



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Option : CONVERSION THERMIQUE

Thème :

Stockage inter-saisonnier

Par :

Melle CHAUCHE Sadia

Soutenu le 28/09/2016 devant le jury compose de :

DoumazToufikMAA Président

SemmarDjaafarProfesseur à Université de Blida1Examineur

OualiRandhaMAAExamineur

Hamid Abdelkader Professeur à Université de Blida1

Promoteur

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements à mon promoteur professeur **Hamid** pour m'avoir guidé et orienté durant mon travail.

Je tiens également à remercier tous les enseignants qui m'ont aidé le long de mon travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à monsieur le chef département des énergies renouvelable Mr **Merzouk** et tous les employés de la scolarité.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui m'ont prêté main forte de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère belle-mère et mon cher père qui
m'ont toujours encouragé durant mon travail.

À mes frères et mes sœurs

À mes très chères amies Hadjer et Dounia

À tous les membres de ma famille

À tous mes collègues

À tous ceux que j'aime

Résumé

Résumé :

Le stockage d'énergie permet l'adaptation dans le temps entre l'offre et la demande en énergie. Il concerne aussi bien les demandes en chaleur ou en froid. Il est donc nécessaire de développer des systèmes de stockage permettant de gérer d'une façon efficace l'énergie produite.

Donc le but de ce travail porte sur l'étude et la simulation d'un système de stockage thermique inter-saisonnier. Relié à des collecteurs solaires, destiné à satisfaire les besoins en chauffage et l'eau chaude sanitaire dans le site de Blida.

Le dimensionnement des composants de notre système est déterminé à partir des besoins de chauffage du bâtiment.

Le système a été simulé à l'aide d'un logiciel TRNSYS.

Les résultats montrent que le système est satisfait.

Mots clés : Stockage d'énergie- Stockage inter saisonnier- TRNSYS.

Abstract:

The Storage of energy allows the temporal adaptation between supply and in energy. It as well relates to the demands in heat or cold. It is thus necessary to develop storagesystems making it possible to manage in effective way produced energy.

Thus the goal of this work concerns the study and the simulation of a Thermal storagesystem inter seasonalworker. Connected to solarcollectors, intended to satisfy the requirements in heating and sanitary warm water in the site of Blida.

The dimensioning of the components of our system is given starting from the needs for heating of the building.

The system was simulated using as ofware TRNSYS.

The results shows that the system is satisfied .

Keywords: Storage of energy –interseasonalstorage–TRNSYS.

المخلص:

يقوم تخزين الطاقة بين العرض والطلب و تتعلق ايضا بطلب الحرارة أو البرودة. ولذا فمن الضروري بوضع أنظمة التخزين لإدارة الطاقة الفعالة المنتجة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة محاكاة نظام التخزين للحرارة الموسمية متصلة بالألواح الشمسية، والمصممة لتلبية احتياجات التدفئة والمياه الساخنة في الموقع بالبلدية.

يتم تحديد أبعاد مكونات النظام من احتياجات التدفئة في المبنى.

تم محاكاة النظام باستخدام برنامج ترانسيزيس

النتائج كانت مقبولة.

كلمات البحث: تخزين الطاقة- التخزين الموسمي- ترانسيزيس.

Aujourd'hui, la plupart des secteurs résidentiels répondent à des charges thermiques en utilisant des systèmes qui produisent ou évacuent la chaleur lorsque les charges sont présentes. Des systèmes de stockage d'énergie thermique dans les différents secteurs permettraient de répondre aux besoins de chauffage et de refroidissement en utilisant de l'énergie produite à un tout autre moment. Ces derniers peuvent être conçus pour la charge et la décharge de l'énergie sur trois types de durées: diurne, hebdomadaire et saisonnière.

Le stockage d'énergie thermique inter-saisonnier permet à un secteur, l'utilisation de la chaleur recueillie durant l'été pour chauffer le bâtiment pendant l'hiver, ou l'utilisation du froid recueilli au cours de l'hiver pour refroidir le bâtiment en été. Par rapport aux systèmes de stockage diurne, ils nécessitent un plus grand volume parce que la quantité d'énergie à stocker est grande.

Les systèmes sont constitués de plusieurs éléments: la source chaude (ou froide), les systèmes d'échange de chaleur, le système de distribution de la chaleur, le matériau de stockage thermique, le tout lié aux charges thermiques du secteur. Une question clé dans la conception d'un système de stockage d'énergie thermique est sa capacité thermique - la quantité d'énergie qu'il peut stocker et fournir.

Beaucoup de méthodes et de systèmes ont été développés pour les systèmes de stockage d'énergie thermique. Les procédés de stockage d'énergie thermique peuvent être classés selon leur mécanisme de stockage : le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente, le stockage par thermochimique.

Cette étude s'inscrit dans une volonté d'apporter des connaissances nécessaires pour les différentes technologies de stockage thermique saisonnier. Comprendre son comportement thermique, le dimensionner et le simuler. Il s'agit dans un premier temps de dimensionner le système en commençant par le bilan thermique de bâtiment et ensuite l'échangeur de chaleur et enfin faire un bilan thermique sur la cuve de stockage.

Le présent mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués jusqu'à présent. Pour ce faire une littérature riche portant sur plusieurs références bibliographiques été consultée et exploitée. Il porte aussi des généralités sur les différentes modes et systèmes de stockage thermique.

Après avoir choisi le système de stockage qui est le stockage enterré en passera au second chapitre qui propose la description détaillée du bâtiment à l'étude avec les résultats obtenus à partir des calculs statique et le dimensionnement d'échangeur de chaleur et la cuve de stockage et enfin un bilan thermique est réalisé.

Le troisième chapitre porte sur la simulation du système de stockage sous le logiciel TRNSYS avec ses différentes interprétations et discussions des résultats.

INTRODUCTION GENERALE

On terminera notre travail par une conclusion générale.

1.1. Introduction :

Le stockage est un moyen très important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie.

Cette étude bibliographique s'inscrit pour adapter des connaissances nécessaires pour le développement de la technologie de stockage thermique saisonnier. Ainsi que le comportement des différents systèmes de stockage thermique saisonnier, et enfin établir un état de l'art des modes de stockage d'énergie thermique connus à ce jour. Ces recherches sont orientées vers la sélection de systèmes adaptés au stockage à longue durée.

1.2. Concept du stockage de l'énergie : [1]

Le stockage thermique est une technologie qui permet de stocker de l'énergie thermique par le chauffage ou le refroidissement d'un milieu de stockage, et de rendre cette énergie disponible ultérieurement. Que ce soit pour des applications industrielles, commerciales ou résidentielles, un système de stockage thermique convenablement dimensionné et installé a pour avantages de baisser les coûts d'opération, de réduire la taille des équipements de chauffage ou de climatisation et d'améliorer la flexibilité d'opération.

1.3. L'intérêt de stockage : [2]

La variabilité de l'énergie solaire incidente nécessite son stockage dès qu'il faut adapter sa production à sa consommation. Par définition «stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante pour la récupérer quand c'est nécessaire. L'intérêt du stockage est donc, de différer la disponibilité de l'énergie solaire surtout pour les énergies renouvelables.

1.4. Les différents modes de stockage thermique :

1.4.1. Stockage par chaleur sensible : [3]

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau. Si h est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice i à un état final noté avec l'indice f est :

$$Q = m (h_f - h_i) \quad [\text{J}] \quad (1.1)$$

m : est la masse du matériau [kg].

h_i : est l'enthalpie massique initiale [J kg⁻¹].

h_f : est l'enthalpie massique finale [J kg⁻¹].

Si la capacité thermique massique du matériau C_p (J kg⁻¹ K⁻¹) est constante, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire:

$$Q = m C_p (T_f - T_i) \quad [\text{J}] \quad (1.2)$$

T_i : est la température initiale [K].

T_f : est la température finale [K].

Il est donc utile d'utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. Mais ces matériaux doivent avoir d'autres propriétés comme une stabilité à long terme lors des cycles thermiques, la compatibilité avec le récipient de stockage et également un coût raisonnable.

Selon l'état physique du matériau de stockage, le stockage par chaleur sensible a deux variantes:

- le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide.
- le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide.

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1: Propriétés de quelques matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C. [4]

Matériau	Densité Kg/m ³	Chaleur spécifique	Capacité thermique (J/m ³ K)
Argile	1458	879	1.28
Brique	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

1.4.1.1. Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide: [5]

Les matériaux liquides sont de bons candidats pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible. En effet, leur état liquide permet généralement une meilleure intégration au système d'échange de chaleur. De plus, la vitesse de restitution de la chaleur est généralement plus élevée due aux effets convectifs qui se produisent à l'intérieur du liquide. Cette caractéristique spécifique aux matériaux liquides leur procure par contre une plus grande autodécharge, résultant en une plus faible autonomie pour une puissance donnée. Les principaux liquides utilisés sont l'eau et les huiles thermiques.

- **Le stockage par l'eau :** [3]

L'eau est le meilleur milieu pour le stockage aux faibles températures. Elle a la capacité thermique massique la plus grande par rapport aux autres corps (4 185 J/ kg à 20 °C). Ainsi, pour une variation de température de 60°C, l'eau peut stocker 250 kJ/kg ou 2.5.10⁵ kJ/m³. De plus, l'eau n'est pas chère et facilement disponible. Cependant, à cause de sa grande pression de vapeur, pour les applications à haute température, elle demande une isolation coûteuse et un réservoir de stockage qui résiste aux fortes pressions. L'eau est utilisable non seulement comme milieu de stockage mais aussi comme milieu de transport de l'énergie. Actuellement, l'eau chaude est le vecteur le plus utilisé dans les systèmes d'applications de l'énergie solaire. Elle est utilisable dans un domaine de températures allant de 25 à 90°C.

Les différentes formes de stockage de l'eau sont :

-Le réservoir

-Les nappes aquifères naturelles en sous-sol...etc.

Le tableau 1.2 résume les avantages et inconvénients de l'utilisation de l'eau dans un système de stockage de chaleur sous forme sensible.

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de l'eau comme stockeur de chaleur. [6]

Avantages	Inconvénients
Haute efficacité	Autodécharge élevée
Chaleur spécifique élevée	Pression de vapeur élevée
Stratification thermique	Corrosif à certain contenants
Faible coût	
Très disponible	
Très documenté	
Aucune détérioration	

- **Le stockage par les autres fluides :** Les liquides autres que l'eau utilisés pour le stockage par chaleur sensible sont généralement des huiles organiques ou des sels fondus. Leurs capacités thermiques massiques sont de l'ordre de 25 à 40 % de celle de l'eau.
- **Huiles organiques :** Elles ont une pression de vapeur plus faible que celle de l'eau, elles peuvent être utilisées à des températures supérieures à 300 °C mais inférieures à 350 °C pour éviter leur décomposition. [3]

Les deux principales huiles qui ont retenu l'attention pour une application de stockage de chaleur sont le Therminol et la Caloria-HT. Le tableau 1.3 résume les avantages et inconvénients des huiles [6], [7].

Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients de l’huile comme stockeur de chaleur.

Avantages	Inconvénients
Chaleur spécifique élevée	Très dispendieux
Non-corrosif aux contenants	Toxique pour l’environnement
Disponible	Inflammable
Faible pression de vapeur	
Température de fonctionnement élevée	

- **Sels fondus** : Le plus courant est l’hydroxyde de sodium. Il a un point de fusion de 320°C et il est possible de l’utiliser à une température supérieure à 800°C. Mais, il est fortement corrosif et il est difficile à Stocker à fortes températures. [3]

1.4.1.2. Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide: [3]

- **Roches, béton et briques** :[5]

Ayant des caractéristiques très rapprochées, les roches, le béton et les briques forment une catégorie à haut potentiel d’utilisation comme matériaux dans un système de stockage thermique sous forme sensible. En effet, leur stabilité à long terme, leur disponibilité et leur prix abordable en font de bons candidats. Par contre, leur faible conductivité thermique ainsi que leur faible chaleur spécifique font que d’autres matériaux leur soient souvent préférés. Le tableau 1.4 résume leurs avantages et inconvénients.

Tableau 1.4 : Avantages et inconvénients de la roche, du béton et des briques comme stockeur de chaleur. [5]

Avantages	Inconvénients
Excellente stabilité cyclique	Faible chaleur spécifique
Chimiquement stable	Faible conductivité thermique
Disponible	
Abordable	

- **Métaux** : [5]

La principale caractéristique qui fait que les métaux puissent être intéressants pour un système de stockage de chaleur sous sensible est leur grande capacité thermique. Celle-ci leur permet une absorption rapide de la chaleur, mais également une dissipation rapide, ce qui implique une grande autodécharge, une faible autonomie et une efficacité réduite. Pour ces raisons, ils seront

principalement utilisés dans des applications de courte durée. Le Tableau 1.5 résume leurs avantages et inconvénients.

Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients des métaux comme stockeur de chaleur [5]

Avantages	inconvénients
Conductivité thermique élevée	Très dispendieux
Chimiquement stable	
Disponible	
Recyclage	

1.4.2. La chaleur latente : [3]

Pour réduire considérablement les volumes de stockage et s'affranchir des fluctuations de température liées au stockage par chaleur sensible, on peut choisir l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière.

Comme le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase.

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit:

$$Q = m (h_f - h_i) = m \Delta h_f [J] \quad (1.3)$$

Où : Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion. Généralement, il faut porter le matériau initialement à T_i à sa température de fusion et l'on écrit :

$$Q = m (h_f - h_i) = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) + m \Delta h_f [J] \quad (1.4)$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée figure 1.2. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.

Si T_f est la température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la température T_1 à la température T_2 , avec $T_1 \leq T_f \leq T_2$ alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} m c_s (T) dT + mL + \int_{T_f}^{T_2} m c_L (T) dT \quad (1.5)$$

$C_s(T)$: chaleur spécifique du corps à l'état solide.

$C_L(T)$: chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

L : chaleur latente de changement de phase.

On retrouve dans l'équation (1.5) deux termes de chaleur sensible en plus du terme mL représentant la chaleur latente due à la masse m .

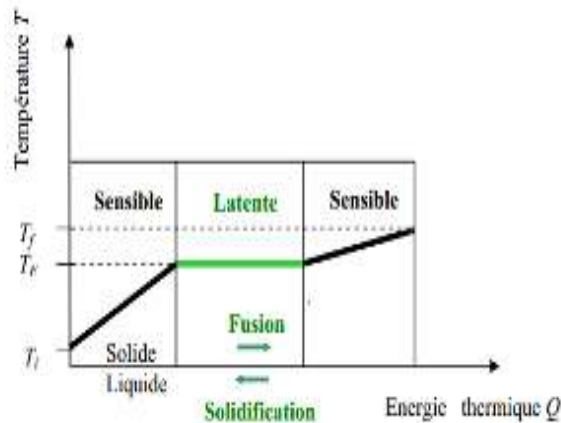


Figure 1.1 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

1.4.2.1. Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente : [3]

Le stockage par chaleur latente utilise l'enthalpie de changement d'état pendant la fusion ou la solidification du milieu utilisé, mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion. Il faut donc :

- Que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites de températures demandées pour ce changement.
- Que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié.
- Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature.
- Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le matériau à changement de phase.

1.4.2.2. Les avantages du stockage par chaleur latente: [3]

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi:

- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.
- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.

1.4.2.3. Matériaux à changement de phase (MCP) : [8]

On appelle matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans

notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...).

1.4.2.4. Le choix du matériau à changement de phase (MCP) : [9]

Lors du choix d'un matériau à changement de phase, plusieurs critères doivent être pris en compte, notamment la température de fusion qui doit être en adéquation avec l'utilisation qui va en être faite. Les critères de choix sont répertoriés dans le Tableau 1.6.

Tableau1.6: Critères à respecter lors du choix d'un matériau à changement de phase. [9]

Thermiques	<ul style="list-style-type: none"> ○ Température de changement de phase adéquate ○ Enthalpie d de changement de phase élevée ○ Conductivité thermique élevée
Physiques	<ul style="list-style-type: none"> ○ Masse volumique élevée ○ Faible variation de volume au changement de phase ○ Faible pression partielle de vapeur
Cinétiques	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pas de surfusion ○ Taux suffisant de cristallisation
Chimiques	<ul style="list-style-type: none"> ○ Stabilité à long terme à la température de travail ○ Compatibilité avec les matériaux de construction ○ Non toxicité ○ Non inflammabilité
Economiques	<ul style="list-style-type: none"> ○ Abondance de matériau ○ Disponibilité ○ Coût du matériau

1.4.2.5. Les différents changements d'état :

Les MCP peuvent être regroupés en trois principales catégories :

- Les matériaux ayant un changement de phase solide-solide.
- Les matériaux ayant un changement de phase solide-liquide.
- Les matériaux ayant un changement de phase liquide-gazeux.

Les avantages et inconvénients des différents changements d'état sont donnés dans le tableau 1.7

Tableau 1.7 : Avantages et inconvénients des différents changements d'état. [3]

Changement de page	Avantages	Inconvénients
Liquide/gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume
Solide/solide	Faible changement de volume Pas de formation de fluide	Faible valeur de la chaleur latente
Solide/liquide	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente

1.4.2.6. Classification des matériaux à changement de phase :

Les matériaux à changement de phases peuvent se classer en trois catégories:

- les MCP organiques, comme les paraffines, les acides gras et les mélanges organiques.
- les MCP inorganiques, les sels hydratés et mélanges de sels hydratés.
- Eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

- **Les matériaux inorganiques :** [10]

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), des sels hydratés (température de fusion comprise entre $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $130\text{ }^{\circ}\text{C}$), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à $150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Tableau 1.8 : Avantages et inconvénients des matériaux inorganiques.

Avantages	Inconvénients
Une chaleur latente importante (enthalpie de changement de phase élevée).	Problème de ségrégation de phases
Une grande conductivité thermique	Problème de la corrosion et de la surfusion
Une fusion nette grâce à une plage de fusion étroite.	L'utilisation nécessaire d'agent de nucléation.
Non inflammables.	Manque de stabilité thermique
	Sous refroidissement

- **Les matériaux organiques :** [11]

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Comme les paraffines, les acides gras et les mélanges organiques, ils ont des avantages majeurs par contre, ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques.

Tableau 1.9 : Avantages et inconvénients des matériaux organiques.

Avantages	Inconvénients
Disponibles dans une large gamme de température.	Une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide.
Compatibles avec les matériaux conventionnels de construction (absence de corrosion).	Une chaleur latente de fusion plus faible (faible enthalpie de changement de phase).
Stables chimiquement, ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation.	Inflammables.
Recyclables et non réactifs la plus part du temps.	

Les matériaux organiques et inorganiques les plus utilisés sont illustrés ci-dessous (Tableau 1.10).

Tableau 1.10 : Température de fusion et chaleur latente de quelques MCP inorganiques et organiques. [12]

Matériaux	Point de fusion (°C)	Chaleur latente (Kj/Kg)
Composés inorganiques	14	109
K ₂ HPO ₄ .6H ₂ O	25.5	148
Mn (NO ₃) ₂ .6H ₂ O	21	105
FeBr ₃ .6 H ₂ O	33	173
KFe (SO ₄) ₂ .12H ₂ O	34	138
LiBr ₂ .2 H ₂ O	34	124
Zn (NO ₃) ₂ .6H ₂ O	36.1	134
Composés organiques		
Acide Acétique	16.7	184
Acide Caprique	36	152
Acide Eladique	47	218
Acide Laudique	49	178
CaCl ₂ .6H ₂ O/CaBr ₂	14.7	140
C ₁₄ H ₂₈ O ₂ /C ₁₀ H ₂₀ O ₂	24	147.7
CaCl ₂ /MgCl ₂ .6H ₂ O	25	95
CH ₃ CONH ₂ /NH ₂ CONH ₂	27	163
Triethylolethane/ urea	29.8	218

- **Les eutectiques** : [5]

Les eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique). Les avantages et les inconvénients sont présentés au tableau ce dessus :

Tableau 1.11 : Avantages et inconvénients des eutectiques.

Avantages	Inconvénients
Le point de fusion similaire à une substance pure.	Les chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celles des composés organiques purs.
peu utilisés au niveau des systèmes industriels.	peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.

Le tableau suivant représente quelques eutectiques:

Tableau 1.12 : Une liste de quelques Eutectiques [13]

Eutectiques inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [KJ/Kg]
49.3%MgCl ₂ .6H ₂ O+50.7%Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	58	132.3
Na ₂ SO ₄ (32.5%) H ₂ O(41.4%),NaCl(6.66%), NH ₄ Cl(6.16%)	13	146
61.5%Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O+38.5%NH ₄ NO ₃	51	131.1

58.3%Mg(NO ₃) ₆ H ₂ O+41.7%MgCl ₂ .6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ .6H ₂ O+CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
Eutectiques organiques		
Acides Caprique –Laurique	18	120
Acides Palmitique-Laurique	33	145
Acides Stéarique-Laurique	34	150

1.4.3. Stockage thermochimique :[14]

Le stockage par voie thermochimique est le plus innovant. Les fortes densités énergétiques (500 kWh m⁻³), les températures de stockage comprises entre 25 et 1200 °C et les durées de stockage théoriquement illimitées en font un procédé très attractif. La voie thermochimique exploite la réversibilité des réactions pour stocker l'énergie. Les réactions chimiques envisagées sont de la forme suivante :



Lors de la charge, l'énergie thermique permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (A+B) sont ensuite séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (A + B) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restituer la chaleur et régénérer le produit initial (A). Ce phénomène exothermique correspond à la décharge. Les matériaux associés à ce type de stockage sont primordiaux car l'efficacité des systèmes en dépend. Ils peuvent être séparés en trois catégories, explicitées dans le (tableau 1.13) :

Tableau 1.13: Matériaux adsorbants. [15]

Adsorbants organiques	Adsorbants minéraux	Autres adsorbants	
Charbons actifs	Gels de silice	Polymères synthétiques	
Tamis moléculaires carbonés	Alumines activées	Heatsorp	
Nanomatériaux carbonés	Zéolithes	Sulfure de sodium	
Fullerènes et hétéro-fullerènes	Ettringite	Matériaux hybrides	nanoporeux
Micro-perles de mésocarbone	Oxyde de métal		

1.4.4. Stockage chimique :[16.17]

Le stockage d'énergie par réactions chimiques est un procédé lors duquel les molécules d'adsorbat sont fixées par liaison covalente à la surface de l'adsorbant provoquant l'irréversibilité du mécanisme. Ce type de stockage consiste par exemple à utiliser l'énergie solaire pour initier une réaction chimique endothermique. La chaleur est stockée au sein du système et peut être restituée souvent à l'aide d'un catalyseur.

Les réactions chimiques adaptées à ce type de stockage, dont certains exemples sont mentionnés dans le tableau 1.14 :

Tableau 1.14: Matériaux adaptés au stockage chimique [18]

Matériaux	Réactions de dissociation	Densité énergétique (GJ/m ³)	Température de réaction (°C)
Sulfate de Magnésium	$MgSO_4 \cdot 7H_2O = MgSO_4(s) + 7H_2O$	2.8	122
Oxyde de silicium	$SiO_2 = Si + O_2$	37.9	4065
Carbonate de fer	$FeCO_3 = FeO + CO_2$	2.6	180
Sulfate de Calcium	$CaSO_4 \cdot 2H_2O = CaSO_4 + 2H_2O$	1.4	89

Les réactions précédentes présentent toutes des densités énergétiques intéressantes et peuvent être utilisées pour des applications aux bâtiments. Cependant, la partie endothermique est souvent assez complexe et peut nécessiter d'être réalisée dans un environnement industriel.

1.5. Les technologies de stockage thermique :

1.5.1. Le stockage par chaleur sensible :

1.5.1.1. Le stockage d'eau chaude : [19]

La magasinassions de la chaleur de l'eau chaude à la plus large gamme de possibilités d'utilisation. En raison de la capacité de chaleur spécifique élevée et les taux élevés de capacité de charge et il acquitte la plus favorable des quatre entreposages types du point de vue thermodynamique. La construction du réservoir rempli d'eau du béton armé est généralement Partiellement noyée dans le sol et peut être construit presque indépendamment des conditions géologiques. C'est calorifuge au moins dans la zone de toit et sur la verticale des murs.

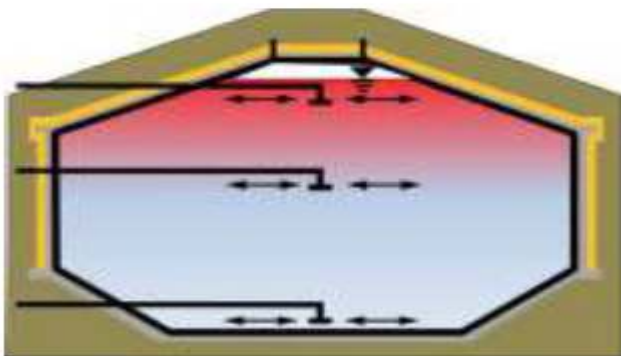


Figure1.2 : le stockage d'eau chaude.[1]

1.5.1.2. Stockage en puits géothermiques : [20]

Le stockage en puits nécessite un sol constitué de roche saturée en eau. Dans ce type d'installation, la chaleur est directement stockée dans le sol. L'échangeur de chaleur est inclus dans un puits de forage à une profondeur pouvant atteindre 100 m. En phase de charge, le flux de chaleur est dirigé du centre vers les bords du système ; il est de sens inverse en période de

décharge. A capacités de stockage égales, ce type de stockage nécessite un volume 3 à 5 fois plus important qu'un stockage d'eau chaude.

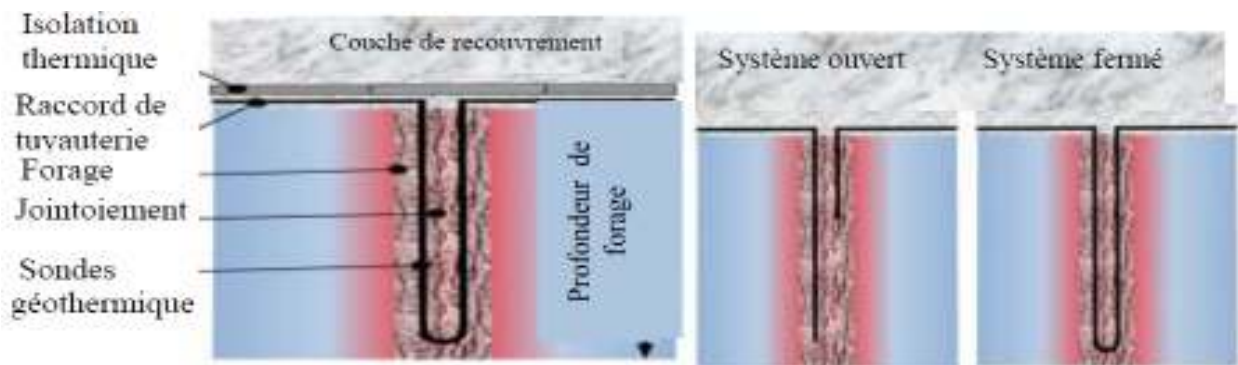


Figure1.3 : Les principes de base pour le stockage d'énergie thermique. [1]

1.5.1.3. Le stockage gravier -eau : [21]

Une fosse avec une doublure en plastique étanche à l'eau est remplie d'un mélange eau-gravier formation du matériau de stockage. Aucune structure de châssis portante est nécessaire parce que les forces sont prises vers le bas sur les parois latérales et au fond par le gravier. Le magasin dispose d'une isolation thermique, au moins au les parois latérales et sur le dessus. De la chaleur est introduite dans et déchargée sur la boutique soit par échange direct de l'eau ou par des tuyaux en plastique installées dans les différentes couches l'intérieur du magasin. En raison de la capacité calorifique spécifique plus faible du mélange de gravier dans l'eau, le volume d'un accumulateur de chaleur gravier de l'eau doit être d'environ 50% plus élevé par rapport à un accumulateur de chaleur à eau chaude pour obtenir la même capacité de chaleur pour l'ensemble du magasin.

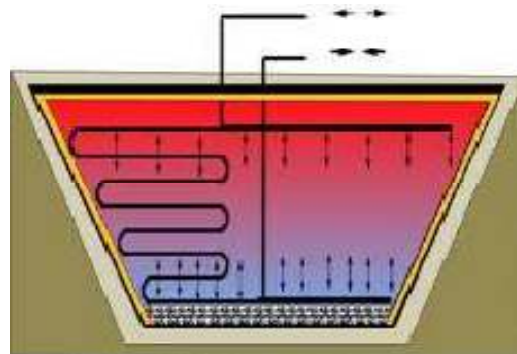


Figure1.4 : Construction du stockage gravier-eau. [1]

1.5.1.4. Le stockage en aquifère : [22]

Un systèmeATESse compose de deuxpuits(ou deux) groupes de puitsforés dansl'aquifèreet servirpour l'extractionou l'injection del'eau souterraine. Elle peut être distinguée de l'eau saturée aquifères poreuses dans le sable, le gravier et des aquifères en calcaire .Pourl'utilisationcommeun accumulateur de chaleurla conductivité hydrauliquedoit être élevéeet aucunécoulementnaturel des eaux souterrainesdevrait être nul.

Au cours de la saison de chauffage, l'eau est extraite du puits chaud, refroidie et réinjectée dans le froid. La circulation est inversée au cours de la saison de refroidissement, de sorte que le froid l'eau est extrait du puits froid, chauffé et réinjectée dans le puits chaud.

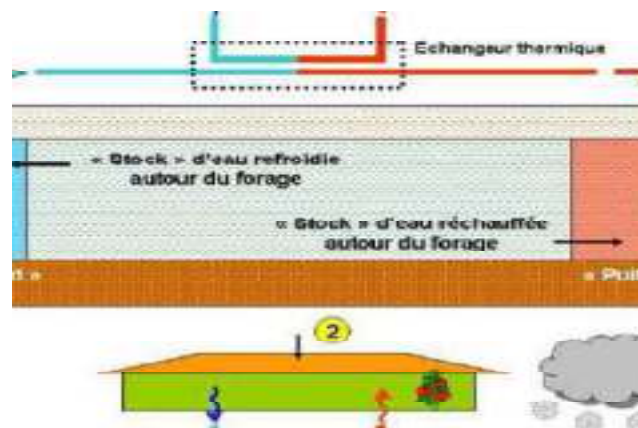


Figure1.5 : Stockage en aquifère. [2]

1.5.2. Le stockage par chaleur latente :

1.5.2.1. Le stockage de glace :

Utilisé dans les systèmes de chauffage, ventilation, et air conditionné, le stockage journalier de glace a pour objectif de lisser le pic de consommation durant les chaudes journées d'été. Dans les pays à climat froid, les températures hivernales permettent de stocker la glace de manière saisonnière. Une source de froid naturelle peut être utilisée pour produire de la glace [24]. Cette glace peut être créée par circulation d'air froid ou accumulation de neige.

1.5.2.2. Les applications des MCP dans le bâtiment :[24]

L'encapsulation des MCP rend leur emploi plus aisé dans certaines applications, notamment le bâtiment. Les MCP sont encapsulés dans des enveloppes de différentes formes (plaques, cylindres, sphères). Ce conditionnement présente plusieurs avantages :

- l'augmentation du rapport surface / volume
- la réduction des distances de transport de chaleur de l'intérieur du PCM vers l'extérieur, ce qui permet également de réduire la taille du réservoir de stockage
- la diminution de la réactivité du MCP vis-à-vis de l'environnement.

Les MCP sont généralement micro-encapsulés dans des polymères, formant des billes de 2 à 20 μm . Ces microcapsules sont dispersées un liquide ; l'ensemble forme un fluide (slurry), Figure (1.6), qui présente l'avantage de pouvoir être directement pompé et utilisé comme fluide caloporteur.

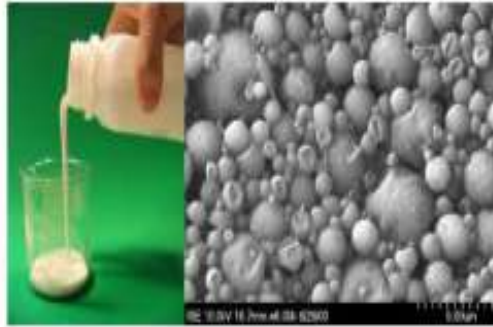


Figure 1.6 : Slurry de MCP micro-encapsulé. [24]

L'un des points faibles des bâtiments récents réside dans leur faible inertie thermique, qui engendre d'importantes fluctuations de la température interne. L'intégration dans des éléments de construction de MCP encapsulés peut permettre d'atténuer ce phénomène [25] [26]. Le principe est de disperser de manière homogène des micro-capsules de MCP dans des plaques de plâtre, de gypse, etc.

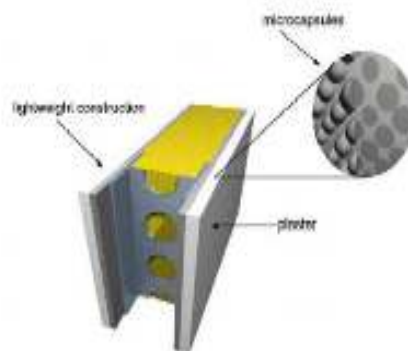


Figure 1.7 : Intégration d'un MCP dans un mur de plâtre. [25]

Les applications des MCP au bâtiment se situent également au niveau des chauffe-eau solaires. Dans un ballon d'eau chaude, l'absence de stratification, c'est-à-dire la présence d'une température homogène dans tout le réservoir, peut poser un sérieux problème. Si la température atteinte est trop basse, l'eau ne peut être utilisée pour le circuit d'eau chaude sanitaire. L'incorporation de capsules de différents MCP permet de créer et de maintenir des couches d'eau stratifiées ; la température d'une couche correspond à la température de fusion des différents matériaux utilisés. Dès lors, la capacité de stockage est augmentée tout en réduisant le volume du ballon d'eau chaude [27] [28] [29].

1.5.3. Le stockage thermochimique :

➤ Les systèmes par thermochimique : [30]

En été, l'énergie solaire est absorbée par un capteur solaire et délivrée à la solution diluée transférée dans le désorbeur. La solution libère le sorbat sous forme de vapeur et devient plus concentrée. Ce sorbat est condensé à partir d'une source froide dans un condenseur, puis stocké dans un réservoir. La solution est stockée dans un autre réservoir. Les réservoirs de stockage étant disjoints, il n'y a plus d'échange de masse et l'énergie

peut donc ainsi être stockée sous forme de potentiel chimique aussi longtemps que souhaité. En hiver, la solution concentrée absorbe dans l'absorbeur la vapeur du sorbat qui est évaporé dans l'évaporateur à partir d'une source de chaleur à basse température (une source géothermique par exemple). La chaleur de ce phénomène exothermique est récupérée pour le chauffage du bâtiment.



Figure1.8 :Schéma du système de stockage de chaleur solaire par absorption.

1.6. Travaux portant sur le stockage inter-saisonnier :

➤ Par chaleur sensible :

1-Stockage inter saisonnier de la chaleur dans le sol par puits à double circulation : [31]

Par : J.Y Ausseur Ph jean J-p sauty (1985)

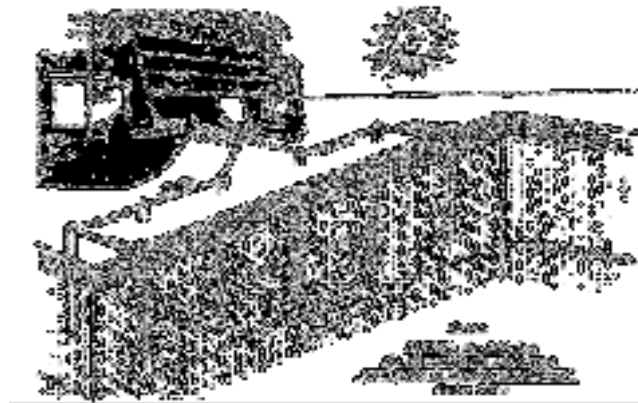


Figure1.9 : schéma de principe du dispositif de stockage par puits à double circulation.[31]

Ils ont étudié un stockage de chaleur dans le sol par conduction thermique, l'échangeur étant constitué d'une batterie de puits à double circulation avec une simulation de comportement thermique du sous-sol et de l'eau en circulation dans les forages dans ce type de d'installation.

Leur étude aboutit à la conclusion que sous réserve de validité des hypothèses sur les paramètres physique du terrain et des caractéristiques des systèmes de capteurs et du dispositif de chauffage un projet comprenant 24 puits de 25 m de profondeur et disposés sur une grille carré

d'espacement 2m, conduirait après plusieurs années de fonctionnement, a une efficacité du stockage comprise entre 30 %et 40%.

2-Etude expérimentale et modélisation d'un stockage thermique de longue durée en lit de cailloux enterré, couplé à des capteurs solaires à air : [32]

Par : C. Dang Vu, B. Delcambre (1987)

Ils ont présentées l'analyse d'ensemble d'une expérimentation de stockage thermique de longue durée en lit de cailloux, le réservoir de cailloux est enterré et isolé était ventilé soit une boucle aéraulique avec préchauffage éventuel de l'air soufflé, soit par de l'air extrait d'un champ de capteurs solaires a air.

Ils ont atteintes un faible rendement de 14 %, il apparait que la phase de relaxation doit être réduit au minimum.il ne s'agit pas d'un stockage inter- saisonnier mais un stockage de quelque rendement.

Ils ont vérifié les avantages a priori d'un stockage en lit de galet ventilé : bonne stratification thermique à la charge et à la décharge, bonne répartition aéraulique, convection naturelle pendant les périodes de relaxation (dans le cas d'un stockage horizontal partiellement chargé, détériore partiellement la stratification et dans le cas d'un stockage plein peut augmenter les pertes thermiques, pertes thermiques qui, même si l'isolation du réservoir est bonne, vont avoir des effets non négligeable sur les longues périodes de fonctionnement.

3-Analyse d'un système de stockage thermique résidentiel par masse d'eau : [1]

Par : Samira Cherbal (2014)

Le travail porte sur l'optimisation l'optimisation d'un système de stockage thermique par masse d'eau dans un réservoir enfoui au sol. Relié à des collecteurs solaires et couplé à une pompe à chaleur eau/eau, le réservoir d'eau emmagasine la chaleur captée en été et la restitue en hiver pour le chauffage des locaux et de l'eau sanitaire. Le stockage thermique s'effectue aussi lors de la demande de climatisation.

Les résultats démontrent l'importance des paramètres : volume de stockage et isolation du réservoir enfoui au sol. Plus le volume de stockage est grand, plus l'économie d'énergie annuelle est importante allant de 3679 kWh pour un réservoir de stockage de 30 m³ à 11344 kWh pour un réservoir de 100m³ couplé à 3 collecteurs au lieu de 2 collecteurs dans le cas de base.

Les résultats obtenus ont permis de constater que la technologie de stockage thermique résidentiel par masse d'eau est une solution envisageable dans le but de réaliser des économies d'énergie. L'analyse de sensibilité a permis de montrer l'importance du volume du réservoir de stockage thermique dans la facture énergétique annuelle du bâtiment. L'isolation joue aussi un rôle majeur puisque les résultats montrent que les économies réalisées avec un réservoir non isolé sont supérieures à celles issues d'un réservoir isolé.

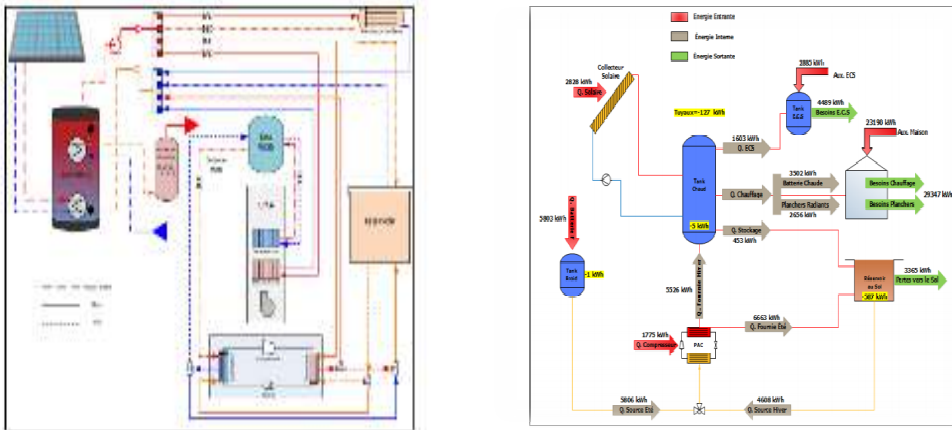


Figure 1.10 : Schéma du système de chauffage et climatisation. [1]

➤ Par chaleur latente :

1-Simulation du Stockage de l'Energie Thermique dans un Lit Fixe de Sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase : [33]

Par : A. Benmansour et M.A. Hamdan (2001)

Le travail consiste à étudier numériquement le stockage de l'énergie thermique par la chaleur latente à basses températures dans un lit fixe rempli de sphères uniformes contenant chacune un matériau à changement de phase traversé par un flux d'air. Un modèle théorique unidimensionnel à deux phases séparées est appliqué pour les deux modes (stockage, déstockage) et résolu numériquement lors d'un changement de phase isotherme et non isotherme. Ce modèle a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres dynamiques et thermiques de l'air à l'entrée du lit et de montrer que la vitesse d'écoulement de l'air ainsi que le rapport hauteur/diamètre du lit avaient une influence notable sur le processus de stockage.

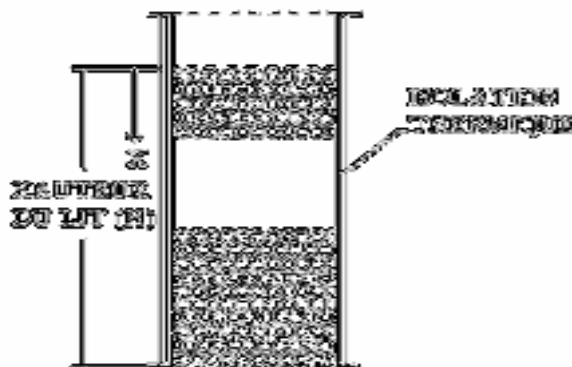


Figure 1.11 : schéma du lit de stockage. [33]

2-Analyse du transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion pour le chauffage d'eau : [34]**Par : Hamid El QARNIA(2005)**

Un modèle mathématique basé sur les équations de conservation de l'énergie a été développé pour prédire le comportement thermique ainsi que la performance d'une unité de stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase.

Une série de simulations numériques ont été effectuées dans le but d'optimiser le système de stockage durant la phase de charge. Les valeurs optimales des paramètres de contrôles : la masse du MCP M , le nombre de tubes N et le débit massique du fluide caloporteur m et f correspondantes à chaque MCP ont été estimées. En utilisant ces valeurs, la performance thermique du système de stockage pendant la phase de décharge a été aussi évaluée pour différents débits massiques d'eau.

3-Optimisation d'un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion : application au refroidissement d'une composante électronique : [35]**Par: Mustapha Faraji, Hamid El Qarnia (2007)**

Ils ont optimisé la performance thermique d'un modèle de refroidissement d'une composante électronique. Un modèle mathématique régissant le comportement thermique des différentes composantes du système est développé. Les paramètres clés du modèle ont été définis et les équations du modèle sont ensuite discrétisées, transformées en un système d'équations algébriques et résolues itérativement. Plusieurs expériences de simulations ont été effectuées en vue d'optimiser les dimensions optimales du refroidisseur proposé.

L'étude d'optimisation séquentielle a permis de déterminer la configuration géométrique optimale du refroidisseur qui maximise la durée de fonctionnement sécurisée de la composante électronique, tout en assurant la fusion quasi-totale du MCP. Les expériences de simulation ont permis de dégager les remarques suivantes :

- les ailettes d'épaisseur très mince sont recommandées.
- la base doit être massive, d'épaisseur plus importante, disponible sur les catalogues
- il est inutile de sur- dimensionner la cavité contenant le MCP.

➤ Par thermochimique :**1-Stockage inter saisonnier d'énergie solaire pour l'habitat par absorption : [31]****Par : Liu Hui (2010)**

L'étude consiste à développer un concept de stockage inter-saisonnier par absorption de l'énergie solaire pour l'habitat on effectuant à l'aide d'une simulation statique la capacité de stockage, le rendement, de la pression de fonctionnement, du besoin de température pour l'énergie solaire, de la température possible pour le chauffage du bâtiment, des critères de sécurité et du coût des matériaux de sept couples d'absorption: $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$, Glycérine/ H_2O , $\text{KOH}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}$ et $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$.

Un prototype de démonstration de la faisabilité de ce concept innovant avec le couple $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ a été conçu, dimensionné et construit. Les performances thermodynamiques et les

différents problèmes du prototype sont analysés, le fonctionnement optimal du prototype est étudié.

Une simulation globale annuelle est effectuée afin d'étudier le fonctionnement annuel du système de stockage inter-saisonnier en lien avec un système solaire et un bâtiment.

La capacité de stockage est de 116 kWh/m^3 dans l'exemple étudié et le rendement du système de stockage est d'environ 66,4%. Cependant, pour un bâtiment de 120 m^2 , il est difficile d'avoir au total 30 m^3 de réservoirs de stockage (dimensionnement obtenu). La température de la production de chaleur (environ 21°C) n'est pas satisfaite non plus. Il faut se concentrer dans l'amélioration de la capacité de stockage, le rendement du stockage et la température de la production de chaleur.

2-Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle : [20]

Par : Stéphanie Hongois(2011)

L'étude consiste à développer un système de stockage de chaleur par voie thermochimique dédié au chauffage solaire d'une maison individuelle. A cet effet, un matériau de stockage spécifique a été mis au point, à base de zéolithe et de sulfate de magnésium. Le principe, reposant sur un phénomène mixte d'adsorption physique de vapeur d'eau et de réaction chimique d'hydratation, est à caractère inter-saisonnier : en été, la chaleur issue de capteurs solaires thermiques à air est stockée par le matériau, qui se déshydrate selon une réaction endothermique ; en hiver, l'exothermicité de la réaction inverse est exploitée afin de chauffer l'habitat.

-Le dimensionnement préliminaire du système, centré sur les besoins énergétiques hivernaux, ne prend pas en considération le potentiel solaire en été, associé à l'ensoleillement. Cette analyse conduira à ajuster les capacités de stockage selon la région d'implantation du système.

-La taille du stockage correspondra donc à un compromis entre le potentiel de stockage de la région et les besoins hivernaux.

-Le développement d'un système de stockage thermochimique performant adapté au bâtiment demande une totale complémentarité entre les travaux expérimentaux et numériques.

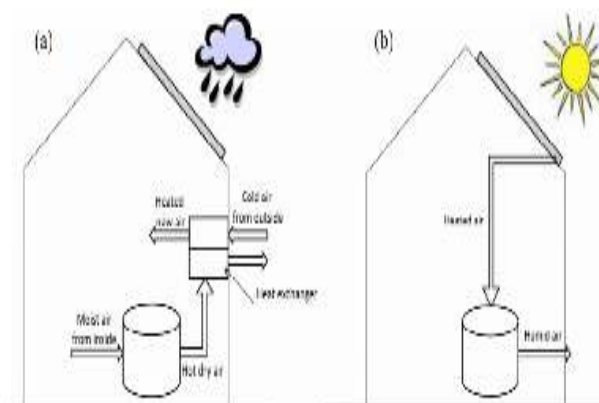


Figure 1.12 : Présentation du concept : (a) stockage de chaleur l'été, (b) décharge de chaleur l'hiver. [32]

3-Etude du stockage à long terme de l'énergie solaire thermique par procédé d'absorption LiBr-H₂O pour le chauffage de l'habitat : [32]

Par : KokouviEdem N'Tsoukpoe(2012)

Ce travail a démontré la faisabilité d'un stockage de chaleur thermique à long terme basé sur un stockage par absorption à haute densité énergétique. Cet objectif a été partiellement atteint car la charge du procédé a pu être réalisée et la décharge a montré la faisabilité du chauffage (production d'une température suffisante dans l'absorbeur). Cependant, à cause d'une conception inadaptée de l'échangeur de chaleur l'absorbeur, la chaleur n'a pas pu être valorisée. Voir la figure (1.6)

4- Procédé de stockage d'énergie solaire thermique par adsorption pour le chauffage des bâtiments : Modélisation et Simulation numérique : [36]

Par : Parfait Tatsidjoudoung (2014)

Cette étude montre le fonctionnement d'un système de stockage de chaleur par sorption intégré à une habitation individuelle. Cette étude a pu être réalisée par le biais de la simulation numérique à partir de modèles mathématiques des composants du SSCS validés expérimentalement. La principale conclusion se dégageant des résultats obtenus porte sur la faisabilité d'un tel système de stockage de chaleur longue durée par sorption pour l'habitat. Il a été démontré en effet que les réacteurs de zéolithe, sous conditions d'un débit d'air et d'une humidité absolue suffisants, pouvaient assurer partiellement ou complètement le chauffage d'une habitation individuelle. L'étude a également permis de mettre en avant un rendement de 17 % entre l'énergie stockée et l'énergie solaire incidente. Toutefois, plusieurs points restent encore à étudier ou à approfondir dans la conception du SSCS.

1.7. Conclusion :

Ce chapitre a présenté les informations disponibles dans la littérature concernant le stockage d'énergie thermique solaire, en mettant l'accent sur la classification des concepts de stockage et la description des matériaux utilisés. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

1. Le développement d'un système de stockage thermique efficace et rentable est essentiel pour le développement futur de l'énergie solaire.
2. Selon les matériaux de stockage, les systèmes de stockage sont classés en tant que stockage par chaleur sensible, par chaleur latente, par réaction ou par chaleur de sorption. Seuls les systèmes par chaleur sensible ont été effectivement utilisés dans des stockages d'énergie solaire, bien que d'autres méthodes soient possibles et offrent des avantages.
3. La technologie de stockage chimique et de sorption est prometteuse, mais elle est encore moins développée que la technologie par chaleur latente. Des recherches plus approfondies sont encore nécessaires pour son développement.

2.1. Introduction :

Après avoir présenté le premier chapitre les différents modes et systèmes de stockages. Dans ce chapitre nous allons s'intéresser au dimensionnement de l'installation de stockage enterré désigné a satisfait les besoins d'un bâtiment, pour cela,on commencera par le calcul des déperditions thermiquesde notre bâtiment, dans l'objectif de connaitre les besoins en chauffage et en eau chaud sanitaire et le calcul de différentes paramètre de l'échangeur et enfin le bilan thermique de la cuve de stockage est dressé.

2.2. Déterminations des déperditions thermiques :

2.2.1. Présentation du Bâtiment :

Le bâtiment étudié est situé dans la ville d'Ain Romana, région de Blida, qui est situé dans la zone climatique B. ce bâtiment de cinq étage contient dix appartements d'une superficie de 67 m² chacun.

Chaque appartement est composé de deux chambres, une cuisine, de sanitaire et d'une salle de séjour. Il est habité par cinq personnes, les besoins de cette habitation sont évaluer en fonction de ces caractéristiques architecturales, du nombre d'occupants et du taux de renouvellement d'air.

❖ Données architecturales du bâtiment :

Hauteur du bâtiment	14 m
Surface du bâtiment	140 m ²
Volume du bâtiment	1960 m ³

❖ Données géographiques du bâtiment :

Latitude (ϕ)	36.42°
Longitude (L)	2.8°
Altitude	341 m



Figure 2.1 : Plan du bâtiment (Blida).

2.2.2. Déperditions thermiques du bâtiment :

2.2.2.1. Déperditions par l'enveloppe de bâtiment :

Le calcul des déperditions par l'enveloppe de la maison est fait par les règles de calcul des déperditions calorifiques[37]. (Méthode de D.T.R)

Le tableau suivant montre la composition des parois du bâtiment :

Tableau 2.1 : composition des parois du bâtiment.

	Composition	Épaisseur (m)	λ (w/m°C)	$R(m^2.c/w)$	$K(w/m^2°C)$	$S(m^2)$
Mur externe	Mortier	0.02	1.15	0.02		
	Brique polystyrène	0.10	0.48	0.21		
	Brique plâtre	0.05	0.04	1.28		
		0.10	0.48	0.21		
		0.02	0.35	0.06		
				$\Sigma R_{th}=1.78$	0.513	713.85
Mur interne	Plâtre	0.02	0.35	0.06		
	Brique	0.10	0.48	0.21		
	Plâtre	0.02	0.35	0.06		
				$\Sigma R_{th}=0.33$		

Toit	Plâtre	0.015	0.35	0.04		
	hourdi					
	béton	0.16	1.23	0.13		
	polystyrène	0.04	1.75	0.02		
	mortier	0.10	0.04	2.56		
	tuile	0.03	1.15	0.03		
		0.01				
				$\Sigma R_{th}=2.78$	0.348	168.4
Plancher bas	Plâtre	0.015	0.35	0.04		
	hourdi					
	béton	0.16	1.23	0.13		
	polystyrène	0.04	1.75	0.02		
	mortier	0.10	0.04	2.56		
	carrelage	0.03	1.15	0.03		
		0.02	1.70	0.01		
				$\Sigma R_{th}=2.79$	0.338	168.4
La porte extérieure	Métal				5.8	3.74
Les fenêtres et les portes fenêtres	Double vitrage				3.3	67.2

- **Calcul du coefficient de transmission surfacique de la maison :**

a) Calcul du coefficient de transmission surfacique du mur extérieur (K_m) :

$$K_m = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_i + \Sigma R_{th} + R_e} \quad (2.1)$$

Avec :

$$R_i = \frac{1}{h_i} = 0.11$$

$$R_e = \frac{1}{h_e} = 0.06$$

b) Calcul du coefficient de transmission surfacique du plancher bas et le toit :

$$K_p = \frac{1}{R_i + \Sigma R_{th}} \quad (2.2)$$

$$R_i = \frac{1}{h_i} = 0.09 \text{ Pour plancher bas.}$$

$R_i = \frac{1}{h_i} = 0.17$ Pour le toit.

c) coefficient de transmission surfacique des portes et des fenêtres :

Les valeurs du coefficient de transmission surfacique des portes et fenêtres sont obtenus selon le DTR comme ils sont montrés dans le tableau (2.1).

Les déperditions par l'enveloppe de la maison sont calculées comme suit :

$$Q_{ext} = Q_m + Q_{po} + Q_f + Q_p \quad (2.3)$$

Où

Q_{ext} : Déperditions totales coté extérieur.

Q_m : Déperdition par le mur extérieur.

Q_{po} : Déperditions par les portes.

Q_f : Déperditions par les fenêtres.

Q_p : Déperditions par le plancher.

Q_t : Déperdition par le toit.

Donc la formule des déperditions totales cotées extérieur sera :

$$Q_{ext} = Q_m + Q_{po} + Q_f = [(K_m S_m + K_{po} S_{po} + K_f S_f + K_p S_p + K_t S_t)](T_i - T_a) \quad (2.4)$$

Avec :

K_m, K_{po}, K_f, K_p et K_t : sont les coefficients de transmission surfacique des murs extérieurs, des portes, des fenêtres, de plancher bas et de toit.

Et S_m, S_{po}, S_f, S_p et S_t : sont les surfaces des murs extérieurs, des portes et des fenêtres.

T_i : la température de confort égale à 21 °C

T_a : la température ambiante.

Le calcul de la température ambiante est fait à l'aide du logiciel METEONORM.

Les valeurs de T_a (°C) pour la ville de Blida sont représentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.2 : Température ambiante moyenne mensuelle à Blida.

Mois	janv	fév	mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout	Sept	Octobre	Nov	Déc
T_a	9.4	10.5	12.1	14.5	18.3	22.6	26.4	26.5	23.4	18.6	13.7	10.1

2.2.2.2. Déperditions par renouvellement d'air : [38]

Plus une maison est isolé, plus elle est étanche à l'air. Il se pose alors un problème de renouvellement d'air. La température ambiante T_a est inférieure à la température interne de la maison T_i , ce renouvellement d'air entraîne une déperdition calorifique Q_a que l'on peut mettre sous la forme suivantes :

$$Q_a = \rho_a V_a C_{pa} (T_i - T_a) \quad (2.5)$$

Avec :

ρ_a : Masse volumique de l'air égal à 1,204 [Kg/m³]

V_a : débit de renouvellement d'air en [m³/h]

C_{pa} : Chaleur massique de l'air égal à 1006 [J/Kg. °C]

Le débit V_a du renouvellement d'air s'élève à la moitié du volume de la maison par heure

$$V_a = \frac{V}{2} \quad (2.6)$$

Et on obtient donc les déperditions totales par l'enveloppe de la maison qui sont données par la formule suivante :

$$Q_{to} = 1.1Q_{ext} + Q_a \quad (2.7)$$

2.2.2.3. Apports internes : [39]

Nous avons supposé que chaque appartement est habité par cinq personnes, La puissance dissipée par personne est estimée à 120 W.

✓ Appareils électroménagers :

Ils sont à la fois liés à la présence et l'activité humaine. Le tableau ci-dessus présente les puissances dégagées par les appareils électroménagers.

Tableau 2.3 : Puissances dégagées par les appareils électroménagers.

Appareil	Zone	Temps d'utilisation	Puissance moyenne sur 24h [W]
Réfrigérateur	Cuisine	24/24	70
Téléviseur	Salon, chambre1, chambre2	12h	150
Appareil de cuisson	Cuisine	5h	200
Ordinateur	Chambre2	7h	30

2.3. Détermination des besoins de chauffage : [38]

2.3.1. Calcul du coefficient de déperdition thermique GV [W/C°] :

Ce coefficient appelé coefficient de déperdition thermique, caractérise les déperditions thermiques Q_{th} du bâtiment. Il est calculé à partir de l'équation suivante :

$$Q_{th} = GV(T_i - T_a) = [(K_m S_m + K_f S_f + K_{po} S_{po} + K_p S_p + K_t S_t) 1.1 + \rho_a V_a C_{pa}] (T_i - T_a) \quad (2.8)$$

2.3.2. Calcul du coefficient des besoins thermiques BV : [W/C°]

Le coefficient des besoins thermiques BV se déduit du coefficient de déperdition thermique GV en prenant compte les apports énergétiques dus aux occupants de l'habitation, aux appareils domestiques et aux apports solaires par les fenêtres. Il s'exprime en W/C°.

Soient Q_i les apports internes à la maison. On définit une température T_{sc} dite température sans chauffage, correspondante à la température extérieure à partir de laquelle il n'y a plus besoin de chauffage pour maintenir à la température intérieure de l'habitation T_i .

$$Q_i = GV (T_i - T_{sc}) \quad (2.9)$$

Donc les besoins énergétique réels Q_c sont donnés par :

$$Q_c = Q_i - Q_{th} \quad (2.10)$$

Ou encore :

$$BV (T_i - T_a) = GV (T_i - T_a) - GV (T_i - T_{sc}) \quad (2.11)$$

On obtient :

$$BV = GV (1 - F) \quad (2.12)$$

Avec :

$$F = \frac{(T_i - T_{sc})}{(T_i - T_a)} \quad (2.13)$$

F : est appelé facteur d'apport gratuit

Ce dernier facteur dépend de nombreux paramètres tels que :

- *Le nombre d'occupants du logement.
- *Le mode de vie (température de confort, éclairage, appareils électrique.)
- *La situation géographique (ensoleillement, température extérieure.)
- *La construction de la maison (orientation par rapport au sud, dimensions, isolation.)

2.3.3 Méthode des degrés jours : [40]

Elle permet de calculer les besoins en chauffage d'une habitation, à un instant donné. La puissance thermique effective nécessaire pour maintenir à la température intérieure de l'habitation s'écrit :

$$Q_c = GV (T_{sc} - T_a) \quad (2.14)$$

La détermination de l'énergie à fournir au logement durant une période Δt s'écrit :

$$Q_c = \int GV (T_{sc} - T_a) dt \quad (2.15)$$

Appelons nombre de degré jour la quantité suivante :

$$N_{dj} = \int (T_{sc} - T_a) dt \quad (2.16)$$

Le terme dt de l'intégrale correspond au nombre de jours durant lesquels la température de l'air extérieure vaut T_a avec bien sur $T_a < T_{sc}$. La définition de N_{dj} implique que T_{sc} et T_a représentent des températures moyennes calculées sur la journée. Le nombre degrés-jours correspond donc au nombre de jour de chauffage multiplié par l'écart de température ($T_{sc} - T_a$).

En considérant que le facteur Gv est constant sur la période étudiée, l'énergie à fournir pour le chauffage s'écrit :

$$Q_c = GV N_{dj} \quad [W] \quad (2.17)$$

Pour obtenir Q_c en KWh, il faut diviser par 10^3 et multiplier par 24 le résultat.

$$Q_c = 0.024 \text{ GV Ndj [KWh]} (2.18)$$

2.4. Détermination des besoins en eau chaude sanitaire :

La consommation d'eau chaude sanitaire à 45 C° varie en fonction des habitudes des occupants, du type de famille et du nombre de personnes, la consommation d'eau chaude peut être définie comme suit [41] :

Basse consommation	20-30
Moyenne consommation	30-50
Haute consommation	50-70

Nous supposons une consommation d'eau chaude moyenne de 50l par personne par jour.

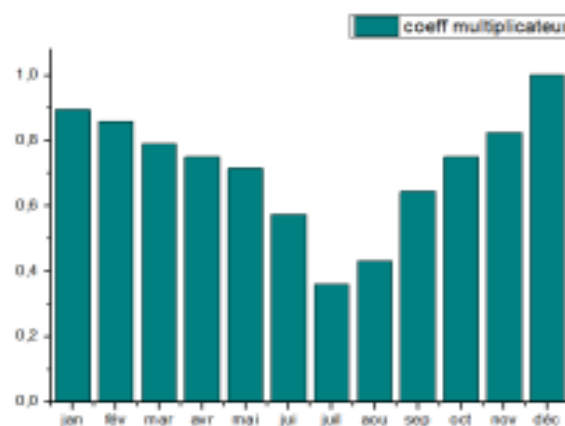


Figure 2.2 : Profil de la consommation d'eau chaude sanitaire. [42]

La figure (2.2) montre le profil de la consommation d'eau chaude sanitaire exprimée en valeurs moyennes mensuelles, le mois de décembre est considéré comme une consommation maximale elle correspondant d'un coefficient égal à 1ce qui signifie d'un volume de 2500l.

Les consommations pour les autres mois seront calculées comme le produit de la consommation maximale par le coefficient correspondant au mois considéré.

La quantité réelle d'énergie nécessaire pour la production d'eau chaude sanitaire est déterminée comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ce volume de la température de l'eau froide jusqu'à la température demandée. Si V_s est le volume à soutenir et T_h la température demandée, l'énergie nécessaire Q_{ecs} est donnée par : [43]

$$Q_{ecs} = \rho C_p V_s (T_h - T_e) [J] \quad (2.19)$$

Où :

C_p : est la capacité thermique massique de l'eau (4180 J/Kg .C°).

ρ : sa masse volumique (1Kg/l).

T_e : la température de l'eau froide.

Pour obtenir Qecs en Wh, il faut diviser par 3600.

2.5. Calcul des besoins en chauffage :

2.5.1. Calcul du coefficient de déperdition thermique (GV) :

A partir de l'équation on va calculer le coefficient de déperdition thermique par l'enveloppe de la maison.

Avec :

$$\rho_a = 1,204 \text{ [Kg/m}^3\text{]}, C_{pa} = 1006 \text{ [J/Kg.C}^\circ\text{]}, V_a = 980 \text{ [m}^3\text{/h]}$$

On aura donc $GV = 1127.4 \text{ [W/C}^\circ\text{]}$

2.5.2. Calcul des apports internes (Qi) :

On a supposé que chaque appartement abrite cinq personnes ce qui donne les valeurs suivantes :

$$Q_i = (120 \times 50) + 450 = 6450 \text{ [W]}$$

Et par suite on va calculer la température T_{sc} à partir de l'équation (2.9) :

$$T_{sc} = T_i - \frac{Q_i}{G_v} = 21 - \frac{6450}{1127.4} = 15.3^\circ\text{C}$$

2.5.3. Calcul des degrés-jours (Ndj) :

En remplaçant la valeur de T_{sc} dans l'équation (2.16).

Les calculs sont faits pour chaque mois.

Tableau 2.4 : Nombre des degrés jours (Ndj)

Mois	T_a	Nbre de jour	$(T_{sc} - T_a)$	Ndj
Janvier	9.4	31	5.9	182.9
Février	10.5	28	4.8	134.4
Mars	12.1	31	3.2	99.2
Avril	14.5	30	0.8	24
Mai	18.3	31	-	-
Juin	22.6	30	-	-
Juillet	26.4	31	-	-
Aout	26.5	31	-	-
Septembre	23.4	30	-	-
Octobre	18.6	31	-	-
Novembre	13.7	30	1.6	48
Décembre	10.1	31	5.2	161.2

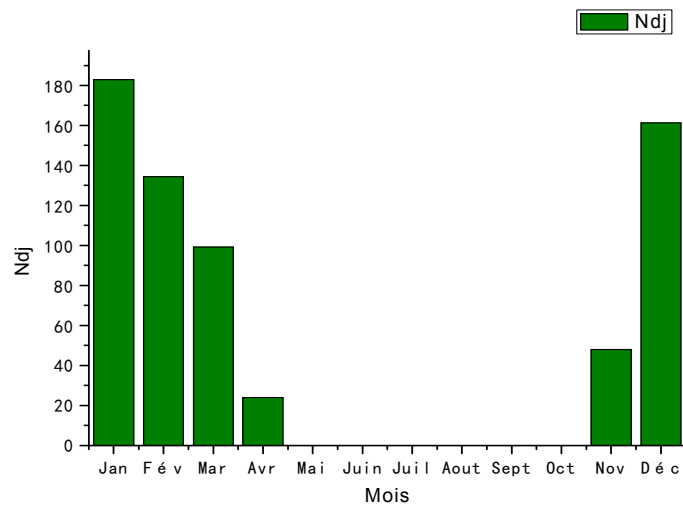


Figure 2.3 : Nombre des degrés-jours (Ndj) à Blida.

A partir de l'équation (2.18), on trouve les valeurs des besoins de chauffage Q_c .

Tableau 2.5 : Les besoins mensuels de chauffage.

Mois	Jan	fév	Mar	Avr	mai	Juin	Juill	Aout	Sept	oct	nov	déc
Q_c	4948.8	3636.54	2684.1	649.4	0	0	0	0	0	0	1298.8	4361.7

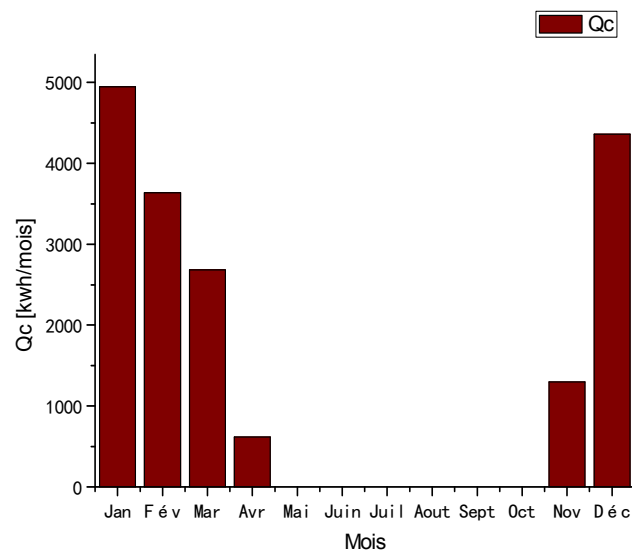


Figure 2.4 : Les besoins mensuels en chauffage.

2.5.4. Calcul des besoins en eau chaude sanitaire :

Nous avons effectué les calculs en prenant l'exemple d'une famille de 5 personnes. La température de l'eau chaude (T_h) est prise égale à 45 C°. La température de l'eau au réseau (T_e) est supposée égale à 10 C° en saison froide et 15 C° en saison douce.

Tableau 2.6 : Les besoins mensuels en eau chaude sanitaire.

Mois	T_e (°C)	Consommation Journalière[l/j]	Qecs [kwh/j]	Qecs [kwh/mois]
Jan	10	2237.5	90.93	2818.81
Fév	10	2150	87.37	2446.7
Mar	10	197.5	80.26	2488.11
Avr	10	1875	76.2	2285.94
Mai	15	1787.5	62.26	1930.20
Juin	15	1437.5	50.073	1502.19
Juil	15	900	31.35	971.85
Aout	15	107.5	37.4	1160.8
Sept	15	1621.5	56.16	1685.06
Oct	15	1875	65.31	2024.69
Nov	10	2062.5	83.82	2514.53
Déc	10	2500	101.6	3149.51

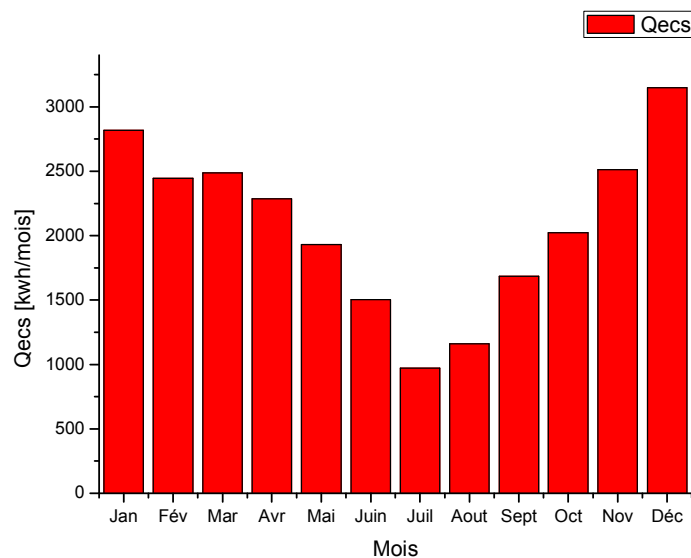


Figure 2.5: Les besoins mensuels en ECS.

2.6. Dimensionnement de la cuve de stockage :

- **Volume de stockage** :[43]

Afin de connaître les besoins journaliers en eau chaude on doit connaître le site dans lequel l'installation va être mise en place. Si le site présente une forte insolation, nous considérons pour l'installation une autonomie d'énergie, N_j (nombre de jour) de 01 jour au minimum.

Par contre, si l'ensoleillement n'est pas très important ou on risque d'avoir fréquemment une succession de jours sans soleil, on doit alors dimensionner notre installation pour une autonomie d'énergie supérieure à 01 jour. Avec les deux paramètres, les besoins journaliers et le temps de réserve, on peut calculer le volume du réservoir de stockage par :

$$V_c = B_e \times t_r \times P \quad (2.20)$$

Avec :

V_s : volume de la cuve.

B_e : les besoins en litre/jours.

t_r : temps de réserve.

P : le nombre de personne.

Nous avons 60 personnes avec une consommation de 50 l/jour/personne.

Pour qu'on réalise un besoins combiné en eau chaud sanitaire et chauffage nous aurons une capacité de stockage de 6 m³.

Après la détermination du volume de la cuve de stockage, nous pouvons tirer les dimensions de la cuve (diamètre et hauteur) à partir des équations suivantes [44] :

- **Le diamètre de la cuve :**

$$D_c = \sqrt[3]{\frac{2 V_c}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{2 * 6000 / 1000}{\pi}} = 1.6 \text{ m.} \quad (2.21)$$

- **La hauteur de la cuve de stockage :**

$$H_c = 2 D_c = 2 * 1.6 = 3 \text{ m.} \quad (2.22)$$

2.7. Le capteur solaire :

- **Surface des capteurs :**

Le calcul fait introduire un paramètre important (**Ra**) appelé « **Ratio** » défini comme le rapport entre la capacité d'eau à chauffer par la surface totale de captation. sa valeur recommandée et délimitée dans l'intervalle [44,45] :

$$75 \text{ l/m}^2 < Ra \left[\frac{1}{\text{m}^2} \right] < 100 \text{ l/m}^2$$

Pour les sites à faible insolation, on choisit une valeur située vers la borne inférieure de l'intervalle [75 l/m²]. Par contre, pour les sites forts insolation, la valeur de Ra choisie doit tendre vers l'extrémité droite de l'intervalle [100 l/m²].

Des études antérieures[46] ont montré que si la valeur de Ra diminue en dessous de la valeur de 75 l/m² le pourcentage d'économie réalisé chute d'une manière très important. Par contre, il est inutile de considérer une valeur de Ra supérieur à 100 l/m² parce qu'on ne réalisera pas d'économie d'avantage et le rendement cessera d'augmenter. Donc Ra est un paramètre de base choisi à partir des critères techniques et économique. la surface de capteur est calculer par l'équation suivante [45] :

$$S = \frac{V_c}{Ra} = \frac{6000}{85} = 70 \text{ m}^2 \quad (2.23)$$

On prend un ratio 85 l/m²[47] et on a trouvé une surface de capteurs de 70 m².

R_a = Ratio de stockage. [l/m²]

- **Le nombre de capteurs :**

$$N_c = \frac{S}{S_c} \quad (2.24)$$

Les caractéristiques du capteur utilisé sont sur le tableau au-dessus :

Tableau 2.7 : Caractéristique du capteur utilisé : SOFTEN.

Dimensions (mm)	2002 x 1050 x 75 mm
Surface hors tout (m²)	2.1
Surface d'entrée (m²)	2
Pression maximale (bar)	7
Volume d'eau (L)	1.04
Rendement optique η₀	0.7
Coefficients de déperdition a₁ ((W/m²).K)	5
Coefficients de déperdition a₂ ((W/m²).K²)	0.01

Avec :

a₀ : Rendement optique du capteur.

a₁: coefficient de perte thermique globale.

S_c : surface effective du capteur utilisé.

On a donc :

N_c= 70/2=35 capteurs.

- **Influence des ombres :**[48]

Le coefficient d'ensoleillement est en fonction de deux angles α et β exprimés en degrés (obstacles infiniment longs et capteurs orientés sud).

Il est possible de déterminer les angles α et β en fonction des longueurs représentées dans le schéma suivant :

$$\begin{aligned} \text{tg}\beta &= [\mathbf{L} \cdot \mathbf{h} - \ell \cdot (\mathbf{h} - \mathbf{H})] / [\ell \cdot \mathbf{L} - \mathbf{h} \cdot (\mathbf{h} - \mathbf{H})] \\ \text{tg}\alpha &= [(2\mathbf{h} - \mathbf{H})] / [(\mathbf{L} - \ell)] \quad (2.25) \end{aligned}$$

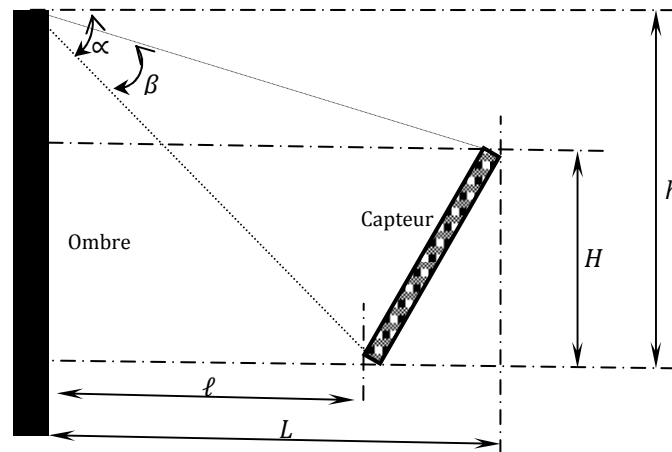


Figure 2.6 : Schémas de calcul des angles de l'ombre.

L'installation solaire sera installée sur la terrasse du bâtiment, avec une inclinaison de 26.42° (l'été), on suppose quand a pas l'effet d'ombre. (Site dégagé).

- **Surface disponible pour les capteurs :**

On peut définir la surfacemaximale d'un champ de N rangées de capteurs inclinés d'un angle β sur l'horizontal en fonction de S_{dispo} [49] :

Dans ce cas nous avons considéré la disposition de 7 rangées en parallèle dans chaque rangée 5 capteurs en séries.

Les capteurs sont inclinés à 26.42° .

$$S_{\text{cMax}} = S_{\text{dispo}} / (R_s - \text{tg}(\beta) / N_r) \quad (2.26)$$

Avec :

$$R_s = 2 \cos(|\beta - 60^\circ|) \quad (2.27)$$

Donc : $R_s = 2 \cos(|26.42^\circ - 60^\circ|) = 1.66$.

Ce qui donne :

$$S_{\text{cMax}} = S_{\text{dispo}} / (R_s - \text{tg}(\beta) / N_r) = 168.4 / (1.66 - \text{tg}(26.42) / 7) = 106 \text{ m}^2$$

L'écart minimal C entre rangées est donné par :

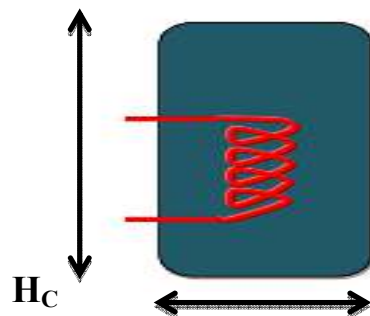
$$\Delta C = 2^{\sqrt{3}} \cdot \sin(\beta) \quad (2.28)$$

$$\Delta C = 2^{\sqrt{3}} \cdot \sin(26.42) = 1.48\text{m}$$

- **Disposition des capteurs et calcul du circuit de distribution :**

Le débit est un paramètre très important dans l'étude des installations de chauffage d'eau collectif. On retient couramment comme valeur du débit $\dot{m}_c = 70$ l/h/capteur. D'après la surface disponible on doit installer les capteurs selon une configuration mixte. [50]

2.8. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur :



D_C

Figure 2.7 : un échangeur de chaleur intégré dans une cuve de stockage.

Les caractéristiques de l'échangeur utilisé sont les suivantes : [50,51]

Diamètre extérieur est de 22mm.

Diamètre intérieur est de 20mm.

Diamètre de spire 0.7 m.

L'échangeur de chaleur sera intégré dans la cuve de stockage et pour cela il ne faut faire certains calculs qui sont présentés se dessus :

- **La surface de l'échangeur :**

$$S_e = \frac{S_c N_c}{3} = \frac{2 \cdot 35}{3} = 23\text{m}^2 \quad (2.29)$$

- **La longueur de l'échangeur :**

$$L_e = \frac{S}{\pi D_e} = \frac{23}{(\pi \cdot 0.022)} = 332.9\text{m} \quad (2.30)$$

- **Le nombre de spire dans l'échangeur :**

$$N_s = \frac{L_e}{\pi D_s} = \frac{332.9}{(\pi \cdot 0.7)} = 151.5.$$

- **La hauteur de l'échangeur :**

$$H_e = D_e N_s = 3.33 \text{ m.}$$

Avec :

D_i : diamètre intérieur de l'échangeur. [m]

D_s : diamètre de la spire. [m]

D_e : diamètre extérieur de l'échangeur. [m]

2.9. Description de la cuve :

❖ **Forme :**

Les stockages enterrés peuvent être cubique, cylindrique, en pyramide ou cône inversé ou encore une combinaison de ces différentes géométries.

Dans notre étude on a choisi la cuve cylindrique.

❖ **L'enveloppe :**

L'enveloppe peut être en béton (préfabriqué ou coulé sur place), en acier.

❖ **L'isolation :**

Les cuves verticales utilisent des matériaux isolants en vrac comme le verre expansé ou gravier de mousse de verre (GLAPOR).

Il n'y a pas de consensus quant aux zones de la cuve à isoler ou non. Certains isolent toute la cuve, d'autres uniquement les parois latérales.

2.10. Bilan thermique de la cuve de stockage :

La cuve de stockage est de type vertical de 1.6m de diamètre et de 3m d'hauteur.

Pour cela, nous avons considéré deux modèles pour le calcul de la température à l'intérieur de la cuve de stockage.

a- Modèles stratifiés : [52]

Dans ce modèle on suppose que le stockage divisés on plusieurs tranches horizontal ayant chaque une température homogène T_{sj} . tout le liquide pénétrant dans la cuve de stockage viendras sur loger dans la tranche dont la T_{sj} et la plus voisine de température. On introduit les fonctions de contrôle circuit capteurs F_{cj} et les fonctions de contrôle circuit soutirage F_{sj} définie comme suit :

$$F_{cj} = 1 \quad \text{si} \quad T_{sj} < T_c < T_{s(j-1)}$$

$$F_{cj} = 0 \quad \text{dans les autre cas}$$

$$F_{sj} = 1 \quad \text{si} \quad T_{sj} > T_r > T_{s(j-1)}$$

F_{cj} dans les autres cas

Alors on :

$$\begin{aligned} MC_{pj} \frac{dT_{sj}}{dt} = & [F_{cj}(T_c - T_j) + (T_{j-1} - T_j) \sum_{K=1}^{j-1} F_{ck}] (\dot{m}C_p)_i + (\dot{m}C_p)_s [F_{sj}(T_r - T_j) + \\ & (T_{j+1} - T_j) \sum_{k=j+1}^N F_{sk}] + \frac{\lambda N S}{H} [(T_{j-1} - T_j) - (T_j - T_{j+1}) - k_{sj}(T_{sj} - T_{amb})] \end{aligned} \quad (2.33)$$

Avec :

MC_{pj} : la capacité thermique de la tranche j .

$(\dot{m}C_p)_i$: produit débit massique. Chaleur spécifique dans le circuit de capteur.

$(\dot{m}C_p)_s$: produit débit massique. Chaleur spécifique dans le circuit de chauffage.

H : hauteur de la cuve.

S : surface d'une section horizontale de la cuve.

N : nombre de tranches de la cuve.

λ : Conductivité de liquide stocké.

k_{sj} : conductance entre la tranche j et l'environnement.

$MC_{pj} \frac{dT_{sj}}{dt}$: variation de l'énergie stockée dans la tranche j .

$(\dot{m}C_p)_i F_{cj}(T_c - T_j)$: énergie provenant du capteur $F_{cj}=1$.

$(\dot{m}C_p)_i (T_{j-1} - T_j) \sum_{K=1}^{j-1} F_{ck}$: énergie provenant de la tranche $(j-1)$ lorsque $T_c > T_{sj-1}$.

$(\dot{m}C_p)_s F_{sj}(T_r - T_j)$: énergie perdue lorsque la température de retour est telle que $F_{sj}=1$

$(\dot{m}C_p)_s (T_{j+1} - T_j) \sum_{k=j+1}^N F_{sk}$: : énergie perdue lorsque la température de retour déplace le liquide plus froid des tranches inférieures vers la haut c'est-à-dire $T_r < T_{sj+1}$.

$\frac{\lambda N S}{H} (T_{j-1} - T_j)$: énergie gagnée par conduction à partir de la tranche supérieure.

$\frac{\lambda N S}{H} (T_j - T_{j+1})$: énergie perdue par conduction à partir de la tranche inférieure.

$\frac{\lambda N S}{H} k_{sj}(T_{sj} - T_{amb})$: énergie perdue à l'espace en environnement.

b-Modèle brassé : [53]

Ce modèle consiste à supposer que la température dans la cuve est uniforme. Le régime est considéré transitoire et le flux total de la chaleur perdue dans la cuve est égal à la somme des flux radiaux Q_r plus le flux qui traverse les fonds bombés. La puissance récupérée par le fluide caloporteur est définie comme étant la différence entre l'énergie solaire incidente et les pertes thermiques.

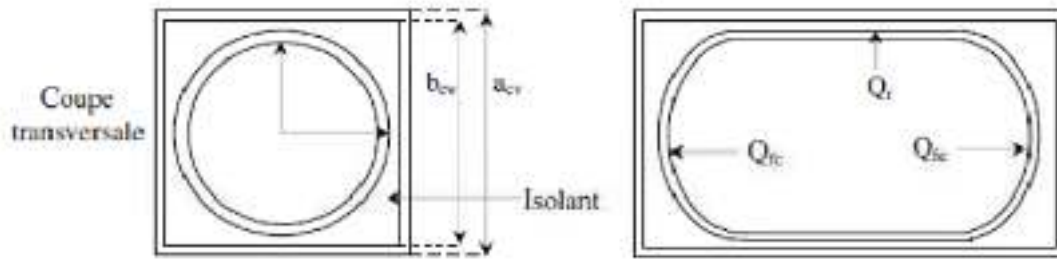


Figure 2.8 : Schéma de la cuve de stockage.

Les relations nous permettant de calculer le coefficient de perte, et l'énergie dans le réservoir, ainsi que la température du stockage sont :

$$\dot{m} = K_s(T_s - T_a) = (1/R_{th})(T_s - T_a) \quad (2.34)$$

Ou :

$$K_s = 2 \pi r_1 L_{cv} \sum \frac{1}{R_{thr}} + 2 \pi r_1^2 \sum \frac{1}{R_{thc}} \quad (2.35)$$

Avec :

T_s, T_a : sont respectivement la température du stockage et la température ambiante.

R_{th} : résistance thermique de la cuve de stockage entre le milieu ambiant et le fluid stocké.

R_{thr} : résistance thermique radiale.

R_{thc} : résistances thermiques sur les côtés.

Pour déterminer la résistance thermique du stockage de la cuve, on utilise le schéma analogique équivalent donné dans la figure 2.7.

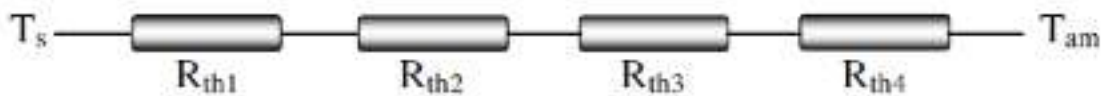


Figure 2.9 : Schéma analogique de la cuve de stockage.

- R_{th1} : résistance thermique de la cuve.

$$R_{th1} = \frac{1}{2 \pi L_{cv} r_1 h_{cv}} \quad (2.36)$$

Avec :

L_{cv} : longueur de la cuve (m).

r_1 : rayon intérieur de la cuve (m).

h_{cv} ; coefficient d'échange de la chaleur par convection, il est calculé par la relation de Nuselt dans le cas de la convection naturelle par :

$$h_{cv} = N_u \frac{\lambda}{D} \quad (2.37)$$

Ou :

$$N_u = 0.25 K_s (G_r P_r)^{0.25} \quad (2.38)$$

- **R_{th2} : résistance de la virole.**

$$R_{th2} = \frac{1}{2\pi L_{cv} \lambda_{cv}} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.39)$$

Avec :

r_2 : rayon extérieur de la virole (m).

λ_{ac} : conductivité thermique de la virole ($W m^{-1} K^{-1}$).

- **R_{th3} : résistance thermique de l'isolant.**

$$R_{th3} = \frac{1}{2\pi L_{cv} \lambda_{iso}} \ln \left(\frac{0.54 b_{cv}}{r_2} \right) \quad (2.40)$$

Avec :

λ_{isc} : conductivité thermique de l'isolant ($W m^{-1} K^{-1}$).

- **R_{th4} : résistance thermique entre l'isolant et la tôle.**

$$R_{th4} = \frac{0.785}{2\pi L_{cv} \lambda_t} \ln \left(\frac{a_{cv}}{b_{cv}} \right) \quad (2.41)$$

Avec :

λ_t : conductivité thermique de la tôle.

D'où :

$$K_s = 2\pi r_1 L_{cv} \left[\frac{1}{h_{cv}} + \frac{r_1}{\lambda_{ac}} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{r_1}{\lambda_{isc}} \ln \left(\frac{0.54 b_{cv}}{r_2} \right) + \frac{0.785 r_1}{\lambda_t} \ln \left(\frac{a_{cv}}{b_{cv}} \right) \right]^{-1} + 2\pi r_1^2 \left[\frac{1}{h_{cv}} + \frac{e_{ac}}{\lambda_{ac}} + \frac{e_t}{\lambda_t} + \frac{e_{isc}}{\lambda_{isc}} \right]^{-1} \quad (2.42)$$

En égalant la variation de l'énergie stockée dans la cuve à l'énergie captée par le collecteur moins l'énergie perdue vers l'environnement et l'énergie puisée, on peut écrire le bilan thermique de la cuve de stockage sous forme suivante [53,54] :

$$(MC_p)_s \frac{dT_s}{dt} = S_{cap} F_r [(\tau\alpha) G_n - U_L (T_s - T_a)] - K_s (T_s - T_a) - \dot{m} (T_s - T_{lr}) \quad (2.43)$$

Avec :

e_{ac}, e_t, e_{isc} : sont respectivement de l'acier, tube et de l'isolant de la cuve.

T_{lr} ; température de soutirage (K).

Au-delà on peut détermine la température de stockage.

2.11.Conclusion :

Dans ce chapitre on a modélisé :

- Les Déperditions thermiques du bâtiment.
- Le capteur solaire.
- Les différentes caractéristiques d'échangeur de chaleur.
- Le bilan thermique de la cuve de stockage.

Après les calculs des différents sous-systèmes, on peut passer alors à la simulation de systèmes choisis qui seront détaillés dans le chapitre suivant.

3.1. Introduction :

Le dimensionnement étudié dans le deuxième chapitre nous permet de commencer notre simulation à partir des calculs statiques qu'on a obtenus. Dans ce chapitre, les équipements nécessaires au chauffage sont présentés ; les capteurs solaires, la cuve de stockage seront décrits.

Nous avons établi deux modèles :

- Modèle de stockage thermique stratifié.
- Modèle de stockage brassé.

-L'influence de certains paramètres à savoir ; le débit et l'inclinaison de capteur solaire.

-Le logiciel TRNSYS a été utilisé pour la simulation et la modélisation de l'installation et les composants utilisés pour la simulation seront également détaillés.

3.2. Présentation de l'outil utilisé: [1] (TRNSYS Simulation Studio)

TRNSYS (TRaNsient System Simulation program) est un logiciel complet, modulaire et flexible pour la simulation dynamique des systèmes, y compris les bâtiments multizones. La simulation dynamique des bâtiments et des systèmes permet de prédire leur comportement énergétique en fonction des changements apportés sur la stratégie de contrôle des équipements, le type de matériaux utilisés pour les parois, l'architecture et la source d'énergie entre autres éléments.

TRNSYS comporte une bibliothèque de 50 familles de composants qui permettent, en régime transitoire, de simuler des concepts énergétiques allant du simple système de chauffage d'eau domestique, aux concepts plus complexes, comme le couplage de sources d'énergies renouvelables, les installations HVAC et le stockage énergétique.

Les composants de TRNSYS, aussi appelés TYPES, représentent chacun un élément du système étudié : capteur solaire, tuyau, pompe, réservoir, vanne etc. Ils comportent chacun des entrées, des sorties et des paramètres de simulation que l'utilisateur saisit sur l'interface visuelle Simulation Studio comme le montre la Figure 3.1.

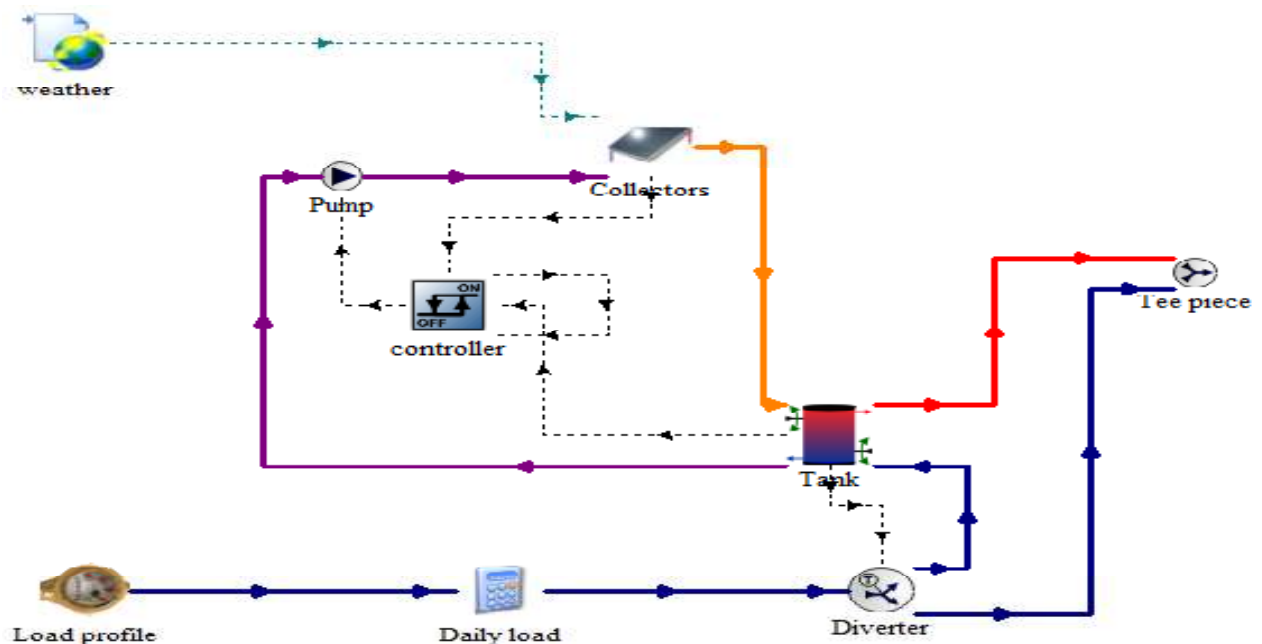


Figure 3.1 : Exemple de simulation d'un chauffe-eau solaire sur TRNSYS.

3.3. Noyau de TRNSYS :[2]

Le noyau de TRNSYS a pour tâche la résolution de l'ensemble des équations dans les conditions de sollicitations déterminées, en particulier la dimension temporelle (instant initial et final et le pas de temps du calcul). A l'instar des autres logiciels, TRNSYS peut gérer automatiquement le changement des heures d'hiver et d'été évitant toute confusion dans l'interprétation des résultats.

3.4. Description générale du système :

La Figure 3.2, 3.15 montre le système de chauffage et l'eau chaude sanitaire du bâtiment. L'installation comprend des capteurs solaires, un réservoir enfoui dans le sol.

Les capteurs solaires thermiques, situés sur le toit du bâtiment, captent la chaleur et l'envoient vers le réservoir enfoui au sol si l'énergie solaire fournie est supérieure aux besoins en ECS et en chauffage en été. C'est à ce moment que s'opère le stockage thermique saisonnier.

3.4.1. Fichier météo : TYPE (109)

Cette composante sert le but principal de la lecture des données météorologiques à des intervalles de temps réguliers à partir d'un fichier de données, en le convertissant à un système souhaité d'unités et le traitement des données de rayonnement solaire pour obtenir un rayonnement de surface inclinée et l'angle d'incidence pour un nombre arbitraire de surfaces.

Dans ce mode, le type 109 lit un fichier de données météorologiques dans le format TMY2 standard. Le format TMY2 est utilisé par la Base nationale de données du rayonnement solaire (Etats-Unis), mais les fichiers TMY2 peut être généré à partir de nombreux programmes, tels que Métronome.

3.4.2. Capteur solaire : Type (1b)

La matrice de capteurs solaires peut être constituée de capteurs connectés en série et en parallèle. Les performances thermiques de la rangée de capteurs est déterminé par le nombre de modules en série et les caractéristiques de chaque module. L'utilisateur doit fournir des résultats de tests normalisés de rendement du capteur par rapport à un rapport de fluide température ambiante moins de température au rayonnement solaire. La température du fluide peut être la température d'entrée, la température moyenne, ou la température de sortie. Les panneaux solaires installés sur le toit de la maison sont de la marque Soften . Leur fiche technique est présentée en deuxième chapitre de ce mémoire et comporte les paramètres à insérer dans TRNSYS.

3.4.3. Pompecirculatrice : TYPE(3)

La pompe permet de faire circuler le fluide caloporteur entre le collecteursolaire et le réservoir de stockage. Ce modèle de pompe calcule un débit massique en utilisant une fonction de commande variable, qui doit avoir une valeur entre 1 et 0, et une capacité de débit maximal (spécifié par l'utilisateur) fixe.

3.4.4. Réservoir de stockage :TYPE (4b)

Le réservoir de stockage enfoui dans le sol a été modélisé avec le TYPE 4b. Il s'agit d'un réservoir cylindrique, située au sous-sol a 1.5 m. Il a un volume de 6 m³ pour une hauteur de 3 m. Il est fait en béton avec une conductivité thermique de 1 W/m.K. La Figure 3.16 montre les liens entre le réservoir enfoui, les capteurs solaires et la pompe circulatrice avec des composants TRNSYS. Le TYPE 4b permet de modéliser le phénomène de stratification dans la cuve de stockage. Il est donc divisé en nœuds isothermes. Nous avons considéré 4 nœuds pour ce réservoir de stockage. Le fluide contenu dans le réservoir est de l'eau. et il n'y a pas d'échangeurs thermiques. On néglige les pertes thermiques dans notre étude.

3.4.2. Réservoir de stockage : TYPE (60)

Ce TYPE a les mêmes caractéristiques de la cuve précédente sauf qu'il y a un échange de chaleur entre l'eau du réservoir et le fluide caloporteur qui passe dans l'échangeur de chaleur, relié aux panneaux solaires.

Nous avons aussi un échange thermique avec l'environnement mais nous négligerons les pertes de chaleur du réservoir pour notre étude. Le réservoir enfoui est isolé sur les 4 côtés latéraux avec du GLAPOR. Le bas du réservoir n'étant pas isolé, c'est au niveau du nœud le plus bas que s'effectuent les échanges thermiques avec le sol. En hiver il y a un gain car la température du sol est supérieure à celle du réservoir; en été, la situation inverse se produit et il y a des pertes vers le sol.

On suppose que tous les nœuds de stratification du réservoir sont uniformes en taille. (température uniforme)

3.5. Les résultats :

➤ Système1 :

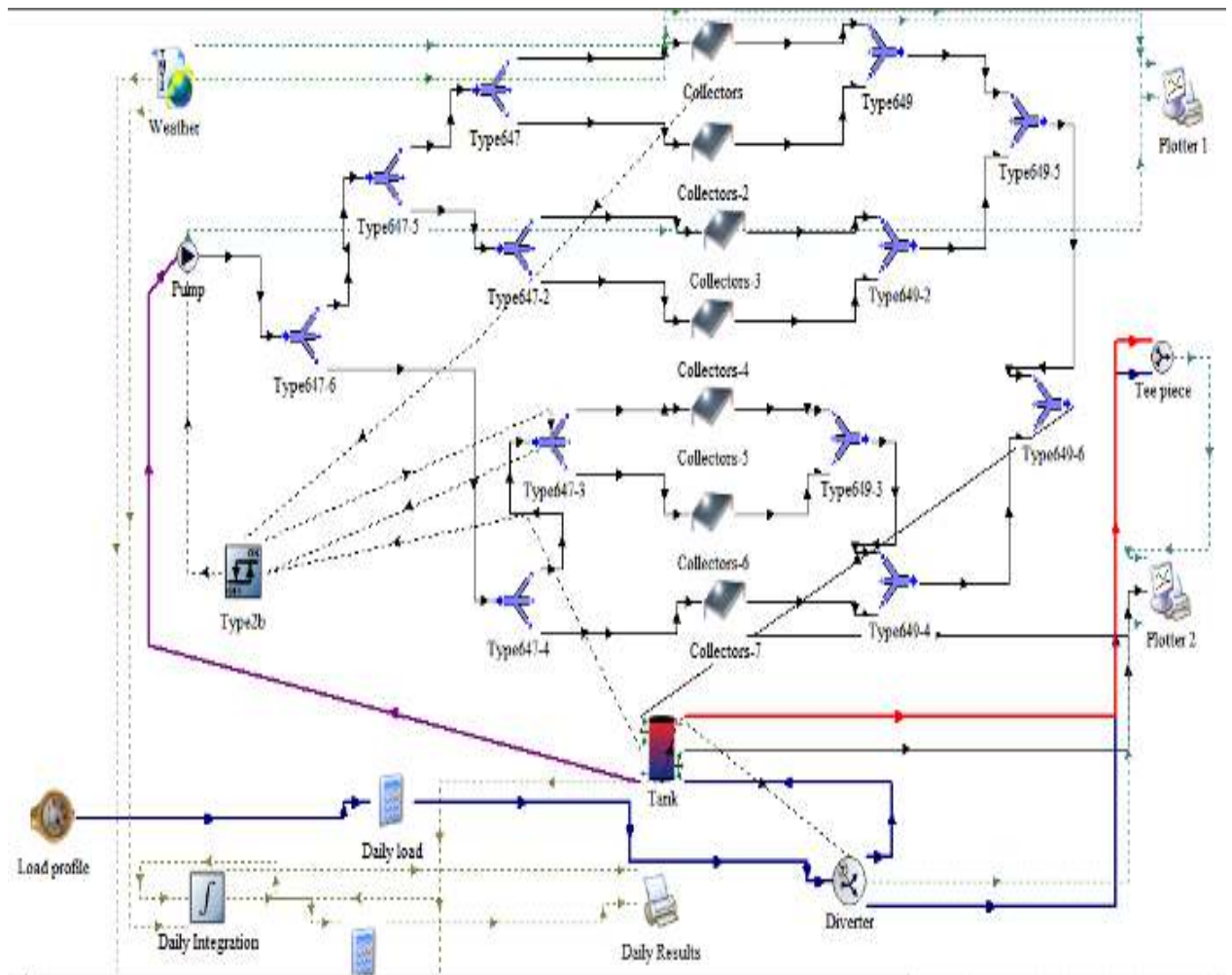
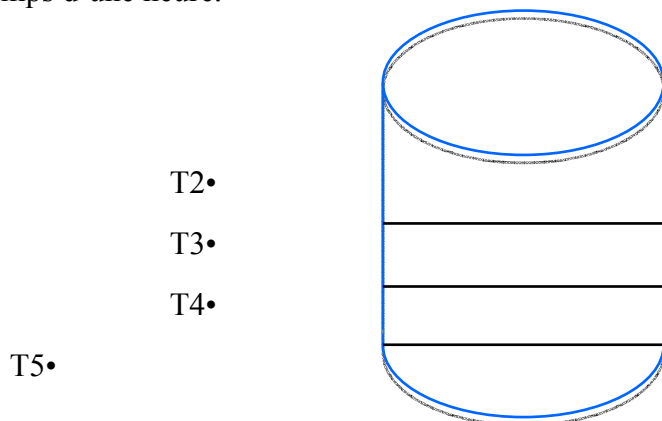


Figure 3.2 : Schéma du modèle de stockage -1-

Les figures ce dessus représentent l'évolution des températures des différents nœuds du stockage (T2, T3, T4, T5) pendant la période d'hiver (décharge) de stockage avec un pas de temps d'une heure.



❖ L'évolution de température dans une cuve stratifiée sans puisage avec un débit de 70 l/hret inclinaisons de 26.42 :

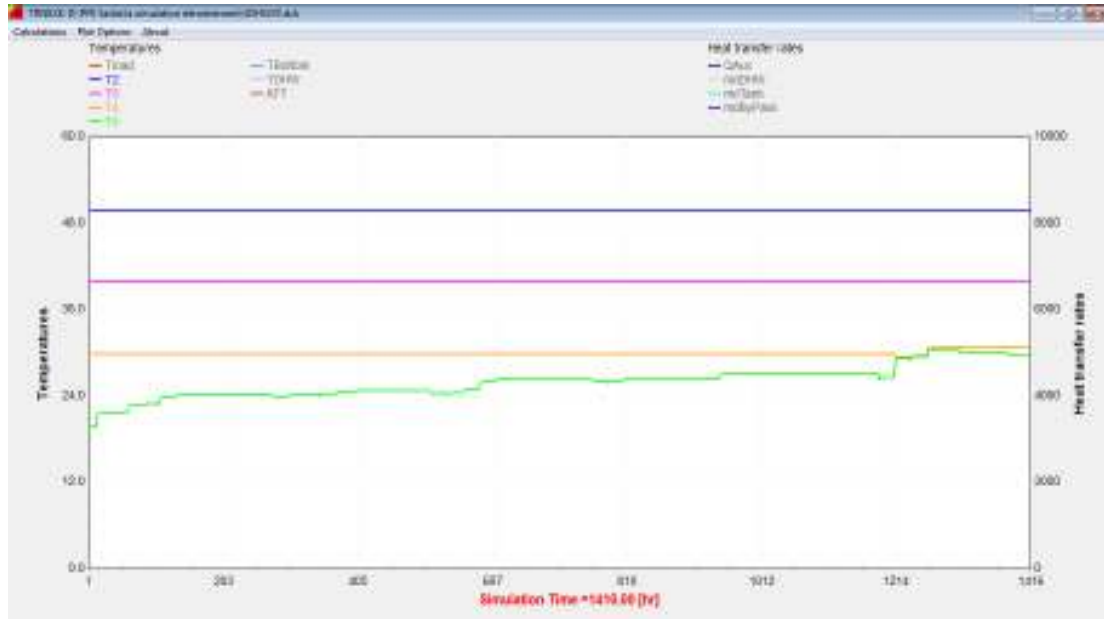


Figure 3.3 :l'évolution de température pendant (1h-1416h)

-On remarque que les températures des nœuds T2, T3, T4, restent constantes avec un écart de 10°C.

Par contre, la température de la tranche inférieure augmente progressivement jusqu'à 30 °C.



Figure 3.4 :l'évolution de température pendant (1416h-2880h)

- Les températures T2 et T3 reste constante et augmentation de T4 et T5jusqu'à 35°C .

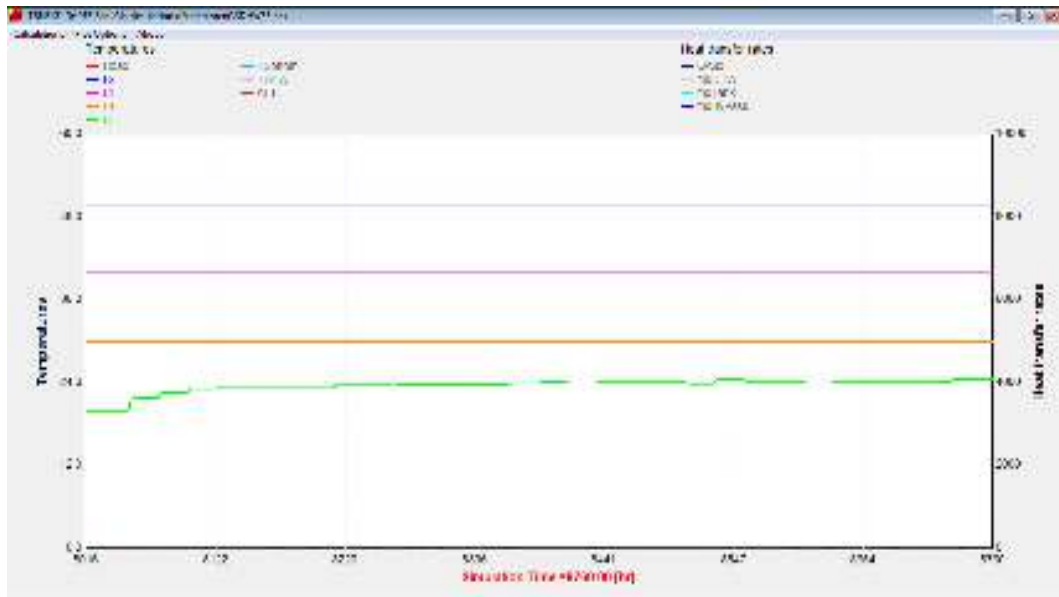


Figure 3.5 :l'évolution de température pendant (8016h-8760h)

-La stabilité de la température T4 à 30°C et la diminution de la température T5 à 25°C.

❖ **L'évolution de température dans une cuve stratifiée avec puisage avec un débit de 70 l/hr et altitude de 26.42 :**

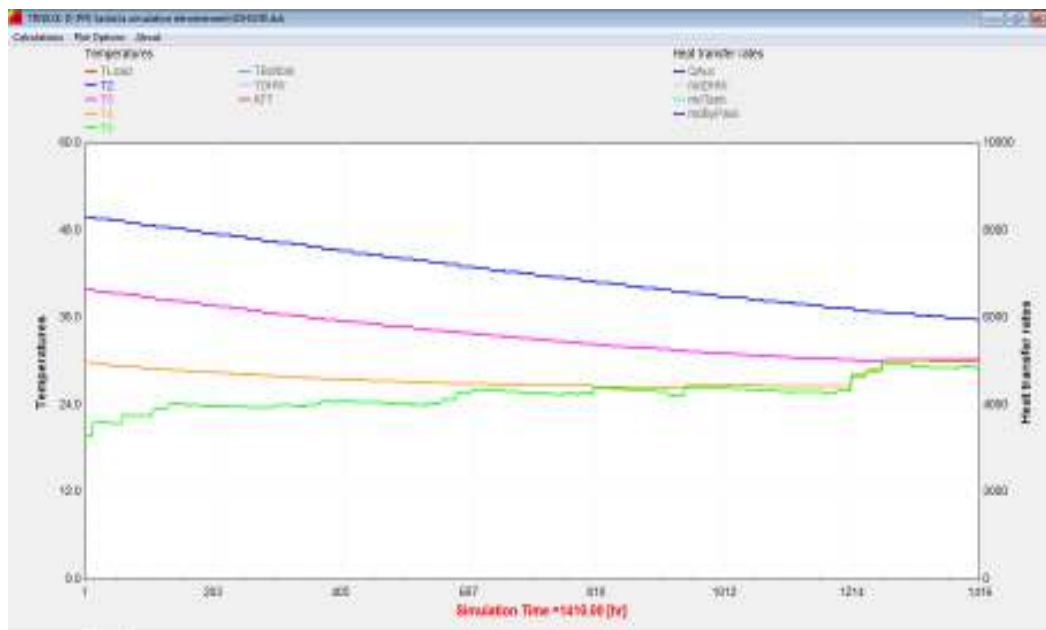


Figure 3.6 :l'évolution de température pendant (1h-1416h)

On remarque dans cette période la diminution des températures T2 de 50 °Cà 36°C et T3 de 40°C à 30°C.

- La diminution de T4 de 30°C à 26°C après elle augmente jusqu'à 30°C.

- l'augmentation de T5 de 20°C jusqu'à 29°C.

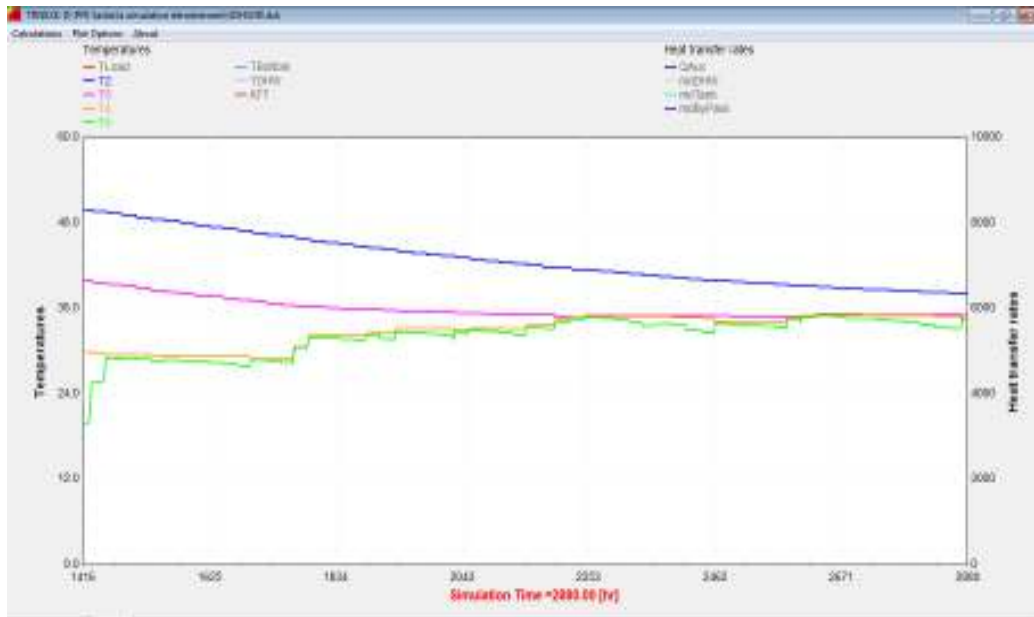


Figure 3.7 : l'évolution de température pendant (1416h-2880h)

La figure 3.7 représente :

- L'augmentation de T2 et T3 (38°C -35°C).
- L'augmentation de T4 et T5 a 35°C.

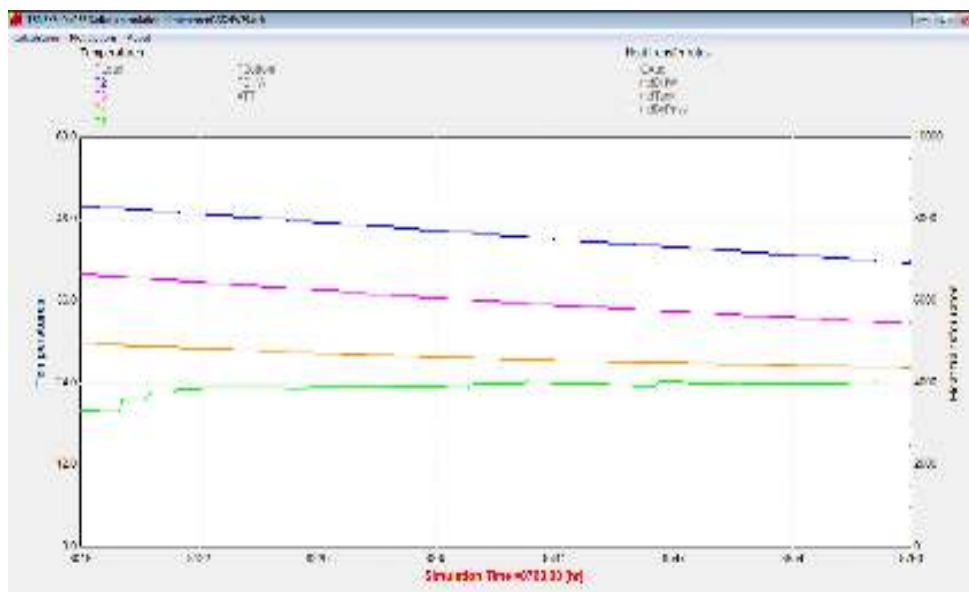


Figure 3.8 : l'évolution de température pendant (8016h-8760h)

Les figures 3.6, 3.7, 3.8, représente les évolutions des températures des tranches pour les mois d'hiver avec puisage avec un débit de 2000l/h.

On remarque que les températures (T2, T3, T4) décroient et que l'écart de température entre les nœuds reste constant.

La température du nœud T5 augmente à cause :

- Le stockage durant l'hiver (les capteurs fonctionnent durant cette période).
- L'inertie du système.
- L'échange par conduction entre la tranche 4 et 5 d'une part et l'effet des parois de la cuve (joue le rôle d'ailette).
- ❖ **L'évolution de température dans une cuve stratifiée sans puisage avec un débit de 40 l/hr et une inclinaison de 26.42 :**

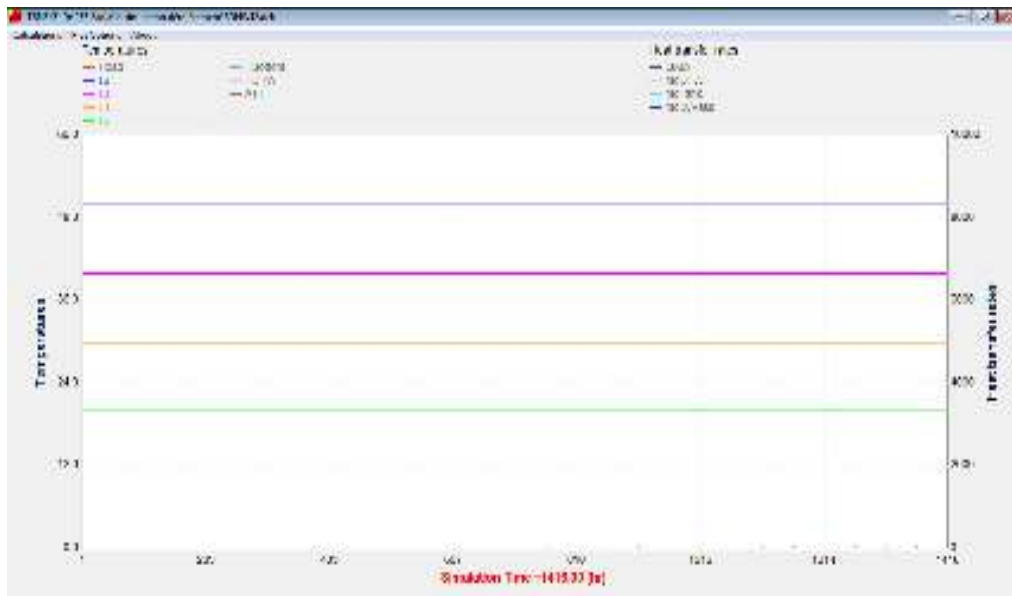


Figure 3.9 : l'évolution de température pendant (1h-1416h)



Figure 3.10 : l'évolution de température pendant (1416h-2880h)

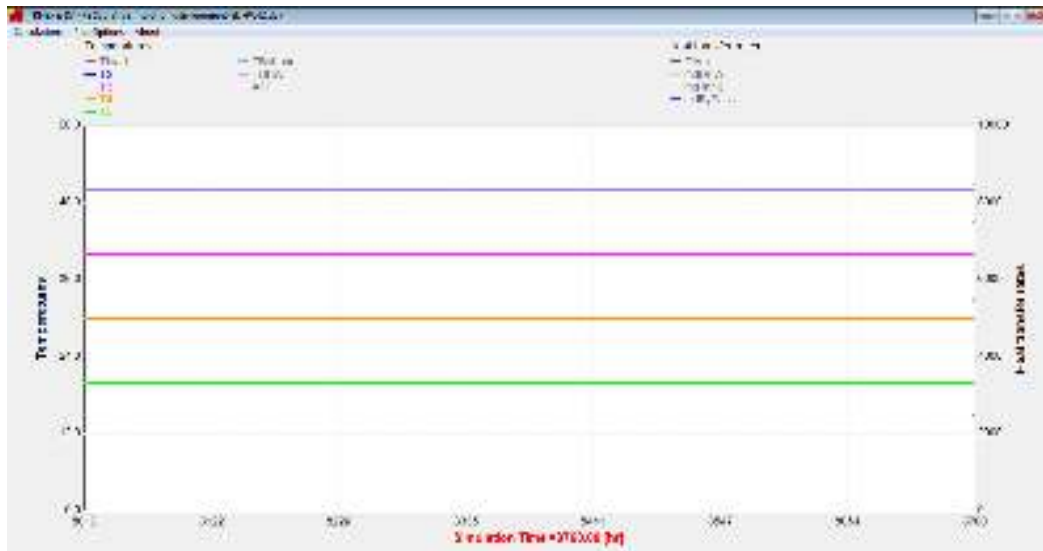


Figure 3.11 : l'évolution de température pendant (8016h-8760h)

- On remarque que tous les températures ont la même allure sous forme d'une droite durant la période d'hiver avec des températures uniforme pour chaque tranche. Les températures T2, T3, T4, T5 comprenant les valeurs (50-40-30-20°C).

- ❖ L'évolution de température dans une cuve stratifiée avec puisage avec un débit de 40 l/hret une inclinaison de 26.42 :

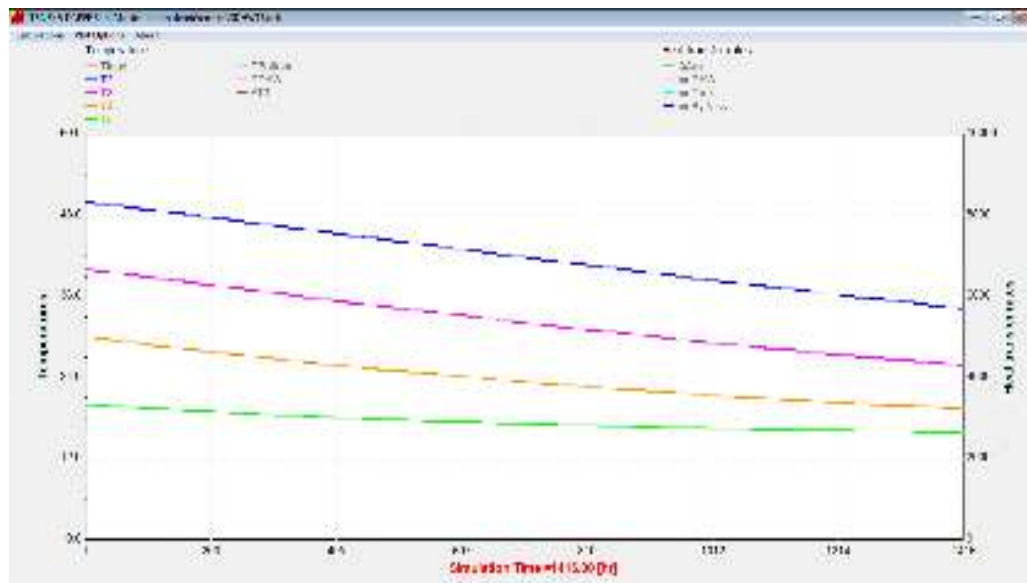


Figure 3.12 : l'évolution de température pendant (1h-1416h)

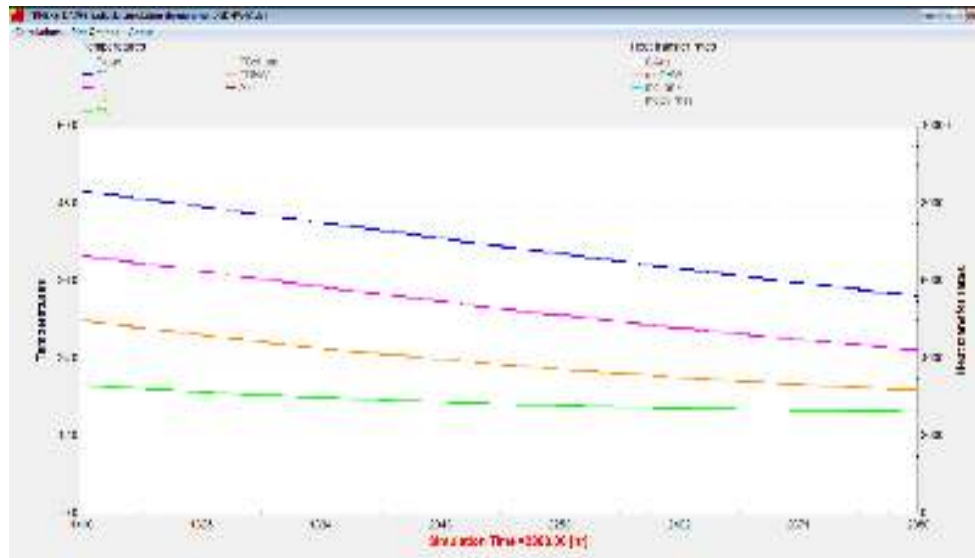


Figure 3.13 : l'évolution de température pendant (1416h-2880h)

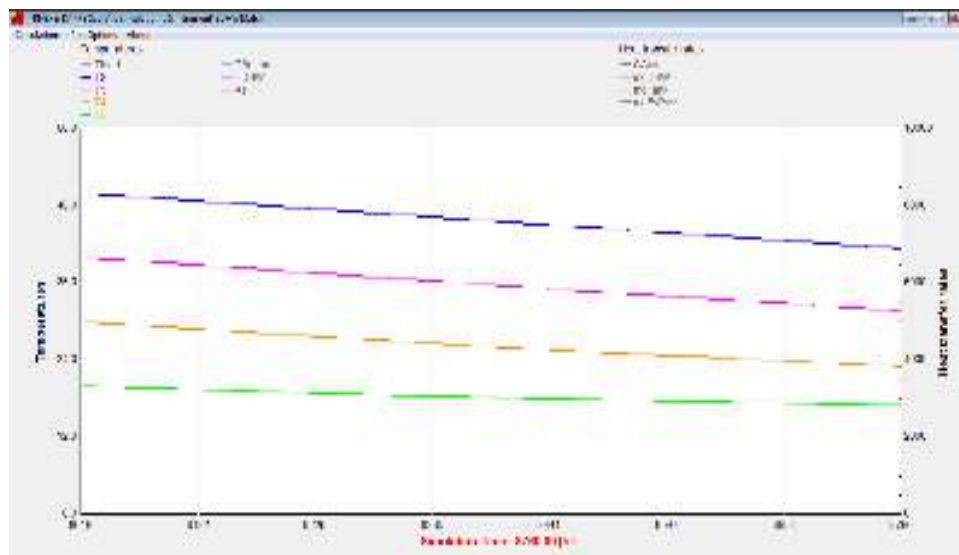


Figure 3.14 : l'évolution de température pendant (8016h-8760h)

-les figures 3.12 ; 3.13, 3.14 représente la diminution des températures progressivement de chaque tranche.

-Les températures T2, T3, T4, T5 diminuent à partir des valeurs (50-40-30-20°C) aux (41°C – 32°C – 23°C – 17°C).

➤ système 2 :

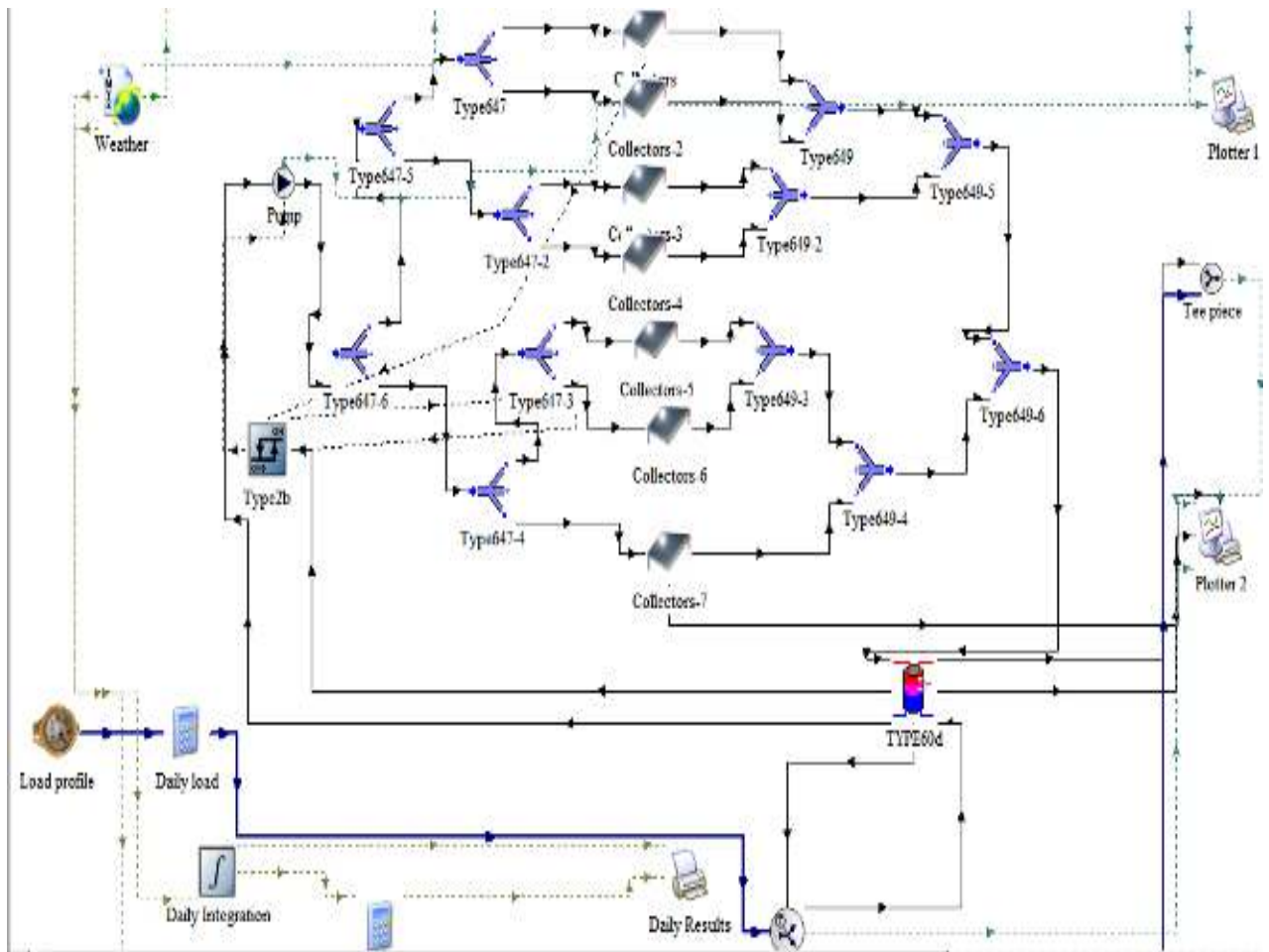


Figure3.15 : Schéma du modèle de stockage -2-

- ❖ L'évolution de température dans une cuve non stratifiée sans puisage avec un débit de 70 l/hr et inclinaison de 26.42 :

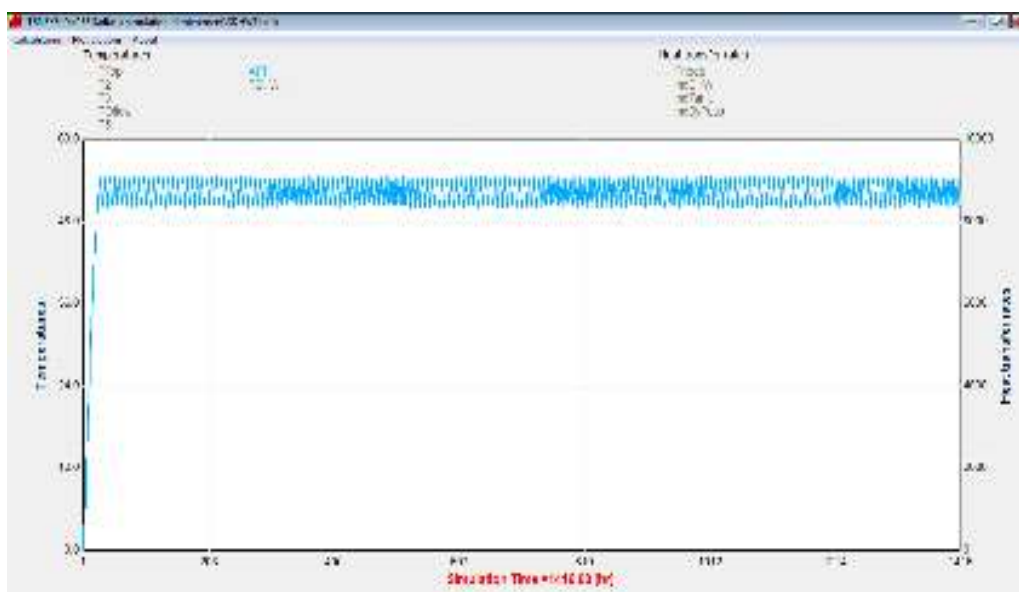


Figure 3.16: l'évolution de température pendant (1h-1416h)

-La figure 3.16 représente l'évolution de température, on constate qu'elle est constante pendant la période d'hiver.

-Le même résultat a été obtenu pour une cuve non stratifiée avec puisage avec un débit de 70 l/hr et 40 l/hr et une inclinaison de 26.42.

L'été : (la charge)

➤ **Systeme 1 :**

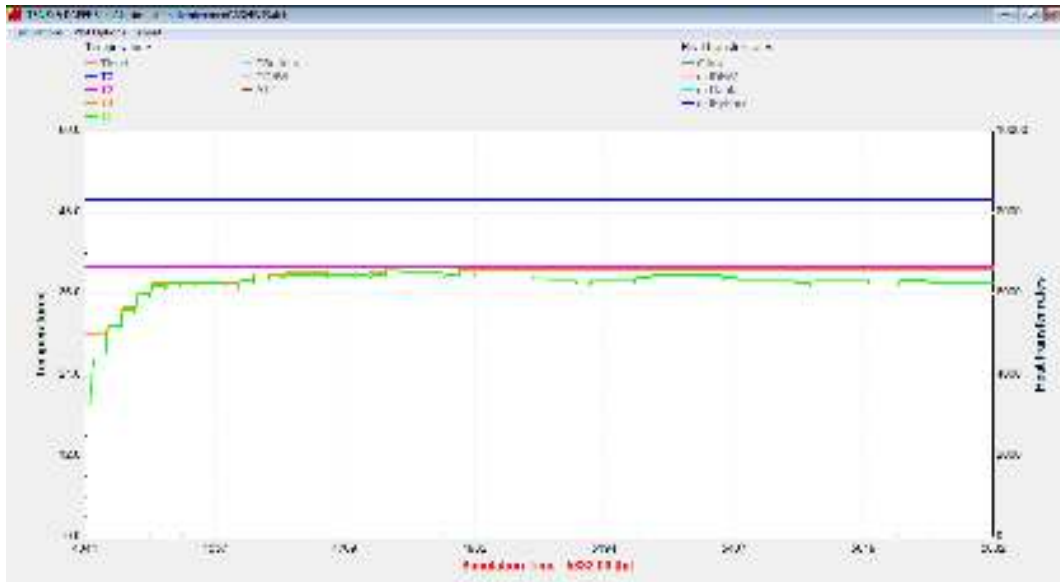


Figure 3.17 : L'évolution de température dans une cuve stratifiée sans puisage avec un débit de 70 l/hr et une inclinaison de 26.42.

La figure 3.17représente :

- La stabilité de T2 et T3 qui comprennent les valeurs (50°C-40°C).
- l'augmentation de T4 et T5 de (30°C-20°C) a (40°C-38°C).

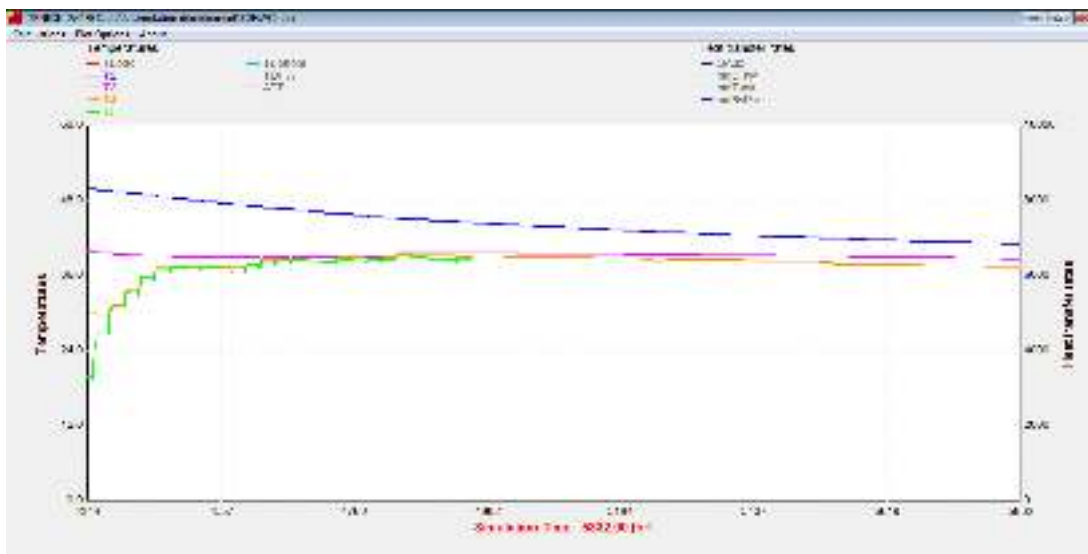


Figure 3.18 : L'évolution de température dans une cuve stratifiée avec puisage avec un débit de 70 l/hr et une inclinaison de 26.42.

On remarque dans la figure 3.18 la diminution progressivement de T2 et T3 (50°C à 34 °C) et de (40°C à 38°C) par contre une augmentation de T4 et T5 de (30 °C à 32°C) et de (20 °C à 30°C).



Figure 3.19 : L'évolution de température dans une cuve stratifiée sans puisage avec un débit de 40 l/hret une inclinaison de 26.42.

La figure 3.19 montre la stabilité de température de différents nœuds.

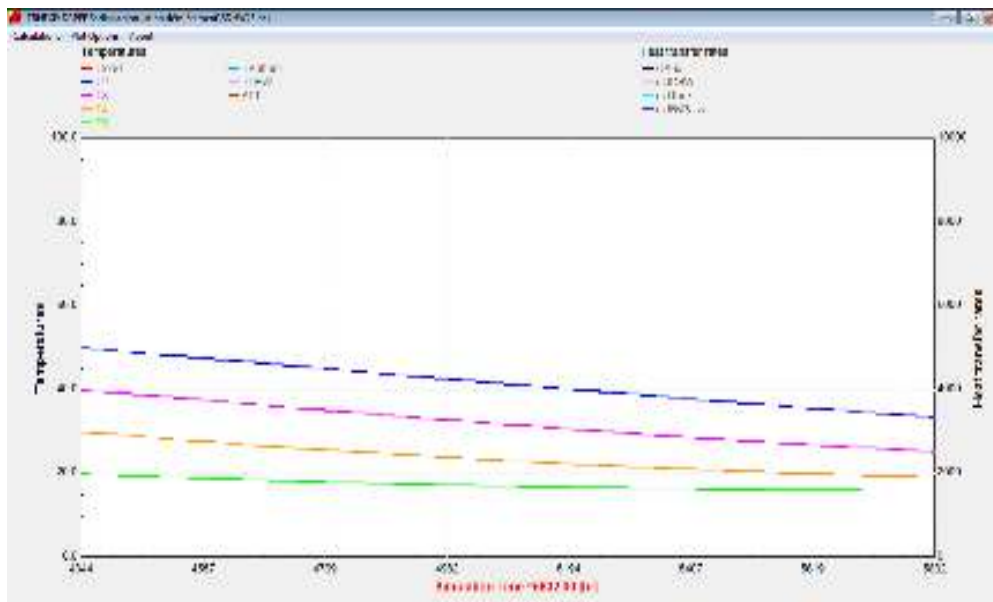


Figure 3.20 : L'évolution de température dans une cuve stratifiée avec puisage avec un débit de 40 l/hr et une inclinaison de 26.42.

La figure 3.20 représente la diminution de différentes tranches de (50 °C - 40°C-30°C-20°C) a (34 °C-25°C-19°C- 16°C).

➤ **Système 2 :**

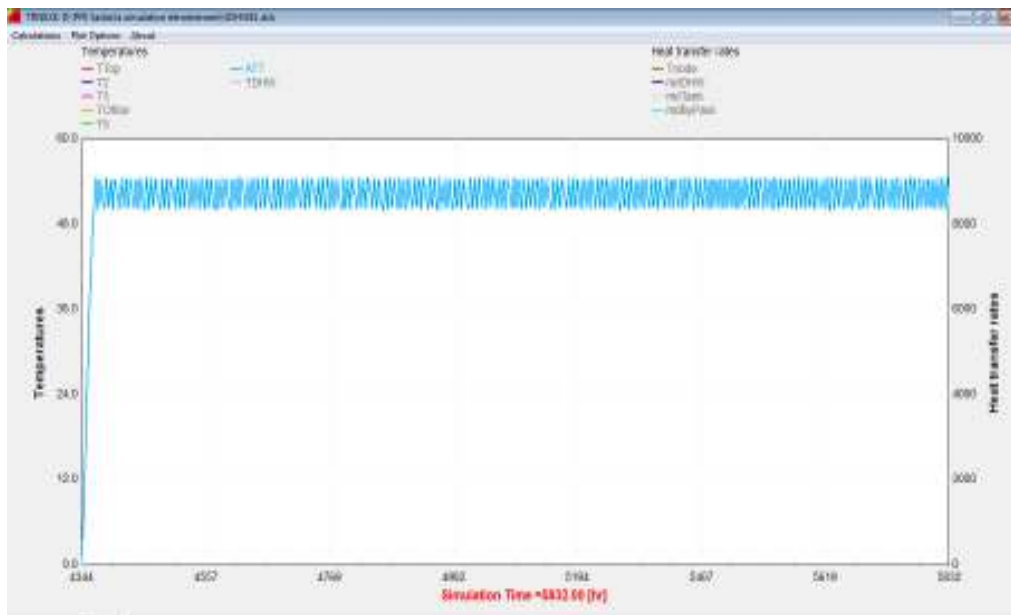


Figure 3.21 : L'évolution de température pour le deuxième système.

-On a obtenu le même résultat pour l'évolution de la température dans une cuve non stratifiée avec puisage avec un débit de 70 l/hr et 40 l/hret une inclinaison de 26.42.

-Concernant le deuxième paramètre l'inclinaison des capteurs à 36.42 on obtient presque les mêmes graphes.

3.6. Conclusion :

Après La simulation du comportement thermique dans notre système, nous avons montré que :

- La stratification est apparaît dans le cas de stockage sans puisage par rapport avec puisage.
- Le débit influe sur l'évolution les températures de la cuve de stockage.
- L'inclinaison influe peu sur la répartition de température dans la cuve de stockage.

Liste des Figures

Figure1.1 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état...10	10
Figure1.2 : le stockage d'eau chaude.....15	15
Figure1.3 : Les principes de base pour le stockage d'énergie thermique.....16	16
Figure1.4 : Construction du stockage gravier-eau.....16	16
Figure1.5 : Stockage en aquifère.....17	17
Figure 1.6 : Slurry de MCP micro-encapsulé.....18	18
Figure 1.7 : Intégration d'un MCP dans un mur de plâtre.....18	18
Figure 1.8 : schéma de principe du stockage de chaleur solaire par absorption.....19	19
Figure 1.9 :schéma de principe du dispositif de stockage par puits à double circulation.....19	19
Figure 1.10 : Schéma du système de chauffage et climatisation.....21	21
Figure 1.11 : schéma du lit de stockage.....21	21
Figure 1.12 : Présentation du concept : (a) stockage de chaleur l'été, (b) décharge de chaleur l'hiver.....23	23
Figure 2.1 : Plan du bâtiment (Blida).....27	27
Figure 2.2 : Profil de la consommation d'eau chaude sanitaire.....32	32
Figure2.3 : Nombre des degrés-jours (ndj) à Blida.....34	34
Figure 2.4 : Les besoins mensuels en chauffage.....34	34
Figure 2.5 : Les besoins mensuels en ECS.....35	35
Figure 2.6 : Schémas de calcul des angles de l'ombre.....38	38
Figure 2.7 : un échangeur de chaleur intégré dans une cuve de stockage.....39	39
Figure 2.8 : Schéma de la cuve de stockage.....42	42
Figure2.9 : Shéma analogique de la cuve de stockage.....42	42
Figure 3.1 : Exemple de simulation d'un chauffe-eau solaire sur TRNSYS.....47	47
Figure 3.2 : Schéma du modèle de stockage -1-.....49	49
Figure 3.3 :l'évolution de température pendant (1h-1416h).....50	50
Figure 3.4 :l'évolution de température pendant (1416h-2880h).....50	50
Figure 3.5 :l'évolution de température pendant (8016h-8760h).....51	51
Figure 3.6 :l'évolution de température pendant (1h-1416h).....51	51
Figure 3.7 :l'évolution de température pendant (1416h-2880h).....52	52

LISTE DES FIGURES

Figure 3.8 : l'évolution de température pendant (8016h-8760h).....	52
Figure 3.9 : l'évolution de température pendant (1h-1416h).....	53
Figure 3.10 : l'évolution de température pendant (1416h-2880h).....	53
Figure 3.11 : l'évolution de température pendant (8016h-8760h).....	54
Figure 3.12 : l'évolution de température pendant (1h-1416h).....	54
Figure 3.13 : l'évolution de température pendant (1416h-2880h).....	55
Figure 3.14 : l'évolution de température pendant (8016h-8760h).....	55
Figure 3.15 : Schéma du modèle de stockage -2-.....	56
Figure 3.16 : l'évolution de température pendant (1h-1416h).....	56
Figure 3.17 : L'évolution de température dans une cuve stratifiée sans puisage avec un débit de 70 l/hr et une inclinaison de 26.42.....	57
Figure 3.18 : L'évolution de température dans une cuve stratifiée avec puisage avec un débit de 70 l/hr et une inclinaison de 26.42.....	57
Figure 3.19 : L'évolution de température dans une cuve stratifiée sans puisage avec un débit de 40 l/hr et une inclinaison de 26.42.....	58
Figure 3.20 : L'évolution de température dans une cuve stratifiée avec puisage avec un débit de 40 l/hr et une inclinaison de 26.42.....	58
Figure 3.21 : L'évolution de température pour le deuxième système.....	59

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C.....	6
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de l'eau comme stockeur de chaleur.....	7
Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients de l'huile comme stockeur de chaleur.....	8
Tableau 1.4 : Avantages et inconvénients de la roche, du béton et des briques comme stockeur de chaleur.....	8
Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients des métaux comme stockeur de chaleur.....	9
Tableau1.6: Critères à respecter lors du choix d'un matériau à changement de phase.....	11
Tableau 1.7 : Avantages et inconvénients des différents changements d'état.....	11
Tableau1.8: Avantages et inconvénients des matériaux inorganiques.....	12
Tableau 1.9 : Avantages et inconvénients des matériaux organiques.....	12
Tableau 1.10 : Température de fusion et chaleur latente de quelques MCP inorganiques et organiques.....	13
Tableau 1.11: Avantages et inconvénients des eutectiques.....	13
Tableau 1.12 : Une liste de quelques Eutectiques.....	13
Tableau 1.13: Matériaux adsorbants.....	14
Tableau 1.14 : Matériaux adaptés au stockage chimique.....	15
Tableau 2.1 : Composition des parois du bâtiment.....	27
Tableau 2.2 : Température ambiante moyenne mensuelle à Blida.....	28
Tableau 2.3 : Puissances dégagées par les appareils électroménagers.....	30
Tableau2.4 : Nombre des degrés jours (Ndj).....	33
Tableau 2.5 : Les besoins mensuels de chauffage.....	34
Tableau 2.6: Les besoins mensuels en eau chaude sanitaire.....	35
Tableau 2.7 : Caractéristique du capteur utilisé.....	37

Sommaire

Résumé

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature et abréviation

Introduction Générale.....**Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre 1 Etude bibliographique

1.1.Introduction**Erreur ! Signet non défini.**

1.2. Concept du stockage de l'énergie**Erreur ! Signet non défini.**

1.3. L'intérêt de stockage**Erreur ! Signet non défini.**

1.4. Les différentes modes de stockage thermique.....**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.1. Stockage par chaleur sensible**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.1.1. Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.1.2. Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.2. La chaleur latente**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.2.1. Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.2.2. Les avantages du stockage par chaleur latente.....**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.2.3. Matériaux à changement de phase (MCP)**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.2.4. Le choix du matériau à changement de phase (MCP)**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.2.5. Les différents changements d'état**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.2.6. Classification des matériaux à changement de phase**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.3. Stockage thermochimique.....**Erreur ! Signet non défini.**

1.4.4. Stockage chimique**Erreur ! Signet non défini.**

1.5. Les technologies de stockage thermique.....**Erreur ! Signet non défini.**

1.5.1. Le stockage par chaleur sensible.....**Erreur ! Signet non défini.**

1.5.2. Le stockage par chaleur latente**Erreur ! Signet non défini.**

1.5.3. Le stockage thermochimique**Erreur ! Signet non défini.**

1.6. Travaux portant sur le stockage inter-saisonnier.....**Erreur ! Signet non défini.**

1.7. Conclusion**Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre 2

Dimensionnement de l'installation

2.1. Introduction**Erreur ! Signet non défini.**

Sommaire

2.2. Déterminations des déperditions thermiques.....	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2. Déperditions thermiques du bâtiment	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2.1. Déperditions par l'enveloppe de bâtiment	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2.2. Déperditions par renouvellement d'air	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2.3. Apports internes	Erreur ! Signet non défini.
2.3. Détermination des besoins de chauffage.....	Erreur ! Signet non défini.
2.3.1 Calcul du coefficient de déperdition thermique.....	Erreur ! Signet non défini.
2.3.2. Calcul du coefficient des besoins thermiques BV	Erreur ! Signet non défini.
2.3.3 Méthode des degrés jours.....	Erreur ! Signet non défini.
2.4. Détermination des besoins en eau chaude sanitaire	Erreur ! Signet non défini.
2.5. Calcul des besoins en chauffage	Erreur ! Signet non défini.
2.5.1. Calcul du coefficient de déperdition thermique.....	Erreur ! Signet non défini.
2.5.2. Calcul des apports internes	Erreur ! Signet non défini.
2.5.3. Calcul des degrés-jours	Erreur ! Signet non défini.
2.5.4. Calcul des besoins en eau chaude sanitaire.....	Erreur ! Signet non défini.
2.6. Dimensionnement de la cuve de stockage.....	Erreur ! Signet non défini.
2.7. Le capteur solaire	Erreur ! Signet non défini.
2.8. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur	Erreur ! Signet non défini.
2.9. Description de la cuve.....	Erreur ! Signet non défini.
2.10. Bilan thermique de la cuve de stockage.....	Erreur ! Signet non défini.
a- Modèles stratifiés	Erreur ! Signet non défini.
b- Modèle brassé	Erreur ! Signet non défini.
2.11. Conclusion	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre 3	Résultats et interprétations
3.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
3.2. Présentation de l'logiciel utilisée(TRNSYS Simulation Studio).....	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Noyau de TRNSYS	Erreur ! Signet non défini.
3.4. Description générale du système	Erreur ! Signet non défini.
3.4.1. Fichier météo TYPE (109).....	Erreur ! Signet non défini.
3.4.2. Capteur solaire Type (1b)	Erreur ! Signet non défini.
3.4.3. Pompe circulatrice TYPE(3).....	Erreur ! Signet non défini.
3.4.4. Réservoir de stockage TYPE (4b).....	Erreur ! Signet non défini.
3.4.2. Réservoir de stockage : TYPE (60).....	Erreur ! Signet non défini.
3.5. Les résultats.....	Erreur ! Signet non défini.
3.6. Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

Sommaire

Conclusion Générale

Références bibliographiques

NOMENCLATURE ET ABREVIATION

Nomenclature et abréviation

Symbole	Définition	Unité
a_0	Rendement optique du capteur	%
a_1	Conductance globale du capteur	W/K.m ²
Be	Besoins journalier en eau chaud	l/j
BV	Coefficient des besoins thermiques	W/°C
C_L	Chaleur spécifique du corps à l'état liquide	J kg ⁻¹ K ⁻¹
C_P	Capacité thermique massique du matériau	J kg ⁻¹ K ⁻¹
C_{pa}	Chaleur massique de l'air	J/Kg.°C
C_s	Chaleur spécifique du corps à l'état solide	J .kg ⁻¹ .K ⁻¹
D_c	Diamètre de la cuve	m
D_e	Diamètre extérieur	m
D_I	Diamètre intérieur	m
D_s	Diamètre de spire	m
e_{ac}	Epaisseur d'acier	m
e_t	Epaisseur de tube	m
e_{isc}	Epaisseur de l'isolant	m
F_R	Facteur de conductance de capteur solaire	-
GV	Coefficient de déperdition thermique	W/°C
G_n	Irradiation global	J/m ²
h_{cv}	Coefficient d'échange de la chaleur par convection	W/m ² .°C
he	Coefficient de convection thermique coté extérieur	W/m ² .°C
h_i	Enthalpie massique initiale	J kg ⁻¹
h_f	Enthalpie massique finale	J kg ⁻¹
H_c	Hauteur de la cuve	m
H_e	Nombre de spire dans l'échangeur	-
K	Coefficients de transmission	W/m ² .°C

NOMENCLATURE ET ABREVIATION

	surfacique	
Kf	Coefficients de transmission surfacique des fenêtres	W/m ² .°C
Km	Coefficients de transmission surfacique des murs	W/m ² .°C
K _p	Coefficients de transmission surfacique de plancher bas	W/m ² .°C
K _{po}	Coefficients de transmission surfacique des portes	W/m ² .°C
K _t	Coefficients de transmission surfacique de toit	W/m ² .°C
L	Chaleur latente de changement de phase	J/Kg
L _e	Longueur de l'échangeur	m
L _{cv}	Longueur de la cuve	m
m	Masse du matériau	kg
m _c	Débit de capteur	litres/h/m ²
N _r	Nombre de rangées de capteurs inclinés	-
N	Nombre de tranche de la cuve	-
N _c	Nombre de capteur	-
n _j	Nombre du jour	-
N _{dj}	Nombre de degré jour	-
P	Nombre de personne	-
Q	Quantité de chaleur Q échangée par le matériau	J
Q _c	Besoins énergétique réels	KWh
Q _{ecs}	Quantité d'eau chaude sanitaire	KWh/mois
Q _{ext}	Déperditions totales coté extérieur	W
Q _f	Déperditions par les fenêtres	W
Q _i	Apports internes à la maison	W
Q _m	Déperdition par le mur extérieur	W
Q _p	Déperditions par le plancher	W
Q _{po}	Déperditions par les portes	W

NOMENCLATURE ET ABREVIATION

Q_t	Déperditions par le toit	W	
Q_{th}	Déperditions thermiques du logement	W	
Q_{to}	Déperditions totales par l'enveloppe de la maison	W	
R_a	Ratio de stockage	l/m^2	
r_1	Rayon intérieur de la cuve	m	
R_{th2}	Résistance de la virole	$m^2 \cdot ^\circ C/W$	
R_{th3}	Résistance de l'isolant	$m^2 \cdot ^\circ C/W$	
R_{th4}	Résistance thermique entre l'isolant et la tôle	$m^2 \cdot ^\circ C /w$	
R_{th}	Résistance thermique	$m^2 \cdot ^\circ C /w$	
R_{thc}	Résistances thermiques sur les côtés	$m^2 \cdot ^\circ C /w$	
R_{thr}	Résistance thermique radiales	$m^2 \cdot ^\circ C/w$	
S	Surface de capteur	m^2	
S_{dispo}	Surface disponible	m^2	
S_e	Surface de l'échangeur	m^2	
S_{cMax}	Surface maximale d'un champ	m^2	
S_e	Surface de l'échangeur	m^2	
S_f	Surface des fenêtres	m^2	
S_m	Surface du mur extérieure	m^2	
S_{po}	Surface des portes	m^2	
t_r	Temps de réserve	jour	
T_a	Température ambiant	$^\circ C$	
T_e	Température de l'eau froide	$^\circ C$	
T_i	Température de confort		$^\circ C$
T_{sc}	Température sans chauffage	K	
T_{ir}	Température de soutirage	K	
T_s	Température du stockage	K	
V	Volume de la maison	m^3	
V_a	Débit de renouvellement d'air	m^3/s	
V_s	Volume de la cuve	m^3	
U_L	Coefficient de perte globale	$m^2 \cdot ^\circ C/w$	

NOMENCLATURE ET ABREVIATION

d'un capteur

Symboles grecs :

Δh_f		Enthalpie spécifique de fusion	$J\ kg^{-1}$
ρ		Masse volumique de l'eau	Kg/ m^3
ρ_a		Masse volumique de l'air	Kg/ m^3
β		Inclinaison de lieu	degré
	ΔC	Ecart minimal C entre rangées	
λ		Conductivité de liquide stocké	$Wm^{-1}K^{-1}$
λ_{isc}		Conductivité thermique de l'isolant	$Wm^{-1}K^{-1}$
λ_t		Conductivité thermique de la tôle	$Wm^{-1}K^{-1}$
$(\tau \alpha)$		Coefficient de transmittivité et d'absorptivité produit par le capteur	-

Nombres Adimensionnels :

Nu	nombre de nusselt
Pr	nombre de prandlt
Gr	nombre de grashoft

Abréviation :

MCP	matériaux à changement de phase.
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage.
ECS	Eau chaud sanitaire.

Le travail que nous avons entrepris a porté sur le stockage inter-saisonnier.

Nous avons accompli au cours de ce mémoire à l'étude d'un système de stockage thermique saisonnier destiné à satisfaire les besoins en chauffage et l'eau chaud sanitaire d'un bâtiment.

A l'issue de l'état de l'art des différents modes de stockage, le stockage par chaleur sensible est apparu comme le moyen le plus adapté à cause de sa simplicité, faible cout, il utilise une source de chaleur pour augmenter la température du matériau. Les conditions hydrogéologiques du site de construction imposent le plus souvent le choix du système.

Après le calcul des besoins de chauffage du bâtiment, nous avons dimensionné l'échangeur thermique et la cuve de stockage.

La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel TRYNSYS.

Les résultats montre que :

- ✓ La stratification est apparente dans le cas de stockage sans puisage par rapport avec puisage.
- ✓ Le débit influe sur les températures de stockage.
- ✓ L'inclinaison influe peu sur la répartition de température.

Cette étude a permis d'atteindre les objectifs suivants :

- Etudié les différents systèmes de stockage inter-saisonnier et de s'intéresser au stockage enterré.
- L'étude de déperditions thermiques du bâtiment pour satisfaire le besoins en chauffage et en eau chaud sanitaire.
- Dimensionnement de l'échangeur de chaleur et la cuve de stockage.
- La simulation pour les deux cas de stockage stratifié et brassé.
- L'influence de certains paramètre à savoir ; le débit et l'inclinaison de capteur solaire.

Perspectives :

Selon l'étude bibliographique le stockage chimique nous apparait comme technologie adaptée à l'application de stockage longue durée, il serait souhaitable d'étudier ce type de stockage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]Cherbal S, Analyse d'un système de stockage thermique résidentiel par masse d'eau, Université du Québec, 2014.
- [2]Smakdji N, Optimisation et modélisation d'un distillateur solaire à ailettes avec stockage de chaleur, Université de Constantine, 2014.
- [3] Maha A, Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments, Couplage matériaux à changement de phase, supe isolation, Apports solaire, Université Joseph Fourier, 2004.
- [4] Dincer I, MA Rosen, Thermal energy storage: Systems and Applications, Chichester, England, Wiley Edition, 2002.
- [5]Jean SS, Hussein I, Adrian I, Étude et conception d'un échangeur thermique pour un système hybride de type éolien-diesel-stockage d'air comprimé (JEDSAC), Laboratoire de recherche en énergie éolienne, université de Québec à Rimouski, Canada, 2008.
- [6] Hasnain SM, Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: Heat storage materials and techniques, Elsevier Science Ltd, 1998.
- [7]Duffie JA, Beckman WA, Solar Thermal Processes, John Wiley, Sons, 1989.
- [8]Ali Abou Hassen, Modélisation et caractérisation de modules de stockage de chaleur comprenant des matériaux à changement de phase, Université Libanaise, 2012.
- [9] Pierre Pardo M, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013.
- [10]Serge Blaise EA, Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase.
- [11]Farid MM. et al, A review on phase change energystorage: materials and applications, Energy conservation and management 45 ,2004, 1597-1615.
- [12] Atul Sh, Review on thermal energystorage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2009, 318–345.
- [13] Hasnain SM, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques, Energy research, 1997, Vol. 39(11), pp. 1127 – 1138.
- [14] Gil A, Medrano M, Martorell I, Lazaro A, Dolapo P, Zalba B, Cabeza LF, State of the art on hightemperature thermal energystorage for powergeneration. Part 1. Concepts, materials and modelisation, Renewable and sustainable energy reviews 14 (1), 2010, 31-55.
- [15] Akgün U, Prediction of Adsorption Equilibria of Gases, Genehmigten dissertation, Technischen Universität München, 2006.
- [16] Tsoukpoe N, K E, Liu H, Le Pierrès N, Luo L, A review on long-term sorption solarenergystorage. Renewable and sustainable energy reviews 13, 2009, 2385-2396.
- [17] Marsteau S, Adsorption, ED 4263. INRS 29 (39), 2005.
- [18] Pinel P, Cruickshank CA, Beausoleil-Morrison I, Wills A, A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15(7) ,2011, 3341-3359.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [19] Lide D, CRC handbook of chemistry and physics, CRC Press, 90e édition, 2009.
- [20] Hongois S, Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 2011.
- [21] Beck JS, Vartuli JC, Roth WJ, Leonowicz ME, Kresge CT, Schmitt KD, Chut CTW, Olson DH, Sheppard EW, Mcgullen SB, Higgins JB, Schlenker JL, A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates. *Journal of the American Chemical Society*, 1992, 114, 10834-10843.
- [22] Zhang ET Fang, 2006.
- [23] Schmidt T, Mangold D, Müller-Steinhagen H, Central solar heating plants with seasonal storage in Germany, *Solar Energy*, 2004, 76, 165-174.
- [24] Hadorn JC, Thermal energy storage for solar and low energy buildings, state of art by the IEA Solar Heating and Cooling Programme Task 32. 2005.
- [25] Fukai J, Hamada Y, Morozumi Y, Miyatake O, Effect of carbon-fiber brushes on conductive heat transfer in phase change materials, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45, 4781-4792.
- [26] Kuznik F, David D, Johannes K, Roux JJ, A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 379-391.
- [27] Mehling H, Cabeza LF, Hippeli S, Hiebler S, PCM-module to improve hot water heat stores with stratification, *Renewable Energy*, 2003, 28, 699-711.
- [28] Ibanez M, Cabeza LF, Solé C, Roca J, Nogués M, Modelization of a water tank including a PCM module, *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26, 1328-1333.
- [29] Cabeza LF, Ibanéz M, Solé C, Roca J, Nogués M, Experimentation with a water tank including a PCM module, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, 90, 1273-1282.
- [30] Kokouvi E, N'Tsoukpoe, Etude du stockage à long terme de l'énergie solaire thermique par procédé d'absorption LiBr-H₂O pour le chauffage de l'habitat, Université de Grenoble, 2012.
- [31] Ausseur JY, Jean PH, Sauty JP, Stockage inter saisonnier de la chaleur dans le sol par puits à double circulation, 1985.
- [32] Dang Vu C, Delcambre B, Etude expérimentale et modélisation d'un stockage thermique de longue durée en lit de cailloux enterré, couplé à des capteurs solaires à air, 1987.
- [33] Benmansour A, Hamdan MA, Simulation du Stockage de l'énergie thermique dans un Lit fixe de sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase, 2001.
- [34] El Qarania Hamid, Analyse du transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion pour le chauffage d'eau, 2005.
- [35] Mustapha Faraji, Hamid El Qarnia, Optimisation d'un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion : application au refroidissement d'une composante électronique, 2007.
- [36] Parfait Tatsidjoudoug, Procédé de stockage d'énergie solaire thermique par adsorption pour le chauffage des bâtiments : Modélisation et Simulation numérique, Université de Grenoble, 2014.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [37] Règlementation thermique des bâtiments d'habitation, Règles de calcul des déperditions calorifiques, Fascicule 1, D.T.R. C-32.
- [38] Bernard J, Energie solaire calculs et optimisation, édition ellipses, 2004.
- [39] Fezzioui N, Droui B, Benyamine M, Larbi S, Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique, Revue des énergies renouvelables, 2008, Vol.11 N°1, 25-34.
- [40] Buyukalaca O, Bulut H, Yilmaz T, Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey, Applied Energy 69, 2001, 269-283.
- [41] Louinis L, Etude d'un système solaire combiné pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage, 2014.
- [42] Handbook A, Fundamentals, Energy Estimating Methods, 1993.
- [43] Benmeriem F, Contribution de l'analyse de la faisabilité énergétique d'une installation de production de l'eau chaude sanitaire par voie solaire, mémoire de magister, Université de chef, 2009.
- [44] Chateauminos, M, Mandineau, D, Roux D, Calcul d'installations solaires à eau, Edisud, 1982.
- [45] Cabirol T, Roux D, Chauffage de l'habitat et énergie solaire, Tome 2, Edisud, 1984.
- [46] Couards P, Michel H, Bilan thermique d'une maison solaire, méthode de calcul rapide, Editeur Paris, 1979.
- [47] Sami S, Lafri D, Hamid A, Dimensionnement d'une installation de chauffage d'eau collectif d'une capacité de 1500 litres, Rapport technique, 1999.
- [48] Mahfoud O, Bahria S, Pre-dimensionnement d'une installation de chauffage d'eau collective au CDER, Rapport technique.
- [49] Ahmed Khedim, L'énergie solaire, utilisation thermique et photovoltaïque, Editions Anep, 2005.
- [50] Lafri D, Contribution à l'étude du comportement thermique d'une cuve de stockage d'une installation de chauffage d'eau solaire, Magistère, Université Blida, 2001.
- [51] ADEME, Eau chaude sanitaire solaire - individuel et collectif, guide pour l'installateur, 2008.
- [52] Cours d'Énergie renouvelable (Stockage d'énergie), Mr Lafri, Université de Blida, Algérie.
- [53] Boulakhras K, Etude comparative des performances d'un capteur solaire sous vide et d'un capteur solaire ordinaire, Thèse de Magister en Énergétique, Option photo-thermique, Université de Constantine, 1998.
- [54] Braun JE, Klein SA, Mitchell JW, Seasonal storage of energy in solar heating, in revue, solar energy, 1981, ol.26, pp.403-411, U.S.A.