

République Algériennes Démocratique Et Populaire



Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté Des Sciences Appliquées

Département De Génie Mécanique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Énergétique

Présenté par :

BENSLIMANE Fatah.

BENATIA El Mahdi.

Thème :

Étude de stockage d'énergie thermique par sorption solide-gaz

Application aux bâtiments à basse consommation

Devant le jury composé de :

Mme : M.Battouch	Président	MAA	Université Kasdi Merbah Ouargla
Mr : A.Boubekri	Examineur	Prof.	Université Kasdi Merbah Ouargla
Mr : N.Cherrad	Encadreur	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla
Mr : Z.Derghout	Co-Encadreur	MAA	Université Kasdi Merbah Ouargla

Année 2018/2019

AVERTISSEMENT PREALABLE

Le présent document a été réalisé par des étudiants du Master Génie Mécanique Energétique dans le cadre de leur scolarité. Il n'a pas un caractère de publication scientifique au sens strict. En effet, il n'a pas été soumis à un comité de lecture avant publication. Ce travail a été noté, ainsi que la soutenance orale et l'éventuelle production multimédia auxquelles il a donné lieu. Ces évaluations participent à l'évaluation globale des étudiants en vue de l'obtention du diplôme de Master ; elles ont un caractère privé et ne sont pas communiquées ici.

Le contenu de ce document est donc proposé sous la seule responsabilité de leurs auteurs (étudiants) et doit être utilisé avec les précautions d'usage. C'est pourquoi le lecteur est invité à exercer son esprit critique.

Sa reproduction, totale ou partielle, est autorisée à condition que son origine et ses auteurs soient explicitement cités.

L'Encadreur

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Avant tout à mon père, demande à Allah d'avoir pitié de

lui, à ma chère mère

à mon frère.

Et à toutes les familles BENSLIMANE.

À tous mes amis

et à toute la promotion 2018/2019

de énergétique.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Avant tout à mon père, à ma chère mère

A tous mes frères

Et à toutes les familles BENATIA

A tous mes amis leur aide

Et à toute la promotion 2018/2019

de énergétique.

Remerciement

Avant tout propos, je remercie « ALLAH » le tout puissant qui me donné sagesse et santé pour faire ce modeste travail.

J'adresser mes remerciements, et à exprimer mes reconnaissances à mon promoteur Mr : N.Cherrad et Mr : Z.Derghout pour leur orientations .

Ma gratitude va particulièrement à tous les enseignants de département de Génie mécanique (UKM Ouargla) pour la formation que nous avons reçue.

Nous tenons aussi à exprimer nos profonds remerciements au Membres de jury qui ont accepté d'assister notre soutenance De mémoire fin d'étude.

En fin nos derniers remerciements et ne sont pas les moindres, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

Résumé

Le stockage d'énergie thermique est l'un des solutions qui permet d'utiliser l'énergie solaire gratuite disponible sur toute l'année et surtout pendant la période estivale. Le stockage d'énergie thermique est fait par plusieurs types, un de ces types est le stockage par sorption. Le stockage par sorption étant conçu selon deux types, d'adsorption et d'absorption. Ces deux types sont utilisés pour stocker l'énergie thermique solaire pour produire de la chaleur, du froid ou les deux. Ce travail présente une étude d'un système ouvert de stockage thermique par adsorption qui utilise l'énergie solaire thermique comme une source de chaleur, le matériau adsorbant utilisé est la zéolithe 13X qui fait un couple avec l'eau comme un adsorbat. La pression de fonctionnement est la pression atmosphérique. Les calculs analytiques ont été basés sur la détermination des efficacités de chargement, de stockage et de déchargement. Les efficacités sont basées sur les quantités totales échangées. Les résultats pour le stockage ouvert dans cette étude ont montré que les efficacités de charge et de décharge sont respectivement de 0.95 et 0.88 pour la zéolithe 13X.

Mots clés : stockage de chaleur – sorption – adsorption – zéolithe 13X.

Abstract

The storage of thermal energy is one of the solutions allows the use of free solar energy available throughout the year and especially during the summer. Thermal energy storage is done by several types, one of these types is sorption storage. The sorption storage is designed according to two types of adsorption and absorption. Both types are used to store solar thermal energy to produce heat, cold or both. This work presents a study of an open adsorption thermal storage system that uses solar thermal energy as a source of heat, the adsorbent material used is the 13X zeolite which pairs with water as an adsorbate. The operating pressure is the atmospheric pressure. The analytical calculations were based on the determination of the efficiencies of loading, storage and unloading. The efficiencies are based on the total quantities exchanged. The results for open storage in this study showed that the charge and discharge efficiencies are respectively 0.95 and 0.88 for the 13X zeolite.

Key words: heat storage - sorption - adsorption - 13X zeolite.

ملخص

يعد تخزين الطاقة الحرارية أحد الحلول التي تعد جزءاً من الأجهزة التي تتيح استخدام الطاقة الشمسية المجانية المتوفرة على مدار العام وخاصة خلال فصل الصيف. يتم تخزين الطاقة الحرارية بعدة أنواع ، أحد هذه الأنواع هو تخزين الامتصاص. تم تصميم وحدة تخزين الامتصاص وفقاً لنوعين من الامتصاص للصلب والامتصاص للسوائل . يستخدم كلا النوعين لتخزين الطاقة الحرارية الشمسية لإنتاج الحرارة والبرودة أو كليهما. يقدم هذا العمل دراسة لنظام تخزين حراري بامتصاص مفتوح يستخدم الطاقة الحرارية الشمسية كمصدر للحرارة ، والمواد الماصة المستخدمة هي زيوليت 13 X الذي يتزاوج مع الماء كثف. ضغط التشغيل هو الضغط الجوي. استندت الحسابات التحليلية إلى تحديد كفاءة التحميل والتخزين والتفريغ. تستند الكفاءة إلى إجمالي الكميات المتبادلة. أظهرت نتائج التخزين المفتوح في هذه الدراسة أن كفاءة الشحن والتفريغ تساوي 0.95 و 0.88 على التوالي للزيوليت 13X.

الكلمات المفتاحية: تخزين الحرارة - الامتصاص - الامتزاز - X13 الزيوليت.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciement	iii
Résumé	iv
Table des matières	vi
Listes des figures	viii
Listes des tableaux	ix
Nomenclatures	x
Introduction Générale : ...	1
1 Chapitre I : Généralités sur le stockage d'énergie	
1.1 Introduction :	3
1.2 Définition des énergies renouvelables	3
1.3 Technologies de stockage des énergies renouvelables :	3
1.3.1 Méthodes de stockage d'énergie :	4
1.4 Définition du bâtiments à basse consommation :	5
1.5 Énergie solaire :	6
1.6 Énergie solaire thermique :	6
1.7 Capteur solaire thermique :	7
1.8 La région choisie pour cette étude :	7
1.8.1 Données météorologiques (Ouargla) :	7
1.8.2 Données géographiques :	7
1.9 Stockage thermique au bâtiments à basse consommation :	8
2 Chapitre II : Système de stockage de chaleur par Adsorption	
2.1 Introduction :	13
2.2 Définition de sorption :	13
2.3 Application de stockage de chaleur par sorption :	13
2.4 Classement de type de stockage par sorption :	14
2.5 Système de stockage par Adsorption :	15
2.5.1 Matériaux d'Adsorption :	16
2.5.2 Choix de l'adsorbant/l'adsorbat :	18
2.5.3 Classification des systèmes de stockage par adsorption :	28
2.5.4 Avantages du Systèmes de stockage par adsorption :	29

3	CHAPITRE III : Description du système	
3.1	Introduction :	30
3.2	Description de fonctionnement du système :	30
3.2.1	Cas de chargement :	30
3.2.2	Cas de déchargement :	32
3.2.3	Conclusion :	33
4	Chapitre IV : Résultats et Discussions	
4.1	Introduction :	34
4.2	Les données :	34
4.2.1	Cas de charge :	34
4.2.2	Cas de décharge	36
4.3	La discussion du résultat :	37
4.4	Conclusion :	41
	Conclusion générale :	42
	Références Bibliographies :	43

Listes des figures :

Figure I-1 : Types de stockage l'énergie mécanique.

Figure I-2: Type de stockage d'énergie électrique.

Figure I-3 : Représentation des composants d'un capteur solaire plan.

Figure I-4 : Représentation de la disponibilité d'ensoleillement selon le besoin d'énergie thermique au cours de l'année au Ouargla.

Figure I-5: Présente des différents matériaux utilisés pour l'application du stockage d'énergie thermique dans une large gamme de température ($20\text{ °C} < T < 200\text{ °C}$).

Figure I-6: Quelle que types de stockage par chaleur sensible.

Figure I-7: Type de stockage par chaleur latente.

Figure I-8 : Les étapes de stockage de chaleur par thermochimique.

Figure II-1 : Classement de stockage de chaleur par sorption.

Figure II-2 : Phénomène d'adsorption.

Figure II-3 : Les calcification d'adsorbent suivent son nature.

Figure II-4 : Classement de las adsorbants suivant la taille des pores de leur matrice.

Figure II-5 : Gels de silice schématisés, en vrac et en conditionnés sachet.

Figure II-6 : Unité structurale des zéolithes de types A, X et Y.

Figure II-7 : Schéma système de stockage ouvert par adsorption.

Figure II-8 : Schéma système de stockage fermé par adsorption.

Figure III-1 : Processus de chargement pour un système ouvert d'adsorption.

Figure III-2 : Processus de déchargement pour un système ouvert d'adsorption.

Figure IV-1 : Le processus de charge.

Figure IV-2 : Le processus de décharge.

Figure IV-3 : Variation des quantités des chaleurs en fonction de temps.

Figure IV-4 : Variation des efficacités en fonction de temps.

Figure IV-5 : Variation des quantités des chaleurs en fonction de débite volumique.

Figure IV-6 : Variation des efficacités en fonction de débite volumique.

Liste des tableaux :

Tableau I-1 : classification des types de stockage de chaleur.

Tableau II-1 : Caractéristiques thermochimiques de quelques adsorbants poreux.

Tableau II-2 : Caractéristiques des zéolithes de type A, X et Y.

Tableau IV-1 : Variation des quantités des chaleurs en fonction de temps.

Tableau IV-2 : Variation des efficacités en fonction de temps.

Tableau IV-3 : Variation des quantités des chaleurs en fonction de débit volumique.

Tableau IV-4 : Variation des efficacités en fonction de débit volumique.

Nomenclatures :

Symbole	Signification	Unités
Q	Quantité de chaleur	kJ
Q _{ch}	Quantité de chaleur chargé	kJ
Q _{déch}	Quantité de chaleur déchargé	kJ
m	Masse de matériau de stockage	Kg
ℓ	Chaleur massique de changement d'état du matériau	kJ.kg ⁻¹
ΔH_c	capacité de stockage maximale de cas de chargement	en kJ
ΔH_d	capacité de stockage maximale de cas de déchargement	en kJ
m _c	Masse totale de charge	Kg
m _d	Masse totale de décharge	Kg
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
Q _v	Débit volumique	m ³ /h
t	Le temps de chargement.	h (heur)
η_c	Efficacité dans le cas de charge.	
η_d	Efficacité dans le cas de décharge	
TES	Stockage d'énergie thermique (Traduction française de « Thermal energy storage »)	

Introduction Générale :

La demande énergétique à long terme dans le monde est en augmentation croissante, principalement en raison de la croissance de la population mondiale et de la croissance des pays en développement. Par exemple, pour l'année 2018, la consommation d'énergie dans le monde était de 102.4 quadrillions (10^{24}) kJ et, d'ici 2050, il est prévu qu'elle atteindrait 112,6 quadrillions kJ. On peut voir pour 2018 que les combustibles fossiles a dominé les autres consommations énergétiques mondiales, entraînant 5157 millions de tonnes d'émissions de CO₂ [1].

Afin de réduire l'utilisation de gaz naturel, de pétrole et de charbon, et donc de réduire leur impact sur l'environnement, des sources d'énergie renouvelables sont à l'étude. Les sources d'énergie renouvelables ont récemment été développées à un point où elles ont le potentiel et la capacité d'influencer de manière significative la technologie actuelle. Ces ressources ont la capacité de se reconstituer naturellement et si elles sont extraites à un prix raisonnable, elles pourraient fournir l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Les sources d'énergie renouvelables comprennent l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie solaire, la biomasse, les biocarburants et l'énergie géothermique [2].

Ces sources d'énergie sont durables, car elles peuvent être utilisées à l'avenir et leur utilisation pourrait entraîner une réduction significative des impacts environnementaux et sociaux des combustibles traditionnels actuels. À l'heure actuelle, environ 17% de l'énergie mondiale totale provient de sources renouvelables [2]. La biomasse et l'hydroélectricité sont les principaux contributeurs. Cependant, les énergies éolienne et solaire se développent et, avec la poursuite de la recherche et du développement, apporteront une contribution plus significative.

Les secteurs des bâtiments et de la construction immobilière représentent ensemble 36% de la consommation d'énergie finale mondiale et près de 40% des émissions totales de CO₂ directes et indirectes. La demande en énergie des bâtiments et de la construction continue d'augmenter, sous l'impulsion d'un meilleur accès à l'énergie dans les pays en développement,

d'une appropriation et d'une utilisation accrues des dispositifs consommateurs d'énergie et d'une croissance rapide de la surface totale des bâtiments, de près de 3% par an [2].

Pour ça des pionniers en le monde ont commencé d'étudier des types de bâtiments, et leurs premiers retours d'expérience sont précieux pour tous ceux qui souhaitent s'engager dans des projets de bâtiments à basse consommation. Il s'agit de volonté politique, organisation, méthodologies, pratiques de conception et de construction, c'est-à-dire beaucoup de nouveautés et d'innovations doivent être intégrées, de couts maitrises, et ceci, tant dans les domaines du bâtiment que de ceux des techniques de chauffage, ventilation, d'éclairage ...

Les ingénieurs et les architectes qui sont tous concernés, devront avancer ensemble, très en amont et différemment, pour répondre aux nouvelles exigences : le confort des utilisateurs en hiver comme en été, la lumière naturelle, et réduction de la consommation d'énergie.

L'objectif principal à atteindre alors consiste à étudier les efficacités du système de stockage l'énergie thermique par adsorption solaire.

Le premier chapitre est une généralité sur les types de stockage d'énergie, la construction et la définition d'un bâtiment à basse consommation, l'énergie solaire thermique, et finalement une comparaison entre les types de stockage d'énergie thermique.

Le deuxième chapitre présente le phénomène de sorption avec ses types, puis définit le système de stockage par adsorption, y compris les types d'adsorbent et d'adsorbat connus et les différents couples.

Le troisième chapitre présente le système utilisé dans cette étude et présente aussi l'analyse thermodynamique de ce système.

Le quatrième chapitre est les résultats et la discussion des efficacités de stockage thermique du système d'adsorption avec le couple zéolite/eau.

Enfin une conclusion générale sur les résultats aboutis et ainsi que les recommandations qui peuvent être déduites.

Chapitre I :

Généralités sur le

stockage d'énergie

1.1 Introduction :

Compte tenu de l'état actuel de l'environnement et des besoins énergétiques permanents, les énergies renouvelables constituent une solution prometteuse pour un approvisionnement énergétique sûr et compatible avec l'environnement. Le principal défi reste de développer des technologies capables d'utiliser efficacement les sources d'énergie renouvelables disponibles pour les bâtiments à basse consommation. Mais ces énergies ne sont pas toujours existées à cause du changement de climats et changement de saisons (hiver, été, automne, printemps). C'est pour ça les scientifiques créent champ que spécialisés de stockage ces énergies pour permet d'utilisées en le cas où les sources absent (le cas de changement de saisons), et aussi permet de corriger la corrélation entre l'offre et la demande d'énergie disponible [2].

1.2 Définition des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium). Contrairement à celle des énergies fossiles, l'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisque ces énergies renouvelables ne couvrent que 20 % de la consommation mondiale d'électricité [3].

1.3 Technologies de stockage des énergies renouvelables :

La capacité à utiliser de nombreuses sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire, dépend fortement de l'efficacité du processus de stockage. De ce fait, les processus de stockage de l'énergie sont au cœur de la mise en œuvre de nombreuses sources renouvelables. Le stockage est nécessaire pour capter l'énergie lorsqu'elle est disponible pour une utilisation ultérieure [4].

Pour que les technologies de stockage d'énergie soient applicables, économiquement compétitives et fiables, il est nécessaire de mettre au point des systèmes et des matériaux garantissant que les sources d'énergie renouvelables atteignent leur plein potentiel [4].

Le stockage d'énergie est une solution prometteuse d'énergie renouvelable qui peut répondre aux besoins de la société en matière d'énergie efficace et respectueuse de l'environnement pour de nombreuses applications, notamment le chauffage et la climatisation des bâtiments, et les applications utilitaires [2, 4].

Avantages des systèmes de stockage d'énergie : [2]

- Réduction des coûts énergétiques.
- Énergie redistribuée.
- Réduction des coûts initiaux et de maintenance.
- Conservation des combustibles fossiles.
- Amélioration de la sécurité énergétique.
- Réduction des émissions dans l'environnement.

1.3.1 Méthodes de stockage d'énergie :

Les différentes formes d'énergie pouvant être stockées incluent énergie mécanique, électrique et thermique, dont leur détaille est le suivant :

1.3.1.1 Stockage d'énergie mécanique :

Les systèmes de stockage d'énergie mécanique incluent la gravitation, à savoir, stockage d'énergie hydraulique pompée, stockage d'énergie à l'air comprimé et volants d'inertie. Les technologies de stockage d'énergie hydraulique pompée et de stockage d'énergie à air comprimé peuvent être utilisées pour le stockage d'énergie à grande échelle, tandis que les volants d'inertie sont plus adaptés au stockage intermédiaire. Le stockage est effectué lorsque de l'alimentation de pointe peu coûteuse est disponible, par exemple la nuit ou le week-end. La mémoire est déchargée lorsque le courant est nécessaire en raison d'une alimentation insuffisante de l'installation à charge de base [5].

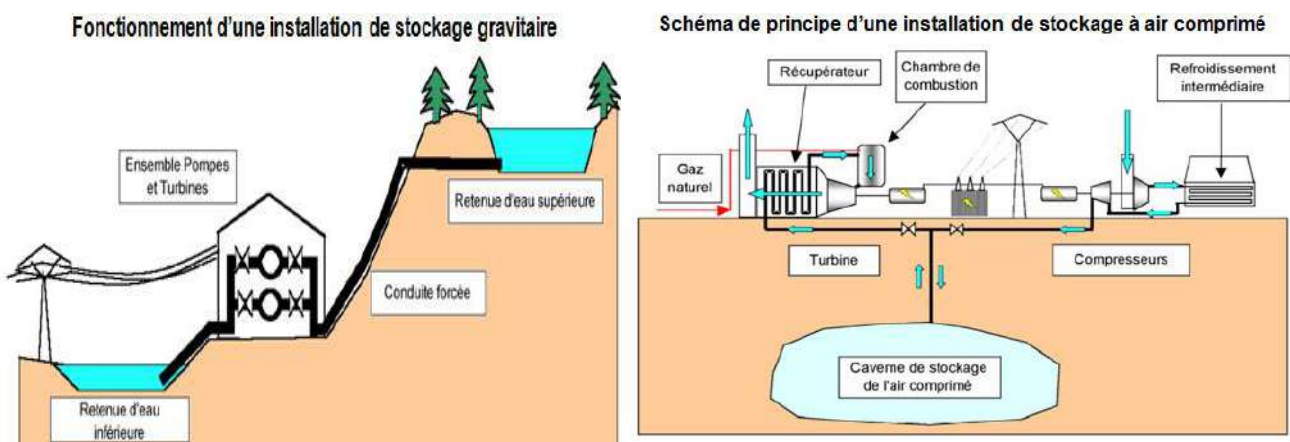


Figure I-1 : Types de stockage l'énergie mécanique [5].

1.3.1.2 Stockage électrique :

Le stockage d'énergie au moyen de batteries est une option pour stocker l'énergie électrique. Une batterie est chargée en la connectant à une source de courant électrique continu et lorsqu'elle est déchargée, l'énergie chimique stockée est convertie en énergie électrique. Les applications potentielles des batteries sont l'utilisation de l'énergie en période creuse, le nivellement de la charge et le stockage de l'énergie électrique générée par les éoliennes ou les centrales photovoltaïques. Le type d'accumulateur le plus répandu est l'acide au plomb et le Ni – Cd [6, 7].

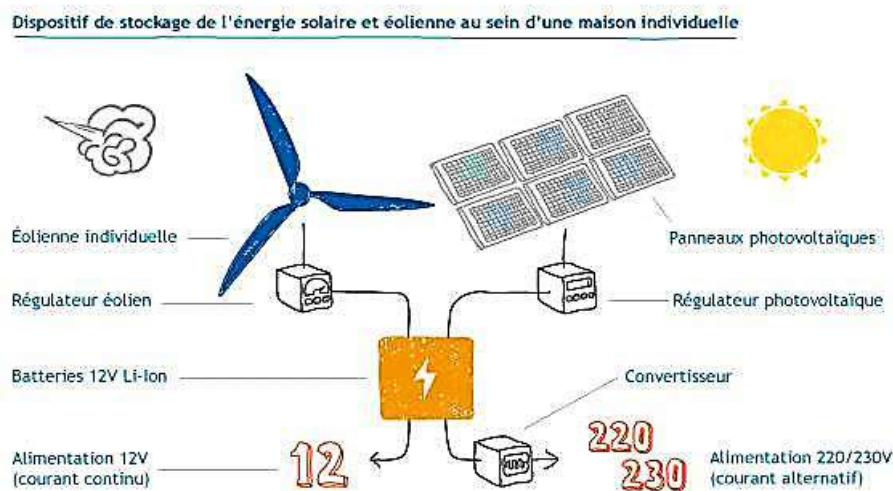


Figure I-2: type de stockage d'énergie électrique [6].

1.3.1.3 Stockage thermique :

L'énergie thermique peut être stockée sous forme de modification de l'énergie interne d'un matériau, sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente ou thermochimique ou d'une combinaison de ces facteurs. Le stockage de chaleur sensible est dû au changement de température du matériau, tandis que le stockage de chaleur latente est dû à la transformation de phase (solide-liquide, liquide-gaz, solide-solide) [8].

1.4 Définition du bâtiments à basse consommation [9] :

Le Bâtiment à Basse Consommation énergétique (ou BBC) est un label attribué aux bâtiments qui ont une basse consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage, l'eau chaude sanitaire [10] et la ventilation [9].

Ainsi un logement BBC est un bâtiment performant en termes de consommation énergétique, qui nécessite 50% d'énergie en moins par rapport à un bâtiment conforme.

Pour cela, il met en œuvre, entre autres, une conception bioclimatique, une bonne isolation thermique et une bonne étanchéité, le choix du mode de chauffage le plus adapté...

Il existe deux types de conditions d'attribution du label BBC en fonction de l'âge du logement [11] :

- les logements neufs ne doivent pas dépasser l'objectif de consommation de 50 kWhep/m².an.
- les logements existants doivent présenter une consommation inférieure à 50 % de la consommation conventionnelle. L'objectif de consommation est fixé pour eux à 80 kWhep/m².an.

Ce label BBC a de nombreux avantages : il permet une diminution de taxes foncières.

1.5 Énergie solaire :

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre [12].

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. Le Soleil est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire et de la géothermie profonde, l'utilisation de l'énergie solaire passe par ses deux composantes principales : sa chaleur et sa luminosité [12].

1.6 Énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.) [13].

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le Soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par le soleil en électricité [13].

1.7 Capteur solaire thermique :

Un capteur solaire thermique (ou capteur hélio-thermique ou collecteur solaire ou simplement capteur solaire) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur. Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels [14].

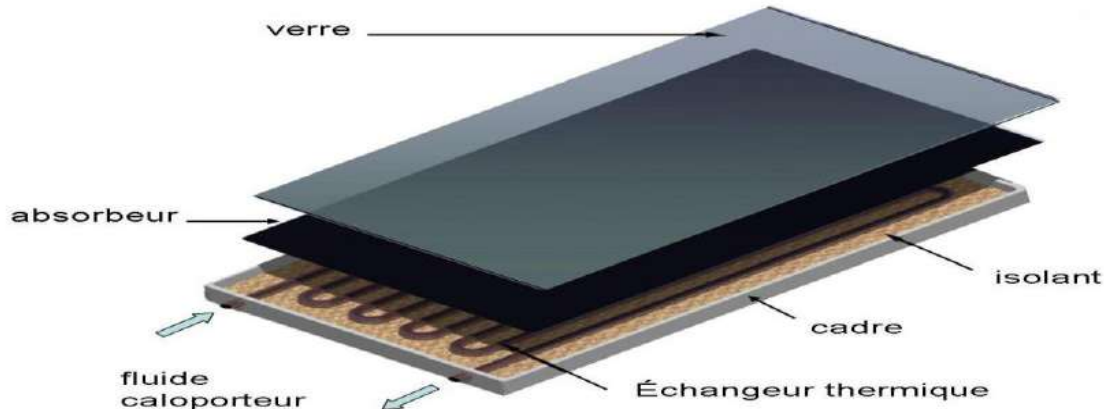


Figure I-3 : Représentation des composants d'un capteur solaire plan [15].

Type de capteur solaire thermique :[15]

- les capteurs à tube sous vide.
- les capteurs plans vitrés.
- les capteurs non vitrés.

1.8 La région choisie pour cette étude :

Sélectionné région Ouargla pour cette étude.

1.8.1 Données météorologiques (Ouargla) :[16]

-Altitude (Z)= 141 m -Longitude (γ)=5°24'E.

-Latitude (L) =31°57'

1.8.2 Données géographiques :

La wilaya de Ouargla est située au Sud-est Algérien, elle est distante de 800 km de la capitale Alger. Elle couvre une superficie de 163 323 km². Elle est limitée au Nord par les wilayas de Biskra et d'El Oued au Sud par les wilayas d'Illizi et Tamanrasset à l'Ouest par les wilayas de Ghardaïa et Djelfa et à l'Est par la Tunisie [16].

La figure suivant représente la disponibilité d'ensoleillement sur 10 m² selon le besoin d'énergie thermique au cours de l'année pour une maison qu'occupée par 4 personnes au Ouargla.

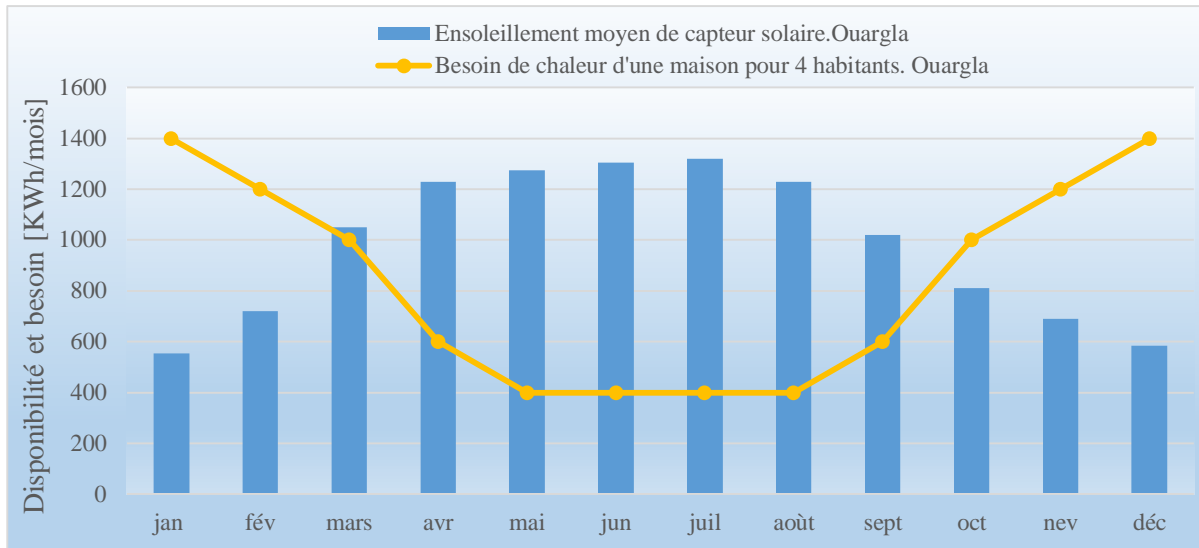


Figure I-4 : Représentation de la disponibilité d'ensoleillement selon le besoin d'énergie thermique au cours de l'année au Ouargla [17].

1.9 Stockage thermique au bâtiments à basse consommation :

De tels systèmes permettent de répondre à plusieurs besoins selon leurs domaines d'application, d'un logement particulier aux usages industriels par exemple. Les recherches montrent que le stockage d'énergie est possible tout au long de la journée et à la fois pour plusieurs mois ce qui est intéressant pour une application et un développement de ce type de système dans les bâtiments.

En générale, un cycle de fonctionnement de chaque système stockage d'énergie thermique consiste en trois étapes :

- la charge (charging) est une étape du stockage de chaleur.
- le stockage (storage) de la chaleur.
- la décharge (discharging) est une phase de déstockage de la chaleur.

Les stockages d'énergie thermique peuvent être distingués selon leur mécanisme de stockage en trois groupes : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et par thermochimique.

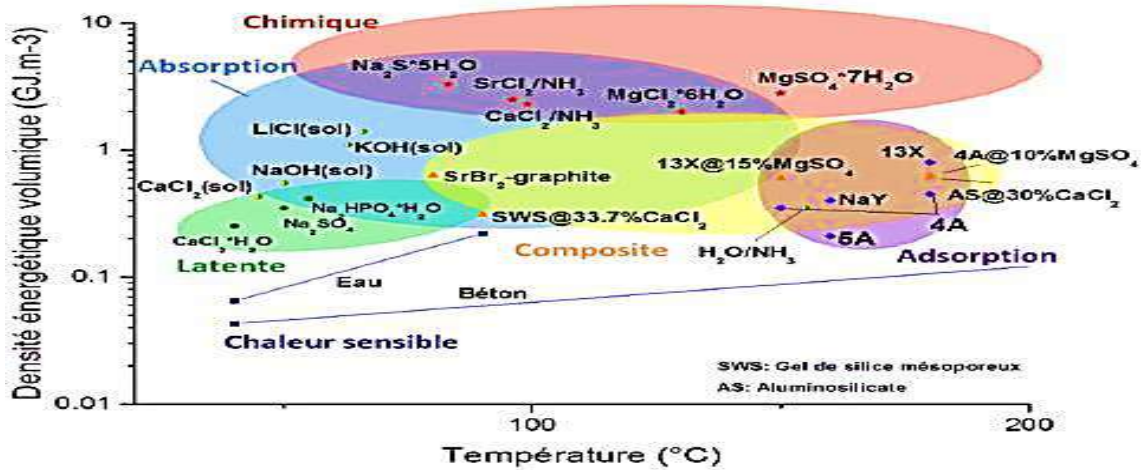


Figure I-5: Différents matériaux utilisés pour l'application du stockage d'énergie thermique dans une large gamme de température (20 °C < T < 200 °C) [18, 19].

1.9.1.1.1 Stockage de chaleur sensible :

L'énergie sous forme de chaleur sensible est modifiée par le chauffage, ou le refroidissement des matériaux de stockage, via le changement de températures du solide ou du liquide. La quantité d'énergie impliquée au processus du stockage de la chaleur sensible dépend de C_p , la capacité calorifique massique du corps ($J.kg^{-1}K^{-1}$), de la variation de température (T_1, T_2 en K°) et la masse de matériau (en Kg) [20].

La quantité d'énergie stockée (Q) peut être exprimée par l'équation [20] :

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot C_p \cdot dT \quad (I - 1)$$

Ce mode de chaleur est connu depuis des milliers d'années, il s'agit de simples pierres posées à côté d'un feu pour pouvoir ensuite profiter de la chaleur restituée dans le temps. Les matériaux typiquement utilisés pour le stockage thermique sont l'eau, l'huile, l'alcool, la roche, le béton, le sable, le granite ou enfin les sous-produits du procédé d'affinage des métaux qui sont peu onéreux [20, 21].

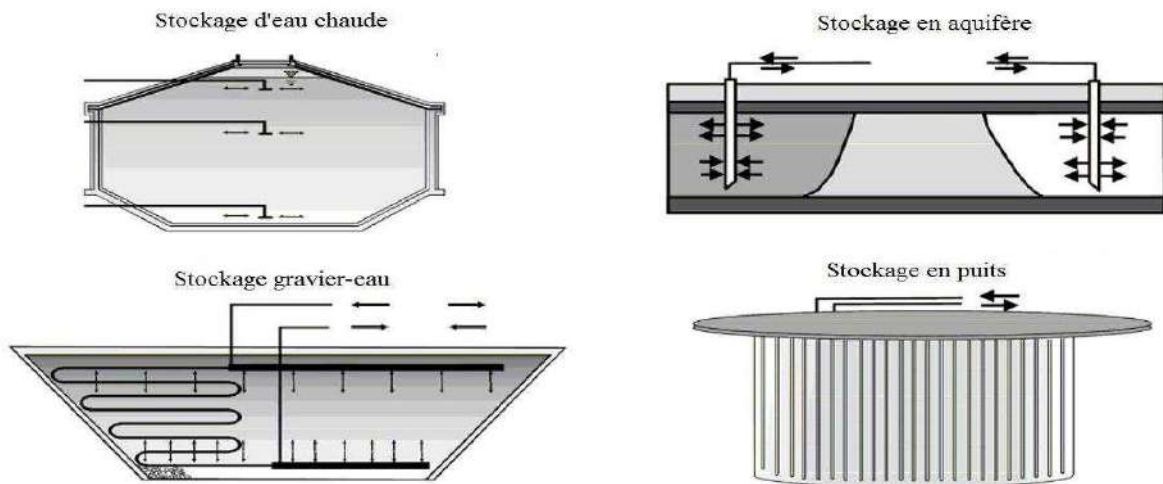


Figure I-6: Quelques types de stockage par chaleur sensible [22].

1.9.1.1.2 Stockage par chaleur latente :

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes. Elle s'exprime par l'équation [23]:

$$Q = m \times \ell \quad (I - 2)$$

Avec m est la masse du matériau de stockage (kg), et ℓ est la chaleur massique de changement d'état du matériau ($J.kg^{-1}$).

Un large choix de matériaux à changement de phase, notés MCP, est disponible. Ils se répartissent en deux familles : les MCP organiques, paraffine et non paraffine comme les acides gras et les MCP inorganiques tels que les hydrates de sel et les métaux [21].

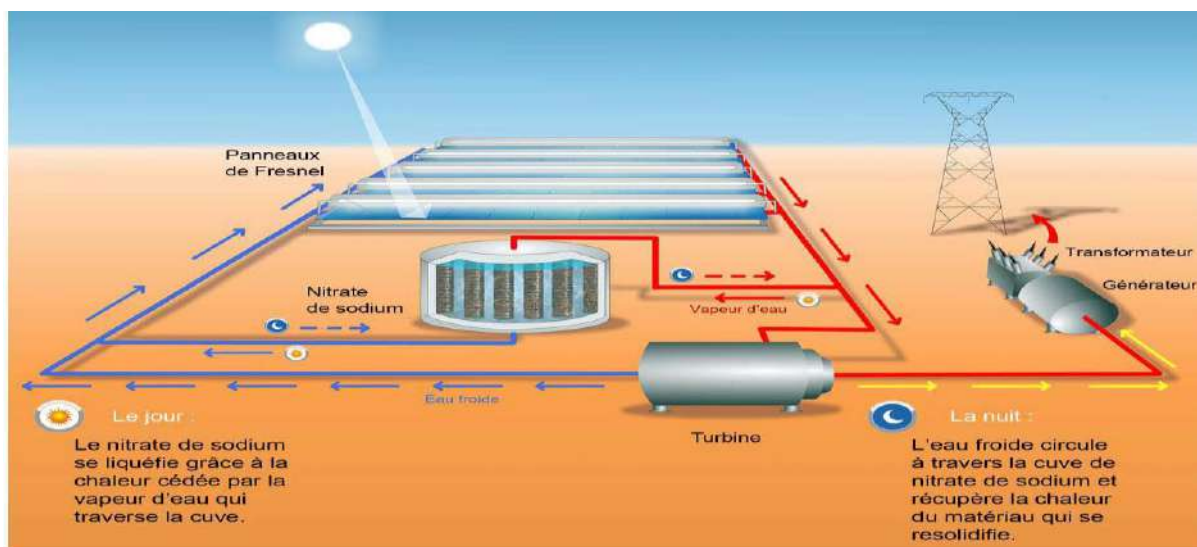


Figure I-7: Type de stockage par chaleur latente [24]

1.9.1.1.3 Stockage thermochimique :

Le stockage thermochimique s'appuie sur un mécanisme physico-chimique réversible. L'utilisation des expressions « stockage chimique », « stockage thermochimique » et « stockage par sorption » diffère d'un auteur à l'autre [25], et il est difficile d'établir des limites claires entre ces expressions. Les réservoirs d'énergie chimique utilisent des réactions chimiques réversibles pour stocker l'énergie dans des limites chimiques, cette énergie est stockée en fournissant de l'énergie sous forme d'énergie thermique (réactions thermochimiques), d'énergie électrique (réactions électrochimiques telles que celles des batteries) ou de radiation électromagnétique (réactions photochimiques et photosynthèse) [26]:



Le matériau AB absorbe de la chaleur, ce qui engendre l'apparition des deux composants A et B, distincts, pouvant être stockés séparément. Ce phénomène endothermique est appelé la charge, phase de stockage de chaleur. Inversement, la mise en contact des composants A et B provoque la formation d'un composant AB et la libération de chaleur. Ce phénomène exothermique correspond à la décharge, phase de restitution de chaleur [21, 26]. Chaque système faisant appel au stockage thermochimique possède un cycle de fonctionnement s'articulant en ces deux étapes de charge et de décharge.

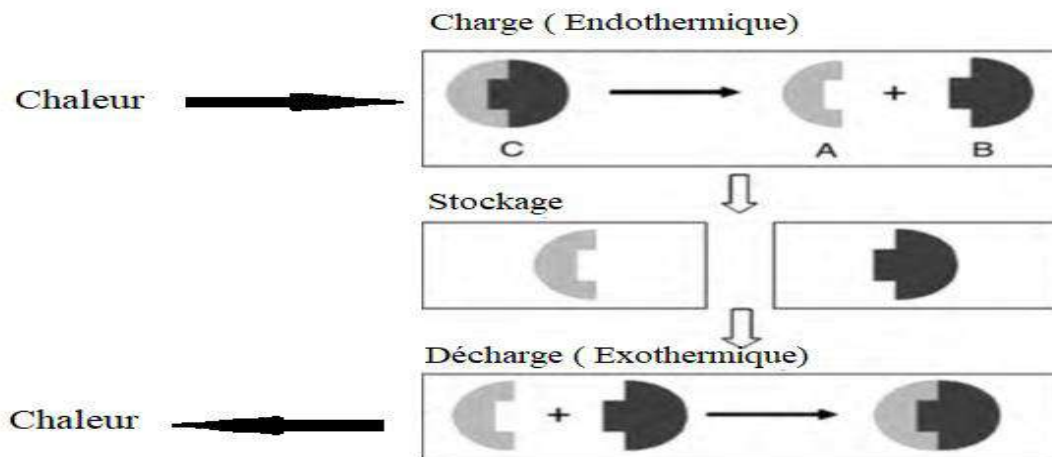


Figure I-8 : Étapes de stockage de chaleur par thermochimique [27].

De nombreux systèmes de stockage thermochimiques ont des densités d'énergie plus élevées que les autres technologies de stockage d'énergie thermique, ce qui permet de stocker de grandes quantités d'énergie dans des volumes plus faibles et ce qui les rend plus adaptés aux

Chapitre I : Généralités sur le stockage d'énergie

applications résidentielles. En outre, l'énergie des systèmes thermochimiques est stockée sous forme de potentiel chimique [27].

Par conséquent, elle ne se dégrade pas avec le temps, ce qui en fait une technologie appropriée pour le stockage à long terme. L'énergie thermochimique peut théoriquement être stockée indéfiniment à une température proche de la température ambiante, ce qui rend cette technologie particulièrement attrayante. On peut obtenir des densités d'énergie élevées à partir des réactions de divers matériaux, notamment des sels et des hydrates de sels [28].

1.9.1.2 Comparaison entre les trois types de stockage de chaleur :

Le tableau ci-dessous répertorie les caractéristiques des trois types de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système [29].

Tableau I-1 : Classification des types de stockage de chaleur [29].

		Stockage sensible	Stockage latent	Stockage thermochimique (lit de zéolithe)
Densité énergétique	Volumique	Faible 35-70 KWh.m ⁻³	Moyenne 50-60 KWh.m ⁻³	Élevée 150 KWth.m ⁻³
	Massique	Faible 0.02-0.03 KWh.Kg ⁻¹	Moyenne 0.05-0.1 KWh.Kg ⁻¹	Moyenne 0.5-1 KWh.Kg ⁻¹
Température de stockage		200 - 350 °C	-20 - 90°C	Jusqu'à 250°C
Duré de stockage		20 – 30 ans	20 000 -100 000 cycles	5 000 -100 000 Cycles
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance Théoriquement illimité
Maturité		Échelle industrielle (20 MWe)	Échelle Pilote (100 KWth)	Échelle Pilote (100 KWth)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

Chapitre II : Système de stockage de chaleur par Adsorption

2.1 Introduction :

Le stockage de chaleur par sorption et un type de stockage d'énergie est considérée en généralement comme le stockage thermochimique à cause de différâtes des auteures, le stockage par sorption est construit par deux martiaux l'sorbant et l'sorbat, l'adsorbent est aussi devisiez au deux type à cause de sa nature physique solide ou liquide (adsorbent où absorbent respectivement).

Ont spécialisé ce chapitre est pour approfondir dans le système de stockage par adsorption comme la définissions de ces systèmes, les types et les matériaux utilisée dans ses systèmes.

2.2 Définition de sorption :

Le stockage d'énergie thermochimique est un concept large qui fait référence aux processus de sorption et aux réactions chimiques. La sorption est une réaction chimique est caractérisée par des modification des liaisons chimiques des composés impliqués dans la réaction (dissociation et recombinaison). L'énergie peut être stockée par la réaction endothermique et libérée par la réaction exothermique inverse, parfois en ajoutant un catalyseur. Le stockage par sorption peut être défini comme un phénomène de fixation ou de capture d'un gaz ou d'une vapeur par une substance adsorbant à l'état condensé (solide ou liquide) au moyen d'interactions physiques moins intenses [30].

2.3 Application de stockage de chaleur par sorption :

Une application courante considérée pour l'intégration d'un système de stockage de chaleur à sorption est une maison passive familiale, qui a une demande en chauffage et en eau chaude sanitaire, ainsi que des capteurs solaires thermiques sur son toit capable de fournir la température de désorption requise. Le but des systèmes de stockage de la chaleur de sorption considérés dans cette analyse est de stocker de l'énergie thermique en été et de la restituer en hiver pour satisfaire la demande de chauffage. C'est le concept principal du stockage de chaleur saisonnier. Les maisons modernes peuvent utiliser des systèmes de chauffage à basse température, tels que le chauffage par le sol, pouvant fonctionner à des températures de départ inférieures à 40 °C [10].

2.4 Classement de type de stockage par sorption :

Les systèmes de stockage thermochimiques (sorption) peuvent être classés par les forces de cohésion impliquées dans le processus (physisorption et chimisorption), par type de réaction (adsorption / absorption), et par conception (systèmes ouverts / fermés) [31].

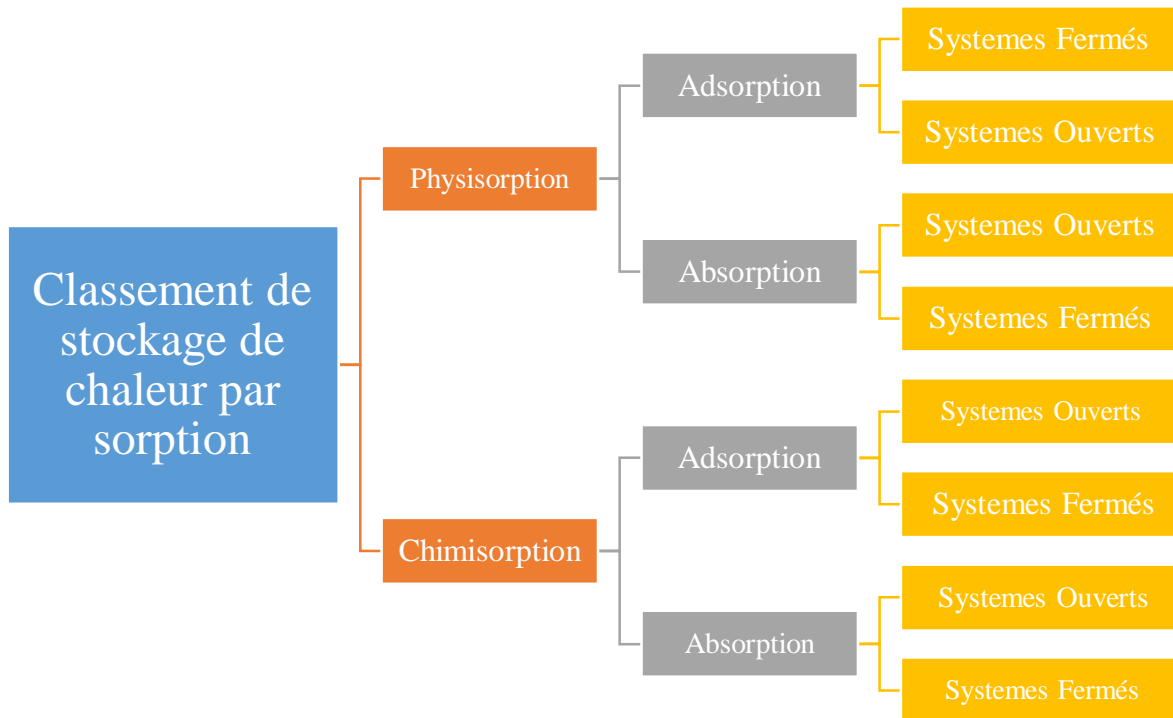


Figure II-1 : Classement de stockage de chaleur par sorption [31].

On peut distinguer alors le stockage par sorption :

❖ Par type des forces de cohésion

✓ Physisorption

En physisorption, l'énergie de sorption est généralement liée aux faibles forces intermoléculaires (forces de Van der Waals) et à la liaison hydrogène et aucune énergie d'activation n'est requise [26, 31].

✓ Chimisorption

Dans la chimisorption, une liaison covalente plus forte est impliquée et dans certains cas, elle peut être irréversible. Souvent, les deux processus peuvent se produire simultanément et une distinction claire ne peut pas être faite [26, 31].

❖ Par type de réaction :

✓ L’Absorption :

L'absorption est définie comme un phénomène dans lequel un liquide ou un gaz pénètre dans un solide ou un liquide mais, en considérant les applications de stockage. Ce terme est généralement associé à l'absorption d'un gaz par un liquide (absorbant) [32].

✓ L’Adsorption :

De la même manière, on utilise habituellement par adsorption pour désigner un phénomène de liaison d'un gaz sur une surface d'un matériau solide ou poreux lorsqu'une acceptation plus générale du mot désigne un phénomène de surface : une fixation de gaz ou phase liquide d'un composant à la surface d'une autre substance [32].

❖ Par type de conception:

✓ Systèmes ouverts :

Dans les systèmes ouverts, qui fonctionnent à la pression atmosphérique, la vapeur du fluide de travail est rejetée dans l'environnement, ce qui signifie que seule l'eau est utilisée pour ces systèmes [33].

✓ Systèmes fermés :

Les matériaux isolés du voisinage et les fluides circulant dans des circuits fermés caractérisent les systèmes fermés [33].

- Les systèmes fermés peuvent fournir des températures de sortie plus élevées pour les applications de chauffage que les systèmes ouverts [33].

2.5 Système de stockage par Adsorption :

Les systèmes d'adsorption, contrairement aux systèmes de stockage latents ou sensibles, ne nécessitent aucune isolation thermique pour le stockage, car l'énergie est stockée via un potentiel chimique ou physique [34]. L'adsorption implique la liaison d'un fluide à la surface d'un matériau poreux ou solide, qui utilise un processus de désorption endothermique (régénération) pour stocker l'énergie, et un processus d'adsorption exothermique pour la libérer. Les processus d'adsorption ont des densités d'énergie élevées, des pertes de chaleur négligeables, et peuvent être exploités dans un cycle continu pour stocker de l'énergie thermique. L'adsorption repose sur le principe selon lequel un gaz ou une vapeur (adsorbat) est

capturé par un matériau solide ou poreux (adsorbant) et se lie à sa surface pendant l'étape d'adsorption. Une fois que l'adsorbant est saturé avec l'adsorbat et que plus aucun gaz ou vapeur ne peut se lier à sa surface, le matériau adsorbant doit être régénéré. La désorption (régénération) est le processus d'élimination du gaz ou du vapeur lié de la surface pour ramener l'adsorbant dans un état lui permettant de répéter le processus d'adsorption de manière cyclique. Théoriquement, une quantité donnée de chaleur peut être stockée dans un matériau adsorbant et plus tard, la même quantité de chaleur peut être extraite sans aucune perte [2].

La figure II-2 présente le principe de base des étapes d'adsorption et de désorption (régénération) d'un processus d'adsorption. Lors de la régénération de l'adsorbant, de la chaleur est fournie au système, ce qui représente l'étape de chargement. Cette énergie thermique peut être fournie par des sources de chaleur perdue ou par l'énergie solaire afin d'éviter l'épuisement des ressources naturelles et la pollution de l'environnement [35].

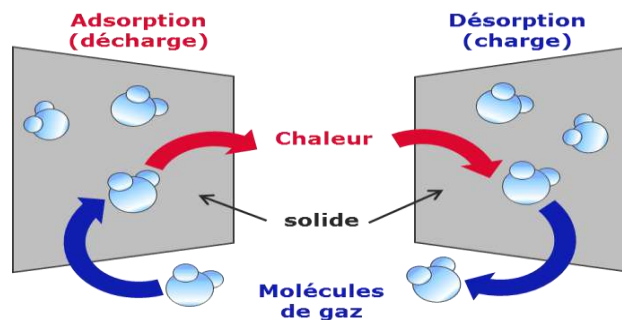


Figure II-2 : Phénomène d'adsorption[36].

Lorsque l'adsorbat se lie à l'adsorbant au cours de l'étape d'adsorption, ce processus exothermique libère de la chaleur qui peut être utilisée pour diverses applications, telles que le chauffage d'espace [37].

2.5.1 Matériaux d'Adsorption :

Les adsorbants utilisés dans le cadre du stockage thermochimique et de sorption peuvent être de natures différentes : solides dans le cas des matériaux poreux (tels que les charbons actifs ou fibres de charbons actifs, les gels de silice ou les zéolithes), de sels impliqués dans une réaction chimique (tels que les chlorures métalliques, les oxydes métalliques, les sulfates etc...), de composites (sels dans une matrice poreuse solide tels que les composites gels de silice et CaCl_2 , les composites de zéolithe et de MgSO_4 etc...). Parmi les sorbats présentés, les physiciens montrent que l'eau apparaît comme présentant le meilleur compromis pour une application bâtiment (toxicité nulle, ressource abondante et pas chère, chaleur latente

d'évaporation significative, pollution environnementale nulle, caractère corrosif contrôlable, conditions de vaporisation (pression, température) réalisables avec des systèmes classiques, etc..). Dès lors, les sorbants présentant le plus d'affinité avec l'eau parmi ceux étudiés tels que le gel de silice, les zéolithes et leurs composites, le CaCl_2 , le MgCl_2 , et le MgSO_4 apparaissent comme plus appropriés pour ces applications [23, 38, 39].

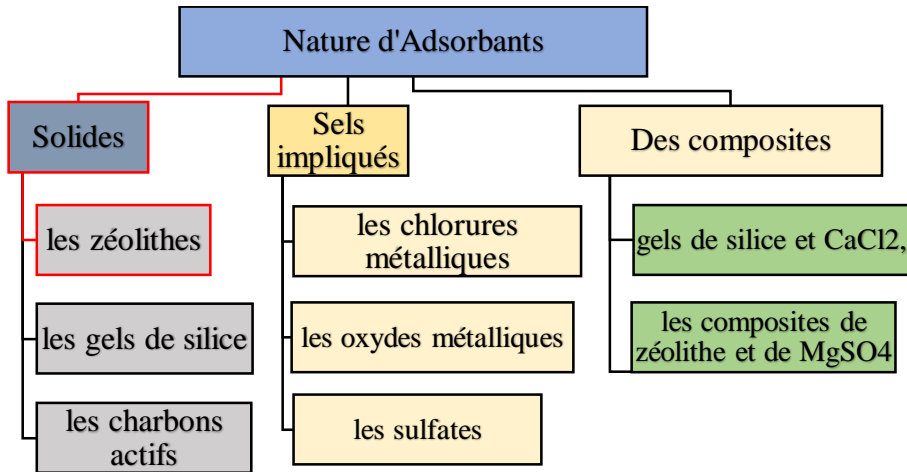


Figure II-3 : Classification d'adsorbent suivant son nature [23].

La sorption comme un phénomène de surface s'opérant à l'interface de 2 phases (solide/liquide et gaz) et impliquant des forces d'électrostatiques de cohésion, telles que les forces de Van der Waals et liaisons hydrogène. Dès lors, en tant que phénomène de surface, la capacité de sorption d'un matériau est directement liée à la surface spécifique de ses pores qui permet d'obtenir la superficie réelle de la surface du matériau sur sa masse (m^2/g). De ce fait, les principaux matériaux adsorbants sont des matériaux poreux à grande surface spécifique tels que les gels de silice, les alumino-phosphates, les silicophosphates et les zéolithes. Du fait de leur structure poreuse, ces adsorbants peuvent être classés suivant la taille des pores de leur matrice [36].

On distingue ainsi les composés microporeux, mésoporeux et macroporeux comme la suite :

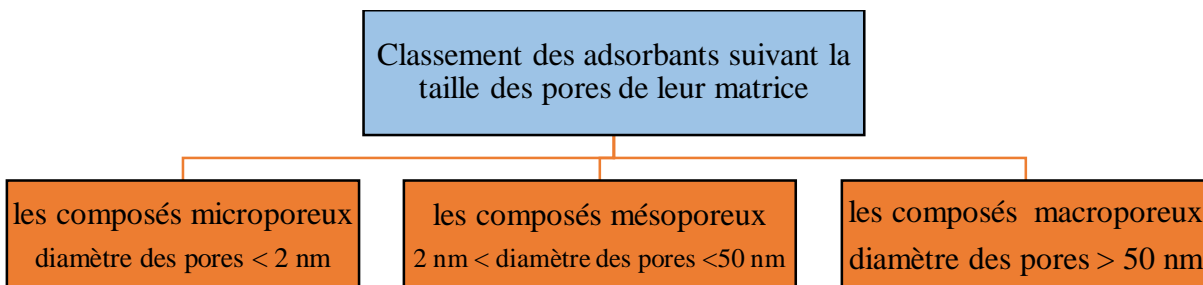


Figure II-4 : Classement de las adsorbants suivant la taille des pores de leur matrice [36].

2.5.2 Choix de l'adsorbant/l'adsorbat :

2.5.2.1 Choix de l'adsorbant :

Le choix de l'adsorbant pour le procédé de stockage de chaleur va dépendre aussi de la performance, la capacité d'adsorption, la cinétique et l'affinité entre adsorbat et adsorbant.

La performance est contrôlée par les propriétés de surface, la porosité, la taille et la forme des grains (la poudre, les cristaux, les billes ou les pastilles) [40, 41].

Parmi les sorbants solides, les matériaux tels que les gels de silice, les alumino-phosphates, les silico-phosphates et les zéolithes présentent une structure polarisée favorisant leur pouvoir de captation de molécules gazeuses polaires telles que la vapeur d'eau, faisant ainsi d'eux des composés particulièrement hydrophiles , Le Tableau présente les principales propriétés de ces matériaux poreux [23, 39-41].

Chapitre II : Système de stockage de chaleur par Adsorption

Tableau II-1: Caractéristiques thermochimiques de quelques adsorbants poreux [23].

Matériaux	Famille	Caractéristiques	Capacité maximale de sorption (g/g*) et densité énergétique de stockage	
Silicates mésoporeux	Gels de silice	-Taille des pores : 2 nm (molécules à densité moyenne) ; 15-20 nm (molécules à faible densité) -Porosité moléculaire : 0.3-0.4 -Volume massique moyen : 1.0-1.5 cm ³ /g -Surface spécifique : 300 à 700 m ² /g -faible coût	- 0.40 : gel de silice de type A - 2.2 nm pore size - 0.45 : gel de silice de type RD, 2.2 pore size	
			- 120 kWh/m³ de gel de silice (projet HYDES) -Charge : 88 °C -décharge : 42°C - 2.87 kW de puissance	
			- 50 kWh/m³ de gel de silice (projet MODESTORE) -Charge : 88 °C -décharge : 42°C - 1 kW de puissance	
	Aérogel s de silice	-Avantages : large surface spécifique et volume de pore -inconvénients: instabilité moléculaire à l'humidité, faible stabilité mécanique, faible densité	- 1.35 : (100% SiO ₂) - 1.25 : (100% AlO ₂) - 1.15 : 70% SiO ₂ à 30% Al ₂ O ₃	
	MCMs, MOFs, SBA	-Avantages : pores uniformes, homogénéité moléculaire, large surface de pores et de volume -inconvénients: forme cylindrique ou hexagonale des pores	MCMs-48	- 0.83 : 2.8 nm de diamètre de pore, 983 m ² /g de surface spécifique
			KIT-1	- 0.81 : 2.9 nm de diamètre de pore, 923 m ² /g de surface spécifique
SBA-1			- 0.44 : 2.1 nm de diamètre de pore, 940 m ² /g de surface spécifique - 0.84 : 5.0 nm de diamètre de pore, 645 m ² /g de surface spécifique	
Zéolithes	-Avantages : molécules poreuse la plus synthétisée (200 types connus), forte affinité à l'eau quand la valeur du ratio Si/Al est proche de 1 -inconvénient : température de charge élevée lorsque la valeur du ratio Si/Al proche de 1	- 0.20–0.45		
		- 160 kWh/m³ de zéolithe (type A) (ITW, projet MONOSORP) -Charge : 180°C -décharge : 35°C ; 1 - 1,5 kW de puissance		
		- 124 kWh/m³ de zéolithe (type 13X) (ZAE) -Charge : 130°C ; 135 kW de puissance -décharge : 65°C		
		• 140 - 220 kWh/m³ de zéolithe (type 13X) (TNO) • Charge : 180°C • décharge : 50 – 60 °C		
Aluminophosphates métalliques	• Taille uniforme de pores sur la gamme de diamètres 0.3 - 0.8 nm • affinité modérée à l'eau	- 0.35 : VPI-5 - 0.55 : SAPO-37 - 0.14 : VAPO-5 - 0.32-0.36 : GeAPO-5, MnAPO-5 - 0.46 : SAPO-5 - 0.46 : SAPO-40		

* : mesures faites à 25°C

MCM-x : structure cristalline type x du « Mobil Crystalline Materials », SBA-x : structure cristalline type x du « Santa Barbara Amorphous », MOF : structure cristalline type « Metal Organic Framework », KIT-x : structure cristalline type x du « Korean Institute of Technology », SAPO : « Silica AluminoPhosphates », VAPO : « Vanadium substituted AluminoPhosphates », VPI- x : structure cristalline type x du « Virginia Polytechnic Institute », GeAPO : « Germanium substituted AluminoPhosphates », MnAPO : « Manganese substituted AluminoPhosphates »

2.5.2.1.1 Gels de silice :

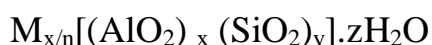
Comme le montre le Tableau II-1, les gels de silice constituent des matériaux largement étudiés et utilisés en raison de leur forte affinité à la vapeur d'eau, leur grande capacité de sorption, leur coût acceptable et leur régénération facile (température de désorption peu élevée). De formule chimique $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, ce sont des polymères d'acide silicique $\text{Si}(\text{OH})_4$ synthétisés par précipitation de silicate de sodium sur un acide minéral (acide sulfurique ou acide chlorhydrique). La diversité de taille de leurs pores (2 nm-20 nm), leur grande surface spécifique (de l'ordre de $650 \text{ m}^2/\text{g}$) et le caractère polaire de leur surface en font des molécules particulièrement affines de composés polaires tels la vapeur d'eau et les alcools comme le montre la Figure. Ce qui justifie leur utilisation comme tamis moléculaires, agent dessiccateur, séparateur de composés aromatiques, etc...[33, 42].



Figure II-5: Gels de silice schématisés, en vrac et conditionnés en sachets a) pour le schéma chimique et b) pour l'emballage en sachets [36].

2.5.2.1.2 Zéolithes :

En raison du caractère polaire de leur structure moléculaire, les zéolithes sont des adsorbants poreux à fort caractère hydrophile utilisés généralement comme desséchants ou comme filtres moléculaires dans l'industrie. Ce sont des composés microporeux, naturels ou synthétiques appartenant à la famille des aluminosilicates cristallins et de formule chimique :



Où x et y sont des entiers naturels, n est la valence du cation, M et z sont le nombre de molécules d'eau dans chaque molécule. Le cation M est un alcalin ou un alcalino-terreux, tel que le sodium, le potassium ou le calcium. Ce dernier joue le rôle de compensateur de charge pour la molécule[43].

Le rapport y/x , qui est supérieur ou égal à 1, a une influence sur le comportement « absorbant » de la zéolithe : une valeur proche de 1 donnera lieu à une forte affinité pour des

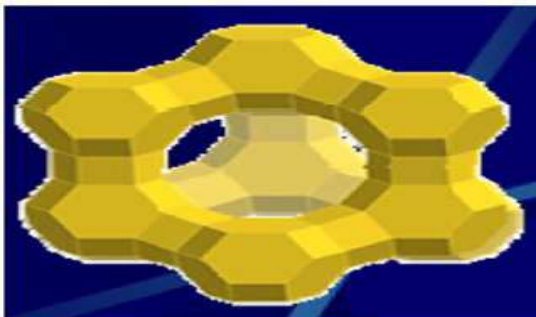
Chapitre II : Système de stockage de chaleur par Adsorption

molécules polaires telles que l'eau et les alcools, tandis qu'avec une valeur élevée du rapport le comportement du matériau s'approchera de celui d'une silice microporeuse ayant une absorptivité préférentielle pour les composés organiques. On recense près 40 types de zéolithes naturels pour près de 200 synthétisés industriellement [28, 36, 42, 43].

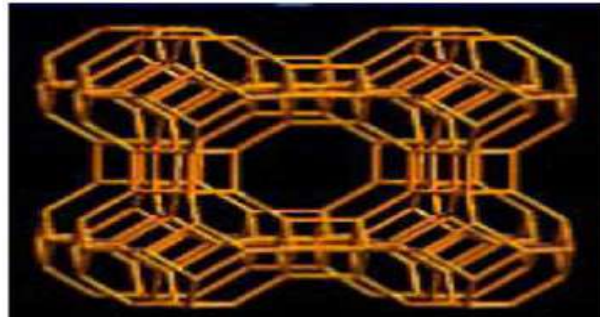
La structure moléculaire des zéolithes est constituée d'une chaîne de tétraèdres des atomes d'oxygène, au centre desquels se trouvent des ions Al_3^+ et Si_4^+ . Les tétraèdres SiO_4^- et AlO_4^- sont liés entre eux par un échange d'ions oxygène et voient leurs charges électrostatiques compensées par des cations compensateurs de charge (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Li^+ , ...).

La nature de ces derniers et leur emplacement au sein de la molécule détermine la famille de la zéolithe. On distingue ainsi 3 familles de zéolithes désignés sous les dénominations A, X, et Y, et donc les caractéristiques et la structure sont présentées par le Tableau II-2 et la Figure II-6. On peut y voir que la structure de base commune à chacune des familles est un octaèdre tronqué, appelé cage sodalite, ou cage bêta [43].

Tableau II-2 : Caractéristiques des zéolithes de type A, X et Y [23].					
Famille de zéolithe	Structure	Ratio Si/Al (y/x)	Type de zéolithe (exemples)	Cation compensatoire	Diamètre des pores (nm)
A	sodalité	1	type 3A	K^+	0.3
			type 4A	Na^+	0.4
X	faujasite	1 à 1.5	type 13X	Na^+ majoritaire	1.0
Y	faujasite	1.3 - 3	type Y	Na^+ , K^+ , Ca^{2+}	0.7
		> 3	Type USY (Ultra Stable Y)	Na^+ , K^+ , Ca^{2+}	1.4



Zéolites X et Y



Zéolite A

Figure II-6: Unité structurale des zéolithes de types A, X et Y [36].

Le diamètre des pores de zéolithes peut être contrôlé sur la plage 0.3 nm - 1.4 nm par fixations du nombre de cations compensateurs. Ce qui procure au matériau de zéolithe une grande sélectivité d'adsorption. La Figure I.5 montre que les pores de zéolithe de type A sont formés par des anneaux de 8 ions oxygène (anneau rouge), tandis que ceux des zéolithes X et Y sont formés par des anneaux de 12 ions oxygène (anneau bleu), ce qui en fait la famille de 14 zéolithe à plus grande taille de pores. Parmi les zéolithes synthétiques, les zéolithes de type X et Y possèdent les plus grandes porosités. Toutefois, avec un rapport (y/x) plus faible, les zéolithes de type X disposent de températures de désorption plus faibles par comparaison aux zéolithes de type Y. Au sein de la famille de type X, la nature du cation majoritaire détermine l'appellation de la zéolithe. Ainsi, une majorité d'ions calcium Ca^+ caractérise la zéolithe 10X, tandis que la zéolithe 13X est définie par une majorité d'ions sodium Na^+ [28, 33, 36, 42].

2.5.2.1.3 SAPO et Aérogels de silice :

D'autres adsorbants sont également composés de silice comme le SAPO ainsi que les aérogels de silice. Le SAPO est un aluminophosphate microporeux modifié par incorporation de silice. Il possède des propriétés d'adsorption intéressantes. Plusieurs catégories d'aérogels ont également été synthétisés. A ce jour, il existe : les aérogels d'oxyde simple qui sont les plus communs, les aérogels d'oxyde mixte ou d'ordre supérieur, les aérogels organiques, les aérogels hybrides organique/minéraux ou à base de métalloïdes, les aérogels dopés, essentiellement par des atomes métalliques, les aérogels densifiés et les composites. Tous proviennent d'un même procédé de fabrication mais ont des propriétés physiques différentes. Les aérogels de silice font partie des aérogels d'oxyde. Ils ont une grande surface spécifique et un volume de pore important mais leur stabilité mécanique et leur masse volumique sont faibles [33, 36].

2.5.2.1.4 Autres adsorbants (MOFs, MCMs, Alumine activée) :

Les MOFs (Metal-Organic Framework) constituent une nouvelle classe de matériaux microporeux avec une structure cristalline (configuration, taille des pores, surface spécifique) et des performances, en termes de capacité de sorption, comparables à celles des zéolithes et gels de silice [28].

Les MCMs (Mobil Crystalline Matériels) sont une famille de silicates mésoporeux amorphes et synthétisés, lors de la formation de gels de silice, par ajout de surfactants tels que des ammoniums quaternaires. Ces derniers ont une influence sur la structure poreuse des molécules obtenues avec des pores pouvant varier de 2 à 10 nm suivant la nature du surfactant [28].

Cependant, le coût prohibitif de la synthétisation de ces matériaux les rend inenvisageable pour une utilisation à grande échelle [28].

Les alumines activées, obtenues par déshydratation thermique du tri hydrate d'alumine. Très hydrophiles, elles sont couramment utilisées pour le séchage et comme agents dessiccateurs de substances organiques polaires. Très peu de systèmes de stockage thermique utilisent l'adsorption sur les alumines activées. Cependant, son emploi est à l'essai dans des composites alumine/sel hygroscopique [22].

2.5.2.2 Adsorbats :

2.5.2.2.1 Adsorbat :

Les adsorbats sont des matériaux qui ont des molécules de petite taille. Les trois adsorbats les plus utilisés sont le méthanol, l'eau et l'ammoniac. Les caractéristiques les plus importantes des adsorbats sont : la chaleur latente, le volume spécifique, la pression de saturation, la stabilité avec l'adsorbant utilisée et l'impact sur l'environnement. L'identification et le choix de ce dernier sont basés sur trois critères (technique, écologique et économique) [44] :

2.5.2.2.2 Échelle technique :

Le choix de l'adsorbat est dicté par un ensemble des contraintes techniques (pression, propriétés thermodynamiques et sécurité) suivantes [44, 45] :

- Posséder une grande chaleur latente d'évaporation.
- Avoir une faible viscosité.
- Avoir une grande conductivité thermique.
- Être constitué de petites molécules facilement adsorbables.
- Avoir une chaleur spécifique la moins élevée possible.
- Avoir la composition chimique stable dans les conditions de fonctionnement de la machine.
- Être compatible avec le matériau de construction de la machine.
- N'ayant pas d'effet sur les denrées à conserver dans le cas de la congélation et la réfrigération. Être sans toxicité.
- Être ininflammable et non explosif en mélange avec l'air.

2.5.2.2.3 Échelle écologique :

L'utilisation et la fabrication des adsorbats doivent être réalisées sans aucun effet négatif sur l'environnement. À titre d'exemple : l'utilisation des CFCs (Les chlorofluorocarbures ou CFC sont une sous-classe de gaz fluorés) est interdite. Des HCFCs (Les hydrochlorofluorocarbures sont des gaz organiques dont la molécule est formée d'atomes de chlore) et des HFCs (Les hydrofluorocarbures sont des halogénoalcanes gazeux de la famille des fluorocarbures) sont soumis à une réglementation de plus en plus sévère du fait de leur contribution à l'effet de serre. D'autres recherches s'orientent vers le développement de nouveaux fluides frigorigènes possédant une efficacité énergétique intéressante tout en restant neutres vis-à-vis de l'environnement [44, 45].

2.5.2.2.4 Échelle économique :

Selon l'offre et la demande, il convient de dire que l'adsorbat a un coût raisonnable du fait de sa disponibilité à l'échelle industrielle. Les différents critères et propriétés cités ci-dessus sont techniquement contradictoires, car l'amélioration d'une caractéristique entraîne souvent la détérioration d'une autre. Jusqu'à maintenant, l'adsorbat qui réunit toutes ces conditions n'existe pas pratiquement. Néanmoins, il y a des adsorbats qui satisfont à un nombre élevé de ces conditions et ce en fonction des besoins spécifiques en froid. Parmi eux nous citons : l'eau, l'ammoniac et le méthanol. On présente ci-dessous quelques caractéristiques de ces adsorbats [44, 45] :

Eau (H₂O) :

Est un frigorigène parfaitement sûr pour l'homme, disponible, a des bonnes propriétés thermiques et sa pression de fonctionnement est faible (20 mbar-80 mbar). Sa gamme de température de production de froid est réduite (0 °C, 10 °C), qui ne peut pas être utilisée dans des applications de congélation. Mais elle est bien adaptée pour la climatisation. Toutefois, l'eau reste un fluide « idéal » d'un point de vue toxicité et environnement [44].

Ammoniac (NH₃) :

Ce fluide frigorigène présente une chaleur latente d'évaporation et une conductivité thermique élevées, sa pression de fonctionnement est élevée (0.5 bar - 5 bar) supérieure à la pression atmosphérique, ce qui peut être retenu comme avantage. La gamme de température de production de froid est importante (-50 °C, 10 °C). Cependant, il est très dangereux, formant avec l'air un mélange explosif et peut former une certaine réaction chimique avec les matériaux de construction de la machine tel que le cuivre. Donc, il nécessite pour son emploi l'utilisation des matériaux résistants comme l'acier inoxydable [44, 46].

Méthanol (CH₃OH) :

Est un frigorigène agréable, il possède les propriétés suivantes :

- La gamme de température de production de froid est de 15 °C à 10 °C. Sa chaleur latente d'évaporation est haute et égale presque à la moitié de celle de l'eau.
- Ses molécules sont petites (4 Å) et pouvant être facilement adsorbées dans les micropores de diamètre plus petit que 20 Å.
- Son point d'ébullition (~ 65 °C à pression 1atm) est beaucoup plus haut que la température ambiante. Cependant, il a quelques inconvénients tels que :
- Sa décomposition à des températures supérieures à 150°C, ce qui impose une prise de précautions pour son utilisation dans des applications solaires.
- Sa pression de son fonctionnement est faible (5 mbar -100 mbar) et est inférieure à la pression atmosphérique, ce qui nécessite des équipements spéciaux pour éviter les fuites.
- Son niveau de toxicité est élevé et sa forte odeur.
- Son inflammabilité. Il brûle dans l'air en formant du dioxyde de carbone et de l'eau.

Parmi les réfrigérants, neutre pour l'environnement, utilisés dans les systèmes frigorifiques à adsorption on peut citer l'eau, le méthanol et l'ammoniac [44, 46].

2.5.2.3 Couples adsorbant/adsorbat :

Le choix du couple utilisé est primordial pour le système de réfrigération. Les pompes à chaleur à adsorption utilisent le plus communément les couples : Méthanol/Charbon actif, Ammoniac/Charbon actif, Eau/Zéolite et Eau/Gel de silice. Les critères de sélection sont les suivants :

Critères pour l'adsorbat [45] :

- Forte chaleur de vaporisation.
- Respectueux de l'environnement.
- Non corrosif et non toxique.
- Bonnes propriétés thermochimiques aux conditions de fonctionnement (pression, température, point triple...).

Critères pour l'adsorbant [32] :

- Importante capacité d'adsorption.
- Forte sensibilité de la capacité d'adsorption en fonction de la variation de température.
- Forte conductivité thermique.
- Coût d'achat faible.
- Stabilité thermique.

2.5.2.3.1 Couples

Méthanol / Charbon actif :

Le couple Méthanol / Charbon actif est fréquemment employé en raison d'une forte capacité d'adsorption et d'une faible chaleur d'adsorption bénéfique au COP. La faible température de désorption d'environ 100°C permet d'exploiter une source d'énergie alternative comme l'énergie solaire [44].

Néanmoins, ce fluide est hautement toxique, et la pression de fonctionnement est inférieure à la pression atmosphérique. Le système devra alors être résistant à la dépression afin d'assurer l'étanchéité du circuit. En effet, la présence d'incondensable détériorerait les performances de la machine. Pour finir, le choix de la source chaude est limité à une température d'utilisation de 120°C en raison du risque de dégradation du méthanol pour des températures supérieures [44, 46].

Ammoniac / Charbon actif :

Le couple Ammoniac / Charbon actif présente l'avantage de fonctionner à des pressions élevées, au-dessus de la pression atmosphérique. Pour une température de condensation à 40°C, la pression est alors de 15.54 bar, il n'y a donc pas de risque d'introduction d'air. De plus, la haute pression de fonctionnement améliore le transfert de masse et réduit les temps de cycle, car la masse volumique est élevée et la différence de pression importante entre les adsorbants. La puissance frigorifique spécifique est alors meilleure [44, 46].

L'inconvénient de l'utilisation de l'ammoniac est sa forte toxicité et son incompatibilité avec les alliages cuivreux. L'amélioration de l'étanchéité des machines tend à faciliter son développement. Pour finir, ce couple présente une capacité d'adsorption moindre que le méthanol d'environ 36% [47].

Chapitre II : Système de stockage de chaleur par Adsorption

Eau / Zéolite :

Le couple eau / zéolite présente l'avantage d'utiliser l'eau comme réfrigérant, élément qui possède la meilleure chaleur de vaporisation (65% supérieur à l'ammoniac). Un autre avantage de ce couple est de pouvoir utiliser une source de chaleur à haute température. C'est d'ailleurs à partir d'une température de source chaude supérieure à 200°C que le COP et la PFS deviennent compétitifs au couple Méthanol/charbon actif. Ce couple est uniquement utilisé pour des applications de climatisation car le point triple de l'eau se situe à 0°C [46-48].

En raison de sa forte chaleur d'adsorption et de sa faible pression de fonctionnement, le transfert de masse est médiocre, et les temps de cycles sont plus longs qu'avec les autres couples [47, 48].

Eau / Gel de silice :

Ce couple est très intéressant pour récupérer l'énergie solaire à faible température car la température de désorption peut être très basse, de l'ordre de 50°C [46].

Toutefois, la capacité d'adsorption est faible pour ce couple, et la température de désorption doit être inférieure à 120°C [47-49].

2.5.3 Classification des systèmes de stockage par adsorption :

Parmi les systèmes de stockage de chaleur par sorption, deux types de fonctionnements sont possibles : le système fermé et le système ouvert.

Système ouvert :

Dans un système ouvert en phase de décharge, le matériau de stockage adsorbe la vapeur d'eau contenue dans l'air humide et libère la chaleur d'adsorption. La vapeur d'eau est libérée pendant la phase de désorption, qui s'accompagne d'une production de chaleur s'il y a condensation. L'eau est directement libérée dans l'environnement d'où l'appellation de système ouvert [33, 36].

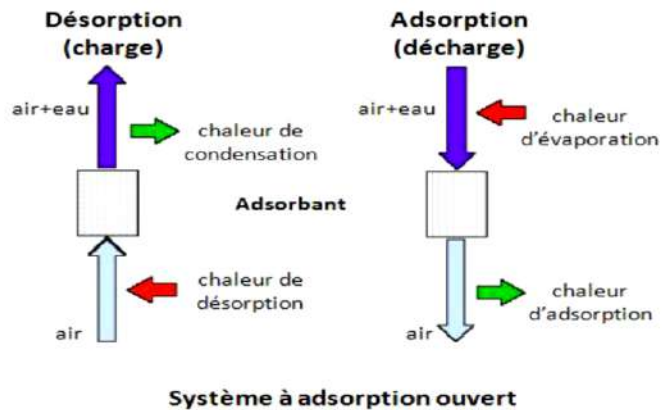


Figure II-7 : Schéma système de stockage ouvert par adsorption[50].

Système fermé :

Contrairement aux systèmes ouverts, les systèmes fermés ne mettent en jeu aucun échange de matière avec l'environnement. En mode de décharge, un système fermé se comporte comme une pompe à chaleur, c'est-à-dire que la chaleur utile produite provient à la fois du milieu de stockage et de l'air ambiant ou d'une source de chaleur auxiliaire. Les échanges de matières y sont plus aisés à contrôler [22, 36].

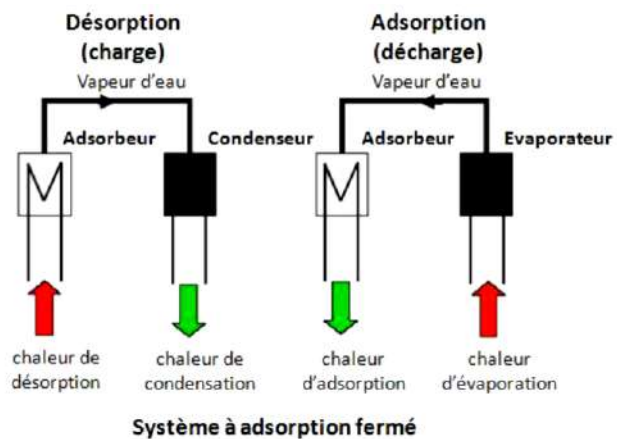


Figure II-8 : Schéma système de stockage fermé par adsorption [36].

2.5.4 Avantages du Systèmes de stockage par adsorption :

Les systèmes à adsorption présentent comme avantages principaux :

- L'absence de compression mécanique donc la limitation des vibrations et du bruit.
- La possibilité d'utiliser une énergie calorifique disponible et d'éviter ainsi la consommation électrique du compresseur.
- La parfaite autonomie.
- Le procédé classique des systèmes à adsorption opère avec un seul adsorbent, il présente donc l'avantage d'être simple technologiquement, lui conférant des qualités de simplicité d'entretien et de fiabilité dans le temps.
- L'intermittence du cycle de base associé à ces systèmes représente une caractéristique utile dans les applications solaires où l'énergie n'est disponible que de manière discontinue. Ces systèmes sont donc adaptés à cette énergie [36].

3 CHAPITRE III :

Description du système

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter le modèle mathématique qui se base sur les différentes équations nécessaires pour calculer les efficacités pour un système ouvert à adsorption.

3.2 Description de fonctionnement du système :

L'analyse énergétique est effectuée sur des TES (Stockage d'énergie thermique) thermochimiques ouverts généraux. Le système ouvert comprend un fluide de travail et un matériau thermochimique dans lequel les substances internes sont séparées du fluide caloporteur. L'énergie thermique provenant d'une ressource énergétique, qui fournit l'énergie nécessaire à la dissociation du matériau thermochimique, est transférée dans un fluide de travail [34].

Après une période de stockage, il se produit une période de décharge au cours de laquelle l'énergie libérée par la synthèse du matériau thermochimique est absorbée par le fluide de travail à des fins de chauffage [33].

Les analyses supposent que les réactions chimiques dans le réacteur se produisent à pression constante et que l'énergie cinétique et potentielle, les interactions de travail et le travail de la pompe, du compresseur et du ventilateur peuvent être négligés. On suppose en outre que la température initiale du matériau thermochimique lors du chargement est celle de l'environnement de référence T_0 , les matériaux thermochimiques sont stockés à l'énergie de température de l'environnement de référence. Selon les hypothèses retenues pour le processus de stockage, l'efficacité énergétique du stockage est égale à l'unité pour un système fermé.

3.2.1 Cas de chargement :

Un processus général de chargement (désorption) pour un TES par adsorption ouvert est illustré à la figure III-1. Un courant d'air chaud, chauffé par une source de chaleur à haute température, traverse le stockage, désorbe l'eau de l'adsorbant (matériau thermochimique) et le sèche, et sort du lit tassé une température plus basse et une humidité plus élevée. Le processus est endothermique et l'apport net d'énergie au lit à garnissage Q_{in} est fourni par l'air d'entrée [33].

Analyse énergétique :

Un bilan énergétique pour le processus de charge pour les TES thermochimiques ouverts, tenant compte de l'apport de chaleur net et de l'accumulation d'énergie dans le matériau de stockage, ainsi que de la perte de chaleur Q_1 , peut être écrit comme suit [51]:

$$\text{Énergie absorbée nette} = \text{perte de chaleur} - \text{énergie d'accumulation dans TES} \quad (\text{III} - 1)$$

Un bilan énergétique pour les systèmes ouverts peut être écrit comme [51]:

$$Q_{in} - Q_1 = Q_{utile} \quad (\text{III} - 2)$$

$$Q_{in} = m_c C_p (T_1 - T_2) \quad (\text{III} - 3)$$

Où m_c et C_p sont la masse et la chaleur spécifique à pression constante du fluide de travail, T_2 et T_1 sont les températures finale et initiale du fluide de travail et ΔH_c est le changement d'enthalpie de la réaction [51].

L'efficacité énergétique de charge peut être exprimée pour le système en tant que [51]:

$$\eta_c = \frac{\text{énergie de sortie utile}}{\text{énergie d'entrée}} = \frac{\Delta H_c}{Q_{in}} \quad (\text{III} - 3)$$

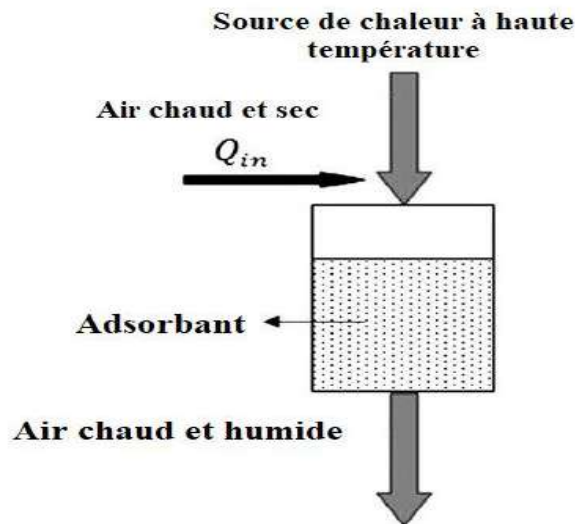


Figure III-1 : Processus de chargement pour un système ouvert d'adsorption [33].

3.2.2 Cas de déchargement :

Dans un processus de décharge (adsorption) pour un TES par adsorption ouvert (figure III-2), l'air intérieur préalablement humidifié et froid pénètre dans le lit garni désorbé. Ensuite, l'adsorbant adsorbe la vapeur d'eau du flux d'air et libère la chaleur d'adsorption Q_{rec} [33].

Analyse énergétique

On peut écrire un bilan énergétique pour décharger pour un TES comme :

$$- (\text{énergie récupérée} - \text{perte de chaleur}) = \text{énergie d'accumulation} \quad (\text{III} - 4)$$

Pour un TES thermochimique ouvert, l'énergie récupérée par le fluide de travail et le rendement énergétique de décharge sont respectivement :

$$Q_{rec} = m_d C_p (T_4 - T_3) \quad (\text{III} - 5)$$

Où m_d et C_p sont la masse et la chaleur spécifique à pression constante du fluide de travail, T_4 et T_3 sont les températures finale et initiale du fluide de travail et ΔH_d est le changement d'enthalpie de la réaction ($\Delta H_c = \Delta H_d$) [51].

Pour un système ouvert, l'énergie récupérée est gagnée par le flux d'air et l'efficacité énergétique peut être écrite ainsi [51] :

$$\eta_d = \frac{Q_{rec}}{\Delta H_d} \quad (\text{III} - 6)$$

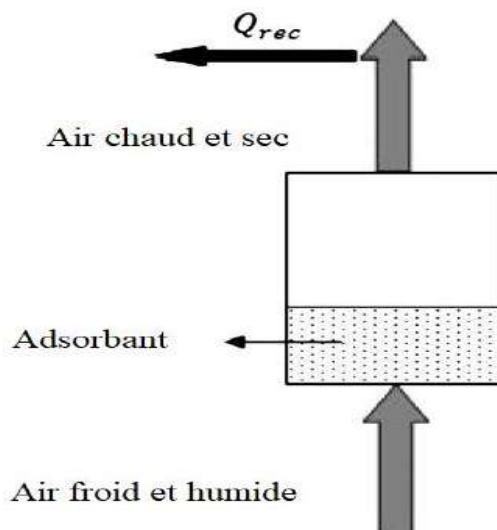


Figure III-2 : Processus de décharge (a) pour thermochimique, (b) pour adsorption [33].

3.2.3 Conclusion :

Les équations présentées dans ce chapitre représentent notre modèle mathématique qui va être transféré en modèle numérique à l'aide de l'outil MS Excel afin de calculer les efficacités du système de stockage par adsorption. Les résultats obtenus seront traités dans le chapitre 4.

4

Chapitre IV :

Résultats et Discussions

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va valider les formules des efficacités du stockage par adsorption qu'on a déclaré au chapitre III avec le couple zéolithe/eau en cas d'application sur un bâtiment, et on va faire une vérification du cas de stockage saisonnier.

Ce calcul est fait par MF Excel. Il a permis de mettre en relation l'influence des différents paramètres sur les quantités de chargement et déchargement ainsi que les débits et les temps du cas concerné.

4.2 Les données :

Pour illustrer l'analyse d'un système TES thermochimique ouvert pour notre cas d'étude, nous considérons un système existant pour lequel des données expérimentales ont été rapportées. Nous considérons ici un système de stockage thermochimique à sorption ouverte utilisé dans l'école de Munich en Allemagne depuis 1996. Ce système est connecté au système de chauffage urbain de Munich et chauffe un bâtiment d'école en hiver et refroidit un club de jazz en été. Le bâtiment de l'école et le club de jazz sont également connectés au système de chauffage urbain. Le système de stockage est connecté à un système de chauffage combiné air, radiateur et plancher [52]. Les hypothèses suivantes sont formulées dans cette enquête [51] :

- La capacité de stockage maximale est utilisable dans le processus de la charge.
- La zéolite 13X a pour formule $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Elle a une absorption maximale d'eau pendant le chargement et les hydrates de zéolite 13X séchés contiennent le nombre maximal de molécules d'eau.
- Le débit volumétrique maximal de l'air se produit pendant le chargement et le déchargement.
- Au cours de l'adsorption et de la désorption, les variations d'énergie sont égales en magnitude.
- Les propriétés de l'air sec sont considérées pour l'air en tant que fluide de travail.

4.2.1 Cas de charge :

Le stockage par adsorption est facturé lorsque l'énergie du système de chauffage urbain est disponible en heures de travail. La charge est effectuée pendant 7 heures par jour (9 :30 a.m. à 4 :30 p.m.). Le processus de charge est illustré à la figure III-1. Le système de chauffage solaire chauffe de 33 à température moyenne de 50 °C. Pendant la journée, la zéolite est chargée en utilisant l'air. Dans ces conditions, la zéolite est séchée et la chaleur dégagée par le processus de charge à une température de 15 °C au bâtiment comme on voit au figure IV-1. Dans le

Chapitre IV : Résultats et Discussion

processus de charge, l'énergie de sortie utile est égale à la capacité de stockage du processus de charge, qui est de 538.5 kWh (ou 1938461.5 kJ) à 50 °C [23, 51].

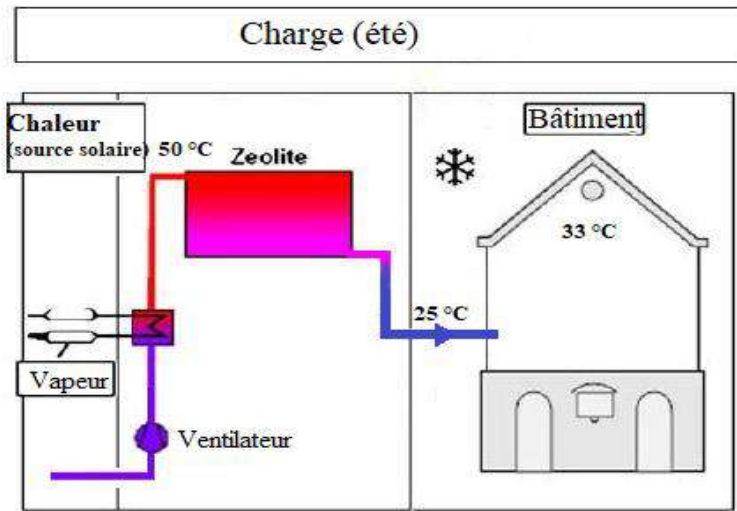


Figure IV-1 : Le processus de charge [33]

Les données pour les calculs :

- Les températures sont $T_1 = 50\text{ °C}$ et $T_2 = 25\text{ °C}$.
- Le débit volumique d'air est $Q_v = 130\text{ m}^3/\text{h}$.
- La masse volumique est $\rho = 0.99\text{ kg/m}^3$, et la chaleur spécifique $C_p = 1.009\text{ kJ/kg.k}$ (à la température moyenne d'entrée et de sortie).
- La masse totale échangée pour le cas de chargement en 3 mois (90 jours) par 7 heures par jours est calculée par :

$$m_c = \rho * Q_v * t = 81081\text{ kg} \quad (\text{IV} - 1)$$

Où m_c : masse totale de chargement, ρ : masse volumique, Q_v : débit volumique, t est le temps de chargement.

- La valeur de la capacité de stockage est 1938461.5 kJ.

Application numérique :

Pour calculer l'efficacité de charge de ce système on applique l'équation III – 3 comme la suite :

$$\eta_c = \frac{\Delta H_c}{Q_{in}} = \frac{1938461.5}{81081 * 1.009 * (323 - 298)} = 0.95$$

4.2.2 Cas de décharge

La mémoire thermo-chimique est déchargée pendant la journée (la période de pointe). Le processus de décharge est illustré à la figure IV-2. L'air est chauffé à 20 °C et saturé de vapeur d'eau par un humidificateur.

Ensuite, l'air saturé est insufflé à travers le stockage de la zéolite séchée. La température de l'air s'élève à 60 °C. La décharge se produit au tous les nuits jours d'hiver pendant 10 heures (7 p.m à 5 a.m par jour) que permet un échauffement du bâtiment comme on vu sur la figure IV-2.

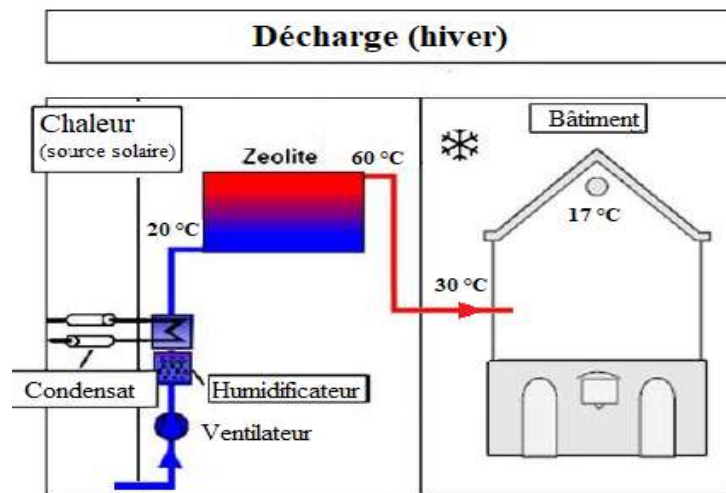


Figure IV-2 : Le processus de décharge [33].

Les données pour les calculs :

- Les températures sont $T_1 = 17\text{ °C}$ et $T_2 = 30\text{ °C}$.
- Le débit volumique d'air est $Q_v = 130\text{ m}^3/\text{h}$.
- La masse volumique est $\rho = 1.106\text{ kg/m}^3$, et la chaleur spécifique $C_p = 1.006\text{ kJ/kg.k}$ (à la température moyenne d'entrée et de sortie).
- La masse totale échangée pour le cas de chargement en 3 mois (90 jours) par 10 heures par jours est calculée par :

$$m_d = \rho * Q_v * t = 129402\text{ kg} \quad (\text{IV} - 2)$$

Où m_c : masse totale de chargement, ρ : masse volumique, Q_v : débit volumique, t est le temps de chargement.

- La valeur de la capacité de stockage est 1938461.5 kJ.

Application numérique :

Pour calculer l'efficacité de charge de ce système on applique l'équation III – 6 comme la suite :

$$\eta_d = \frac{Q_{rec}}{\Delta H_d} = \frac{129402 * 1.006 * (303 - 290)}{1938461.5} = 0.88$$

4.3 La discussion du résultat :

Après la validation sur MF Excel les équations des efficacités dans les cas de charge et de décharge avec nos données, nous trouvons que les efficacités sont 0.95 et 0.88 pour les cas de charge et décharge respectivement.

Les quantités de chaleur totale de chargement et de déchargement sont (2.05 et 1.7 GJ) respectivement et sont équivalent du (569 et 472 kWh) pour la charge et décharge respectivement.

Les efficacités du système ouvert assurent un bon fonctionnement du système sur long temps du stockage où pour le cas d'utilisation saisonnier.

4.3.1 Variation des quantités et des efficacités de charge et décharge en fonction de temps :

Il ya plusieurs facteurs affectent directement sur les efficacités et les quantités des chaleurs de charge et décharge, tel que le temps qu'est représenté sur les formules (IV-1) et (IV-2).

C'est dessiné on a des tableaux qui représentent le changement de quantités de chaleur en fonction de temps sur le tableau (IV-1), et les efficacités sur le tableau (IV-2).

Temps de charge (h)	Temps de décharge (h)	Quantités de charge (GJ)	Quantités de décharge (GJ)
90	360	0,29218118	0,67894641
180	450	0,58436235	0,84868302
270	540	0,87654353	1,01841962
360	630	1,1687247	1,18815622
450	720	1,46090588	1,35789283
540	810	1,75308705	1,52762943
630	900	2,04526823	1,69736603
720	990	2,3374494	1,86710264
810	1080	2,62963058	2,03683924
900	1170	2,92181175	2,20657584

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Temps de charge (h)	Temps de décharge (h)	Les efficacités de charge	Les efficacités de décharge
90	360	6,63445049	0,35025013
180	450	3,31722524	0,43781267
270	540	2,2114835	0,5253752
360	630	1,65861262	0,61293773
450	720	1,3268901	0,70050027
540	810	1,10574175	0,7880628
630	900	0,94777864	0,87562534
720	990	0,82930631	0,96318787
810	1080	0,73716117	1,0507504
900	1170	0,66344505	1,13831294

À travers les graphes de la figures IV- 3 et de figure IV-4 nous avons noté que :

- Les quantités de chaleur augmentent en fonction de temps de charge et décharge.
- Les deux valeurs des efficacités, de charge et celle de décharges varient dans deux direction opposées en face d'augmentation de temps.
- Le point d'intersection des deux courbes est le point ou les deux efficacités de charge et de décharge sont égaux.

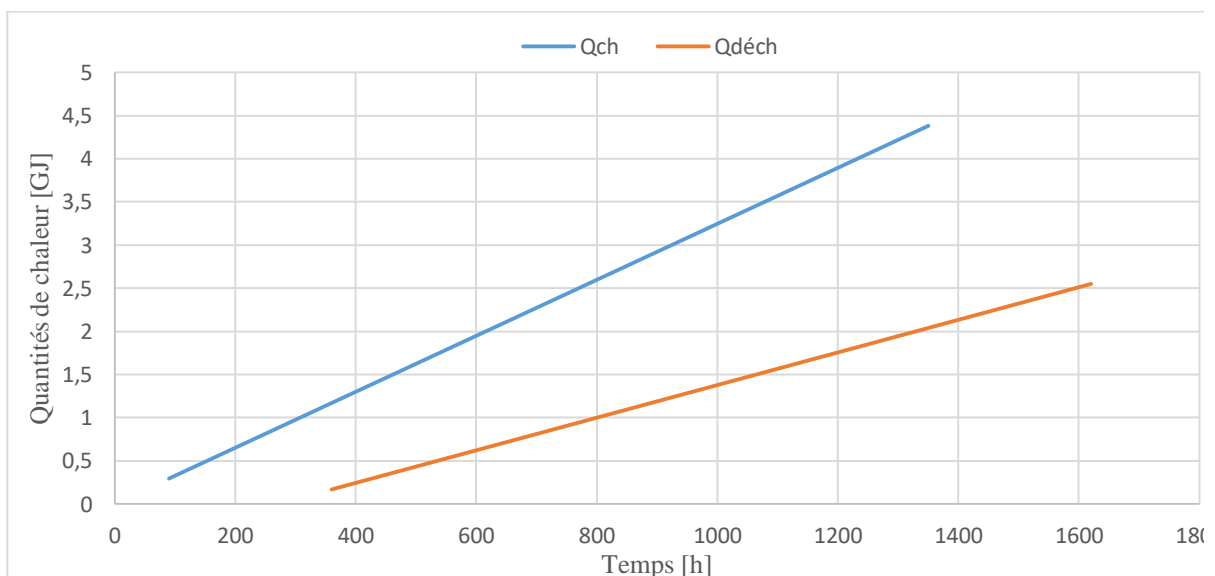


Figure IV-3 : Variation des quantités de chaleur en fonction de temps.

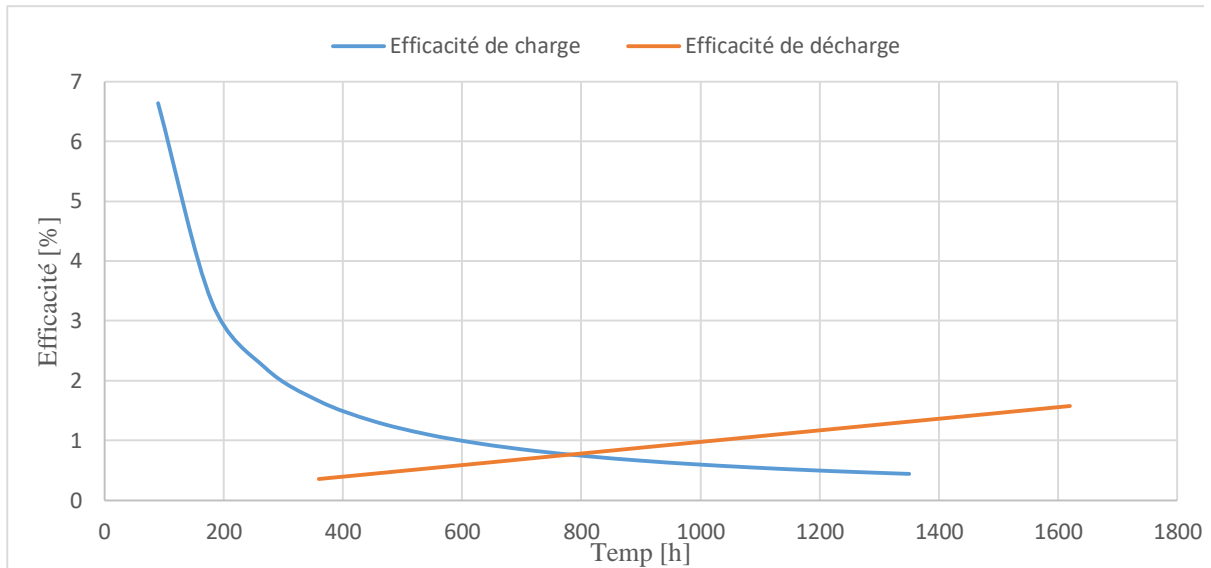


Figure IV-4 : Variation des efficacités en fonction de temps.

4.3.2 Variation des quantités et des efficacités de charge et décharge en fonction de débit volumique :

Comme le temps qu'est représenté sur la formule (IV-1) et (IV-2) le débit volumique effectué directement sur les efficacités et les quantités des chaleurs de charge et décharge.

Les tableaux au dessus représente le changement de quantités de chaleur en fonction de temps sur le tableau (IV-3), et les efficacités sur le tableau (IV-4).

Q_v de (charge / décharge)	Quantités de charge (GJ)	Quantités de décharge (GJ)
20	0,31465665	0,26113324
40	0,6293133	0,52226647
60	0,94396995	0,78339971
80	1,2586266	1,04453294
100	1,57328325	1,30566618
120	1,8879399	1,56679942
140	2,20259655	1,82793265
160	2,5172532	2,08906589
180	2,83190985	2,35019912
200	3,1465665	2,61133236

Tableau IV-4 : Variation des efficacités en fonction de débit volumique.

Q_v de (charge / décharge)	Les efficacités de charge	Les efficacités de décharge
20	6,16056117	0,13471159
40	3,08028058	0,26942318
60	2,05352039	0,40413477
80	1,54014029	0,53884636
100	1,23211223	0,67355795
120	1,02676019	0,80826954
140	0,88008017	0,94298113
160	0,77007015	1,07769272
180	0,6845068	1,21240431
200	0,61605612	1,3471159

À travers les graphes ci-dessous nous avons noté que :

- Les quantités de chaleur augmentent en fonction de débit de charge et décharge.
- Les deux valeurs des efficacités, de charge et celle de décharges varient dans deux direction opposées en face d'augmentation de débit.
- Le point d'intersection des deux courbes est le point ou les deux efficacités de charge et de décharge sont égaux.

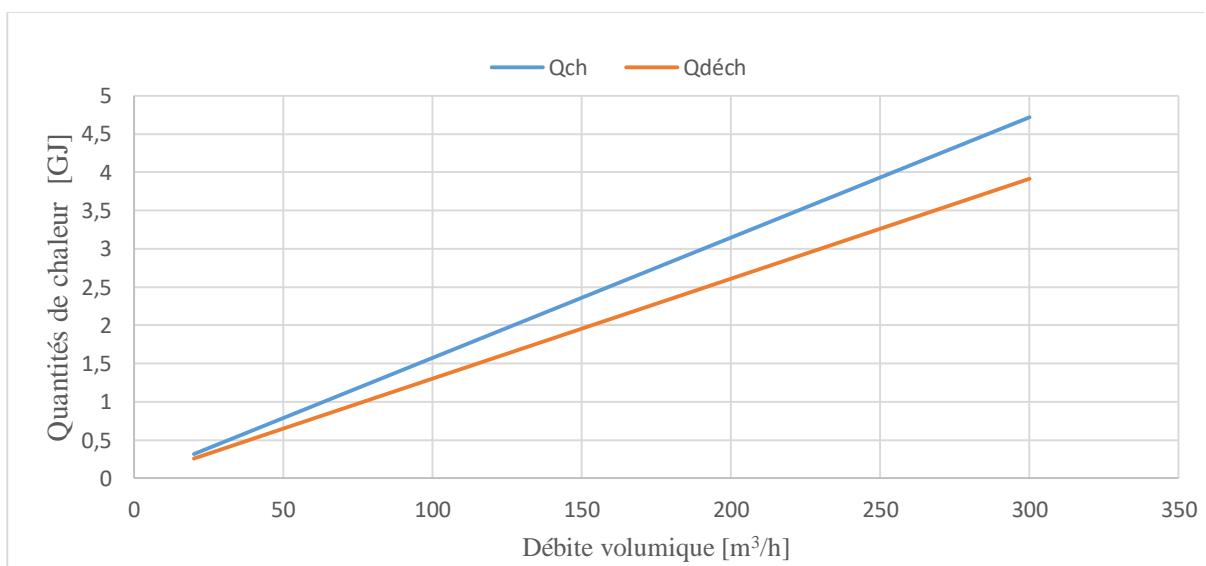


Figure IV-5 : Variation des quantités de chaleur en fonction de débit de charge et décharge.

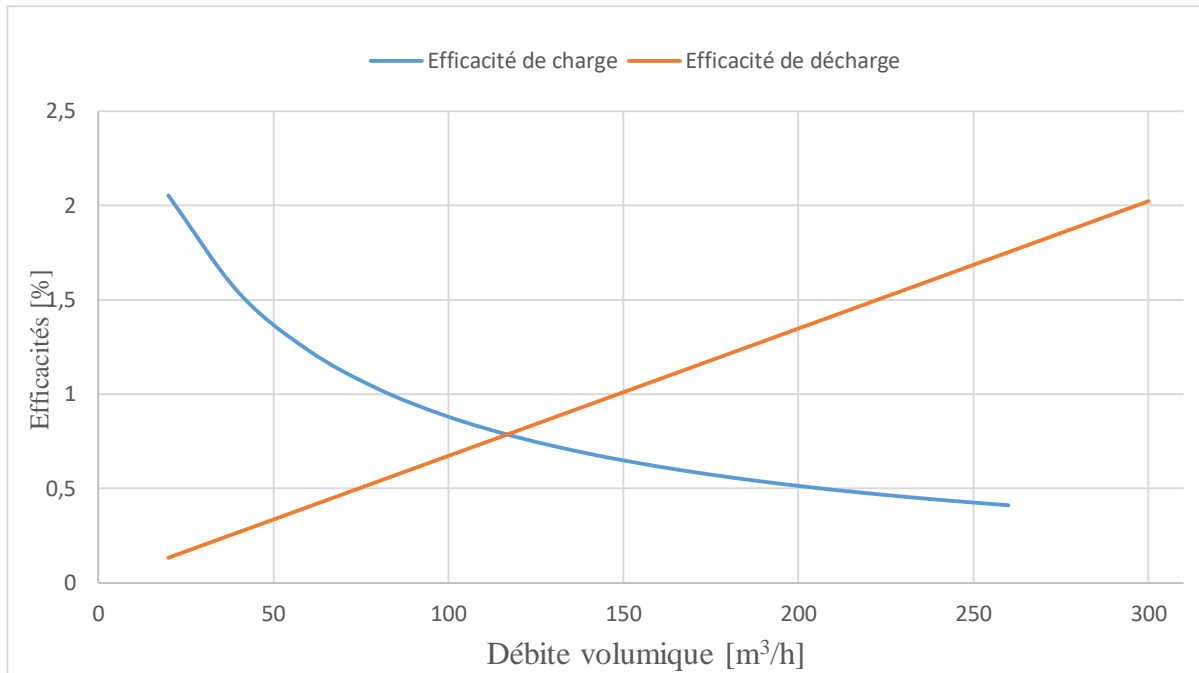


Figure IV-6 : Variation des efficacités de chaleur en fonction de débit de charge et décharge.

4.4 Conclusion :

Les débits volumiques et les temps de la charge et de décharge sont deux paramètres importants ayant un grand effet sur les efficacités, de charge et celle de décharge du système de stockage par adsorption.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Une étude de performance d'un système de stockage par adsorption fonctionnant par le couple zéolithe 13X - eau et alimentée par l'énergie solaire a été réalisée. La méthode mathématique pour calculer les efficacités du système présenté est développé en modèle numérique au moyen du programme MS Excel.

Les résultats pour le stockage ouvert montrent que les efficacités de charge et de décharge sont respectivement de 0.95 et 0.88 pour la zéolithe 13X.

Le calcul a permis de suivre l'allure des efficacités du système en fonction des débits et les temps de charge et décharge du cycle de fonctionnement. Les résultats ont montré que les efficacités ayant une sensibilité pour les facteurs comme les temps et les débits en cas d'augmentation ou diminution, mais ils donnent valeurs satisfaisantes des efficacités.

Le choix d'un stockage d'énergie par sorption pour une application particulière à besoin d'évaluation d'autres facteurs qu'examinés ici, notamment les effets environnementaux, la rentabilité, la dégradation thermo-chimique des matériaux et le comportement cyclique dans le temps, la fiabilité et les exigences de maintenance.

Références

Bibliographies

1. Ibrahim Dincer , M.A.R., and Farrukh Khalid., Thermal Energy Production, Comprehensive Energy Systems. 2017.
2. Lefebvre, D., Thermal Energy Storage Using Adsorption Processes for Solar and Waste Heat Applications: Material Synthesis, Testing and Modeling. 2015, University of Ottawa.
3. <https://www.edfenr.com/lexique/energies-renouvelables/05-04-2019>.
4. Pinel, P., et al., A Review of Available Methods for Seasonal Storage of Solar Thermal Energy in Residential Applications. Vol. 15. 2011. 3341-3359.
5. https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiovrq4NzgAhXqxoUKHTZZBpoQjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fsti2d.ecolelamache.org%2Fressources%2FEE%2Fpremiere%2Fcourse%2Fnrj_elec_part5_eleves.pdf&psig=AOvVaw2J70ivrWnhld_IwhNsZ8Mo&ust=1551385627764843/05-03-2019.
6. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-autonomie-energetique-stockage-individuel-energie-faire-53431/12-03-2019>.
7. Khartchenko, N.V. and V.M. Kharchenko, Advanced energy systems. 2013: CRC Press.
8. Kumar, A. and S.K. Shukla, A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application. Energy Procedia, 2015. 74: p. 462-469.
9. <https://www.edfenr.com/lexique/bbc-batiments-basse-consommation/05-03-2019>.
10. Ovchinnikov, P., A. Borodinecs, and K. Strelets, Utilization potential of low temperature hydronic space heating systems: A comparative review. Building and Environment, 2017. 112: p. 88-98.
11. consommation, G.A.E.b.à.b.
12. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire.
13. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_thermique.
14. https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_thermique.
15. <https://www.2es.fr/fr/nos-competences/le-solaire-thermique>.
16. Gherib Lazhar. Etude et calcul des capteurs solaires plans "Application au chauffe - eau". 2015.
17. Benaida, M. , Khenfer, N. Développement des nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des bâtiments à énergie positive en climat chaud et sec (Région de Ouargla). 2017
18. Liu, H., Inter-seasonal solar energy storage for buildings by absorption. 2010, Université de Savoie.
19. Casey, S.P., et al., Salt impregnated desiccant matrices for ‘open’ thermochemical energy storage—Selection, synthesis and characterisation of candidate materials. Energy and Buildings, 2014. 84: p. 412-425.
20. Navarro, M.E., et al., Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012. 107: p. 131-135.

Références Bibliographies

21. Pelay, U., Intégration d'un procédé de stockage thermochimique à un cycle de Rankine, sous énergie solaire concentrée (in-stores). 2017, Nantes.
22. Hongois, S., Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. 2011, Lyon, INSA.
23. Tatsidjodoung, P., Procédé de stockage d'énergie solaire thermique par adsorption pour le chauffage des bâtiments: modélisation et simulation numérique. 2014, Université de Grenoble.
24. <http://sitelyceejdar.org/autodoc/cours/001%201%20STI2D/Technologie%20transversale/StockageEnergie/index.html?Stockagethermiqueparchangementde.html/12-03-2019>.
25. Faninger, G., Thermal energy storage. 2004.
26. N'Tsoukpoe, K.E., et al., A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. 13(9): p. 2385-2396.
27. LIU, H., Study on Open and Closed Chemical Thermal Energy Storage Technology with Low-regeneration Temperature.
28. Tatsidjodoung, P., N. Le Pierrès, and L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 18: p. 327-349.
29. <http://www.recuperation-chaleur.fr/stockage-par-chaleur-latente/20-06-2019>.
30. Jesús Lizana , R.C., Angela Barrios-Padura ,José Manuel Valverde,, Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review. University Sevilla.
31. Weber, R. and V. Dorer, Long-term heat storage with NaOH. *Vacuum*, 2008. 82(7): p. 708-716.
32. Aydin, D., S.P. Casey, and S. Riffat, The latest advancements on thermochemical heat storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. 41: p. 356-367.
33. Luca Scapino , H.A.Z., Johan Van Bael , Jan Diriken , Camilo C.M. Rindt . Sorption heat storage for long-term low-temperature applications : A review on the advancements at material and prototype scale. 2016, Eindhoven University of Technology.
34. Aiello, R., A. Nastro, and C. Colella, Solar energy storage through water adsorption—desorption cycles in zeolitic tuffs. *Thermochemica Acta*, 1984. 79: p. 271-278.
35. Stitou, D., Transformation, Conversion, Stockage, Transport de l'énergie thermique par procédés thermochimiques et thermo-hydrauliques. 2013, Université de Perpignan.
36. Duquesne, M., Résolution et réduction d'un modèle non-linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes. 2013, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
37. Dicaire, D. and F.H. Tezel, Use of adsorbents for thermal energy storage of solar or excess heat: improvement of energy density. *International Journal of Energy Research*, 2013. 37(9): p. 1059-1068.
38. El-Sharkawy, I.I., et al., Experimental investigation of activated carbon fibers/ethanol pairs for adsorption cooling system application. *Applied Thermal Engineering*, 2006. 26(8): p. 859-865.

Références Bibliographies

39. CHAZEL, V.M.-. ANALYSE DES PROCESSUS D'ADSORPTION A L'INTERFACE SOLIDE - GAZ PAR L'ETUDE DU PHENOMENE DE POLARISATION. 1994, UNIVERSITE MONTPELLIER.
40. N'Tsoukpoe, K.E., et al., The size of sorbents in low pressure sorption or thermochemical energy storage processes. *Energy*, 2014. 77: p. 983-998.
41. OKHRIMENKO, L., Stockage d'énergie thermique par un composite zéolite/MgSO₄ : étude thermocinétique du système MgSO₄ – H₂O et étude expérimentale des composites. 2018, UNIVERSITY OF LYON.
42. Thu, K., et al., Thermo-physical properties of silica gel for adsorption desalination cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2013. 50(2): p. 1596-1602.
43. Jentys, A., et al., Adsorption of water on ZSM 5 zeolites. *The Journal of Physical Chemistry*, 1989. 93(12): p. 4837-4843.
44. Chekirou, W., Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption. 2008.
45. Rezk, A.R.M., Theoretical and experimental investigation of silica gel/water adsorption refrigeration systems. 2012, University of Birmingham.
46. N'Tsoukpoe, K.E., N'tsoukpoe, Study of a long term solar thermal energy storage based on LiBr–H₂O for house heating. 2012, Université de Grenoble.
47. Wang, L.W., R.Z. Wang, and R.G. Oliveira, A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. 13(3): p. 518-534.
48. Yu, N., R. Wang, and L. Wang, Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013. 39(5): p. 489-514.
49. Najeh, G., et al., Performance of silica gel-water solar adsorption cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2016. 8: p. 337-345.
50. Ding, Y. and S. Riffat, Thermochemical energy storage technologies for building applications: a state-of-the-art review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2012. 8(2): p. 106-116.
51. Abedin, A.H. and M.A. Rosen, Closed and open thermochemical energy storage: Energy- and exergy-based comparisons. *Energy*, 2012. 41(1): p. 83-92.
52. Hauer, A. Thermal energy storage with zeolite for heating and cooling applications. in *Proceedings of 3rd Workshop of Annex*. 2002.