

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
Filière : GENIE MECANIQUE  
Spécialité : MECANIQUE ET ENERGETIQUE

Thème

**Stockage thermique d'énergie d'une centrale  
solaire**

**Présenté Par :**

- 1) Zenasni Ilyes.
- 2) Miloud Abid Hicham .

**Devant les jurys composés de :**

Dr TOUHAMI Baki	MAB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr Nehari Driss	MAB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr GUENDOOUZ Bouhelal	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur

*Année universitaire 2015/2016*



## *Dédicace*

*Nous dédions ce mémoire à nos chers parents qui nous 'ont éclairé*

*notre chemin et qui nous 'ont encouragé et soutenu tout au long de nos études.*

*A tous les membres de nos familles.*

*A tous nos amis, pour leur soutien aux moments difficiles de notre travail.*

*« Pour Tous Ceux On Demande De Allah Qu'il Les Récompense »*

*HICHAM et ILYES*

## *Remerciements*

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à notre Dieu pour nous avoir donné l'esprit et les moyens pour arriver à ce stade de connaissance, nous prions pour que nous restions fidèles à lui.

Nous exprimons toute notre gratitude à l'encadreur Mr. NEHARI Driss pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants du département de mécanique de Le centre universitaire de BELHADJ Bouchaib d'Ain Temouchent, qui nous ont donné les bases de la science.

Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien accepté de juger ce travail.

Nos remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

## ***Summary***

The purpose of this work was to present the implementation of the simulation of a storage system solar thermal a solar central. This system of refreshment storage solar thermal was simulated with the software TRNSYS 16.

We have articulated the presentation of our work around four parties:

the first chapter is devoted to present. The General Information on the storage of energy and energy efficiency to a storage of energy.

The second chapter is reserved to a description well detailed: the system of thermal storage and combines for heating and cooling.

The third chapter addresses to present modeling and the model formulation of equations that allow to see the thermal storage.

The fourth chapter is summarized on details to the dynamic simulation of a solar central power in the region of Ain Témauchant, using an installation of solar central cylindrical parabolic

A general conclusion is given at the end of the document.

## ***Résumé***

Le but de ce travail était de présenter la mise en place de la simulation d'un système de stockage thermique solaire d'un central solaire. Ce système de rafraîchissement stockage thermique solaire a été simulé avec le logiciel TRNSYS 16.

Nous avons articulé l'exposé de nos travaux autour de quatre parties :

Le premier chapitre est consacré à présenter. les Généralités sur le stockage d'énergie et L'efficacité énergétique d'un stockage d'énergie.

Le deuxième chapitre est réservé à une description bien détaillé de : les Système de stockage thermique et combine de chauffage et de refroidissement.

Le troisième chapitre aborde a présente modalisation et les model Formulation des équations qui permettre de a voir le stockage thermique.

Le quatrième chapitre et Le dernier chapitre est résumé sur détaille à la simulation dynamique d'une central solaire dans la région de ain temauchant, utilisant une installation de central solaire cylindrique parabolique.

Une conclusion générale est donnée à la fin du document

## المخلص

الهدف من هذا العمل هو تقديم انشاء من محاكاة نظام التخزين الحرارية الشمسي لمحطة الطاقة الشمسية. عن طريق نظام تخزين

## TRNSYS 16

لقد فصلنا عملنا حول اربعة اجزاء

الفصل الاول يتمثل في تقديم - لمحة عامة عن تخزين الطاقة وكفاءة استخدام الطاقة في تخزين الطاقة

.الفصل الثانى مقصورة على وصف مفصل جيدا: عن نظام تخزين الحرارة يضم التدفئة والتبريد

الفصل الثالث فقد تناول وضع النماذج و المعادلات التى تمكن من تخزين الحرارة

الفصل الرابع و الفصل الاخير هو ملخص بالتفصيل عن المحاكاة ديناميكية لمحطة الطاقة الشمسية فى منطقة عين تموشنت باستعمال محطة شمسية دوانية استوانية

الاستنتاج العام تعطى فى نهاية الوثيقة.

# SOMMAIRE

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclatureur

Introduction général..... | 2

## Chapitre I : *GÉNÉRALITE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE*

I.1 Introduction.....	3
I.2 Ressources énergétiques solaires.....	3
I.2.1. Le rayonnement solaire.....	3
I.3 le stockage d'énergie.....	4
I.3.1. Le stockage sous forme d'énergie mécanique.....	5
I.3.2. Le stockage sous forme d'énergie électrique.....	8
I.3.3. Le stockage sous forme d'énergie électrochimique.....	9
I.3.4. Le stockage sous forme d'énergie thermique.....	10
I.3.5. Le stockage par chaleur sensible ou latente.....	11
I.4 Conclusion.....	15

## Chapitre II : *STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE*

II.1 Introduction.....	16
II.2 Principe du solaire thermodynamique.....	16
II.3 Les cycles thermodynamiques et fluides caloporteurs.....	19
II.3.1. Les cycles thermodynamiques.....	19
II.3.2. Les fluides caloporteurs.....	19
II.4 Les différentes technologies des centrales solaires thermodynamiques..	20
II.4.1. Technologie à capteur cylindro-parabolique.....	20
II.4.2. Technologie à tour (héliostat).....	21
II.4.3. Collecteur de Fresnel.....	22
II.4.4. Technologie à concentrateurs paraboliques (Dish-Stirling).....	23
II.5 Le stockage de l'énergie solaire.....	24
II.5.1. Centrale solaire avec stockage thermique.....	24
II.5.2. Constituants de base du système de stockage thermique.....	27
II.6 Centrale solaire hybride.....	32

II.7 Système solaire intégré dans une centrale à cycle combiné.....	33
II.8 Conclusion.....	33

### **Chapitre III : *LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***

III.1 Introduction.....	34
III.2 Modélisation.....	34
III.3 La description du model.....	35
III.3.1. Présentation détaillé.....	35
III.3.2. Modélisation du système.....	37
III.3.3. Position du problème.....	37
III.4 Formulation des équations régissant le champ thermique dans l'accumulateur.....	39
III.4.1. Equation régissant la température de l'eau.....	39
III.4.2. Equation régissant la chaleur dans la paraffine.....	40
III.4.3. Equation de la chaleur dans la phase liquide.....	42
III.5 Méthodes de résolution.....	42
III.5.1. Résolutions numériques.....	44
III.5.2. Discrétisation des équations.....	44

### **Chapitre IV : *DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS***

IV.1 Introduction.....	46
IV.2 Aperçu sur TRNSYS.....	46
IV.2.1. TRNSYS Simulation Studio.....	47
IV.2.2. TRN Build.....	48
IV.3 Résultat et discussion.....	49
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>69</b>
<b>Références bibliographique</b>	

Symbole	Signification
$\alpha$	Coefficient d'absorption
$\beta$	Angle d'inclinaison
$Q$	Flux d'énergie
$\Delta$	écart
$\zeta$	rendement énergétique
$\eta$	Rendement
$v$	volume spécifique
$\rho$	masse volumique
$f$	taux de couverture solaire



## *Nomenclature*

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>
A	la surface de collecteur	m <sup>2</sup>
a <sub>0</sub>	le coefficient d'efficacité optique du panneau	-
BP	Basse pression	Pa
HP	Haute pression	Pa
COP	Le coefficient de performance	-
COP <sub>C</sub>	Le coefficient de performance de Carnot	-
C <sub>p</sub>	Chaleur spécifique	k J/kg.K
h	Enthalpie	K J/kg.
I	l'irradiation solaire	-
L <sub>v</sub>	Chaleur latente	Kj/kg
m <sub>f</sub>	Le débit massique de réfrigérant	kg/s
m <sub>r</sub>	Le débit massique de solution diluée	kg/s
m <sub>ge</sub>	Le débit massique de solution concentrée	kg/s
P	La pression	Pa
Q <sub>ab</sub>	La puissance thermique a l'absorbeur	W
Q <sub>c</sub>	La puissance thermique au condenseur	W
Q <sub>ge</sub>	La puissance thermique au générateur	W
Q <sub>e</sub>	La puissance thermique a l'évaporateur	W
T <sub>a</sub>	La température de l'absorbeur	K°
T <sub>c</sub>	La température de condenseur	K°
T <sub>g</sub>	La température de générateur	K°
T <sub>e</sub>	La température de l'évaporateur	K°

$W_p$	Le travail de la pompe	W
$X_f$	Le titre massique du frigorigène	%
$X_c$	Le titre massique de la solution concentrée	%
$X_d$	Le titre du mélange binaire riche en fluide frigorigène	%
$\rho$	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{col}$	Le rendement du collecteur	-
$\eta$	Le rendement, efficacité	-

## ***INDICES***

C	Ciel
Ext	Exterieur
Pa	Paroi
S	phase solide
Ros	rose
e	eau
L	liquide
F	Front de fusion
P	Paraffine

# *Liste des Tableaux*

**Tableau IV** : définitions des paramètres principaux de trnsys.

# *Liste des figures*

## *Chapitre I :*

Figure I.1 : Composantes du rayonnement solaire

Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une station de pompage hydraulique

Figure I.3 : stockage d'énergie sous forme d'air comprimé

Figure I.4 : Principes de fonctionnement de systèmes de stockage électrochimiques

Figure I.5 : Les trois étapes du stockage de l'énergie thermique

Figure I.6 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (solide/liquide)

Figure I.7: Différentes configurations de stockages thermiques

## *Chapitre II :*

Figure II.1 : Schéma global du solaire thermodynamique

Figure II.2 : Principe d'une centrale solaire thermodynamique

Figure II.3 : Facteur de concentration

Figure II.4 : Schéma d'une machine motrice

FigureII.5 : Cycles de Clausius-Rankine à vapeur simple

FigureII.6 : Collecteur cylindro-parabolique

FigureII.7 : Tour solaire.

FigureII.8 : Collecteur de Fresnel

FigureII.9 : Miroir parabolique.

FigureII.10 : Principe d'une centrale solaire cylindro-paraboliqueavec système de stockage thermique

FigureII.11: Principe d'un panneau solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire

FigureII.12 : Les capteurs solaires thermiques

FigureII.13 : Bilan énergétique du capteur solaire.

FigureII.14 : Echangeur à plaques.

FigureII.15 : Echangeur intégré

FigureII.16 : Schéma principe d'une centrale hybride

FigureII.17 : Centrale solaire intégré à un cycle combiné

### **Chapitre III :**

Figure III.1 : un model de chauffe-eau solaire

Figure III.2 : les composant de chauffe-eau solaire

### **Chapitre IV:**

Figure IV.1 : Interface du logiciel TRNYS

Figure IV.2: Interface du logiciel TRNBuild.

Figure IV.3 : Model d'installation 1 sur trnysys.

Figure IV.4 : le résultat de la simulation de l'installation1.

Figure IV.5 : Model d'installation 2 sur trnysys.

Figure IV.6: le résultat de la simulation de l'installation2.

Figure IV 7: Comparaison de la variation de température entre deux collecteur par rapport au temps.

Figure IV 8: Comparaison de la variation de Température entre deux collecteurs pendant une journée du mois de Janvier.

Figure IV 9: la variation de Température entre deux collecteurs pendant une journée du mois d'avril.

Figure IV 10: La variation de Température entre deux collecteurs pendant une journée du mois de Juillet.

Figure IV 11: La variation de Température entre deux collecteurs pendant une journée du mois d'Octobre.

Figure IV 12: variation de Température pendant la période de janvier entre les deux réservoirs.....

Figure 13 : variation de Température pendant la période d'Avril entre les deux réservoirs.

Figure IV 14: variation de Température pendant la période de juillet entre les deux réservoirs.

Figure IV 15 :variation de Température pendant la période d'Octobre entre les deux réservoirs.....

Figure IV 16 : variation de Température pendant une journée du mois de Janvier entre les deux réservoirs.

Figure IV 17 : variation de Température pendant une journée du mois de juillet entre les deux réservoirs.

Figure IV 18 ; variation de Température pendant une journée du mois d'octobre entre les deux réservoirs

Figure IV 19 : La variation de la température pendant le mois de janvier par rapport a une seul journée du mois de janvier.

Figure IV 20 : La variation de la température pendant le mois de janvier par rapport a une seul journée du mois de d'avril

Figure IV 21 : La variation de la température pendant le mois de janvier par rapport a une seul journée du mois de juillet

Figure IV 22 : La variation de la température pendant le mois de janvier par rapport a une seul journée du mois de d'octobre

Figure IV 23 :variation de température de deux réservoir par apport a une journée de mois de d'avril

Figure IV. 24 :variation de température de deux réservoir par apport a une journée de mois de d'avril

Figure IV 25 : variation de température de deux réservoirs par apport a une journée de mois de juillet

Figure IV 26 : variation de température de deux réservoirs par apport a une journée de mois de

Figure IV 27 : variation de température de deux réservoirs par apport a une journée de mois de

Figure IV 28 : variation de température de deux réservoirs par apport a une journée de mois de d'avril

Figure IV 29 : variation de température de deux réservoir par apport a une journée de mois de d'octobre

Figure IV 30 :variation de température de deux réservoir par apport a une journée de mois de juillet .....

Figure IV 31 :variation de température de deux réservoir par apport a une journée de mois de janvier

Figure IV 32:variation de température de deux réservoir par apport a une journée de mois de d'avril

Figure IV 33: variation de température de deux réservoirs par apport a une journée de mois d'octobre

***INTRODUCTION***  
***GENERALE***



# Introduction générale

L'utilisation mondiale de l'énergie repose aujourd'hui à 80% sur les énergies fossiles comme le charbon, le gaz ou le pétrole. La plupart de ces sources d'énergie seront épuisés dans quelques dizaines d'années.

La première crise pétrolière du début des années 1970 a totalement modifié le rapport des pays occidentaux avec l'énergie. L'énergie, abondante et bon marché, est devenue un bien rare et cher. Les efforts ont été concentrés, d'une part sur la baisse du coût de l'énergie, et d'autre part sur la réduction de la consommation énergétique. Ensuite les préoccupations environnementales, ainsi que la prise de conscience du caractère fini des énergies fossiles ont pris une part croissante dans la gestion énergétique mondiale. Le réchauffement climatique global, dû aux émissions de gaz à effet de serre, et plus particulièrement au CO<sub>2</sub> provenant de la combustion des énergies fossiles est un fait établi et étudié par la communauté scientifique. La raréfaction des ressources mondiales en énergie fossile, bien que la date de la fin du pétrole ne soit pas l'objet d'un consensus, est un phénomène qui va nécessairement favoriser la hausse du coût de l'énergie. Ces deux facteurs obligent à repenser l'utilisation et la production de l'énergie (R. CHELAN, 2004).

Il devient impératif de développer des solutions alternatives mettant en valeur les différentes formes des énergies renouvelables, en particulier le solaire thermique. Mais ce dernier est limité à cause de l'absence de rayonnement solaire quotidiennement mais le stockage de l'énergie thermique reste impératif de développer des solutions alternatives et des techniques qui remplacent l'absence de soleil.

Du pétrole, du gaz mais aussi du soleil. Riche en énergies, l'Algérie, de par sa situation géographique privilégiée par rapport à l'équateur, bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel sur la quasi-totalité du territoire. Le potentiel solaire algérien reste le plus important de tout le bassin méditerranéen avec 169440 TWh/an soit 5000 fois la consommation algérienne en électricité et 60 fois la consommation de l'Europe.

*CHAPITRE I*  
*GÉNÉRALITE*  
*SUR LE STOCKAGE*  
*D'ÉNERGIE*

## ***1.1 Introduction :***

L'énergie solaire est une énergie inépuisable et propre à l'échelle humaine, elle permet de respecter l'environnement et de préserver la santé et les ressources énergétiques.

Utiliser l'énergie solaire directe ou stockée pour chauffer ou refroidir est une idée qui paraît d'une logique implacable. Le principe est simple et la technique est aujourd'hui fiable et éprouvée. Mais il souffrait déjà de ne pouvoir la stocker et l'utilisait sans même en être conscient, en réglant toute sa vie d'après l'alternance des jours et des nuits, d'après les variations cycliques des saisons.

Dans ce chapitre nous allons présenter les sources de base d'énergie solaire et les différents types de stockage de l'énergie parmi ces types on a le stockage thermique qui se fait généralement sous deux formes; le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente.

## ***1.2 Ressources énergétiques solaires :***

### ***1.2.1. Le rayonnement solaire***

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que  $1354 \text{ w/m}^2$  (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus.

L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus (figure I.1). L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc. [1]

- **Le rayonnement direct :**

Ce sont les rayons UV du Soleil. C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans les systèmes à concentration (four solaire, centrales solaires thermodynamique et photovoltaïque).

# GÉNÉRALITE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE

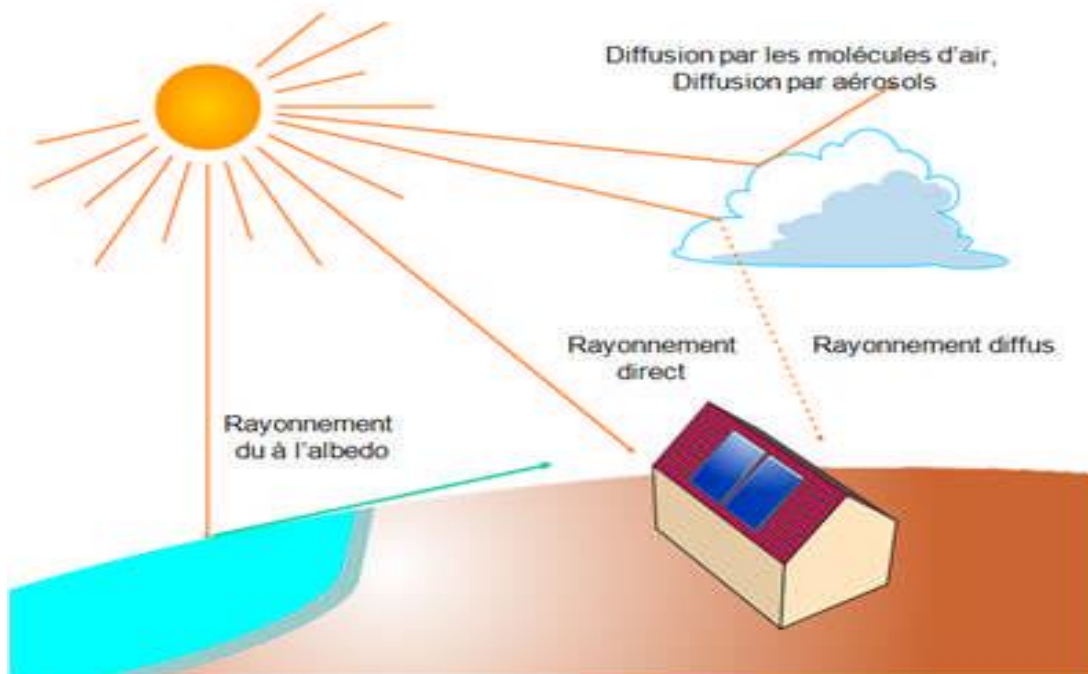
---

## ▪ Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année. [2]

## ▪ Le rayonnement global :

C'est la somme du rayonnement direct et diffus. C'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques.



*Figure I.1 : Composantes du rayonnement solaire.*

## ***I.3 le stockage d'énergie :***

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Par extension, le terme « stockage d'énergie » est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie. La maîtrise du stockage de l'énergie est particulièrement importante pour valoriser les énergies alternatives, telles que l'éolien ou le solaire, sûres et renouvelables, mais par nature intermittentes.

## ***GÉNÉRALITE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE***

---

Même pour la « production d'énergie », le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement « production d'énergie » n'est pas, physiquement, de la production, mais de la transformation d'un stock d'énergie potentielle (charbon, eau stockée en hauteur, matière fissile...) en une énergie directement utilisable pour un travail (électricité, travail mécanique).

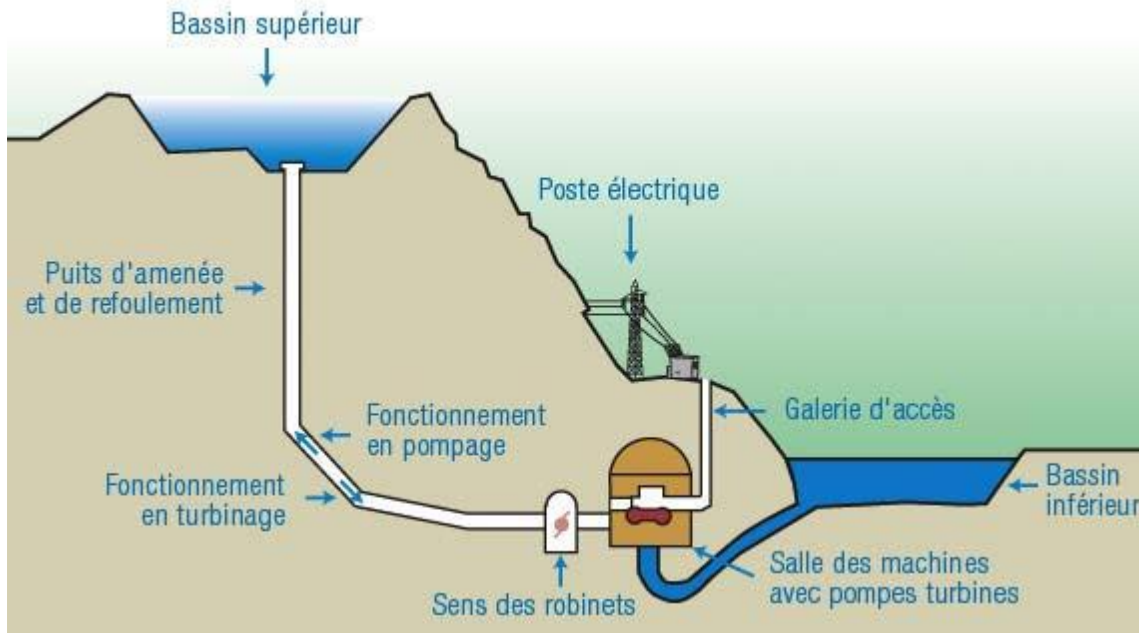
Les technologies de stockage sont nombreuses, mais aucune n'est parfaite, aucune n'est définitive. Elles permettent d'accumuler l'énergie dans une large gamme de niveaux de puissance ou de densité énergétique. Ces technologies peuvent être classées selon le type d'énergie restituée : mécanique, électrique ou thermique, mais elles ne sont pas forcément toutes adaptées au stockage de l'énergie solaire. [3]

### ***1.3.1. Le stockage sous forme d'énergie mécanique***

Ce type de stockage repose sur l'accumulation d'énergie cinétique ou potentielle, dont la restitution se fait sous forme d'énergie mécanique. Cette énergie n'est que très rarement utilisée en tant que telle ; elle sert dans la majorité des cas à entraîner un convertisseur électrique ou une turbine.

- **Pompage hydraulique gravitaire :**

Le principe de fonctionnement du pompage hydraulique est bien connu (Figure I.2). La phase de stockage consiste à remplir, lors du stockage, des réservoirs situés en altitude à l'aide de pompes hydrauliques. Au moment du déstockage, l'eau est simplement relâchée dans des conduites, pour aller décharger l'énergie cinétique de la chute dans une turbine électrique. Ce type de stockage nécessite des reliefs montagneux et les sites à aménager ne sont qu'en nombre limité, ce qui pose la question de l'utilisation/création de réservoirs souterrains, forcément plus dispendieux.[4]



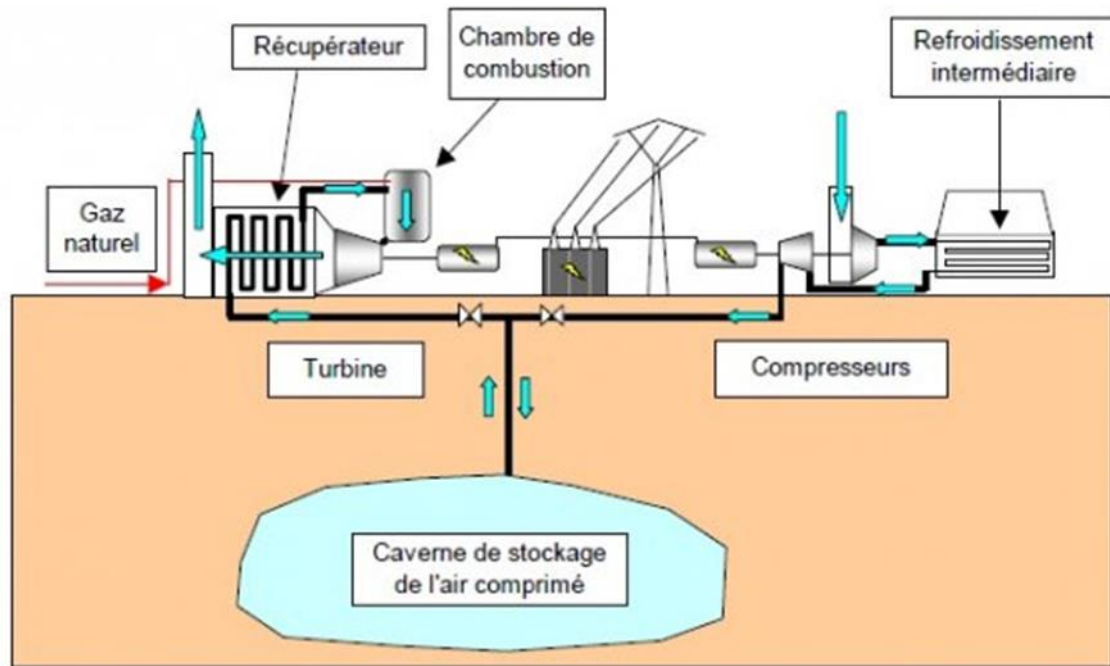
*Figure I.2: Principe de fonctionnement d'une station de pompage hydraulique*

### ▪ l'air comprimé :

Le principe de cette technologie est de convertir l'énergie électrique en air comprimé que l'on stocke. Le stockage se fait soit dans des cavernes souterraines soit dans des réservoirs en surface pour de petites installations. Pour restituer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel puis détendu dans la turbine. (Figure I.3)

Des projets de ce type ont été concluants en Alabama et en Allemagne, bien que le rendement soit médiocre (40 %).

Deuxième méthode en cours de développement : des batteries oléopneumatiques, (technique à base d'air comprimé et d'huile) permettront à terme le stockage d'électricité à l'échelle locale, régionale, voire internationale, à un coût compétitif. [4]



*Figure I.3 : stockage d'énergie sous forme d'air comprimé*

- **Hydropneumatique :**

La création d'accumulateurs hydrauliques sous pression est le fruit de la convergence des deux précédents concepts. La compression de l'eau présente un avantage important en comparaison à celle de l'air : sa capacité calorifique est beaucoup plus élevée, ce qui permet une certaine stabilité de la température de fonctionnement, en compression comme en détente, ce qui limite les pertes thermiques. [4]

- **Stockage inertiel :**

Le stockage d'énergie par volant d'inertie est un système très ancien. Dès l'Antiquité, certains tours de potier utilisaient un volant d'inertie pour conserver leur vitesse de rotation. De nos jours, ces systèmes sont utilisés pour le stockage de l'énergie électrique. Ils ont beaucoup évolué sur un plan technique et utilisent des dispositifs très avancés : partie tournante bobinée en fibres de carbone, rotor en lévitation magnétique, enceinte sous vide, etc. Le volant à proprement parler est en général un rotor en forme de roue ou de cylindre, tournant à très grande vitesse. Pour stocker un maximum d'énergie, il suffit d'atteindre une vitesse de rotation la plus élevée possible. Pour cette raison, les matériaux utilisés sont relativement denses, possèdent une limite de résistance en traction très élevée et travaillent très près de cette limite.

## ***GÉNÉRALITE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE***

---

L'énergie est donc stockée sous forme mécanique, et les pertes sont liées aux frottements du volant ou de son axe. C'est pour cette raison que les volants tournent généralement dans des enceintes sous basse pression, afin de réduire les frottements aérodynamiques. Les volants sont souvent connectés à des machines synchrones à aimants permanents pour la conversion électromécanique, car ce type de machine peut fonctionner sans contact entre rotor et stator . Ce type de stockage permet de délivrer de fortes puissances, mais sur de très courtes durées de décharge (de quelques millisecondes à plusieurs minutes). De plus, son autodécharge ne permet pas le stockage de l'énergie sur de longues périodes. Il est donc exclusivement réservé à la gestion de la qualité de la puissance et la stabilité du réseau électrique. Pourtant la forme la plus immédiate du stockage de l'électricité serait naturellement sous forme d'énergie électrique même. [5]

### ***1.3.2. Le stockage sous forme d'énergie électrique***

#### **▪ Supraconducteurs :**

Une des solutions envisageables pour stocker l'énergie directement sous sa forme électrique est le recours à des matériaux supraconducteurs. Certains métaux ou alliages peuvent atteindre, à très basse température, un état de super-conduction pour lequel la résistivité électrique devient nulle. Il est donc possible, en court-circuitant ses bornes, de stocker de l'énergie par l'induction magnétique créée par le courant persistant qui circule en circuit fermé. La constante de temps d'autodécharge (décroissance du courant persistant) d'un supraconducteur est de l'ordre de 100 000 ans : le courant est donc bien constant à échelle humaine [4]. Ce procédé permet, à l'image des volants d'inertie, d'emmagasiner l'énergie et de la restituer sur de très courtes périodes de temps, pour délivrer de très grandes puissances, ce qui le cantonne à des applications de stabilité du réseau.

#### **▪ Condensateurs :**

Les condensateurs et super-condensateurs sont des technologies matures du stockage de l'énergie électrique. Ils sont constitués de deux armatures conductrices séparées par un diélectrique et capables de stocker des charges électriques opposées.

Cependant, comme les supraconducteurs, ils permettent une réponse en puissance relativement importante mais pour de courtes périodes. Leur application reste donc essentiellement mobile, puisque leur large gamme de capacité leur permet une intégration dans tous les appareils électroniques.



## ***GÉNÉRALITE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE***

---

Dans le cadre du stockage de l'énergie, leur utilisation se limiterait à l'amélioration de la stabilité du réseau et à la qualité de la puissance délivrée.

### ***I.3.3. Le stockage sous forme d'énergie électrochimique***

- **Accumulateurs électrochimiques :**

Le stockage de l'énergie électrique peut être réalisé à l'aide de composés chimiques qui absorbent ou restituent l'énergie par réaction (oxydation-réduction) avec d'autres composés. Le stockage électrochimique le plus familier reste sans aucun doute les batteries. Ce type de stockage est basé sur la circulation d'ions entre une anode et une cathode via une solution électrolytique. Ce type de fonctionnement peut être étendu aux piles à combustions, ou encore aux accumulateurs à circulation d'électrolytes, où les échanges d'ions se font à travers une membrane séparant deux électrolytes de nature différente (Figure I.4).

# GÉNÉRALITE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE

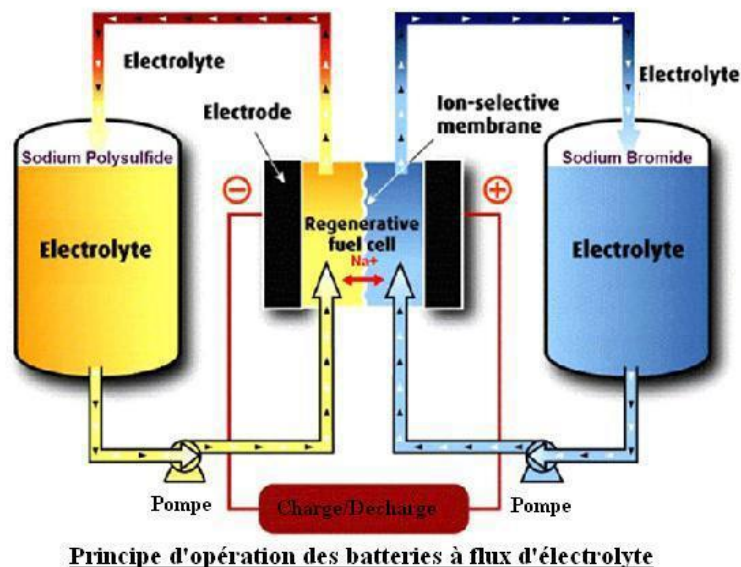
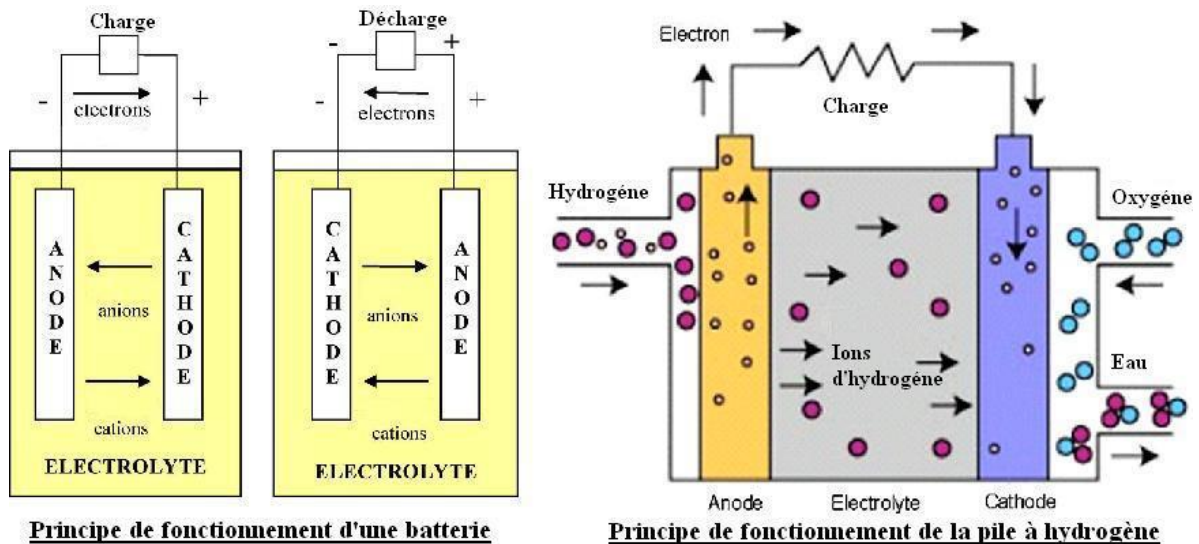


Figure I.4 : Principes de fonctionnement de systèmes de stockage électrochimiques. [6]

## I.3.4. Le stockage sous forme d'énergie thermique

Le stockage thermique intervient sous différentes formes dans notre vie quotidienne : la capacité des murs d'une maison ou d'une plaque de cheminée à absorber et restituer la chaleur, ou encore les ballons d'eau chaude résidentiels en sont de bons exemples. Deux types de stockage de chaleur peuvent être distingués : le stockage par chaleur sensible, et le stockage par chaleur latente. (Figure I.5)

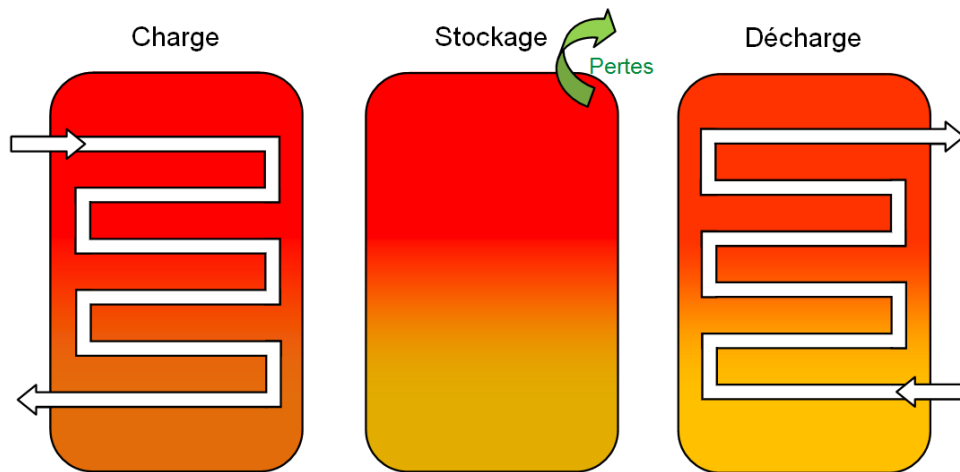


Figure I.5 : Les trois étapes du stockage de l'énergie thermique.

### I.3.5. Le stockage par chaleur sensible ou latente

Dans le cadre des centrales solaires thermodynamiques, le stockage de chaleur se situe en amont du groupe turboalternateur en utilisant toute ou partie de l'énergie produite par le champ solaire. Les systèmes de stockage thermiques peuvent être classés suivant deux catégories [7] : les systèmes de stockage actifs et les systèmes de stockages passifs.

Dans les systèmes de stockage actifs le fluide de stockage circule dans l'installation. On peut distinguer deux subdivisions de système dans cette classe, ceux qui stockent l'énergie directement avec le fluide caloporteur (huile thermique, sels fondus, vapeur) – on parle dans ce cas de stockage actif direct — et ceux qui utilisent un média de stockage spécifique avec un échangeur de chaleur entre le fluide caloporteur et le fluide de stockage – on parle alors de stockage actif indirect.

Au contraire, dans un système de stockage passif, le matériau de stockage ne circule pas, il reste donc confiné dans une enceinte où le fluide caloporteur vient circuler pour échanger de la chaleur.

Deux propriétés principales caractérisent la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur : la capacité calorifique et la chaleur latente (si le matériau change d'état). La capacité calorifique d'un matériau, exprimé en  $J.kg^{-1}.K^{-1}$  ou en  $J.mol^{-1} K^{-1}$ , exprime la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une quantité unitaire de matériau d'un kelvin. Lorsqu'on utilise cette propriété pour stocker de la chaleur, on parle de stockage par chaleur sensible ou stockage sensible. Les échanges d'énergie thermique qui s'opèrent entre le matériau et son environnement ont donc une influence sur sa température. En notant  $C_p(T)$  la capacité calorifique massique du matériau, la quantité d'énergie stockée dans une masse  $m$  de

## **GÉNÉRALITE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE**

---

matériau lorsque sa température évolue de  $T_1$  à  $T_2$  à pression constante peut donc être exprimée par la relation (I.1) :

$$E_{\text{sensible}} = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot Cp(T) \cdot dT \quad (\text{Eq. I-1})$$

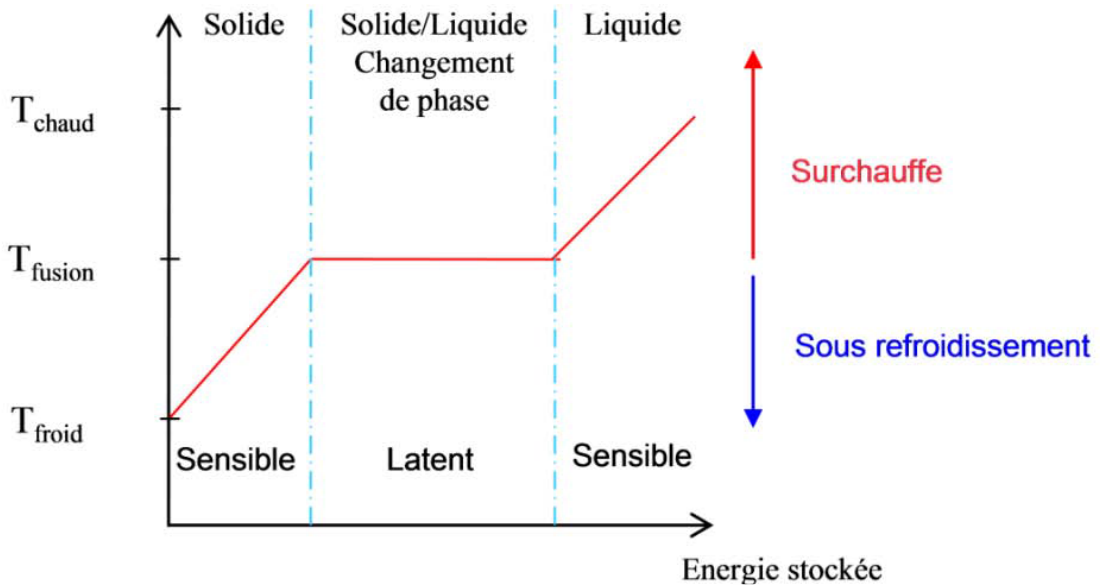
En supposant la capacité calorifique indépendante de la température, cette relation devient :

$$E_{\text{sensible}} = m \cdot Cp \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{Eq. I-2})$$

La chaleur latente d'un matériau, ou enthalpie de changement d'état exprimée en  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$  ou en  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$  suivant qu'elle soit molaire ou massique, permet de quantifier l'énergie nécessaire à une quantité unitaire de matériau pour passer d'un état physique initial à un état final avec un changement de phase. On parle alors de stockage par chaleur latente, ou stockage latent. La quantité d'énergie mise en jeu lors du changement de phase d'une masse  $m$  du matériau caractérisé par une chaleur latente notée  $L$  est donnée par la relation :

$$E_{\text{latente}} = m \cdot L \quad (\text{Eq. I-3})$$

Avec  $m$ , la masse du matériau de stockage (kg) et  $L$  la chaleur massique de changement d'état du matériau ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). [8]



*Figure I.6: Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (solide/liquide).*

Dans ce cas les échanges thermiques qui ont lieu entre le matériau (un mélange de sa phase solide et de sa phase liquide) et son environnement n'ont pas d'influence sur sa température, mais sur la proportion de chaque phase dans le mélange.

Parmi les fluides caloporteurs utilisés dans les centrales solaires thermodynamiques, on peut distinguer ceux qui utilisent uniquement la chaleur sensible : les huiles thermiques et sels fondus ; et l'eau qui emmagasine de l'énergie lors de son changement de phase liquide-vapeur en plus de l'énergie sensible. La caractéristique des transferts d'énergie lors du changement de phase est qu'ils sont isothermes. La quantité d'énergie transportée par l'eau est donc composée de trois parties : une partie sensible liquide entre la température initiale et la température de vaporisation (dépendante de la pression), une partie latente à la température de vaporisation et une partie sensible vapeur entre la température de vaporisation et la température finale. [8]

### ▪ Le stockage actif direct

L'utilisation directe du fluide caloporteur comme média de stockage peut prendre plusieurs formes, en fonction de la technologie utilisée ou de la nature de ce fluide. Ainsi dans le cas de l'eau comme fluide caloporteur, le système le plus commun fait appel à une cuve en acier pour y stocker directement la vapeur à haute pression, permettant d'avoir une très bonne réactivité et une puissance de restitution de l'énergie importante. Ce système très simple souffre néanmoins de limitations, car la vapeur y est stockée à haute pression, contraignant la

# GÉNÉRALITE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE

conception et l'utilisation en termes de sécurité et limitant la densité énergétique de stockage jusqu'à  $30 \text{ kWh.m}^{-3}$  [9]. Compte tenu de ses avantages et inconvénients, ce type de stockage est souvent utilisé en guise de stockage tampon permettant d'assurer la production pendant quelques dizaines de minutes tout au plus, lors d'un passage nuageux par exemple.

## ▪ Le stockage passif

Il existe également des systèmes où le matériau de stockage est sous forme solide, et ne peut donc pas circuler dans un circuit ni dans un échangeur. Le fluide caloporteur vient alors échanger de la chaleur à travers un échangeur intégré dans le matériau de stockage. Le stockage par chaleur sensible dans ces procédés est réalisé avec des matériaux solides, mais il est également possible dans cette configuration d'utiliser des « Matériaux à Changement de Phase » (MCP) solide-liquide afin d'utiliser leur chaleur latente. Cela permet de stocker une grande quantité d'énergie à une température fixe, permettant de travailler en adéquation avec le comportement de l'eau comme fluide caloporteur comme nous le verrons par la suite. [9]

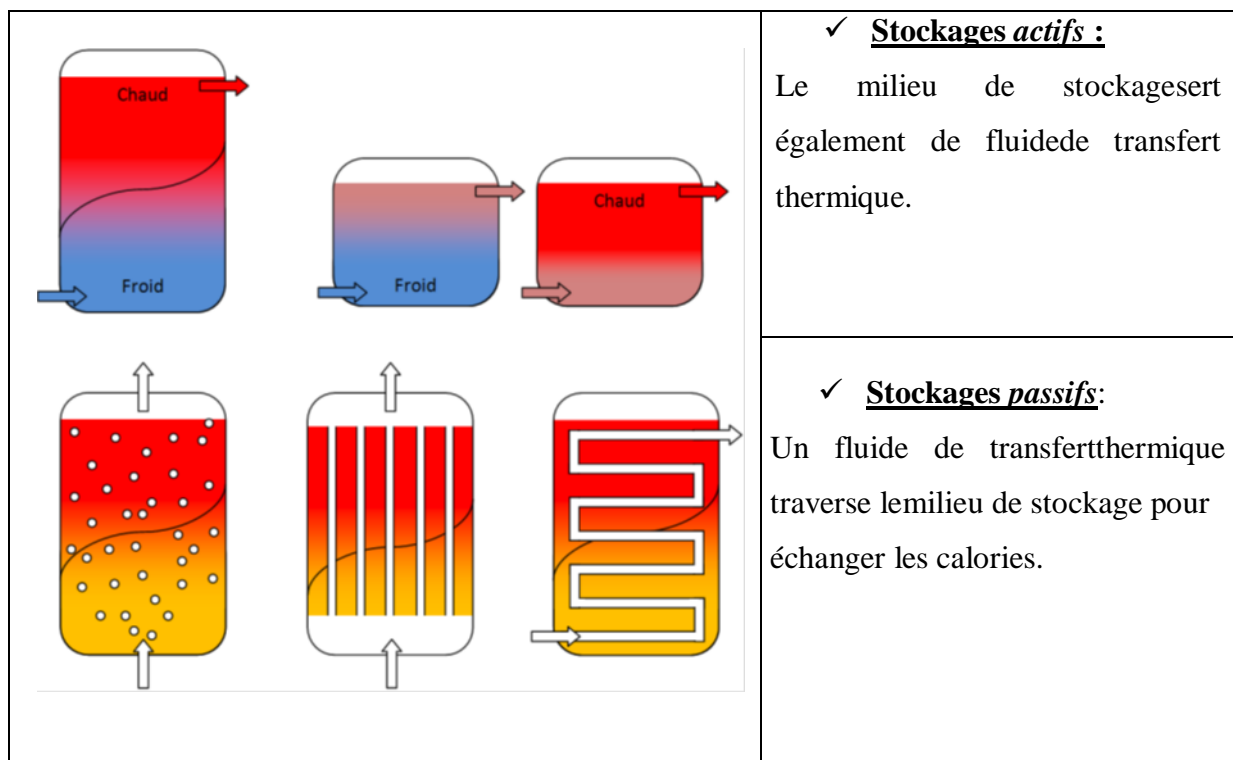


Figure I.7 : Différentes configurations de stockages thermiques

### ***1.4 Conclusion :***

Dans ce chapitre, on a présenté les caractéristiques de l'énergie solaire, ainsi quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil.

Le stockage de l'énergie est au cœur de nombreux enjeux industriels : Que ce soit pour assurer l'autonomie de sites isolés, de systèmes de télémétrie, de véhicules ; gérer l'intermittence de production et d'utilisation des énergies ; optimiser l'énergie. Ainsi, les différentes formes de stockage de l'énergie constituent un enjeu majeur pour les mix énergétiques du futur.

***CHAPITRE II***  
***STOCKAGE THERMIQUE***  
***D'UNE CENTRALE***  
***SOLAIRE***



# STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE

## II.1 Introduction :

Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 GWh d'électricité par an, grâce à la technologie des centrales solaire. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW [10].

L'énergie solaire thermodynamique est une technologie permettant l'exploitation des rayons du soleil pour produire de la chaleur.

Le solaire thermodynamique fonctionne par le biais de cycles thermodynamiques (fluide) grâce à des chaudières à gaz, chaudières à vapeur ou chaudières à cycles combinés, pour transformer la chaleur en énergie mécanique (turbines) puis électrique (alternateurs).

## II.2 Principe du solaire thermodynamique :

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire n'est pas un processus direct. Le principe est de produire des températures exploitables pour les dispositifs thermodynamique de conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique puis électrique. Pour cela, le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne.

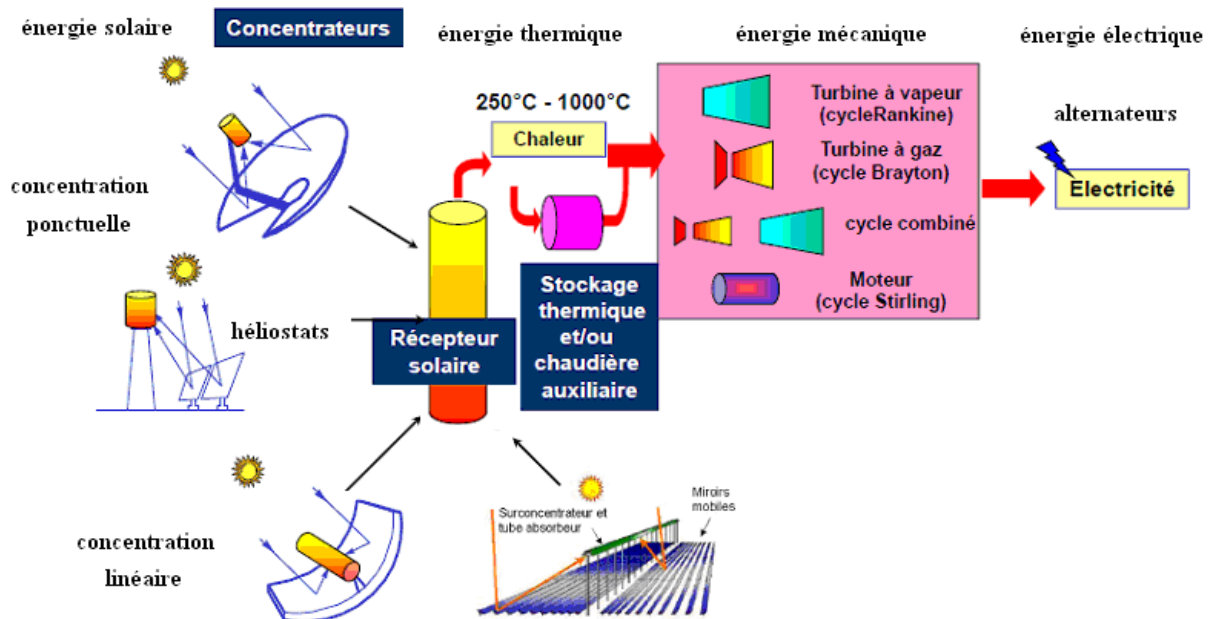
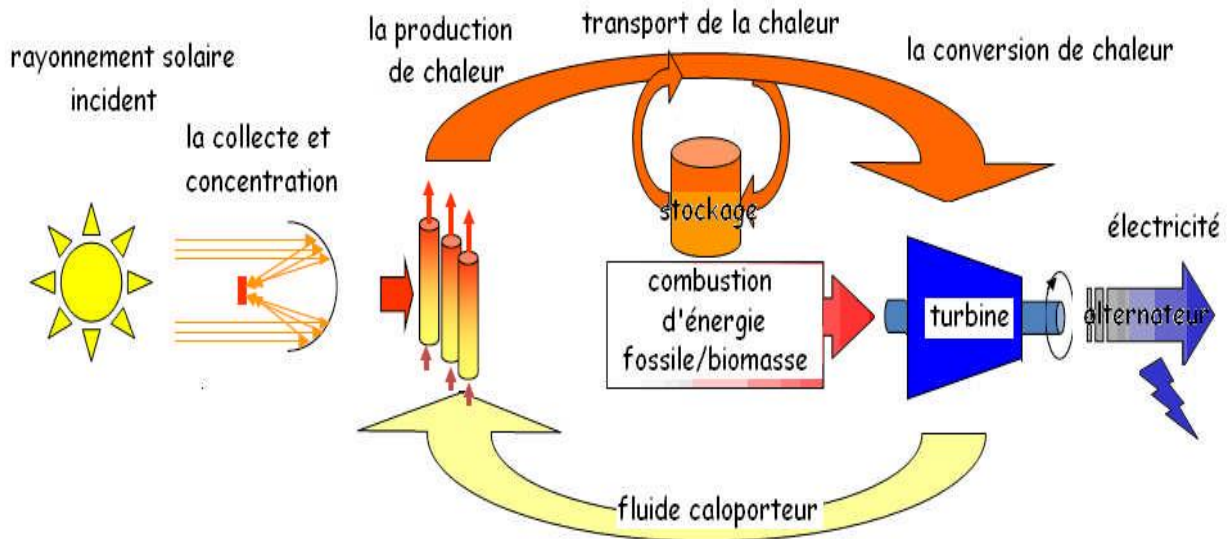


Figure II.1 : Schéma global du solaire thermodynamique

Mais quelle que soit la solution technologique retenue pour la captation des flux solaires ou la transformation de chaleur en électricité, on distingue les blocs fonctionnels interagissant entre eux par le choix du ou des fluides thermodynamiques [11] :

## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

- 1- La collecte et la concentration par le capteur du flux solaire sur le récepteur pour chauffer le fluide caloporteur.
- 2- Absorption sur les parois du récepteur, transformation en chaleur (production de chaleur)
- 3- transport et éventuellement stockage de chaleur (vapeur d'eau ou autre fluide caloporteur selon la température de source chaude et le système utilisé).
- 4- La conversion de chaleur en électricité à partir d'un cycle thermodynamique.



***Figure II.2 : Principe d'une centrale solaire thermodynamique***

Le capteur solaire ou collecteur est le composant de base du champ solaire. Il est composé d'un réflecteur (miroir), d'une structure métallique, d'un récepteur et du système de poursuite solaire.

Un réflecteur (miroir) est composé de verre pauvre en fer. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident.

La fonction du récepteur est d'absorber l'énergie solaire concentrée, de transférer la chaleur vers le fluide de transfert et de limiter les pertes thermiques (rayonnement et convection).

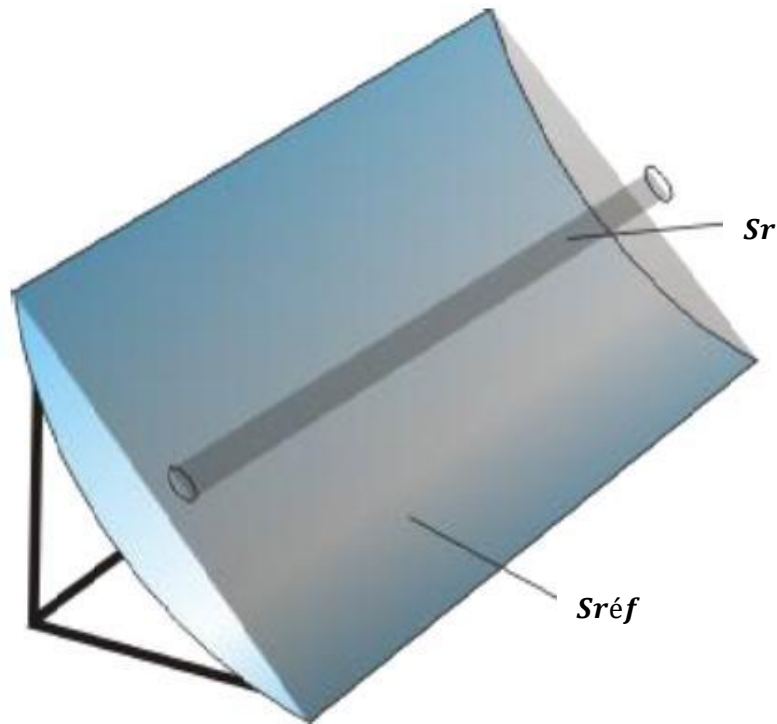
L'intensité de la concentration du collecteur est définie par le facteur (ou taux) de concentration (géométrique)  $C$ . Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte au récepteur (foyer) sera importante.

Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels. Selon Figure II.3 ce facteur est défini comme suit :

## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

---

$$c = \frac{\text{surface du réflecteur}}{\text{surface de récepteur}} = \frac{Sr_{éf}}{Sr} = \text{concentration} \quad (\text{Eq. II-1})$$



***Figure II.3 : Facteur de concentration***

La conversion d'énergie solaire en électricité se fait comme suit. La liaison entre le champ solaire et le bloc de puissance se fait par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur entre le fluide caloporteur et le fluide thermodynamique. Le fluide caloporteur circule dans le champ solaire et il est chargé de transporter la chaleur entre le champ solaire et le bloc de puissance. Le fluide thermodynamique circule dans le bloc de puissance, il convertit la chaleur cédée par le fluide caloporteur en électricité en actionnant les machines (moteurs, turbines,...). En effet, dans le champ solaire, chaque collecteur capte et concentre le rayonnement solaire dans le receveur.

Dans ce dernier le fluide caloporteur absorbe le rayonnement solaire et le convertit en énergie thermique. Ensuite, le fluide caloporteur transporte et cède cette énergie au fluide thermodynamique qui à son tour la transporte vers le bloc de puissance où il la convertit en fin de compte en électricité. [12]

## II.3 Les cycles thermodynamiques et fluides caloporteurs :

### II.3.1. Les cycles thermodynamiques

Les systèmes thermodynamiques de génération d'énergie mécanique sont divers tel que les turbines à gaz, cycle de Rankine, Moteur Stirling et Cycle de Rankine organique qui sont les options généralement choisies.

Ils utilisent tous un fluide caloporteur de transfert de chaleur auquel est imposé un cycle thermodynamique classique selon le schéma de principe :

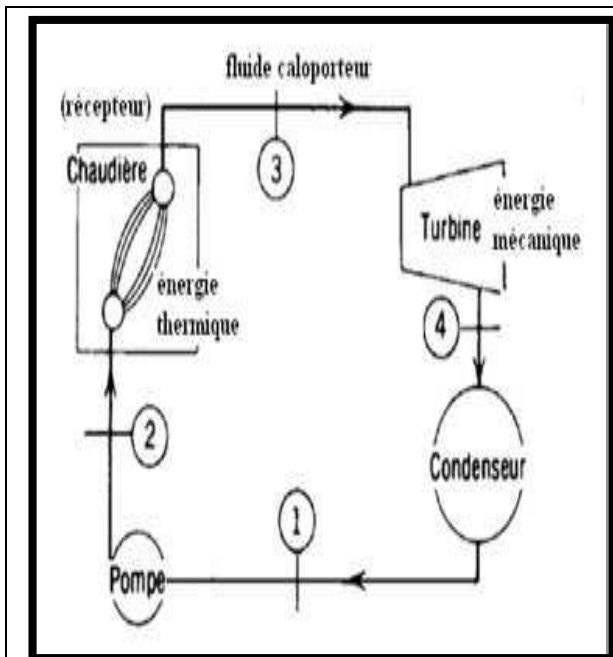


Figure II.4 : Schéma d'une machine motrice

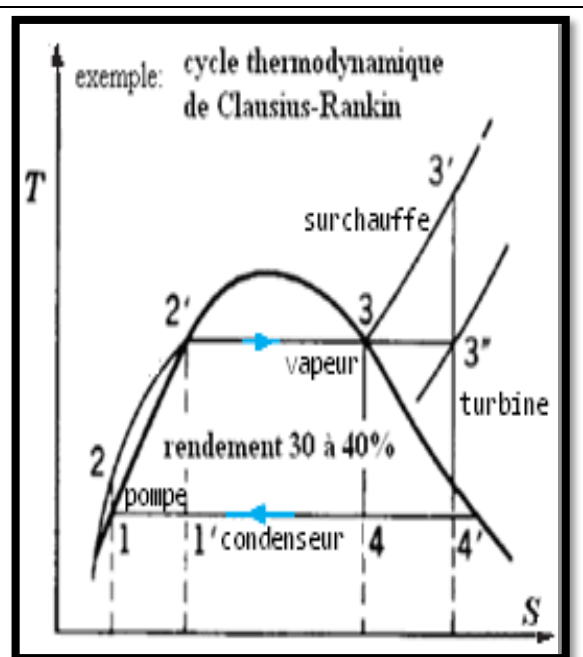


Figure II.5 : Cycles de Clausius-Rankine à vapeur simple

### II.3.2. Les fluides caloporteurs

Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, impose la technologie et les matériaux du récepteur et conditionne la possibilité du stockage. Dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique (on fait dans ce cas l'économie d'un échangeur)[13].

On distingue comme fluides:

- **Sels fondus :**

Mélanges binaires ou ternaires de nitrate (ou nitrite) de sodium/potassium qui permettent un stockage intermédiaire si la température de sortie du fluide caloporteur se situe au-dessus de

## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

---

350°C, généralement autour de 500°C. Ils peuvent devenir fluides caloporteurs dans les centrales à tours.

- **Huiles thermiques (huile synthétique) :**

Fluide caloporteur utilisé dans les capteurs cylindro-paraboliques (400°C).

- **Fluides organiques :**

À basse température d'évaporation (butane, propane,...), utilisés dans les cycles à basse température.

- **Eau et vapeur d'eau :**

Utilisées soit comme fluide thermodynamique soit comme fluide caloporteur et thermodynamique (génération directe de vapeur).

- **Gaz (Hydrogène, Hélium) :**

Entraîne un moteur thermique placé au foyer d'une coupole parabolique.

- **Air :**

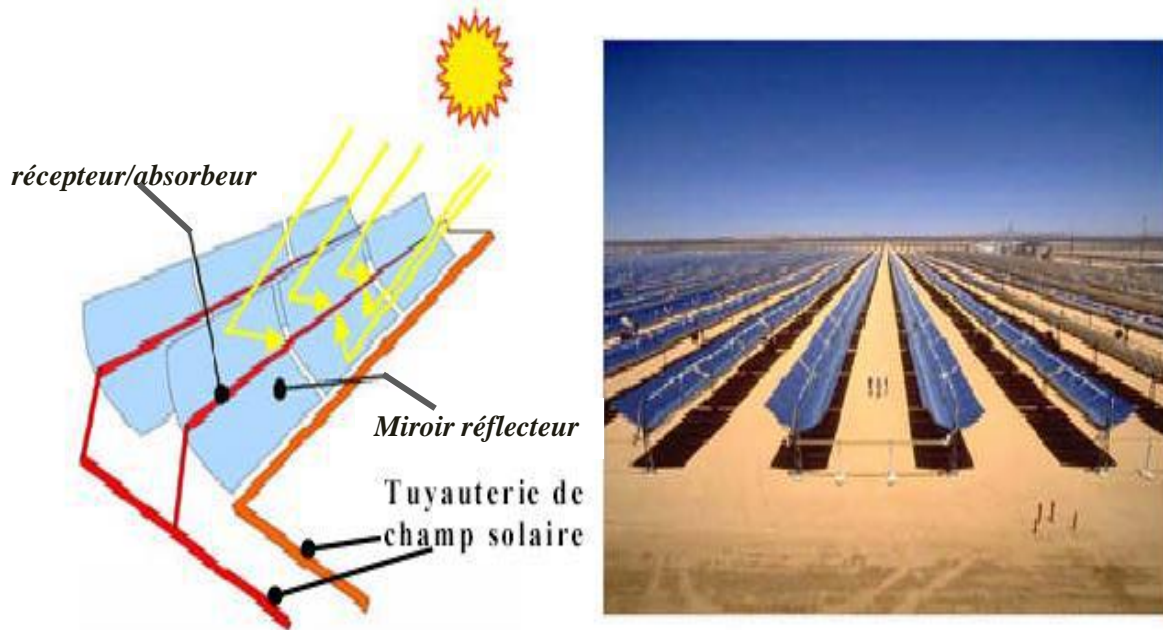
Utilisé soit comme caloporteur, soit comme fluide thermodynamique dans une turbine à gaz, le récepteur remplaçant la combustion comme source chaude.

### ***II.4 Les différentes technologies des centrales solaires thermodynamiques :***

#### ***II.4.1. Technologie à capteur cylindro-parabolique***

Le champ solaire se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400°C. Ce fluide est ensuite pompé vers le bloc de puissance à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique. Le facteur de concentration peut aller jusqu'à 100.

Les collecteurs cylindro-paraboliques représentent la technologie la plus mature et ils sont présents dans la plus grande partie des projets en cours. Le rendement moyen annuel de la conversion solaire-électricité peut atteindre 15% [14], voir Figure II-6.



*Figure II.6 : Collecteur cylindro-parabolique.[15]*

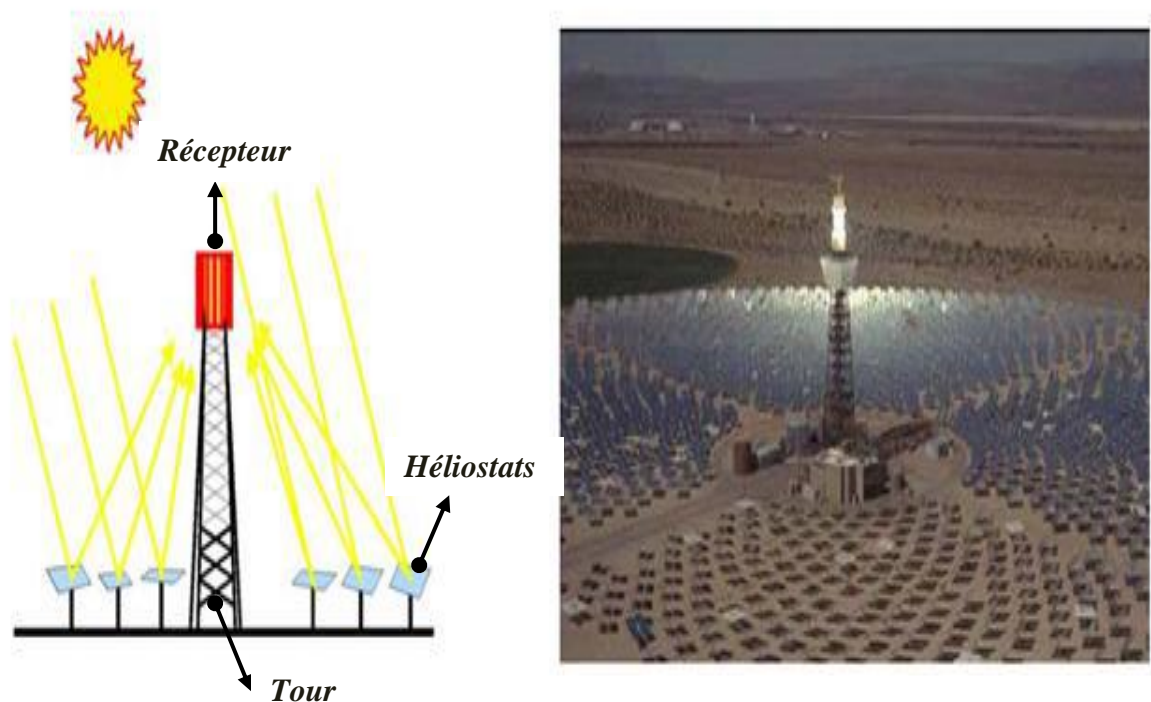
### **II.4.2. Technologie à tour (héliostat)**

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers un point situé au sommet d'une tour, Figure II-7. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire.

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement (motorisation sur 2 axes) et réfléchit le rayonnement solaire sur la chaudière (récepteur). Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 °C à 1000°C [16].

L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée à un fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

Les tours peuvent générer de la vapeur saturée ou surchauffée directement, ou utiliser de l'air ou d'autres fluides de transfert de chaleur.



*Figure II.7 : Tour solaire. [15]*

Les hautes températures atteintes dans les tours solaires peuvent être utilisées pour alimenter non seulement un cycle de Rankine, mais aussi une turbine à gaz et un cycle combiné. Ce système de centrale permet un rendement récepteur (énergétique solaire/chaueur) de 80%, un rendement turbine de 50% et un rendement annuel solaire-électrique de 25% [17].

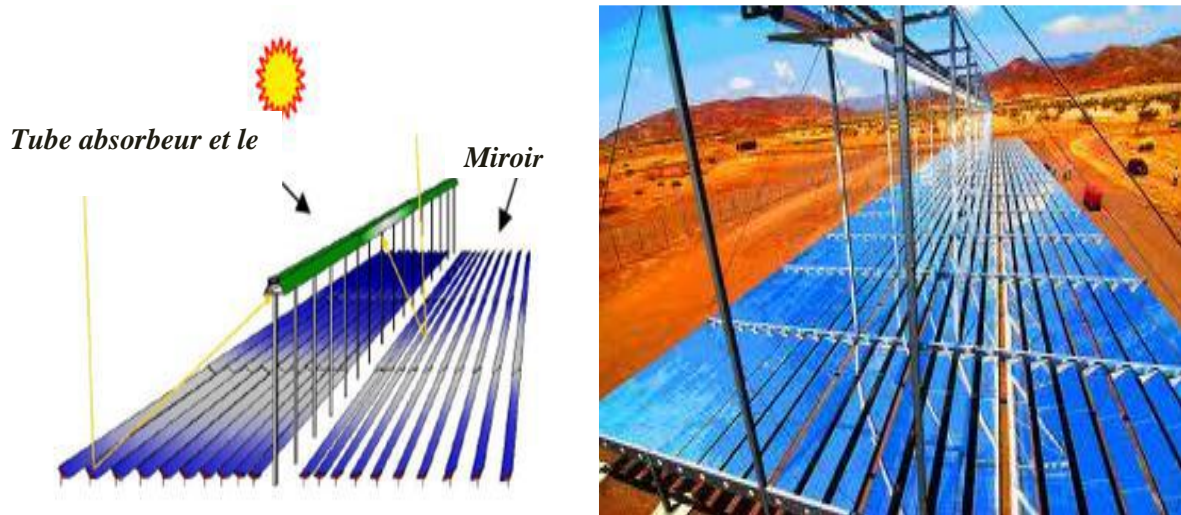
### ***II.4.3. Collecteur de Fresnel***

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits réflecteurs compacts linéaires, Figure II-8. Le facteur de concentration peut dépasser 100. Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes. En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide caloporteur peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °C. De ce fait, la vapeur est générée directement dans les tubes récepteurs. La vapeur alors produite est dirigée vers le bloc de puissance pour actionner une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur.

## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

---

En effet, en ce moment ce type de collecteur fait l'objet d'intensive activité de recherche pour permettre la génération directe de la vapeur dans le champ solaire. Ainsi, dans toute la centrale thermique un seul fluide circule, dans le champ solaire et dans le bloc de puissance. Principal avantage de cette technologie, les miroirs plats sont bien meilleur marché que les miroirs paraboliques. Les coûts d'investissement par zone miroir sont plus faibles, mais le rendement annuel reste inférieur à 10% [14].



***Figure II.8 : Collecteur de Fresnel [15].***

### ***II.4.4. Technologie à concentrateurs paraboliques (Dish-Stirling)***

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer, Figure II-9. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui dont la température monte sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000°C [18]. Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible, et il n'y a nécessité d'eau de refroidissement.

Le cycle Stirling est utilisé dans les « Dish Stirling ». C'est le capteur le plus courant des capteurs paraboliques. Le Dish Stirling suit le soleil et concentre le rayonnement sur un point (foyer) où est placé l'absorbeur de chaleur d'un moteur Stirling. La production d'électricité a lieu directement par le moteur Stirling (relié à une génératrice électrique). C'est l'hélium (ou l'hydrogène) qui sont principalement utilisés comme fluide caloporteur. Ce gaz est la source

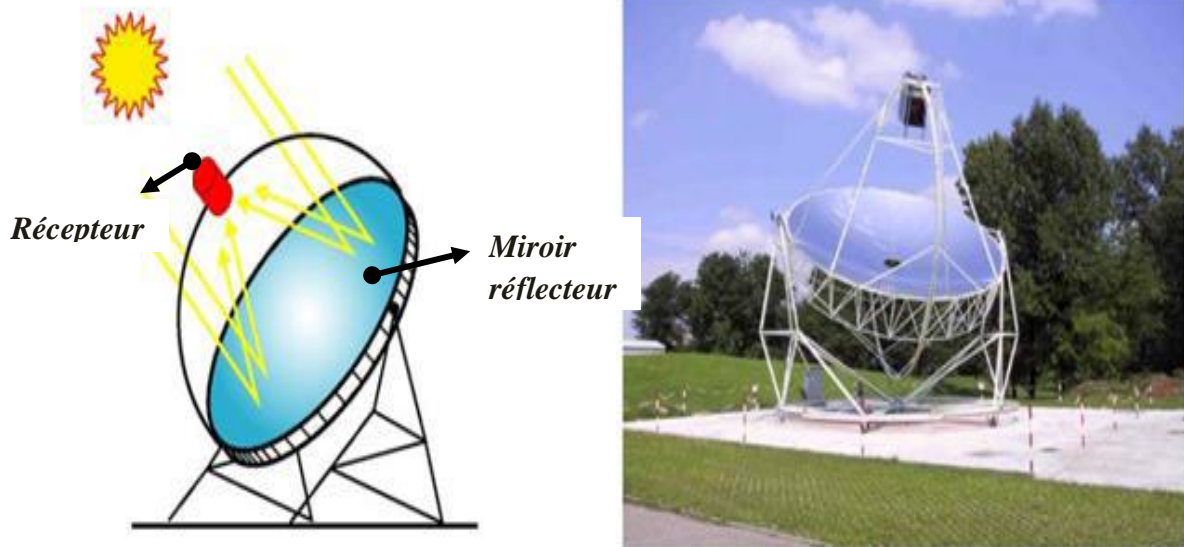


## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

---

chaude du moteur de Stirling. La source froide peut être soit un refroidisseur à eau, soit l'air ambiant.

Les Dish Stirling sont des unités entièrement autonomes et automatiques (minicentrale) utilisées pour la production décentralisée d'électricité de 10 à 25 kW. C'est en associant plusieurs Dish Stirling que l'on constitue une centrale de haute puissance.



***Figure II.9 : Miroir parabolique. [15].***

Le rendement global de ce système est de 20 à 25 %, pour 50 m<sup>2</sup> d'interception. (Record de production d'électricité solaire). C'est le concurrent direct des petits champs photovoltaïques de 3 à 30 kW (petites puissances).

Dans le cas des cycles de Brayton, une technologie semblable à celle des tours solaire est utilisée: le rayonnement solaire est absorbé par une substance poreuse, qui réchauffe l'air d'alimentation du cycle. Cette méthode offre un rendement énergétique de 40% [19].

### ***II.5 Le stockage de l'énergie solaire :***

#### ***II.5.1. Centrale solaire avec stockage thermique***

Le stockage constitue un aspect important puisqu'il permet de rendre la production d'électricité constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire.

En effet, les installations électriques solaires sont confrontées au caractère intermittent et fluctuant de la disponibilité de l'énergie solaire. Le stockage de l'énergie thermique permet ainsi d'obtenir un bon taux d'utilisation du bloc de puissance.

## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

---

L'avantage avec le solaire à concentration thermodynamique est que la chaleur peut être stockée dans des sels fondus (il est plus facile de stocker de la chaleur que de l'électricité). Le sel fondu présente en effet une bonne capacité calorifique volumique (2,4 joule/°C cm<sup>3</sup>, à comparer aux 4,18 de l'eau).

D'où la nécessité d'intégrer dans le système de génération de puissance un dispositif lui permettant de fonctionner pendant la nuit et pendant les heures d'ensoleillement insuffisant. Dans le cas d'une centrale purement solaire, une production de l'énergie thermique par anticipation obtenue par un procédé de stockage thermique par sels fondus est susceptible d'assurer une meilleure exploitation de la centrale et cela en l'alimentant en chaleur même durant les périodes de pannes solaires.

Le système de stockage à sel fondu peut être configuré de deux manières [16]:

- **Système à un seul réservoir :**

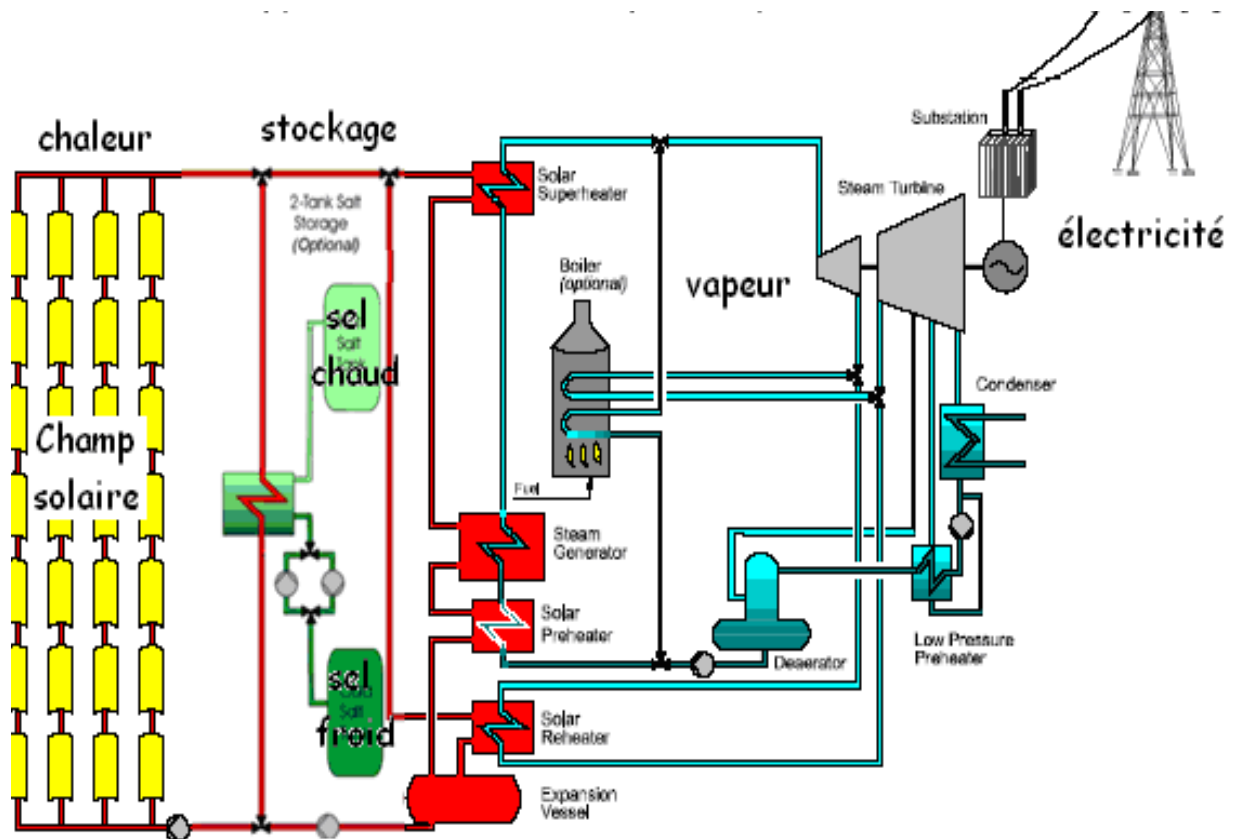
Le stockage thermique peut se faire par l'intermédiaire d'un seul bac vertical de grande hauteur dans lequel se trouve une huile thermique (liquide dense) où la température est stratifiée. On parle, dans ce cas, de stockage à stratification où le sel chaud flotte sur le sel froid.

- **Système à deux réservoirs :**

Ce type de stockage est le plus classiquement utilisé ; le système emploie deux bacs ayant chacun la pleine capacité de rétention du sel en circulation. Dans ce cas, l'un des bacs contient le sel « froid » (aux alentours tout de même de 250°C) et l'autre le sel chaud. L'échangeur solaire est toujours fourni en chaleur par le réservoir chaud. Les sels fondus sont transférés du réservoir froid au réservoir chaud afin d'accumuler l'énergie excédentaire

La présence d'un système de stockage améliore ainsi les performances du champ solaire, pendant les périodes de faible ensoleillement, car il se comporte comme un amortisseur thermique et évite ainsi le retour des perturbations qui affectent la température à la sortie du champ.

## STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE



*Figure II.10 : Principe d'une centrale solaire cylindro-parabolique avec système de stockage thermique [20].*

Le principe du stockage thermique est basé sur l'utilisation d'un accumulateur de chaleur. Il peut stocker, sous forme de chaleur latente, une partie de l'énergie solaire produite par la centrale.

Par exemple l'accumulateur installé sur la plateforme solaire d'Almeria en Espagne est un accumulateur à sel de nitrate constitué de plusieurs couches de graphite et de matériaux caractérisés par un changement de phase qui permettent un stockage thermique par chaleur latente. Il délivre une puissance de 100 kW avec des températures de vapeur d'eau dépassant les 200 °C. Il est capable de stocker la chaleur pendant 10 heures et d'en restituer jusqu'à 90 % [21].

Le champ solaire de la centrale doit donc non seulement alimenter le système de génération électrique (turbine) mais aussi le système de stockage thermique.

Par conséquent, une centrale fonctionnant exclusivement en mode solaire nécessite un champ solaire plus important qui va se traduire par un surcoût de production. Alors, une technique qui a fait ses preuves dans le secteur de la production électrique par voie solaire est celle

## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

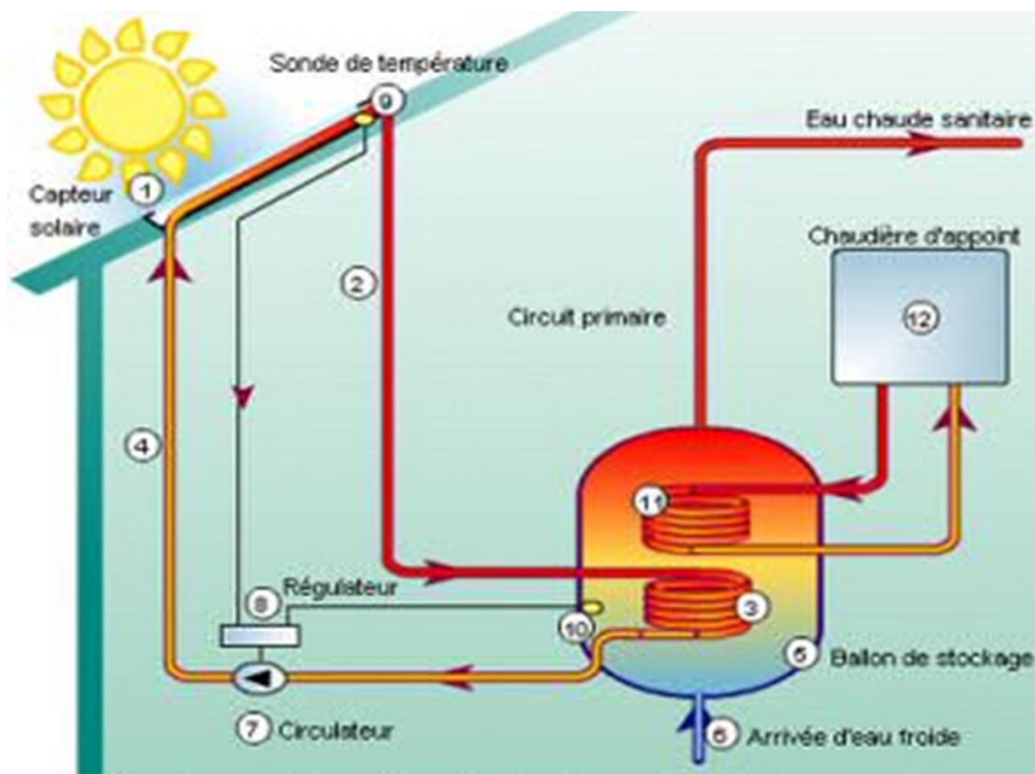
consistant à intégrer dans une centrale solaire classique un système d'appoint en combustible fossile. On parle dans ce cas, de système solaire hybride.

La première formule est préférable (capacité géométrique et surface de pertes divisées pratiquement par deux) mais présente l'inconvénient de permettre le mélange thermique des couches chaude et froide : à leur interface, il se crée une couche « tiède » dont l'épaisseur augmente avec le temps.

### ***II.5.2. Constituants de base du système de stockage thermique***

Dans notre travail, nous avons remarqué qu'un certain nombre de composant bien précis se répète et dont la présence est indispensable. Autrement dit, dans toute installation les capteurs solaires, le ballon de stockage, la pompe à chaleur, et les capteurs enterrés sont des constituants de base omni présente pour une installation solaire avec stockage thermique comme le montre les figures suivantes.

De ce fait on a jugé utile d'expliquer le rôle de chaque appareil dans l'installation, mais un intérêt spécial sera porté aux échangeurs verticaux enterrés qui sont l'outil de stockage thermique.



***Figure II.11 : Principe d'un panneau solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire. [22]***

# STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE

## ▪ Capteurs solaires :

Un capteur solaire effectue la conversion du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, en chaleur et permettent le transfert de cette énergie calorifique en la cédant à un fluide caloporteur, il est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur, les calories produites par absorption du rayonnement incident, et émet en s'échauffant un rayonnement thermique de plus grande longueur d'onde (Loi de Stefan-Boltzman).

Dans un capteur équipé d'une couverture transparente, le rayonnement thermique émis par l'absorbeur est absorbé par la couverture transparente qui s'échauffe et rayonne à son tour par les deux faces. En première approximation, on peut considérer qu'une moitié du rayonnement se disperse dans le milieu extérieur et que l'autre moitié, réémise vers l'absorbeur est à l'origine de l'effet de serre.

Il existe deux principales technologies des capteurs solaires thermiques:

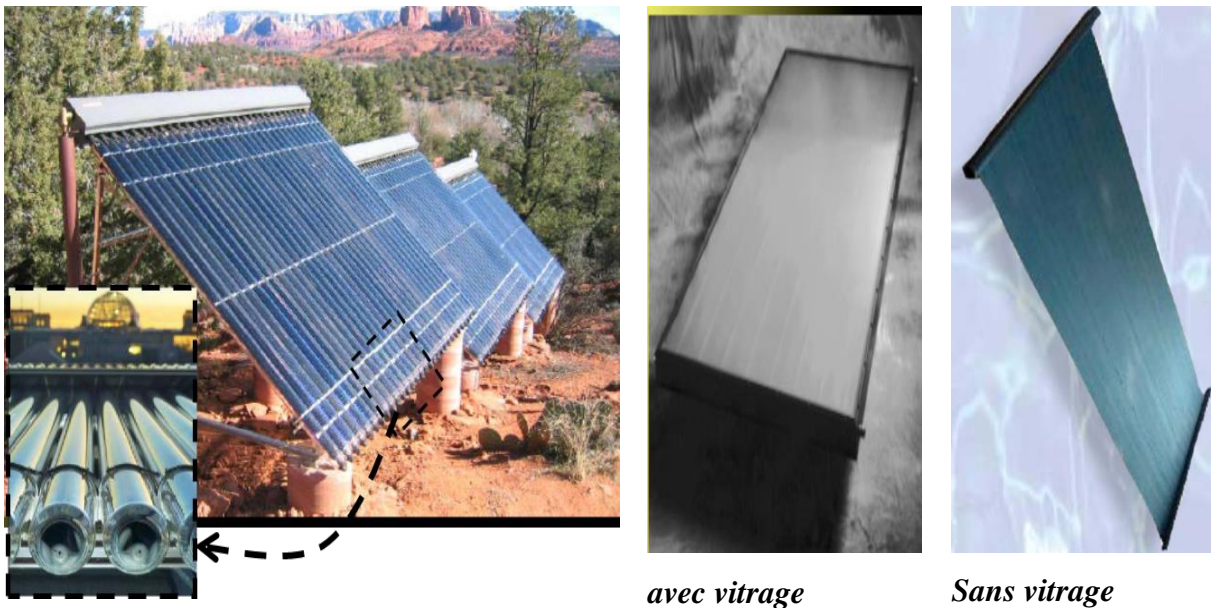


Figure II.12 : Les capteurs solaires thermiques [23].

## Les capteurs solaires plans

Les couvertures ont également pour rôle de limiter les pertes par convection, étant donné que les échanges thermiques entre deux plaques séparées par une lame d'air immobile, se font essentiellement par conduction et qu'il est connu que l'air immobile est un bon isolant thermique.

## STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE

Cet effet d'isolation croît avec l'épaisseur de la lame d'air séparant les deux surfaces, tant que le phénomène de transfert reste conductif (2 à 3 cm d'épaisseur).

Au-delà, les effets de la convection naturelle viennent contrarier l'effet recherché.

Une autre méthode pour réduire les pertes du capteur est la réalisation, sur la surface de l'absorbeur, d'un revêtement sélectif, présentant un coefficient d'absorption le plus élevé possible pour les longueurs d'onde du spectre solaire (inférieures à 2,5  $\mu\text{m}$ ) tout en ayant une émissivité la plus faible possible dans le domaine de l'infrarouge correspondant au rayonnement de l'absorbeur (longueurs d'onde supérieures à 2,5  $\mu\text{m}$ ).

De tels revêtements sélectifs sont réalisés par dépôt chimique ou par traitement électrochimique de la surface absorbante.

### Les capteurs solaires sous-vides

Enfin les capteurs sous vide permettent de réduire les pertes par convection en plaçant l'absorbeur à l'intérieur d'une enceinte en verre dans laquelle un vide d'air a été fait. [24]

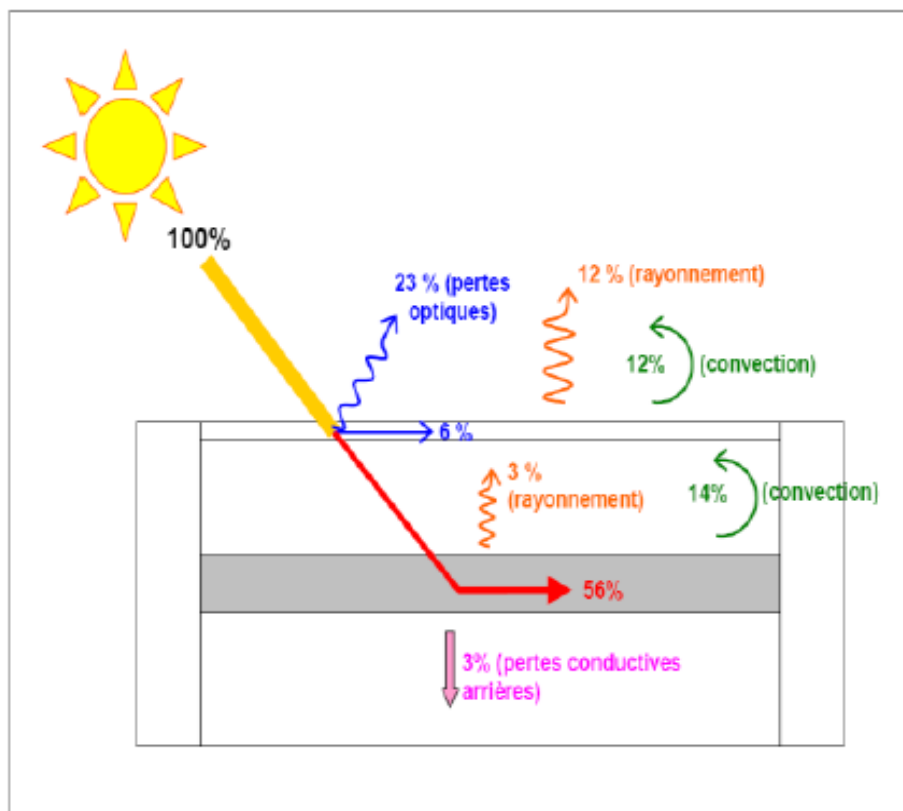


Figure II.13 : Bilan énergétique du capteur solaire.

## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

---

### ▪ **Ballon de stockage :**

Le stockage de l'énergie solaire dans un ballon de stockage permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire. L'accumulation de l'énergie dans le stockage se traduit par une élévation de sa température.

Pour apprécier l'efficacité d'un système de stockage, il faut rappeler que le rendement d'un capteur dépend essentiellement de la température moyenne du fluide qui le traverse, donc de la température du fluide au retour du stockage. L'une des caractéristiques essentielles de l'aptitude à l'emploi du stockage sera de fournir, à l'entrée des capteurs, un fluide dont la température sera la plus basse possible.

Le transfert de chaleur des capteurs vers le ballon s'effectue de deux façons différentes :

- par circulation forcée avec une pompe commandée par un dispositif de régulation,
- par circulation naturelle ou thermosiphon.

Les systèmes fonctionnant par thermosiphon présentent l'avantage par rapport aux systèmes habituels avec circulateurs de ne nécessiter aucun dispositif de régulation des apports solaires, ni pompes de mise en circulation du fluide caloporteur.

Cependant, dans les faits, les installations en thermosiphon ne concernent généralement que certaines fabrications de chauffe-eau individuels et restent l'exception pour les installations collectives.

En raison des problèmes hydrauliques posés par les champs de capteurs de grandes dimensions, et des contraintes architecturales posées par la disposition des capteurs sous le stockage, la circulation du fluide caloporteur par thermosiphon est, sauf cas particulier, mal adaptée aux installations collectives. [24]

### ▪ **Les échangeurs de chaleur :**

Il est nécessaire de protéger les équipements solaires contre les risques de gel. Dans la plupart des cas, les capteurs sont protégés par un fluide non gélif, ce qui implique la présence d'un échangeur.

On distingue deux catégories d'échangeurs :

- Les échangeurs intégrés au stockage.

## ***STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE***

---

- Les échangeurs extérieurs au stockage.

Dans le cas où l'échangeur est situé à l'extérieur du stockage, l'échange se fait de part et d'autre part convection forcée. Les surfaces d'échange sont en général réduites par rapport à un échangeur intégré.



***Figure I.14 : Échangeur à plaques.***



***Figure I.15 : Échangeur intégré.***

Dans tous les cas, l'efficacité d'un échangeur ne dépend pas de la température des fluides mais des caractéristiques géométriques de l'échangeur et des débits calorifiques.

Dans la pratique, l'efficacité des échangeurs est de l'ordre de 0,6 à 0,8.

Notons que si l'efficacité d'un échangeur est médiocre, non seulement le transfert de chaleur sera faible, mais la température de retour du fluide dans le capteur sera élevée et le rendement du capteur sera diminué.

Lorsque l'échangeur est incorporé au stockage, il est disposé en partie basse du ballon. Cette disposition permet, à condition que la surface d'échange soit suffisante, de réchauffer de manière homogène le volume d'eau baignant l'échangeur, tant que la température de celui-ci n'aura pas atteint à 3 ou 4 degrés près, la température de la partie supérieure du ballon.

A chaque introduction d'eau froide dans le stockage au moment des soutirages, on évite ainsi d'envoyer dans la partie haute du ballon, de l'eau insuffisamment réchauffée (Stratification des températures).

Cette disposition permet de plus, d'alimenter les capteurs solaires avec un fluide dont la température en sortie de l'échangeur est la plus faible possible compte tenu des conditions de



## STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE

soutirage et de la stratification des températures. En outre, elle permet de limiter les risques de pertes thermiques par circulation inverse dans les capteurs en cas de mauvais fonctionnement du clapet anti-retour. [25]

### II.6 Centrale solaire hybride :

Une autre solution pour obtenir un bon taux d'utilisation du bloc de puissance consiste à hybrider l'installation : une unité auxiliaire au gaz ou au pétrole est utilisée pendant les périodes nuageuses ou en fin de journée afin d'assurer une production continue.

Une centrale solaire hybride comprend donc une centrale solaire thermique convertissant en électricité la chaleur provenant soit de concentrateurs solaires soit d'un brûleur appoint à carburant fossile (gaz, pétrole...). L'appoint permet de satisfaire la demande électrique lorsque le rayonnement solaire est trop faible (passage nuageux, léger voile, etc.). Ou inexistant (la nuit). Ce concept permet donc de produire en permanence, la nuit ou lorsque les conditions météo ne sont pas optimales.

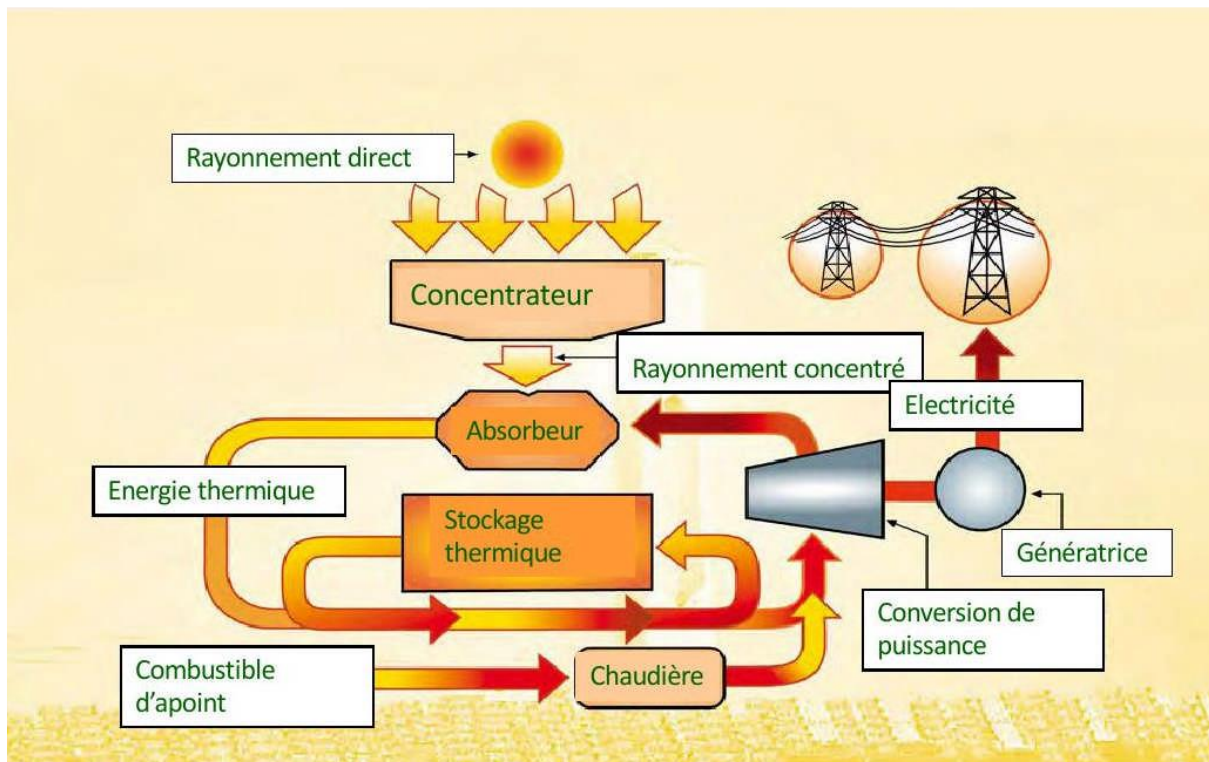


Figure I.16 :Schéma principe d'une centrale hybride [26].

Un autre concept consiste à placer le brûleur en série sur le circuit primaire de façon à élever la température du fluide caloporteur par un apport complémentaire de chaleur à très haute température issu de la combustion [20].

# STOCKAGE THERMIQUE D'UNE CENTRALE SOLAIRE

## II.7 Système solaire intégré dans une centrale à cycle combiné :

Le concept est basé sur l'intégration d'un champ solaire à une centrale à cycle combiné, voir Figure II-17. Il est appliqué surtout pour la production de grandes puissances. La vapeur générée par le champ solaire est introduite dans le cycle eau-vapeur de la centrale à cycle combiné, ce qui augmente la puissance de la turbine à vapeur et crée des mégawatts d'électricité supplémentaires sans utiliser de gaz naturel additionnel. Ce genre de centrale n'a pas besoin de système de stockage. En mode de nuit la centrale fonctionne comme une centrale à cycle combiné conventionnel.

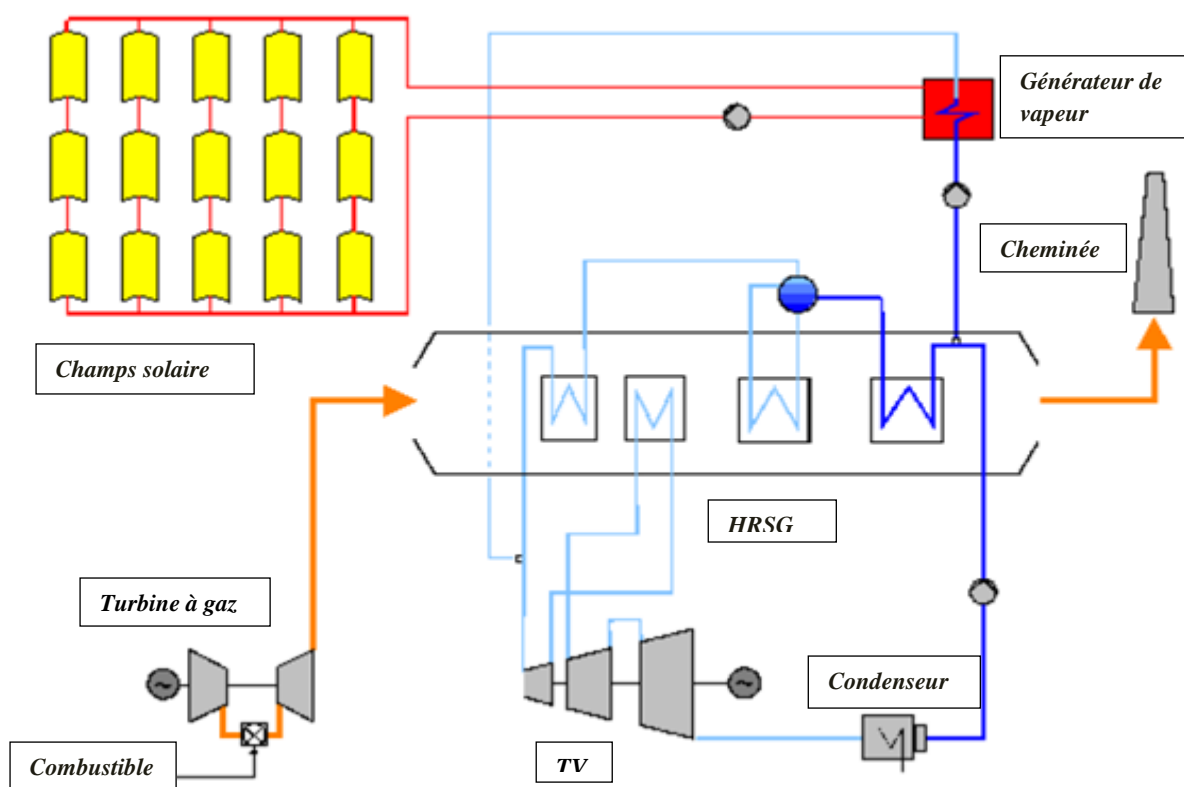


Figure I.17 : Centrale solaire intégrée à un cycle combiné.

## II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les caractéristiques de l'énergie solaire, coté thermique, un aperçu a été donné sur chaque composant d'une installation solaire destinée pour l'eau chaude sanitaire, cela dans le but de la compréhension générale de leurs systèmes de fonctionnement.

*CHAPITRE III*  
*LES ÉQUATION DE*  
*TRANSFERT THERMIQUE*  
*D'ÉNERGIE*

# ***LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***

---

## ***III.1 Introduction :***

Dans ce chapitre on a discuté sur différentes équations de transfert de chaleur et de stockage d'énergie.

## ***III.2 Modélisation :***

Model choisi

Le model choisi est celui de la fig.il est constitué des différentes parties que sont :

- Le capteur solaire
- La tuyauterie
- Le réservoir d'accumulation
- L'isolation

En effet l'eau contenue dans le capteur est chauffé par le phénomène de l'effet de serre. La circulation du fluide caloporteur (eau) vers le réservoir de stockage (réservoir d'accumulation) la tuyauterie se fera par thermosiphon.

Le réservoir de stockage est constitué de trois parties :

- Une partie contenant la paraffine
- Une partie contenant l'eau, fluide caloporteur
- Les toutes enveloppes dans une bonne isolation

On dimensionne le réservoir de stockage de telle sorte que le débit puisse nous permettre de maintenir un certain niveau d'eau chaude dans le réservoir.

Ainsi l'eau chaude (fluide caloporteur) va d'une part nous permettre soit d'utiliser directement son énergie (application directe), ou d'accumuler cette énergie dans notre système de stockage (paraffine )pour une utilisation ultérieure de la cuisinière pour mettre en place marmite en cas de cuisson ;en cas de non utilisation ,le couvercle nous permet de minimiser les pertes thermiques.

# ***LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***

---

Ainsi l'eau sort du capteur a une température T1, cède l'essentielle de son énergie a l'utilisation ou /et a l'accumulation et sort a la température T2 pour recommencer le cycle au niveau du capteur.

## ***III.3 La description du model :***

Cette partie du travail est consacrée a la description détaillée du model sur lequel nous allons travailler. Ce système comprend :

- Le capteur solaire
- La tuyauterie
- Le réservoir d'accumulation
- L'isolation

### ***III.3.1. Présentation détaillé***

- Le capteur solaire :

Pour mener l'étude du stockage dans l'accumulateur un capteur solaire est choisi de sorte qu'il puisse nous fournir une température de 65°C a l'entrée du réservoir de stockage pour en sortir a la température de 45°C.

- La tuyauterie :

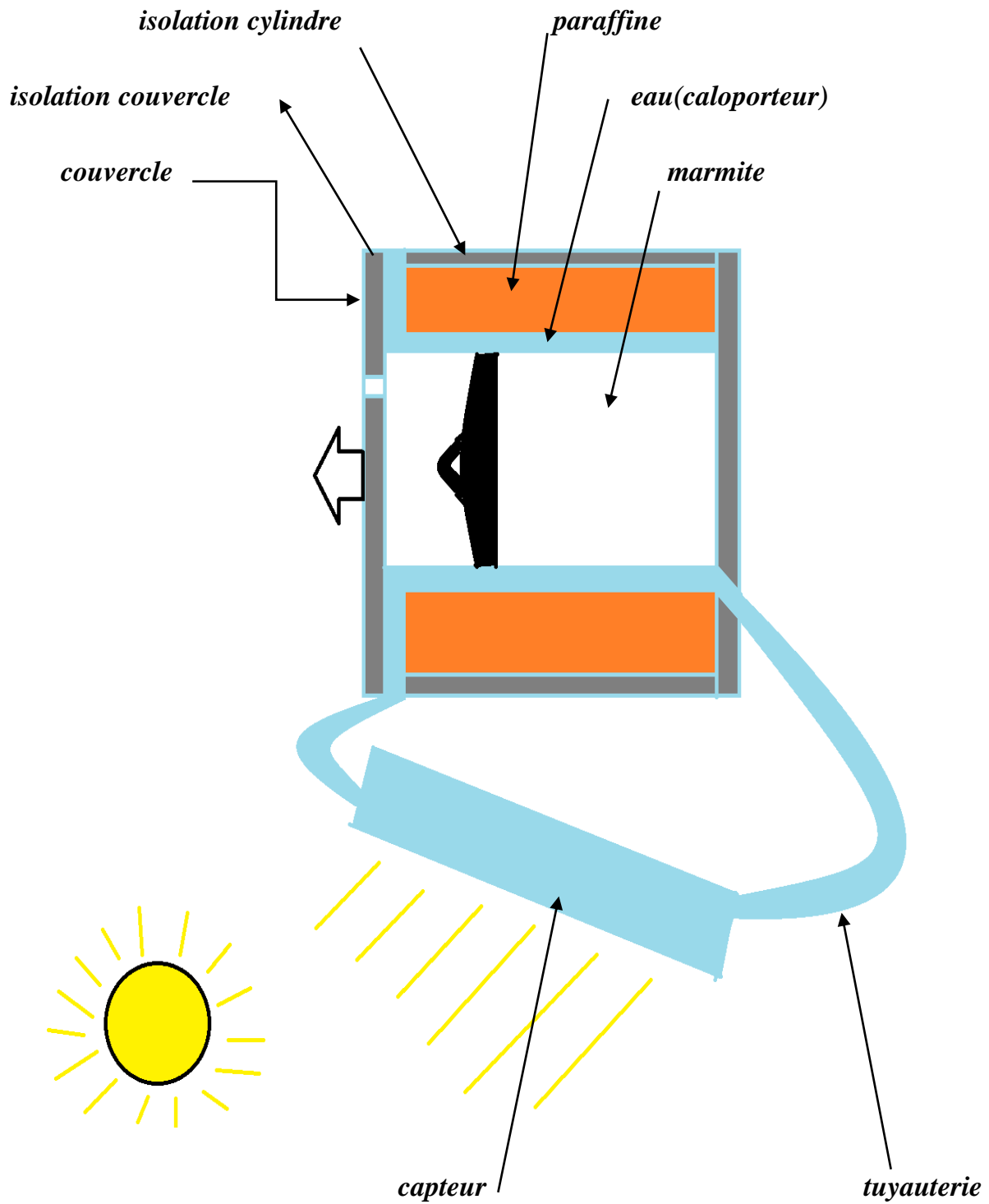
En même temps que le capteur elle doit être assez calorifugé pour éviter les pertes afin de satisfaire les paramètres d'entres et de sorties de l'accumulateur qu'on s'est fixes.

- Le réservoir de stockage :

Le réservoir de stockage, essentiellement de tôles d'acier galvanise est constitue de deux compartiments séparés par une tôle en acier galvanise dont l'un contient le MCP (la paraffine) et l'autre l'eau.

Le réservoir a une structure parallélépipédique dont les dimensions. Ses faces latérales sont isolées par du polystyrène expansé.

# LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE



# ***LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***

---

## ***III.3.2. Modélisation du système***

Dans cette partie nous présenterons un modèle mathématique qui permet de décrire le comportement thermique du système de stockage .pour cela des hypothèses simplificatrices seront nécessaires.les paramètres thermo physiques (masse volumique, conductivité et capacité calorifique) sont indépendants de la température.

## ***III.3.3. Position du problème***

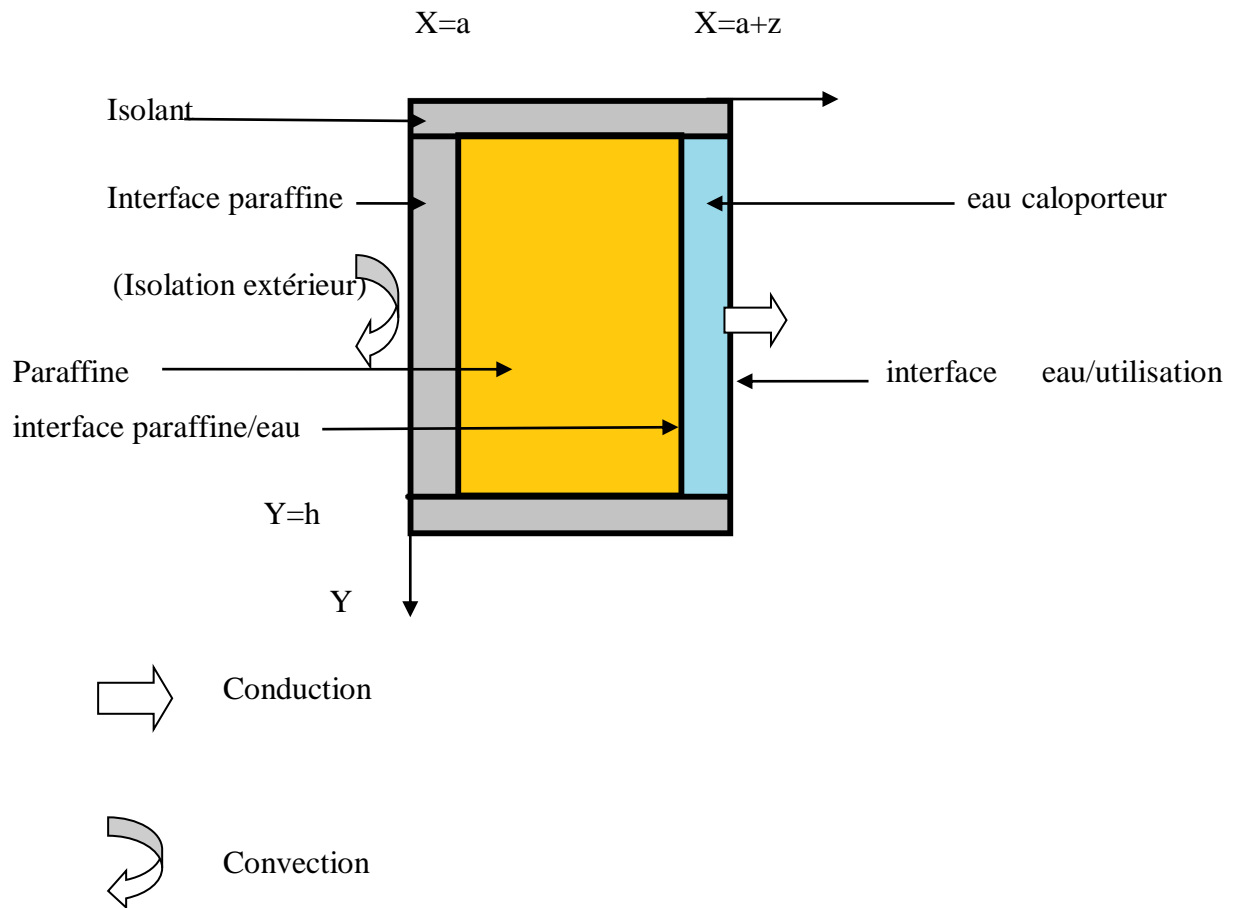
Notre problème est un problème de détermination du champ thermique spatio-temporel dans un liquide (l'eau contenue dans l'accumulateur), champ régi d'une part par la capacité du capteur et d'autre part par le matériau à changement de phase avec transfert de chaleur par conduction dans les phases solides et liquides.

Le nœud du sujet porte sur l'étude d'un système de stockage donc sur l'amélioration d'un système déjà existant (cuisinière solaire).notre étude sera axée sur l'accumulateur .en effet on a choisi d'améliorer le système en améliorant son accumulateur c'est-à-dire en stockant son énergie dans un matériau a changement de phase. Ce matériau restituera cette énergie en cas de besoin. Le matériau à changement de phase est soumis à un flux variable. La connaissance de ce champ thermique permettra de suivre l'évolution de la température de l'eau dans l'accumulateur qui déterminé on faite l'utilisation (la cuisinière).

L'accumulateur est un cube qui contient un matériau à changement de phase (paraffine) absorbant la chaleur d'un liquide caloporteur (eau).

Ce matériau à changement de phase est soumis à un flux variable. L'évolution de la température de la paraffine, une fonction de la température de l'eau d'une part et de l'utilisation d'autre part dépendra principalement de la détermination du champ thermique dans le matériau a changement de phase. Mais dans la pratique des hypothèses simplificatrices peuvent êtres émise afin de contourner beaucoup de difficultés liées à la résolution d'équations parfois non linéaires. Résolution qui s'avère parfois très délicats

# ***LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***





# LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE

## **III.4 Formulation des équations régissant le champ thermique dans l'accumulateur :**

### **III.4.1. Equation régissant la température de l'eau**

L'étude théorique de la température de l'eau dans l'accumulateur nous permet de prévoir l'évolution de la température de celle-ci (caloporteur).

Pour cela il faut considérer deux états de l'eau : un premier état ou l'eau (caloporteur) reçoit son énergie du capteur et la transmet à la paraffine (stockage) et un deuxième état ou l'eau devra récupérer la chaleur emmagasinée par la paraffine (déstockage)

- Dans le cas du stockage ou l'eau reçoit son énergie du capteur et la cède à la paraffine :

On peut écrire (si on néglige les pertes de la canalisation) :

**Chaleur récupérée par l'eau au niveau du capteur = chaleur fournie à l'eau du réservoir**

Soit :

$$Q = \dot{m} C_{Peau} (T_2 - T_1) = \dot{m} C_{Peau} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{Eq. III-1})$$

Avec :

$\dot{m}$  = débit massique de l'eau (kg /h) pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$

$T_1$  = température de l'eau à l'entrée du capteur à l'instant t.

$T_2$  = température de l'eau à la sortie du capteur à t +  $\Delta t$

$\Delta T$  = augmentation de la température du volume total d'eau contenue dans l'accumulateur durant  $\Delta t$

$\Delta t$  = intervalle de temps choisi pour prendre les mesures.

m = masse d'eau dans l'accumulateur

Pour des intervalles de temps très faibles on peut écrire que :

## LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE

il a noté que  $\frac{\delta T}{\delta t}$  représente le taux de variation de la température de la masse d'eau se trouvant dans tout le système durant l'intervalle de temps considéré. la différence  $(T_2-T_1)$  note de sa part l'écart de température entre la sortie et l'entrée du capteur durant le même temps.

D'où nous pourrions tracer le graphe du débit comme l'utilisation du débitmètre etc.....peuvent être utilisées :

- Dans le cas du déstockage ou maintenant c'est l'eau qui récupère de la chaleur à partir de la paraffine.

Les échanges thermiques dans cette partie de l'accumulateur sont essentiellement conductifs entre la paroi qui constitue l'interface paraffine /eau est l'eau et l'intérieur de l'eau stocke.

Le bilan thermique dans l'eau s'écrit :

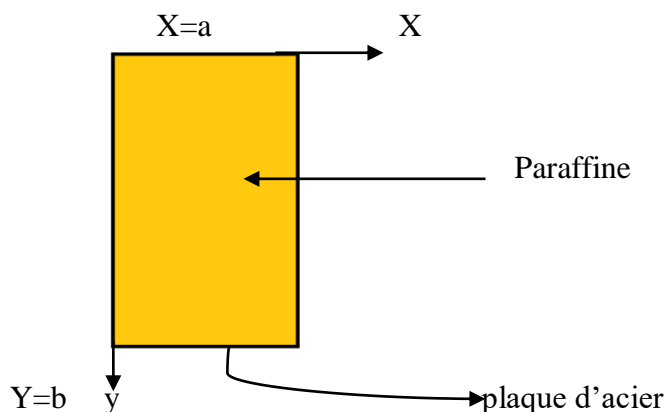
$$\frac{\delta T_e}{\delta t} = a_e \left( \frac{\delta^2 T_e}{\delta x^2} + \frac{\delta T_e}{\delta y^2} \right) \text{(Eq. III-2)}$$

✓ Conditions aux limites  $Ax=a \longrightarrow$

- $Ax=a$  l'eau est limitée par la paraffine, on peut donc écrire :  $T=T_e$
- $Ax=a+z$  On a un échange de chaleur entre l'eau et la marmite, on peut donc écrire que le flux est égale :  $\Phi = \Phi_e$

### **III.4.2. Equation régissant la chaleur dans la paraffine**

Nous faisons l'hypothèse que le champ thermique dans la paraffine est bidimensionnel. le plan d'étude est le plan XOY car nous considérons qu'à x et y constants le champ ne varie pratiquement pas.



## LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE

- Equations de la chaleur dans la phase solide :

Dans la phase solide, la conduction est le seul mode de transfert de la chaleur dans la paraffine. La seule équation à modéliser est l'équation de diffusion de la chaleur.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a_e \Delta T \quad (\text{Eq. III-3})$$

En coordonnée cartésienne, l'équation s'écrit :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a_{ps} \left( \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (\text{Eq III-4})$$

- ✓ Conditions initiales et conditions aux limites

- ✓ Conditions initiales

On pose :  $T(x, y, t=0) = T_0(x, y)$

- ✓ Conditions aux limites

- $Ax = a$

La continuité du flux nous permet d'écrire :  $\Phi_p(x, y=b) = \Phi_e$

- $Ax = 0$  :

On considère que la paraffine est parfaitement isolée sur sa surface supérieure, des lors le flux est nul sur cette surface :  $\Phi_p(x, y=0, t) = 0$

- Aux surfaces  $y=0$  et  $y=b$  :

Les parois de haut et de bas sont parfaitement isolées, des lors de flux est nul sur ces deux surfaces soit :

$$\Phi_p(x=0, y, t) = 0$$

Et

$$\Phi_p(x=a, y, t) = 0$$

- A l'interface solide liquide

## ***LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***

---

La condition à l'interface traduit l'équilibre thermique entre la phase solide et la phase liquide.

Si  $v_f$  désigne la vitesse de l'interface, Le bilan s'écrit :

$$P_s L_f \vec{V}_f \cdot \vec{n} = \lambda_s \vec{\nabla} T_s \vec{n} - \lambda_f \vec{\nabla} T_f \cdot \vec{n} \quad (\text{Eq. III-5})$$

$\vec{n}$ : Désigne la normale à la frontière dirigée vers l'extérieur du domaine liquide D1

$L_f$ : désigne l'enthalpie de fusion

Le terme  $\vec{\nabla} T_s \vec{n}$  représente le flux de conduction pénétrant dans le solide.

En coordonnées cartésiennes, le bilan thermique à l'interface se met sous la forme :

$$P_s L_f \frac{\delta y}{\delta t} = \lambda_s \frac{\delta_s}{\delta x} - \lambda_f \frac{\delta_f}{\delta x} \quad (\text{Eq. III-6})$$

Avec :  $T(x, y=y_f, t)=T_f$

### ***III.4.3. Equation de la chaleur dans la phase liquide***

La paraffine absorbant la chaleur du caloporteur est complètement fondue, par conséquent transfert thermique est dominée par la conduction.

L'équation à modéliser est l'équation de diffusion de la chaleur dans le liquide :

$$\frac{\delta y}{\delta t} = a_{pt} \Delta T \quad (\text{Eq. III-7})$$

En coordonnée cartésienne, l'équation s'écrit :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a_{pt} \left( \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (\text{Eq. III-8})$$

### ***III.5 Méthodes de résolution :***

La mobilité du front de fusion rend complexe l'évolution du champ de température .cela confère aux problèmes a changement de phase leur non linéarité.

## ***LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***

---

Des lors ,ils ne peuvent être résolus que par des méthodes numériques, elles permettent d'approximer un système d'équations différentielles par un système d'équations algébriques.

Les méthodes numériques peuvent être classées en trois grandes catégories :

- ✓ Les méthodes analytiques
- ✓ Les méthodes intégrales
- ✓ Les méthodes de discrétisation
- ✓ Les méthodes analytiques

Les résultats numériques sont obtenus à partir de fonctions explicitées ou des développements en série de fonctions connues.

Les solutions analytiques sont limitées pour un nombre restreint de problèmes ou le changement de phase est dans un milieu infini ou dans un domaine semi infini

- ✓ La méthode intégrale

La solution exacte est remplacée par une combinaison de fonctions donnée a priori et dans laquelle les paramètres inconnus sont obtenus a partir des conditions obtenues par des intégrations sur le domaine du problème.

D.Y.S.LOU a étudié en 1982 la solidification du sel de Glauber à partir des méthodes intégrales.

- ✓ La méthode de discrétisation

L'ensemble continu des valeurs prises par les variables dans l'espace et dans le temps est remplacé par des valeurs prises par les grandeurs physiques en un nombre fini de point. Le volume entourant chaque point du réseau est dans un état d'équilibre thermodynamique. Entre deux points du réseau les grandeurs physiques doivent varier de manière régulière et faible.

Il existe trois méthodes de discrétisation :

- ✓ La méthode des différences finies
- ✓ La méthode des éléments finis

# ***LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***

---

- ✓ Les méthodes des volumes de contrôle finis

## ***III.5.1. Résolutions numériques***

Les problèmes à changement de phase sont non linéaires du fait de la mobilité du front de fusion de solidification. La complexité de tels problèmes fait qu'ils ne peuvent être résolus que de façon numérique.

Nous procéderons donc par méthodes de discrétisation pour simuler surtout le comportement de la paraffine dans le compartiment qui la contient.

Ils existent plusieurs méthodes de discrétisation, mais pour la suite nous utiliserons les méthodes des différences finies parce qu'étant la méthode la plus indiquée en géométrie classique (cylindre parallélépipède).

Le principe des différences finies repose sur la substitution d'une fonction continue par une fonction discrète connue en un certain nombre de points du domaine et aux instant  $t_0$ . Les dérivées partielles sont approximées à partir des développements limites en série de Taylor jusqu'à un certain ordre et une certaine précision.

## ***III.5.2. Discrétisation des équations***

Pour déterminer la valeur des températures discrètes, on doit discrétiser les équations aux dérivées partielles.

$$\frac{\delta T_e}{\delta t} = a_e \left( \frac{\delta^2 T_e}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T_e}{\delta y^2} \right) \quad (\text{Eq. III-9})$$

Et donc l'équation dans sa forme discrétisée est :

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{a_e}{\Delta x_e^2} (T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n) + \frac{a_e}{\Delta y_e^2} (T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n) \quad (\text{Eq. III-10})$$

Pour l'équation régissant la chaleur dans la paraffine (solide comme liquide), on a :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a_{ps} \left( \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (\text{Eq. III-11})$$

Et donc l'équation dans sa forme discrète s'écrit :

## ***LES ÉQUATION DE TRANSFERT THERMIQUE D'ÉNERGIE***

---

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{\alpha_p}{\Delta x_p^2} (T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n) + \frac{\alpha_p}{\Delta y_p^2} (T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n) \quad (\text{Eq. III-12})$$

Pour l'équation de l'évolution de l'interface solide liquide :

$$P_s L_f \frac{\delta y}{\delta t} = \lambda_s \frac{\delta_s}{\delta x} - \lambda_f \frac{\delta_f}{\delta x} \quad (\text{Eq. III-13})$$

La forme discrétisée s'écrit :

$$P_s L_f \frac{(y^{n+t} - y^n)}{\Delta t} = \lambda_s \frac{(T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n)}{\Delta y} - \lambda_f \frac{(T_{i,j}^n - T_{i,j-1}^n)}{\Delta y} \quad (\text{Eq. III-14})$$

L'avantage de cette technique est que chaque équation ne contient qu'une seule inconnue par contre, n'importe qu'elle valeur du paramètre reliant les incréments de temps et d'espace ne saurait convenir .en effet le coefficient de ne peut être négatif, car cela imposerait que la valeur de la température au temps soit d'autant plus faible que sa valeur au t est grand.

Cette situation fait apparaitre une instabilité de calcul, qui se traduit par des oscillations des valeurs de la température, qui vont en s'amplifiant .on montre que la condition de stabilité pour un nœud interne impose définissant le nombre de variables géométriques.

*CHAPITRE IV*  
*DÉSCRIPTION DE TRNSYS*  
*ET RÉSULTATS*



### ***IV.1 Introduction :***

Dans ce chapitre, une simulation dynamique d'un système de chauffe eau solaire sera réalisée à l'aide de logiciel TRNSYS.

Le logiciel de simulation TRNSYS est un environnement complet et extensible, dédié à la simulation dynamique des systèmes.

### ***IV.2 Aperçu sur TRNSYS :***

TRNSYS ("Simulateur de système transitoire» prononcé «transis ») a été développé à l'origine par l'Université du Wisconsin dans les années 1970 pour l'analyse numérique de l'énergie solaire destiné au chauffage et à l'eau chaud. Au cours des 30 dernières années TRNSYS n'a cessé d'affiné et maintenant il est largement reconnu comme un outil d'analyse fiable pour les systèmes énergétiques complexes.

TRNSYS est un logiciel de simulation du comportement thermique des bâtiments et des systèmes associés en régime dynamique. La modélisation et la simulation de ce système est nécessaire pour étudier le comportement thermique et celui du système solaire photovoltaïque, et peut être utilisé pour valider tous les concepts de toutes énergies nouvelles et simuler des systèmes énergétiques. Le recours à ce type de logiciel est indispensable pour prendre en compte la variabilité temporelle importante des sollicitations et des sources d'énergie.

Dans TRNSYS les composants d'un système sont appelés types et chaque type a un ensemble de paramètres les entrées (inputs) et les sorties (output) qui décrivent et définissent la manière dont il permettra de relier d'autres types.

La simulation est en effet un outil extrêmement séduisant. Contrairement à l'expérimentation elle permet de tout essayer même les solutions les plus originales. Il donne la possibilité de jouer avec le modèle de bâtiment en lui ajoutant des composants en modifiant sa forme son orientation en le situant à des endroits différents etc. C'est un vecteur d'imagination et de créativité. La simulation permet d'évaluer une solution technique et/ou architecturale elle le fait avec détail précision et pertinence. Contrairement aux méthodes de calcul simplifiées elle fournit des résultats sous une forme identique à celle qu'auraient des mesures expérimentales

## ***DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS***

---

sur un bâtiment réel. On injecte dans le modèle les valeurs que prennent au cours du temps des variables décrivant le climat ; on indique les paramètres de fonctionnement du bâtiment (occupé continuellement, chauffé, climatisé, etc.

Classiquement on obtient les valeurs prises par un certain nombre de variables d'observation (températures d'air températures de surface des parois, puissance de chauffage ou de refroidissement, etc.) à des moments successifs en général régulièrement espacés de la période considérée (G. Bouhelal, 2012).

### ▪ **Avantages :**

- Grâce à son approche modulaire, TRNSYS est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).
- L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.
- Documentation vaste sur les sous-programmes y compris explications usages usuels équations de base.
- définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation.

### ▪ **Inconvénients :**

- Pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder et introduire l'ensemble exhaustif des données définissant le bâtiment et le système.
- La bibliothèque est limitée.

#### ***IV.2.1. TRNSYS Simulation Studio***

« TRNSYS Simulation Studio » est l'interface d'accueil de TRNSYS permettant de développer des applications de simulation. Un projet de simulation consiste à choisir un

# DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

ensemble de modules et à décrire ensuite les interactions entre ceux-ci.

Chaque module représente un sous-programme et agit comme une boîte noire (qu'il est cependant possible d'ouvrir). On introduit pour chaque sous-programme les différents paramètres les variables d'entrée et de sortie

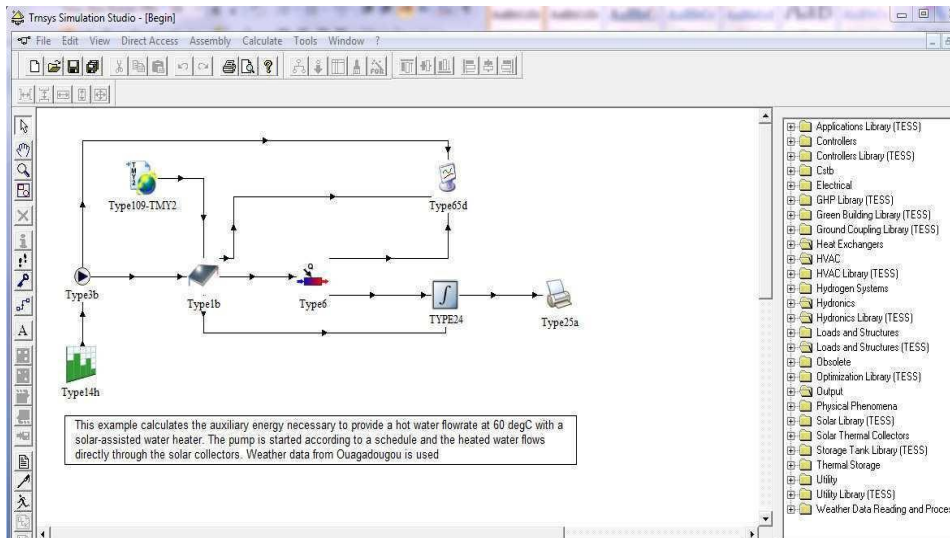


Figure IV.1: Interface du logiciel TRNYS

## IV.2.2. TRN Build

« TRNBuid » est un outil permettant d'introduire les caractéristiques d'un bâtiment multizone nécessaire à la simulation thermique de celui-ci .Ses propriétés sont introduites dans « TRNSYS Simulation Studio » via le module « type56 » ainsi l'utilisateur décrit chaque zone thermique alternativement (les matériaux utilisés pour la construction des murs).

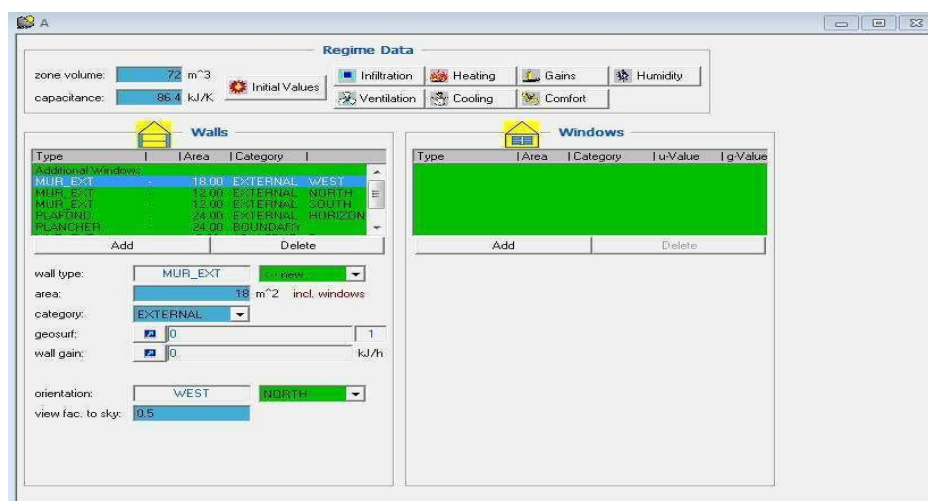


Figure IV.2: Interface du logiciel TRNBuil.

# DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

## IV.3 Résultat et discussion

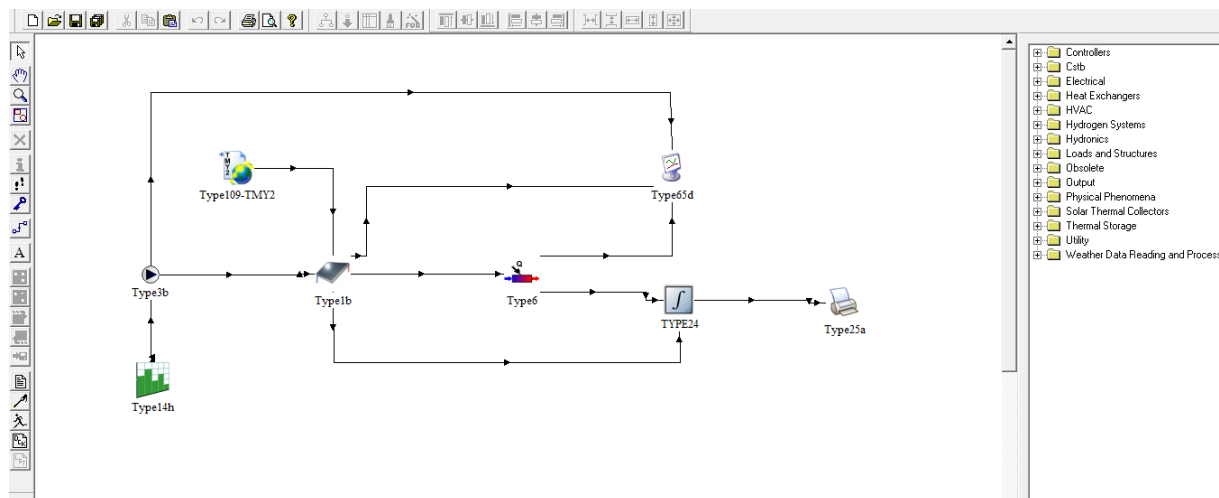


Figure IV.3: model d'installation 1 sur trnsys.



Figure IV.4: le résultat de la simulation de l'installation 1.

# DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

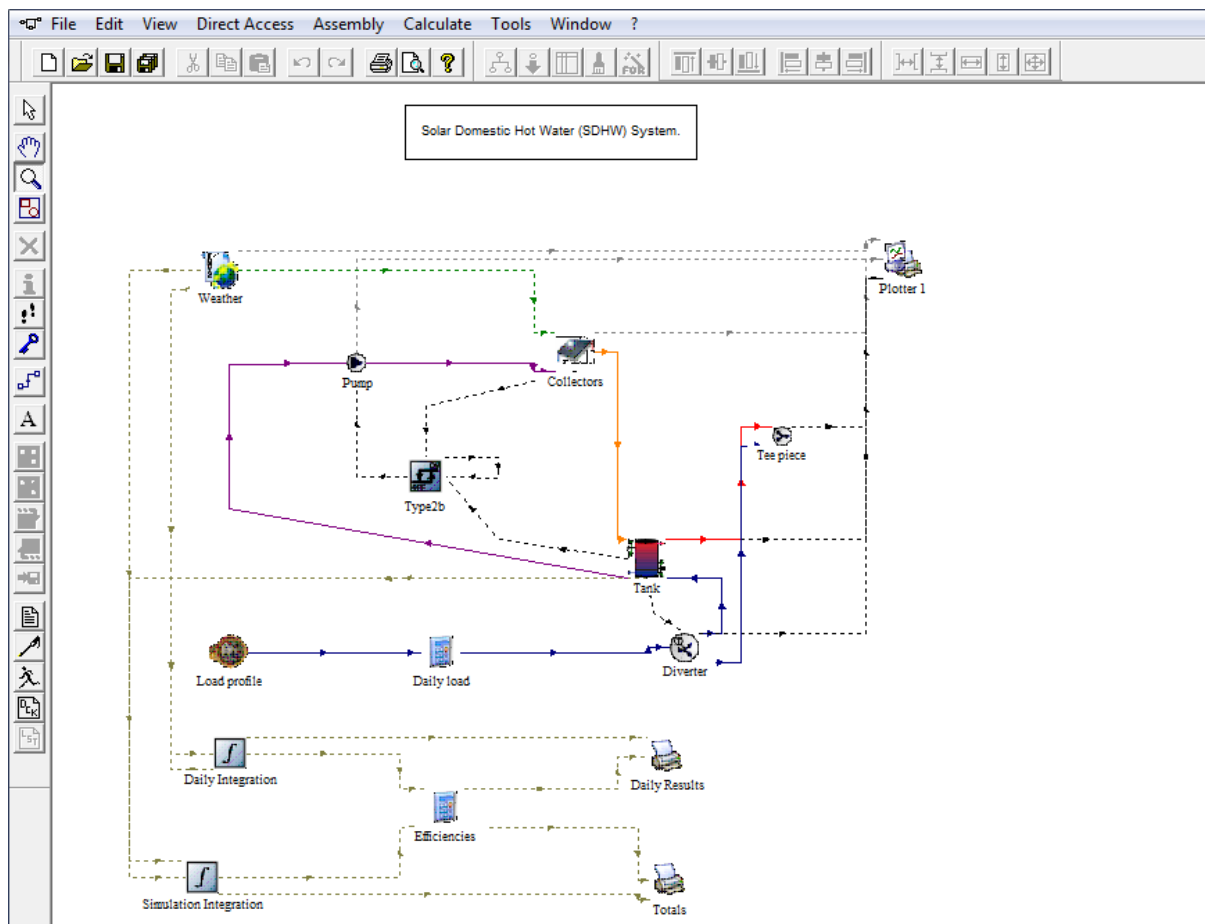


Figure IV.5: model d'installation 2 sur trnsys.

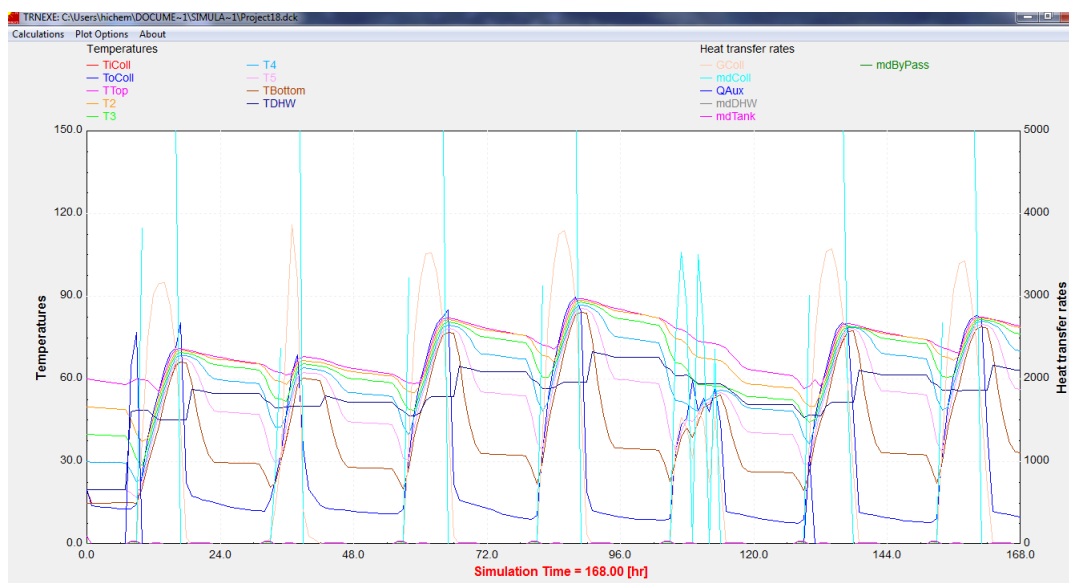


Figure IV.6: le résultat de l'installation 2.

## **DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS**

---





**Définition et paramètre :**

**Tableau IV : définitions des paramètres principaux de trnsys.**

paramètres	définitions
 Weather	<p>type de 109 : lit un fichier de données météorologiques dans le format TMY2 norme</p>
 Collectors	<p>Collecteur solaire; Efficacité Quadratic, 2e ordre Angle d'incidence Modificateurs</p>
 Plotter 1	<p>traceur graphique en ligne avec le fichier de sortie</p>
 Tee piece	<p>Mélangeurs et déviateurs qui sont soumis à un contrôle externe est souvent nécessaire dans les systèmes thermiques</p>
 Load profile	<p>Fonction de temps</p>
 Type2b	<p>ON / OFF Controller différentiel; Stratégie Old contrôle</p>
 Tank	<p>Reservoir de stockage; Inlets variables, pertes uniformes</p>
 Diverter	<p>Valve Trempe</p>

## *DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS*

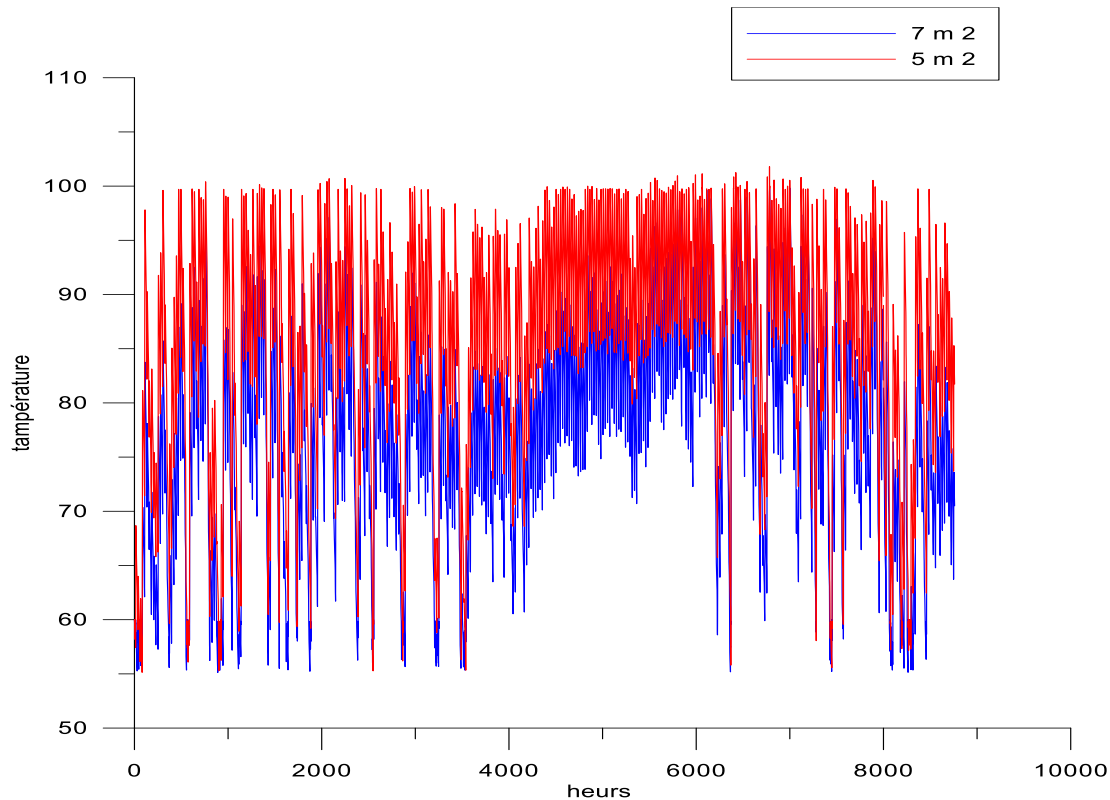
---

 Daily load	Calculatrice d'équation
 Daily Integration	Quantité Integrator
 Daily Results	Imprimante - Pas d'unités imprimées dans le fichier de sortie
 Totals	Imprimante - Pas d'unités imprimées dans le fichier de sortie

## Résultats et discussion :

### Température de collecteur :

- *La période annuelle des deux dimensions :*



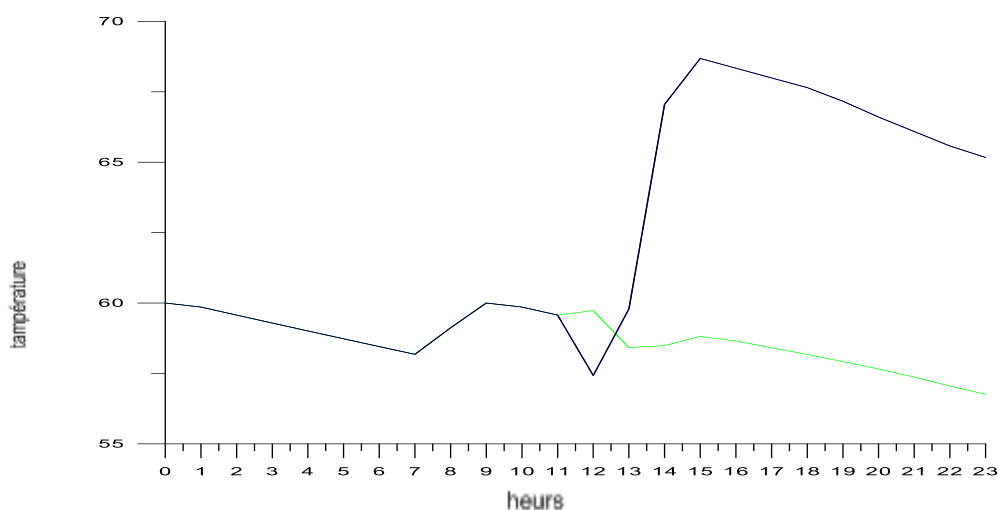
**Figure 7:** Comparaison de la variation de température entre deux collecteur par rapport au temps.

#### Interprétation :

- On remarque que la température dégrade pendant la nuit puis augmente pendant le jour.
- On remarque aussi des variations de température entre les différents mois de l'année.
- On remarque aussi que le collecteur a grand surface absorbe plus.



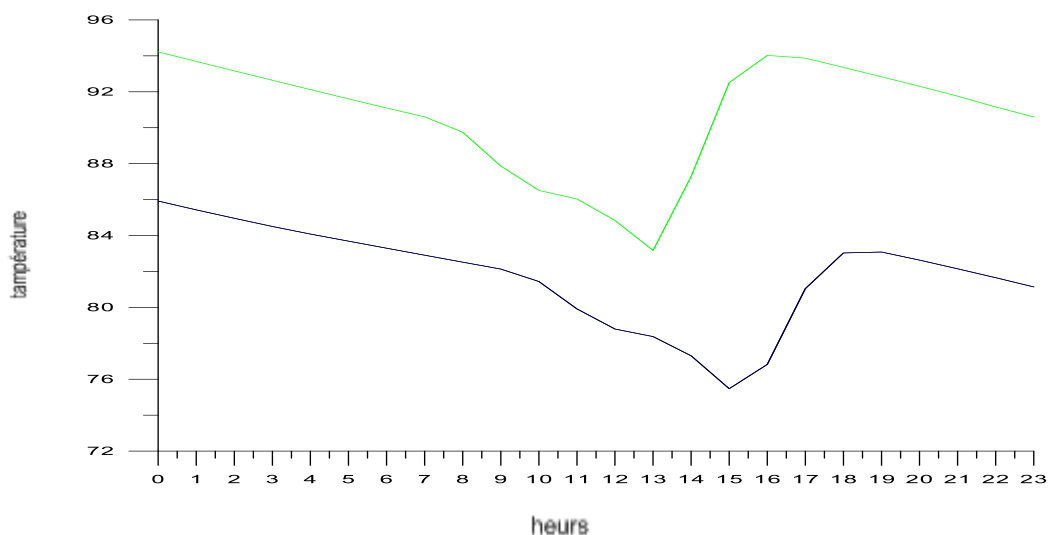
✓ Le moi de janvier :



**Figure 8:** Comparaison de la variation de Température entre deux collecteurs pendant une journée du mois de Janvier.

- On remarque que de minuit à 11h matin il n'y a pas de changement de Température entre les 2 collecteurs.
- Dans la période suivante la température diffère entre les deux collecteurs.
- La température dans le collecteur à grand surface augmente par rapport à l'autre collecteur.

✓ Le moi d'avril:



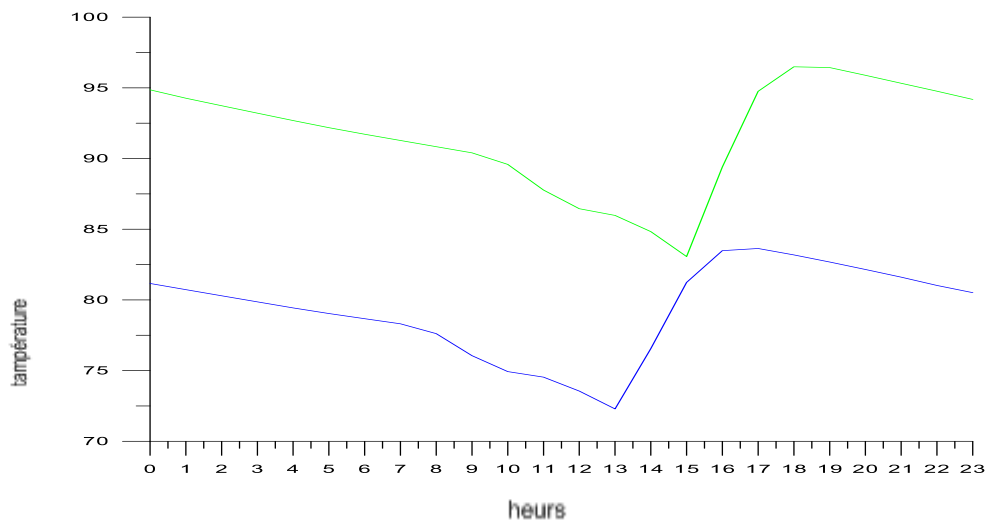
**Figure 9:** la variation de Température entre deux collecteurs pendant une journée du mois d'avril.

## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

---

- Pendant la journée du mois d'avril on a une différence de température entre les deux collecteur quelques soit la nuit ou le jour.
- On remarque que le collecteur à grand surface absorbe plus de chaleur que l'autre donc il est plus efficace.

### ✓ le moi de juillet :



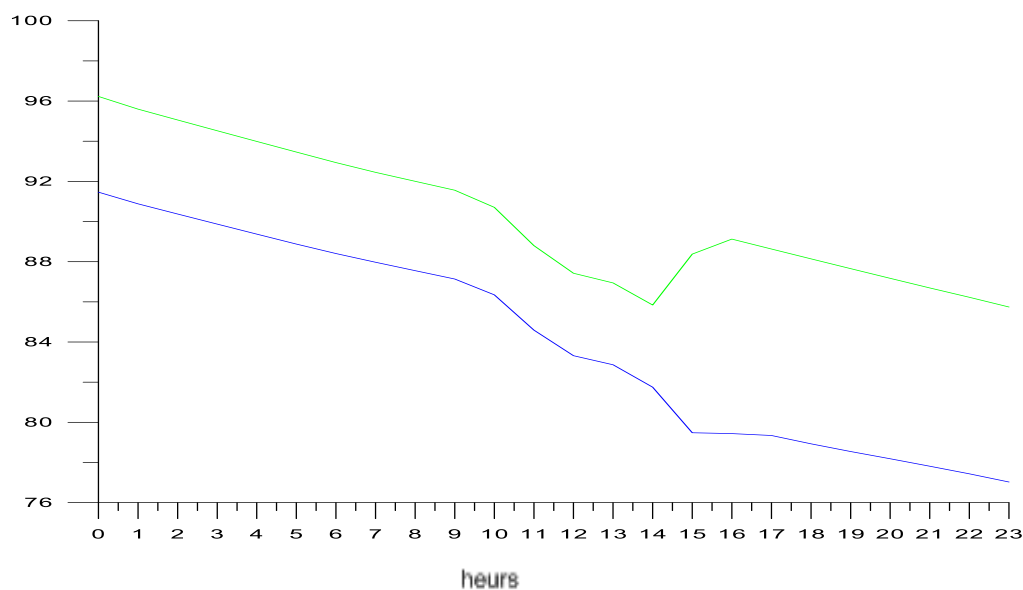
**Figure 10 :** La variation de Température entre deux collecteurs pendant une journée du mois de Juillet.

Le collecteur à grand surface plus efficace que l'autre collecteur et on trouve sa dans la grande température absorbé par le collecteur à grand surface.

### ✓ Le moi d'octobre :

température

## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

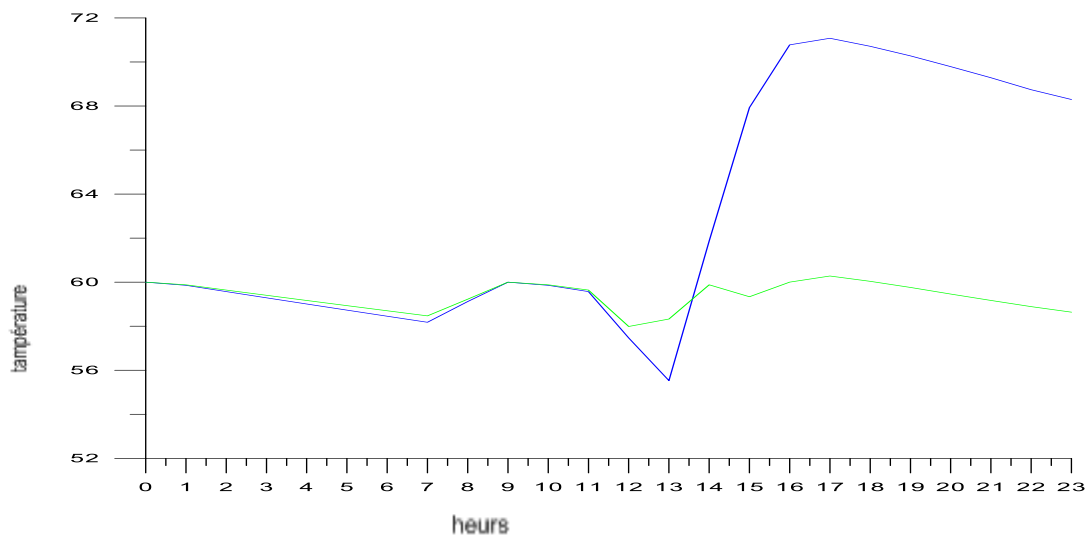


**Figure 11:** La variation de Température entre deux collecteurs pendant une journée du mois d'Octobre.

- Pendant le mois d'Octobre on remarque la décroissance de la température par rapport aux autres mois, la température élevée pendant la nuit est moins que celle de la journée.

### La température de réservoir:

#### ✓ Le moi de janvier :

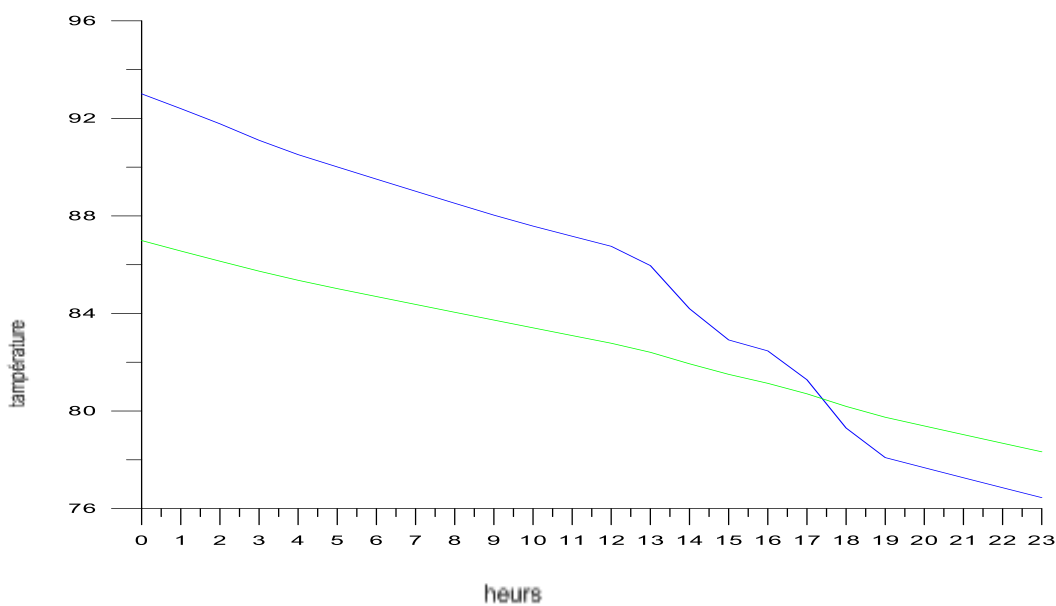


**Figure 12 :** variation de Température pendant la période de janvier entre les deux réservoirs.

- Pendant la période de minuit à midi la température des deux réservoirs est équivalente.
- Le reste de la journée la température change et le réservoir à grand volume et plus efficace

#### ✓ Le moi d'avril :

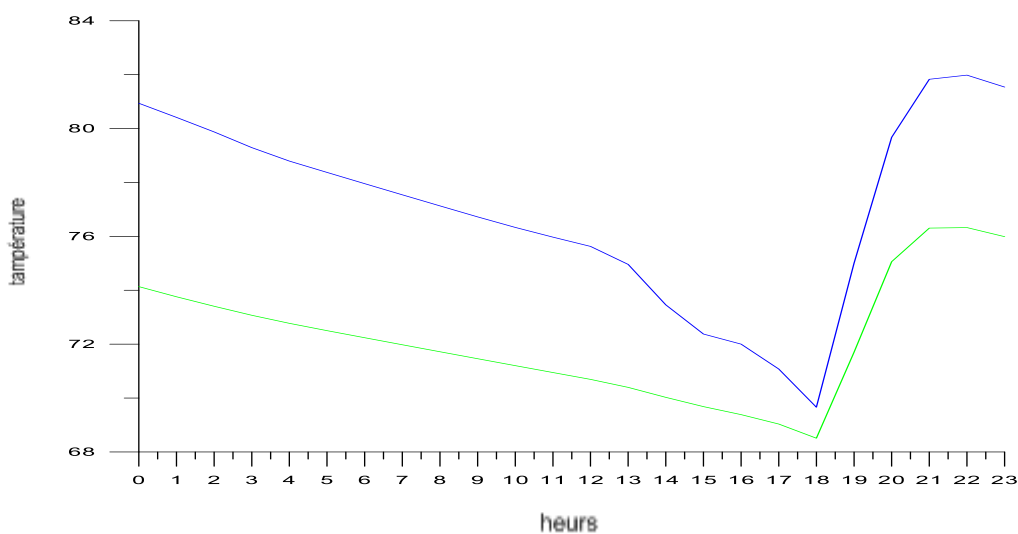
## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS



**Figure 13:** variation de Température pendant la période d'Avril entre les deux réservoirs.

- Diminution de la température des deux réservoirs pendant le mois d'avril qui contient une température plus élevée la nuit que le jour.

✓ **Le moi de juillet :**



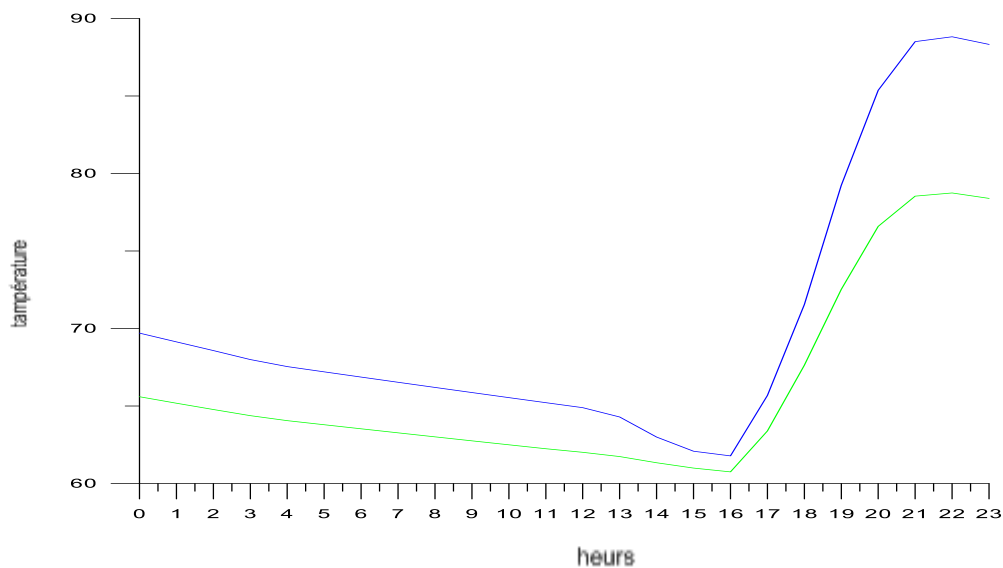
**Figure 14:** variation de Température pendant la période de juillet entre les deux réservoirs.

- La température augmente pendant la nuit et faiblit dans la journée.

✓ **Le moi d'octobre :**

## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

---

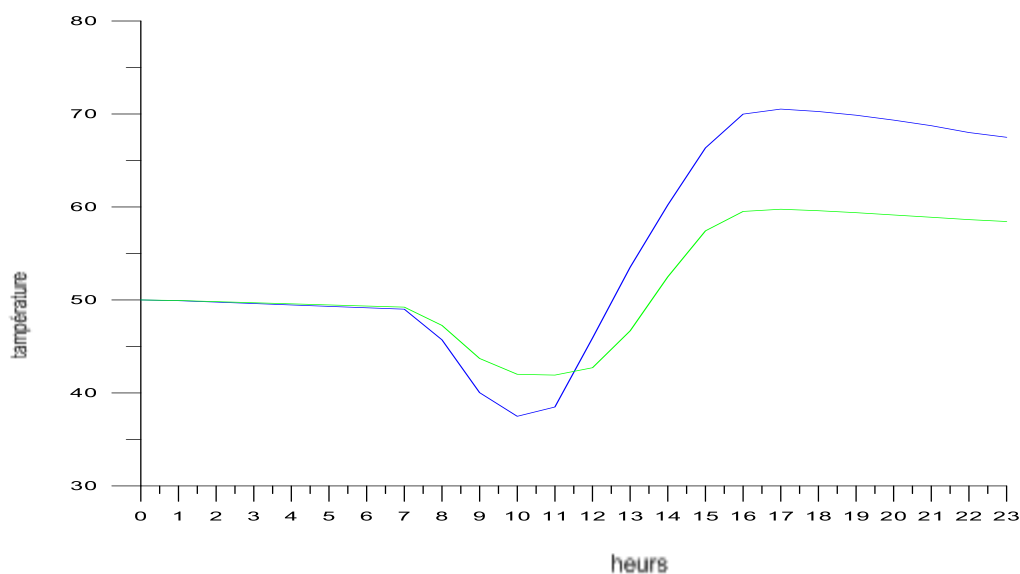


**Figure 15:** variation de Température pendant la période d'Octobre entre les deux réservoirs.

- On remarque une légère différence entre la 'évolution de la température.
- On remarque une augmentation simultanée de la température mais le réservoir de 0,500m<sup>3</sup> est très important par rapport à celle de 0,003m<sup>3</sup>.

### Température T2 :

✓ Le moi de janvier :

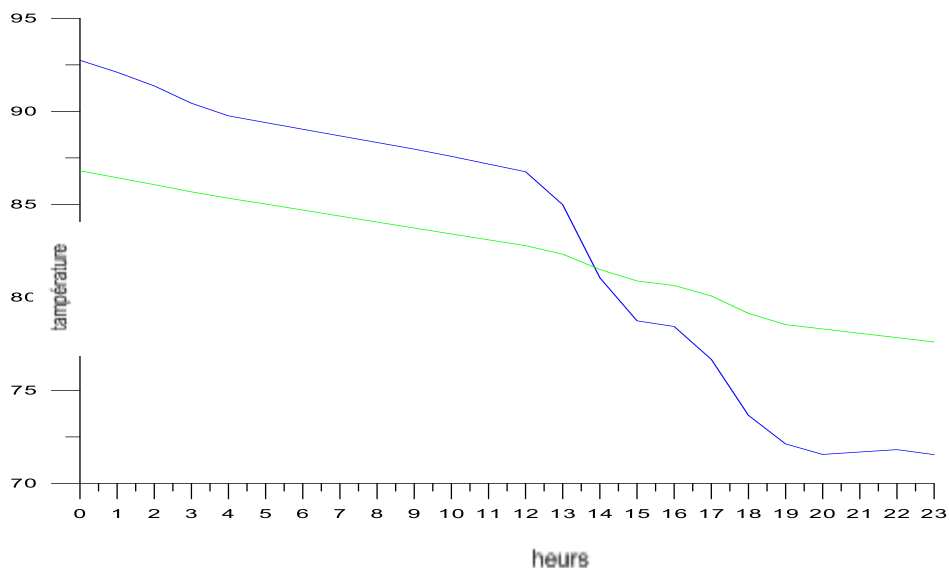


**Figure 16:** variation de Température pendant une journée du mois de Janvier entre les deux réservoirs.

## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

- On remarque dans la période matinale aucun changement de température jusqu'à vers 7h mais en vois une évolution de T jusqu'à 17h est celle du réservoir de 0,005m<sup>3</sup> et qui est la plus importante.

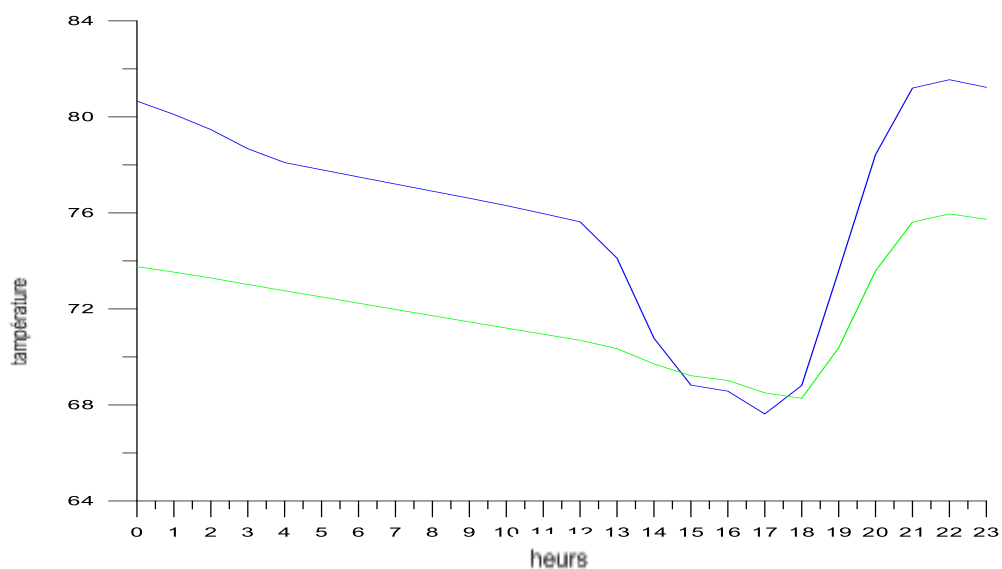
### ✓ Le moi d'avril :



**Figure 1:** variation de Température pendant une journée du mois d'Avril entre les deux réservoirs.

- On remarque que les deux températures des deux réservoirs diminuent.

### ✓ Le moi de juillet :



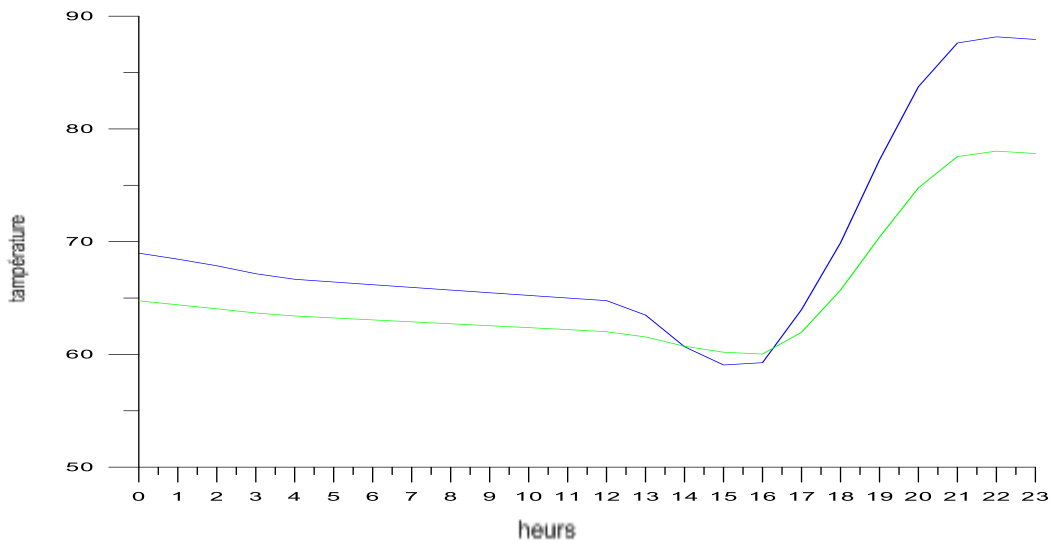
**Figure 2:** variation de Température pendant une journée du mois de juillet entre les deux réservoirs.

## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

---

- On remarque que dans la période de minuit la Température est élevée et dégrade par rapport au temps vers 17h et ré-augmente vers 23h.

### ✓ Le moi d'octobre :



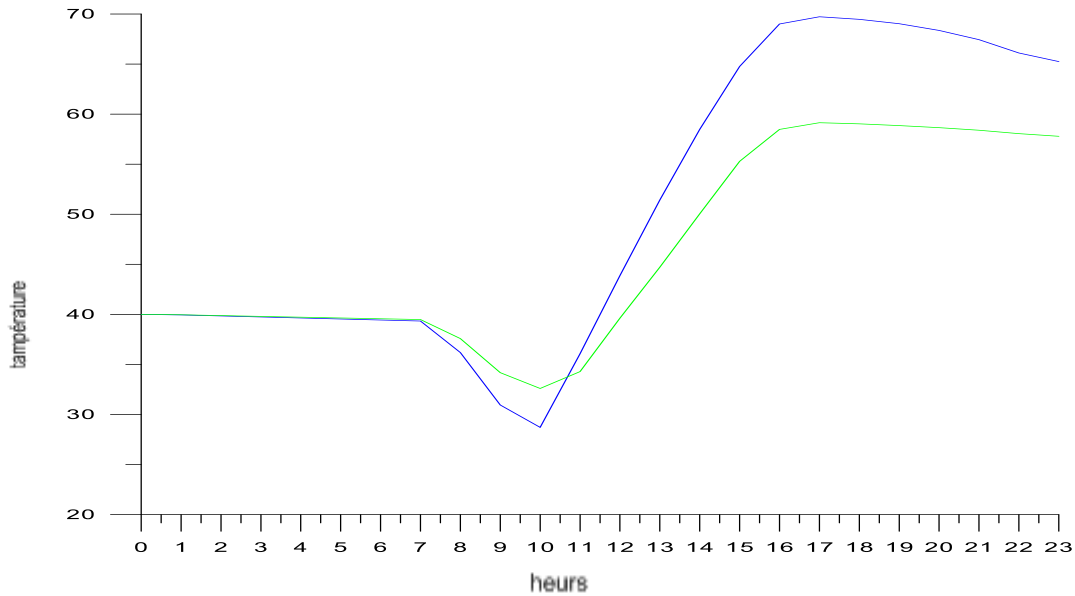
**Figure 3 :** variation de Température pendant une journée du mois d'octobre entre les deux réservoirs.

- Le grand réservoir garde plus de chaleur que l'autre réservoir et spécialement pendant la période de la nuit.

### La température T3 :

#### ✓ Le moi de janvier :

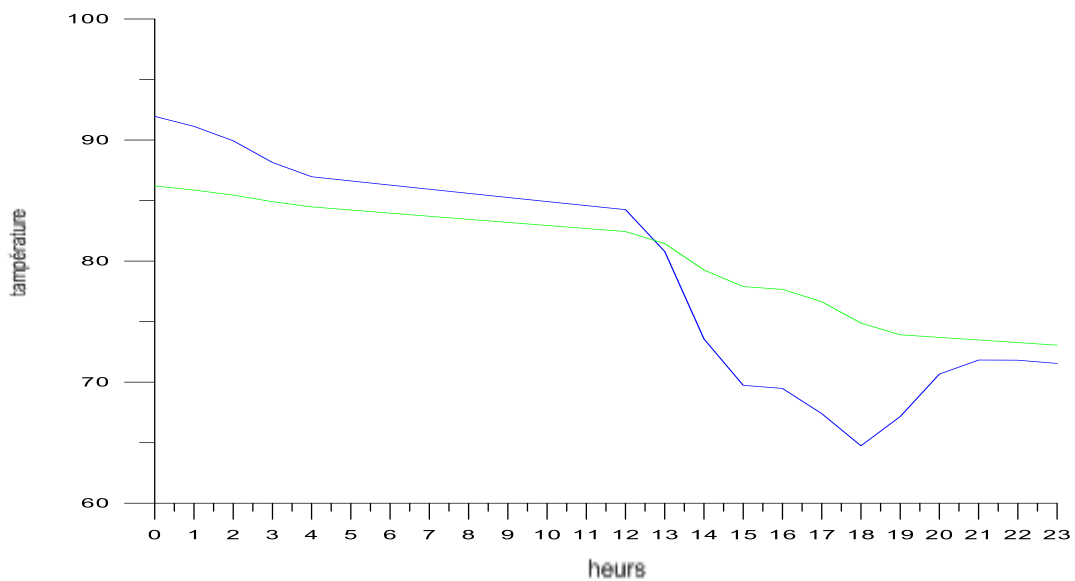
## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS



**Figure 20:** La variation de la température pendant le mois de janvier par rapport a une seul journée du mois de janvier.

- La température reste constante jusqu'à 7h du matin puis diminue jusqu'à 10h du matin et augmente vers 23h.

✓ **Le moi d'avril :**



**Figure 21 :** variation de température pendant le moi d'avril

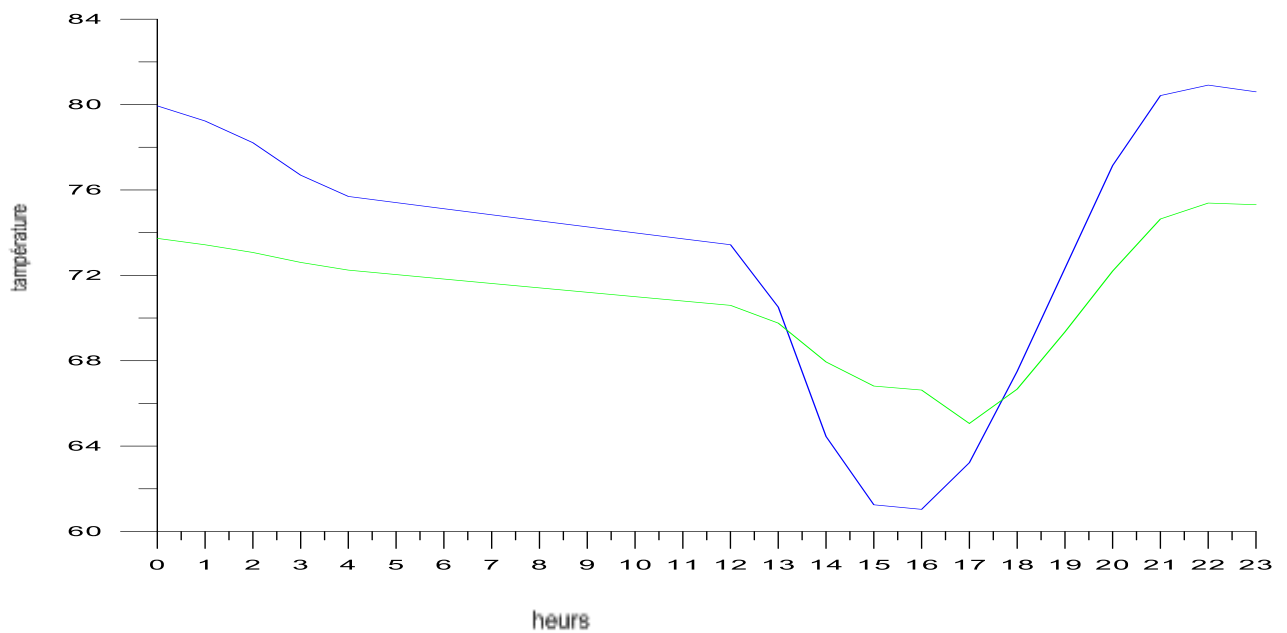
- démunissions de température important pendant les heurs de jour

✓ **Le moi de juillet :**



## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

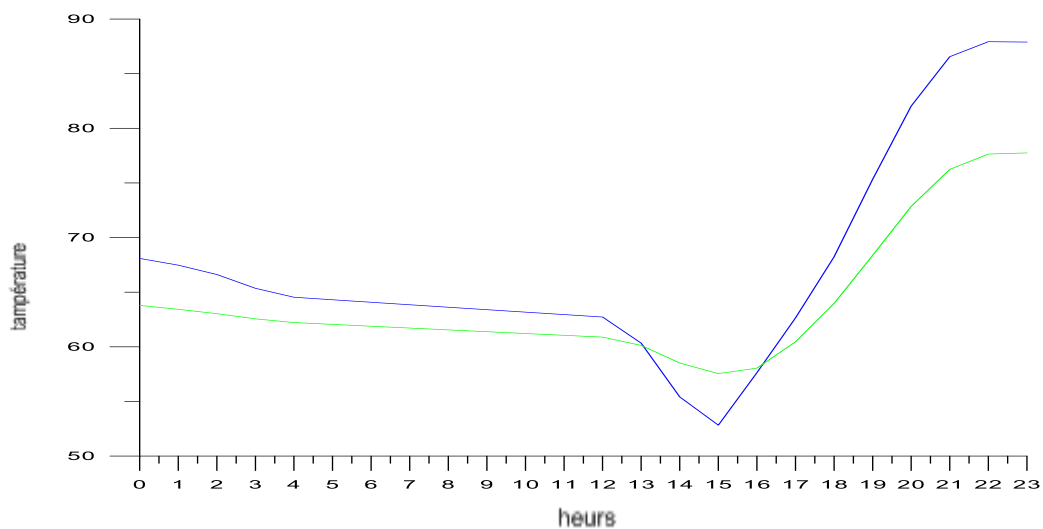
---



**Figure 22** : changement de température pendant le moi de juillet

- Démunissions de température pendant la période de minuit a 15h puis augmentation jusqu'à 23h.

✓ **Le moi d'octobre :**

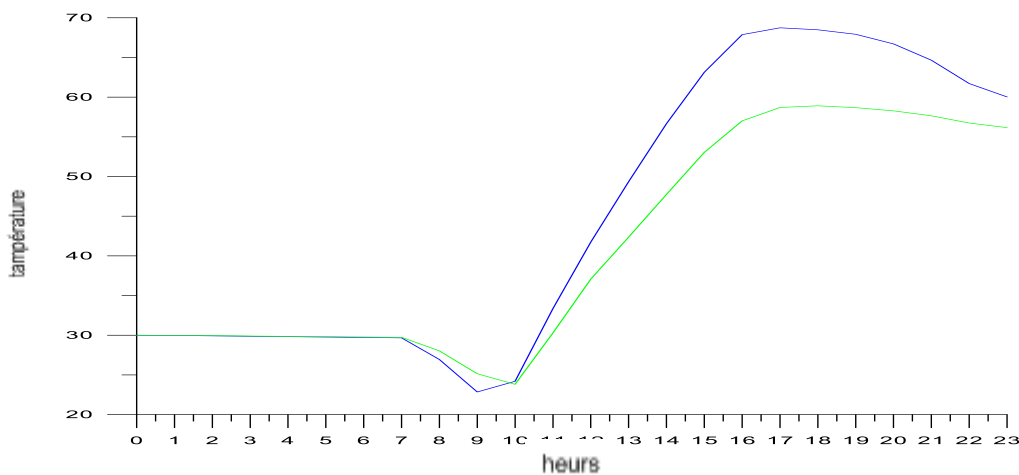


**Figure 23** : variation de température a le moi d'octobre

### La température T4 :

## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

### ✓ Le moi de janvier :

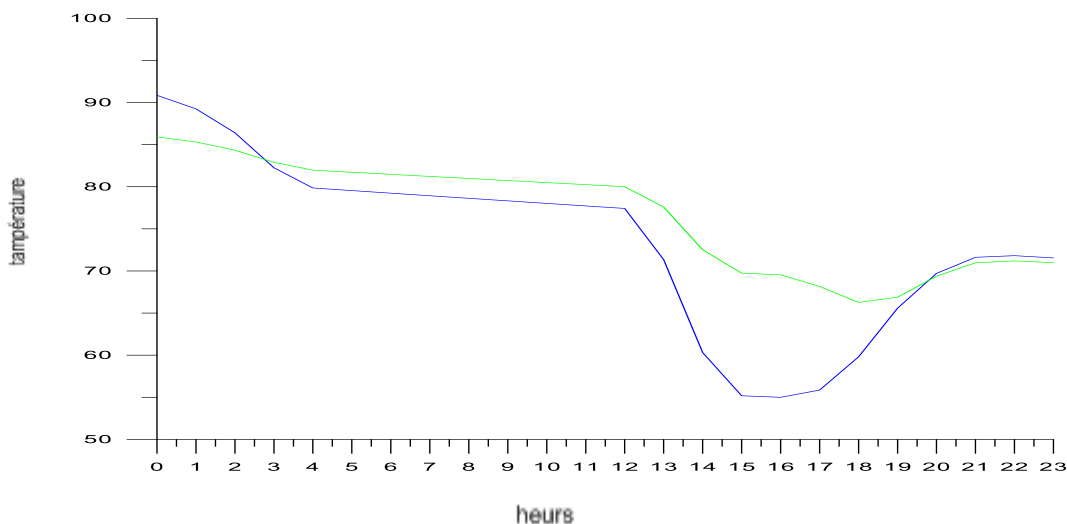


**Figure 24 :** variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de janvier

- On remarque une basse de température et stabilité de jusqu'à 9h puis augmentation agressive

Cette augmentation rapide devient de passe de température de nuit

### ✓ Le moi d'avril :

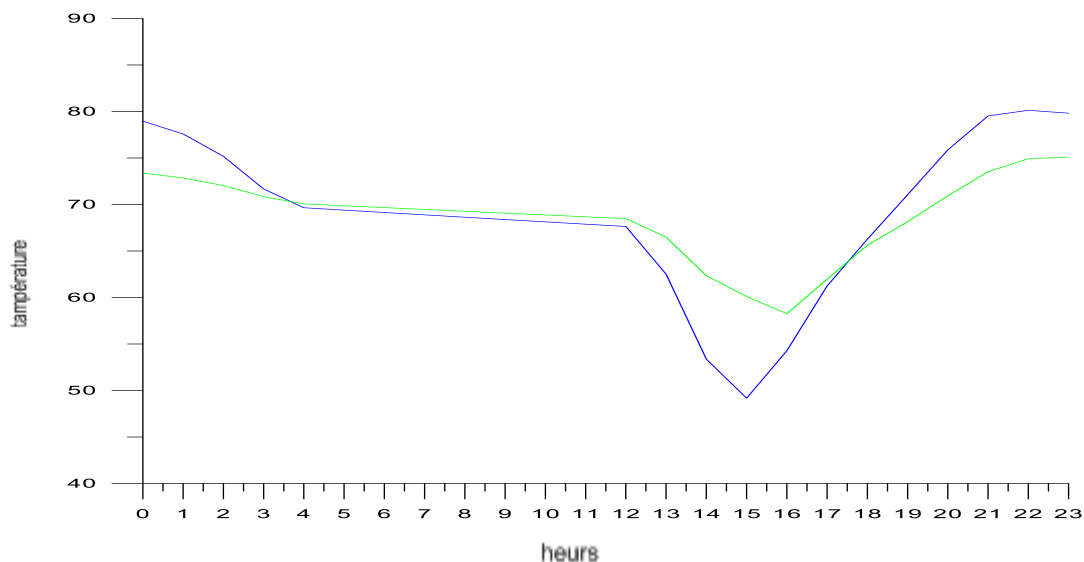


**Figure 25 :** variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de d'avril

- On remarquant une dégradation de température légère puis diminutions de 13h à 15h puis augmentation

### ✓ Le moi de juillet :

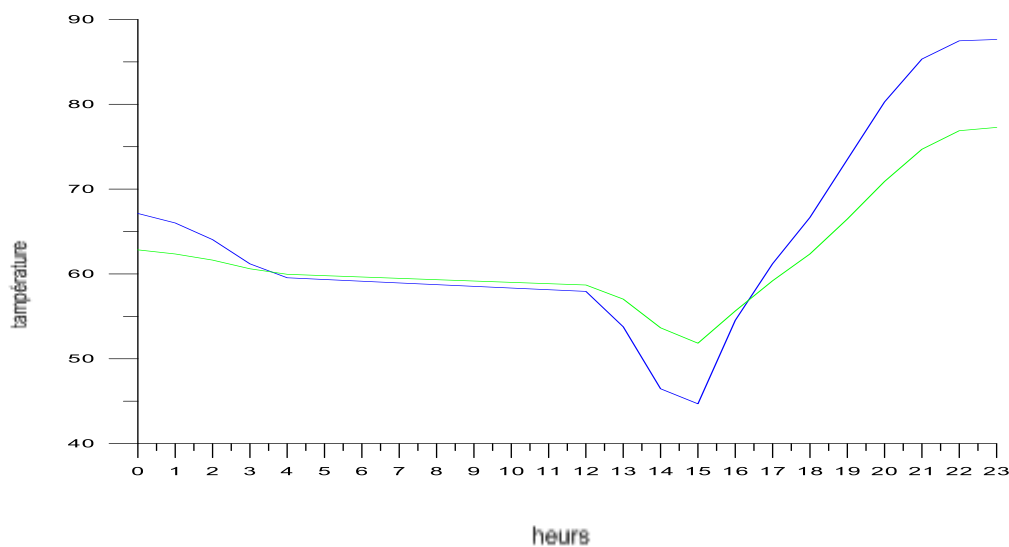
## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS



**Figure 26** : variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de juillet

- On remarque une baisse de température de 85C<sup>0</sup> ou moyen pour les de réservoir jusqu'à 65C<sup>0</sup> puis augmentation
- Cette augmentation devenue de la basse de température

✓ **Le moi d'octobre :**

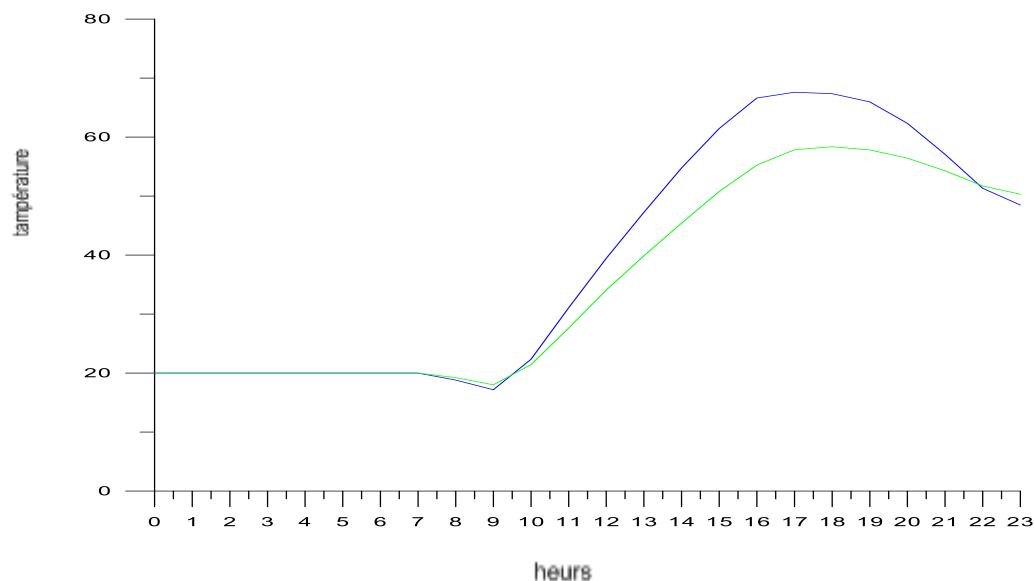


**Figure27** : variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de d'octobre

- On remarque une décroissante de deux température puis diminution jusqu'à 15h puis augmentation direct
- Cette diminution et augmentation devenu de la basse de température

## La température T5 :

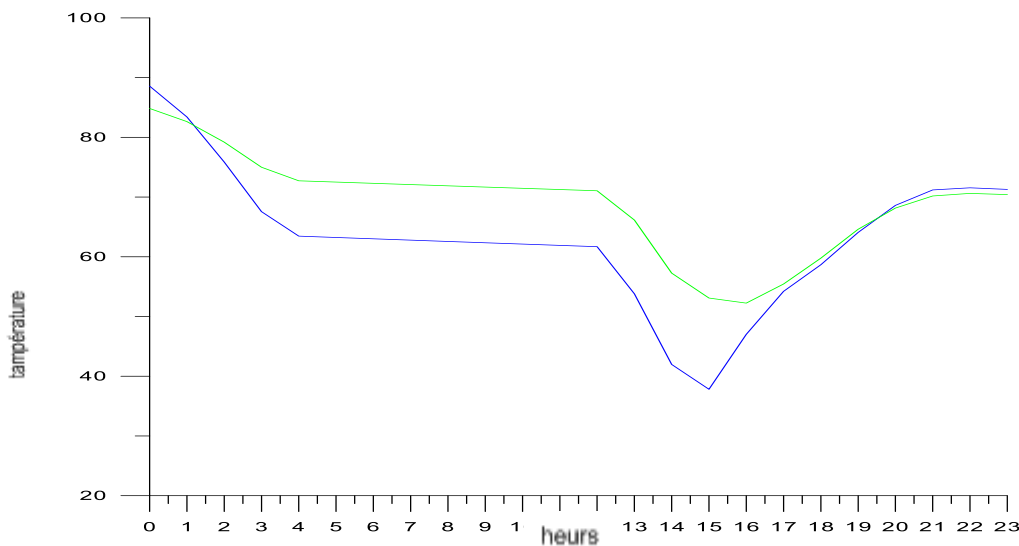
### ✓ Le moi de janvier :



**Figure 28** : variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de janvier

- On remarque que la température de deux réservoirs sont constantes puis augmentation agressive
- Cette augmentation devenue importante le soir

### ✓ Le moi d'avril :

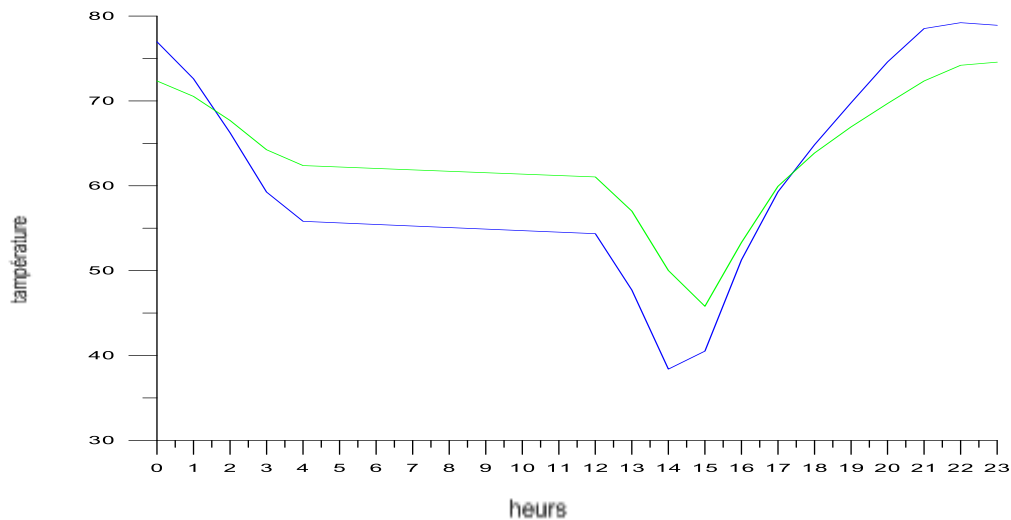


**Figure 29** : variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de d'avril

- Une diminution de température jusqu'à 4h puis constante puis augmentation jusqu'à 23h

## DÉSCRIPTION DE TRNSYS ET RÉSULTATS

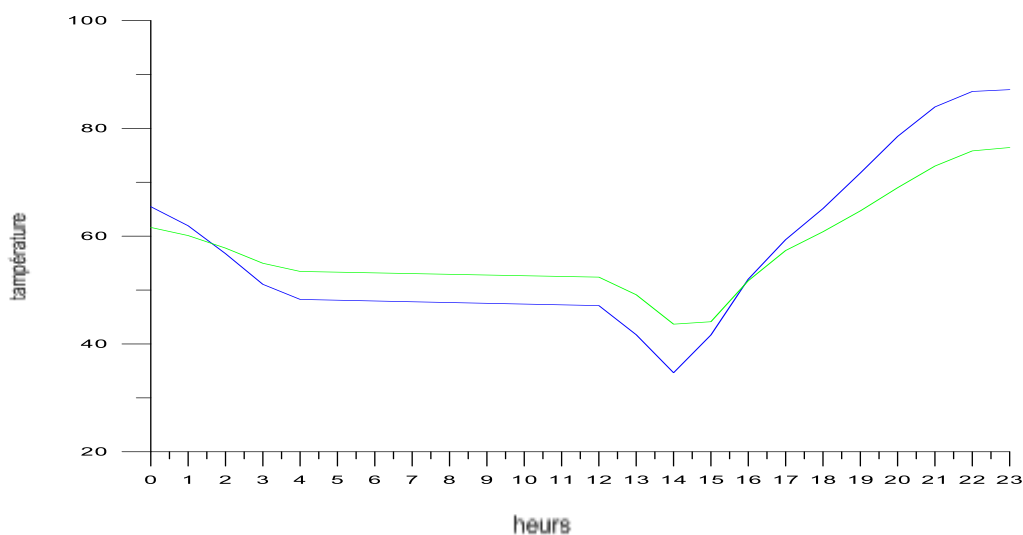
### ✓ Le moi de juillet :



**Figure 30 :** variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de juillet

- On remarque une décroissance de température jusqu'à 4h puis constante à 11h puis démission puis augmentation
- Cette augmentation revient à la passe de chaleur et le transfert de chaleur qui se fait à l'aide de fluide chaud qui se gèle à une température importante
- 

### ✓ Le moi d'octobre :

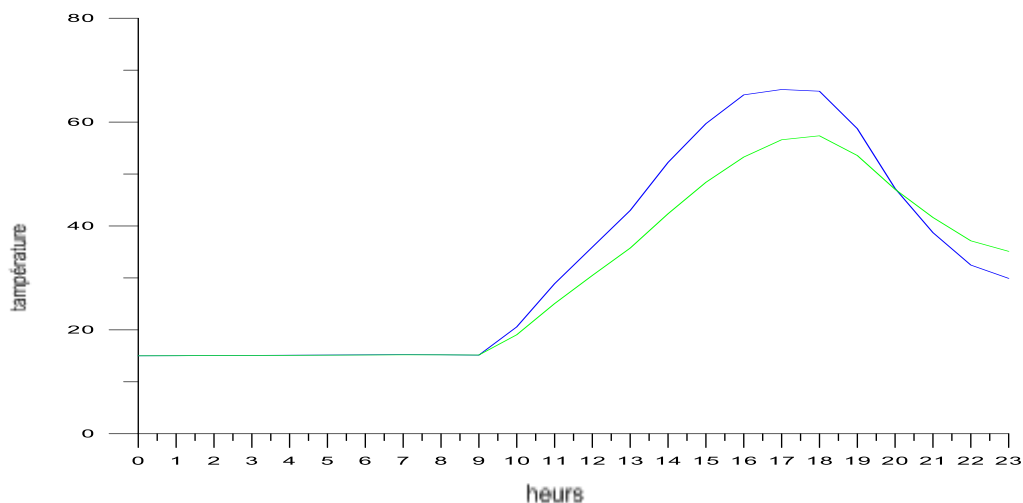


**Figure 31 :** variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois d'octobre

- Pas de grande différence entre la variation de température entre des réservoirs

## La température bottom :

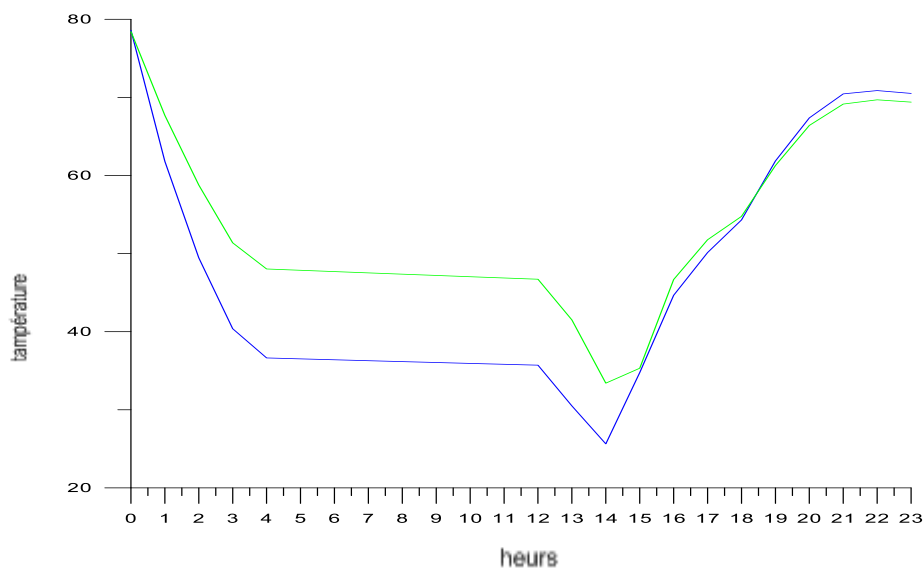
### ✓ Le mois de janvier :



**Figure 32 :** variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de janvier

- On remarque que la température reste constante jusqu'à 9h de matin puis augmentation de température jusqu'à 19h

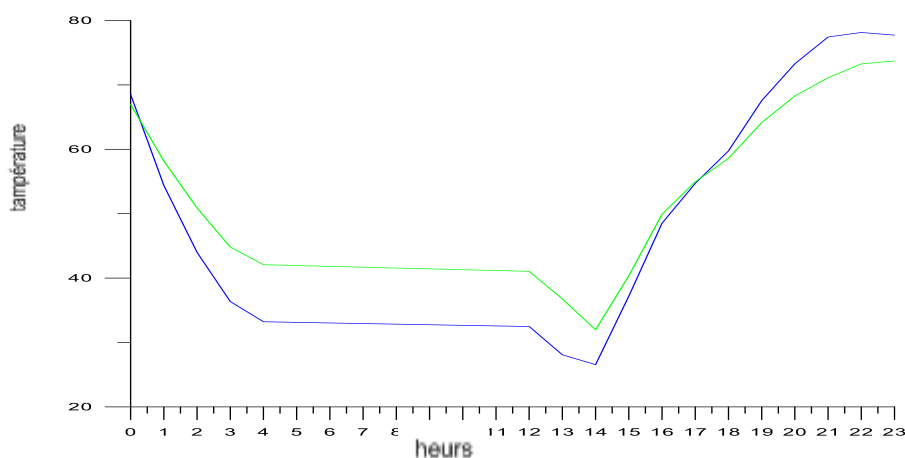
### ✓ Le moi d'avril :



**Figure 33 :** variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de d'avril

- On remarque une démunissions de température jusqu'à 4 heure de matin puis reste constante a 12h puis augmentation agressif de 14h a 22h
- Cette déférence de température conclue de la condition métrologie et le volume de réservoir

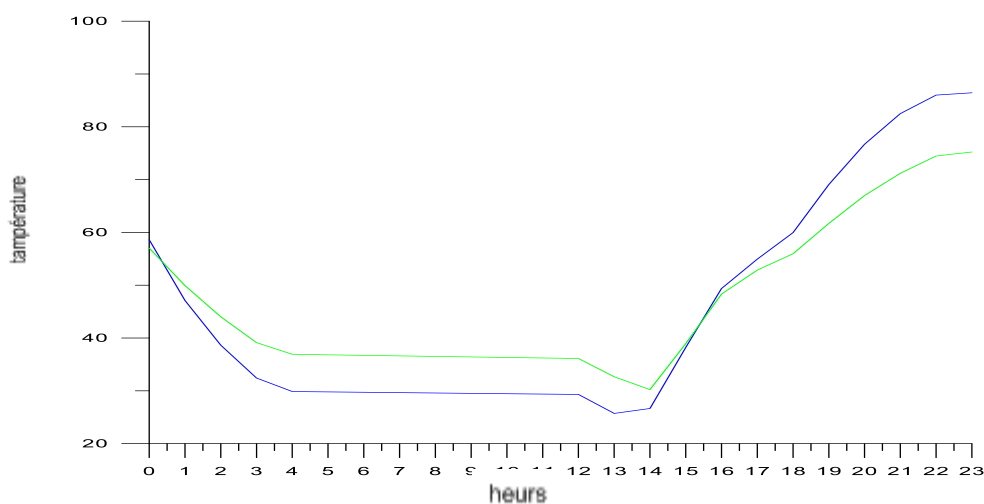
## ✓ Le moi de juillet :



**Figure 34 :** variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois de juillet

- On remarque une diminution de température jusqu'à 4 heures de matin puis reste constante à 12h puis augmentation agressive de 14h à 22h
- Cette différence de température conclue de la condition météorologique et le volume de réservoir

## ✓ Le moi d'octobre :



**Figure 35 :** variation de température de deux réservoirs par rapport à une journée de mois d'octobre

- On ne remarque pas grande de différence entre le graphique de 0.500m<sup>3</sup> et le graphique 0.300 m<sup>3</sup> cette différence est devenue de la détermination de réservoir

***CONCLUSION  
GENERALE***



# CONCLUSION GÉNÉRALE

---

## Conclusion générale

Le but de ce travail était de présenter la mise en place de la simulation et de comparer entre une installation de climatisation solaire et une installation de climatisation classique. Ces installations de rafraîchissement sont simulées avec les composants existants dans la bibliothèque du code de calcul TRNSYS.

Dans ce travail on a évoqué les inconvénients des systèmes simple (sont stockage) et leurs impacts de rendement. Nous avons rendu compte de la non durabilité des énergies fossiles, d'où la nécessité de chercher d'autres sources d'énergie. Les recherches ont montré que l'énergie solaire est une bonne solution qui peut remplacer les énergies fossiles. Les différentes technologies de système de stockage ont été présentées. Sa donne le travail Il est démontré qu'il existe une adéquation entre l'énergie solaire et les besoins de stockage d'énergie solaire .c'est le moment où l'irradiation solaire est maximale que les besoins de stocké sont plus importants donc des économies d'énergie primaire plus importantes. Ce pendant, l'effort technique pour l'implantation d'une installation de stockage thermique solaire est plus élevé que pour un système classique sont système de stockage. Ceci provient à la fois de la mise en œuvre de la partie production d'énergie solaire

### Perspectives :

Il sera intéressant de poursuivre ce travail par la mise en place d'un prototype de Système de stockage solaire en site réel pour tester système et confirmer les résultats Obtenus. Ce dispositif permettra aussi d'avoir des informations sur l'action du milieu

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références Bibliographie

[1] **R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz**, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2<sup>ème</sup> édition 1980.

[2] **site web**: <http://www.mtaterre.fr/dossier-mois/chap/606/En-r%C3%A9sum%C3%A9,-on-fait-quoi-gr%C3%A2ce-%C3%A0-l-%C3%A9nergie-solaire-> ; Les différents rayonnements du Soleil consulté le **10/09/2012**.

[3] **M. PIERRE PARDO** pardo-partie- PDF, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température ; le lundi **9 décembre 2013**.

[4] **BRUNET Y.** Technologies du stockage de l'énergie. *Éditions Hermès-Lavoisier. (2009)*

[5] **site web**: [http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage\\_energie\\_volant\\_inertie](http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage_energie_volant_inertie); Article rédigé par **Romain Guillo** année **2012**.

[6] **Marie DUQUESNE** « résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes » l'université de bordeaux **2013**.

[7] **A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba, et L. F. Cabeza**, « State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no 1, p. 31-55, janv. **2010**.

[8] **S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, et E. K. Stefanakos**, « Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants », *Prog. Energy Combust.Sci.*, vol. 39, no 4, p. 285-319, août **2013**.

[9] **M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, et L. F. Cabeza**, « State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no 1, p. 56-72, janv. **2010**.

[10] **Bruno Rivoire**, Le solaire thermodynamique. Groupe d'évaluation scientifique Thémis de **1982 à 1987**. Un laboratoire propre du CNRS, site d'Odeillo.

[11] « **Feuille de route Solaire Thermodynamique** » guide de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (A D E M E) Version finale Juin **2010**.

- [12] **Oehlschlaeger S., ReGrid: Énergie solaire à concentration**, RenewablesAcademy (RENAC) AG. (2013).
- [13] Principe de fonctionnement de la solaire thermodynamique, in: Syndicat des énergies renouvelables [on line] ( 2012) [www.enr.fr](http://www.enr.fr) [consulted juin2012].
- [14] **Renewable Energy Essentials: Concentrating Solar Thermal Power**, International EnergyAgency (IEA). (2009).
- [15] **Richter C.**, Focus on Concentrating Solar Powe The state of the art of the technology. (2008).
- [16] **Sylvain Quoilin**, les centrales solaires à concentration. Faculté des sciences Appliquées, Université de Liège (Mai 2007)
- [17] Les Centrales Solaires à Concentration, **Quoilin Sylvain** Ingénieur Civil Electromécanicien/Energéticien Université de Liège, **Mai 2007**
- [18] **site web**: Les centrales à capteurs paraboliques [on line] (2008)  
[http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale\\_solaire\\_capteur\\_parabolique](http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_capteur_parabolique)
- [19] **Jean Jacques Bezian**, Arezki Bounaceur, Alain De ryck, Mouna El hafi, Un nouveau concept de centrale solaire thermodynamique base sur un récepteur a lit fluidise. Energ. Ren : 13ème journées internationales de thermique. Publié dans "JITH 2007
- [20] **Alain. Ferrière**, Centrales solaires thermodynamiques, Techniques de l'ingénieur **BE8 903**.
- [21] **site web**: Centrales Solaires Thermiques. [www.outilssolaires.com](http://www.outilssolaires.com) consulté 2012 .
- [22] **site web**: Fonctionnement d'un chauffe-eau à capteur solaire Doc Picbleu  
[www.picbleu.fr](http://www.picbleu.fr) 486 × 396 Search by image le 14/02/2009.
- [23] **Felix. A. P.** et al. "Installation Solaire Thermique", Conceptions et Mise en OEuvre, le Moniteur, Systèmes Solaires, Paris, (2005).
- [24] **A.A.Sfeir, G.Guarracino**, Ingénierie des systèmes solaires, application à l'habitat. Technique et documentation 1981.

**[25]** « **Feuille de route Solaire Thermodynamique** » guide de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (A D E M E) Version finale Juin **2010**.

**[26]** **Jean-Bernard Michel**, Centrales Solaires Thermique à concentration(CSTC) Etat de l'art, le **05.12.2010**