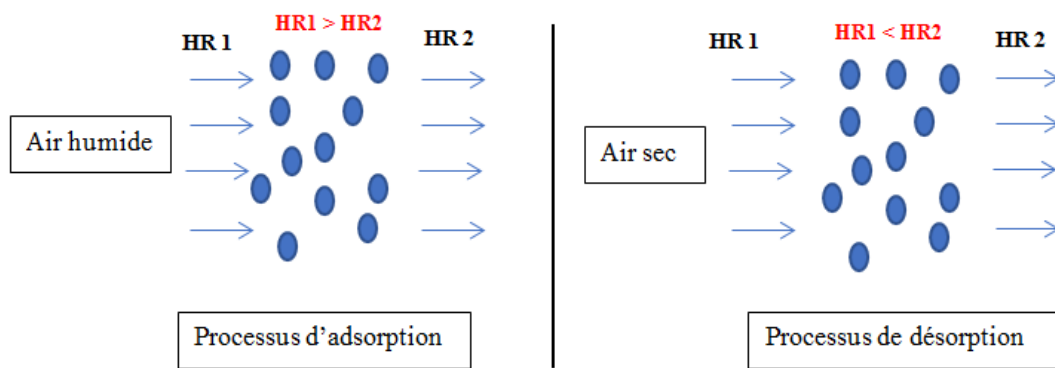


Figure II.4 : Schéma représentatif du processus d'adsorption et de désorption

Le déshydratant dans le déshumidificateur est réactivé par l'application de chaleur pour libérer l'humidité sous le processus de désorption, qui est évacuée vers l'extérieur. La chaleur pour la réactivation peut provenir d'un certain nombre de sources d'énergie telles que l'énergie solaire, la chaleur perdue, le gaz naturel et l'électricité.

II.4 Description de l'installation

Une installation expérimentale a été construite pour étudier les caractéristiques dynamiques des processus de déshumidification dans un déshumidificateur à dessiccant solide. Le schéma de l'installation expérimentale est illustré à la figure II.5.

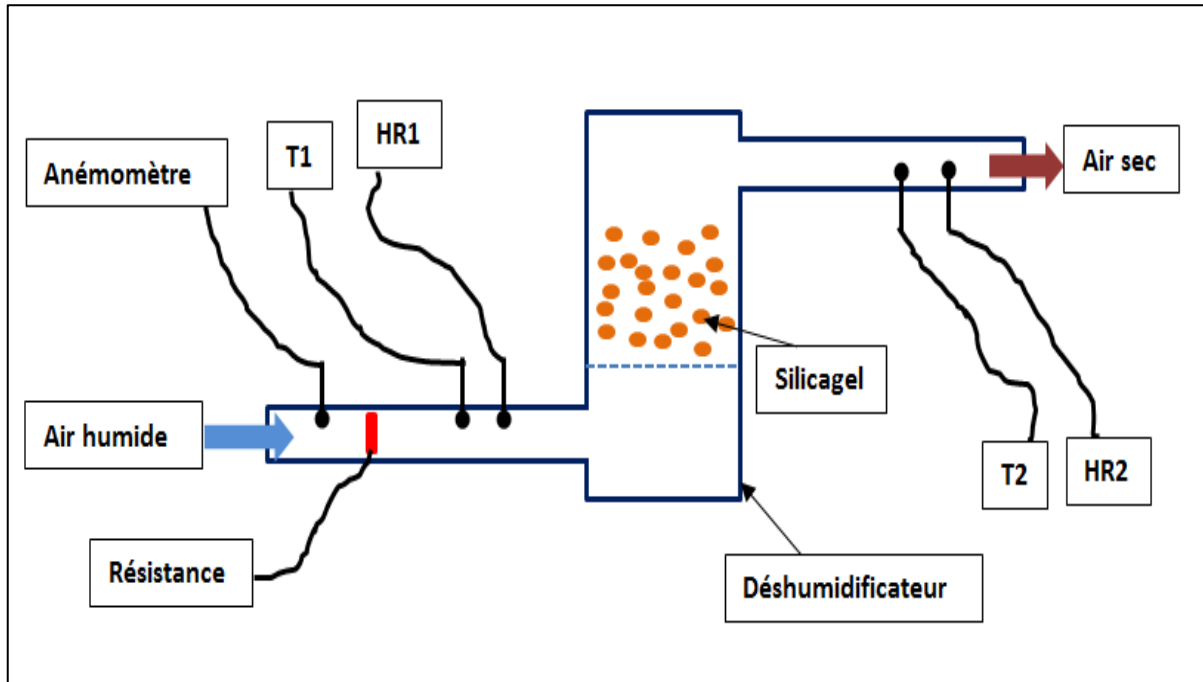


Figure II.5 : Schéma du déshumidificateur à dessiccation solide expérimental

La figure II.6 montre la photographie de l'installation expérimentale. Dans ce prototype de déshumidification par dessiccateur solide, le déshumidificateur est l'élément essentiel et il fait l'objet de notre étude.



Figure II.6 : Photographie de l'installation de déshumidificateur solide

II.4.1 Les dimensions du prototype

La figure II.6, montre le prototype de déshumidificateur à 4 étages réalisé en plexiglass et dont dimensions sont :

- Hauteur : 1 m
- Largueur : 30 cm
- Profondeur : 30 cm

Il est terminé par un tube horizontal dont les dimensions sont :

- Longueur de l'ordre de 0.5 m
- Diamètre 8 cm.

Le déshumidificateur est une structure solide avec une coque en plexiglass de 5 mm d'épaisseur pour assurer une isolation thermique minimale avec l'environnement. Ce système à dessiccation solide utilisé pour extraire l'humidité de l'air, comme le montre la figure (II.7) comprend essentiellement, un déshumidificateur rempli de produit adsorbant, une soufflerie pour souffler de l'air humide et une résistance électrique.

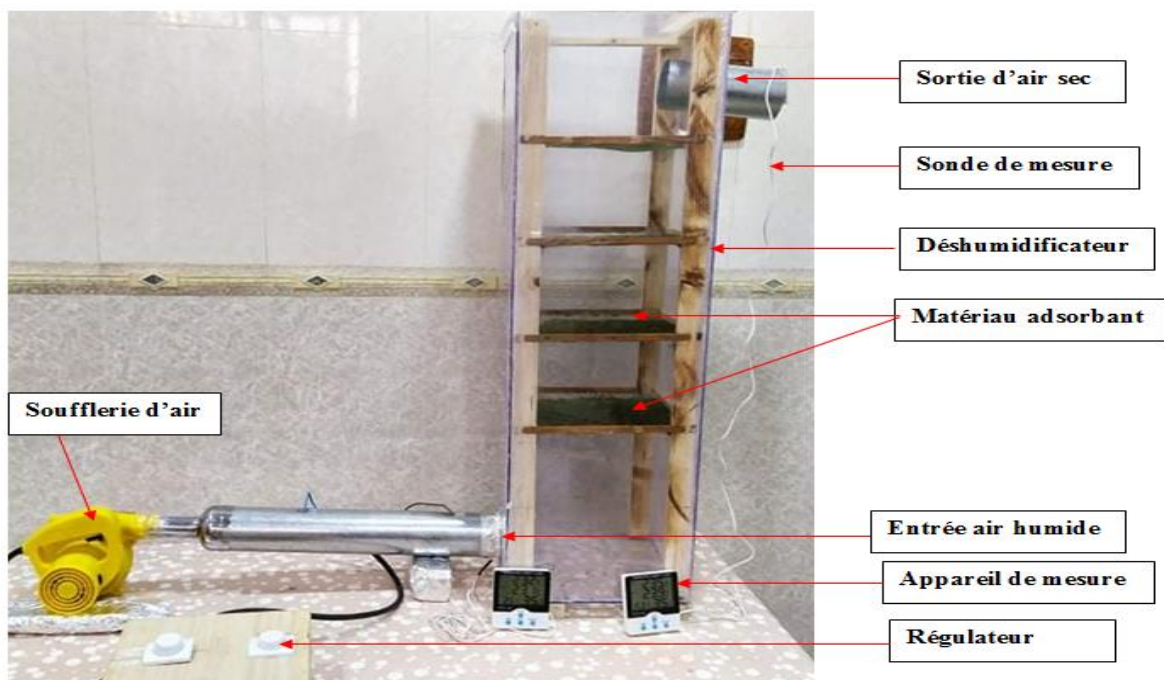


Figure II.7 : Eléments de l'installation du déshumidificateur solide

II.4.2 Matériel et produit dessiccant

II.4.2.1 Soufflerie

Les soufflantes sont utilisées pour fournir de l'air avec une pression qui fait circuler l'air ambiant dans le déshumidificateur.

Caractéristiques de la soufflerie	
Source d'énergie et type	Mini ventilateur électrique portatif
Tension évaluée	230 v
Puissance d'entrée	600 w
Pas de vitesse de chargement	13000 RPM
Débit d'air	2.3 m ³ / min
Taille Approx	54*49*37 cm
Longueur de câble	1.3 mètre
Taux de Fréquence	50-60 Hz

Tableau II.1 : Caractéristiques de la soufflerie



Figure II.8 : Photographie d'une soufflerie

Une résistance électrique et un pulvérisateur d'eau sont utilisés dans le conduit d'air à l'entrée du déshumidificateur. L'air est chauffé et humidifié jusqu'à atteindre la température et l'humidité souhaitées. Ensuite, l'air traverse le déshumidificateur de bas en haut.

II.4.2.2 L'adsorbant

La déshumidification par dessiccation solide utilise des matériaux à fortes hydrophiles poreux pour adsorber l'humidité du flux d'air. Le dessiccant solide généralement utilisé est le gel de silice (silicagel). Dans notre étude un matériau adsorbant, appelé « silicagel », est utilisée comme dessiccant solide comme le montre les figures II.9 et II.10. La capacité d'absorption, la durabilité, la stabilité et la température du régénération (température de désorption) sont les principaux facteurs à considérer lors de la sélection d'un dessiccant solide.

Nous avons utilisé du gel de silice comme adsorbant déshydratant solide pour retenir la vapeur d'eau sans être fondu. Il est orange, non toxique et le diamètre des grains varie entre 3 et 5 mm.

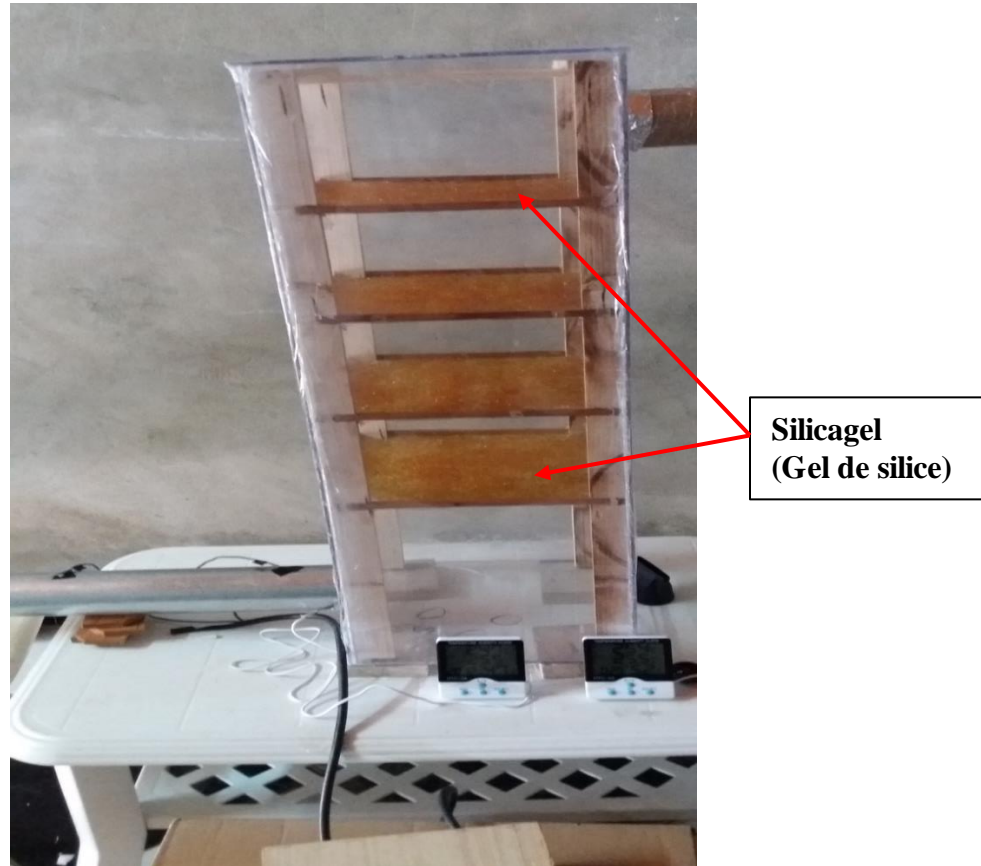


Figure II.9 : Matériau dessiccant (silicagel)



Figure II.10 : Photographie d'un échantillon de silicagel

II.4.2.3 Mesure des températures et de l'humidité relative

L'installation de déshumidification à dessiccation solide est équipée d'un système d'acquisition de données destiné à mesurer les différentes températures à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur ainsi que l'humidité relative à l'entrée et à la sortie toutes les minutes, comme le montre la figure (II.11).

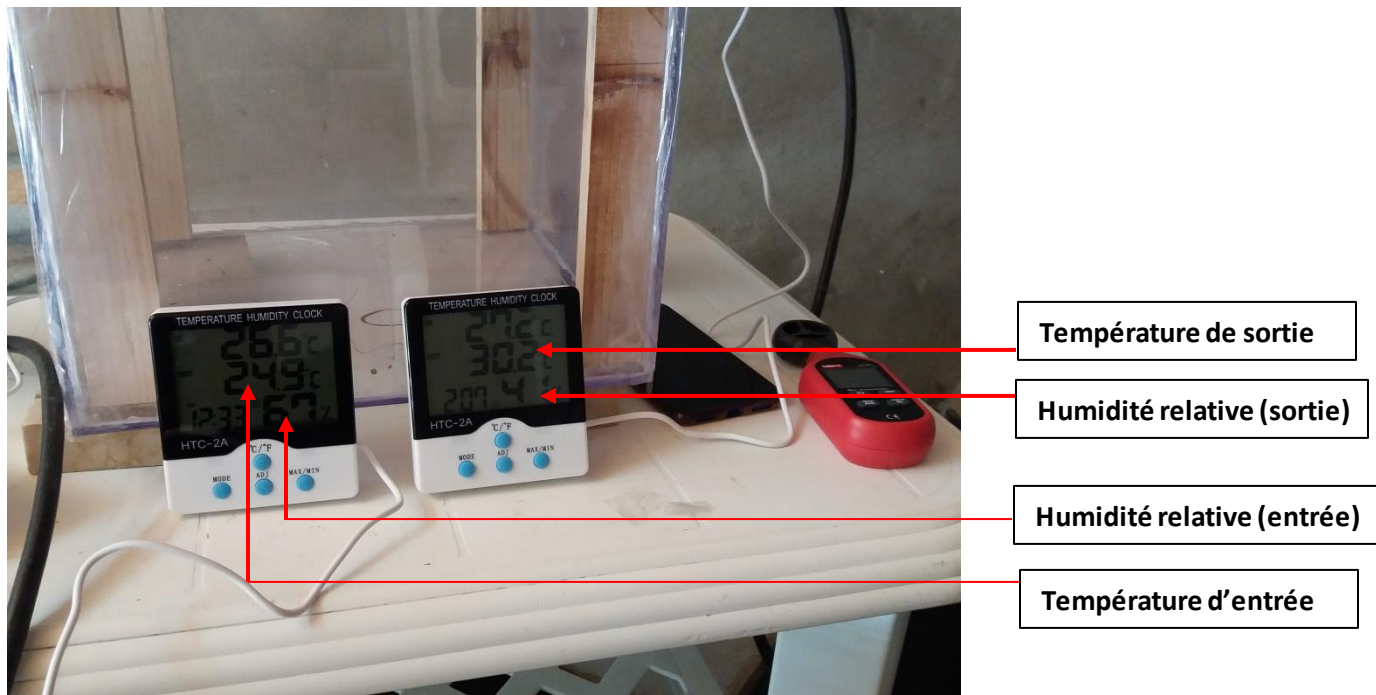


Figure II.11 : Photographie d'un hygromètre

II.4.2.4 Mesure de la vitesse de l'air à l'entrée du déshumidificateur

L'installation de déshumidification à dessiccation solide est équipée d'un anémomètre numérique UT363 permettant de mesurer la vitesse de l'air comme le montre la figure II. 12. Cet appareil léger est équipé de la dernière technologie de détection magnétique qui peut afficher directement la vitesse d'écoulement de l'air sur l'écran LCD.



Figure II.12: Photographie d'un Anémomètre à affichage LCD

Caractéristiques de l'anémomètre :

Plage de vitesse du vent : **0 - 30 m/s**

Résolution : 0.1 m/s

Précision : $\pm (5\% \text{ rdg} + 0.5)$

Plage de Température : **- 10 à 50 °C**

Résolution : 0,1 °C

Précision : ± 2 °C

II.5 Mise en service de l'installation

Une installation de déshumidification à dessiccation solide à cycle ouvert fonctionne à la pression atmosphérique. Avant de procéder à la mise en fonctionnement de ce système, on vérifie l'étanchéité du déshumidificateur.

Dans notre l'installation le nettoyage et la vérification de chaque élément est faite séparément. Puis le prototype est monté en utilisant deux régulateurs séparés, l'un est utilisé pour faire varier la puissance de la soufflerie afin de varier la vitesse de l'air à l'entrée du déshumidificateur et l'autre est utilisé pour faire varier la puissance de la résistance électrique afin de faire varier la température de l'air humide à l'entrée du déshumidificateur comme le montre la figure II.13.



Figure II.13 : Installation de déshumidification à dessiccation solide avec régulateurs

Une fois l'installation montée, nous procédons ensuite à l'expérimentation de notre prototype en fixant par exemple la masse du silicagel, la température et la vitesse de l'air à l'entrée du déshumidificateur et en relevant la température et l'humidité relative à sa sortie.



Chapitre III

**Modélisation par l'approche de
réseaux de neurones artificiels**



III.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude numérique par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels pour modéliser un système de déshumidification par dessiccation solide. Nous présentons l'état de l'art de ces réseaux de neurones et leurs applications dans les systèmes de déshumidification par dessiccant solide. D'abord, nous rappelons la définition et les propriétés des réseaux de neurones, avant de décrire les architectures neuronales les plus utilisées, le choix des entrées et sorties, l'élaboration de la base de données, de la structure du réseau et l'algorithme d'apprentissage.

III.2. Matlab

MATLAB est un langage de développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques et utilisé pour développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul et des simulations complexes du système de contrôle.

Ce logiciel, développé par la société MathWorks, permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes et de créer des interfaces utilisateurs comme le montrent les figures III.1 et III.2. Il peut aussi s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran.

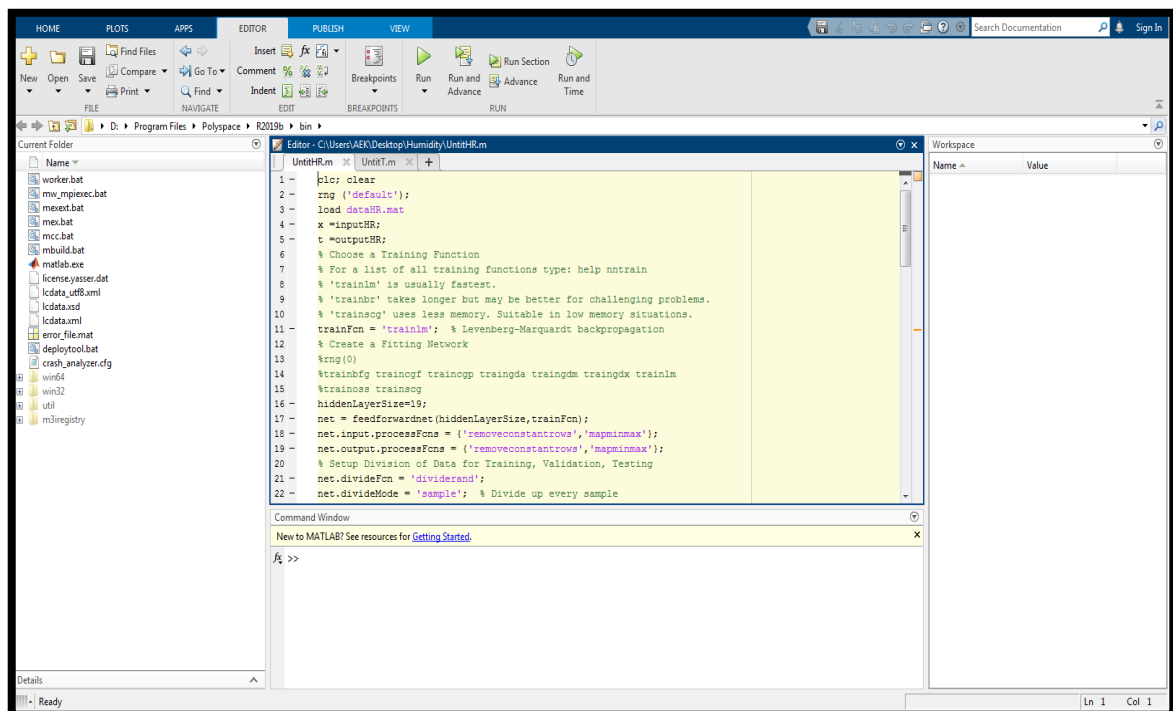


Figure III.1 : Interface du logiciel Matlab

III.3. Application des réseaux de neurones dans les systèmes de déshumidification solide

Sur la base de la littérature, certains chercheurs préfèrent développer des modèles mathématiques pour décrire et déterminer les principaux paramètres d'un système de réfrigération. De plus, les modèles numériques ont besoin d'un grand nombre de paramètres qui définissent le système : propriétés physiques, géométriques et thermodynamiques, qui peuvent ne pas être facilement disponibles, et leurs prédictions peuvent ne pas être suffisamment précises dans de nombreux cas.

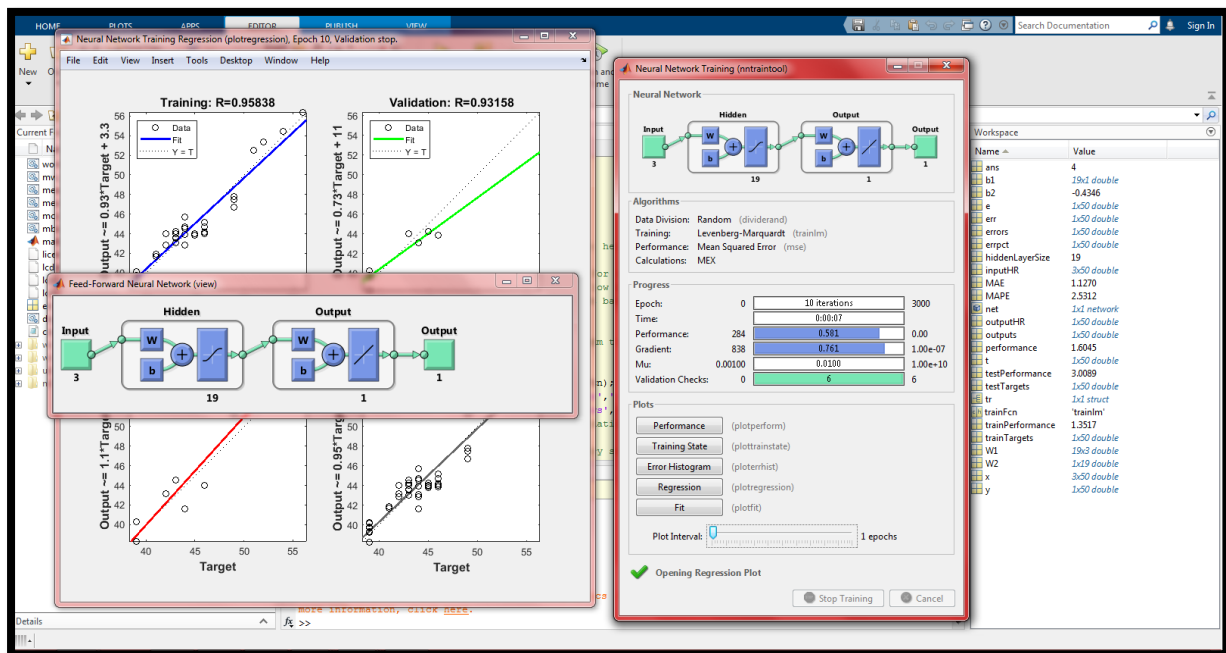


Figure III.2 : Réseau de Neurones Artificiels

Les réseaux de neurones ont prouvé leur efficacité dans le domaine diversifié de système d'ingénierie pour la prédiction, l'identification, le contrôle, etc,... [19] et [20]. Dans les systèmes de déshumidifications par dessiccation solide, nous constatons que l'utilisation des réseaux de neurones devient de plus en plus intense.

Cejudo et al [21] ont utilisé deux méthodes de modélisation des performances d'une roue déshydratante : un modèle physique, basé sur les bilans de masse et d'énergie et un modèle de réseau neuronal, basé sur l'apprentissage d'un modèle de boîte noire avec des données réelles. Le modèle physique consiste en un ensemble d'équations différentielles non linéaires résolues par des techniques de différences finies. Le modèle de réseau neuronal consiste en un réseau à quatre entrées et quatre sorties qui calcule les conditions de sortie à

partir de celles d'entrée. Des données réelles sont utilisées pour valider le modèle physique et former le réseau neuronal. Le modèle physique montre des écarts entre les valeurs calculées et mesurées, principalement en raison du fait que le système est supposé adiabatique. Dans le cas du modèle de réseau de neurones, le rapport de température et d'humidité calculé pour l'air de sortie est conforme aux données expérimentales.

Jani et al [22] ont développé un modèle de réseau de neurones artificiels (ANN) pour prédire les performances d'un déshumidificateur rotatif à dessiccant solide pour différentes conditions d'entrée de l'air. La température du bulbe sec, le taux d'humidité, le débit du processus ainsi que les flux d'air de régénération du déshumidificateur, les températures de régénération sont utilisés comme entrées pour le modèle. Les sorties du modèle sont la température de bulbe sec de sortie et le taux d'humidité du processus ainsi que les flux d'air de régénération du déshumidificateur, le taux d'élimination de l'humidité et l'efficacité du déshumidificateur. Les prévisions de performances via la technique ANN sont comparées aux résultats des tests expérimentaux et un accord étroit est observé.

Mishra et al [23] ont utilisé un modèle de réseau de neurones artificiels (ANN) pour évaluer les performances du système rotatif à dessiccateur solide en termes de température de l'air de sortie de processus et d'humidité relative. Le modèle utilise la vitesse de l'air d'entrée de processus de dessiccation, la vitesse de l'air de régénération d'entrée, la température de régénération et la température d'entrée et l'humidité relative de l'air de processus de dessiccation ainsi que l'air de régénération comme paramètres d'entrée. Le modèle neuronal conçu fonctionne de manière satisfaisante.

Koronaki et al [24] ont développé un modèle de réseau de neurones basé sur des données expérimentales pour prédire les conditions d'état de l'air au niveau du processus et du flux de régénération. Les résultats de cette analyse ont révélé que tous les paramètres étudiés ont influencé les performances de l'unité de dessiccation. Les valeurs de sortie prévues du modèle de réseau neuronal proposé pour les systèmes déshydratants sont conformes aux résultats d'autres modèles de corrélation basés sur l'interpolation des données expérimentales obtenues à partir d'installations de climatisation industrielles.

III.4. Principe d'un réseau de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels, généralement appelé « réseau neuronal », est un modèle mathématique ou un modèle de calcul qui s'inspire de la structure et / ou des aspects fonctionnels des réseaux de neurones biologiques, pour simuler des phénomènes de nature

diverses, mathématiques, médecines, économies, météorologiques, sciences de l'ingénieries, etc... [19].

Un réseau neuronal artificiel est un système basé sur le réseau neuronal biologique, il est composé de trois éléments ; dendrites, axone et synapse, comme le montre la figure (III.3).

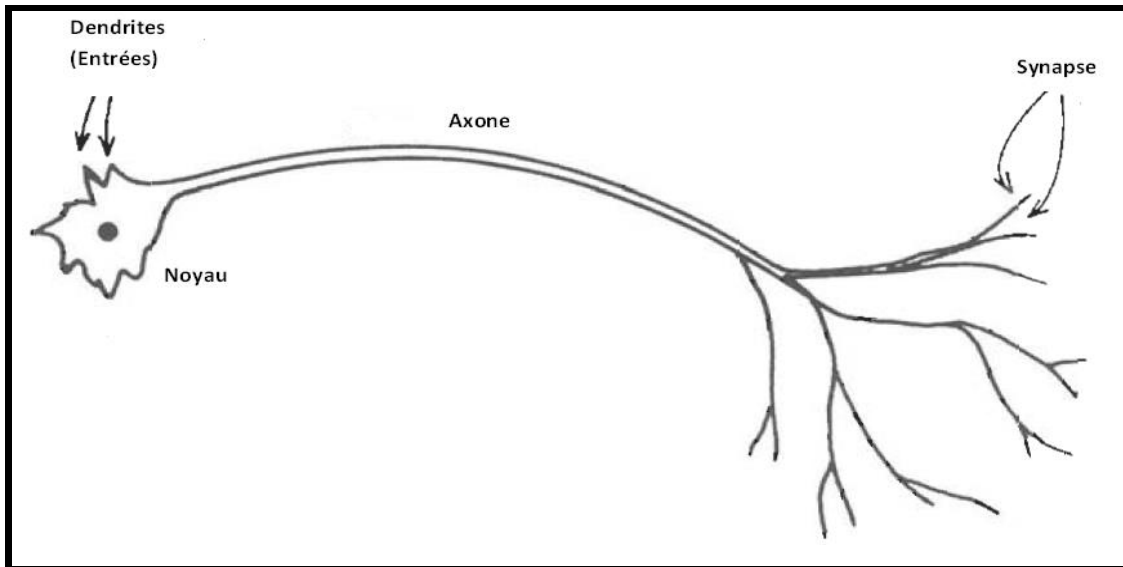


Figure III.3 Schématisation d'un réseau neuronal biologique

Les neurones sont connectés entre eux par l'intermédiaire de jonctions appelées synapses, comme le montre la figure (III.3).

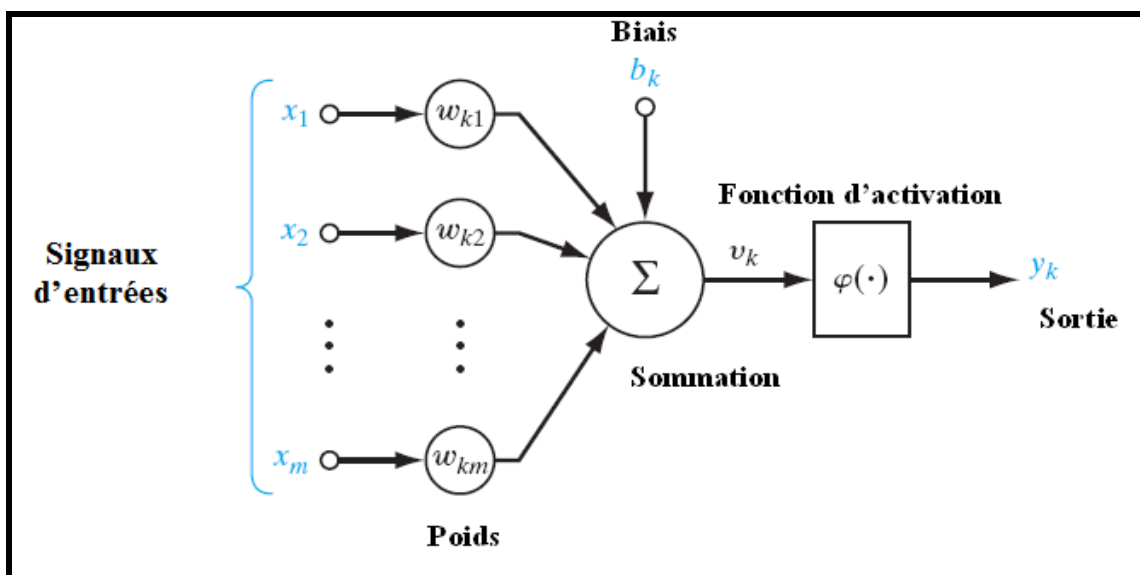


Figure III.4 Modèle non linéaire d'un neurone

Chaque neurone reçoit des signaux de plusieurs connections recevant en permanence des signaux d'entrée. Si l'addition de ces signaux dépasse un certain seuil une réponse est envoyée à travers l'axone. Il est commode de représenter graphiquement un neurone non linéaire comme indiqué sur la figure (III.4).

Le modèle neuronal comprend aussi un biais, noté (b_k). Le biais (b_k) a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'entrée nette de la fonction d'activation, selon qu'elle est positive ou négative.

En mathématiques, on peut décrire le modèle neurone par l'équation suivante :

$$v_k = \sum_{i=1}^m w_{ik} x_i + b_k \quad (\text{III.1})$$

La sortie de neurone a pour expression :

$$y_k = f(v_k) \quad (\text{III.2})$$

Où :

x_1, x_2, \dots, x_m : sont les signaux d'entrée;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$: sont les poids synaptiques respectifs du neurone k ;

v_k : est la sortie du combineur linéaire due aux signaux d'entrée;

b_k : est le biais;

$f(v_k)$: est la fonction d'activation;

y_k : est le signal de sortie du neurone.

La fonction (φ) est appelée fonction d'activation elle peut être une fonction à seuil, une fonction linéaire ou non linéaire. La fonction sigmoïde se présente comme une approximation continûment dérivable de la fonction d'activation linéaire par morceaux ou de la fonction seuil. Elle présente l'avantage d'être régulière, monotone, continûment dérivable.

III.5. Architecture des réseaux de neurones

Un réseau de neurones est composé d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie dite à perceptron monocouche ou avec une ou plusieurs couches cachées dites à perceptron multicouche. Le perceptron multicouche figure (III.5), est le plus connu des réseaux de neurones et le plus utilisé pour des problèmes d'approximation et de prédiction.

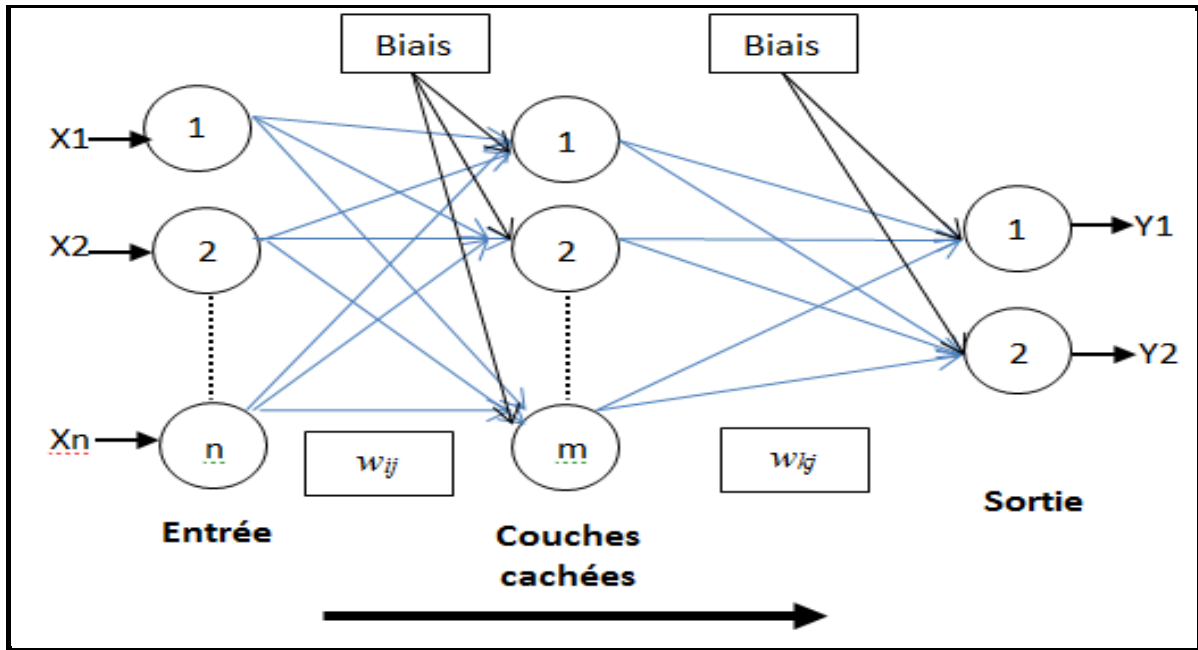


Figure III.5 Structure d'un perceptron multicouche

III.6. Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage c'est l'étape fondamentale des réseaux de neurones. Les règles d'apprentissage sont des algorithmes pour trouver des poids appropriés (w) et / ou d'autres paramètres de réseau. L'apprentissage d'un réseau neuronal peut être considéré comme un problème d'optimisation non linéaire pour trouver un ensemble de paramètres de réseau. Ce type d'estimation de paramètres est également appelé algorithme d'apprentissage.

En général, les réseaux de neurones se réalisent en modifiant les connexions entre les neurones par époque. Une époque est une exécution complète lorsque tous les exemples de formation sont présentés au réseau et sont traités en utilisant l'algorithme d'apprentissage qu'une seule fois. Après l'apprentissage, un réseau de neurones représente une relation complexe et a la capacité de généralisation.

L'apprentissage supervisé ajuste les paramètres du réseau par une comparaison directe entre la sortie réelle du réseau et la sortie générée, figure (III.6). L'apprentissage supervisé est un système de rétroaction en boucle fermée, où l'erreur est le signal de retour.

La mesure d'erreur, qui montre la différence entre la sortie du réseau et la sortie des échantillons de formation, est utilisée pour guider le processus d'apprentissage.

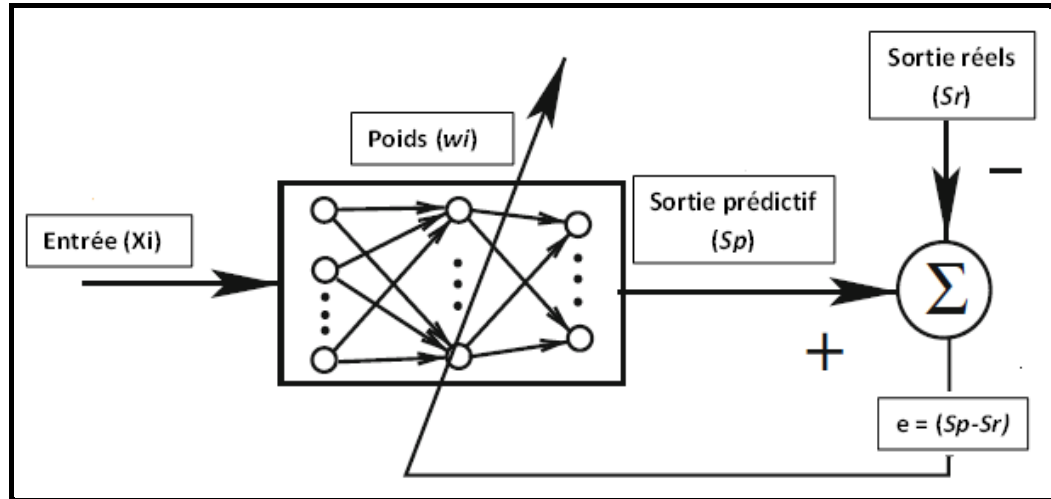


Figure III.6 Apprentissage supervisé

La mesure de l'erreur est généralement définie par l'erreur quadratique moyenne (MSE).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_1^n \|Sp - Sr\|^2 \quad (III.3)$$

Avec :

n : est le nombre de paires dans l'ensemble d'échantillons,

Sp : est la partie de sortie prédictive par le réseau

Sr : est la sortie de données réelles.

La nouvelle erreur (MSE) est calculée après chaque époque. Le processus d'apprentissage est terminé lorsque (e) est suffisamment petit ou si un critère de défaillance est atteint.

III.7. Identification des paramètres du modèle

Dans cette étude, un modèle de réseau de neurones artificiels a été développé pour prédire la température et l'humidité relative à la sortie d'un système de déshumidification solide utilisant le silicagel comme un matériau adsorbant.

De manière générale, le sens de transfert de l'information dans un réseau est défini par la nature des connexions qui sont directes ou récurrentes.

Les perceptrons multicouches utilisés dans cette étude sont présentés par une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Les variables sont la température à

l'entrée, l'humidité relative à l'entrée, le débit d'air à l'entrée, la température de sortie et l'humidité relative de sortie du système de déshumidification à dessiccation solide.

III.7.1 Initialisation

Toutes les entrées et sorties des réseaux sont redimensionnées pour avoir des variables, variant entre -1 et 1, ou 0 et 1 afin de rendre le réseau plus efficace et avoir de meilleurs résultats.

III.7.2 Nombre de couches cachées et de neurones

Le nombre de neurones indique la complexité qui peut être approchée par le réseau neuronal. Il est souhaitable d'utiliser la structure de réseau le plus simple possible avec le moins de paramètres d'entrée. Le modèle développé peut être utilisé pour valider de nouvelles mesures de processus. Une vraie procédure de formation des réseaux neuronaux est généralement basée sur une approximation itérative dans laquelle les paramètres sont successivement mis à jour en plusieurs étapes.

III.7.3 Valeurs des poids

Avant de former un ANN, les valeurs initiales des poids et des biais doivent être déterminées automatiquement par le logiciel ANN Toolbox ou elles peuvent être ajustées manuellement au moyen d'écritures et de codes dans l'environnement MATLAB®.

III.7.4 Algorithmes de formation

Notre modèle est basé sur le réseau perceptron multicouche d'architecture (Feed-forward), où nous avons utilisé l'algorithme de rétro propagation (backpropagation). Cet algorithme est actuellement l'outil le plus utilisé dans le domaine de réseaux de neurones. C'est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure de fonctions dérivables. Cette méthode est basée mathématiquement sur l'algorithme de descente du gradient et utilise les règles de dérivation des fonctions dérivables. De telles façons que l'erreur commise en sortie du réseau sera rétro propagée vers les couches cachées. La fonction de formation en réseau qui met à jour les valeurs de poids et de biais selon l'optimisation de Levenberg-Marquardt a été modifiée pour inclure la technique de régularisation. Il minimise une combinaison d'erreurs carrées et de poids et détermine ensuite la combinaison correcte pour produire un réseau qui se généralise.

III.7.5 Fonctions de transfert

La fonction $f(.)$ est appelée fonction d'activation. Elle peut être une fonction à seuil, une fonction linéaire ou non linéaire. La fonction sigmoïde se présente comme une approximation continûment dérivable de la fonction d'activation linéaire par morceaux ou de la fonction seuil.

III.7.6 Evaluation du modèle neuronal

L'étape importante dans l'estimation des modèles neuronaux est de choisir l'ordre du modèle. Une fonction sigmoïde tangente a été appliquée à la couche cachée, et une fonction de transfert linéaire a été utilisée dans la couche de sortie. Le nombre de neurones de la couche cachée a été sélectionné par plusieurs essais pour estimer le modèle. La performance du modèle a été évaluée par l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de détermination (R) :

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n (y_p - y_d)^2 \quad (\text{III.4})$$

Et

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_i^n (y_p - y_d)^2}{\sum_i^n (y_p)^2} \right) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

n: est le nombre des données,

y_k : sont les sorties de réseau,

y_d : sont les données désirées.



Chapitre IV

Résultats et discussion



IV.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, les résultats expérimentaux de l'étude de caractérisation du fonctionnement de notre prototype de déshumidification à dessiccation solide et en particulier le déshumidificateur car il est l'élément le plus important dans les systèmes de conditionnement d'air. Nous présentons, aussi dans ce chapitre, les résultats numériques de simulation par l'application de modèle de réseaux de neurones artificiels.

IV.2 Présentation du banc d'essais

Le banc d'essais présenté dans la figure (IV.1), est une plate-forme élémentaire (Covid-19 oblige !) qui permet de suivre l'évolution de la température et de l'humidité de l'air à l'entrée et à la sortie de notre prototype de déshumidificateur et d'en effectuer la mise au point.

Le prototype développé est un système expérimental destiné pour déshumidifier l'air humide en exploitant le phénomène d'adsorption de l'humidité par une quantité de silicagel placée dans le chemin d'écoulement de l'air.

La première étape, de la conduite des essais, consiste à vérifier l'étanchéité de chaque élément de l'installation avant le lancement du processus de déshumidification.



Figure IV.1 : Banc d'essais du prototype

IV.3 Résultats expérimentaux

Dans ce qui suit, nous présentons l'essentiel des résultats expérimentaux obtenus sur notre prototype de déshumidificateur d'adsorption solide. Les valeurs, des grandeurs mesurées telles que la température de l'air et l'humidité relative, ont été relevées à un écart de temps de deux minutes.

IV.3.1 Evolution de la température et de l'humidité en fonction du temps

Les principaux paramètres expérimentaux mesurés sont la température de l'air à l'entrée et à la sortie, l'humidité relative à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur à dessiccation solide. Sur les figures IV.2 et IV.3, nous avons représentés l'évolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie ainsi que l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur. Ces résultats ont été obtenus pour une vitesse de l'air et une masse de silicagel fixes.

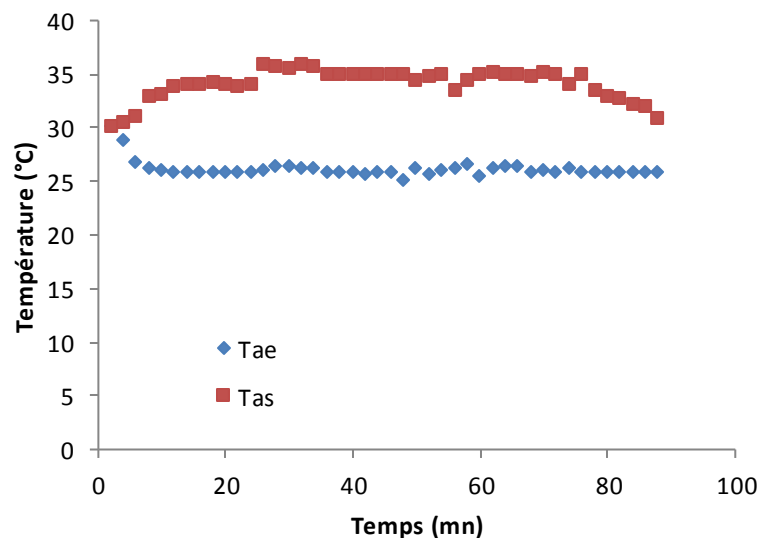


Figure IV.2 : Evolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur ($v_1=1\text{m/s}$)

Sur la figure IV.2, nous remarquons que la température de l'air à la sortie du déshumidificateur augmente ce qui montre que, durant le processus d'adsorption le silicagel a cédé une quantité de chaleur.

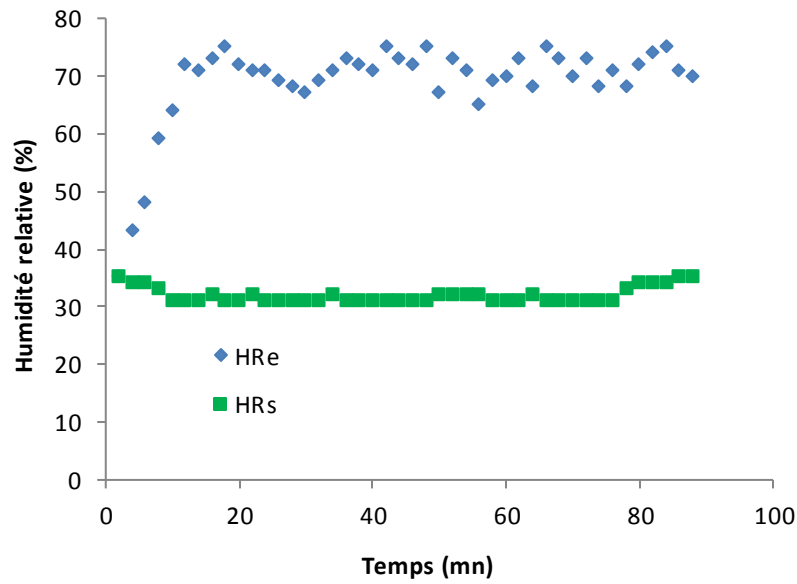
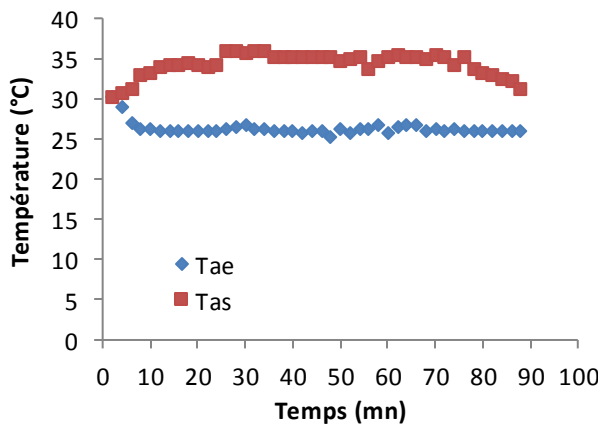


Figure IV.3 : Evolution de l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur ($v_1=1\text{m/s}$)

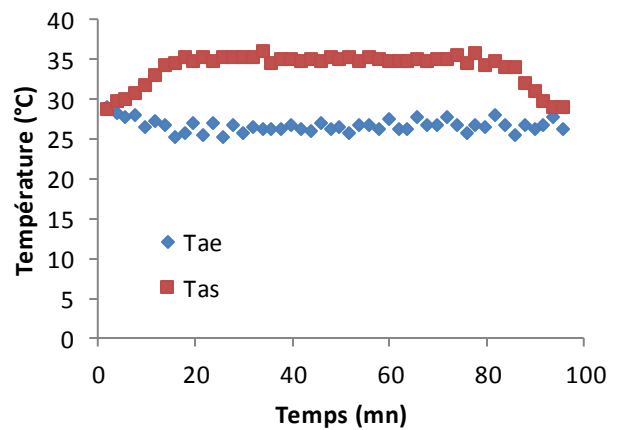
Nous remarquons aussi dans la figure IV.3, que l'humidité relative de l'air à la sortie du déshumidificateur a diminué de 31 % ce qui montre que le Silicagel est un bon matériau absorbant de l'humidité.

IV.3.2 Evolution de la température et de l'humidité de l'air pour différentes vitesses

Sur la figure IV.4 nous avons représenté l'évolution de la température de l'air en fonction du temps à l'entrée et à la sortie au cours du processus de déshumidification pour les vitesses suivantes : ($v_1=1\text{m/s}$) , ($v_2=2\text{m/s}$), ($v_3=3\text{m/s}$) et ($v_4=4\text{m/s}$). Nous remarquons que la température de l'air mesurée à la sortie du déshumidificateur diminue avec la vitesse de l'air.



a./ Vitesse de l'air ($v_1=1\text{m/s}$)



b./ Vitesse de l'air ($v_2=2\text{m/s}$)

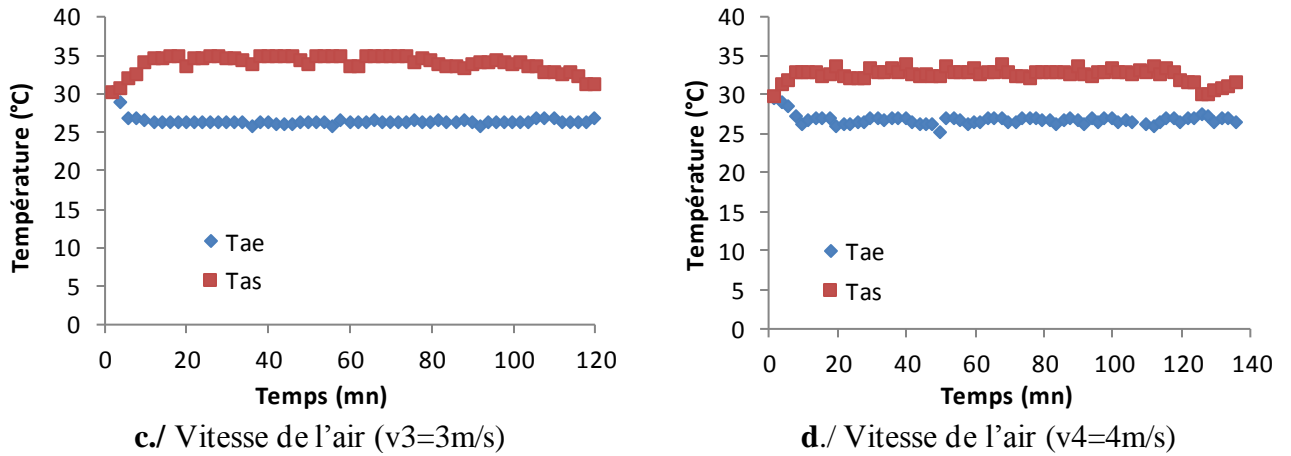


Figure IV.4 : Evolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur pour différentes vitesses d'air.

La figure IV.5 représente l'évolution de l'humidité relative de l'air en fonction du temps à l'entrée et à la sortie au cours du processus de déshumidification pour les vitesses de l'air suivantes : ($v_1=1\text{m/s}$), ($v_2=2\text{m/s}$), ($v_3=3\text{m/s}$) et ($v_4=4\text{m/s}$). Nous remarquons que l'humidité relative de l'air mesurée à la sortie du déshumidificateur augmente avec la vitesse de l'air.

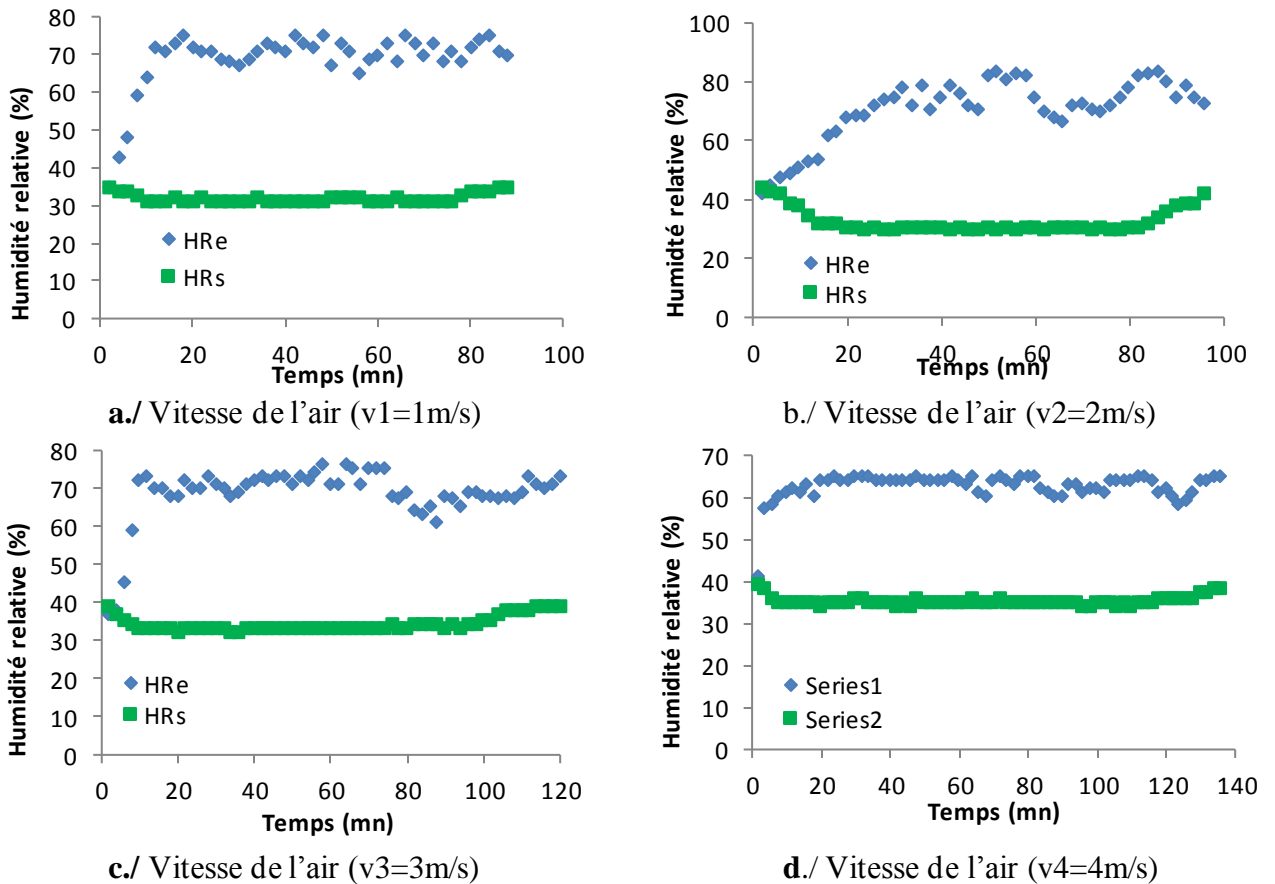


Figure IV.5 : Evolution de l'humidité relative à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur pour différentes vitesses d'air.

IV.3.3 Influence de la vitesse de l'air sur la température et l'humidité relative

Sur la figure IV.6 nous avons représenté, pour une masse de Silicagel fixe, la variation de la température et de l'humidité à la sortie de notre prototype de déshumidificateur à dessiccant solide en fonction de la vitesse de l'air. Nous remarquons que plus la vitesse de l'air s'accroît plus la température diminue et plus l'humidité augmente.

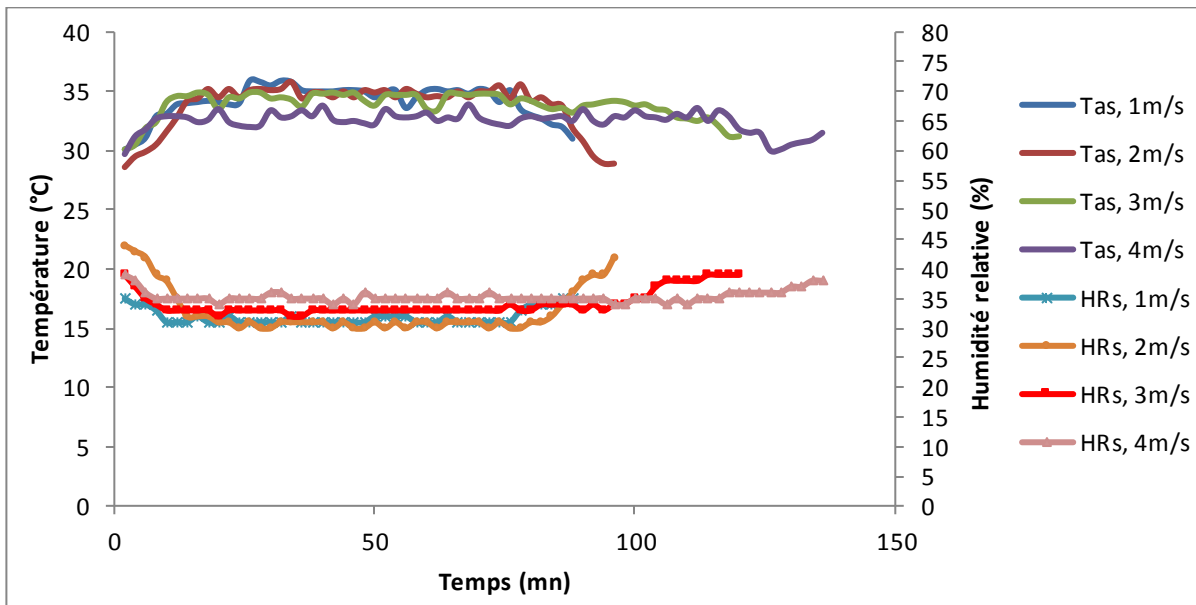
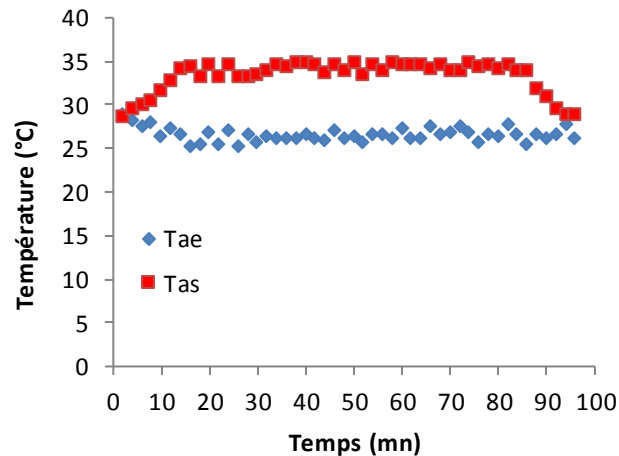


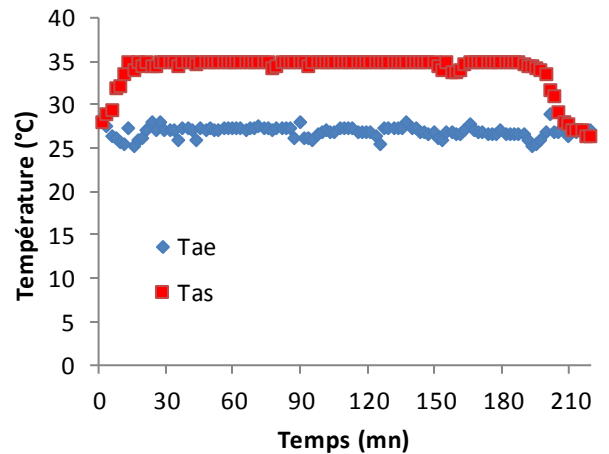
Figure IV.6 : Influence de la vitesse de l'air sur la température et l'humidité de l'air

IV.3.4 Influence de la masse du silicagel sur l'évolution de la température de l'air

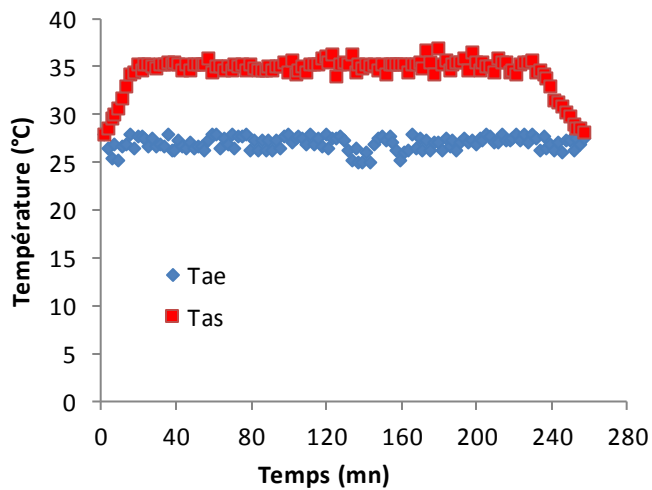
La figure IV.7, représente l'évolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur pour différentes masses de silicagel (0.5 kg, 1 kg, 1.5kg et 2 kg). Nous remarquons que la température de l'air à la sortie du déshumidificateur augmente. Ceci montre que, durant le processus d'adsorption le silicagel cède une quantité importante de sa chaleur d'adsorption.



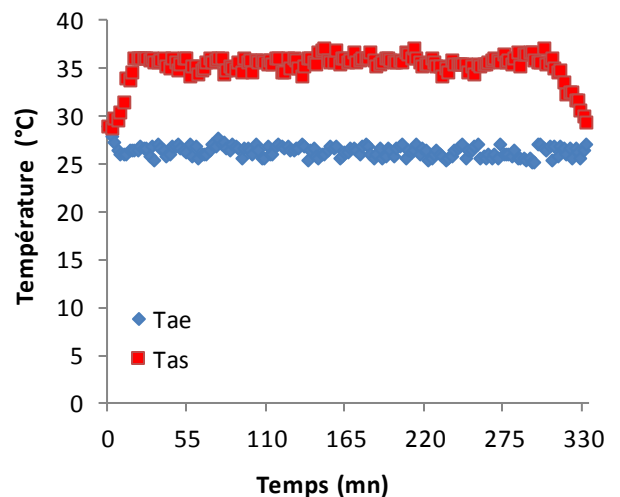
a) Masse de silicagel = 0.500kg



b) Masse de silicagel = 1 kg



c) Masse de silicagel = 1.5kg

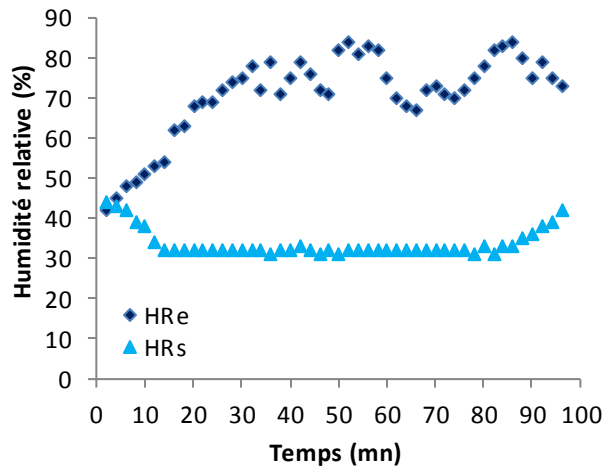


d) Masse de silicagel = 2kg

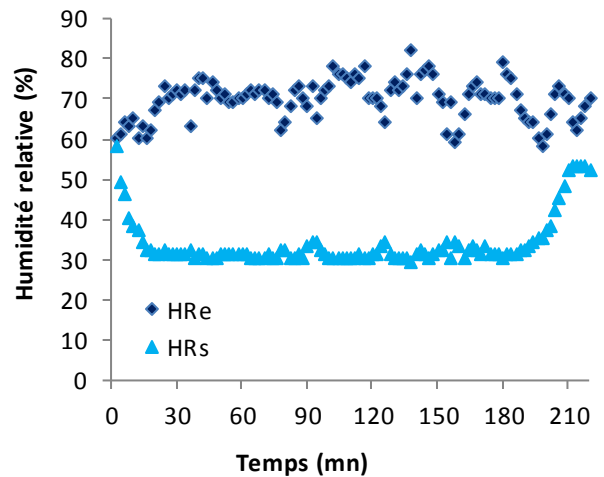
Figure IV.7 : Evolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur pour différentes masses de silicagel

IV.3.5 Influence de la masse du silicagel sur l'évolution de l'humidité relative de l'air

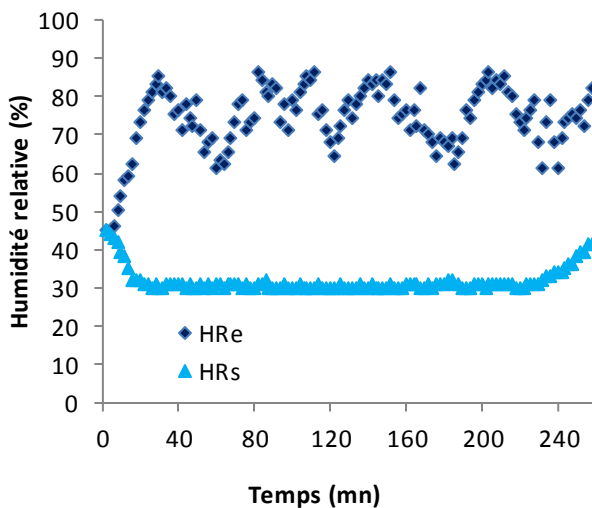
Sur la figure IV.8, nous avons représenté l'évolution de l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur pour une vitesse d'air de (2m/s) et pour différentes masses de silicagel (0.5 kg, 1 kg, 1.5kg et 2 kg). Nous remarquons que l'humidité relative de l'air à la sortie du déshumidificateur diminue durant le processus d'adsorption quand la quantité de silicagel augmente.



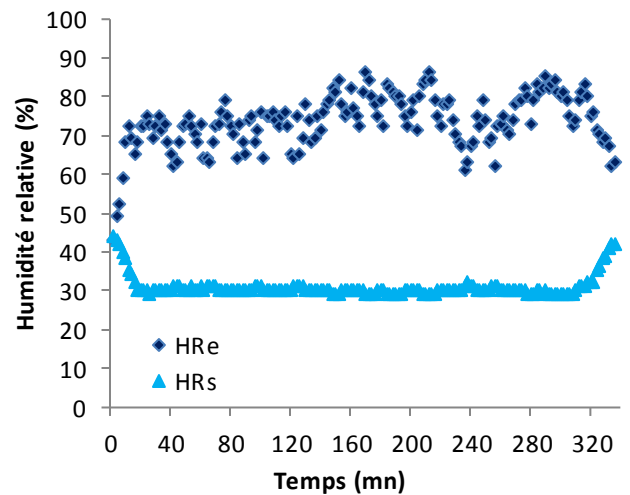
a) Masse de silicagel = 0.500kg



b) Masse de silicagel = 1kg



c) Masse de silicagel = 1.5kg



d) Masse de silicagel = 2kg

Figure IV.8 : Evolution de l'humidité relative à la sortie du déshumidificateur pour différentes masses de silicagel

IV.4 Résultats de prédiction par les réseaux de neurones

Dans cette section, un modèle de réseau de neurones artificiel a été développé afin de prédire la température et l'humidité relative à la sortie du déshumidificateur à dessiccation solide basé sur les résultats expérimentaux du prototype développé.

Le modèle neuronal développé par l'utilisation de l'environnement MATLAB®, est basé sur l'ensemble des résultats expérimentaux. Ce modèle est composé de 60 vecteurs d'entrées et de leurs vecteurs de sortie. Les valeurs, d'entrées et de sorties des réseaux sont redimensionnées pour avoir des variables, variant entre -1 et 1, afin de rendre le réseau plus efficace et avoir de meilleurs résultats. Ces données sont divisées en trois sous-ensembles.

Le premier est celui de la formation ou de l'apprentissage et représente (60%) de l'ensemble des données. Il est utilisé pour le calcul du gradient et la mise à jour des poids et des biais du réseau afin de minimiser la fonction de performance du réseau. Le second sous-ensemble est celui de la validation et représente (20 %) des données totales. Le test est la dernière étape, où le modèle du réseau neuronal entraîné est évalué par un ensemble de données qui n'ont pas été utilisés pour la formation du réseau. Enfin, le sous-ensemble de test qui représente (20 %) des données totales, est utilisé après l'étape de formation et de validation du modèle neuronal pour un test final.

Les perceptrons multicouches utilisés dans cette étude sont présentés par une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie, comme le montre la figure IV.9.

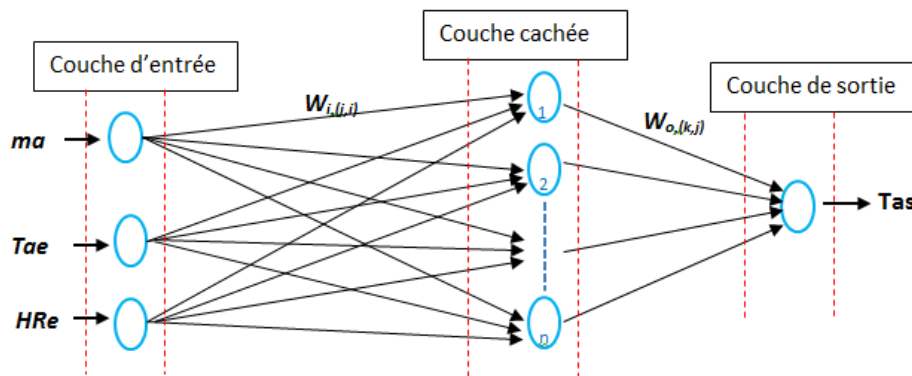


Figure IV.9 : Variables d'entrées utilisés pour prédire la température d'air à la sortie

Les variables comme le débit d'air (ma), la température d'air ambiante (Tae) et l'humidité relative à l'entrée (HRe) du déshumidificateur sont utilisées comme des paramètres d'entrées. La température à la sortie (Tas) du déshumidificateur est utilisée comme paramètre de sortie dans le modèle neuronal comme le montre la figure IV.10.

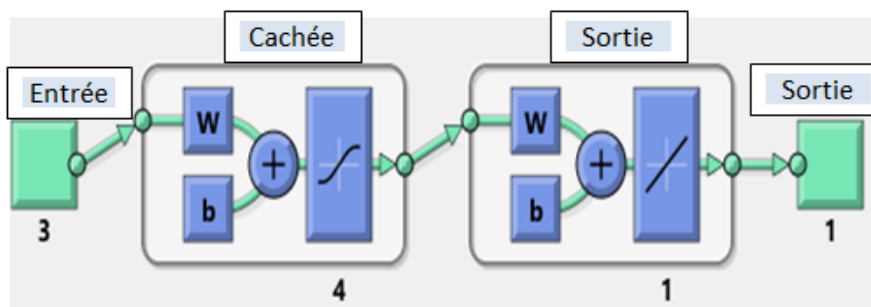


Figure IV.10 : Structure du réseau de neurones pour prédire la température d'air à la sortie

Aussi, pour la prédiction de l'humidité relative à la sortie du déshumidificateur, les perceptrons multicouches utilisés dans cette étude sont présentés par une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie, comme le montre la figure IV.11.

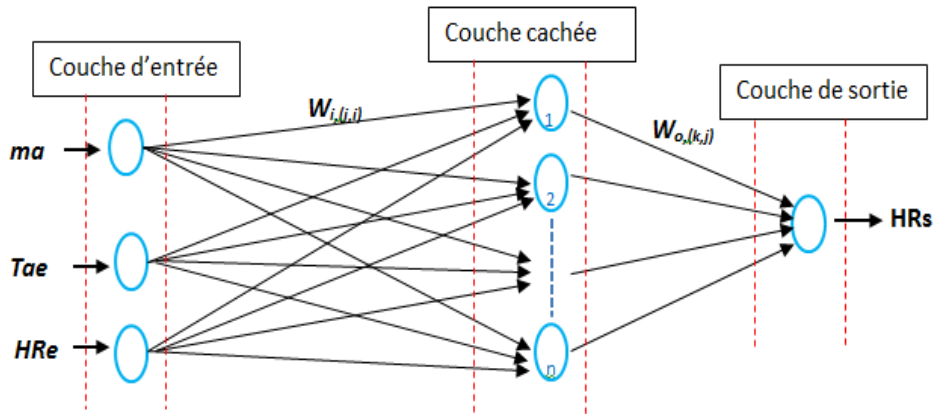


Figure IV.11 : Variables d'entrées utilisées pour prédire l'humidité relative à la sortie

Les variables comme le débit d'air (ma), la température d'air ambiante (Tae) et l'humidité relative à l'entrée (HRe) du déshumidificateur sont utilisées comme paramètres d'entrées. L'humidité relative à la sortie du déshumidificateur (HRs) est utilisée comme un paramètre de sortie dans le modèle neuronal comme le montre la figure IV.12.

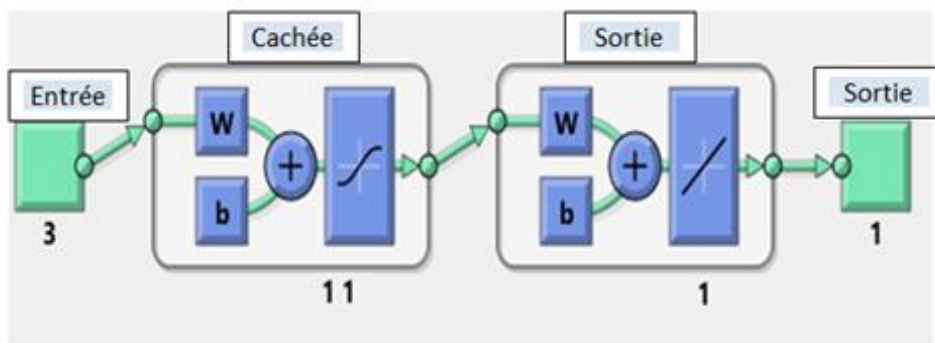


Figure IV.12 : Structure du réseau de neurones pour prédire l'humidité relative à la sortie

Le nombre de neurones de la couche cachée a été sélectionné par plusieurs essais pour estimer le modèle. On constate que le nombre de couche cachée utilisé pour prédire la température à la sortie du déshumidificateur est de 4 neurones, donc la structure du modèle de neurones est comme suit (3 -4 -1).

Pour prédire l'humidité relative à la sortie du déshumidificateur en utilise 11 neurones dans la couche cachée, donc la structure du modèle de neurones est comme suit (3 -11 -1).

Notre modèle qui est basé sur le réseau perceptron multicouche d'architecture, utilise l'algorithme d'apprentissage de rétro-propagation (Back-Propagation). Cet algorithme est actuellement l'outil le plus utilisé dans le domaine des réseaux de neurones [15]. C'est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure de fonctions dérivables. Cette méthode est basée mathématiquement sur l'algorithme de descente du gradient et utilise les règles de dérivation des fonctions dérivables de telle façon que l'erreur commise en sortie du réseau est rétro-propagée vers les couches cachées.

La performance du modèle a été évaluée par l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de détermination (R) :

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n (y_p - y_d)^2 \quad (IV.1)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_i^n (y_p - y_d)^2}{\sum_i^n (y_p)^2} \right) \quad (IV.2)$$

Avec ;

- n: est le nombre de données,
- y_k : sont les sorties du réseau,
- y_d : sont les données désirées.

IV.4.1 Modélisation de la température l'air à la sortie

La figure IV.13 montre l'évolution des erreurs quadratiques moyennes. Ces dernières diminuent continuellement jusqu'à des valeurs suffisamment faibles et qui montrent que les poids sont améliorés et que le réseau s'est formé.

La formation du réseau par l'algorithme de Levenberg-Marquardt a été arrêtée après 16 itérations parce que les différences entre les erreurs d'apprentissage et les erreurs de validation ont commencé à augmenter. L'algorithme d'entraînement BP est un algorithme de descente en gradient. Il tente d'améliorer les performances du réseau en minimisant l'erreur totale en changeant les poids le long de son gradient.

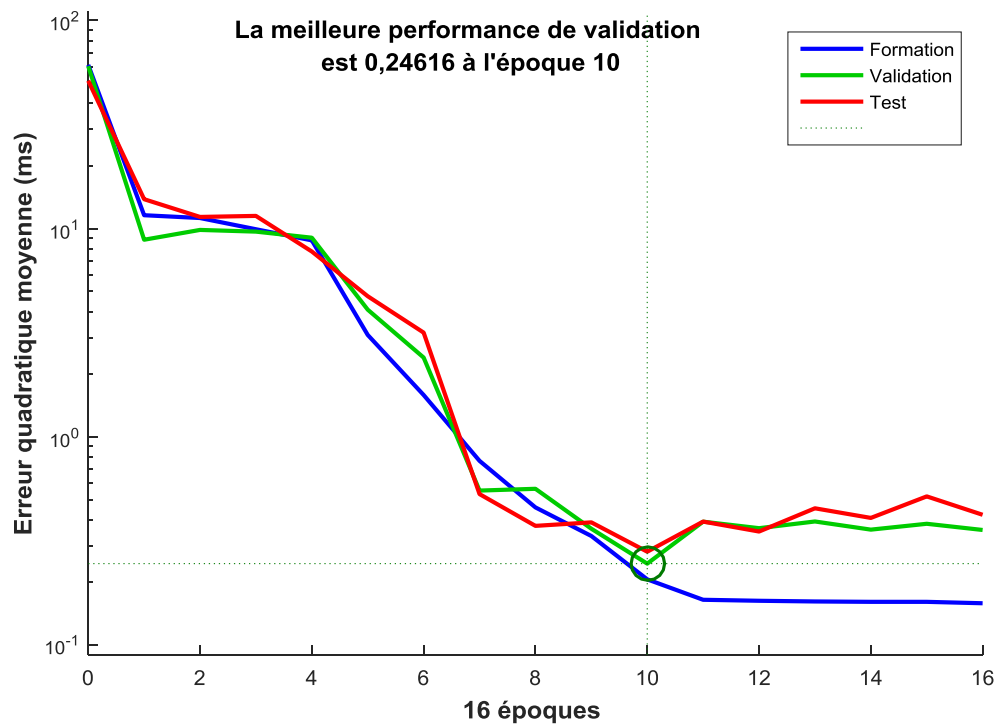


Figure IV.13 : Erreur quadratique moyenne pour la formation, validation et test, (Tas)

La figure IV.14 montre les graphiques des coefficients de régression (R), dans lesquels les cercles sont les points de données et la ligne représentant le meilleur ajustement entre les résultats prédits et les résultats réels. Les coefficients de régression obtenus lors de la formation, la validation et le test de notre modèle sont parfaits et dans les limites acceptables par la configuration étudiée.

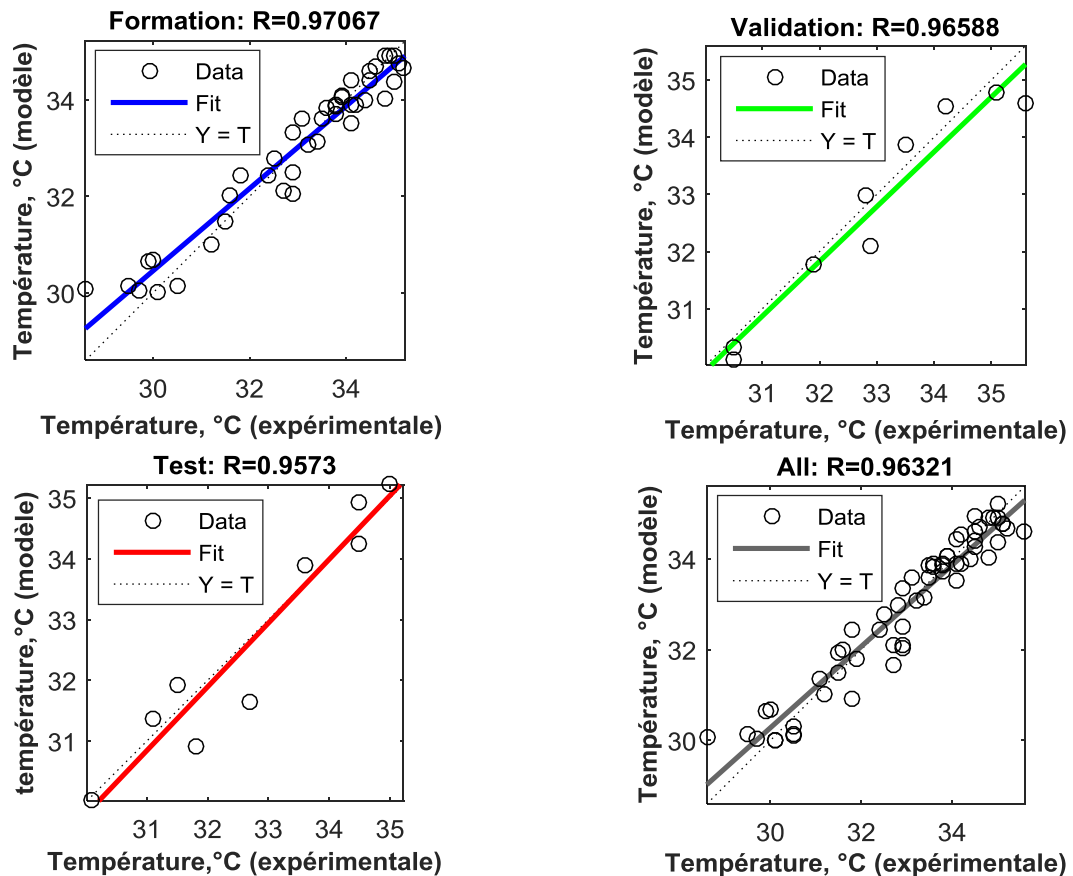


Figure IV.14 : Coefficient de régression obtenu lors de la formation, (Tas)

IV.4.2 Modélisation de l'humidité relative de l'air à la sortie

La figure IV.15 montre l'évolution des erreurs quadratiques moyennes. Ces dernières diminuent continuellement jusqu'à des valeurs suffisamment faibles et qui montrent que les poids sont améliorés, et que le réseau s'est formé.

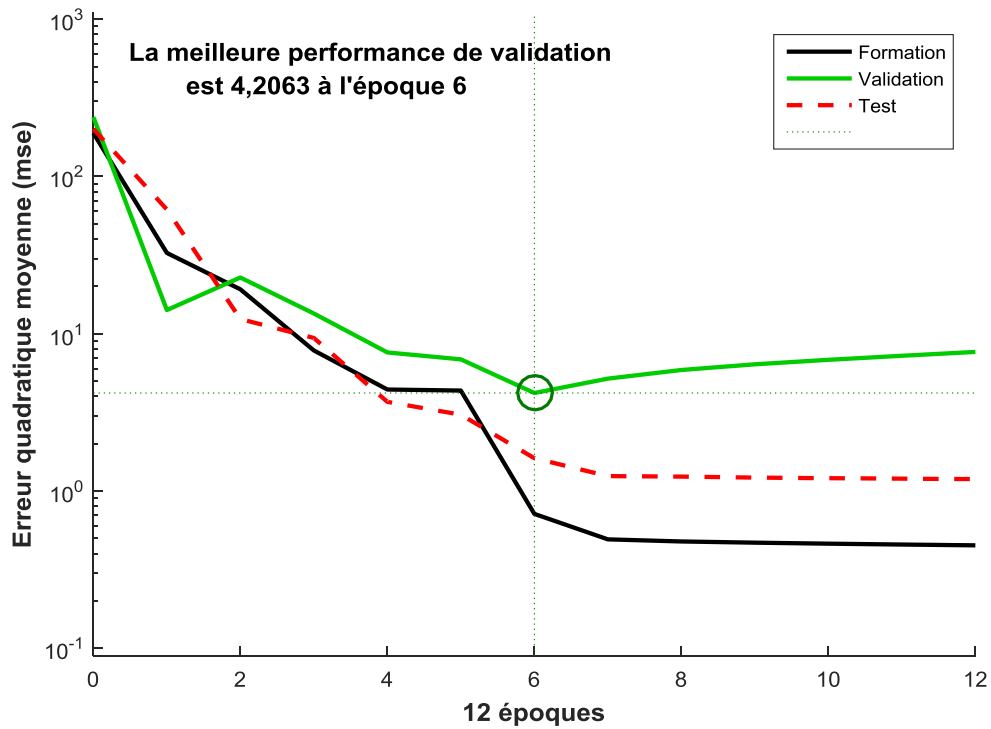


Figure IV.15 : Erreur quadratique moyenne pour la formation, validation et test, (HRs)

La figure IV.16 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits de la quantité d'eau condensée. Les valeurs prédites par le modèle sont en excellent accord avec l'expérience. Lorsque le coefficient de régression s'approche de 1, la précision de la prédiction s'améliore. Dans notre cas, le coefficient de régression est de 0.984, ce qui indique une excellente concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits.

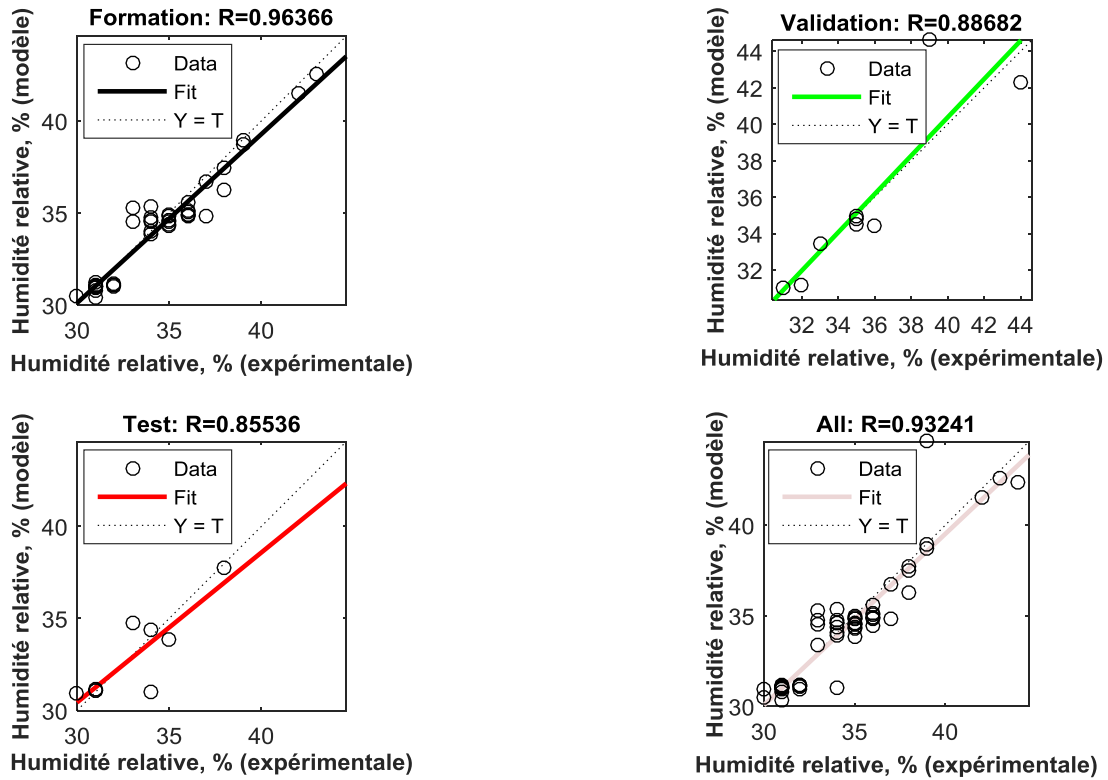


Figure IV.16 : Coefficient de régression obtenu lors de la formation, (HRs)

IV.5 Comparaison des résultats expérimentaux et prédits

Les figures IV.17 et 18 montrent la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits de la température et l'humidité relative de l'air à la sortie du déshumidificateur.

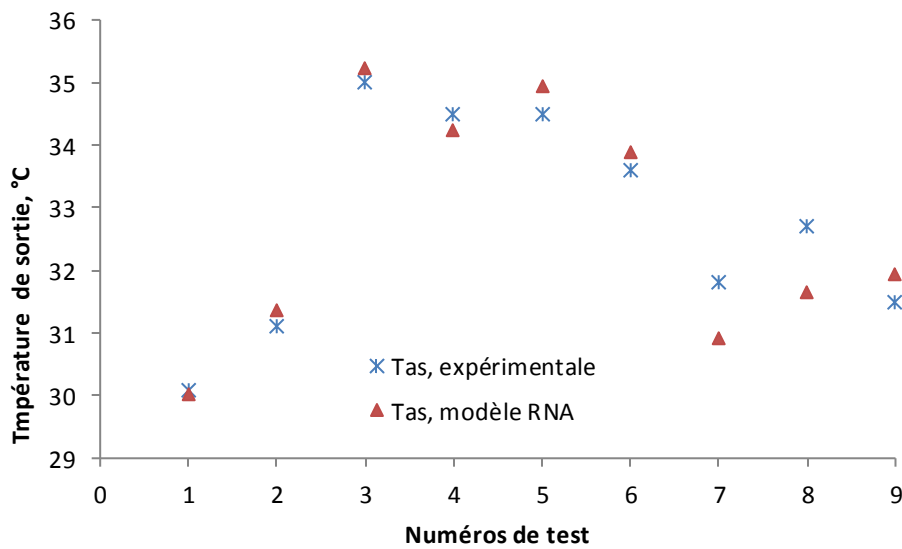


Figure IV.17 : Comparaison des températures expérimentales et prédites

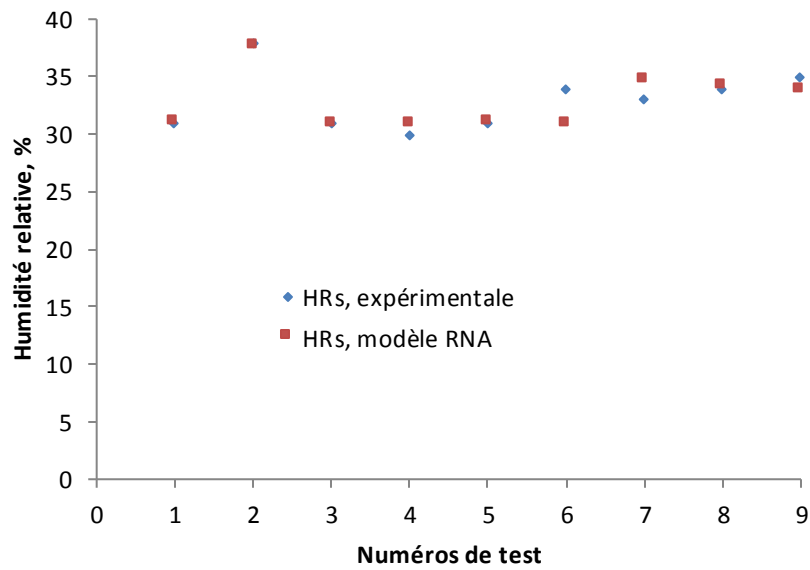


Figure IV.18 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et prédites

Ces résultats suggèrent qu'un modèle de calcul fiable pourrait être utilisé pour prédire le comportement thermique du déshumidificateur à dessiccation solide sous les différents paramètres comme le débit d'air, la température de l'air à l'entrée et l'humidité relative de l'air à l'entrée.



Conclusion Générale



Conclusion générale

Nous nous sommes, au cours de ce travail, intéressés à un système permettant une meilleure qualité de l'air à l'intérieur des édifices dont la demande devient de plus en plus élevée et dont les systèmes traditionnels sont de plus en plus remis en cause sur le plan environnemental.

Le système de rafraîchissement par dessiccation solide est un système ouvert utilisant un matériau déshydratant pour déshumidifier l'air. L'ensemble des équipements qui forme ce système écologique et qui permet une économie d'énergie considérable, contribue à la réduction des impacts sur l'environnement.

Les résultats expérimentaux, obtenus sur notre prototype de déshumidificateur à dessiccant solide, ont mis en évidence les constatations suivantes :

- Le silicagel libère de la chaleur au cours de l'adsorption de l'humidité de l'air.
- La capacité d'adsorption du silicagel ne dépend pas de la surface de l'adsorbant mais plutôt du nombre de sites.
- Le débit de l'air de traitement à travers le lit de dessiccant affecte fortement l'humidité de l'air à la sortie. Le taux d'humidité relative à la sortie diminue si le débit d'air de traitement diminue.
- Les paramètres qui influent sur l'adsorption du silicagel sont le débit, la température et l'humidité relative de l'air.

Afin d'obtenir un air plus sec à la sortie du déshumidificateur, la vitesse de l'air de traitement ou le débit massique de l'air de traitement doit être faible.

Pour les résultats de simulation, la nouvelle technique de modélisation est utilisée dans de nombreuses applications d'ingénierie, où les approches classiques sont trop complexes pour être utilisées. Ainsi, la technique ANN (artificial neural networks) permet de modéliser des phénomènes physiques dans des systèmes complexes sans nécessiter de représentations mathématiques explicites ou sans nécessiter des expériences exhaustives et plus coûteuses.

En raison de la grande précision et du faible temps de calcul, qui dépend du type de modèle et le nombre de couche caché utilisé de ci-dessus, le modèle ANN peut être utilisé efficacement pour prédire les performances d'un déshumidificateur solide en termes de température et d'humidité relative, plutôt que de mener des expériences coûteuses qui

Conclusion générale

demandent beaucoup de temps et d'argent ou en utilisant une autre méthode mathématique complexe nécessitant beaucoup plus d'efforts d'ingénierie.

Ce travail a montré la faisabilité et l'intérêt des systèmes de rafraîchissement dessicatif par adsorption surtout vis-à-vis de la protection de l'environnement et de la consommation en énergie électrique.



Références bibliographiques



Références bibliographiques

- [1] **Chung TW, Ghosh TK, Hines AL. (1993)**, 'Dehumidification of air by aqueous lithium chloride in a packed column'. *Sep Sci Technol* 28(1–3):533–550.
- [2] **Chung TW. (1994)**, 'Predictions of the moisture removal efficiencies for packed bed dehumidification systems'. *Gas Sep Purif* 8(4):265–268.
- [3] **Patnaik S, Lenz TG, Lof GOG. (1990)**, 'Performance studies for an experimental solar open-cycle liquid desiccant air dehumidification system'. *Sol Energy* 44(3):123–135.
- [4] **Jain S, Tripathi S, Das RS. (2011)**, 'Experimental performance of a liquid desiccant dehumidification system under tropical climates'. *Energy Convers Manag* 52(6):2461–2466.
- [5] **Bassuoni MM. (2011)**, 'An experimental study of structured packing dehumidifier /regenerator operating with liquid desiccant'. *Energy* 36(5):2628–2638.
- [6] **Alizadeh S, Saman WY. (2002)**, 'An experiment study of forced flow solar collector /regenerator using liquid desiccant'. *Sol Energy* 73(5):345–362.
- [7] **Zurigat YH, Abu-Arabi MK and Abdul-Wahab SA. (2004)**, 'Air Dehumidification by Triethylene Glycol Desiccant in A Packed Column', *Energy Conversion and Management*, 45: 141 – 155.
- [8] **Esam Elsarrag, Elsheikh Elmagzoub M. Ali, Sanjeev Jain. (2005)**, Design Guidelines and Performance Study on a Structured Packed Liquid Desiccant Air- Conditioning System. *HVAC&R Research*: 11(2), 319-337.
- [9] **G. Anies. (2011)**. 'Modélisation, simulation dynamique, validation expérimentale et optimisation énergétique d'une unité de rafraîchissement solaire par absorption'. Thèse de doctorat, École doctorale sciences exactes et leurs applications (Pau, Pyrénées Atlantiques). France.
- [10] **Kodoma A., Jin J., Goto M., Hirose T., Pons M. (2000)**, 'Entropic analysis of adsorption open cycles for air conditioning. Part 2: interpretation of experimental data', *International Journal of Energy Research*, Vol. 24.
- [11] **Techajunta S, Chirarattananon S, Exell RHB. (1999)**, 'Experiments in a solar simulator on solid desiccant regeneration and air dehumidification for air conditioning in tropical humid climate', *Renew Energy*; 17:549–68.
- [12] **Jia CX, Dai YJ, Wu JY, Wang RZ. (2007)**, 'Use of compound desiccant to develop high performance desiccant cooling system', *International Journal of Refrigeration*, 30,345-353.
- [13] **M.A. Mandegari, H. Pahlavanzadeh. (2009)**, 'Introduction of a New Definition Effectiveness of Desiccant Wheels', *Energy* 34.

Références bibliographiques

- [14] **T.S.Ge, Y.Li. (2008)**, ‘Experimental Study on a Two-Stage Rotary Desiccant Cooling System’, *International Journal of Refrigeration*, 32; 498 – 508.
- [15] **Sun lian-Ming et Meunier Francis.**, *Adsorption. Aspects théoriques. Technique de l'ingénieur* (2003).
- [16] **Hellmut G. Karge., Jens Weitkamp. (2008)** ‘Adsorption and Diffusion’. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- [17] **Jürgen U. Keller, Reiner Staudt. (2005)** “GAS ADSORPTION EQUILIBRIA” *Experimental Methods and Adsorptive Isotherms*”. Springer Science + Business Media, Inc Boston.
- [18] **ASHRAE** Fundamentals Handbook, (1997).
- [19] **Soteris A. Kalogirou. (2000)**, ‘Applications of artificial neural-networks for energy systems’. *Applied Energy*. 67; 17-35.
- [20] **M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan. (2012)**, ‘Applications of artificial neural networks for refrigeration, air-conditioning and heat pump systems- A review’. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1340– 1358.
- [21] **J.M. Cejudo, R. Moreno, A. Carrillo. (2002)**, ‘Physical and neural network models of a silica-gel desiccant wheel’. *Energy and Buildings* 34 ; 837–844.
- [22] **D.B. Jani, Manish Mishra, P.K. Sahoo. (2016)**, ‘Performance prediction of rotary solid desiccant dehumidifier in hybrid air-conditioning system using artificial neural network’. *Applied Thermal Engineering* 98; 1091–1103.
- [23] **V K Mishra, R P Singh, R K Das. (2018)**, ‘Performance prediction of solid desiccant rotary system using artificial neural network’. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 404: 012006.
- [24] **I.P. Koronaki, E. Rogdakis, T. Kakatsiou. (2012)**, Thermodynamic analysis of an open cycle solid desiccant cooling system using Artificial Neural Network. *Energy Conversion and Management* 60 : 152–160.



Annexe



ANNEXE

Les propriétés thermodynamiques du mélange air-vapeur d'eau, à l'entrée et à la sortie du déshumidificateur à dessiccation solide utilisant le matériau silicagel comme dessiccant, sont tracés sur le diagramme psychrométrique comme le montre les figures A.1, A.2, A.3 et A.4.

Débit	Température E	Humidité E	Température S	Humidité S
1m/s	25,9	73	35,1	31
	25,9	72	35,0	31
	25,8	71	35,0	31
	25,7	75	35,0	31
	25,8	73	35,1	31
	25,9	72	35,1	31
	25,2	75	35,0	31
	26,2	67	34,5	32
	25,7	73	34,9	32
	26,1	71	35,1	32
	26,2	65	33,6	32
	26,6	69	34,5	31
	25,5	70	35,1	31
	26,3	73	35,2	31
	26,5	68	35,0	32

Tableau A.1 Valeurs expérimentales de température et d'humidité à l'entrée et la sortie pour une vitesse de 1m/s

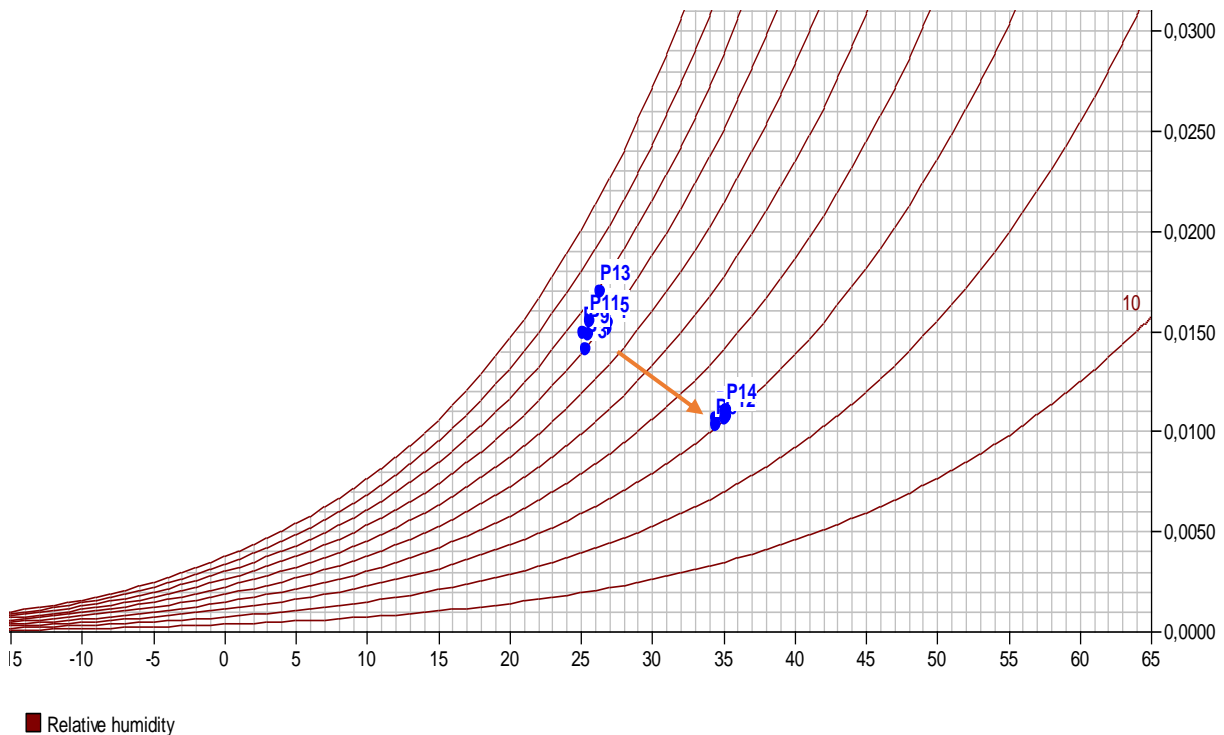


Figure A.1 Les propriétés thermodynamiques du mélange air-vapeur d'eau à l'entrée et à la sortie pour une vitesse de 1m/s

Débit	Température E	Humidité E	Température S	Humidité S
2m/s	25,7	75	35,0	31
	25,8	73	35,1	31
	25,9	72	35,1	31
	25,2	75	35,0	31
	26,2	67	34,5	32
	25,7	73	34,9	32
	26,1	71	35,1	32
	26,2	65	33,6	32
	26,6	69	34,5	31
	25,5	70	35,1	31
	26,3	73	35,2	31
	26,5	68	35,0	32
	26,5	75	35,1	31

Tableau A.2 Valeurs expérimentales de température et d'humidité à l'entrée et la sortie pour une vitesse de 2m/s

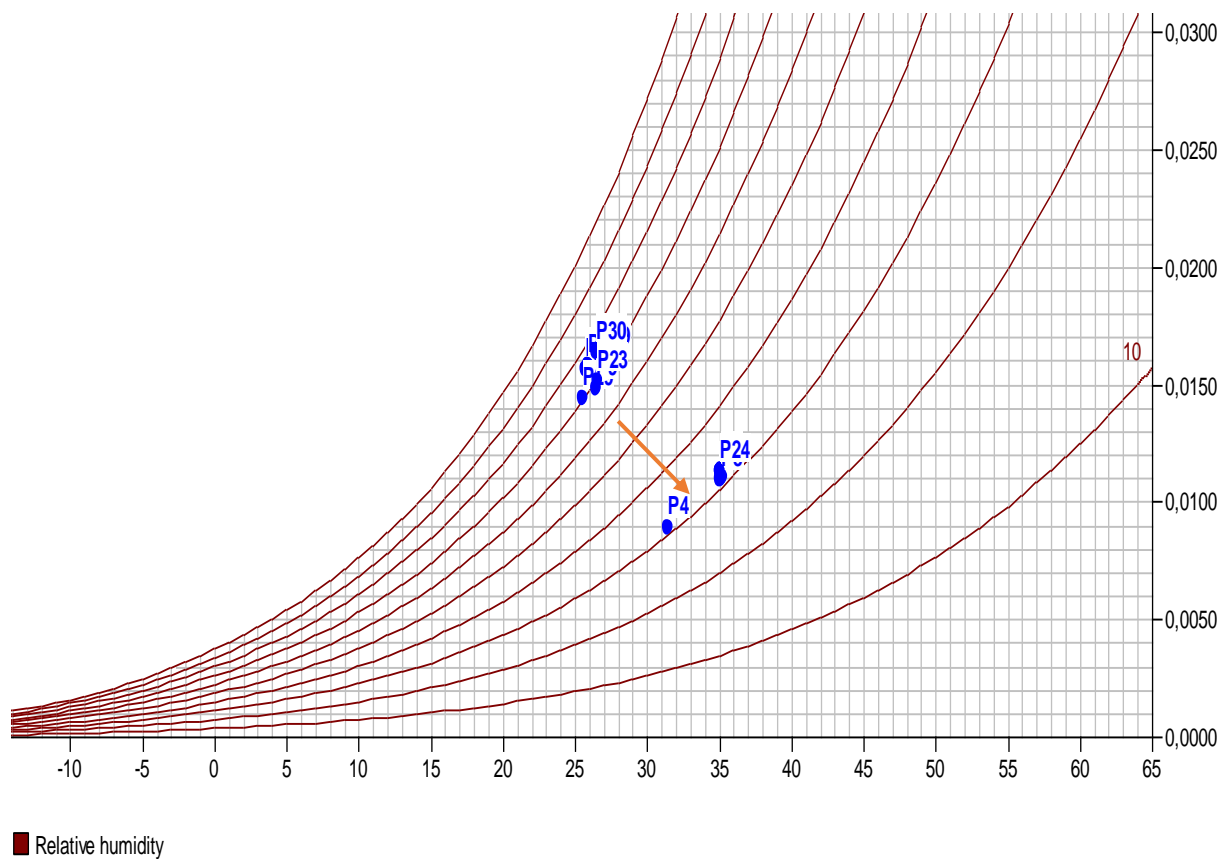


Figure A.2 Les propriétés thermodynamiques du mélange air-vapeur d'eau à l'entrée et à la sortie pour une vitesse de 2m/s

Débit	Température E	Humidité E	Température S	Humidité S
3m/s	26,4	76	34,7	33
	26,2	71	33,5	33
	26,2	71	33,4	33
	26,2	76	34,8	33
	26,5	75	34,8	33
	26,2	71	34,7	33
	26,2	75	34,8	33
	26,2	75	34,8	33
	26,1	75	34,7	33
	26,0	68	33,9	34
	26,1	67	34,4	33
	26,0	69	34,2	33
	26,0	64	33,8	34
	26,1	63	33,5	34

Tableau A.3 Valeurs expérimentales de température et d'humidité à l'entrée et la sortie pour une vitesse de 3m/s

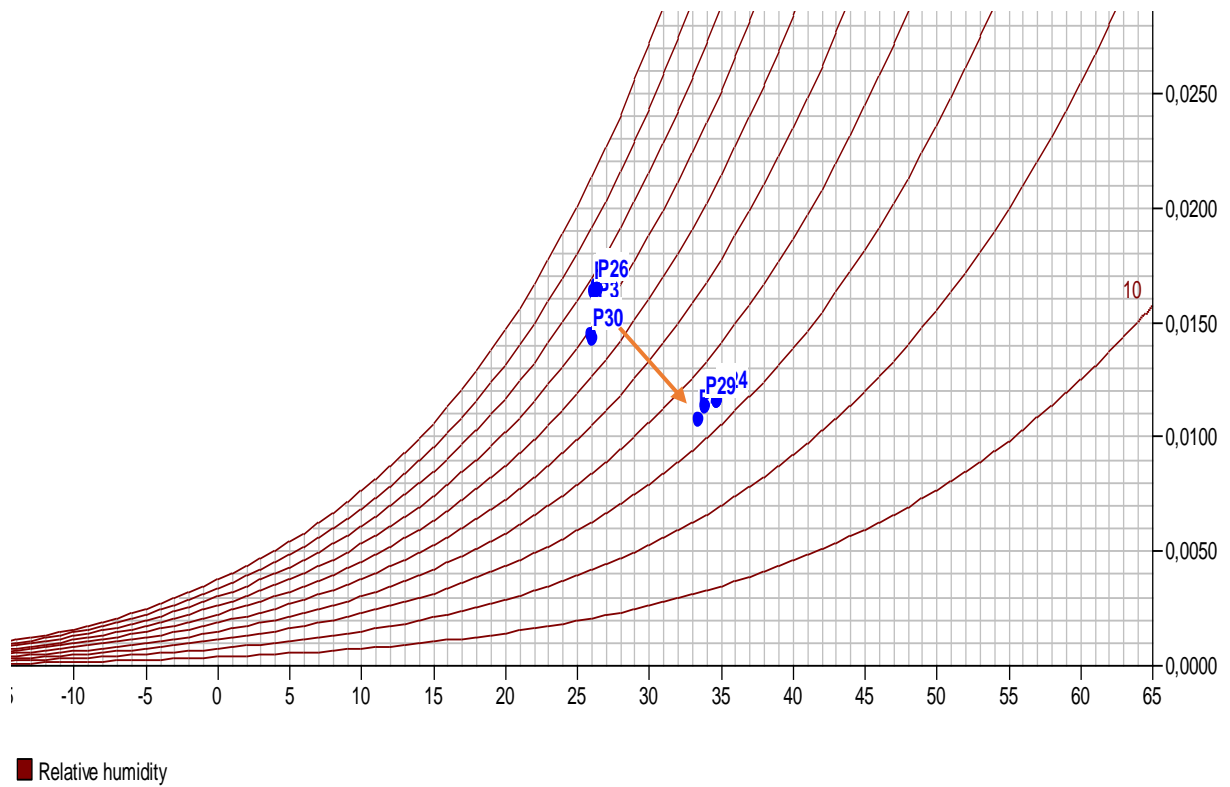


Figure A.3 Les propriétés thermodynamiques du mélange air-vapeur d'eau à l'entrée et à la sortie pour une vitesse de 3m/s

Débit	Température E	Humidité E	Température S	Humidité S
4m/s	26,9	61	32,7	35
	26,8	60	33,9	35
	26,0	64	32,8	35
	26,0	65	32,4	36
	26,8	64	32,2	35
	26,9	63	32,1	35
	26,8	65	32,7	35
	26,6	65	32,9	35
	26,6	65	32,7	35
	26,2	62	32,8	35
	26,6	61	32,9	35
	26,8	60	32,5	35
	26,7	60	33,5	35
	26,2	63	32,5	35
	26,8	63	32,2	35
	26,5	61	32,9	34
	26,9	62	32,8	34
	26,8	62	33,4	35
	26,3	61	32,9	35
26,6	64	32,8	35	

Tableau A.4 Valeurs expérimentales de température et d'humidité à l'entrée et la sortie pour une vitesse de 4m/s

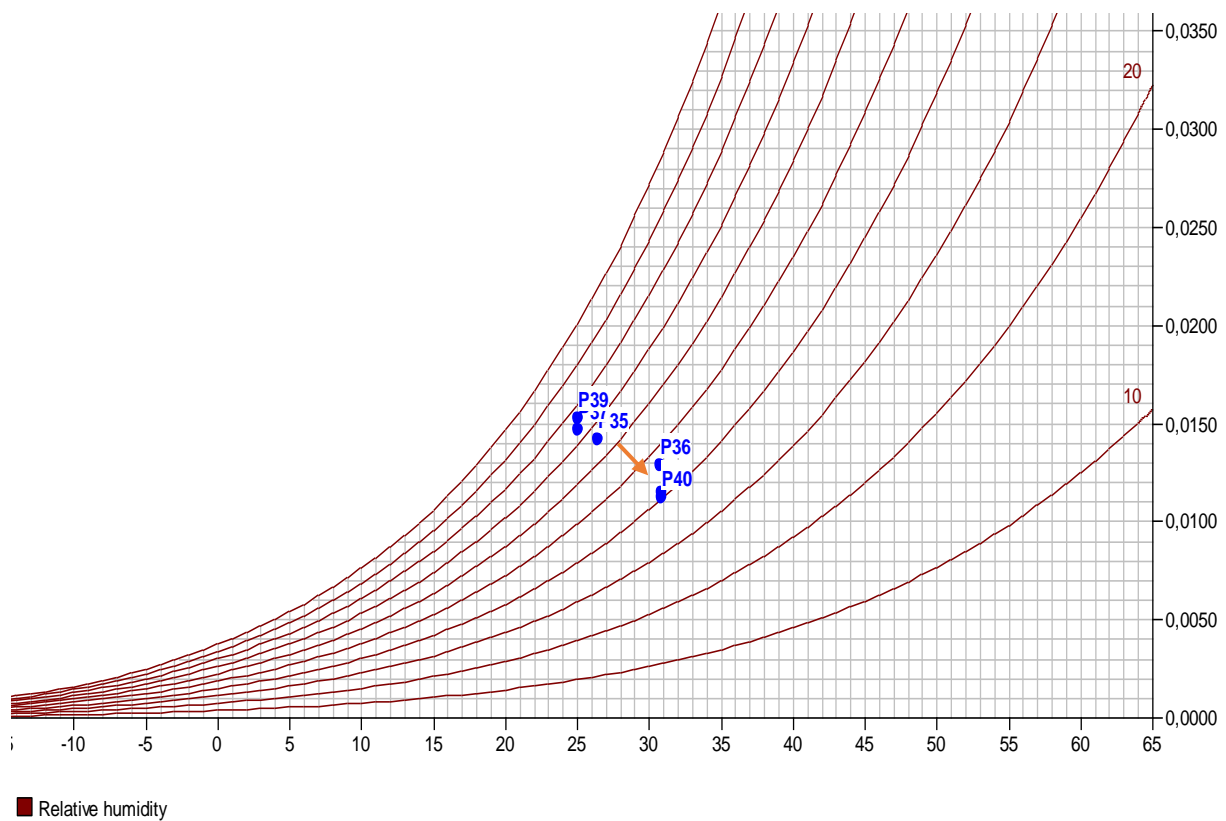


Figure A.4 Les propriétés thermodynamiques du mélange air-vapeur d'eau à l'entrée et à la sortie pour une vitesse de 4m/s