



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت// 2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **Génie des procédés**

Option: **Génie Chimique**

Thème

**Etude la performance de quelques matériaux
hygroscopique**

Présenté par

1- Kaid chahinez

Soutenu le 28/06/2026 devant le jury composé de :

Président :	DOUARA Nadia	Docteur	Université de Mostaganem
Examineur :	BENZEKRI BENALLOU Mokhtar	Docteur	Université de Mostaganem
Rapporteur :	MEKIBS Zohra	Docteur	Université de Mostaganem
Invité	BENDERDOUCHE Nouredine	Pr	Université de Mostaganem



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère **MERE**, pour son amour infini, sa tendresse, ses sacrifices et ses encouragements permanents.

À mon très cher **PERE**, pour son soutien, ses conseils précieux et tous les efforts qu'il a fournis pour ma réussite.

À mes chers frères **Mohamed EL AMINE** et **Sofiane** , et à ma chère sœur **Fariel**, pour leur soutien moral, leur affection et leur présence à mes côtés.

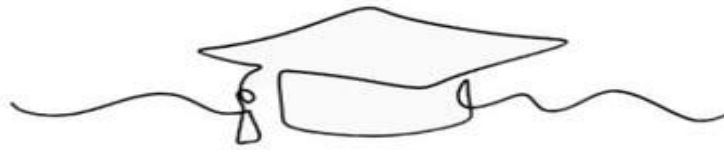
À mes collègues et amis(es), pour les beaux moments partagés, leur aide et leur encouragement durant tout mon parcours universitaire.

A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

chahinez



والحمد لله رب العالمين



Remerciements

Avant tout, nous remercions DIEU le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

Mes premiers remerciements vont à mon encadrant de mémoire, le Prof : BENDERDOUCHE Nouredine ,je le remercie pour tous les efforts qu'il a déployés dans la supervision du déroulement des manipulations, de sa contribution substantielle dans l'analyse et l'interprétation des résultats, des corrections du manuscrit, des encouragements et des conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer.

Et bien sûr, nous n'oublions pas les efforts de mon encadrant **Mkibbs Zohra**, pour son aide précieuse, sa disponibilité, ses conseils et son accompagnement tout au long de ce travail. Sa patience, son professionnalisme et ses encouragements ont été d'une grande valeur et ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect, de ma sincère reconnaissance et de mes plus vifs remerciements

Je remercie notre respectueuse gratitude au **Douara nadia**, l'université de Mostaganem, qui a bien voulu **BenzekriM.benallou** accepter de présider le jury de soutenance ainsi qu'à l'Université de Mostaganem pour avoir bien voulu examiner ce travail.

J'ai remercions également tous nos enseignants du Département de Génie des procédés qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire.

Je exprimons enfin notre gratitude à nos collègues et à toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

الملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة أداء ثلاثة مواد استرطابية هي البنتونيت، وهلام السيليكا (Silica Gel)، وكلوريد الكالسيوم (CaCl_2) بهدف هذا العمل إلى تقييم قدرة هذه المواد على امتصاص الرطوبة من الهواء الجوي واسترجاع الماء الممتص بواسطة التسخين، مع التركيز على تطبيقاتها في أنظمة استخلاص المياه من الهواء والتقطير الشمسي. أنجزت الدراسة التجريبية باستعمال ثلاث تقنيات رئيسية هي: التجفيف في الفرن، واسترجاع الماء بواسطة المكثف، والتقطير الشمسي. أظهرت النتائج أن كفاءة الامتزاز والتحرير الحراري للماء تتأثر بطبيعة المادة المستعملة وبالظروف المناخية المحيطة، خاصة درجة الحرارة والرطوبة النسبية للهواء. وقد حقق كلوريد الكالسيوم أفضل أداء استرطابي بفضل قدرته العالية على امتصاص الماء، بينما أظهر هلام السيليكا كفاءة جيدة في الامتزاز والتجديد. أما البنتونيت فقد مثّل بديلاً اقتصادياً وصديقاً للبيئة رغم انخفاض قدرته على الامتصاص مقارنة بالمواد الأخرى. وتؤكد هذه الدراسة أهمية المواد الاسترطابية في تطوير أنظمة مستدامة لاستخلاص المياه من الهواء اعتماداً على الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية: المواد الاسترطابية، البنتونيت، هلام السيليكا، كلوريد الكالسيوم، الامتزاز، إزالة الامتزاز، استرجاع المياه، التقطير الشمسي.

Résumé

Ce travail de mémoire porte sur l'étude de la performance de trois matériaux hygroscopiques : la bentonite, le gel de silice et le chlorure de calcium (CaCl_2). L'objectif principal est d'évaluer leur capacité d'adsorption de l'humidité atmosphérique ainsi que leur aptitude à restituer l'eau par chauffage dans le cadre des applications de récupération d'eau et de distillation solaire. L'étude expérimentale a été réalisée à l'aide de trois méthodes : le séchage à l'étuve, la récupération d'eau par condenseur et l'utilisation d'un distillateur solaire. Les résultats obtenus montrent que la capacité d'adsorption et de désorption dépend fortement de la nature du matériau ainsi que des conditions climatiques, notamment la température et l'humidité relative de l'air. Le chlorure de calcium a présenté les meilleures performances hygroscopiques grâce à sa forte capacité d'absorption de l'eau. Le gel de silice a montré une bonne efficacité d'adsorption et de régénération, tandis que la bentonite constitue une alternative économique et écologique malgré une capacité d'adsorption plus faible. Cette étude confirme l'intérêt des matériaux hygroscopiques pour les systèmes de récupération d'eau atmosphérique alimentés par l'énergie solaire.

Mots-clés : Matériaux hygroscopiques, bentonite, gel de silice, chlorure de calcium, adsorption, désorption, récupération d'eau, distillation solaire.

Abstract

This master's thesis investigates the performance of three hygroscopic materials: bentonite, silica gel, and calcium chloride (CaCl_2). The main objective is to evaluate their ability to adsorb atmospheric moisture and release water during thermal regeneration for water harvesting and solar distillation applications. The experimental study was carried out using three techniques: oven drying, water recovery by condensation, and solar distillation. The obtained results show that adsorption and desorption capacities strongly depend on the nature of the material and environmental conditions, particularly air temperature and relative humidity. Calcium chloride exhibited the highest hygroscopic performance due to its remarkable moisture absorption capacity. Silica gel demonstrated good adsorption and regeneration efficiency, while bentonite represents an economical and environmentally friendly alternative despite its lower adsorption capacity. The study confirms the potential of hygroscopic materials for solar-powered atmospheric water harvesting systems.

Keywords: Hygroscopic materials, bentonite, silica gel, calcium chloride, adsorption, desorption, water recovery, solar distillation.

Liste des tableaux

Tableau I.1 :Classification des matériaux hygroscopique	8
TableauI. 2. Propriétés sur le chlorure de calcium	10
Tableau I.3.Pourcentage de matériaux d'eau absorbée par matériaux	13
Tableau I.3.Pourcentage d'eau récupérable par les matériaux Hygroscopiques	14
Tableau I.4.Conditions de dégradation thermique des matériaux hygroscopiques	34
Tableau IV. 6 :l' étude de la bentonite	37
Tableau IV.7 :l' étude de gel de silice	40
Tableau IV.8 :l' étude de ca cl ₂	42

Figure I.3 : Isotherme d'adsorption de la vapeur d'eau .	5
Figure I .4.: Structure de la montmorillonite.	6
Figure I 5: Domaines industriels d'utilisation des bentonite.	7
Figure I.6 : Gel de silice .	9
Figure I.7 : chlorure de calcium (CaCl ₂).	10
Figure I.8 : Volume de contrôle microscopique.	10
Figure II.9 : Schéma d'étuve de séchage. .	11
Figure II.10 : Schéma d'une simple distillation .	17
Figure II.11: Distillateur solaire simple à pente unique .	21
Figure II. 12: Distillateur à double pente	22
Figure II .13 : Solaire terre-eau	24
Figure II.14 : Distillateur à cascade	25
Figure III. 14 : Méthode par condenseur	30
Figure VI.15: Variation de l'humidité de la bentonite en fonctions de la température de l'air	31
Figure VI.16 : Variation de l'humidité en fonctions de l'humidité relative de l'air.	35
Figure VI.17: Variation de l'humidité de gel de silice en fonctions de la température de l'air.	36
Figure VI.18 :Variation de l'humidité du gel de silice en fonction de l'humidité relative de l'air.	38
Figure VI.19 : Variation de l'humidité du chlorure de calcium en fonctions de la température de l'air..	39
FigureVI.21 : Variation du pourcentage récupéré de la bentonite en fonctions du temps de chauffage.	40
FigureVI.22 :Variation du pourcentage récupéré de gel de silice en fonctions du temps de chauffage .	41
FigureVI.23 : Variation du pourcentage récupéré de ca cl ₂ en fonctions du temps de chauffage .	45

Liste des

Liste des abréviations

AWG Atmospheric Water Generator (Générateur d'eau atmosphérique)

HDH Humidification–Déshumidification

HR Humidité Relative

Ha Humidité Absolue

T Température

P Pression atmosphérique

V Vitesse du vent

W Teneur en eau (Humidité du matériau)

Mh Masse humide

Msec Masse sèche

CaCl₂ Chlorure de calcium

SiO₂ Dioxyde de silicium (Gel de silice)

m Masse

g Gramme

°C Degré Celsius

Min Minute

km/h Kilomètre par heure

mbar Millibar

% Pourcentage

Dédicace

Remerciements

Liste des tableaux

Introduction Générale.....	1
Chapitre I , Généralité sur les matériaux hygrosopique.....	3
I.2. Procédé de phénomène de l hygrosopique	4
I.3. Propriétés d'un matériaux hygrosopique :	5
I.3. 1.Capacité d'adsorption.....	5
I.3. 2.Température de désorption.....	6
I.3. 3. Cinétique.....	6
I.3. 4. Forme	6
I.3. 5. Isotherme d'adsorption	7
I.4.Domains d'utilisation des matériaux hygrosopiques.....	7
I.4.1. Génération d'eau atmosphérique (AWG).....	7
I.4.2. Dessalement d'eau de mer	7
I.4.3. Récupération d'eau à partir de déchets industriels	8
I.4.4. Refroidissement et climatisation solaire	8
I.5. TableauI.1 :Classification des matériaux hygrosopique	8
I.6.Les matériaux utilisés dans cette étude sont	9
I.6.1.Les bentonites.....	9
I.6.1.2.Origine de la bentonite	9
I.6.1.3.Application de la bentonite	9
I.6.2.Gel de silice	10
I.6.2.2 Propriétés du gel de silice	10
I.6.3.chlorure de calcium (CaCl_2)	11
I.6.3.2. L'hydratation de chlorure de calcium (la réaction avec l'eau).....	11
I.6.3.3. TableauI 2. Propriétés sur le chlorure de calcium	12
I.6.3.4. l'application de chlorure de calcium	12
I.6.3.5. Traitement d'eau.....	12
I.6.3.6. Industrie de la construction	12
I.7. TableauI.3.Pourcentage de matériaux d'eau absorbée par matériaux.....	13
I.8.TableauI.3.Pourcentage d'eau récupérable par les matériaux Hygrosopiques.....	13
I.9. TableauI.4.Conditions de dégradation thermique des matériaux hygrosopiques.....	14
Partie II : le séchage	14

I.1. Définition de séchage	14
I.2. Les processus de séchage	15
I.2.1. Par conduction	15
I.2.2. Par convection	15
I.2.3. Par les rayonnements	15
I.2.4. Par perte diélectrique	15
I.3. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage	15
I.3.1. Humidité	15
I.3.2. Humidité absolue	16
I.3.3. Humidité relative	16
I.3.4. Degré de saturation	16
I.4. les grandeurs caractéristiques des produits à sécher	17
I.4.1. Porosité volumique d'un produit	17
I.4.2. Le Teneur en eau du produit à sécher (X)	17
Chapitre II. Techniques utilisé	19
II.1. l'étuve	20
II.1. Séchage à l'étuve	20
II.1.2. Le principe de séchage à étuve	20
II.2.1. La distillations	21
II.2.2. La distillation simple	21
II.3. Historique de la distillation solaire	22
II.3.1. Définition de la distillation solaire	22
II.3.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire	23
II.3.3. Les différents types de distillateurs solaires	23
II.3.3.1 Distillateurs à simple effet	23
II.3.3.2 Distillateur à pente unique	23
II.3.3.3. Distillateur à double pentes	24
II.3.3.4. Distillateur solaire terre- eau	24
II 3.3.5. Distillateur solaire à cascades	25
II.4. Paramètres influents sur la distillation solaire	25
II.4.1. Les paramètre de construction	26
II.4.1.1. Couverture	26
II.4.1.1.2. L'inclinaison	26
II.4.1.1.3. L'absorbeur	26
II.4.1.1.2 Paramètres métrologiques	26
II .4.1.1.1 Epaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller	27
II.4.1.1.2 Caractéristiques du distillateur	27

Chapitre III : Matériel et Méthodes	28
III.1. Matériel utilisé	29
III.1. Principe de fonctionnement	30
III.2. Méthode par condenseur	30
III.2.1. Matériel utilisé	30
III.2.2. Principe de fonctionnement	31
III.3.1 distillateur solaire	31
III.3.2.Principe de fonctionnement	32
Chapitre IV: Résultats et discussions	33
Conclusions	51

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction Générale

Les matériaux hygroscopiques jouent un rôle crucial dans de nombreux processus industriels en raison de leur capacité intrinsèque à échanger des molécules d'eau avec l'air ambiant. Contrairement à l'absorption simple, l'hygroscopie implique une interaction physico-chimique complexe où le matériau ajuste sa teneur en eau en fonction de l'humidité relative et de la température. En génie chimique, comprendre ce mécanisme est essentiel pour maîtriser la stabilité des produits solides, qu'ils soient alimentaires, pharmaceutiques ou de construction[1].

La performance d'un matériau hygroscopique est évaluée selon deux axes principaux : sa capacité d'équilibre et sa cinétique de transfert. La capacité est souvent représentée par les isothermes de sorption, qui décrivent la quantité d'eau retenue à une température donnée. La cinétique, quant à elle, dépend de la porosité du matériau et des coefficients de diffusion. Un matériau performant doit non seulement posséder une grande affinité pour l'eau, mais aussi permettre un transfert efficace pour répondre aux exigences des cycles de séchage ou de régulation de l'humidité [2].

L'interaction entre l'eau et le matériau hygroscopique est un processus exothermique. Lors de l'adsorption, de la chaleur est libérée (chaleur isostérique), ce qui modifie la température locale du matériau et, par extension, sa performance globale. Dans le cadre du génie chimique, cet aspect est fondamental pour le dimensionnement des réacteurs ou des systèmes de stockage d'énergie thermique, où le matériau sert de vecteur de transfert de chaleur par sorption [3].

Aujourd'hui, l'optimisation des matériaux hygroscopiques est au cœur des problématiques de développement durable. On les retrouve dans la conception de bâtiments à basse consommation (matériaux bio-sourcés régulateurs d'humidité), dans les systèmes de climatisation par dessiccateurs solides ou encore dans la conservation des principes actifs en pharmacie. L'enjeu actuel réside dans la synthèse de nouveaux matériaux (comme les MOFS ou les composites biosourcés) offrant des performances accrues et une meilleure durabilité[4].

L'efficacité des systèmes de gestion de l'humidité et de distillation solaire repose sur la capacité des matériaux hygroscopiques à capter et à restituer l'eau de manière réversible.

Introduction Générale

Cependant, chaque matériau présente des mécanismes de transfert de masse et des capacités de rétention thermique très divergents.

La question centrale de ce travail est la suivante :

"Comment les propriétés physico-chimiques intrinsèques de la bentonite, du gel de silice, du chlorure de calcium (CaCl_2) influencent-elles leur cinétique d'adsorption et leur rendement de régénération lorsqu'ils sont soumis à différents environnements thermiques (séchage classique en étuve, condensation et distillation solaire) ?

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygrosopique

I.1. Définition des matériaux hygroscopiques

L'hygroscopie est la capacité de certaines substances à attirer et retenir les molécules d'eau présentes dans l'air ambiant par absorption ou adsorption. Ce phénomène joue un rôle essentiel dans les technologies de récupération de l'eau atmosphérique, même lorsque l'humidité relative est faible. Il repose sur des interactions physico-chimiques entre les molécules d'eau et les surfaces des matériaux, notamment les liaisons hydrogène et les effets de nanoconfinement [5]. Les matériaux hygroscopiques, appelés aussi sorbants, possèdent une forte affinité pour l'eau : ils capturent la vapeur d'eau de l'air, la stockent dans leur structure puis la libèrent sous forme de vapeur concentrée ou d'eau liquide sous l'effet d'un stimulus externe comme la chaleur solaire. Ces matériaux constituent ainsi un élément clé dans les procédés de production d'eau potable à partir de l'humidité atmosphérique[5].

I.2. Procédé de phénomène de l'hygroscopique

Les méthodes basées sur les matériaux hygroscopiques reposent sur l'utilisation de dessiccants solides ou liquides, tels que le gel de silice, les zéolithes ou certains sels hygroscopiques, capables de capter l'humidité de l'air ambiant. Le principe de fonctionnement est fondé sur un cycle adsorption–désorption : durant la phase d'adsorption, les molécules d'eau sont fixées à la surface du matériau sous l'effet de forces physiques ou physico-chimiques, généralement lorsque l'humidité relative est élevée et la température basse. Ensuite, lors de la phase de désorption, un apport de chaleur, souvent d'origine solaire, permet de libérer la vapeur d'eau adsorbée, qui est ensuite condensée afin de produire de l'eau liquide [6]Ce mécanisme est illustré par la Figure 1.

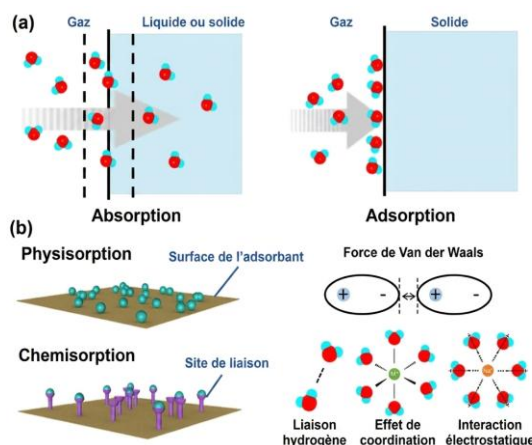


Figure I.1: Mécanismes de sorption de l'humidité.

I.3. Propriétés d'un matériaux hygroscopique :

Peu importe le type de dessiccant employé, les paramètres suivants sont principaux pour la conception d'un système optimal :

I.3. 1.Capacité d'adsorption

Il s'agit d'une mesure de la capacité de rétention d'eau du dessiccant. Idéalement, un chiffre élevé est préférable, car cela signifie que pour un même débit d'eau, la quantité de dessiccant nécessaire sera moindre. Cela implique, en soi, un coût de système réduit – tant au niveau du coût du dessiccant nécessaire que de celui du système (taille de la chambre, isolation, poids). La figure 2 montre la capacité des dessiccants actuellement utilisés dans les systèmes HDH et AWG. L'humidité typique du désert est de 25 %. À ce niveau, le chlorure de lithium a une capacité maximale de 35 % (p/p), le gel de silice de type 1 (le « type standard ») est d'environ 15 % et le tamis moléculaire d'environ 20 % [6].

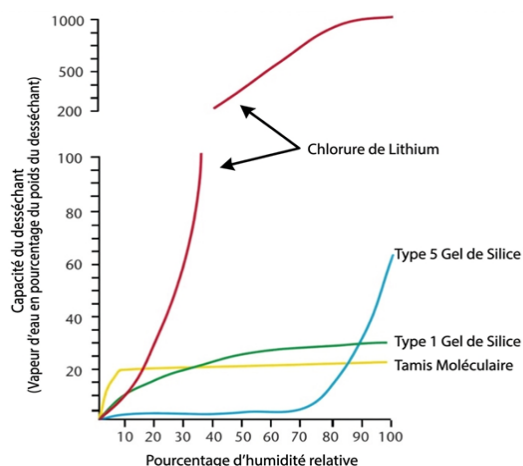


Figure.I.2 :capacités des matériau hygroscopique a différents température.

I.3. 2.Température de désorption

Une température de désorption plus basse est souhaitable. D'une part, les pertes thermiques sont moindres dans les systèmes à basse température, en raison d'une réduction exponentielle des pertes par rayonnement. D'autre part, à des températures plus basses, l'énergie solaire thermique devient viable. Bien que l'énergie solaire thermique puisse être utilisée pour atteindre des températures extrêmement élevées, typiques des systèmes solaires à concentration [7] – il s'agit toutefois d'installations complexes et de grande envergure, mieux adaptées à la production d'électricité. Les panneaux plats classiques à fluide caloporteur ou à chauffage direct de l'air n'ont un rendement acceptable que lorsque l'écart de température par rapport à la température ambiante est inférieur à 50 °C [8].

I.3. 3. Cinétique

La rapidité de l'adsorption et de la désorption joue un rôle important dans la conception du système. Des déshydratants rapides permettent d'effectuer davantage de cycles par unité de temps. Cela pourrait entraîner une diminution des dépenses associées aux déshydratants ainsi qu'une baisse des coûts du système en fonction du volume d'eau[9].

I.3. 4. Forme

L'incidence sur la conception globale est influencée par la forme physique du dessiccant. Par exemple, les roues déshydratantes qui emploient des revêtements sur les ailettes [9] peuvent se révéler très onéreuses à changer régulièrement.

Les systèmes à lit fixe peuvent présenter une meilleure efficacité en termes de coût.frais du système en fonction du volume d'eau produit.

I.3. 5. Isotherme d'adsorption

La forme de l'isotherme d'adsorption [10] déterminera son adéquation dans les zones où l'humidité relative est faible. Puisque le manque d'eau est un enjeu majeur dans les milieux secs et chauds, un matériau absorbant ayant une isotherme de Langmuir serait idéal.

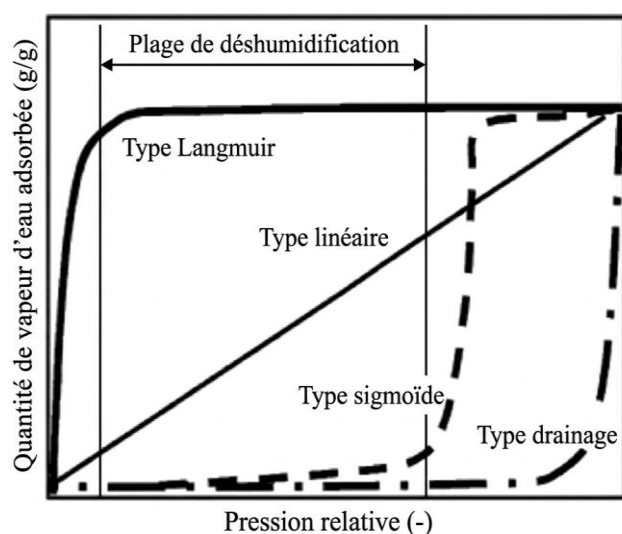


Figure I.3 : Isotherme d'adsorption de la vapeur d'eau .

I.4.Domains d'utilisation des matériaux hygroscopiques

I.4.1. Génération d'eau atmosphérique (AWG)

C'est l'application principale traitée dans l'ouvrage. Les matériaux desséchants sont utilisés pour extraire l'humidité de l'air ambiant, même dans des zones arides, pour produire de l'eau potable [7].

I.4.2. Dessalement d'eau de mer

Les principes de sorption sont appliqués au dessalement à petite échelle, où l'air sert de vecteur pour transporter l'humidité extraite d'une source d'eau salée avant d'être déshumidifié par un matériau hygroscopique[7].

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygroscopique

I.4.3. Récupération d'eau à partir de déchets industriels

Les systèmes à base de desséchants permettent de récupérer l'eau contenue dans les effluents gazeux ou les rejets thermiques industriels[7].

I.4.4. Refroidissement et climatisation solaire

Des matériaux comme le gel de silice sont intégrés dans des systèmes de refroidissement par adsorption pour réguler l'humidité et la température des bâtiments[7].

I.5. Tableau I.1 : Classification des matériaux hygroscopique [8]

Classification	Type de matériau Hygroscopique	Exemples	Caractéristiques Principales
Matériaux adsorbants solides poreux	Adsorbants physiques	Gel de silice, zéolithe,	Retiennent l'humidité à la surface des pores ; grande surface spécifique ; régénération possible par chauffage
Sels hygroscopiques Matériaux argileux naturels	Absorbants chimiques Matériaux Argiles Hygroscopiques	Chlorure de calcium (CaCl_2), chlorure de lithium (LiCl) Bentonite, montmorillonite	Absorbent l'eau par réaction chimique ; forte capacité d'absorption ; peuvent devenir liquides (déliquescence) Forte capacité de rétention d'eau ; structure lamellaire ; faible coût

I.6. Les matériaux utilisés dans cette étude sont

I.6.1. Les bentonites

La bentonite se réfère à une argile majoritairement composée de montmorillonite du groupe des smectiques, elle est réputée pour son important potentiel de gonflement (capacité d'absorption) suite à l'absorption d'un fluide: L'eau ou un fluide organique[11]. Les bentonites sont des silicates d'alumine hydratés qui font partie du groupe des Montmorillonites .

$\text{Si}_4 (\text{Al} (2-x) \text{Rx}) (\text{O}_{10}, \text{H}_2\text{O}) (\text{Cex}, n\text{H}_2\text{O})$ ou $\text{Si}_4 (\text{Al} (2-x) \text{Rx}) (\text{H}_2\text{O})_n$ avec :

- R = Mg, Fe, Mn, Zn, Ni
- Ce (cations échangeables) = Ca, Na, Mg.

I.6.1.2. Origine de la bentonite

Ces roches argileuses formées sont appelées bentonite, du nom du gisement près de Fort Benton (Wyoming, États-Unis). Elle renferme plus de 75 % de montmorillonite, une substance identifiée pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France) [12].

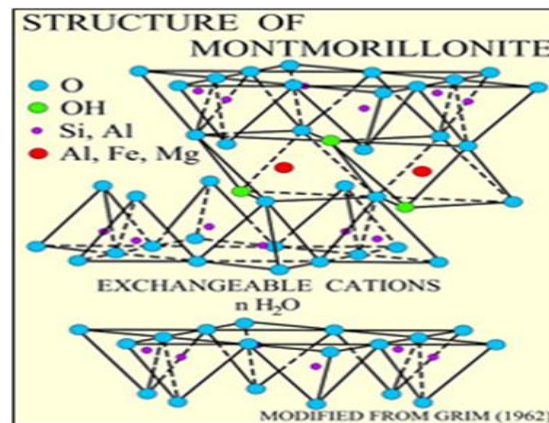


Figure I.4. : Structure de la montmorillonite.

I.6.1.3. Application de la bentonite

Les bentonites connaissent de nombreuses utilisations dans divers secteurs (forage, fonderie, céramique, peinture, pharmacie, terres de décoloration,...etc.). La plupart de la bentonite extraite à travers le globe est employée pour lier le sable de moulage dans l'industrie de la fonderie, ainsi que pour épaissir les fluides de forage [13].

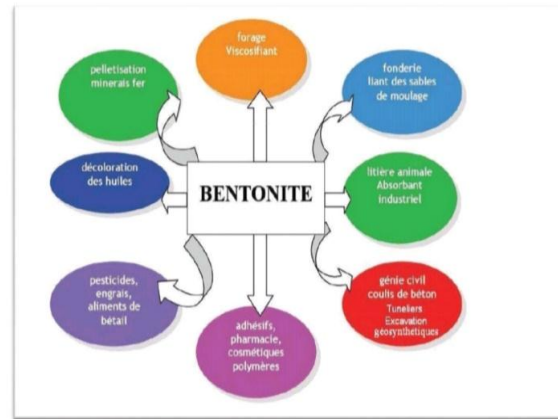


Figure I 5: Domaines industriels d'utilisation des bentonite

I.6.2. Gel de silice

Le gel de silice est un matériau non toxique et chimiquement inerte fait de dioxyde de silicium amorphe. Il dispose d'un réseau interne de pores microscopiques connectés, offrant une surface typique de 700 à 800 mètres carrés par gramme. Autrement dit, la surface intérieure d'une cuillère à café chargée de gel de silice est comparable à celle d'un terrain de football. Ces micro-capillaires adsorbent ou désorbent des molécules d'eau jusqu'à ce qu'un équilibre de pression de vapeur est atteint avec l'humidité relative de l'air environnant [13].

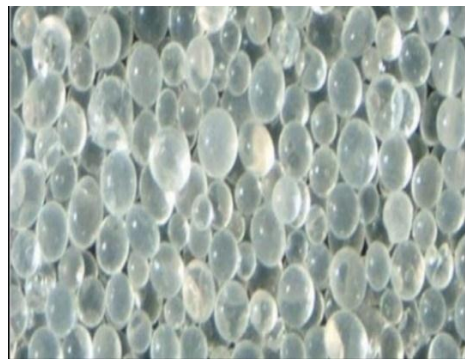


Figure I.6 : Gel de silice

I.6.2.2 Propriétés du gel de silice

Le gel de silice est riche en particules ayant une structure poreuse qui captent l'humidité. Il est capable d'absorber 40% de son poids en moisture.

* Protégez les matériaux contre la rouille et la corrosion.

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygroscopique

* L'option d'un séchoir de couleur blanche est courante, car le gel capte l'humidité sans provoquer de modification physique.

* Le gel de silice a été utilisé comme absorbant de l'humidité (pour déshydrater l'air, purifier les gaz) ou comme adsorbant majeur dans la phase liquide. Il a été signalé que le gel de silice a la capacité d'adsorber des colorants de solution dans différents systèmes avec lesquels il entre en contact [14].

I.6.3.chlorure de calucime (CaCl_2)

Le chlorure de calcium est un composé inorganique de couleur blanche, dont la formule chimique est CaCl_2 ($M = 111\text{g/mol}$). Ce composé chimique, cristallin et solide, est fortement hygroscopique et réagit de façon exothermique lorsqu'il est dilué dans l'eau. On peut facilement le trouver en version hydratée.

$\text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Il se dissout aisément dans l'eau (745 g/L) et confère une conductivité appréciable à la solution [15].



Figure I.7 : chlorure de calucime (CaCl_2) .

I.6.3.2. L'hydratation de chlorure de calcium (la réaction avec l'eau)

Sous des conditions thermodynamiques standards, le chlorure de calcium, dont la formule est CaCl_2 , se manifeste comme un solide blanc (chlorure de sodium à l'état fondu ou anhydre). Il existe également sous la forme de chlorure de calcium cristallisé ou hydraté $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (masse molaire $M = 219$).

ou le chlorure de calcium déshydraté $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (avec une masse molaire M de 183 g/mol). Il se dissout aisément dans l'eau et l'alcool. C'est une substance très hygroscopique, ce

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygroscopique

qui signifie qu'en contact avec l'eau, elle réagit pour former un hydrate en libérant une grande quantité de chaleur :



I.6.3.3. Tableau 2. Propriétés sur le chlorure de calcium[16]

Les grandeurs physiques	Les valeurs
Le poids molaire	111g/mol
La densité	2,15 g/ml
Température de la fusion	782 °C
Le point d'ébullition	1600 °C

I.6.3.4. l'application de chlorure de calcium

I.6.3.5. Traitement d'eau

On emploie aussi le chlorure de calcium dans le processus de purification de l'eau afin de diminuer sa dureté. La principale cause de la dureté de l'eau réside dans les sels de calcium et de magnésium qu'elle contient. Par conséquent, il peut être utilisé pour éliminer les particules en suspension dans l'eau .

Lors du processus de traitement de l'eau potable ou des eaux usées, on peut incorporer du CaCl_2 afin d'augmenter l'efficacité des filtres, notamment dans les systèmes de filtration tels que la filtration à sable ou la filtration sur charbon actif. Cela contribue à éliminer les particules fines et à améliorer la clarté de l'eau traitée [16] .

I.6.3.6. Industrie de la construction

Dans le secteur de la construction, le chlorure de calcium est fréquemment employé pour ses Caractéristiques de déshydratation et pour optimiser la solidification du béton. On l'ajoute fréquemment au Béton servant d'accélérateur de prise, ce qui réduit donc la durée nécessaire à la durcissement du béton, notamment en période de froid. On utilise aussi le chlorure de calcium pour éviter le gel du béton en période hivernale, car celui-ci risque de geler avant d'acquérir sa résistance.

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygroscopique

Satisfaisante L'ajout de chlorure de calcium réduit le point de congélation de l'eau dans le béton, ce qui assure la prise et le durcissement même en conditions de froid [16].

I.7. Tableau I.3. Pourcentage de matériaux d'eau absorbée par matériaux [17]

Voici les pourcentages approximatifs d'eau absorbée par différents matériaux hygroscopiques utilisés dans les systèmes de récupération d'eau atmosphérique

Matériau	Pourcentage	Remarque
Bentonite	15 a 20 %	Adsorption modérée
Gel de silice	25 a 40%	Très utilisé comme dessiccant
Chlorure de calcium (CaCl ₂)	95 a 100%	Très hygroscopique

I.8. Tableau I.3. Pourcentage d'eau récupérable par les matériaux Hygroscopiques [18]

Le pourcentage récupérable représente la quantité d'eau pouvant être récupérée après adsorption et chauffage (désorption) des matériaux hygroscopiques.

Matériau	Pourcentage d'eau récupérable	Remarque
Bentonite	50 à 70 %	Régénération moyenne
Gel de silice	70 à 90 %	Bonne désorption de l'eau
Chlorure de calcium (CaCl ₂)	80 à 95 %	Très forte capacité de Récupération

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygroscopique

I.9. Tableau I.4. Conditions de dégradation thermique des matériaux hygroscopiques [19]

Le chauffage des matériaux hygroscopiques permet la régénération et la récupération de l'eau adsorbée. Cependant, un chauffage excessif peut provoquer une dégradation de leurs propriétés physiques et hygroscopiques

Matériau	Température critique	Condition de dégradation thermique	Effet
Bentonite	200–300 C	Perte d'eau structurale et modification des couches argileuses	Diminution de l'adsorption
Gel de silice	120–150 C	Destruction progressive des pores interne	Baisse de la capacité hygroscopique
Chlorure de calcium (CaCl ₂)	260 C	Fusion et décomposition partielle du sel	Perte d'efficacité et agglomération

Partie II : le séchage

I.1. Définition de séchage

Le séchage est considéré comme l'opération unitaire qui vise à éliminer complètement ou partiellement le solvant (généralement l'eau) présent dans un matériau poreux. Dans cette

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygroscopique

procédure, deux phénomènes sont en jeu : le transfert de chaleur et le transfert de matière [20].

I.2. Les processus de séchage

I.2.1. Par conduction

Le produit en cours de séchage est en contact avec une surface solide maintenue à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La matière et la paroi conduisent à une élévation de la température du composé en cours de séchage : le liquide se transforme alors en vapeur soit par évaporation, soit par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition [21].

I.2.2. Par convection

Ce procédé de séchage est le plus courant dans le secteur chimique, où l'échange thermique s'effectue par un contact direct entre le solide humide et le gaz porteur de chaleur [21].

I.2.3. Par les rayonnements

Les méthodes d'énergies radiantes (Ultraviolet, Infra Rouge, Haute Fréquence, Micro-ondes) offrent la possibilité, lorsque le produit le permet, de garantir un séchage de haute qualité et de diminuer de manière significative les coûts associés à la consommation énergétique [21].

I.2.4. Par perte diélectrique

Le séchage par perte diélectrique repose sur le chauffage des matériaux non conducteurs (diélectriques) par le biais de l'électricité. Lorsque l'on place un matériau isolant dans un champ électrique, ses molécules se polarisent. Quand la polarité des électrodes est inversée [20].

I.3. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage

I.3.1. Humidité

L'humidité est une grandeur physique largement mesurée dans de nombreuses applications commerciales et industrielles. Elle joue un rôle essentiel dans différents domaines tels que la ventilation des bâtiments, les chambres environnementales pour les tests

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygroscopique

électroniques, le séchage industriel, ainsi que la surveillance des processus dans les secteurs de la chimie, de l'électronique, de l'agroalimentaire, de la pharmacie, des cosmétiques et de l'analyse biomédicale[21].

L'humidité est définie comme la mesure de la quantité de vapeur d'eau présente dans un gaz. Deux paramètres couramment utilisés pour quantifier l'humidité sont l'humidité absolue et l'humidité relative .

I.3.2. Humidité absolue [21]

L'humidité absolue ou spécifique, aussi appelée teneur en humidité ou de manière plus concise humidité d'un gaz, se réfère à la masse de l'humidité amalgamée à un kilogramme de gaz sec. Nous symboliserons cette humidité par H_a et elle est exprimée par la formule suivante :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (I-1)$$

M : Masse de l'eau

M : Masse de l'air sèche

Si on considère P la pression totale du mélange de gaz et de vapeur, on peut écrire dans le cas de l'air humide :

$$H_a = 0.622 \frac{P}{P - P_v} \quad (I-2)$$

I.3.3. Humidité relative

Si la pression P est inférieure ou égale à la pression de vapeur saturante P_T , la vapeur d'eau dans l'air se manifeste sous forme de vapeur. On définit alors l'humidité relative ou degré hygrométrique H de l'air par la formule suivante [21] :

$$H_r = \frac{P_v}{P_{S(T)}} * 100 \quad (I-3)$$

P : La pression partielle de la vapeur dans le mélange.

P_T : La pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.

I.3.4. Degré de saturation [21]

Le degré de saturation se définit comme le rapport entre l'humidité spécifique de l'air et l'humidité spécifique de l'air à saturation, tous deux mesurés à la même température.

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygroscopique

$$x = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (I-4)$$

Si P et P sont tous deux inférieurs à P dans le contexte de l'air humide soumis à la pression atmosphérique et à des températures relativement basses, on peut établir [20].

$$x = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \quad (I-5)$$

I.4. les grandeurs caractéristiques des produits à sécher

I.4.1. Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique (ε) est définie par [22]

$$x = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent du produit}} \quad (I-6)$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc $1 - \varepsilon$

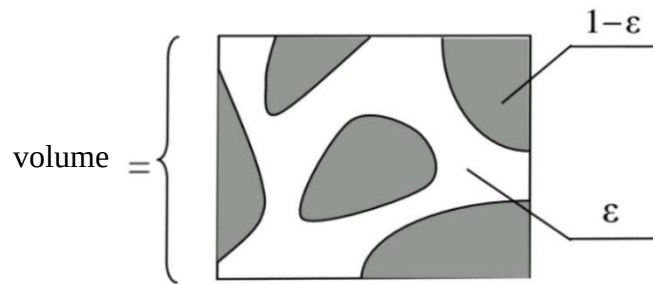


Figure I.8 : Volume de contrôle microscopique

I.4.2. Le Teneur en eau du produit à sécher (X)

$$x_h = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

$$x_s = \frac{M_h - M_s}{M_s} [22]$$

X_s : La teneur en eau à base sèche ou Humidité absolue

X_h : Le teneur en eau à base humide ou Humidité relative

M_s : Masse humide (la masse avant l'élimination de l'eau)

M_h : Masse sèche (la masse après l'élimination de l'eau) Les deux grandeurs sont liées par les relations [20] :

Chapitre I : Généralité sur les matériaux hygrosopique

$$x_h = \frac{X_h}{1 - X_h}$$

$$x_s = \frac{X_s}{1 - X_s}$$

Chapitre II:

Techniques utilisé

II.1. l'étuve**II.1. Séchage à l'étuve**

Dans cette méthode, l'air chauffé est mis en contact avec le matériel humide pour faciliter la chaleur et le transfert massif ; la convection est principalement impliquée (Dikbasan., 2007)[23]. Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour, et la taille de l'échantillon à tester. Même si cette taille n'est pas en général critique, le temps de séjour dans l'étuve doit être adapté au rapport surface/volume (Vasseur., 2009) [24]. La meilleure durée est « jusqu'à poids constant » pour atteindre la masse sèche. La perte de poids est calculée par la différence de pesée avant et après séchage. L'air présent dans l'étuve peut être augmenté par la vapeur émise par les échantillons séchés en fonction du renouvellement de l'atmosphère interne de l'étuve c'est pour cela les étuves ventilées sont les meilleur et les plus utilisés (Jean V., 2009)[25].

II.1.2. Le principe de séchage à étuve

Le corps à sécher est placé dans un courant d'air suffisamment chaud et sec. Il s'établit spontanément, entre ce corps et l'air, un écart de température et de pression partielle d'eau tel que le produit absorbe l'air chaud et transfère à l'extérieur l'eau sous forme de vapeur. L'air sert donc à la fois de fluide chauffant et de gaz vecteur pour enlever l'eau (Bimbenet., 1978). L'air entre chaud et sec dans le séchoir et il en ressort humide et moins chaud.

Ce type de séchage présente plusieurs avantages :

- ✓ Il est simple et relativement facile à réaliser ;
- ✓ La température de l'enceinte est contrôlable ;
- ✓ De plus, la teneur en eau du produit sec est inférieure à 10% et son contrôle est facile ;
- ✓ La rapidité et la fiabilité sont aussi des caractéristiques non négligeables.
- ✓ Opératoire est simple alors que l'équipement est généralement simple et à coût peu élevé[26].

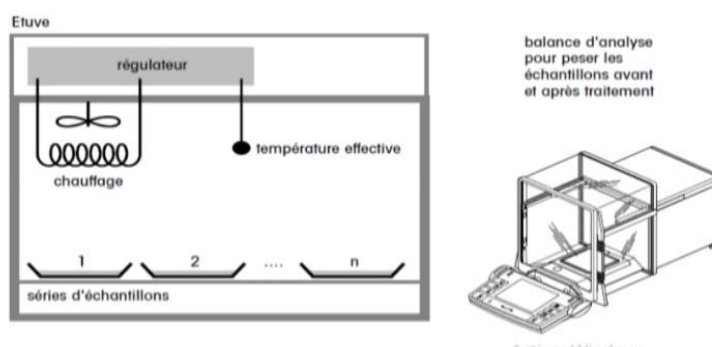


Figure II.9 : Schéma d'étuve de séchage.

II.2.1. La distillations

La distillation est une des méthodes de séparation les plus utilisées industriellement. Cette opération permet la séparation et la purification des mélanges de constituants dont les températures d'ébullition sont différentes, en mettant à profit la différence de volatilité (capacité à s'évaporer selon la température) des constituants puis en réalisant une succession de condensations et de vaporisations pour terminer par la récupération d'un des constituants[27].

II.2.2. La distillation simple

Initialement, la distillation simple a été employée pour la purification de solvants volatils ou de composés ayant des points d'ébullition très variables.

Dans ce processus de distillation, le ballon joue le rôle d'étage théorique, étant donné qu'il ne possède pas de colonnes, il n'y a donc pas ainsi, il n'y a en fait qu'un unique point de contact entre le liquide et la vapeur, au niveau de la surface du bouilleur.

Afin d'améliorer la pureté du distillat aux composés les plus volatils, il est nécessaire de récupérer le distillat et de procéder à une simple distillation à plusieurs reprises [28].

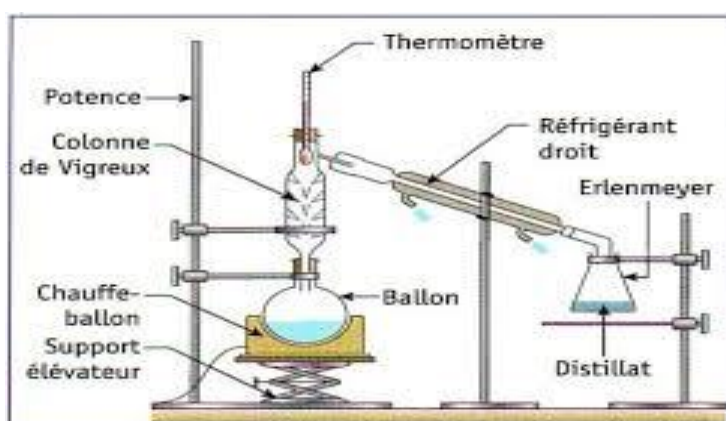


Figure II.10 : Schéma d'une simple distillation

II.3. Historique de la distillation solaire

L'utilisation de la distillation solaire remonte à plusieurs siècles, néanmoins, l'accomplissement le plus grand a émergé en 1872 près de Las-Salinas, au nord du Chili. Carlos Wilson, un ingénieur suédois, est le concepteur de ce modèle qui possède une surface vitrée de 5000 m² et peut générer jusqu'à 20 m³ Production quotidienne de m³ d'eau douce à partir d'une source saline contenant 140 g/L. Jusqu'en 1910, ce dispositif a fonctionné, mais à cause d'une accumulation rapide de sels dans le bassin, un nettoyage fréquent du distillateur devenait nécessaire. Entre les périodes de haute activité, la distillation solaire a connu des moments de stagnation 1880 et le premier conflit mondial. En 1920, Kaush a employé des réflecteurs métalliques pour focaliser les rayons du soleil, menant à l'émergence de divers dispositifs (comme le type toit, la couverture en V, le plateau incliné...etc.) [29].

II.3.1. Définition de la distillation solaire

La technique de distillation solaire exploite la lumière du soleil pour élever la température de l'eau saumâtre dans un récipient muni d'une vitre en pente. L'eau salée dans le récipient va se réchauffer (plus vite si le bassin est noir) et avec cette montée de Lorsque la température augmente, une portion de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se condense sur la face interne de la fenêtre en verre [30].

II.3.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire

Tous les distillateurs solaires fonctionnent selon le même principe, cependant, leur conception et leurs matériaux peuvent varier. Ils fonctionnent sur la base de l'effet de serre . Un distillateur solaire est en essence un bassin isolé avec des parois adiabatiques. Renfermant de l'eau et surmonté d'un couvercle clair, généralement en verre, avec une base teintée en noir. L'eau absorbe l'énergie solaire qui pénètre à travers le couvercle et le fond assombri, puis la transmet à l'air par conduction, convection et rayonnement. Puisque les parois sont complètement scellées et que le verre n'autorise pas le passage des radiations infrarouges à longue longueur d'onde, l'énergie solaire est retenue (effet de serre) et l'air se chauffe [31].

II.3.3. Les différents types de distillateurs solaires**II.3.3.1 Distillateurs à simple effet**

Il s'agit du distillateur le plus couramment employé à travers le globe. Il est composé d'un absorbeur sous forme de bassin horizontal coloré en noir (afin de capter le plus grand montant de la radiation solaire) et rempli d'eau salée ou usée. L'ensemble est protégé par une vitre claire en verre, disposée sous un angle spécifique afin d'optimiser la capture de l'énergie solaire et de favoriser l'écoulement des gouttes vers une gouttière positionnée au bas de la vitre. Dès lors, l'eau condensée, étant une eau pure, est transférée au processus de stockage. Afin de réduire les déperditions d'énergie de l'absorbeur, un isolant thermique est appliqué à la partie inférieure du distillateur [32].

II.3.3.2 Distillateur à pente unique

Il s'agit d'un distillateur à capteur unique incliné d'un certain angle (β), également connu sous le nom de distillateur simple.

Il s'agit du prototype que nous utilisons lors de nos expériences, sa production est généralement limitée en comparaison.

Comparé aux autres distillateurs à multiples effets, il se distingue par sa flexibilité grâce à sa facilité d'entretien, de démontage et d'assemblage [33].

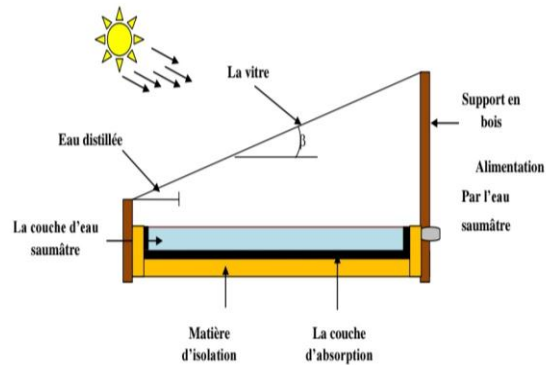


Figure II.11: Distillateur solaire simple à pente unique

II.3.3.3. Distillateur à double pentes

C'est un distillateur simple mais à double couvertures verrières où chacune d'elles est inclinée d'un angle (β), son avantage est d'exposer l'un de ses cotés au soleil et l'autre à l'ombre pour accélérer la condensation [33].

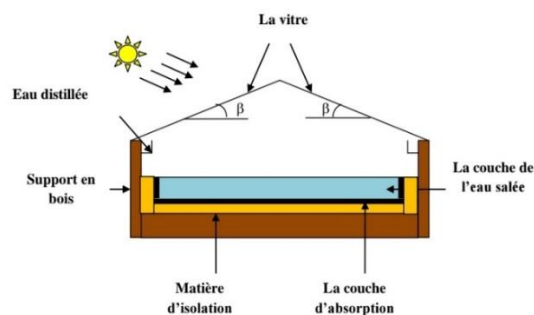


Figure II. 12: Distillateur à double pente

II.3.3.4. Distillateur solaire terre- eau

Il s'agit d'un distillateur à capteur unique incliné d'un certain angle (β), également connu sous le nom de distillateur simple.

Il s'agit du prototype que nous utilisons lors de nos expériences, sa production est généralement limitée en comparaison.

Comparé aux autres distillateurs à multiples effets, il se distingue par sa flexibilité grâce à sa facilité d'entretien, de démontage et d'assemblage [34].

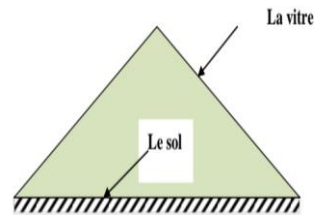


Figure II .13 : Solaire terre-eau

II 3.3.5. Distillateur solaire à cascades

Cet équipement a deux atouts majeurs : la faible épaisseur de la lame d'eau et une orientation plus proche de l'idéal par rapport au rayonnement incident. Cependant, un modèle de cette nature n'a été réalisé qu'à petite échelle. Bien que ces appareils soient performants, leur fabrication et leur Les entretiens engendrent des coûts élevés [35].

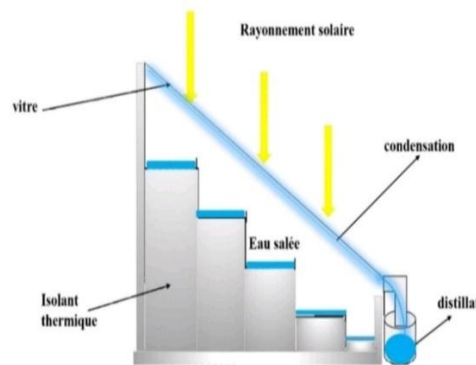


Figure II.14 : Distillateur à cascade

II.4. Paramètres influents sur la distillation solaire

Il est possible de classer ces paramètres en deux principales catégories :

Les paramètres métrologiques ;

Les paramètres de constructions [36]

II.4.1. Les paramètre de construction[36]**II.4.1.1. Couverture**

La couverture en verre joue principalement sur son caractère, c'est-à-dire qu'elle transmet le maximum de rayonnement solaire tout en étant opaque aux infrarouges. Elle ne doit pas seulement être non hydrophobe, elle doit également pouvoir résister aux agressions du vent et des particules solides.

II.4.1.1.2. L'inclinaison

L'angle d'inclinaison doit être soigneusement choisi afin de déterminer la quantité d'énergie solaire captée par le distillateur et de minimiser la distance entre la saumure et le verre. D'autre part, l'inclinaison a une influence sur les

Formulations des bilans énergétiques pour les divers composants du distillateur.

II.4.1.1.3. L'absorbeur

Les recherches effectuées dans ce secteur démontrent que la surface absorbante peut être réalisée avec divers matériaux (comme le bois, le métal, le béton, les matériaux synthétiques ou le verre ordinaire). La sélection du matériau pour la surface absorbante ou bac noir est basée sur son inertie thermique, de La résistance à l'oxydation due à l'eau et aux dépôts minéraux.

Lorsque l'écart entre la saumure et le vitrage se réduit, l'efficacité du distillateur s'améliore. L'impact de l'inclinaison sur la performance se réduit à mesure que la distance entre la saumure et la vitre se rétrécit.

II.4.1.1.2 Paramètres métrologiques

Plusieurs chercheurs ont réalisé des études démontrant que les paramètres souvent retenus sont:

- ✓ L'intermittence des nuages ;
- ✓ La fluctuation du rayonnement global et diffus ;
- ✓ Le vent et la température environnante.

II.4.1.1.1 Epaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller

Le volume d'eau ou de saumure à distiller a une grande influence sur la production. Plus précisément, son importance est accrue lorsque l'épaisseur est réduite, bien que plus cette épaisseur soit importante, plus la distillation prend du temps[36].

II.4.1.1.2 Caractéristiques du distillateur

Un distillateur solaire à effet de serre est caractérisé par plusieurs grandeurs :

- ✓ Le taux de production ;
- ✓ L'efficacité ;
- ✓ La performance ;
- ✓ La pression à l'intérieure du distillateur [37].

Chapitre III :

Matériel et Méthodes

III.1. Méthode par étuve

III.1. Matériel utilisé

Pour l'étude des matériaux hygroscopiques par la méthode de l'étuve, les équipements suivants ont été utilisés : une étuve électrique à température réglable, une balance électronique de précision, Palateaux d'épaisseur de 1 cm, un dessiccateur avec agent desséchant, ainsi que les matériaux hygroscopiques étudiés : le chlorure de calcium (CaCl_2), le gel de silice et la bentonite.



Balance



étuve électrique



dessiccateur



Palateaux

III.1. Principe de fonctionnement

La méthode de l'étuve consiste à chauffer les matériaux hygroscopiques afin d'éliminer l'eau absorbée ou adsorbée dans leur structure. Les échantillons humides sont d'abord pesés à l'aide d'une balance électronique pour déterminer leur masse humide, puis placés dans l'étuve à une température contrôlée pendant une durée déterminée. Sous l'effet de la chaleur, l'humidité contenue dans les matériaux s'évapore progressivement. Après chauffage, les échantillons sont refroidis dans un dessiccateur afin d'éviter une nouvelle absorption d'humidité de l'air ambiant, puis pesés de nouveau pour obtenir la masse sèche. La différence entre la masse humide et la masse sèche permet d'évaluer la quantité d'eau retenue par chaque matériau hygroscopique et d'étudier leurs performances d'adsorption et de régénération.

III.2. Méthode par condenseur

III.2.1. Matériel utilisé

L'étude par la méthode du condenseur nécessite un système composé d'un condenseur, d'un distillateur solaire ou d'une enceinte de chauffage, Source froide (circulation d'eau froide ou bain réfrigérant), tuyaux de circulation, d'un récipient collecteur d'eau condensée, d'une source de chauffage, d'une balance de précision pour la mesure de la masse d'eau récupérée, thermomètre pour le contrôle de la température, Support métallique pour maintenir le dispositif et des matériaux hygroscopiques étudiés : le chlorure de calcium (CaCl_2), le gel de silice et la bentonite.

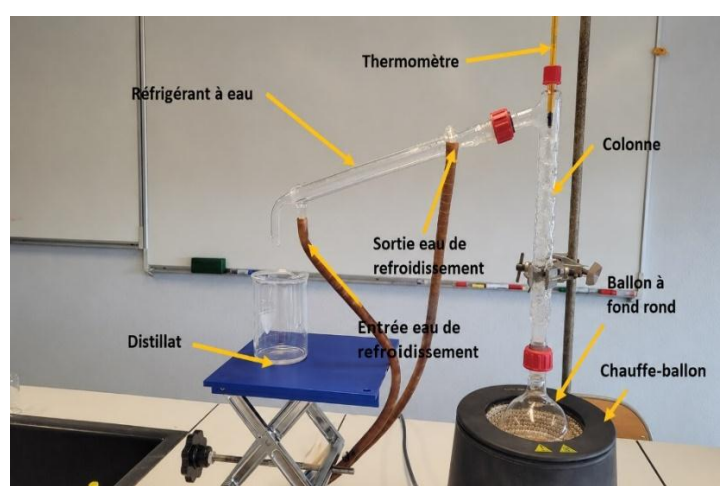


Figure III. 14 : Méthode par condenseur

III.2.2. Principe de fonctionnement

Le principe de cette méthode repose sur l'évaporation puis la condensation de l'eau libérée par les matériaux hygroscopiques (bentonite, CaCl_2 , gel de silice) lors du chauffage. Les matériaux préalablement humidifiés sont placés dans le système de chauffage. Lorsque la température augmente, l'eau absorbée par les matériaux s'évapore sous forme de vapeur d'eau. Cette vapeur circule ensuite vers le condenseur où elle est refroidie. Au contact des parois froides du condenseur, la vapeur se transforme en eau liquide récupérée dans un récipient collecteur. La quantité d'eau condensée permet d'évaluer les performances des matériaux hygroscopiques en termes de capacité de rétention et de récupération d'eau. Cette méthode est particulièrement utilisée dans les études de récupération d'eau atmosphérique et de dessalement solaire.

III.3.1 distillateur solaire

Le matériel expérimental utilisé dans cette étude consiste en un distillateur solaire

Il se compose des éléments suivants :

- Un bac métallique (en fer) peint en noir (absorbe le rayonnement solaire).
- Une isolation thermique en polystyrène.
- Un film plastique transparent servant de couverture.
- Un verre en verre pour la collecte de l'eau condensée.
- Une petite pierre utilisée pour créer une pente au niveau du film plastique.
- Un matériau hygroscopique :

Chlorure de calcium (CaCl_2),

Gel de silice,

Bentonite.

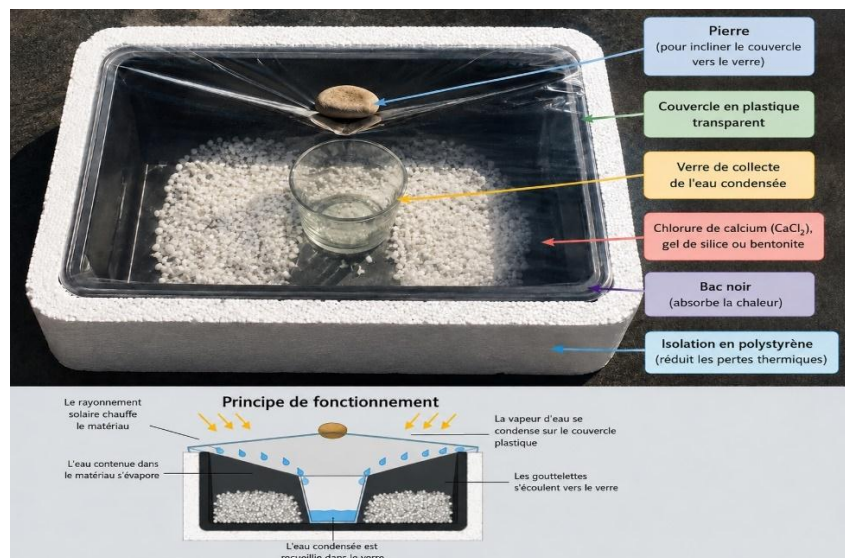


Figure III. 15 : Schéma du distillateur solaire étudié

III.3.2.Principe de fonctionnement

Le dispositif expérimental est basé sur le principe de la désorption thermique de l'eau contenue dans les matériaux hygroscopiques (chlorure de calcium, gel de silice ou bentonite) suivie de sa condensation.

Le matériau hygroscopique est placé dans un bac noir afin d'absorber efficacement le rayonnement solaire. Le bac est entouré d'une isolation en polystyrène qui limite les pertes de chaleur vers l'extérieur. Sous l'effet du rayonnement solaire, la température à l'intérieur du système augmente, ce qui provoque l'évaporation de l'eau préalablement adsorbée par le matériau.

La vapeur d'eau produite monte vers le couvercle transparent. Celui-ci est légèrement incliné grâce à une pierre placée au centre, permettant aux gouttelettes d'eau condensées de s'écouler vers le point le plus bas. L'eau condensée est ensuite recueillie dans un verre placé au centre du dispositif.

Ainsi, le système permet de récupérer l'eau contenue dans les matériaux hygroscopiques en utilisant uniquement l'énergie solaire, sans apport d'énergie externe.

Chapitre IV:

Résultats et discussions

IV .1. Par la méthode de l'étuve

IV.1. La Bentonite

Dans cette expérience, un échantillon de 252 g de bentonite a été étalé uniformément dans un plateau avec une épaisseur d'environ 1 cm afin d'assurer un séchage homogène. Le plateau a ensuite été placé dans une étuve réglée à une température de 105 °C pendant une durée de 24 heures pour éliminer l'humidité contenue dans le matériau. Après le chauffage, l'échantillon a été transféré dans un dessiccateur pendant 30 minutes afin d'éviter l'absorption de l'humidité de l'air ambiant avant la pesée. Cette étape permet d'obtenir la masse sèche réelle de la bentonite avec une meilleure précision. Par ailleurs, les conditions météorologiques de chaque jour de l'expérience ont été relevées et les résultats obtenus ont été présentés dans le tableau suivant afin d'étudier l'influence des paramètres climatiques sur le comportement hygroscopique du matériau :

On a calculer l'humidite par :

$$w(\%) = \frac{\text{Masse humide} - \text{Masse sec}}{\text{Masse humide}} * 100$$

Le jours	02/03	03/04	04/03	05/03	08/03	09/03	10/03	11/03
T (c)	13	14	17	8	13	12	14	12
p(mbar)	1015	1010	1009	1020	1021	1023	1018	1025
V(km/h)	10.5	19.4	8.5	3.8	3.4	12.4	6.2	7.9
H %	70	71	69	68	66	67	75	83
HR %	80	72	46	91	90	92	75	83
M h	252		242		251		249	
M sec		235		235		235		235
W %		6.4		2.89		6.37		5.62

Tableau 6 :l' étude de la bentonite

Nous avons représenté les résultats du tableau sous forme d'histogrammes

L'histogramme montre que l'humidité de la bentonite diminue lorsque la température de l'air augmente. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de la température favorise l'évaporation de l'eau contenue dans le matériau hygroscopique. Ainsi, la bentonite perd progressivement son humidité sous l'effet du chauffage

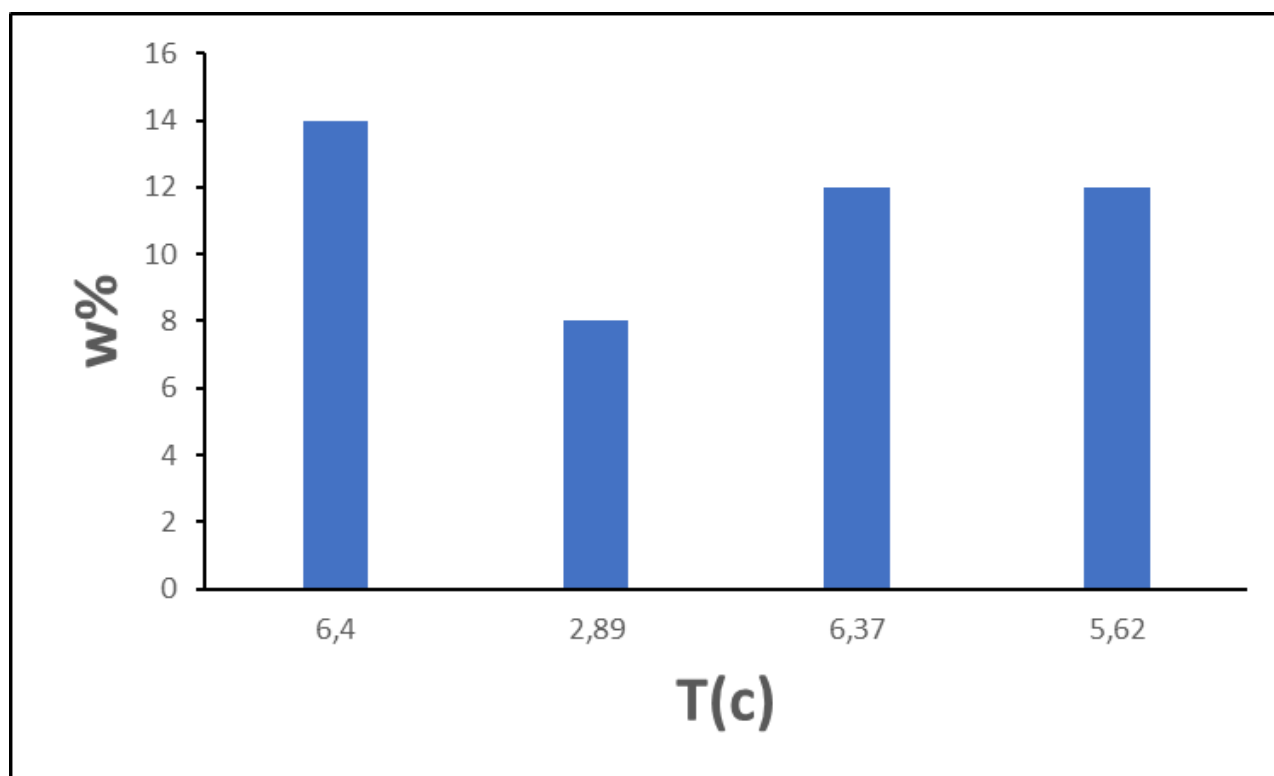


Figure 15: Variation de l'humidité de la bentonite en fonctions de la température de l'air

Cet histogramme indique que l'humidité de la bentonite augmente avec l'augmentation de l'humidité relative de l'air. La bentonite possède une forte capacité d'adsorption de l'eau, ce qui lui permet d'absorber davantage d'humidité lorsque l'air ambiant devient plus humide.

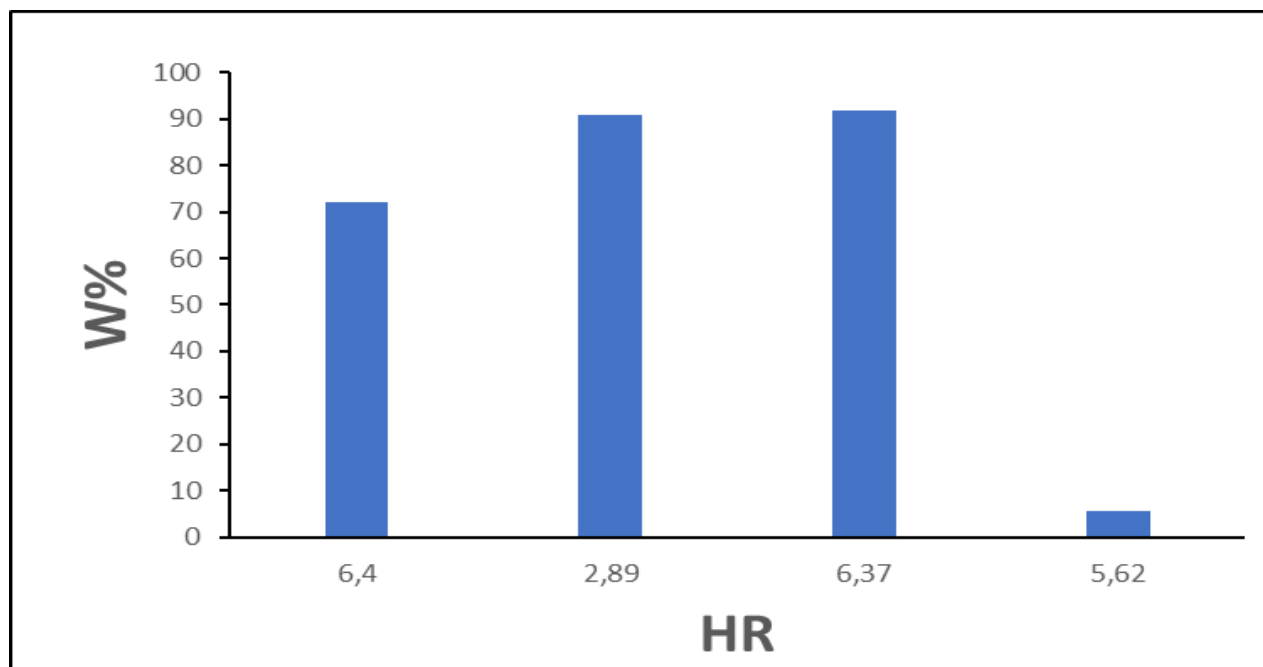


Figure 16 : Variation de l'humidité en fonctions de l'humidité relative de l'air.

IV.2. le gel de silice

Dans cette expérimentation, une masse de 252 g de gel de silice a été étalée uniformément dans un plateau avec une épaisseur d'environ 1 cm afin d'assurer un chauffage homogène du matériau. Le plateau a ensuite été placé dans une étuve à une température de 120°C pendant une durée de 24 heures pour éliminer l'humidité contenue dans la bentonite. Après le chauffage, l'échantillon a été transféré dans un dessiccateur pendant 30 minutes afin d'éviter toute réabsorption de l'humidité de l'air ambiant avant la pesée. Cette procédure permet de déterminer la masse sèche du matériau avec précision. Par ailleurs, les conditions météorologiques ont été relevées quotidiennement durant l'expérience, et les résultats obtenus ont été présentés dans le tableau suivant afin d'étudier l'influence des paramètres climatiques sur le comportement hygroscopique de gel de silice :

On a calculer le pourcentage d'humidite par :

$$W(\%) = \frac{\text{Masse humide} - M_{\text{sec}}}{\text{Masse humide}} * 100$$

Le jours	06/04	07/04	08/04	09/04	12/04	13/04	14/04	15/04
T(c)	14	23	14	26	17	13	17	16
p(mbar)	1022	1018	1017	1013	1008	1013	1020	1021
V(km/h)	12	12.2	6.4	19.9	14.3	52.2	20.9	13
HR%	57	36	15	29	87	72	61	72
M h	252		228		245		233.9	
Msec		206		205		202		206.3
W %		18.25		10.087		17.55		11.76

Tableau.VI.7 étude de gel de silice

L'histogramme montre que l'humidité du gel de silice diminue lorsque la température de l'air augmente. Cette diminution est due au phénomène de désorption de l'eau provoqué par la chaleur. Le gel de silice libère l'humidité stockée lorsque la température devient élevée

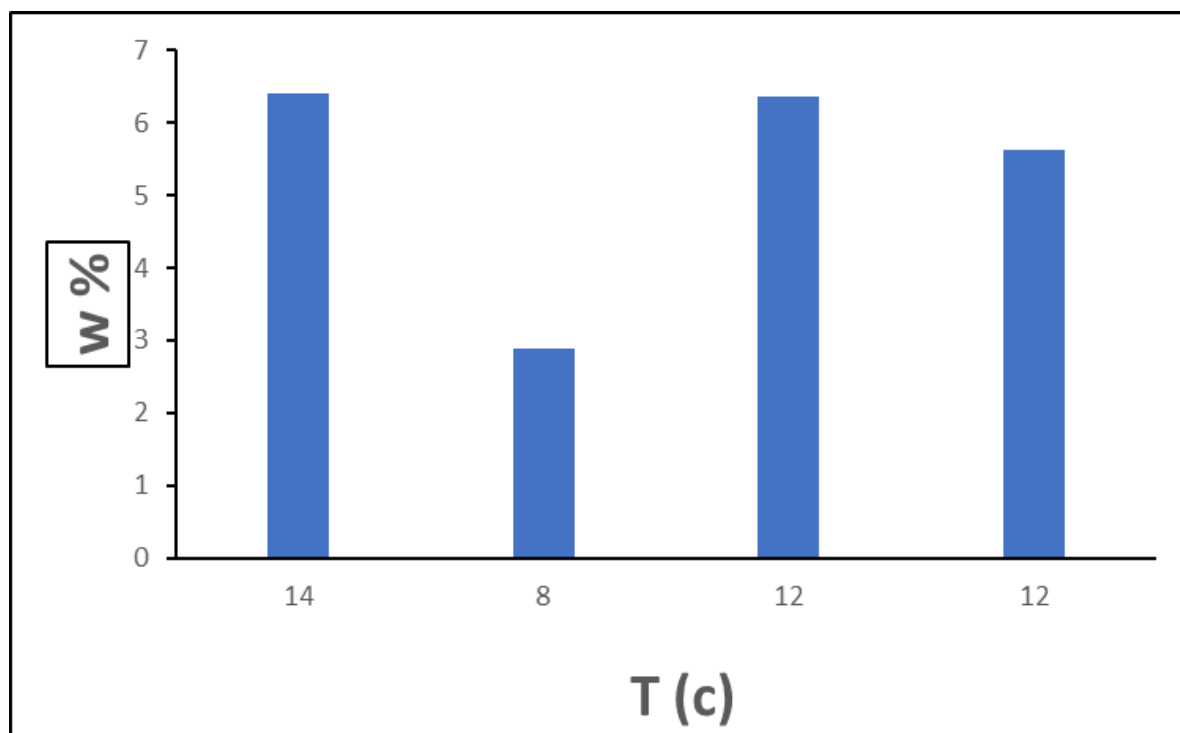


Figure 17: Variation de l'humidité de gel de silice en fonctions de la température de l'air.

Les résultats montrent que le gel de silice absorbe davantage d'humidité lorsque l'humidité relative de l'air augmente. Cela confirme le caractère hygroscopique du matériau, capable de capter la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant

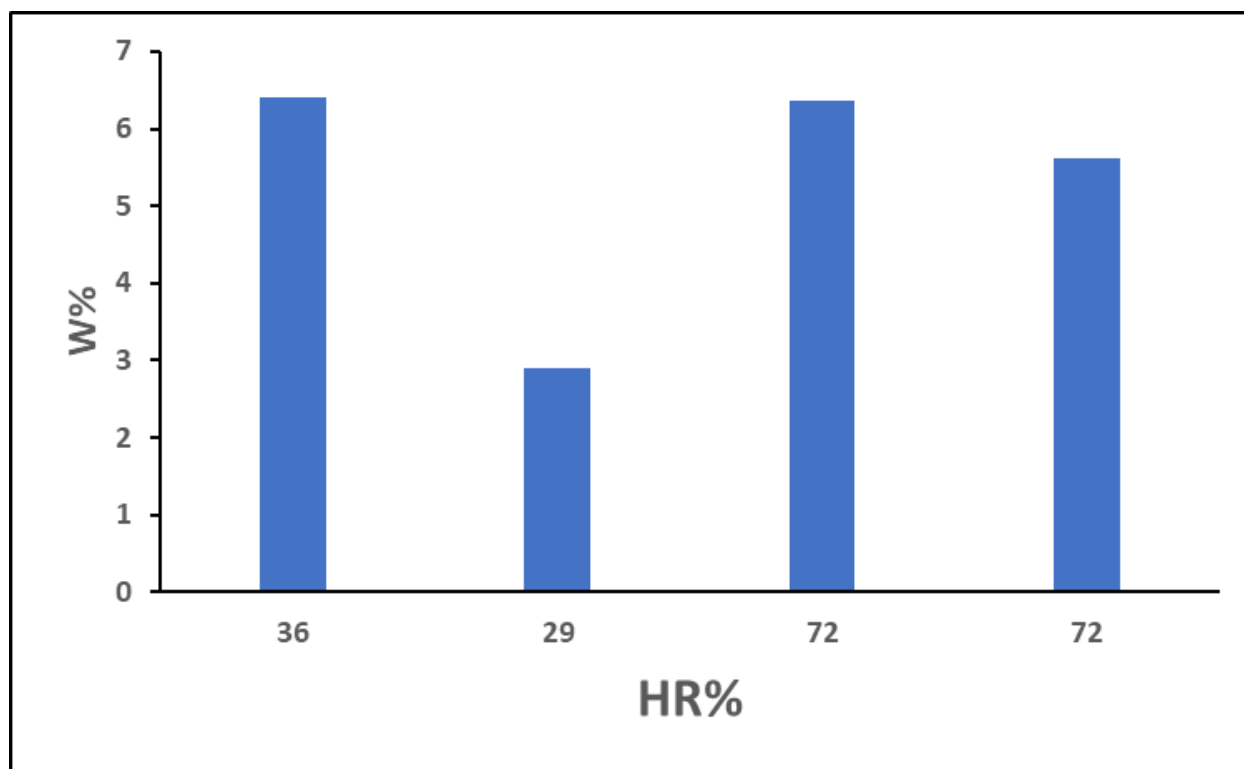


Figure 18 :Variation de l’humidité du gel de silice en fonction de l’humidité relative de l’air.

IV.3.chlorure de calcium

Au cours de cette manipulation expérimentale, 252 g de chlorure de calcium (CaCl_2) ont été répartis de façon homogène dans un plateau sous forme d’une couche d’environ 1 cm d’épaisseur afin de faciliter le séchage. L’échantillon a été introduit dans une étuve maintenue à une température de 150 °C pendant 3 heures pour assurer l’élimination de l’humidité contenue dans le matériau. Après cette étape de chauffage, le plateau a été placé dans un dessiccateur durant 30 minutes afin de refroidir l’échantillon tout en le protégeant de l’humidité atmosphérique avant la mesure de la masse sèche. En parallèle, les conditions météorologiques ont été enregistrées chaque jour de l’expérimentation. L’ensemble des

résultats obtenus a été présenté dans le tableau suivant pour analyser l'effet des paramètres climatiques sur les propriétés hygroscopiques du CaCl_2 :

Le jour	19/04	20/04	21/04	26/04
T(c)	20	21	23	20
p(mbar)	1013	1018	1000	1017
V(km/h)	30	21	18	11.5
HR%	65	66	61	86
M h	252	257.5	261.4	280.6
Msec	196	192.8	191	205
W %	22.22	25.28	26.93	26.91

Tableau IV.7 :l' étude de ca cl2

Nous avons représenté les résultats du tableau sous forme d'histogrammes :

L'histogramme met en évidence une diminution de l'humidité du chlorure de calcium avec l'augmentation de la température. Sous l'effet de la chaleur, l'eau absorbée par le matériau s'évapore progressivement, ce qui réduit son taux d'humidité.

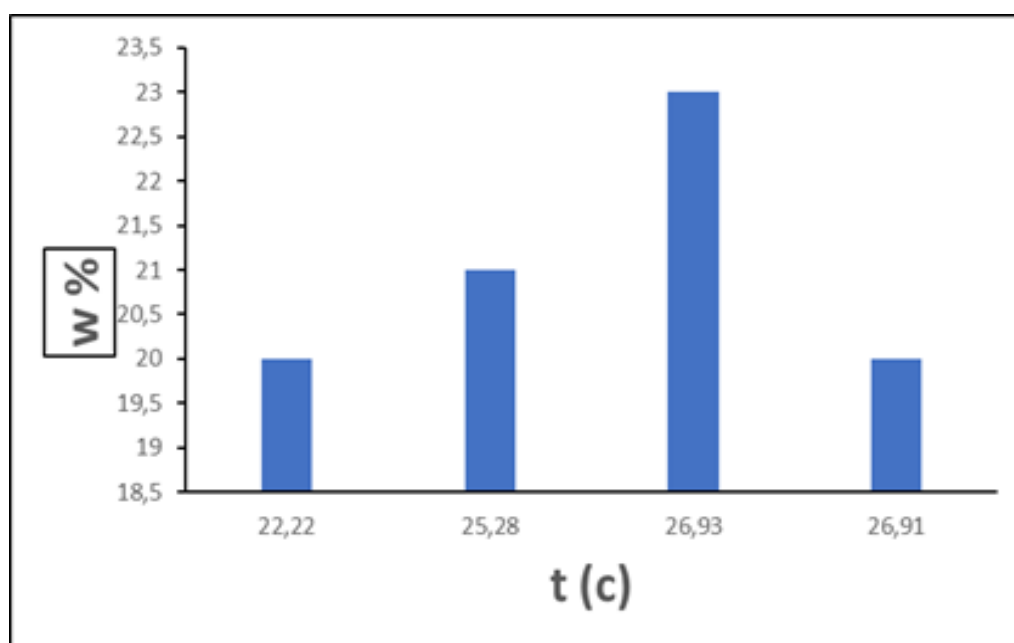


Figure IV.19 : Variation de l'humidité du chlorure de calcium en fonctions de la température de l'air.

L'histogramme met en évidence une diminution de l'humidité du chlorure de calcium avec l'augmentation de la température. Sous l'effet de la chaleur, l'eau absorbée par le matériau s'évapore progressivement, ce qui réduit son taux d'humidité.

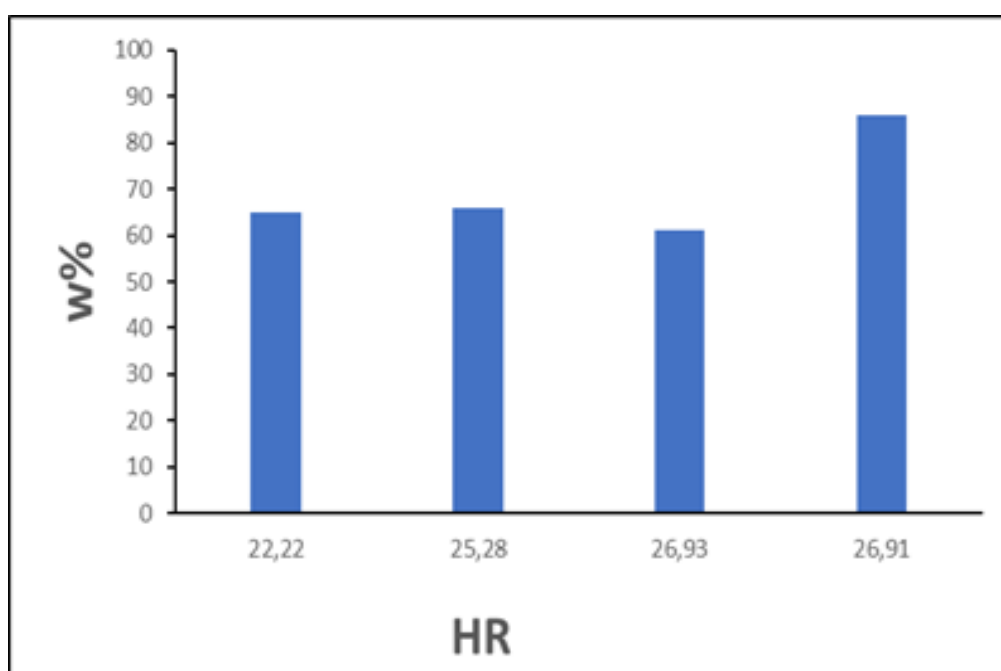


Figure IV.20: Variation de l'humidité chlorure de calcium en fonctions de l'humidité relative de l'air.

IV.2. condenseur

IV.2.1. la Bentonite

Dans l'expérience du condenseur, une masse de 252 g de bentonite a été introduite dans un ballon relié au système de condensation. La température a été relevée toutes les 10 minutes afin de suivre l'évolution du procédé et d'évaluer la quantité d'eau récupérée au cours du temps. Les mesures obtenues ont permis de calculer le pourcentage de récupération de l'eau extraite de la bentonite. Afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats expérimentaux, cette manipulation a été réalisée trois fois dans les mêmes conditions opératoires.

On a :

- La masse humide : 252 g
- La masse sec : 235 g
- La masse eau : 17g

$\% \text{ récupérer} = \frac{\text{la masse d'eau à unstante t}}{\text{la masse totale contient au départ}} \times 100$

Teste 1 :

T (min)	5	15	25	35	45	55
T (c)	89	92.1	94.1	94.5	96.3	100.9
M g	1	1.7	2	3	5	6
W %	5.88	10	11.7	17.6	29.4	35.29

Teste 2 :

T (min)	5	15	25	35	45	55	65	75
T (c)	88	92.6	105.9	108.8	110	116.4	119.1	121
M g	1	2	2.3	2.6	2.9	3	3.7	4
%récuper	5.8	9.4	11.76	13.52	17.05	17.6	21.52	23.5

Test 3 :

Temps	5	15	25	35	45	55
T (c)	88.5	92.3	100	101.6	103.15	108.65
M g	1	1.65	2	2.65	3.8	4.9
%récuper	5.88	9.7	11.76	15.58	22.35	28.8

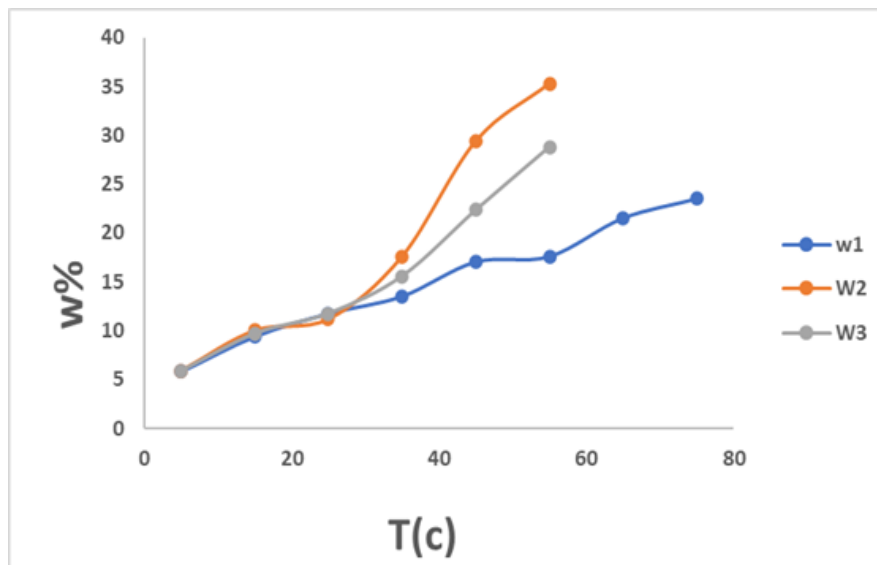


Figure IV.21 : Variation du pourcentage récupéré de la bentonite en fonction du temps de chauffage

Le graphe montre que le pourcentage récupéré augmente progressivement avec le temps de chauffage. Au début, l'augmentation est rapide grâce à l'évaporation importante de l'eau contenue dans la bentonite. Ensuite, la courbe devient plus stable, ce qui indique une diminution progressive de la quantité d'eau restante dans le matériau. Cela signifie que la bentonite possède une bonne capacité hygroscopique et qu'elle libère l'humidité sous l'effet du chauffage.

IV.2.2. le gel de silice

Dans le cadre de l'essai réalisé avec le gel de silice dans le condenseur, une quantité de 252 g de matériau a été placée dans le ballon du dispositif. La température a été suivie à intervalles réguliers de 10 minutes afin de contrôler le déroulement de l'expérience et de déterminer le rendement en eau récupérée. Le pourcentage de récupération a ensuite été calculé à partir des mesures obtenues. Pour garantir la précision et la reproductibilité des résultats, cette manipulation a été effectuée à trois reprises :

On a :

- La masse humide : 252 g

- La masse sec : 207 g
- La masse eau : 47 g

$$\% \text{ récupérer} = \frac{\text{la masse d'eau a unstante t}}{\text{la masse totale contient au départ}} * 100$$

Test 1 :

T (min)	5	15	25	35	45
T (c)	89.9	91.9	92.9	95.9	96.7
m (g)	2	8	13	18	20
%récupér	4.25	17.02	27.65	38.29	42.5

Test 2 :

T (min)	5	15	25	35	45
T (c)	89.9	89.1	91.3	92.5	94.5
m (g)	2.2	7	11	15	19
%récupér	4.6	14.89	23.40	31.9	40.4

Test 3 :

T (min)	5	15	25	35	45
T (c)	89.4	90.5	93.55	94.15	95.7
m (g)	2.1	7.5	12	16.5	19.5
%récupér	4.46	15.95	25.3	35.10	41.4

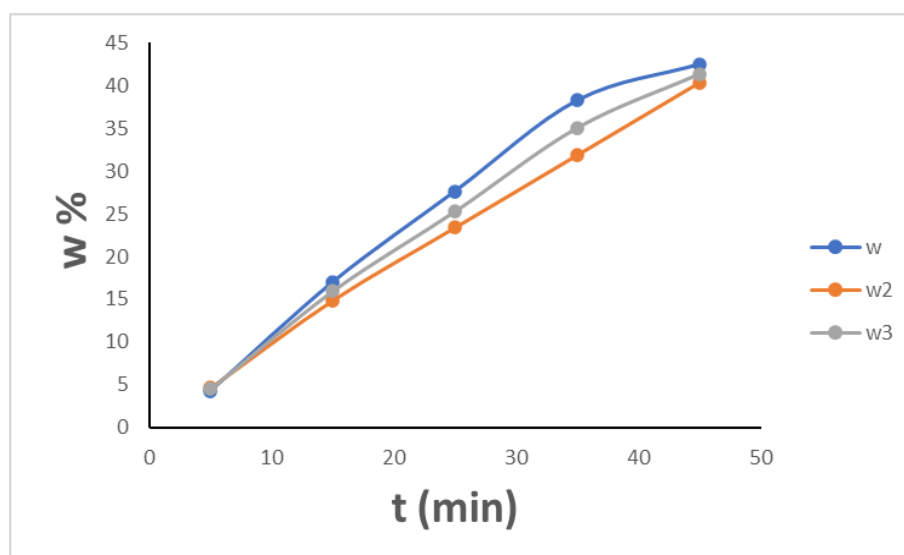


Figure 22 :Variation du pourcentage récupéré de gel de silice en fonctions du temps de chauffage .

Le graphe du gel de silice indique également une augmentation du pourcentage récupéré en fonction du temps de chauffage. Le gel de silice présente généralement une récupération rapide au début, car il adsorbe fortement l'humidité. Après une certaine durée, la courbe tend vers la stabilisation, montrant que le matériau atteint progressivement son état sec. Cela confirme l'efficacité du gel de silice comme matériau hygroscopique.

IV.3.3.chlorure de calcium

Dans l'essai réalisé avec le chlorure de calcium (CaCl_2) dans le condenseur, une masse de 252 g de matériau a été introduite dans le ballon du dispositif expérimental. La température a été relevée toutes les 10 minutes afin de suivre l'évolution du système et de permettre le calcul du pourcentage d'eau récupérée au cours du processus. Ces données ont servi à évaluer la performance du CaCl_2 en tant que matériau hygroscopique. Afin d'assurer la fiabilité des résultats, l'expérience a été répétée trois fois :

On a :

- La masse humide : 252 g
- La masse sec :192 g
- La masse eau : 56 g

Test 1 :

T (min)	5	15	25	35	45	55	65	75	85
T (c)	98.8	103.5	105.7	111.3	116.7	120.5	128.5	132.5	142.5
M (g)	3	6	9	11	13	15	17	19	21
%récuper	5.35	10.71	16.07	19.64	23.21	26.78	30.35	33.9	35.71

T (min)	5	15	25	35	45	55	65	75
T(c)	97.6	98.7	101.3	111.3	116.7	118.1	125	129
M (g)	3	7	11	16	18	22	25	29
%récuper	5.35	12.5	19.64	28.57	32.14	39.28	44.6	51.7

Test 2 :**Test 3 :**

T (min)	5	15	25	35	45	55
T (c)	98.1	101.1	108.5	116.7	119.5	126.7
M(g)	2	7	12	18	22	26
%récuper	3.57	12.5	21.4	32.14	39.28	46.42

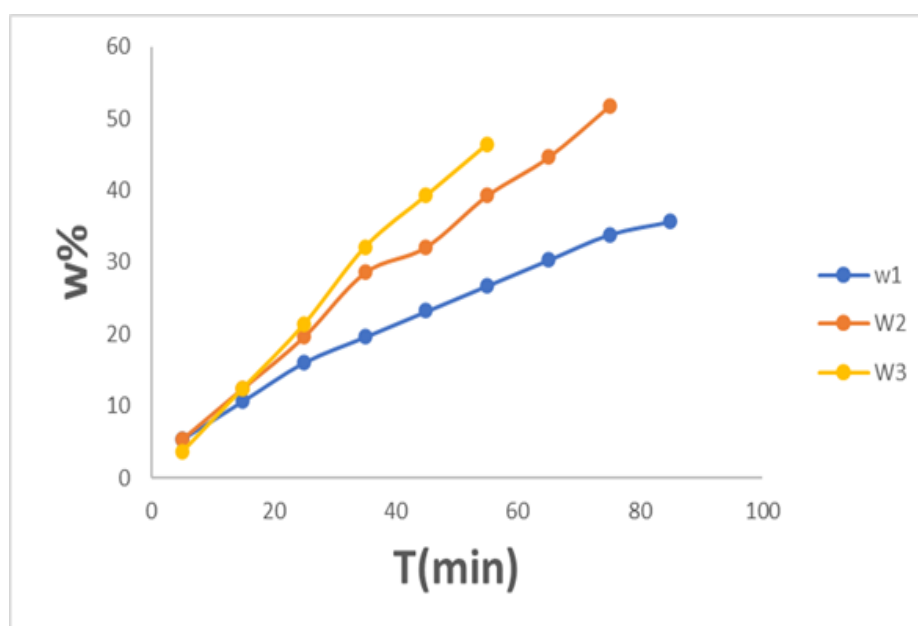


Figure 23 : Variation du pourcentage récupéré de chlorure de calcium en fonctions du temps de chauffage .

Le graphe du chlorure de calcium (CaCl_2) montre une augmentation importante du pourcentage récupéré avec le temps de chauffage. Cette évolution traduit la forte capacité du CaCl_2 à absorber puis à restituer l'eau lors du chauffage. La pente élevée de la courbe au début indique une évaporation rapide de l'humidité absorbée, puis la courbe devient plus stable lorsque la quantité d'eau restante diminue.

Le CaCl_2 présente ainsi une très bonne performance hygroscopique.

IV.3. distillateur solaire

Pour chaque essai, une masse de 252 g de matériau hygroscopique a été introduite dans le bac noir. Le verre de collecte a ensuite été placé au centre du dispositif avant la fermeture du système par le film plastique transparent.

Le distillateur a été exposé directement au rayonnement solaire de 09 h 00 à 18 h 00. Sous l'effet de l'énergie solaire, la température à l'intérieur du dispositif augmente, entraînant l'évaporation de l'eau adsorbée par le matériau hygroscopique. La vapeur d'eau produite se condense sur la surface interne du couvercle transparent, puis les gouttelettes d'eau s'écoulent vers le point le plus bas de la pente pour être recueillies dans le verre de collecte.

À la fin de chaque essai, la quantité d'eau récupérée a été mesurée afin d'évaluer les performances du matériau étudié.

Chaque matériau a fait l'objet d'un essai indépendant réalisé sous les conditions météorologiques correspondantes au jour de l'expérience .

Le matireau	La bentonite	Le gel de silice	Le ca cl 2
Le jour	06/06	05/06	04/06
T (c)	24	26	26
P(mbars)	1013	1013	1013
Le vent (km/ h)	20	20	19
HR%	62	46	45
Masse initiale (g)	252	252	252
Masse eau (g)	17	47	56
Masse récupér (g)	6	20	27
W récupér %	35	42	48

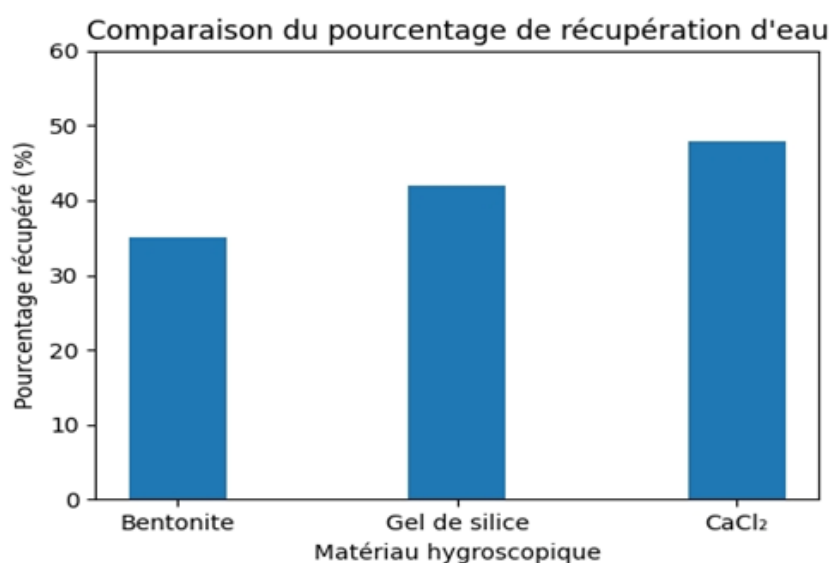


Figure : Pourcentage de récupération d'eau obtenu avec différents matériaux hygroscopiques .

Le graphique compare le pourcentage de récupération d'eau obtenu dans le distillateur solaire en utilisant trois matériaux hygroscopiques : la bentonite, le gel de silice et le chlorure de calcium (CaCl_2).

Les résultats montrent que :

La bentonite présente le plus faible taux de récupération d'eau, avec environ 35 %.

Le gel de silice offre une meilleure performance, avec un taux de récupération d'environ 42 %.

Le CaCl_2 atteint la valeur la plus élevée, avec près de 48 % de récupération d'eau.

Cette différence s'explique par la capacité hygroscopique de chaque matériau. Le CaCl_2 possède une très forte affinité pour la vapeur d'eau, ce qui lui permet d'adsorber une plus grande quantité d'humidité atmosphérique. Lors de la phase de régénération dans le distillateur solaire, cette eau est ensuite libérée et récupérée plus efficacement. Le gel de silice présente également de bonnes propriétés d'adsorption, mais reste moins performant que le CaCl_2 . Quant à la bentonite, sa capacité de captation et de restitution de l'eau est plus faible, ce qui explique son rendement inférieur.

Ainsi, les résultats indiquent que le chlorure de calcium (CaCl_2) est le matériau le plus performant parmi les trois étudiés pour la récupération d'eau atmosphérique dans le distillateur solaire, suivi du gel de silice puis de la bentonite.

Conclusions

Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer les performances de trois matériaux hygroscopiques, à savoir la bentonite, le gel de silice et le chlorure de calcium (CaCl_2), à travers des essais de séchage à l'étuve, de récupération d'eau par condenseur et de désorption dans un distillateur solaire. Les résultats obtenus montrent que les propriétés hygroscopiques de chaque matériau influencent fortement leur capacité d'adsorption et de restitution de l'eau.

L'analyse des résultats a mis en évidence que le chlorure de calcium présente la plus forte capacité d'absorption d'humidité grâce à son caractère fortement hygroscopique. Le gel de silice occupe une position intermédiaire avec une bonne capacité d'adsorption et une régénération relativement rapide, tandis que la bentonite, bien que moins performante en termes de quantité d'eau captée, constitue une solution intéressante en raison de son faible coût et de son abondance naturelle.

Les essais de chauffage ont également montré que l'augmentation de la température favorise la désorption de l'eau contenue dans les matériaux, entraînant une diminution de leur humidité. Par ailleurs, l'humidité relative de l'air influence directement leur comportement hygroscopique, puisque l'augmentation de celle-ci conduit à une adsorption plus importante de la vapeur d'eau atmosphérique.

Les expériences réalisées avec le condenseur ont confirmé la possibilité de récupérer une partie significative de l'eau adsorbée grâce au chauffage. Le gel de silice et le chlorure de calcium ont montré des rendements de récupération supérieurs à ceux de la bentonite, ce qui démontre leur intérêt pour les applications de production d'eau à partir de l'humidité atmosphérique.

En conclusion, les matériaux hygroscopiques représentent une solution prometteuse pour la récupération de l'eau atmosphérique et les systèmes de distillation solaire. Parmi les matériaux étudiés, le chlorure de calcium apparaît comme le plus performant pour la captation de l'humidité, tandis que le gel de silice offre un bon compromis entre capacité d'adsorption et facilité de régénération. La bentonite demeure une alternative économique et écologique pouvant être valorisée dans des applications à grande échelle. Des travaux futurs pourraient porter sur l'amélioration de ces matériaux ou sur le développement de matériaux composites permettant d'augmenter davantage les performances de récupération d'eau tout en réduisant la consommation énergétique des systèmes de régénération.

Références bibliographiques :

Références bibliographiques :

- [1]. Gregg, S. J., & Sing, K. S. (1982). Adsorption, Surface Area and Porosity. Academic Press. Définition thermodynamique de l'hygroscopie et distinction entre adsorption de surface et absorption volumique.
- [2]. Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journal of the American Chemical Society, 60(2), 309-319. Analyse des isothermes de sorption (modèles de BET, GAB) et influence de la microstructure sur la performance
- [3]. Luikov, A. V. (1966). Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. Pergamon Press. Bilans énergétiques et couplage entre transfert de masse (eau) et transfert de chaleur.
- [4]. Aristov, Y. I. (2013). Adsorption solid electrolytes: A new class of materials for heat transformation. Journal of Chemical Engineering of Japan. État de l'art des applications industrielles et critères de sélection des matériaux selon l'usage final.
- [5]. Gupta, Sunil, « Low temperature desiccants In atmospheric water generation. » (2018). Electronic Theses and Dissertations. Page 3087
- [6]. Ahrestani, Z., Sadeghzadeh, S., & Banna Motejadded, H. (2023). An overview of atmospheric water harvesting methods, the inevitable path of the future in water .
- [7]. M. Jradi, N. Ghaddar and K. Ghali, Experimental and theoretical study of an integrated thermoelectric photovoltaic system for air dehumidification and fresh water production, Int. J. Energy Res., 2012, p 963–974.
- [8]. F. Tajeddini, M. Eslami and N. Etaati, Thermodynamic analysis and optimization of water harvesting from air using thermoelectric coolers, J. Energy Convers. Manag, 2018, p 417–429.
- [9]. S. Liu, et al., Experimental analysis of a portable atmospheric water generator by thermoelectric cooling method, Energy Procedia, 2017, 142, 1609 ,1614.
- [10]. K. Pontious, B. Weidner, N. Guerin, O. Pierrakos, and K. Altaii, Design of an atmospheric water generator: Harvesting water out of thin air, in 2016 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), IEEE, 2016, pp. 6–11.

Références bibliographiques :

- [11].BOUKADAH N., 2007.ETUDE DE L'ADSORPTION DE MICROPOLLUANTS ORGANIQUES SUR LA BENTONITE mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme magister, à l'Université 20 Août 55, Skikda.p39
- [12] S. weintraub, demystifying silica gel, objects specialty group postprints ,volume nine, 2002,p:169.194..
- [13]. Wafa OULAD YAHIA ,Zineb TALEB AHMEDSynthèse et caractérisation du gel de Silice à partir du sable de silice et de résidus du palmier dans la région du Ghardaïa.
- [14].E. Frédéric, chlorure de calcium, septembre 2009, novembre 2009, 27 juillet 2010 - <http://fred.elie.free.fr> - page 1/7.
- [15].<https://byjus.com/chemistry/cacl2/>, consulté à 26/02/2025.
- [16]. S.Bitour Étude expérimental et optimisation de la cristallisation de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pour la réduction de la surfusion.
- [17]. .Distinction between Silica Gel And Bentonite Clay – India Super Dry.
- [18].. ScienceDirect – Bentonite and water adsorption studies.
- [19].. XRD Chemical – Calcium chloride desiccant guide.
- [20] A.KHENBLOUCHE.(2014). Etude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire. Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah Ouargla
- [21] S.CHOUICHA.(2010). Etude Expérimentale du Séchage Solaire des Dattes Humides et Impact sur la Qualité .Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah.Ouargla
- [22]SAID Bachir Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nour réhumidifiées.
- [23] Dikbasan T., 2007: Determination of effective parameters for drying of apples. Master of Science Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology.
- [24].Jean V., 2009: Séchage principes et calcul d'appareils Séchage convectif par air chaud. Technique de l'ingénieur Opérations (ref.article :j2451) unitaires : évaporation et séchage, base documentaire :TIB316DUO

Références bibliographiques :

- [25]. Vasseur J : 2009 : "Séchage : principe et calcul d'appareils : séchage convectif par air chaud (partie 1)." Technique de l'ingénieur: Génie des procédés, (J2451).
- [26]. DAMMA Chaima , KERBOUAI Imene Effet de séchage par méthode conventionnelle sur le potentiel antioxydant des feuilles de coriandre (*Coriandrum sativum* L).
- [27]. Tina Djaber Amine Calcul Technologique et simulation du procédé de distillation.
- [28]. TOUMI SELMA Elimination des colorants par énergie solaire
- [29]. BAIT OMAR ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE MULTI-ÉTAGES
- [30]. MODELISATION ET CONCEPTION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE DES EAUX SAUMATRES A BAS COÛT POUR.
- [31]. Amel BECHENEBA , Chaima KAHOUAL Effet de Sel sur la Productivité du Distillateur Solaire
- [32]. H. Boutebila et L. Hadjadj, « Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole », 2017.
- [33]. M. Malik , G.N. Tiwari , A. Kumar , M.S. Sodha ; Solar distillation. Oxford, UK Pergamon Press; Vol.2 (1982). pp. 8–17.
- [34]. SELLAMI Mohamed Hassen ETUDE ET AMELIORATION DES TECHNIQUES DE DISTILLATION SOLAIRE DANS LA REGION SUD-EST ALGERIEN (OUARGLA).
- [35] M. Zerrouki, Y. Marif, M. Belhadj, et N. E. Settou, « Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien », Ann. Sci. Technol., vol. 4, no 1, p. 12-12, 2012.
- [36] K. Geundouz, R. Memmi, et M. Announ, « Simulation par CFD du refroidissement par utilisation des nanofluides dans un échangeur de chaleur coaxial. », 2020.
- [37]. FEDALI SAIDA MODELISATION ET CONCEPTION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE DES EAUX SAUMATRES A BAS COÛT POUR LES COMMUNAUTES RURALES, 2008

Références bibliographiques :
