

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies



Mémoire de Fin d'Etude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière: Génie Mécanique
Spécialité: Energétique

Thème

ETUDE THEORIQUE DES
SYSTEMES DE STOCKAGE
THERMIQUE

Dirigé par:
Mlle N. MAHFOUDI

Réalisé par:
DEHDA Djamel Eddin
ZAID Yakoub

Soutenu le 2 Juin 2013

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidées à réaliser cette étude en apportant des renseignements ou en acceptant de répondre à nos questions.

En premier lieu nous tenons à remercier chaleureusement, notre encadreur, M^{lle}. **MAHFOUDHI Nadjiba**, pour son soutien sans faille, pour sa disponibilité et surtout pour ses encouragements le long de ce travail.

Nous remercions avec gratitude tous les enseignants du département des sciences et de technologies à l'université d'El Oued, qui ont veillé sur notre parcours pédagogique le long des trois ans.

Nos remerciements sont également destinés au membre de jury d'avoir accepté de juger ce travail dans le but de l'enrichir.

Enfin, nous exprimons nos sincères amitiés à tous nos amis, les étudiants de 3^{ème} GM, pour l'ambiance amicale qui a régné durant toute l'année.

Sommaire

Introduction générale.....	01
Chapitre I: Les raisons d'un stockage de chaleur	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Demandes et défis énergétiques.....	03
I.3. Les énergies renouvelables.....	05
I.4. Les défis des énergies renouvelables.....	07
I.5. L'énergie solaire.....	07
I.6. Conclusion.....	08
Chapitre II: Les différents principes de stockage thermique	
II.1. Introduction.....	09
II.2. Définition.....	09
II.3. Les principes de Stockage thermique.....	09
II.3.1. Le stockage par chaleur sensible.....	09
II.3.2. Le stockage par chaleur latente.....	11
II.3.3. Le stockage par réaction chimique.....	13
II.4. Critères d'un bon système de stockage.....	14
II.5. Conclusion.....	14
Chapitre III: les systèmes de stockage solaire	
III.1. Introduction.....	15
III.2. Quelques Systèmes de stockage solaire.....	15
III.2.1. Applications basses températures.....	15
III.2.1.1. Ballon d'eau sanitaire.....	15
III.2.1.2. Le ballon de stockage à stratification.....	17
III.2.1.3. Le plancher chauffant direct.....	18

III.2.2. Applications hautes températures.....	19
III.2.2.1. Système de stockage à sel fondu.....	19
III.2.2.2. Accumulateur à Béton.....	20
Chapitre IV: Etude d'un système de stockage à lit de pierre	
IV.1. Introduction.....	22
IV.2. Description du modèle.....	22
IV.3. Bilan thermique de l'unité de génération de l'air chaud...	22
IV.4. Bilan thermique dans l'unité de stockage.....	23
IV.5. Méthode de résolution.....	24
IV.6. Résultats de simulation.....	24
IV.6. 1. Evolution de la température de l'air dans le capteur	24
IV.6. 2. Evolutions des températures dans l'unité de stockage	26
IV.7. Conclusion.....	27
Conclusion générale.....	28

Liste de figures

Fig. 1: Les répartitions énergétiques en France.....	03
Fig. 2: Consommation mondiale d'énergie primaire.....	04
Fig. 3: Répartition de l'énergie finale mondiale en 2006 selon les sources d'énergie.....	06
Fig. 4: Parts des énergies renouvelables dans la production d'électricité dans quelques pays européens et objectifs à atteindre en 2010.....	06
Fig. 5: Système de stockage solaire.....	15
Fig. 6 : Schéma descriptif d'une boucle d'eau chaude sanitaire.....	16
Fig.7: les composantes de ballon sanitaire.....	16
Fig.8: Phénomène de stratification dans l'eau.....	17
Fig.9: Installation d'un ballon de stockage à stratification.....	17
Fig.10: Schéma d'un plancher chauffant direct.....	18
Fig.11: Schéma d'un système solaire combiné (PSD + ECS).....	19
Fig.12: Centrale thermique à tour.....	19
Fig.13: Accumulateur de stockage à sel fondu.....	20
Fig.14: Module accumulateur à béton.....	20
Fig.15: Séchoir solaire à bois avec cuve de stockage.....	22
Fig. 16 : Evolution de la température de l'air à l'aller dans le capteur en fonction de l'abscisse : $D=0.028\text{Kg/s}$, $L_c=1\text{m}$, $V=1\text{m/s}$	25
Fig. 17 : Evolution de la température de l'air au retour dans le capteur en fonction de l'abscisse : $D=0.028\text{Kg/s}$, $L_c=1\text{m}$, $V=1\text{m/s}$	25
Fig. 18 : Evolution de la température de l'air dans l'unité de stockage à différents niveaux du lit en fonction du temps : $D=0.028\text{Kg/s}$, $L_c=1\text{m}$, $V=1\text{m/s}$	26
Fig. 19 : Evolution de la température du matériau de stockage à différents niveaux du lit en fonction du temps : $D=0.028\text{Kg/s}$, $L_c=1\text{m}$, $V=1\text{m/s}$	27

Liste de tableau

Tableau 1: Consommation mondiale d'énergie en générale.....	07
Tableau 2: Capacité calorifique à pression constante dans les conditions normales de température et de pression de quelques matériaux utilisés pour le stockage par chaleur sensible.....	10
Tableau 3: La chaleur latente de quelques matériaux.....	12
Tableau 4: Quelques matériaux utilisés dans le stockage chimique.....	13

Nomenclature

As : Taux de surface d'échange dans le lit de stockage (m^2/m^3)

a : Largeur du capteur en (m)

Cps : Chaleur spécifique du matériau de stockage (J/Kg. °C)

Dseff : Coefficient de diffusion du matériau de stockage (m^2/s)

D : Débit massique d'air dans le capteur (Kg/s)

Ei : Energie solaire incidente en (W/m^2)

hcaig1: Coefficient de transfert de la chaleur entre l'ailette et l'air ($W/m^2.K$)

hcabg2: Coefficient de transfert de la chaleur entre l'absorbeur et l'air ($W/m^2.K$)

hi : Coefficient de transfert convectif ($W/m^2.K$)

hs : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le matériau de stockage et l'air (m/s).

Nai : Nombre d'ailettes encastrées dans l'absorbeur

Lc, Ls : Longueur de l'ailette, du lit de stockage (m)

TSV : Temps Solaire Vrai

Tab, Tv : Température de l'absorbeur de la vitre (°C)

T0 : Température de référence (C°)

V : vitesse du vent en (m/s)

Sai : Surface des ailettes (en m)

Sr : surface restante des ailettes (en m^2)

tv : Transmittivité de la vitre

β : Coefficient d'absorption du rayonnement solaire

ε1 : Porosité du lit de stockage

η_1 : Efficacité de l'ailette

λ^{seff} : Conductivité thermique du lit de stockage ($W/m. °C$)

λ_{ai} : Conductivité de l'ailettes ($W/m. °C$)

- N_{ai} : Nombre d'ailettes encastrées dans l'absorbeur
 L_c, L_s : Longueur de l'ailette, du lit de stockage (m)
TSV : Temps Solaire Vrai
 T_{ab}, T_v : Température de l'absorbeur de la vitre ($^{\circ}C$)
 T_0 : Température de référence (C°)
 V : vitesse du vent en (m/s)
 S_{ai} : Surface des ailettes (en m)
 S_r : surface restante des ailettes (*en m^2*)
 τ_v : Transmittivité de la vitre
 β : Coefficient d'absorption du rayonnement solaire
 ε_1 : Porosité du lit de stockage
 η_1 : Efficacité de l'ailette
 λ_{eff}^s : Conductivité thermique du lit de stockage
($W/m. ^{\circ}C$)
 λ_{ai} : Conductivité de l'ailettes ($W/m. ^{\circ}C$)

Introduction générale

La demande énergétique mondiale est actuellement de l'ordre de 12,5 Gtep et, selon les scénarios, elle pourrait être contenue dans une fourchette allant de 20 à 25 Gtep à l'horizon 2050. En parallèle, les quantités de CO₂ générées annuellement s'établissent aujourd'hui à près de 6,5 Gt : elles sont à l'origine, par les mécanismes naturels mis en jeu, d'une accumulation de 3 GtC (giga tonne de carbone) par an dans l'atmosphère. Cette situation conduirait à un accroissement sensible de la température moyenne à la surface de la terre entre 1,5 °C et 5,8 °C d'ici 2100. Ceci représente une augmentation sans précédent qui s'accompagnerait en particulier de la montée du niveau des mers de 20 cm à 1m [1].

Face à ces enjeux maintenant classiques, une contribution scientifique et technologique relative aux problèmes actuels concernant l'énergie ne peut ignorer des questions cruciales notamment à cause de leur retentissement géopolitique, telles que:

- La sûreté de l'approvisionnement (tensions, demandes des pays en voie de développement,...);
- La raréfaction des ressources fossiles disponibles à un coût raisonnable;
- L'impact environnemental (CO₂, Santé...), la minimisation des risques et la sécurité.

Les énergies renouvelables apparaissent comme une solution, bien entendu partielle, à cette urgence. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire montre une attractivité spécifique : elle est abondante sur terre, inépuisable et gratuite. En effet, l'énergie solaire reçue au niveau de la terre est de l'ordre de 1300 W/m². L'atmosphère réfléchit et absorbe une partie de ce flux d'énergie, en moyenne la terre reçoit au niveau de sol 1000 W/m² au vertical à midi.

Cependant, l'énergie solaire, par sa nature est intermittente (jour/nuit), aléatoire (orages et passages de nuages) diluée et décalée par rapport à la demande énergétique quotidienne ou saisonnière.

Donc, il est indispensable de trouver des solutions scientifiques et technologiques pour surmonter ces inconvénients caractéristiques de l'énergie solaire et bénéficier pleinement de cette source inépuisable d'énergie renouvelable.

Ce travail bibliographique a pour ambition de contribuer à ce débat.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux applications «thermodynamiques» du stockage d'énergie.

Pour l'énergie solaire en particulier, il s'agit de convertir le rayonnement solaire directement en chaleur. Il existe aussi la transformation photovoltaïque du rayonnement solaire. Dans cette dernière voie, le rayonnement solaire est transformé en électricité.

Un bon usage d'énergie thermique demande d'abord une bonne réception et conversion de cette énergie en contournant les problèmes de «dilution» et «d'intermittence».

Introduction générale

Deux types d'usages d'énergie est à distinguer :

- Usage domestique pour la production de l'eau chaude sanitaire et du chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires;
- Et centrales de production d'électricité par concentration du rayonnement solaire via des réflecteurs de formes diverses et mobiles (suivi du soleil).

Parmi toutes les applications possibles, une seule d'entre elles - les systèmes de chauffe eau et de chauffage solaire du bâtiment- peut être considérée comme mature. Le rendement des systèmes récents est de l'ordre de 40% [1].

Ce mémoire est organisé comme suit:

- Un premier chapitre exposant les raisons du stockage;
- Un deuxième présentant les différents principes de stockage thermique;
- Le troisième est consacré aux systèmes de stockage solaire les plus utilisées;
- En fin une étude détaillée d'un système de stockage utilisant un lit de pierre est présentée.

Chapitre I: Les raisons d'un stockage de chaleur

Chapitre I: Les raisons d'un stockage de chaleur

I.1. Introduction:

Les être humain besoin de l'énergie pour vivre dans une condition -on peut dit- parfait, donc l'homme cherche comment utilise les ressources disponibles pour améliorer ces conditions, on parle pour l'énergie classique(énergie fossiliser) et l'énergie renouvelable.

I.2. Demandes et défis énergétiques:

L'énergie est indispensable pour nos activités économiques et dans les multiples aspects de notre vie quotidienne. Cette énergie est principalement utilisée dans quatre secteurs principaux : habitat, transport, l'industrie et agriculture (figure 1).

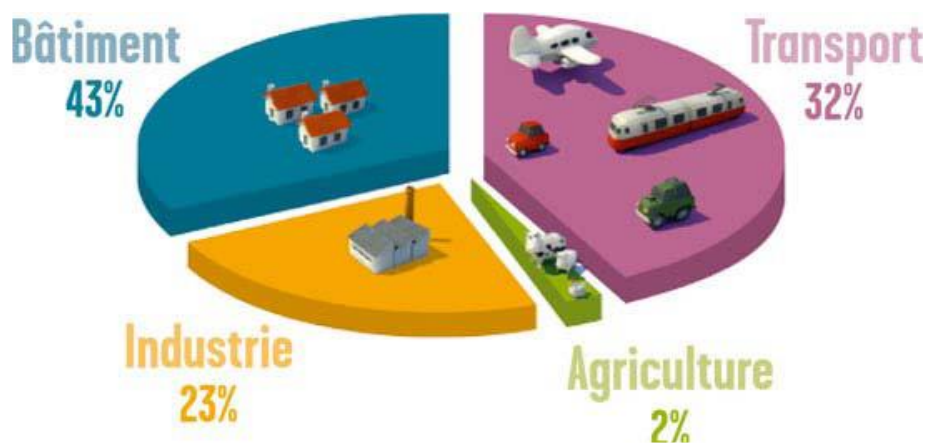


Fig. 1: Les répartitions énergétiques en France [1]

Dans chacun des secteurs, l'énergie est consommée essentiellement sous forme thermique (chaleur ou froid) ou sous forme d'électricité. Le développement économique, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement est directement lié à l'énergie. Ainsi, la demande énergétique mondiale augmente constamment, ceci est dû à deux raisons :

- ✓ l'accroissement rapide de la population avec près de 200 000 hommes supplémentaires par jours,
- ✓ l'augmentation de notre niveau de confort (climatisation, chauffage, électroménagers, transport, ordinateurs, éclairage, etc.) et l'émergence des nouveaux pays industrialisés très peuplés (la Chine, l'Inde, le Brésil, l'Afrique de Sud, etc.) et dont le niveau de vie s'améliore.

L'omniprésence de l'électricité est un exemple flagrant de notre constante dépendance en l'énergie : une panne générale d'électricité nous paralyse.

On distingue quatre types d'énergie :

- ✓ L'énergie primaire qui correspond aux éléments avant la transformation de sources d'énergie (charbon, pétrole, uranium)

Chapitre I: Les raisons d'un stockage de chaleur

- ✓ L'énergie secondaire obtenue après la transformation (essence, gasoil)
- ✓ L'énergie finale qui arrive chez les consommateurs (électricité, fuel domestique)
- ✓ l'énergie utile correspondant à la quantité d'utilisation requise.

La Figure 2 donne un aperçu de l'évolution de la consommation mondiale en énergie primaire pour des années choisies arbitrairement : la consommation entre 1900 et 2000 a quasiment été multipliée par 10 alors que la population n'a été multipliée que par 4. La cause vient évidemment de l'élévation du niveau de vie et de la démocratisation de l'accès au confort. Ainsi aujourd'hui, la consommation en énergie primaire, majoritairement d'énergie fossile (pétrole, gaz naturel, charbon), s'élève à une dizaine de Gtep (1 tep = 42 x 10⁹ joules).

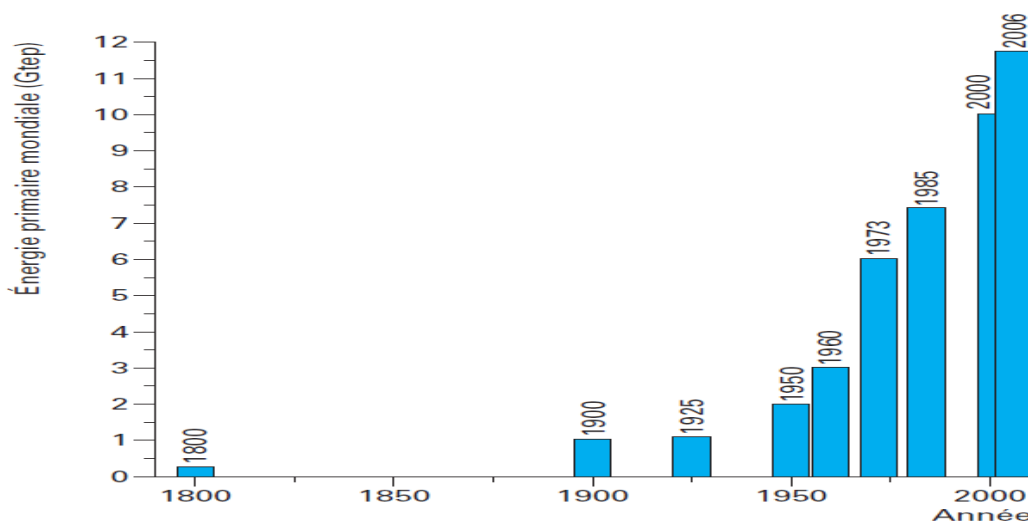


Fig. 2: Consommation mondiale d'énergie primaire [2].

Cependant, cette exploitation massive et croissante des énergies fossiles présente des limites. Certaines régions ont élaboré des alternatives depuis plusieurs années car elles ne disposent pas (ou plus) de ces ressources à l'origine d'un fort rendement. D'autre part, ces combustibles fossiles sont des ressources épuisables, ce qui a entraîné (pour une partie) la hausse des prix des combustibles fossiles qui sont dorénavant difficile à se procurer d'un point de vue économique. Enfin, cette exploitation contribue à une émission massive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui contribue à l'augmentation de la température de la planète Terre et le dérèglement climatique.

On peut donc résumer les défis énergétiques dans les points suivants:

- ✓ Dépendance à l'énergie conventionnelle non renouvelable;
- ✓ Problème de transmission de l'énergie;
- ✓ L'extinction inéluctable des énergies actuellement utilisées (pétrole et gaz);

Chapitre I: Les raisons d'un stockage de chaleur

- ✓ émission de gaz polluants (CO₂) et effet de serre;
- ✓ Catastrophes écologiques provoquées par les accidents industriels (fuite de radiations nucléaires)

Les énergies renouvelables représentent une solution prometteuse au problème de demande d'énergie.

I.3. Les énergies renouvelables:

Contrairement à ce que l'on appelle parfois « énergies nouvelles », l'exploitation des énergies renouvelables n'est pas récente. D'ailleurs, elles ont été utilisées pendant une période plus longue que les combustibles fossiles, c'est-à-dire depuis que les premiers hommes ont exploité le bois pour se réchauffer et cuire la nourriture.

L'énergie renouvelable a des significations diverse:

- ✓ c'est une source d'énergie qui se régénère assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle humaine.
- ✓ L'énergie dérivée d'un approvisionnement rempli constamment et naturellement dans une période relativement courte.
- ✓ Les énergies issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil, mais aussi la lune et la Terre.
- ✓ Les énergies renouvelables sont désignées comme une énergie disponible, à partir de processus de conversion énergétique permanent et naturel, économiquement exploitable dans les conditions actuelles ou dans un avenir prévisible

Les principales sources d'énergie renouvelables

- ✓ le vent: Energie éolienne;
- ✓ le soleil: énergie solaire;
- ✓ la chaleur terrestre: Energie géothermique;
- ✓ l'eau: Energie hydroélectrique, Energie marémotrice;
- ✓ la biodégradation: La biomasse.

L'exploitation massive et majoritaire des combustibles fossiles existe depuis le début du XX^{ème} siècle pour des raisons économiques et est en partie responsable de l'augmentation de la population mondiale. Ainsi de nos jours, les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne, biomasse...) occupent une place moins importante que les combustibles fossiles [3].

Chapitre I: Les raisons d'un stockage de chaleur

La figure 3 montre la répartition des énergies exploitées au niveau mondial.

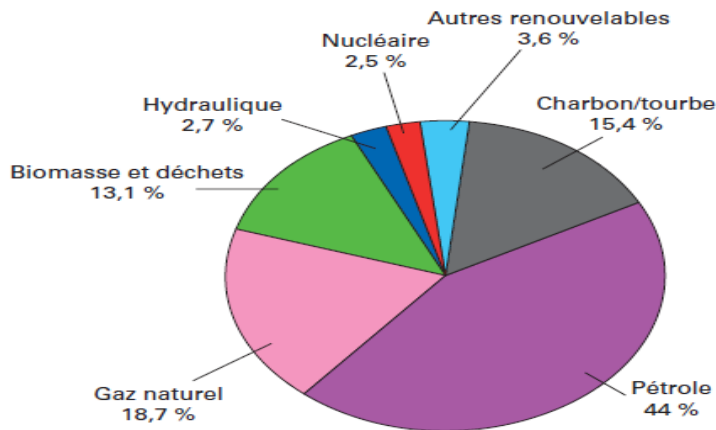
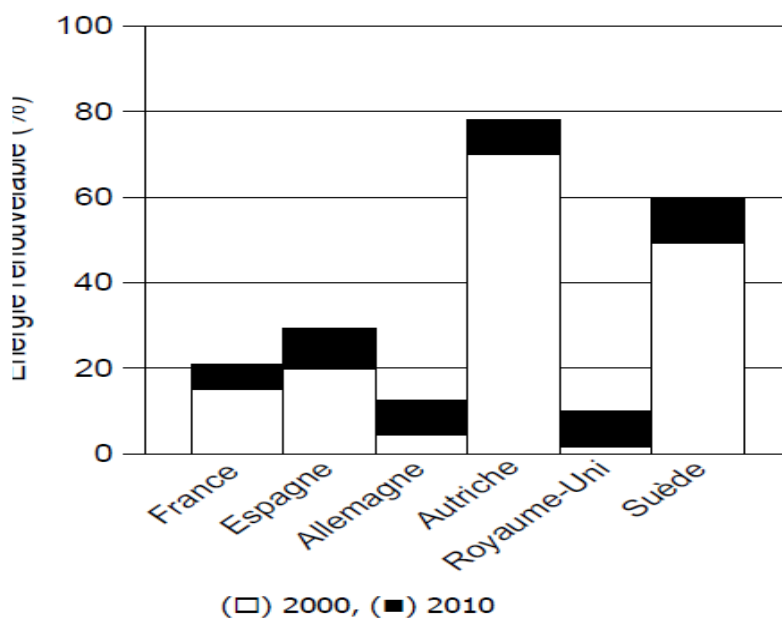


Fig. 3: Répartition de l'énergie finale mondiale en 2006 selon les sources d'énergie [3].

Face à ce fait, la communauté européenne a imposé l'introduction des énergies renouvelables dans la production d'électricité pour 2010 pour tous les pays. Par ailleurs, beaucoup de pays européens comme la Suède et l'Autriche ont déjà intégré de manière assez importante les énergies renouvelables dans leur mixte énergétique. La Figure 4 montre la part des énergies renouvelables dans l'électricité en Europe en 2000 et objectifs à atteindre en 2010 (Pincemin, 2007).



Chapitre I: Les raisons d'un stockage de chaleur

Fig. 4: Parts des énergies renouvelables dans la production d'électricité dans quelques pays européens et objectifs à atteindre en 2010 [4].

I.4. Les défis des énergies renouvelables:

Les avantages des énergies renouvelables sont qu'elles peuvent être exploitées aussi longtemps que la terre existera et sont gratuites. Cependant, elles ont des défis dont on peut citer:

- ✓ La présence de sources d'énergie renouvelables intermittentes;
- ✓ Le coût élevé de ce sujet énergies par rapport aux énergies conventionnelles;
- ✓ Les zones d'utilisation limitée (souvent utilisé dans la production d'électricité);
- ✓ Moins efficace par rapport aux autres énergies;
- ✓ L'absence de systèmes efficaces pour le stockage;
- ✓ La dépendance mondiale infinie des les énergies traditionnelles comme le pétrole, le gaz et le charbon par-apport a les énergies renouvelables

Le tableau suivant, montre la grande différence dans la consommation d'énergie conventionnelle et renouvelable :

Tableau 1: Consommation mondiale d'énergie en générale [5].

Source	Pétrole	Gaz	Charbon	Nucléaire fission	Renouvelables
Monde	37%	21%	24%	7%	9%
Europe	41%	24%	15%	14%	5%
France (proportion sur la consommation finale)	35%(45%)	14%(21%)	5%(4%)	40%	7%(10%)

I.5.L'énergie solaire:

Il semble que ce sont les Egyptiens qui aient découvert l'effet de serre. L'utilisation de l'énergie solaire a commencé au 3^{ème} siècle avant J-C par Archimède, et vers 100 ans après J-C par Héron d'Alexandrie; en 1615 par Salomon de Gauss, en 1774 par Joseph Priestley et en 1878 dans le désert d'Atacama au Chili, où

Chapitre I: Les raisons d'un stockage de chaleur

un distillateur solaire de 5000 m² a été construit pour fournir de l'eau à une mine de nitrate de sodium. Après 1878, le travail sur l'énergie solaire a diminué à cause de la disponibilité de l'énergie fossile à moindre coût, la réutilisation de disponibilité de l'énergie solaire a eu lieu de 1902 à 1908 grâce à Schuman qui a construit des machines solaires de plusieurs chevaux pour pomper de l'eau [3].

En 1913, Boys a installé, près du Caire, une grosse machine de 50 chevaux avec des longs cylindres paraboliques qui concentrent les radiations solaires sur une canalisation centrale avec un facteur de concentration de 4,5 pour pomper l'eau de Nil à des fins d'irrigation. L'utilisation de l'énergie solaire a continué jusqu'à 1938, où il n'y avait aucun autre développement de l'énergie solaire, car cette dernière n'a pas pu concurrencer l'énergie produite par les combustibles fossiles.

A partir de 1950, les applications de l'énergie solaire commencent timidement à se développer. Il peut paraître étonnant, dans ces conditions, que la substitution des énergies conventionnelles par les énergies renouvelables n'ait pas suscité un réel intérêt, nécessitant la mise en place des moyens plus importants pour la maîtrise et le développement des technologies nécessaires.

Parmi les applications de l'énergie solaire on peut citer:

- ✓ Le chauffage et la climatisation des bâtiments.
- ✓ La production du sel par l'évaporation de l'eau de mer.
- ✓ Le séchage des produits agricoles et animaux.
- ✓ Les pompes et les cuisinières solaires.
- ✓ La conversion photovoltaïque.
- ✓ La production de l'eau chaude sanitaire et industrielle ainsi que la production de l'eau distillée.

I.6. Conclusion:

Cependant, l'inconvénient majeur de l'énergie solaire est qu'il s'agit d'une source *intermittente* et qui est parfois en *inadéquation* avec les besoins d'un point de vue spatial, temporel, en puissance ou en température. La solution est donc de *stocker* la chaleur produite par l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques au moment et à l'endroit où ceux-ci se manifestent.

Chapitre II: Les différents principes de stockage thermique

Chapitre II: Les différents principes de stockage thermique

II.1. Introduction:

Pour mieux comprendre le contexte dans lequel le stockage de chaleur (produite par transformation thermodynamique de l'énergie solaire) s'opère, nous allons exposer, dans la section suivante, les différents procédés de production de chaleur (solaire). Puis nous traiterons des techniques de stockage. Il faut rappeler que l'utilisation directe de l'énergie solaire thermique, à partir de l'utilisation de simples capteurs, n'est limitée par aucun verrou scientifique ou technologique.

II.2. Définition:

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la «production» et la «consommation» d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

II.3. Les principes de Stockage thermique:

L'utilisation différée de l'énergie est l'idée commune qui vient à l'esprit dès que l'on parle de stockage. Dans la pratique, on peut alors réaliser cette opération par différents modes. A ce titre, on rappellera ici les principales différences entre ces modes de stockage.

II.3.1. Le stockage par chaleur sensible:

Le stockage par chaleur sensible consiste à accumuler de l'énergie thermique dans un corps par accroissement de sa température sans changement d'état. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle à la variation de température et à la quantité de matière concernée. Le coefficient de proportionnalité est la capacité calorifique C_p en J/(kg K).

L'énergie stockée dans un corps de masse m et de capacité thermique massique $C_p(T)$, avec une augmentation de température de T_1 à T_2 est donnée par sa variation d'enthalpie :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} m.C_p(T).dT \quad (1.1)$$

En supposant $C_p(T)$ constante, on obtient la relation suivante :

Chapitre II: Les différents principes de stockage thermique

$$\Delta H = H_2 - H_1 = m.C_p.(T_2 - T_1) \quad (1.2)$$

D'Où :

ΔH : la variation d'enthalpie de corps (J) ;

$C_p(T)$: La capacité calorifique du corps ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$) ;

T_1 est T_2 : sont les différentes températures du corps (K) ;

m : la masse du corps (Kg).

Le tableau suivant, donne la valeur de la capacité calorifique de quelques matériaux utilisés pour le stockage par chaleur sensible :

Tableau 2: Capacité calorifique à pression constante dans les conditions normales de température et de pression de quelques matériaux utilisés pour le stockage par chaleur sensible [6].

Matériau	Phase	$C_p (J.Kg^{-1}.K^{-1})$
Air (sec)	gaz	1005
Air (saturé en vapeur d'eau)	gaz	1030
Aluminium	solide	0897
Azote	gaz	1042
Cuivre	solide	0385
Diamant	solide	0502
Eau	gaz	1850
Eau	liquide	4185
Eau	solide (glace)	2060
Ethanol	liquide	2460
Mercure	liquide	0139

Les matériaux utilisés pour le stockage par chaleur sensible peuvent être :

Chapitre II: Les différents principes de stockage thermique

- ✓ **Gazeux** : vapeur d'eau surchauffée ;
- ✓ **Liquide** : eau, huile de synthèse ou naturelle, sels fondus etc ;
- ✓ **Solide** : béton, roche, métal ...

Le stockage par chaleur sensible peut être réalisé à basse température ou à haute température en fonction de la température du fluide caloporteur requis.

➤ Le stockage à basse température :

L'eau liquide, la roche et le béton sont les matériaux les plus souvent utilisés pour les stockages à température inférieure à 100°C. L'eau a cependant l'inconvénient d'être corrosive. Son utilisation est avantageuse si le fluide de travail est aussi l'eau, comme c'est le cas dans le cumulus utilisé dans les chauffe-eau solaires.

➤ Le stockage à haute température :

Par haute température dans le domaine solaire, on atteint des températures supérieures à 500°C. C'est la gamme de températures qu'on rencontre dans la production d'électricité avec capteurs à concentration. Les matériaux idéaux pour cette gamme de température sont: les sels fondus, l'eau pressurisée, les huiles organiques hautes températures, le béton de haute température, les céramiques réfractaires, ...

II.3.2. Le stockage par chaleur latente:

Ce mode de stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lorsqu'un matériau change d'état (par exemple solide-liquide). La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de froid, avec un rendement d'environ 60%. Cette technique peut être appliquée dans les bâtiments, par l'intermédiaire des Matériaux à Changement de Phase (MCP). Incorporés aux parois, ils servent de régulateur thermique en fonction de la chaleur apportée par le soleil.

L'énergie dégagée par un corps solide pur ayant une température de fusion T_F et pour une variation de température de T_1 à T_2 , telle que : $T_1 < T_F < T_2$, est donnée par la relation suivante :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_F} m.C_P^S(T).dT + m.L_F(T_F) + \int_{T_F}^{T_2} m.C_P^L(T).dT \quad (1.3)$$

Chapitre II: Les différents principes de stockage thermique

Avec :

$C_p^s(T)$ et $C_p^L(T)$: Capacités thermiques massiques respectivement solide et liquide du corps considéré (J.kg/K) ;

$L_F(T_F)$: la variation d'enthalpie lors de la fusion, est dite Chaleur latente (J. Kg⁻¹).

Dans le cas où $C_p^s(T)$ et $C_p^L(T)$ sont constantes on obtient:

$$L_F (H_2 - H_1 = m.C_p^s.(T_F - T_1) + m.L_F(T_F) + m.C_p^L.(T_2 - T_F) \quad (1.4)$$

Avec :

$h^L(T_F)$ et $h^S(T_F)$: respectivement les enthalpies massiques du liquide et du solide à la température d'équilibre T_F .

Le tableau suivant, donne la valeur de la chaleur latente de quelques matériaux utilisés pour le stockage par chaleur latent :

Tableau 3: La chaleur latente de quelques matériaux [6].

Les matériaux	Domaine de température	L_F
Eau ou solution	Sous-ambiante	300 à 335
Paraffines	Ambiante ou subambiante	200
Composés organique	Ambiante ou subambiante	200
Hydrates	Ambiante ou sbambiante	220 à 250

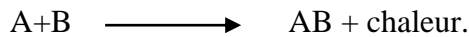
Le choix d'un matériau un changement de phase doit prendre en compte les critères suivants :

- ✓ Chaleur latente plus élevée possible ;
- ✓ Température de changement de phase plus élevée possible ;
- ✓ La conductivité du matériau ;
- ✓ Un moyen facile de contenir le matériau et le mettre en contact thermique avec le fluide colporteur.

Chapitre II: Les différents principes de stockage thermique

II.3.3. Le stockage par réaction chimique :

Le principe du stockage de chaleur par réaction chimique est:



La chaleur de réaction est libérée pour le chauffage des logements ou d'autres usages. La capacité de stockage dépend de la chaleur de la réaction.

Pour ce type de stockage, il est nécessaire que les réactions chimiques en jeu soient totalement réversibles.

Dans les applications solaires la chaleur produite par le capteur solaire est utilisée pour exciter une réaction chimique endothermique. Si cette réaction est totalement réversible, de la chaleur peut être récupérée complètement par la réaction inverse. Souvent, des catalyseurs sont nécessaires pour libérer la chaleur.

Les avantages fréquemment cités du stockage d'énergie thermique par réaction sont leurs fortes densités de stockage de l'énergie et une durée indéfiniment longue de stockage à température ambiante. Leurs inconvénients peuvent comprendre: la complexité, des incertitudes sur les propriétés thermodynamiques des composants de la réaction et de la cinétique de réactions dans le cadre d'un large éventail de conditions d'exploitation, un coût élevé, la toxicité et l'inflammabilité. Bien que le stockage d'énergie thermique par des réactions ait plusieurs avantages d'un point de vue thermodynamique, leur développement est à un stade très amont. À ce jour, aucun prototype viable n'a été construit. Le Tableau 3 présente plusieurs réactions qui ont été étudiées pour être utilisées comme matériaux de stockage chimiques [Van Berkel J. 2005].

Tableau 4: Quelques matériaux utilisés dans le stockage chimique [7].

Milieu	Reaction	Densité d'énergie	Temperature de Reaction
Ammonia	$NH_3 + \frac{3}{2}H_2 \leftrightarrow \frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2$	67 kJ/mol	400–500°C
Hydroxides, e.g.	$Ca(OH)_2 \leftrightarrow CaO + H_2O$	3 GJ/m ³	500°C
Calcium carbonate	$CaCO_3 \leftrightarrow CaO + CO_2$	4.4 GJ/m ³	800–900°C
Iron carbonate	$FeCO_3 \leftrightarrow FeO + CO_2$	2.6 GJ/m ³	180°C
Metal hydrides	$Metal \cdot xH_2 \leftrightarrow metal + yH_2 + (x - y)H_2$	4 GJ/m ³	200–300°C
Magnesium oxide	$MgO + H_2O \leftrightarrow Mg(OH)_2$	3.3 GJ/m ³	250–400°C

Chapitre II: Les différents principes de stockage thermique

II.4. Critères d'un bon système de stockage:

Les qualités d'un Bon système de stockage sont dès lors [8]:

- ✓ Quantité maximale de chaleur stockable par unité de volume ;
- ✓ Pertes thermiques faibles ;
- ✓ Coefficient d'échange thermique favorable ;
- ✓ Toxicité et risques d'incendie minimaux ;
- ✓ Réversibilité sur un grand nombre de cycles (pour les matériaux à changement de phase) ;
- ✓ Matériau de base bon marché;
- ✓ Matériau compatible avec des réservoirs économiques.

II.5. Conclusion:

On peut conclure que il y a deux type de stockage, stockage thermique sensible qui consiste à accumuler de l'énergie thermique dans un corps par accroissement de sa température sans changement d'état, le rendement de ce type de stockage ne dépasse pas 40% , mais le stockage thermique latente ce rendement d'environ de60% qui est basé sur l'énergie mise en jeu lorsqu'un matériau change d'état.

Chapitre III: les systèmes de stockage solaire

III.1. Introduction:

On désigne par un système de stockage solaire une installation assurant le transfert de l'énergie solaire captée, à travers un certain nombre de composants (Figure 5).

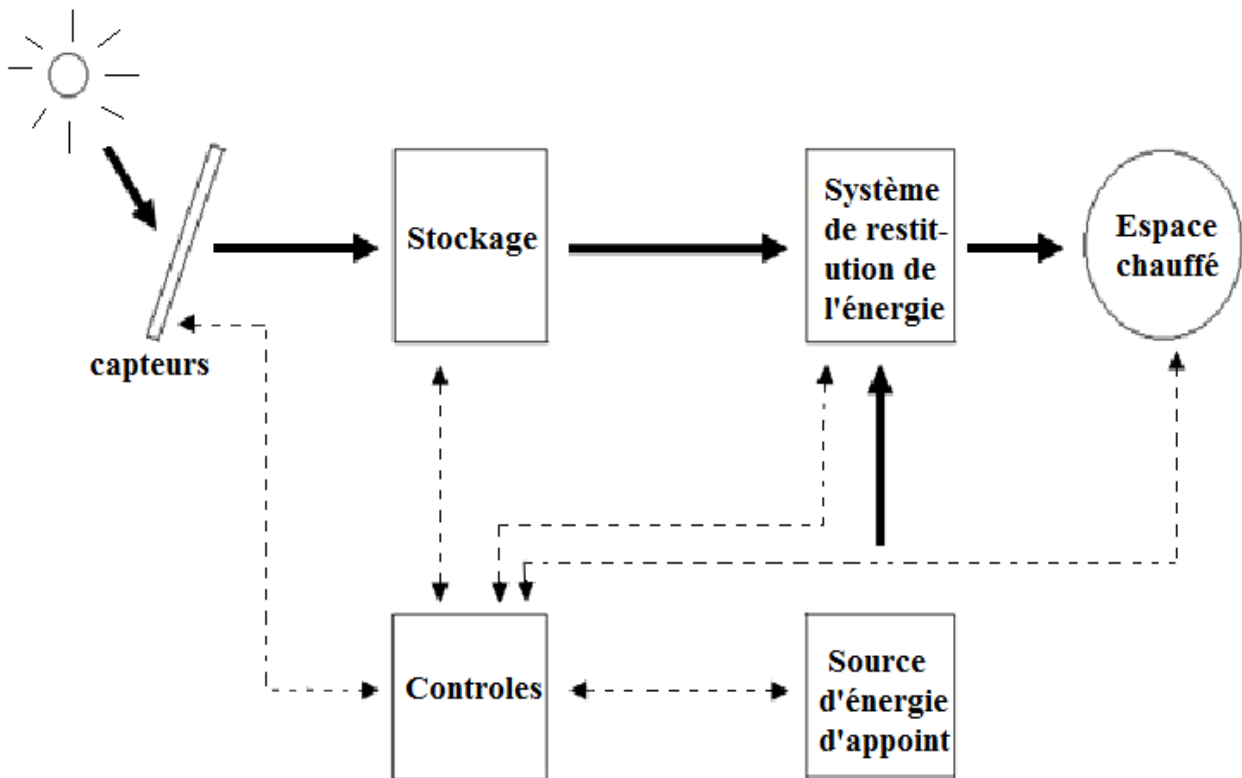


Fig. 5: Système de stockage solaire [9].

III.2. Quelques Systèmes de stockage solaire:

III.2.1. Applications basses températures:

III.2.1.1. Ballon d'eau sanitaire:

La boucle d'eau chaude sanitaire apporte un confort non négligeable à une installation sanitaire. En effet, avec une boucle d'eau chaude sanitaire, dès que vous ouvrez un robinet d'eau chaude, celle-ci est immédiatement disponible.

Une boucle d'eau chaude sanitaire est recommandée pour les installations qui comportent un préparateur E.C.S "Eau Chaude Sanitaire", appelé aussi ballon d'eau chaude et qui ont les points d'eau "baignoires, douches, lavabos, évier,..." éloignés du lieu de stockage de l'eau chaude sanitaire.

Chapitre III: les systèmes de stockage solaire

Une boucle d'eau chaude sanitaire doit être prévue dès la construction ou la rénovation d'une maison car elle nécessite l'installation d'un tuyau supplémentaire pour le retour de l'eau entre le ballon d'eau chaude et chaque point de soutirage. Cette tuyauterie peut être commune à plusieurs points de soutirage. On peut également faire une boucle d'eau chaude sanitaire uniquement sur les points d'eau les plus éloignés du préparateur ECS (figure 6).

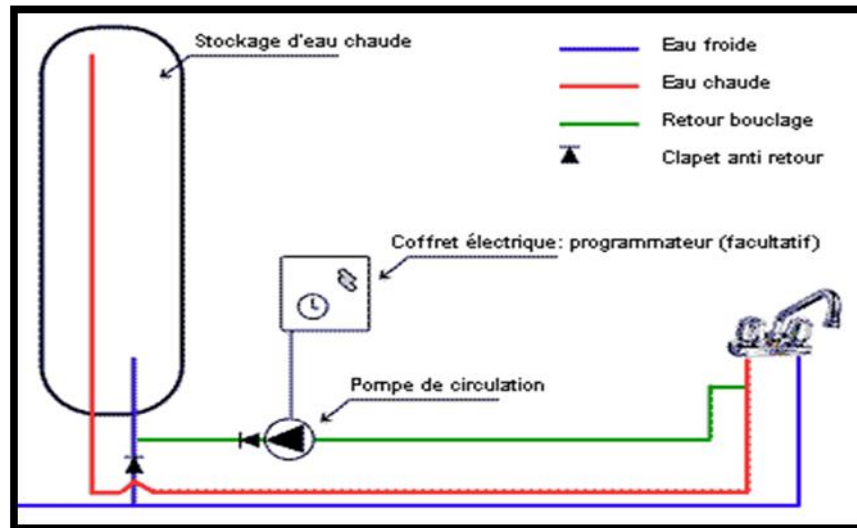
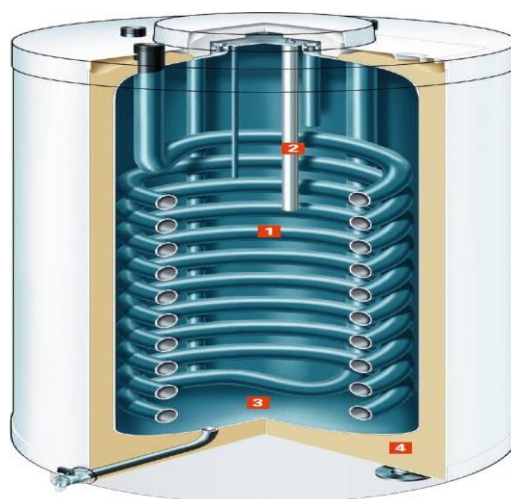


Fig. 6 : Schéma descriptif d'une boucle d'eau chaude sanitaire [10].

La figure ci-après présente les principaux composants d'un ballon de stockage sanitaire :



1. Cuve et serpentin en acier, avec émaillage Céraprotect ;
2. Anode de protection au magnésium ou à courant imposé ;
3. Montée en température de la totalité de l'eau contenue dans le ballon grâce au serpentin descendant jusqu'au fond ;
4. Isolation performante en mousse de polyuréthane rigide sur toute la surface du ballon.

Fig.7: les composants de ballon sanitaire [10].

Chapitre III: les systèmes de stockage solaire

III.2.1.2. Le ballon de stockage à stratification:

La densité de l'eau varie avec sa température. De manière simplifiée, plus l'eau est froide, plus elle est dense. « Un litre d'eau froide, c'est plus lourd qu'un litre d'eau chaude ». A cause de cette propriété, des eaux chaudes et froides qui cohabitent dans un contenant (casserole, ballon d'eau chaude, mais aussi lac ou océan) ont tendance à rester séparées en couches (en strates d'où le nom de stratification), les eaux chaudes au dessus, les eaux froides dessous. L'eau la plus froide reste au fond, puis viennent au dessus les eaux plus tièdes, les couches d'eaux chaudes étant au dessus [11].



Fig.8: Phénomène de stratification dans l'eau.

Le ballon solaire doit généralement pouvoir stocker l'équivalent de 30 à 40 % d'une journée de consommation d'eau chaude (à 60°) de l'établissement. La capacité fréquente des plus grands ballons est de 5 000 l, mais le recours à plusieurs ballons de stockage est en général déterminé par la place prise par les échangeurs internes de grande puissance.

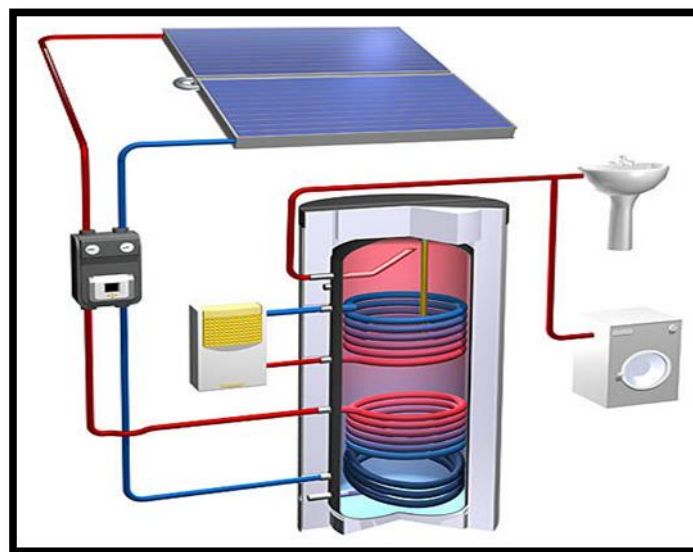


Fig.9: Installation d'un ballon de stockage à stratification [11].

III.2.1.3. Le plancher chauffant direct:

Le plancher solaire direct (PSD) est une technique écologique utilisant l'énergie solaire pour assurer une partie des besoins de chauffage d'une habitation grâce à des capteurs solaires qui eux, chauffent un fluide caloporteur (figure 10).

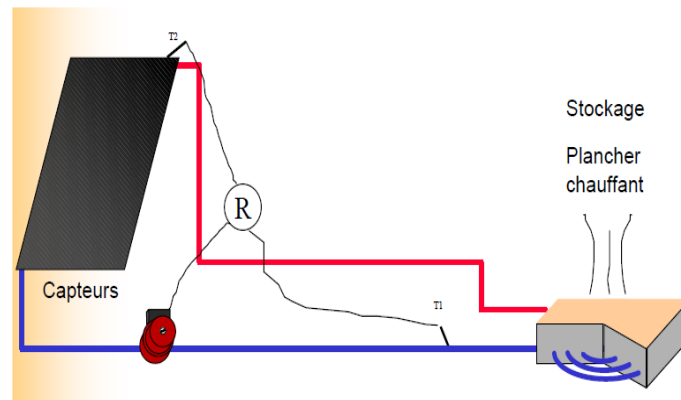


Fig.10: Schéma d'un plancher chauffant direct.

Le fluide caloporteur est réchauffé dans les capteurs solaires et circule directement dans une dalle en béton d'environ 15 cm d'épaisseur (plancher chauffant) qui stocke la chaleur. Grâce à l'inertie de la dalle la chaleur est stockée durant la journée et peut être restituée en soirée ou sur les 2 jours suivants [1].

En effet, sur 100 m² de plancher chauffant, on peut arriver à stocker jusqu'à 7000 litres d'eau tout en gardant une température de sol inférieure à 28°C ce qui permet d'éviter de créer des problèmes de circulation sanguine dans les jambes des résidents.

Le PSD permet aussi de produire une partie d'eau chaude sanitaire (ECS). C'est donc un système solaire combiné (SSC) car il assure simultanément le chauffage et la production de l'eau chaude.

L'efficacité de cette technique dépend de la situation géographique de l'habitation, mais ne permet pas en général de couvrir tous les besoins en chauffage et en eau chaude. C'est pour cette raison que le PSD est souvent combiné avec un système d'appoint qui permet de pallier l'insuffisance en énergie solaire. L'énergie d'appoint peut être produite par une installation intégrée au système solaire ou par une installation complètement indépendante du PSD comme les convecteurs électriques, cheminée, poêle à bois, chaudière, etc.

Chapitre III: les systèmes de stockage solaire

Dans les deux cas, il faut réguler l'utilisation de ces installations pour pouvoir optimiser l'énergie solaire (figure 11).

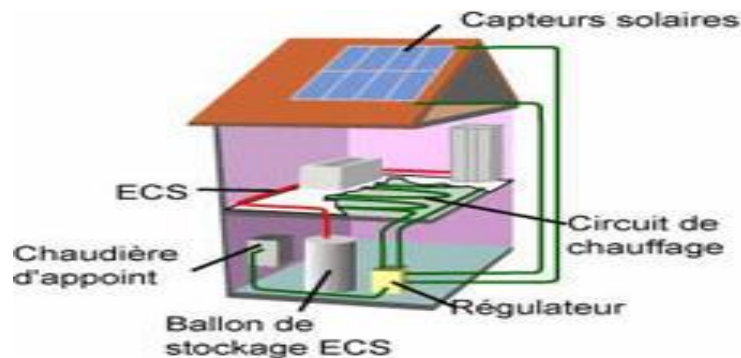


Fig.11: Schéma d'un système solaire combiné (PSD + ECS).

III.2.2. Applications hautes températures:

III.2.2.1. Système de stockage à sel fondu:

Dans les Centrales thermiques à tour, on utilise de nombreux miroirs qui concentrent le rayonnement solaire sur une chaudière placée en haut d'une tour. Les miroirs ou "héliostats" sont conçus pour tourner avec le soleil et ainsi, réfléchir les rayons du soleil sur le foyer de la chaudière. Le rayonnement solaire doit être dirigé vers le foyer en haut de la tour avec une grande précision afin de concentrer l'énergie thermique pour assurer des températures près de 600°C (figure 12).



Fig.12: Centrale thermique à tour [12].

Chapitre III: les systèmes de stockage solaire

Le stockage de la chaleur produite par cette centrale solaire est assuré par un accumulateur de chaleur développé par l'Institut de thermodynamique technique du centre de recherche aérospatial allemand (DLR) .

L'accumulateur à sel de nitrate est constitué de plusieurs couches de graphite et de matériaux caractérisés par un changement de phase qui permettent un stockage thermique par chaleur latente (figure 13). Installé sur la plateforme de recherche solaire d'Almeria en Espagne, l'appareil délivre une puissance de 100 kW avec des températures de vapeur d'eau dépassant les 200 °C. Il est capable de stocker la chaleur pendant 10 heures et d'en restituer jusqu'à 90 %. Les chercheurs du DLR souhaitent appliquer leur concept de stockage à une installation de 1 MW et atteindre des températures de stockage de plus de 300 °C.



Fig.13: Accumulateur de stockage à sel fondu [12].

III.2.2.2. Accumulateur à Béton:

Développé toujours par le centre de recherche aérospatial allemand (DLR), ce système de stockage représente une solution très économique (figure 13).



Fig.14: Module accumulateur à béton [12].

Chapitre III: les systèmes de stockage solaire

Ceci a déjà été démontré avec succès en Espagne, sur la Plataforma Solar de Almería, où le DLR exploite des installations solaires expérimentales.

Grâce au principe de montage du système de stockage à partir de modules élémentaires, l'accumulateur en béton peut être adapté à n'importe quelle puissance. Il est non seulement approprié pour des applications dans des centrales CSP, mais il trouve également sa place pour le stockage de la chaleur d'échappement dans l'industrie par exemple ou encore dans le domaine de la cogénération.

Chapitre IV: Etude d'un système de stockage à lit de pierre

IV.1. Introduction:

Cette étude concerne le comportement thermique d'un lit de pierre lors d'un stockage thermique. Pour cette raison on a choisi un système destiné au séchage de bois. Le séchoir solaire à bois monté en série à une cuve de stockage thermique est alimenté par un capteur solaire.

Dans cette étude un modèle numérique monodimensionnel décrivant tous les modes de transferts thermiques impliqués a été établi. Les conditions d'entrée thermiques de l'air instationnaires dans le système ont été prises en compte.

IV.2. Description du modèle:

Le système étudié est présenté sur la figure ci-après:

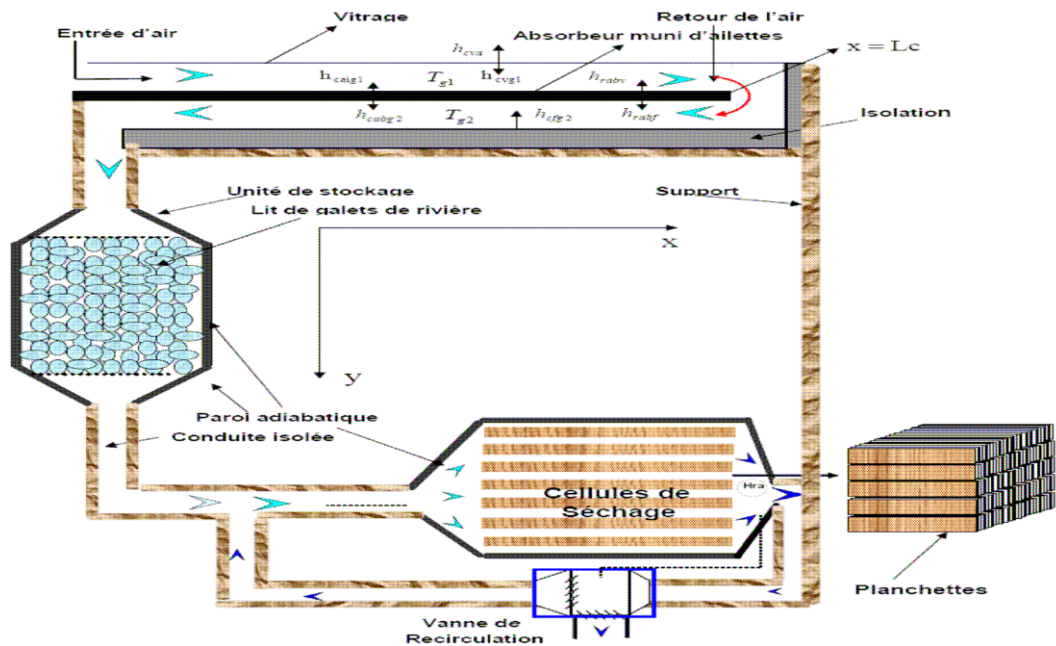


Fig.15: Séchoir solaire à bois avec cuve de stockage [13].

La modélisation consiste à mettre en évidence les équations gérant les différents composants de système.

IV.3. Bilan thermique de l'unité de génération de l'air chaud:

L'unité de génération de l'air chaud est un capteur solaire à air à double passe mené d'ailettes pour augmenter la surface d'échange.

Chapitre IV: Etude d'un système de stockage à lit de pierre

En faisant un bilan thermique pour chaque composant du collecteur, on obtient:

Bilan thermique de la vitre :

$$A_c E_i \alpha_v + h_{rabv} \cdot A_c \cdot (T_{ab} - T_v) + h_{cvg1} A_c (T_{g1} - T_v) - h_{rva} \cdot A_c \cdot (T_v - T_a) - h_{cva} \cdot A_c \cdot (T_v - T_a) = 0 \quad (4.1)$$

Bilan thermique dans le fluide caloporteur de la conduite supérieure :

$$D \cdot C_{pg} \frac{dT_{g1}}{dx} = a \cdot h_{cvg1} (T_v - T_{g1}) + h_{caig1} \cdot [N_{ai} \cdot \eta_1 \cdot L_{ai} + \frac{S_r}{L}] \cdot (T_{ai} - T_{g1}) \quad (4.2)$$

Bilan thermique de l'absorbeur :

$$A_c \cdot E_i \cdot \tau_v + h_{caig1} \cdot [N_{ai} \cdot \eta_1 \cdot S_{ai} + S_r] \cdot (T_{g1} - T_{ai}) + h_{cabg2} A_c \cdot (T_{g2} - T_{ab}) - h_{rabv} \cdot A_c \cdot (T_{ab} - T_v) - h_{rabf} \cdot A_c \cdot (T_{ab} - T_f) = 0 \quad (4.3)$$

Bilan thermique dans le fluide caloporteur de la conduite inférieure :

$$-D \cdot C_{pg} \frac{dT_{g2}}{dx} = a \cdot h_{cfg2} (T_f - T_{g2}) + a \cdot h_{cabg2} (T_{ab} - T_{g2}) \quad (4.4)$$

Bilan thermique dans le fond isolant :

$$T_{is} = \frac{h_{cfa} \cdot T_a - h_{cfg2} \cdot T_{g2}}{h_{cfa} + h_{cfg2}} \quad (4.5)$$

Les conditions aux limites associées sont : en $x = 0$; $T_{g1} = T_a$ et en $x = Lc$; $T_{g1} = T_{g2}$

IV.4. Bilan thermique dans l'unité de stockage:

L'établissement du modèle du stock repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ L'isolation du stockage est supposée suffisante pour que les pertes thermiques latérales soient négligeables durant les périodes de transfert thermique entre les solides et le fluide.
- ✓ La vitesse de l'air est uniforme dès l'entrée dans le milieu du stockage.
- ✓ Le phénomène est unidirectionnel.
- ✓ Le stock est un milieu poreux remplis de matériau granulaire à géométrie sphérique uniforme.

Les hypothèses précédentes conduisent à:

$$\rho_g C_{pg} V_g \frac{\partial T_f}{\partial y} = \lambda_{eff}^v \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + \frac{A_s \cdot h_s}{\epsilon_1} (T_s - T_f) \quad (4.6)$$

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{eff}^s \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} - \frac{A_s \cdot h_s}{1 - \epsilon_1} (T_s - T_f)$$

Avec:

$$\begin{cases} T_f(y,0) = T_s(y,0) = T_0 \\ \lambda_{\text{eff}}^v \frac{\partial T_f}{\partial y}(L_s, t) = h_s(T_f(0,t) - T_s(0,t)) = \lambda_{\text{eff}}^s \frac{\partial T_s}{\partial y}(L_s, t) \\ T_s(0,t) = T_f(0,t) = T_{g2}(x = L_c, t) \end{cases} \quad (4.7)$$

IV.5. Méthode de résolution:

Les équations gouvernantes de l'unité de génération d'air chaud ont été résolues par la méthode de Runge Kutta D'ordre 4.

Les équations de transfert obtenues dans le lit épais ont été résolues à l'aide d'une méthode aux différences finies implicites associée à la technique de volume de contrôle. Le système algébrique obtenu a été résolu par la méthode itérative de Gauss Seidel [13].

IV.6. Résultats de simulation:

IV.6. 1. Evolution de la température de l'air dans le capteur:

Les figures (16) et (17) montrent l'évolution de la température de l'air le long de son parcours dans la partie supérieure et inférieure du capteur double circulation munie d'ailettes.

Nous notons à 14h00 TSV que la température de l'air au point ($x = L_c$) du capteur avoisinait les 70°C et que celle de la sortie ($x = 0$ en bas) avoisinait les 116°C . La principale constatation est l'écart important entre la température de retour du fluide au point ($x = L_c$) et la température de sortie ($x = 0$). Cet écart est de l'ordre de 46°C à 14h00 TSV [13].

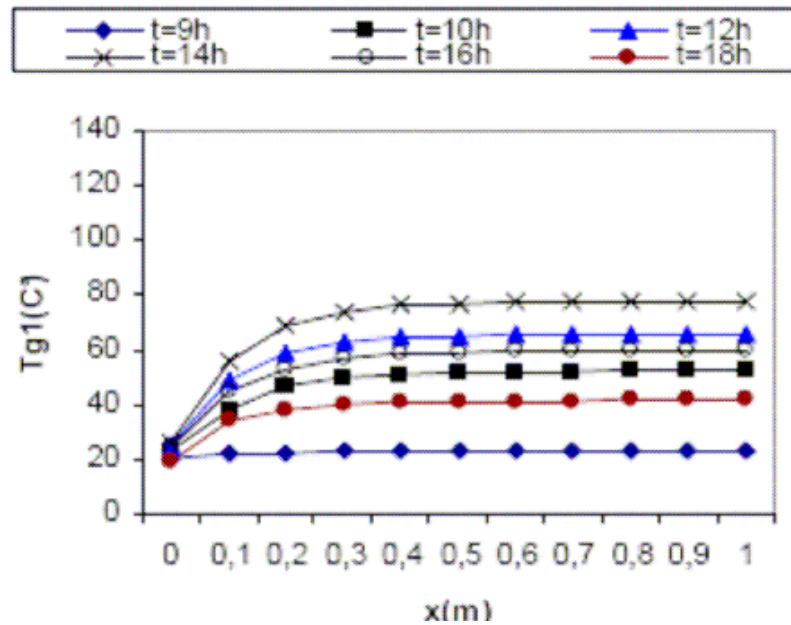


Fig. 16 : Evolution de la température de l'air à l'aller dans le capteur en fonction de l'abscisse : $D=0.028\text{Kg/s}$, $Lc=1\text{m}$, $V=1\text{m/s}$.

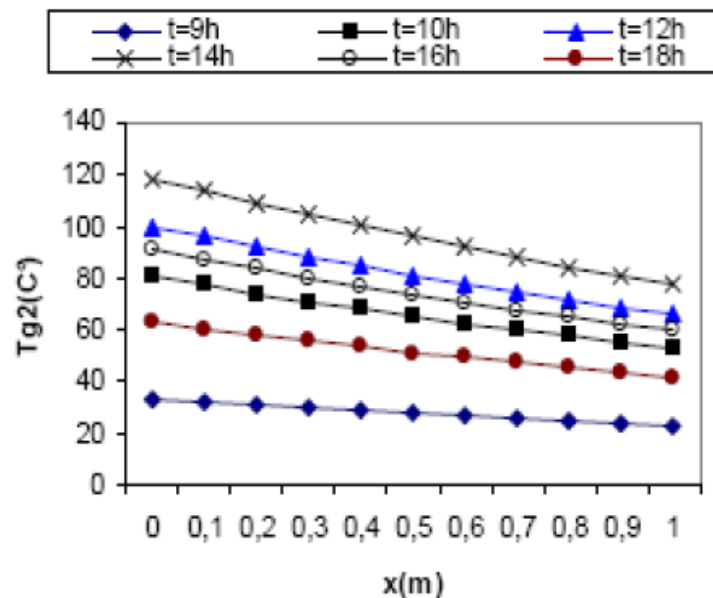


Fig. 17 : Evolution de la température de l'air au retour dans le capteur en fonction de l'abscisse : $D=0.028\text{Kg/s}$, $Lc=1\text{m}$, $V=1\text{m/s}$.

IV.6. 2. Evolutions des températures dans l'unité de stockage:

Les figures (18) et (19) présente les évolutions respectives de la température de l'air, de celle du matériau du stockage en fonction du temps pour différents niveaux du lit. On observe une montée en température pour les premières tranches entre 6h00TSV et 14h00TSV.

Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en raison de l'augmentation de la densité du flux solaire incident dans la matinée, la température de l'air à la sortie du capteur est constamment croissante.

Pour les autres tranches, cette montée en température s'effectue d'autant plus lentement que l'on s'éloigne de l'entrée du stock. Le modèle mathématique traduit ainsi l'effet de l'inertie thermique du volume de stockage.

Par contre dans l'après midi, la diminution progressive de la température de l'air en sortie du capteur, provoque un refroidissement de la zone d'entrée du stock et le fluide traverse le stock de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide. La zone la plus chaude cède peu à peu toute son énergie stockée au profit de la zone la plus froide. On obtient alors à la sortie du stock, une température du fluide qui augmente progressivement au cours du temps pour atteindre un maximum aux alentours de 18h00TSV et puis diminuer à nouveau.

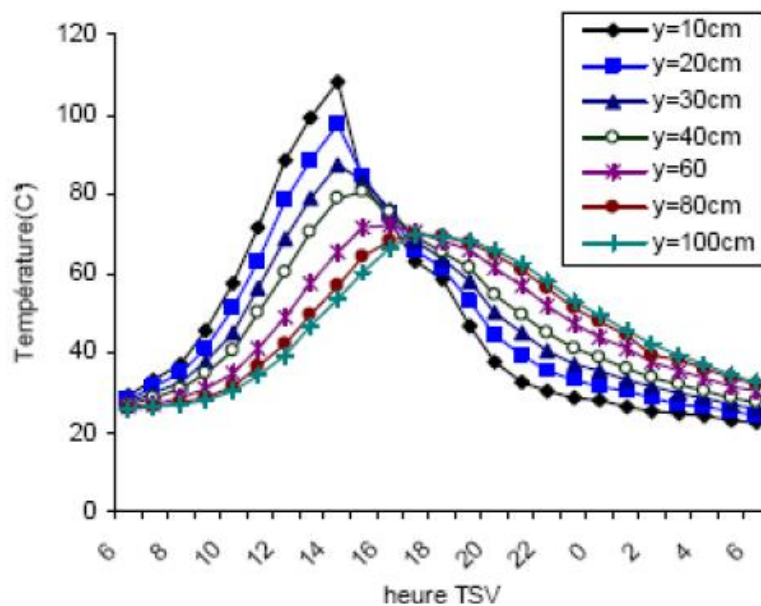


Fig. 18 : Evolution de la température de l'air dans l'unité de stockage à différents niveaux du lit en fonction du temps : $D=0.028\text{Kg/s}$, $L_c=1\text{m}$, $V=1\text{m/s}$.

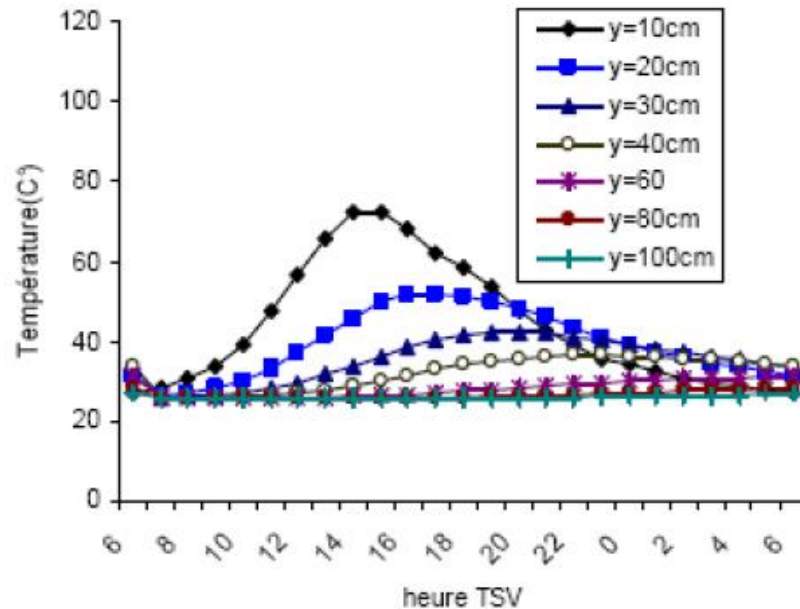


Fig. 19 : Evolution de la température du matériau de stockage à différents niveaux du lit en fonction du temps : $D=0.028\text{Kg/s}$, $L_c=1\text{m}$, $V=1\text{m/s}$.

IV.7. Conclusion:

Cette étude a porté sur la simulation numérique des performances d'une cuve de stockage thermique couplée à un capteur solaire double circulation d'air muni d'ailettes. Une telle caractérisation est très intéressante car elle permet la bonne compréhension des mécanismes ayant lieu dans les unités étudiées pour le dimensionnement du séchoir utilisé.

La modélisation fine des transferts de chaleur dans les principales composantes du capteur solaire et dans l'unité de stockage a montré que l'usage des ailettes dans l'absorbeur ainsi que la double circulation demeure des moyens efficaces pour l'amélioration des performances d'un capteur solaire couplé à une unité de stockage.

Conclusion générale

Le stockage de chaleur est devenu aujourd'hui une nécessité qui s'impose à la politique mondiale de l'énergie.

En effet, la demande croissante de cette ressource, qui est devenue vitale vue l'importance qu'elle tient dans notre quotidien, impose cette technologie comme vecteur porteur de toute initiative entrepris dans ce cadre.

L'énergie solaire reste la forme la plus exploitée dans le domaine du stockage. Ce dernier peut s'effectuer sous diverses formes, surtout sous forme de chaleur sensible (eau, huile, béton, céramique, sable, pierre...), sous forme de chaleur latente (eau, paraffines, sels,...) ou de réaction chimique.

Le choix étant en fonction des besoins économiques et techniques ainsi que de la durée du stockage désirée. Le choix d'un matériau de stockage dépend de la durée de stockage (court ou long terme), ainsi que l'application associé au stockage (production de l'électricité, chauffage, climatisation, séchage...).

Pour les applications liées à la production des hautes températures, le béton, les sels fondus sont les matériaux les plus utilisés, par contre pour les applications liées à l'habitat le sol, le sable, les pierres de galet ainsi que l'eau sont avantageux.

Donc, vue l'importance du stockage thermique il est amplement justifié de concentrer les efforts de recherche pour améliorer le rendement des systèmes actuels et de chercher de nouvelles technologies de stockage.

Les scientifiques sont toujours à la recherche de nouveau matériaux de stockage ayant un caractère écologique et économique.

Bibliographique

- [1]: A. LAGHZAoui, D. PEERHOSSAINI Donia, STOCKAGE DE CHALEUR : ENERGIE SOLAIRE ET AUTRES APPLICATIONS [En ligne] 2009 -2010 (20/04/2013) « <http://cdoc.ensm-douai.fr/EBs/EB-Laghzaoui-Peerhossaini.pdf>».
- [2]: A. A. Sfeir, G. Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires - Applications à l'habitat – Technique et documentations, 1981, pp.265-269
- [3]: C. Ngô, L'énergie : ressources, technologies et environnement, DUNOD, 2ème édition, 2004.
- [4]: Claude Aafort, Le défi énergétique du 21ème siècle , Economie et Politique, mars-avril 2006, pp.32-37.
- [5]: H. Lahmidi, Stockage d'énergie solaire par procédé à sorption solide-gaz : application au chauffage et à la climatisation, Thèse de Doctorat de l'Université de Perpignan, 2005.
- [6]: Ngô, C., Analyse et perspectives énergétiques mondiales, Technique de l'Ingénieur, BE 8 515 : 1-14, 2008.
- [7]: B.Norton, and S.D. Probert, Diurnal performance of thermosyphonic solar water heaters- An empirical prediction method, Solar Energy, 39, 257-265, 1987.
- [8]: R.Bernard-Menguy , M . Schwartz , Le rayonnement solaire Conversion thermique et Application. Technique et Documentation, 2ème Edition, 1980.
- [9]: Ballons d'eau chaude sanitaire VITOCCELL,
« http://www.viessmann.fr/etc/medialib/internet-fr/pdf/pdf_doc_couleur/pdf_doc_couleur_2011/vitocell.Par.80890.File.File.tmp/Vitocell.pdf »
- [10] : « [http://www.apper-solaire.org/Pages/Fiches/Ballons/Stratification %20par%20RICHARDEL/index.pdf](http://www.apper-solaire.org/Pages/Fiches/Ballons/Stratification%20par%20RICHARDEL/index.pdf) ».
- [11] : « http://www.batichauffe.info/pages/Panneau_Solaire_Thermique_oise_1263383.html ».
- [12]: « <http://www.leguידeduchauffage.com/boucle-d-eau-chaude-sanitaire.html> ».
- [13] : A. KHOUYA, J. BENABDELOUHAB, A. DRAOUI, Simulation numérique des transferts thermiques dans un système de séchage solaire de bois, 13èmes Journées Internationales de Thermique (2007).

Résumé

Parmi les applications les plus prometteuse de l'énergie solaire thermique dans l'habitat, le stockage de la chaleur dans le sol apparait une alternatif économique et écologique. Ce travail représente une recherche bibliographique sur, les différents principes de stockage de l'énergie, les dispositifs de stockage thermique et les applications associées à l'énergie solaire.

En fin une synthèse permettant de déterminer les systèmes les plus rentable utilisés actuellement dans le bâtiment.

Mots clés: Energie solaire, Stockage sensible, bâtiment, design.

Abstract

Among the most promising applications of the thermal solar energy in the housing environment, the heat storage appears like an economic and ecological alternative.

This work reports a literature search on the state of thermal storage of energy and particularly the storage of solar energy.

We present the various principles of energy storage, the devices of thermal storage and the applications associated to the solar energy.

At the end a synthesis allowing to determine the most efficient systems used actually in the building.

Key words: Solar energy; Sensitive storage; Building; Design.