

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Ahmed Draia – ADRAR**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de science de la matière**



**MEMOIRE**  
**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Physique**  
**Filière : Physique énergétique**  
**Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables**

**Intitulé**

---

---

**Stockage de la Chaleur par un Matériau à Changement de Phase, Application au Séchage Solaire**

---

---

**Présenté Par :**

**Melle. BENBEY Ahlam**

**Melle. SALMI Houda**

**Devant le jury:**

**Président: Mr. MENNAD Boufeldja**

**UNIV. Adrar**

**Encadreur: Dr. MEDIANI Ahmed**

**URER-MS. Adrar**

**Examineur: Dr. MAOUEDJ Rachid**

**URER-MS. Adrar**

**Année Universitaire: 2020/2021**



## شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): مدياتي أحمد

المشرف على مذكرة الماستر.

الموسومة بـ: Stockage de la chaleur par un matériau à changement de phase, applications au réchauffe solaire

من إنجاز الطالب(ة): بن باي احلام

و الطالب(ة): سالم هدي

كلية: العلوم والتكنولوجيا

القسم: علوم المادة

التخصص: فيزياء طاقوية وطاقات متجددة

تاريخ تقييم / مناقشة: 06/06/2021

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها. وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والإلكترونية (PDF).

77 جويلية 2021

ادرار في: 02  
القسم: 02



أ. قونني محمد  
مساعد رئيس قسم علوم المادة مكلف بالتدريس والتعليم في التدرج

امضاء المشرف =

A. Mediani

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته



## Résumé

Dans cette étude, nous avons fait fonctionner le séchoir solaire en réalisant le capteur solaire, qui est la partie la plus importante pour fournir la chaleur nécessaire en convertissant la lumière du soleil en chaleur, car le fonctionnement de cette installation reste en présence et en l'absence du soleil. L'une des solutions proposées est le stockage d'énergie en utilisant des matériaux à changement de phase, ce qui est l'objet de notre travail.

Où nous avons simulé le fonctionnement du capteur solaire, en ajoutant une à matériaux à changement de phase sous la forme d'un matelas sous la plaque et en comparant les résultats simulés aux expérimentaux dans chaque cas. Les résultats obtenus ont été très encourageants, notamment dans le domaine du séchage solaire, car cela a permis de stabiliser la température et de prolonger la période de travail d'environ 3 heures après le coucher du soleil.

**Mots clés :** stockage thermique, capteur solaire à air, matériaux à changement de phase, simulation, séchage solaire.

## Abstract

In this study, we made the solar dryer work by realizing the solar collector, which is the most important part to provide the necessary heat by converting sunlight into heat, since the operation of this installation remains in the presence and in the absence of the sun.

One of the solutions proposed is energy storage using phase change materials, which is the subject of our work

.Where we simulated the operation of the solar collector, adding a phase change material in the form of a mattress under the plate and comparing the simulated results to the experiments in each case. The results obtained were very encouraging, especially in the field of solar drying, as this made it possible to stabilize the temperature and extend the working period by about 3 hours after sunset.

**Keywords:** thermal storage, solar air collector, phase change materials, simulation, solar drying.

## المخلص

قمنا في هذه الدراسة بتشغيل مجفف شمسي عن طريق الأداء للاقط الشمسي وهو الجزء الأكثر الأهمية لتوفير الحرارة اللازمة وذلك بتحويل أشعة الشمس الى حرارة حيث تبقى تشغيل هذه التركيب في وجود الشمس وأثناء غيابها , وهذا هو المشكل الأساسي في مجالنا. من بين الحلول المقترحة تخزين الطاقة باستعمال اللاقط الشمسي باستخدام المواد تغيير الحالة وهي محور عملنا.

- حيث قمنا بمحاكاة عمل اللاقط الشمسي تجريبيا بإضافة مادة تغير الحالة على شكل فراش تحت الصفيحة ومقارنة النتائج المحاكاة والتجريبية في كل حالة والنتائج المتحصل عليها كانت جد مشجعة خاصة في مجال تجفيف الشمسي حيث سمحت بتثبيت درجة الحرارة وإطالة مدة العمل حوالي 3 ساعات بعد غياب الشمس.

الكلمات مفتاحية: تخزين الحراري اللاقط الشمسي للهواء مواد تغيير الحالة, محاكاة, تجفيف الشمسي.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَاللَّهُ لَئِن لَّمْ يَؤْمُرْ بِالْعَدْلِ وَالْإِتْقَانِ  
لَأَنقَضِ بَعْضَ الْأُمَمِ كَمَا نَفَخَ فِي الْأُفُوقِ  
السُّمُومَ وَاللَّهُ لَبَدِيدٌ عَلِيمٌ

وَأَن سَعَيْتَ لِي لِيُذَمِّرَ  
إِلَهُي

## Remerciements

### بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

والصلاة والسلام على المبعوث رحمة للعالمين سيدنا وحبيبنا محمد صلى الله عليه وسلم ومن تبعه بإحسان إلى يوم الدين...  
مررت قاطرة البحث بكثير من العوائق ومع ذلك حاولنا أن نتخطاها بفضل من الله واليه ينسب الفضل كله.  
وبعد الحمد لله ...

نقف عند لحظات. تقديرا منا واعترافا بالجميل محتراتان من أي أبواب الثناء سندخل وبأي أبواب القصيدة نعبر وفي  
كل لمسة من وجودكم وأكفكم للمكرامات نسطر  
كنتم كسحابة معطاءها سقوت الأرض واخضرت ...  
إلى هؤلاء الذين مهدوا لنا طريق العلم والمعرفة...

جميع أساتذتنا ودكاترتنا الأفاضل لدى كلية العلوم المادة كلاً باسمه

" كن عالماً فإن لم تستطع فكن متعلماً فإن لم تستطع فأحب العلماء فإن لم تستطع فلا تبغضهم "

وانه ليشرقنا أن نتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى من كان مشرفاً عن هذا العمل الدكتور الحاج مدياني احمد  
الذي كلما طلبنا كمية من وقته الثمين وفره لنا بالرغم من مسؤوليته المتعددة  
كما نتقدم بخالص شكرنا إلى الأستاذ منقار حسين على مجهوداته القيمة وعطائه الوفير الدائم من دون ان ننسى  
الأستاذ الفاضل لوهاني محفل على حسن الإرشاد والتوجيه

كما نشكر أساتذتنا المشرفين على المخبر طيقاني شريفه وجابر عبد الكريم وبالقاسم زهرة

كما نتقدم بخالص عبارات شكرنا التي سعتها ذكرتنا ولم تسعها مذكرتنا إلى كل شخص أفاض لنا من وقته واهتمامه  
في انجاز هذا العمل من قريب أو بعيد

# Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الى الذي عظم لله شأنه ورفع قدره سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم وآله وأصحابه أجمعين عدد ما كان ما يكون وعدد  
الحركات والسكون

لا قيمة للعلم دون أخلاق وهذا المبدأ يجب أن يتحلى به كل طالب علم أو متعلم في تحصين ذاته لقوله صلى الله عليه وسلم  
" انما بعثت لأتمم مكارم الاخلاق "

اهدي ثمرة جهدي الى الوالدين الكريمين اللذان اتعبتهما معي في هذه الرحلة القصيرة ولم يبخل علي بشئ نسال الله ان  
يبارك لنا فيهما كما اسال لهما الرحمة المهداة والجنة

الى من امدني بالنصح والإرشاد ودعا لي بالخير جدي الحاج بوجمعة اطل الله في عمره

الى من تربطني بهم صلة الدم والقرباة اللذان تطلعا لنجاحي بنظرات الامل اخوتي الاعزاء كل واحد باسمه صغيرا وكبيراً اخص  
بالذكر أخي عبد النور و عبد الكريم و يونس

الى القلوب الطاهرة الرقيقة والنفوس البرينة من بوجودهما اكتسب قوة وحبّة لاحدود لها من معرفتكم معكم معنى الحياتي اختي  
المام و آية أخي عبد الوافي

كما اهدي هذا البحث الى من رافقتني منذ ان حملنا حقائب صغيرة ومعها سررت الدرر خطوة بخطوة

اختي نوال وزوجها عبد القادر

اختي أمينة وزوجها مبارك

الى من علمني ان الحياة دون ترابط وحب وتعاون لاتساوي شيئا زوجي الخلق محمد الاخضر

الى رفيقتي العزيزة هدى

AHLAM

أحلام

# Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وإذ تأنن ربكم لنن شكرتم لازيدنكم ولنن كفرتم إن عذابي لشديد صدق الله العظيم  
إلى الذي عظم الله شأنه ورفع قدره سيدنا محمد صل الله عليه وسلم وعلى اله وصحبه عدد ما كان وعدد ما يكون وعدد  
الحركات والسكون..

إلى من بسمتها غايتي و ما تحب أقدامها جنتي إلى من أسكنتني قلبها فغمرتني بحبها أمي حبيبتي بارك الله في عمرها  
إلى من علمني ان الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة إلى الذي لم يبخل عليا بشئ وسعى لأجل راحتي ونجاحي أبي العزيز بارك  
الله في عمره

إلى جدي وجدتي حفظهما الله

إلى من ساندني وخطى معي خطواتي وتحمل الكثير من اجلي ووقوفني في هذا المكان ما كان يحدث لولا تشجيعه المستمر لي  
زوجي الغالي سعيد

إلى فلذة كبدي ونور عيوني ابني حبيبي محمد إسحاق الذي أتمنى له التفوق و النجاح في مستقبله  
إلى من بها أكبر وعليها أتمد إلى شموع مقتده تنير ظلمة حياتي إلى من بوجودها اكتسب قوة ومحبة لا حدود لها إلى من  
عرفت معها معنى الحياة أختي سامية وابنتها نور الصدي

إلى من زينا حياتي بضيائي البدر وشموع الفرخ أختوتي هريفة وابنتها هيثم و محمد و أسامة و يوسف  
من دون ان ننسى اخواتي دليلة ز علاشة و لطيفة

كما اهدي إلى من ساندتني في كتابة هذه المذكرة صديقتي العزيزة أعلام  
إلى أساتذتي وأهل الفضل على الذين حمروني بالحبه والتقدير والنصيحة والإرشاد  
إلى كل عائلة سالمى وسليمانى وبن دريس  
إلى كل من نسبه القلم وحفظه القلب



## Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iv
Nomenclature	v
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : les énergies renouvelables et les différentes conversions</b>	
I.1. Introduction	2
I.2.les énergies renouvelables et les conversions	2
I.2.1. l'énergie solaire	2
I.2.2. l'énergie géothermie	3
I.2.3. l'énergie éolienne	4
I.2.3.1. conversion de l'énergie éolienne	5
I.2.4. l'énergie hydraulique	6
I.2.4.1. conversion de l'énergie hydraulique	6
I.2.5. l'énergie biomasse	7
I.2.5.1. conversion de l'énergie biomasse	7
I.2.6. l'énergie photovoltaïque	8
I.2.6.1. conversion de l'énergie photovoltaïque	9
I.2.7. conversion de l'énergie électromécanique	9
I.3. conclusion	10
<b>Chapitre II : Stockage de l'énergie</b>	
II.1. Introduction	11
II.2. Le stockage thermique de l'énergie	12
II.2.1. Stockage thermochimique (thermodynamique)	12
II.2.2. Stockage thermique sensible	13
II.2.3. Stockage thermique latent	13
II.3. Principes physiques	14
II.3.1. chaleur sensible	14
II.3.2. chaleur latente	14
II.3.2.1. Les matériaux à changement de phase « MCP »	15
II.3.2.1.1. Propriétés des matériaux à changement de phase	16
II.3.2.1.1.1. Critères thermiques (thermodynamiques)	16
II.3.2.1.1.2. Critères physiques	16
II.3.2.1.1.3. Critères cinétiques	17
II.3.2.1.1.4. Critères chimiques	17
II.3.2.1.2. Principe du changement de phase : chaleur latente	17

II.3.2.1.3. Les applications des MCP	18
II.3.2.1.4. Classification des matériaux à changement de phase	18
II.3.2.1.4.1. Matériaux organiques à changement de phase (MOCP)	19
II.3.2.1.4.2. Matériaux inorganiques de changement de phase (MICP)	22
II.3.2.2.Choix des MCP	23
II.4. Différentes formes des matériaux à changement de phase	25
II.4.1.Capsules de diverses géométries	25
II.5. Base théorique des matériaux à changement de phase	25
II.5.1. La cristallisation	26
II.5.2. Les problèmes liés au changement de phase	26
II.6. conclusion	28
<b>Chapitre III : les capteurs thermiques et séchoirs solaires</b>	
III.1.Introduction	29
III.2. Etat de l'art-travaux scientifiques des capteurs Solaires thermiques	29
III.3.Capteur solaire thermique	30
III.3.1 les type des capteurs solaires thermiques	30
III.3.1.1.Capteur plats (vitrés/non vitrés)	30
III.3.1.1.1.Les capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif	31
III.3.1.1.2.Les capteurs plans vitrés	31
III.3.1.2.Les capteurs solaires à tubes	31
III.3.1.3.Les capteurs à tubes sous vide	32
III.3.1.4. Le capteur cylindro-parabolique	32
III.3.1.5. Le capteur parabolique	33
III.3.1.6.Le capteur solaire à air	33
III.3.1.6.1.Composants du capteur solaire à air	34
III.3.1.6.1.1. La couverture transparente	34
III.3.1.6.1.2. L'absorbeur	34
III.3.1.6.1.3. Le fluide caloporteur	34
III.3.1.6.1.4.L'isolant thermique	34
III.3.1.6.1.5.Le cadre	34
III.3.1.6.2.Amélioration des performances du capteur	35
III.3.1.6.2.1. Capteur doté de chicane	35
III.3.1.6.2.2.Influence des chicanes sur la performance d'un capteur solaire à air	36
III.3.1.6.3. Les applications des capteurs solaires plans à air	36
III.3.1.6.4. Simulation numérique d'un capteur solaire à air sans et avec MCP	38
III.3.1.6.4.1. Simulation numérique du capteur solaire à air sans MCP en CN et en CF	38

III.3.1.6.4.1.a Bilan thermique global d'un capteur solaire à air	39
III.3.1.6.5. Propriétés thermo-physiques du capteur solaire à air	39
III.3.1.6.6. Bilan thermique global	40
III.3.1.6.7.1. Capteur solaire à air plan simple	41
III.3.1.6.7.1.a. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques	42
III.3.1.6.7.1.b. Echanges thermiques par rayonnement	42
III.3.1.6.7.1.b.a. Echange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste	42
III.3.1.6.7.1.b.b. Echange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre	43
III.3.1.6.7.1.b.c. Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol	43
III.3.1.6.7.1.c. Echange thermique par conduction	43
III.3.1.6.7.1.d. Echanges thermiques par convection	43
III.3.1.6.7.1.d.a. Echange thermique par convection dû au vent	44
III.3.1.6.7.1.d.b. Echange thermique par convection dû au fluide caloporteur	44
III.3.1.6.8. Calcul des pertes thermiques	44
III.3.1.6.9. Expressions analytiques du bilan énergétique	45
III.3.1.6.9.1. Pour la couche du verre	45
III.3.1.6.9.2. Pour le fluide caloporteur	45
III.3.1.6.9.3. Pour la plaque absorbante	46
III.3.1.6.9.4. Pour l'isolant	46
III.4. Généralités sur le séchage solaire	46
III.4.1. Définition du séchage solaire	46
III.4.2. Types de séchage	47
III.4.2.1 : Le séchage naturel	47
III.4.2.2 : Le séchage artificiel	47
III.4.2.3. Les séchoirs solaires directs (séchoirs-serre)	47
III.4.2.4. Les séchoirs solaires indirects	47
III.4.2.5. Les séchoirs mixtes	49
III.4.2.6. Les séchoirs hybrides	49
III.5. L'air humide	50
III.5.1. Principaux paramètres caractérisant l'air humide:	50
III.5.1.1. L'humidité absolue	50
III.5.1.2. L'humidité relative	51
III.5.2. Températures caractéristiques de l'air humide	51
III.6. Caractéristiques des solides humides	52
III.6.1. Description du solide humide	52
III.6.1.1. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)	52

III.6.1.2. Humidité relative (teneur en eau à base sèche)	53
III.6.2. Caractéristique d'un solide poreux	53
III.6.2.1. Porosité volumique d'un produit	53
III.6.2.1.1. Mesure de l'humidité	54
III.6.2.1.1.1. Hygromètre à cheveux	54
III.6.2.1.1.2. Thermo-hygrographe	54
III.7. Modes de séchage	55
III.7.1. Séchage par conduction	55
III.7.2. Séchage par convection	55
III.7.3. Séchage par rayonnement	56
III.8. Choix du procédé de séchage	56
III.9. Vitesse de séchage	56
III.10. Conclusion	57
<b>Chapitre IV : Les applications</b>	
IV.1.Introduction	58
IV.2. Etude numérique du capteur solaire à air sans MCP en CN	58
IV.2.1. Les données météorologiques	58
IV.3.Etude expérimentale du capteur solaire en convection naturelle	58
IV.3.1. Présentation de banc d'essai du capteur solaire à air étudié sans MCP	58
IV.4. Les instruments de mesure expérimentale	59
IV.4.1.Rayonnement solaire	59
IV.4.2.La température	60
IV.5.Résultats expérimentaux et discussions	61
IV.5.1.Les températures expérimentales du capteur solaire simple à air en CN	63
IV.5.2.Les températures expérimentales du capteur solaire du chicaun à air en CN	63
IV.5.3.Le rayonnement solaire du capteur solaire à air expérimental	64
IV.5.4.Le flux de chaleur utile (puissance utile) expérimental en CN	64
IV.5.5.Rendement expérimental en convection naturelle	65
IV.6.Conclusion	66
Conclusion générale	67
Références bibliographiques	68





***LISTE DES FIGURES***

Figure	Titre	page
<b>Figure I.1</b>	Les énergies renouvelables	02
<b>Figure I.2</b>	L'utilisation directe de l'énergie solaire	03
<b>Figure I.3</b>	fonctionnement de l'énergie géothermie	03
<b>Figure I.4</b>	Eolienne : l'énergie du vent	04
<b>Figure I.5</b>	L'énergie et sa conversion	05
<b>Figure I.6</b>	Centrale hydraulique	06
<b>Figure I.7</b>	Capter la force motrice de l'eau pour produire de l'électricité	06
<b>Figure I.8</b>	transformation la biomasse en énergie	07
<b>Figure I.9</b>	génération et séparation de charge au sein d'une jonction P-N	08
<b>Figure I.10</b>	Transformation de l'énergie solaire en électricité	09
<b>Figure I.11</b>	Transformation de l'énergie électromécanique	10
<b>Figure II.1</b>	Les schémas expliquent de décharge de l'énergie	11
<b>Figure II.2</b>	principales techniques de stockage de l'énergie	12
<b>Figure II.3</b>	chaleur (enthalpie) emmagasinée dans un matériau lors d'un changement de phase solide liquide.	15
<b>Figure II.4</b>	Matériaux à changement de phase $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ et $Mg(OH)_2 \cdot 6H_2O$	16
<b>Figure II.5</b>	Principe du stockage thermique par changement de phase	18
<b>Figure II.6</b>	réceptacles du sang contient un MCP	18
<b>Figure II.7</b>	les pommes contiennent un MCP	18
<b>Figure II.8</b>	classification des MCP	19
<b>Figure II.9</b>	MCP sous forme capsule sphérique et cylindrique	25
<b>Figure II.10</b>	Stockage et le déstockage de chaleur latente	26
<b>Figure II.11</b>	Evolution théorique de Température en fonction du temps	26
<b>Figure II.12</b>	Solidification présentant une surfusion	27
<b>Figure III.1</b>	Capteur plats (vitrés/ non vitrés)	30
<b>Figure.III.2</b>	Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitré	31
<b>Figure.III.3</b>	principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés	31
<b>Figure III.4</b>	Capteur solaire à tube	32
<b>Figure III.5</b>	Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide	32
<b>Figure III.6</b>	Système à réflecteur cylindro-parabolique	33
<b>Figure III.7</b>	Capteur parabolique.	33
<b>Figure III.8</b>	capteur solaire à air.	34

<b>Figure.III.9</b>	Dispositif expérimental	35
<b>Figure III.10</b>	Schéma descriptif des chicanes	36
<b>Figure.III.11</b>	Capteur à air avec les obstacles (chicanes longitudinales).	36
<b>Figure.III.12</b>	Chauffage et climatisation des habitations.	37
<b>Figure.III.13</b>	Séchage solaire.	37
<b>Figure.III.14</b>	Rendement des différents types de capteurs selon l'écart de température (°c). [10]	38
<b>Figure.III.15</b>	Schéma de principe d'un capteur solaire plan	39
<b>Figure.III.16</b>	Différents échanges thermiques dans un capteur à air.	41
<b>Figure.III.17</b>	Schéma électrique des résistances dans un capteur solaire à air	42
<b>Figure.III.18</b>	Séchoir solaire direct simple	47
<b>Figure.III.19</b>	Séchoir solaire direct portatif	47
<b>Figure.III.20</b>	Deux types de séchoirs solaires indirects	48
<b>Figure.III.21</b>	Chambre du séchoir solaire indirect	48
<b>Figure.III.22</b>	Schéma descriptif du séchoir solaire indirect	49
<b>Figure.III.23</b>	Séchoir solaire mixte	49
<b>Figure.III.24</b>	Séchoir solaire hybride	50
<b>Figure.III.25</b>	Description du solide humide	52
<b>Figure.III.26</b>	Volume de contrôle microscopique	54
<b>Figure.III.27</b>	Hygromètre à cheveux.	54
<b>Figure.III.28</b>	Thermo-hygrographe	55
<b>Figure IV.1</b>	Capteur solaire à air étudié sans MCP	57
<b>Figure IV.2</b>	L'acquisition des données les températures (Hydre Fluke)	58
<b>Figure IV.3</b>	Image input module	58
<b>Figure IV.4</b>	Le Pyranomètre mesurant le rayonnement solaire	58
<b>Figure IV.5</b>	L'anémomètre mesurant la vitesse du vent et la température ambiante	59
<b>Figure IV.6</b>	Image du thermocouple de type « J » utilisé	59
<b>Figure IV.7</b>	Schéma expérimentale	60
<b>Figure IV.8</b>	La variation temporelle des températures expérimentales	62
<b>Figure IV.9</b>	La variation temporelle des températures expérimentales	62
<b>Figure IV.10</b>	La variation temporelle de rayonnement solaire expérimentale	63
<b>Figure IV.11</b>	La variation de puissance utile de capteur solaire du simple et	63

	chicaun expérimentale	
<b>Figure IV.12</b>	La variation instantanée du rendement expérimental du capteur chicaun en CN	64
<b>Figure IV.13</b>	La variation instantanée du rendement expérimental du capteur simple en CN	64





***LISTE DES TABLEAUX***

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau II.1</b>	Température de fusion et chaleur latente de fusion de Non-paraffine	21
<b>Tableau II.2</b>	Point de fusion et chaleur latente de fusion des acides gras.	21
<b>Tableau II.3</b>	Caractéristiques de quelques MCP inorganiques [12]	22
<b>Tableau II.4</b>	Propriétés thermiques de certains MCP [14]	23
<b>Tableau II.5</b>	avantages et inconvénients des différents types de MCP [14]	24
<b>Tableau III.1</b>	Propriétés thermo-physiques des différents composants d'un capteur	39
<b>Tableau IV.1</b>	Les différents types de thermocouple et leurs intervalles	59
<b>Tableau IV.2</b>	mesures température d'entrée et sortie du Concentrateur en fonction du temps durant	61



***NOMENCLATURE***

Symboles	Désignation	unité
Ms	Masse sèche du produit	<b>kg</b>
Me	Masse humide du produit	<b>kg</b>
Hr	Humidité relative de l'air	$\square$
Ha	Humidité absolue	$Kg_{\text{eau}} / Kg_{\text{air sec}}$
Ps	Pression de saturation	Pascal
Pa	Pression partielle de l'air sec	pascal
$\Psi$	Degré de saturation	%
R	Constante des gaz parfaits	J/k.mol
hc	Coefficient de transmission par convection	W/m <sup>2</sup> .K
Tp	Température la plus chaude (paroi)	K
T $\infty$	Température la plus froide	K
qr	La quantité d'énergie rayonnée	W
J	flux molaire de l'espèce due à la diffusion	mol/s.m <sup>2</sup>
Cm	concentration molaire en de l'espèce	mol/m <sup>3</sup>
X	fraction molaire de l'espèce	-
P	masse volumique de l'espèce	kg/m <sup>3</sup>
<i>Df</i>	coefficient de La diffusion	m <sup>2</sup> /s
Ms	La masse de produit sec	Kg
dX	L'humidité de produit	%
S	Surface de la paroi absorbante en m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann	w/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup>
M	La masse du matériau de stockage	Kg
$\lambda$	Conductivité thermique	w/m.k
MCP	Matériau à changement de phase	Kg
Mv	La masse d'eau évaporée	Kg
Tpch	Température de plaque (capteur chicaun)	C°
Tps	Température de plaque (capteur simple)	C°
Tvch	Température de vitre (capteur chicaun)	C°
Tvs	Température de vitre (capteur simple)	C°
Tech	Température de fluide entré (capteur chicaun)	C°
Tes	Température de fluide entré (capteur	C°



	simple)	
Tsch	Température de fluide sortie (capteur chicaun)	C°
Tss	Température de fluide sortie (capteur simple)	C°
Tch	Température de chicaun (capteur chicaun)	C°
Tamb	Température ambient	C°
$\dot{m}$	Débit massique	Kg/s
Cp	Chaleur spécifique	J/kg.k°
Gh	Le rayonnement solaire	w/m <sup>2</sup>
Quch	Chaleur utile de capteur chicaun	w
Qus	Chaleur utile de capteur simple	w
$\rho V$		
CSP	Capteur solaire plan	-



*INTRODUCTION  
GENERALE*

### INTRODUCTION

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel non polluant, est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres (soleil surtout pour la chaleur et la lumière), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (géothermie). Sa renouvelabilité dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se régénère.

L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

Le soleil est une source fondamentale aux plusieurs énergies secondaire, et L'énergie solaire peut se convertir en chaleur, destinée au séchage des produits alimentaires à l'aide des capteurs solaires à air; mais Le problème est le rendement du séchoir solaire, qui reste toujours très faible surtout dans la période nocturne (dysfonctionnement total) à cause du coucher du soleil et cela entraîne une diminution de la quantité de chaleur nécessaire pour le fonctionnement du séchoir solaire.

Ce travail a été effectué dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URMER) d'ADRAR chez l'équipe de séchage solaire: en simulant le fonctionnement un capteur solaire, réalisant du capteur solaire à air: simple, à chicanes sans ou avec MCP.

Pour cela, ce mémoire se compose de quatre chapitres,

**Le 1<sup>er</sup> chapitre :** est consacré à la recherche bibliographique sur les énergies renouvelables et conversion

**Le 2<sup>ème</sup> chapitre :** nous nous intéresserons au stockage de l'énergie solaire thermique dans les MCP. Dans la première section nous allons exposer les différentes techniques de stockage thermique, les propriétés des matériaux à changement de phase ainsi que leurs problèmes

**Le 3<sup>ème</sup> chapitre :** consacrera l'état de l'art sur le développement des capteurs solaires et leurs différents types, particulièrement, le capteur solaire à air à chicanes et avec MCP ; et des transferts de chaleurs, bilans thermiques ainsi les rendements des systèmes ; et généralités sur le séchage solaire et ses modes. Ensuite, nous citons quelques applications des systèmes solaires avec MCP, utilisés pour le chauffage de l'eau et de l'air.

**Le 4<sup>ème</sup> chapitre :** l'étude expérimentale et simulation du capteur solaire plan à air ; et la discussion des résultats résumant le chapitre.

En fin, une conclusion générale et suggestions complémentaires pour ce travail.



*CHAPITRE I : LES ENERGIES  
RENOUVELABLES ET LES  
DIFFERENTES CONVERSIONS*

## I.1 Introduction :

Énergie renouvelable : Les énergies renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme, car issue directement de phénomènes naturels , réguliers ou constants ,liés à l'énergie du soleil , de la terre ou de la gravitation . Les énergies renouvelables sont également plus «propres» (moins d'émission de CO<sub>2</sub>, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles. Les principales énergies renouvelables sont :

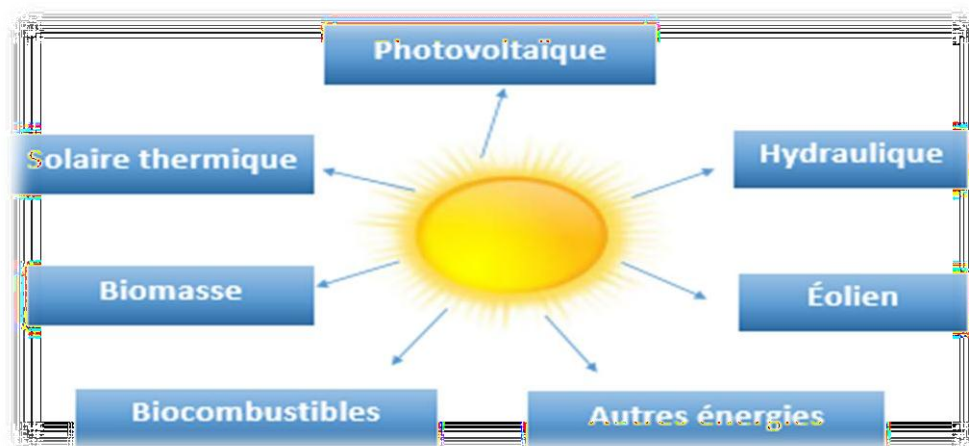


Figure I. 1. Les énergies renouvelables

## I.2 les énergies renouvelables :

### I.2.1 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil. Sur la Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires. [1]

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- a. **Le solaire photovoltaïque** : Qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité.
- b. **Le solaire thermique** : Qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se

différence en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité. De nombreux programmes de recherche sont en cours afin d'améliorer les rendements des nouvelles technologies d'exploitation de l'énergie solaire.

[2]

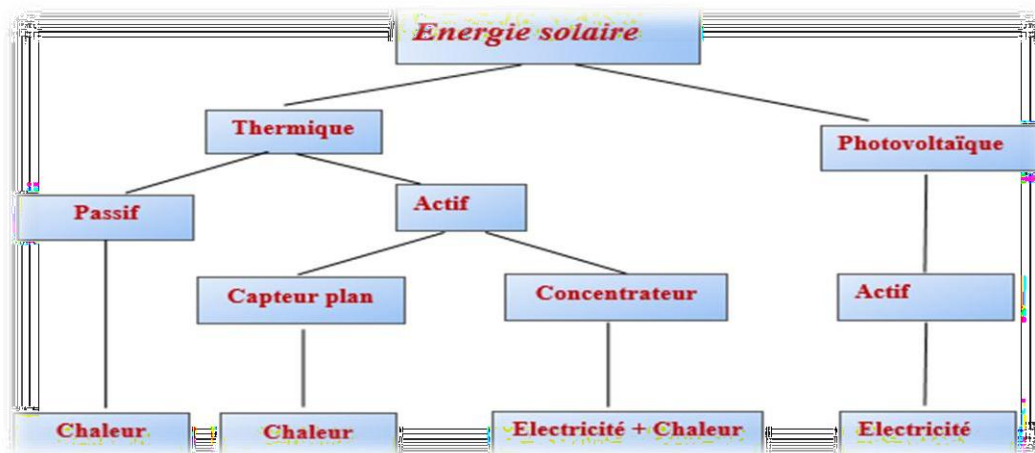


Figure I.2. L'utilisation directe de l'énergie solaire

### I.2.2. L'énergie Géothermie

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur

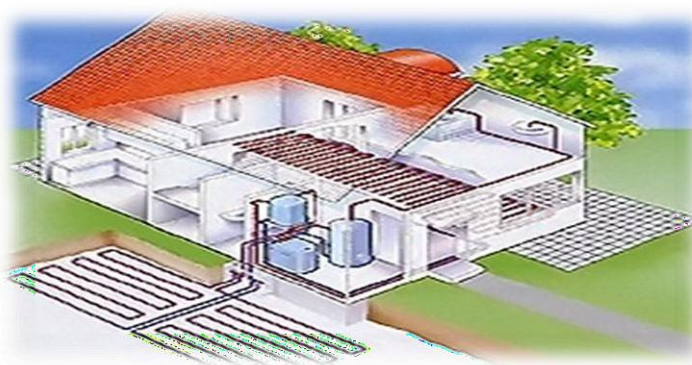


Figure I.3. Fonctionnement de l'énergie géothermie

**Le principe :** On utilise un réseau de tubes, enterrés sous la surface du sol, dans les quels circule un liquide spécial, appelé "fluide caloporteur". Celui-ci capte l'énergie sous forme de calories et la véhicule vers l'intérieur de la maison, jusqu'à la pompe à chaleur (PAC).

**Les avantages:**

- La compétence écologique : c'est un système respectueux de l'environnement car il n'émet que peu de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchet
- C'est une énergie renouvelable
- Le mode de fonctionnement ne nécessite pas de stockage
- Le rendement est bon
- La qualité de chauffage est excellente

**Les inconvénients:**

L'inconvénient capital d'un tel système repose bien entendu sur le prix pour sa mise en place. Plus, il est aussi obligatoire de devoir posséder un terrain plus ou moins grand selon le type de forage à effectuer

**I.2. 3.L'énergie éolienne**

Une éolienne est une machine qui convertit l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique.



Figure I.4.Éolienne : l'énergie du vent



**Principe :** Une éolienne est constituée d'un mât de 50 à 100 m de haut. A son sommet se trouve une nacelle équipée d'un rotor à axe horizontal, lui-même équipé de trois pales mise en rotation par le vent. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. L'énergie mécanique ainsi produite est transformée en énergie électrique dans la nacelle grâce à une génératrice discoïde (Phénomène d'induction) qui délivre un courant alternatif de 690 volts dont l'intensité varie avec la vitesse

\*Elle représente une infime production d'électricité par rapport aux autres moyens tels que la centrale

### I.2.3.1. Conversion énergie éolienne

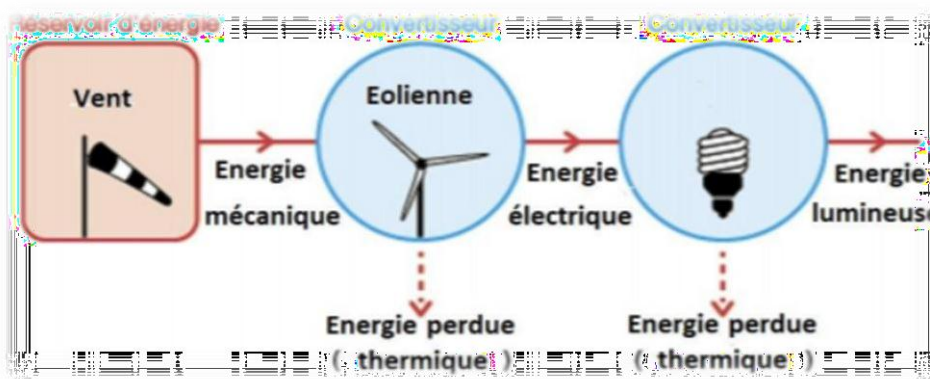


Figure I.5. L'énergie et ses conversions [3]

#### Les avantages

- source facile pour générer de l'électricité.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite.
- C'est une source d'énergie locale permettant de minimiser l'impact négatif sur l'atmosphère.
- les pertes en ligne transportées vers les lieux généralement très proches.

#### Les inconvénients

- Dommages causés à la faune et en particulier aux oiseaux.
- Les éoliennes sont gênantes lorsque le bruit est généré et le bruit émis par le moteur est compensé.
- L'énergie éolienne n'est pas constante, ce qui signifie que les éoliennes ne produisent pas la même quantité d'électricité tout le temps.

### I.2.4. L'énergie hydraulique :

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie Mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.



Figure I.6. Centrale hydraulique

#### I.2.4.1. Conversion énergie hydraulique

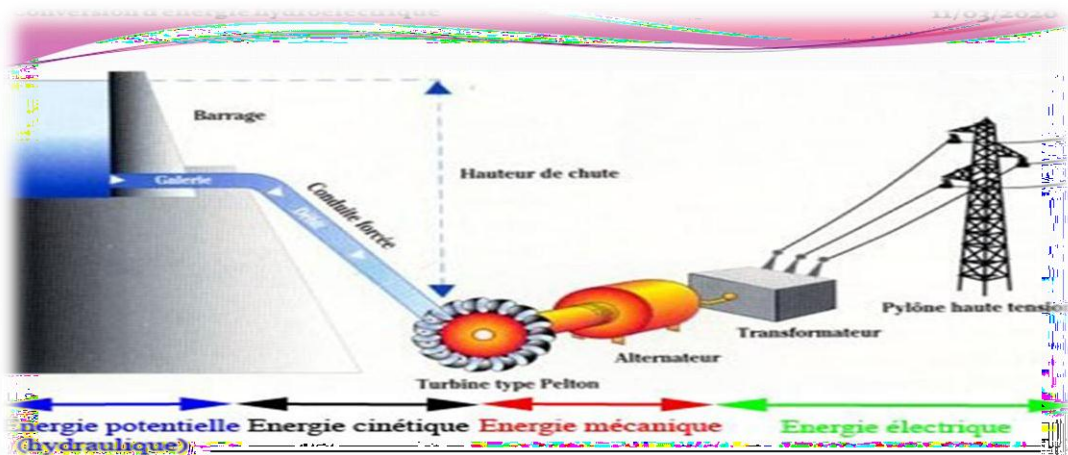


Figure I.7: capter la force motrice de l'eau pour produire de l'électricité

**Les avantages**

- Energie renouvelable et propre.
- Un excellent moyen de lutter contre le changement climatique tout en favorisant le développement durable.
- Le cout d'exploitation est faible.

**Les inconvénients**

- Les cours d'eau les plus intéressants sont déjà exploités.
- On se dispute l'eau pas seulement pour produire de l'électricité.

**I.2.5. énergie biomasse**

C'est l'ensemble de la matière organique [5] stockée par la lumière de soleil, qui la convertit en énergie, et elle est d'origine végétale ou animale. [4]

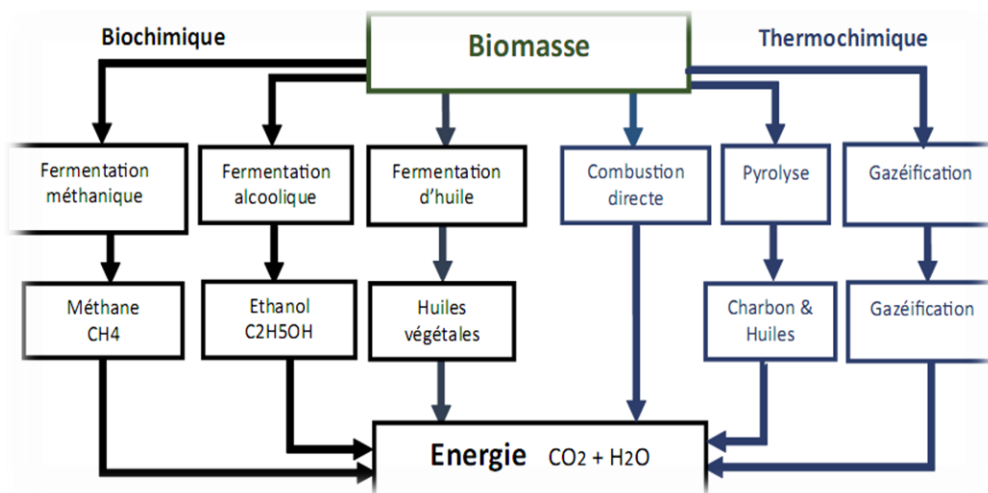
**I.2.5.1. Conversion de l'énergie biomasse**

Figure I.8. Transformation la biomasse en énergie. [8]

**Les avantages**

- Traitement et à la destruction des déchets organiques.
- Une bonne alternative au pétrole
- La biomasse peut être convertie en différentes formes d'énergie.
- Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle

### Les inconvénients

- La production de biocarburant a un prix conséquent. En plus elle n'est pas encore totalement développée
- Pour produire de la biomasse il faut des terres agricoles.
- Leur rendement énergétique est assez faible.
- La biomasse peut être polluante si elle est mal utilisée

### I.2.6. L'énergie solaire photovoltaïque :

Est la transformation directe de la lumière en électricité à l'échelle atomique. Certains matériaux se caractérisent par une propriété connue sous le nom d'effet photoélectrique qui leur fait absorber les photons de la lumière et libérer des électrons. Lorsque ces électrons libres sont capturés, il en résulte un courant électrique qui peut être utilisé comme de l'électricité. [6]

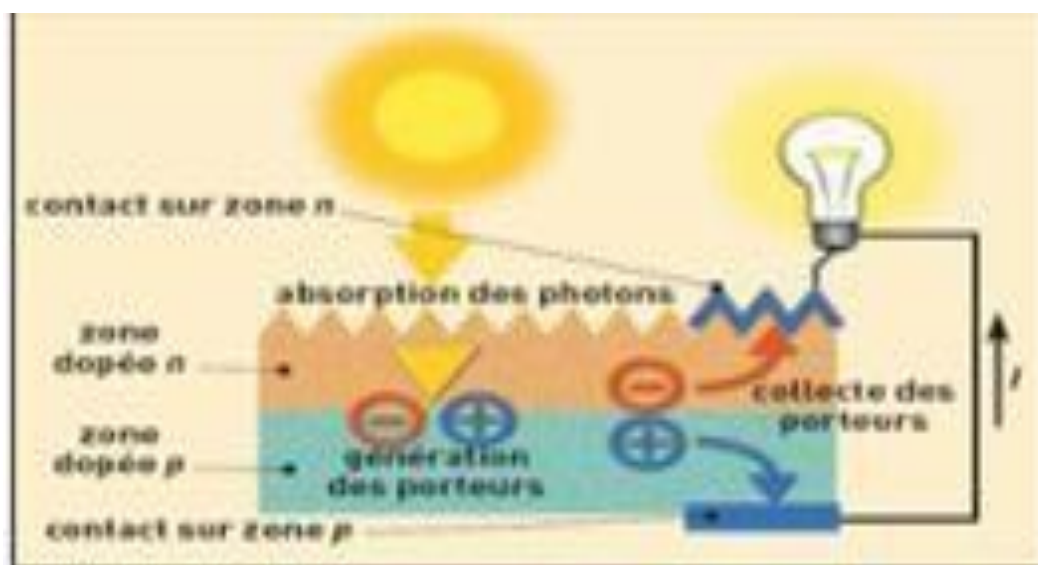


Figure I.9. Génération et séparation de charge au sein d'une jonction P-N [7]

### I.2.6.1. la conversion de l'énergie photovoltaïque

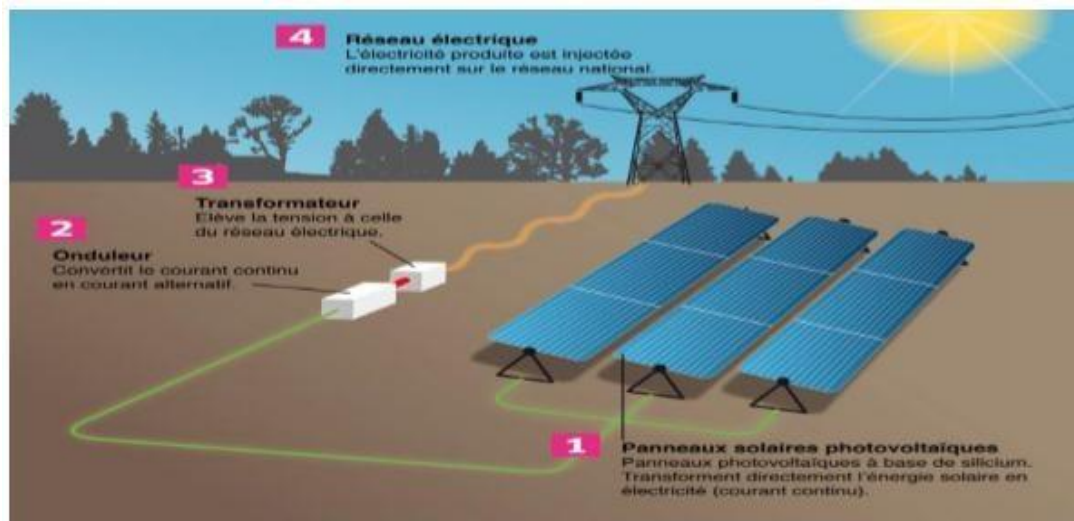


Figure I.10. Transformation de l'énergie solaire en électricité

#### Les avantages

- Leurs couts de fonctionnement sont très faibles
- aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux.

#### Les inconvénientsPv.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un cout élevé
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin et de 28%)
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée

**I.2.7. Conversion électromécanique** Le convertisseur électromécanique: est un dispositif au sein duquel il existe des interactions locales entre des phénomènes électrique et des phénomènes mécaniques.

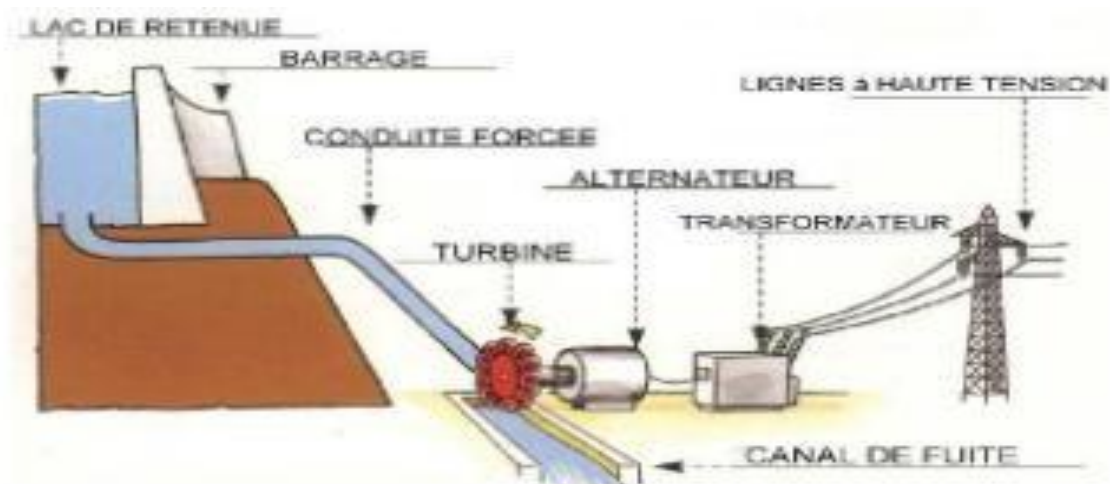


Figure I.11. Transformation de l'énergie électromécanique

### I.3. Conclusion:

Nous concluons que les énergies renouvelables et leurs transformations sont ce qui nous fournit de l'énergie et de la chaleur dans notre vie quotidienne, et c'est la solution idéale pour l'avenir.



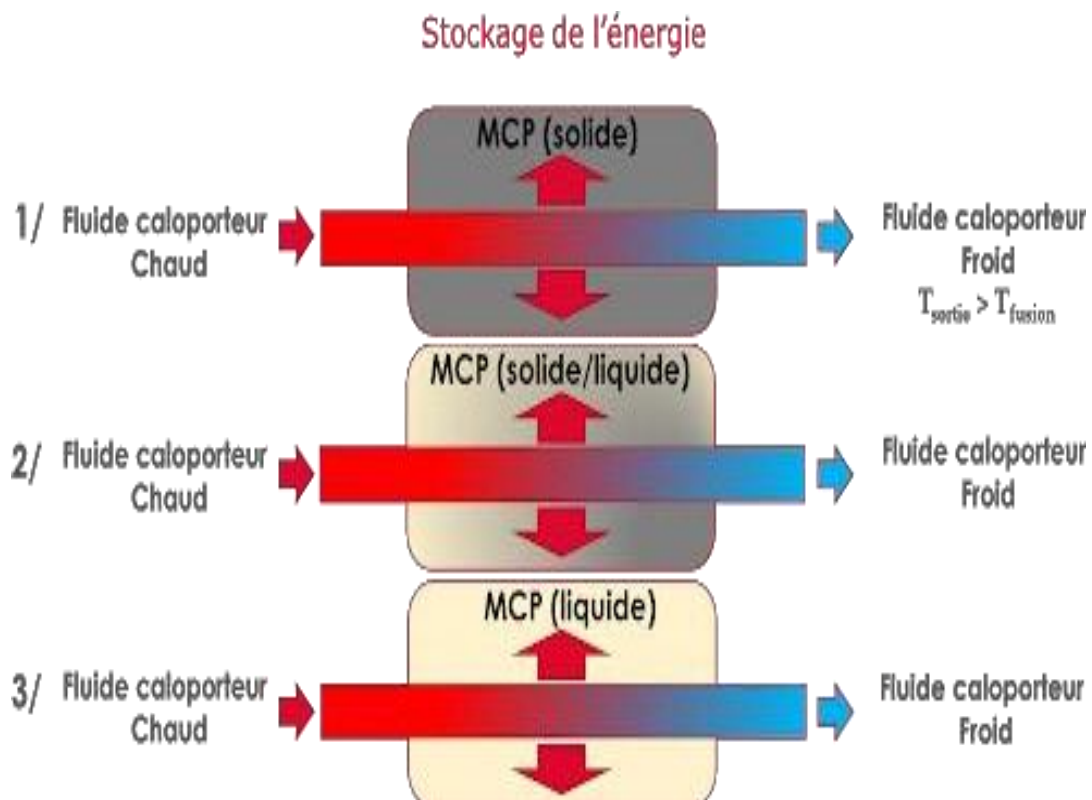
*CHAPITRE II :*  
*STOCKAGE DE L'ENERGIE*



## II.1. Introduction

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agit d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Le stockage thermique peut se faire de deux manières : le stockage thermique sensible et le stockage thermique latent.

**.Par définition** « stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère » (Dumas, 2002). Le stockage de l'énergie solaire peut se faire sous forme : électrique (piles photovoltaïques), thermochimique (procédé de sorption) et thermique (chaleur sensible, chaleur latente). Les modes de stockage électrique et thermochimique ne font pas parti de notre étude ; ils ne seront pas décrits dans ce rapport. Cependant, le stockage thermochimique est très brièvement expliqué à la fin de notre étude



**Figure II.1 : les schémas expliquent de décharge de l'énergie**

pour établir la relation avec les deux autres modes de stockages, c'est-à-dire stockage par chaleur sensible et par chaleur latent

**II.2. Le stockage thermique de l'énergie :** L'énergie thermique est la somme de l'énergie potentielle et des énergies cinétiques des atomes et des molécules qui composent la substance. À la suite de vibrations atomiques et moléculaires, l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie. Essentiellement trois modes de stockage solaire thermique peuvent être envisagés représentés sur la figure II.2 :

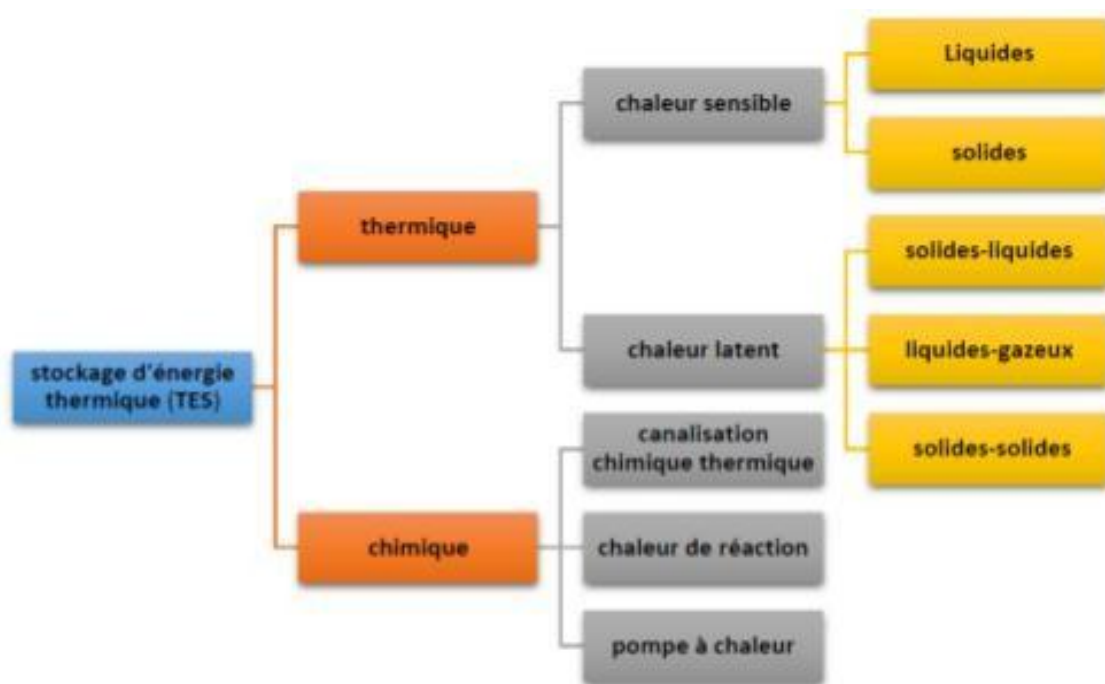


Figure II.2. Principales techniques de stockage de l'énergie [9]

### II.2.1. Stockage thermochimique (thermodynamique)

Le stockage thermochimique, basé sur des réactions chimiques, est une manière de stocker de la chaleur et de la transporter sur de longues distances. L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie, des liaisons des composés chimiques, mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles. Dans ce système, la capacité de stockage de la chaleur est généralement élevée et se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique

réversible. Le stockage thermochimique reste encore au stade de développement mais il se présente déjà comme l'un des nouveaux relais du domaine énergétique

### II.2.2. Stockage thermique sensible

Dans le cas du stockage par chaleur sensible l'énergie est stockée sous forme d'une élévation de température du matériau. L'énergie est emmagasinée sous la forme d'une élévation de température du matériau de stockage au sein d'un système fermé au sens thermodynamique, c'est-à-dire sans échange avec le milieu extérieur. [21], L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique donné par l'équation

$$Q_{\text{stockée}} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{II.1})$$

La quantité d'énergie stockée est donc proportionnelle à la masse, à la capacité calorifique et à la différence de températures entre l'entrée et la sortie du matériau de stockage. Les matériaux de stockage par chaleur sensible se divisent en deux catégories: les liquides, comme l'eau, l'huile, les sels fondus etc., et les solides, tels que la pierre, la brique, le sable etc. De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur du Bâtiment. [23]

### II.2.3. Stockage thermique latent

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière. La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules, mais par une augmentation de leurs énergies potentielles leur permettant de quitter leurs positions d'équilibre. C'est emmagasiné grâce à la Transformation d'état d'un matériau de stockage (solide-liquide). La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes, Par exemple dans le cas de l'eau, 80 fois plus d'énergie est nécessaire pour faire fondre 1 kg de glace pour élever la température de 1 kg d'eau de 1 ° C.[23] La quantité d'énergie thermique stockée via le changement d'état s'exprime par la relation suivante :

$$Q_{\text{latente}} = m \cdot L \quad (\text{II.2})$$

Les principaux avantages du stockage par chaleur latente par rapport au stockage par chaleur sensible sont :

- l'aspect statique de la température de solidification ou de fusion lors du stockage ou du déstockage de la chaleur latente,
- l'existence d'une large gamme de matériaux avec différentes températures de fusion,

- l'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) pour le stockage par chaleur latente évite les problèmes de surchauffe,
- la capacité de stockage de la chaleur latente,  $L_F$ , est beaucoup plus importante que celle de la chaleur sensible.

### **II.3. Principes physiques :**

Il existe plusieurs voies de stockage de l'énergie thermique parmi lesquelles on trouve l'utilisation de la chaleur sensible et/ ou de la chaleur latent des matériaux. La sélection étant fonction de la durée de stockage souhaitée, de la puissance et de la température désirées ainsi que des objectifs technico-économiques ciblés.[8]

#### **II.3.1. Chaleur sensible :**

est la façon la plus ancienne de stocker l'énergie. Le principe repose sur la chaleur (ou le froid) emmagasinée par un matériau lors d'une variation de température et qui peut être restituée ultérieurement.

Les caractéristiques attendues d'un matériau de stockage par chaleur sensible sont : la stabilité des propriétés thermiques au cours des cycles de charge et de décharge, la stabilité chimique, la résistance à la corrosion, la non-toxicité et enfin l'incombustibilité.

Le matériau (ou milieu) dans lequel le stockage est réalisé peut être le béton, le sol ou l'eau... autrement dit, tout matériau, dont la densité et la chaleur spécifique sont élevées. Ces matériaux présentent tous un faible cout, sont ignifuges et non corrosifs, sont stables thermiquement à long terme et n'ont pas d'impact sur l'environnement.[41]

#### **II.3.2. Chaleur latente :**

Est basée sur le changement d'état de la matière (figure II.3). La transition la plus fréquemment utilisée est la transition solide-liquide dont la variation volumique est faible.

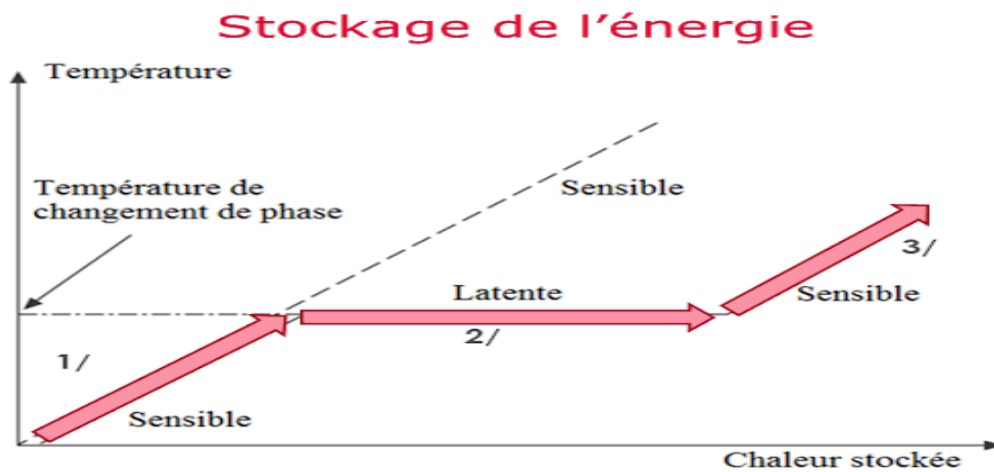


Figure II.3. Chaleur (enthalpie) emmagasinée dans un matériau lors d'un changement de phase solide liquide [41]

La chaleur nécessaire pour obtenir un changement d'état à température constante ; est très importante par rapport à celle nécessaire pour augmenter la température et stocker de la chaleur sensible. En considérant l'eau, il faut fournir 83 calories pour obtenir le changement d'état, autant que pour monter ensuite l'eau de 0°C à 83°C. Il est donc intéressant de stocker l'énergie sous forme de chaleur latente, qui permet d'atteindre la disponibilité de grandes quantités de chaleur avec des variations de température faibles.[41]

### II.3.2.1. Les matériaux à changement de phase « MCP »

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux de stockage de chaleur «latente». [23], L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse).[19], bonne adaptation avec sous-refroidissement minimum et être chimiquement stable, de faible coût, non toxique et non corrosif.[23] Les MCP doivent avoir une grande chaleur latente et une conductivité thermique élevée et une température de fusion comprise entre pratique de l'exploitation, par exemple les sels hydratés, les cires de paraffine, les acides gras et les eutectiques de composés organiques et non organiques. [21]



**Figure II.4. Matériaux à changement de phase  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [22]**

### II.3.2.1.1. Propriétés des matériaux à changement de phase

Le transfert d'énergie thermique se produit quand le matériau change son état physique de l'état solide à l'état liquide, ou liquide à solide. On appelle cela un changement d'état, ou "Phase". Les MCP absorbent et libèrent de la chaleur à une température presque constante. Ils stockent 5-14 fois plus de chaleur par unité de volume que les matériaux de stockage sensibles tels que l'eau.[19] Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température qui varie de 0 °C à 120 °C. Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères.[21].

#### II.3.2.1.1.1. Critères thermiques (thermodynamiques)

- Le MCP doit avoir : Température de fusion dans la gamme de température souhaitée.
- Une chaleur latente élevée.
- Une chaleur spécifique, densité massique et capacité calorifique élevée. [41]
- Une conductivité thermique élevée pour faciliter la charge et la décharge d'énergie stockée.[21]
- bonnes caractéristiques de congruence de la fusion
- des densités solides et liquides proches.

Toutes ses caractéristiques vont dans le sens de l'efficacité, de la simplicité, et de la durabilité des installations.[41]

#### II.3.2.1.1.2. Critères physiques

Physiquement, le MCP présente un équilibre de phase favorable et une haute densité. Le phénomène de CP s'accompagne d'un changement de volume et est caractérisé par une basse

pression de vapeur. La stabilité de phase pendant la fusion/solidification est importante concernant le stockage de la chaleur.

- Absence de décomposition et de corrosion.[41]

#### II.3.2.1.1.3. Critères cinétiques

La surgélation a un aspect handicapant pour le développement des MCP, en particulier pour les sels hydratés de. La surgélation de plus de quelques degrés interagit avec la chaleur appropriée. Ainsi, une surgélation de 5 °C à 10 °C peut empêcher entièrement l'extraction du stockage d'énergie.[21]

#### II.3.2.1.1.4. Critères chimiques

Le MCP peut souffrir de la dégradation par la perte de l'eau d'hydratation, de décomposition chimique ou d'incompatibilité avec les matériaux des contenants. Les MCP doit montrer :

- Une stabilité chimique.
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable.
- Aucune action corrosive sur les matériaux de constructions ou sur leur contenant Aussi le matériau ne doit pas être nocif; il doit être non toxiques, inflammable et inertes (non explosif).[21]

#### II.3.2.1.2.Principe du changement de phase : chaleur latente

Tout matériau à changement de phase, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou céder de l'énergie sous forme de chaleur. le transfert thermique par chaleur latente (CL) : dans ce cas, le matériau peut stocker ou céder de l'énergie par simple changement d'état, tout en conservant une température constante, celle du changement d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CL échangée par un matériau est la chaleur latente de changement de phase notée  $L_f$  (f pour fusion) pour un changement de phase liquide/solide, en J/kg.[13]



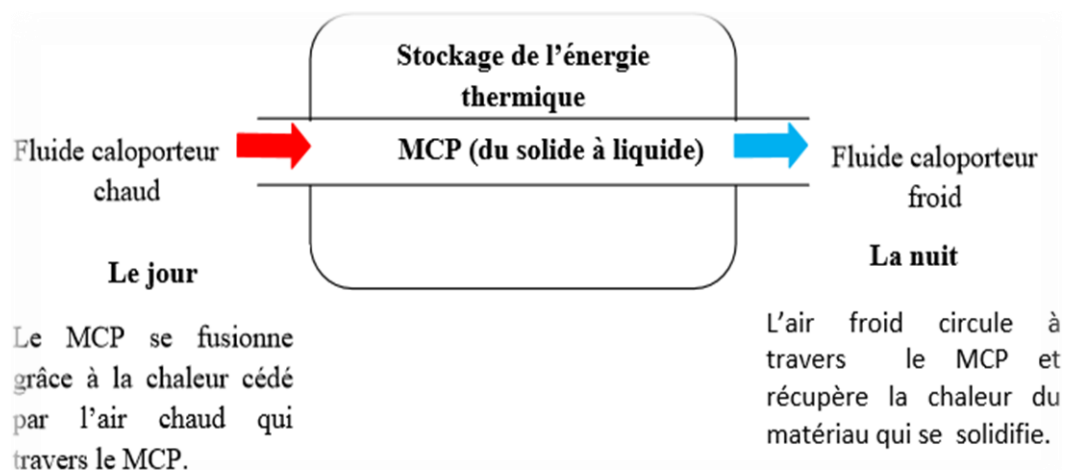


Figure II.5.Principe du stockage thermique par changement de phase [12]

### II.3.2.1.3. Les applications des MCP

#### ❖ Le transport de produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles, par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à



Figure II.6.Récipients du sang contient un MCP. [18]



Figure II.7. Les pommes contiennent un MCP [25]

### II.3.2.1.4. Classification des matériaux à changement de phase

Il y a un grand nombre de substances chimiques qui peuvent être identifiées comme MCP de point de vue de leurs températures de fusion et de leurs chaleurs latentes de fusion. Cependant, excepté le point de fusion se situant dans la plage de température de

fonctionnement souhaitée, une majorité de ces substances ne répondent pas aux autres critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur.

Sharma et al. (2009) ont présenté quelques caractéristiques des principaux MCP commercialisés [12]. Ces substances sont différentes par leurs propriétés thermo-physiques : température de fusion, chaleur de fusion, conductivité thermique et masse volumique.

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories (Figure II.8) :

- les composés organiques : paraffines, corps non-paraffinés et polyalcools,
- les composés inorganiques : hydrates salins, sels, métaux et alliages,
- les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.



Figure II.8. Classification des MCP. [21]

#### **II.3.2.1.4.1. Matériaux organiques à changement de phase (MOCP)**

Des matériaux organiques sont encore décrits comme "paraffine" et "non paraffine". Les matériaux organiques incluent la fusion conforme (fusion et solidification à plusieurs reprises sans ségrégation de phase et sans dégradation consécutive de leur chaleur latente de fusion) alors que l'auto nucléation signifie qu'ils se cristallisent avec peu ou pas de surgélation.

##### **❖ Paraffine**

Les solides "paraffine" se composent la plupart du temps d'un mélange d'alcane de chaîne droite  $n\text{CH}_3-(\text{CH}_2) -\text{CH}_3$ . La cristallisation de la chaîne  $(\text{CH}_2)$  se fait avec dégagement d'une grande quantité de la chaleur latente. Le point de fusion et la chaleur latente de fusion augmentent avec la longueur de la chaîne. Ceci est dû à leur disponibilité dans une

température ambiante étendue. La paraffine est employée comme MCP dans les systèmes de stockage de chaleur latente car elle est fiable, prévisible, bon marché et non-corrosive. Elle montre peu de changement de volume lorsqu'elle fond et a une basse pression de vapeur. Elle présente une fusion conforme et de bonne propriété de nucléation. Pour ces propriétés, les systèmes utilisant la paraffine ont habituellement un très long cycle de fusion/solidification. Cependant, elle montre certaines propriétés indésirables. En effet, elle a une basse conductivité thermique, elle est non compatible avec les contenants ou récipients en plastique et elle est modérément inflammable. Ces effets indésirables peuvent être partiellement éliminés en modifiant légèrement le produit et l'unité de stockage.

### ❖ Non-paraffine

Les "non-paraffines organiques" sont les matériaux à changement de phase les plus nombreux mais avec des propriétés fortement diverses. Chacun de ces matériaux a ses propres propriétés à la différence des paraffines qui ont des propriétés très semblables.

Buddhi et Sawhney (1994) ont conduit une étude sur des matériaux organiques et ont identifié un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcool et de glycol appropriés au stockage de l'énergie [13]. Certains de ces matériaux organiques sont des acides gras et d'autres des non-paraffines organiques. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient pas être exposés excessivement à des hautes températures, aux flammes ou à un oxydant. Quelques non-paraffines.

Les acides gras ont des valeurs élevées de chaleur de fusion et sont comparables à celles des paraffines. Les acides gras montrent également la fonte reproductible et le comportement de solidification sans surgélation [12].

La formule générale décrivant tous les acides gras est  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{-COOH}$  et par conséquent ils sont qualifiés en tant que bon MCP. Leur inconvénient majeur est leur coût, qui est de 2 à 3 fois plus grand que celui de la paraffine de catégorie technique. Ils sont également des corrosifs doux. Quelques acides gras intéressants sont regroupés dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Température de fusion et chaleur latente de fusion de Non- paraffine

Matériaux	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
D- acide de Lactic	26	184
Palmitate méthylique	29	205
Camphenilone	39	205
Bromure de Docasyl	40	201
Caprylone	40	259
Heptadecanone	41	201
1 –cyclohexyloctadecane	41	218
4 –Heptadecanone	41	197
Cyanamide	44	209
Eicosanate méthylique	45	230
3 –Heptadecanone	48	218
2 –Heptadecanone	48	218
9 –Heptadecanone	51	213
Behenate méthylique	52	234
Acide hypophosphorique	55	213
Trimyristin	33 – 57	201 – 213
Acide de Heptaudecanoic	60.6	189
Cire d'abeille	61.8	177
Quinone	115	171
Acétanilide	118.9	222

Tableau II.2. Point de fusion et chaleur latente de fusion des acides gras

Matériaux	Formule chimique	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Acide acétique	CH <sub>3</sub> COOH	16.7	184
Polyéthylène glycol600	H(OC <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> OH	20 – 25	146
Acide d'Eladic	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> COOH	47	218
Acide laurique	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	49	178

<b>Tristéarine</b>	$(C_{17}H_{35}COO)C_3H_5$	56	191
<b>Acide myristique</b>	$CH_3(CH_2)_{12}COOH$	58	199
<b>Acide de Palmatic</b>	$CH_3(CH_2)_{14}COOH$	55	163
<b>Acide stéarique</b>	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	69.4	199
<b>Acétamide</b>	$CH_3 CONH$	81	241
<b>Fumarate méthylique</b>	$(CHCO_2 NH_3)_2$	102	242

#### II.3.2.1.4.2. Matériaux inorganiques de changement de phase (MICP)

Parmi ces composés, on distingue les sels hydratés de et les matériaux métalliques. Seuls les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation en tant que MCP.

##### ❖ Sels hydratés

Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau. Ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes, des bonnes conductivités thermiques et des prix bas. En revanche, leur principal défaut concerne leur tendance à la surfusion. Pendant la fusion et la solidification, il y a précipitation d'autres phases qui ne participent pas au prochain processus de la charge et de la décharge.

##### ❖ Matériaux métalliques

Cette catégorie inclut les métaux avec une basse température de fusion et les eutectiques métalliques. Ces métalliques n'ont pas encore été sérieusement considérés pour la technologie de MCP en raison des pénalités de poids. Cependant, quand le volume est une considération, ils sont les matériaux d'avenir en raison de la chaleur de fusion élevée par volume unitaire. Leurs conductivités thermiques sont aussi élevées.

**Tableau II.3. Caractéristiques de quelques MCP inorganiques [23]**

Type de substance	composé	Température de fusion °C	$\Delta H_{\text{fusion}}$ KJ/Kg	Conductivité thermique $\kappa_{\text{liq}}$	Densité $\rho_{\text{liq}}$
Substan	H <sub>2</sub> O	0	333	0.612 liq.20°C	998 liq.20°C 917 sol.0°C
	CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	29	190.8	0.540 liq.38.7°C	1562 liq.32°C

ces inorgani ques				1.088 sol.23°C	1802 sol.24°C
	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	89	162.8	0.490 liq.95°C	1550 liq.94°C
	O			0.611 sol.37°C	1636 sol.25°C
	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	117	168.6	0.570 liq.120°C 0.694 sol.90°C	1450 liq.120°C 1569 sol.20°C

### ❖ Matériaux eutectiques

Les Eutectiques sont un mélange de sels possédant une température de fusion constante pour une valeur particulière de concentration. Ils peuvent être des alliages de matériaux : organique-organique, organique-inorganique et inorganique-inorganique.

**Tableau II.4. Propriétés thermiques de certains MCP [24]**

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
MCP organiques	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique	21	143
MCP Eutectiques	66.6% CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O + 33.3% MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	25	127
	48% CaCl <sub>2</sub> + 4,3% NaCl + 47,3% H <sub>2</sub> O	26.8	188
	47% (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O + 53% (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	30	136

### II.3.2.2. Choix des MCP

Pour une application particulière, la température appropriée de chauffage ou de refroidissement devrait être convenable à la température de transition du MCP. La chaleur latente devrait être aussi élevée que possible, particulièrement sur une base volumétrique, pour réduire au minimum la taille physique du stockage de chaleur. Une Conductivité thermique élevée aiderait le remplissage et la décharge du stockage d'énergie.

Le Tableau II.5 regroupe les avantages et les inconvénients des types de MCP [12, 14, 15 et 23].

Tableau II.5. Avantages et inconvénients des différents types de MCP [24]

	Avantages	Inconvénients
<b>Organique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La surfusion est négligeable.</li> <li>-Systèmes de stockage de chaleur</li> <li>-Pas de ségrégation de phase.</li> <li>-bonne stabilité dans le temps</li> <li>-Facilité d'utilisation.</li> <li>-Sobriété écologiques.</li> <li>- Peu sensible au cycle de fusion et solidification.</li> <li>-non corrosif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible conductivité thermique (0.18-0.25 w/m.k).</li> <li>-Dilatation volumique élevée.</li> <li>-Inflammables.</li> <li>- Chaleur spécifique massique faible,</li> <li>- Masse volumique plus faible (0,7 à 1,2 kg/m<sup>3</sup>).</li> <li>- Chaleur latente peu élevée (150 à 180 kJ/m<sup>3</sup>),</li> </ul>
<b>Inorganique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disponibilité.</li> <li>-Grande chaleur de fusion.</li> <li>- Meilleure conductivité thermique (0,5 à 0,7 W/m.K</li> <li>-Faible dilatation volumique.</li> <li>-Bon marché.</li> <li>-inflammable.</li> <li>-non corrosif</li> <li>-matériau nature</li> <li>- Prix plus faible</li> <li>- Chaleur latente élevée (250 à 400 kJ/m<sup>3</sup>),</li> <li>- Chaleur spécifique massique plus élevée,</li> <li>- Masse plus élevée (1 à 2 g/m<sup>3</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. - Phénomène de surfusion (15 à 30 K).</li> <li>-La corrosivité.</li> <li>-Perte d'efficacité liée aux fusions / Solidification</li> <li>-Déshydrations liée aux cycles thermiques</li> <li>- Corrosif,</li> <li>- Vieillesse rapide,</li> <li>- Chaleur latente peu élevée (150 à 1-80 kJ/m<sup>3</sup>),</li> <li>- Faible conductivité thermique (0,15 W/m.K),</li> <li>- Masse volumique plus faible (0,7 à 1 kg/m<sup>3</sup>),</li> <li>-Chaleur massique spécifique faible,</li> <li>- Prix plus élevé que celui des paraffines et des sels hydratés</li> </ul>



## II.4. Différentes formes des matériaux à changement de phase

Il doit avoir un échange de chaleur efficace entre le MCP et le fluide caloporteur afin d'avoir un grand aller-retour pour l'efficacité du stockage d'énergie. Par conséquent, les MCP sont généralement contenus tels que la surface de transfert de chaleur ou le coefficient de transfert de chaleur par convection soit élevée entre Pack MCP et le fluide caloporteur. Les récipients de MCP peuvent être sous différentes formes : tube, cylindrique, rectangulaire, que le fluide caloporteur peut circuler autour. [16]

### II.4.1. Capsules de diverses géométries

Capsule est un dispositif où les MCP sont enfermés dans des coquilles de petites tailles prenant différentes formes. L'avantage de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange. Macro-encapsulation moyens de remplissage du MCP dans une enceinte macroscopique qui correspond à des quantités allant de quelques millilitres à plusieurs litres. Ce sont souvent des conteneurs et des sacs en plastique ou en métal, comme le montre quelques exemples de la (figure II.14) L'avantage de la macro-encapsulation est que la possibilité de demander à la fois liquide et l'air comme fluides de transfert de chaleur et plus facile à transporter et à manipuler [18].

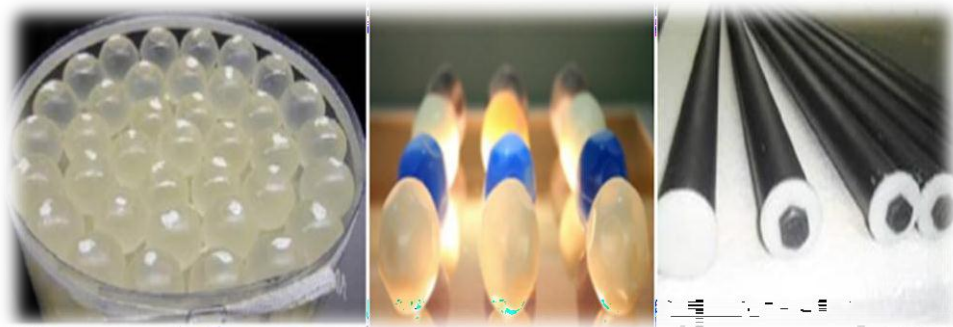


Figure II. 9. MCP sous forme capsule sphérique et cylindrique.[17]

## II.5. Base théorique des matériaux à changement de phase

### ❖ Température de fusion

C'est une des caractéristiques essentielle du matériau ; Elle représente la limite à laquelle se déclenche le stockage ou le déstockage de chaleur latente.[20] Le schéma ci après en est une représentation :



Figure II.10. Stockage et le déstockage de chaleur latente. [20]

### II.5.1. La cristallisation

Le changement de phase liquide /solide permet d'obtenir un solide cristallisé à partir de solutions aqueuses : c'est la cristallisation. L'état cristallin ainsi obtenu est caractérisé par un arrangement régulier des atomes, des molécules ou des ions suivant un modèle rigide appelé réseau. C'est arrangement moléculaire qui fait la différence entre un solide amorphe (solide sans structure régulière).[20] La cristallisation est le résultat de processus: la formation d'un cristal macroscopique. La cristallisation est un processus qui s'accompagne d'un transfert de masse et de chaleur, elle résulte de deux transformations successives :

**-La croissance des noyaux et formation du cristal macroscopique.[22]**

### II.5.2. Les problèmes liés au changement de phase

#### ❖ La surfusion :

Le graphe ci-après illustre l'évolution théorique de la température pendant le changement d'état lors de la décharge thermique.[22]

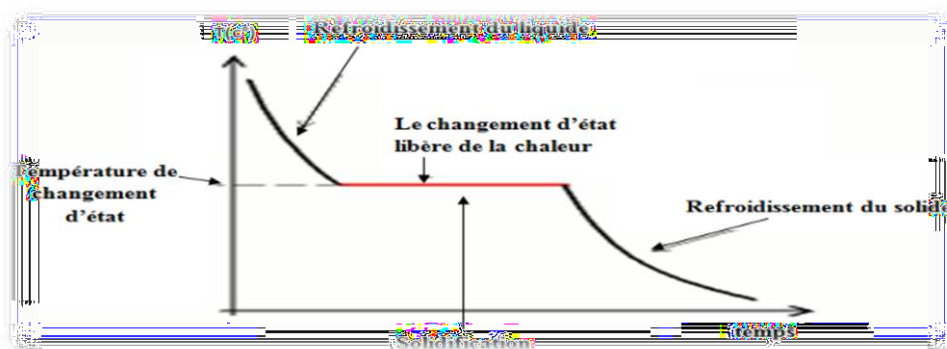


Figure II.11. Evolution théorique de Température en fonction du temps.[19]

Dans la réalité, les courbes de solidification des corps ont souvent des allures plus ou moins différentes de cette courbe théorique du fait de la surfusion des composés utilisés.[20] Ce phénomène de surfusion est intimement lié à la cristallisation, c'est l'une des difficultés majeures affectant le stockage à chaleur latente. Physiquement comprendre la surfusion revient à comprendre le mécanisme qui font que lors du refroidissement d'un liquide, la solidification se fait en général en dessous de la température de changement de phase : le matériau peut rester liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous de la température de fusion dans certains cas, par contre, on n'observe jamais un solide pur au-delà de la température de fusion [20].

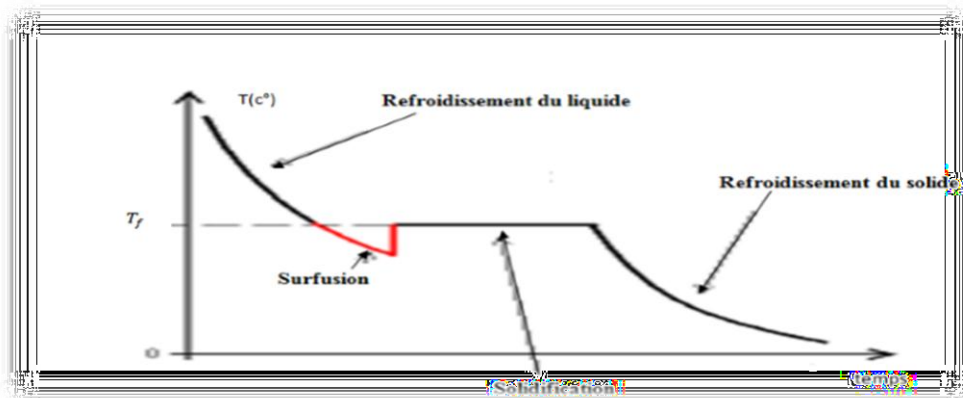


Figure II.12. Solidification présentant une surfusion.[19]

Sur la zone de solidification de la figure (II.12), on note une chute de température qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur, ce dernier est d'autant plus élevé que la masse du liquide est grande. Si l'échange de chaleur avec l'extérieur est faible. [20] La surfusion empêche l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase à la température voulue.[26]

❖ **Les solutions pour remédier à ce problème sont multiples:**

- Incorporation d'additifs tensio-actifs
- faciliter la surfusion au moyen de cristaux solides stables autour de la température de cristallisation : ceux-ci servent de points d'accroche pour la cristallisation du matériau
- garder une zone froide à l'intérieur du matériau. [26]

**II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre on conclue que les méthodes de stockage de l'énergie sont donc nombreuses, leur principe différent à fin de stocker pour trouver une place dans la future aide les besoins quotidiens des gens

Le monde produise toujours de l'énergie en toute façon et toute manière. Mais la grande quantité d'énergie nécessite une possibilité de le stocker, Pour une utilisation ultérieure. Parmi ces énergies on a la chaleur, un domaine important dans une perspective de bonne utilisation des énergies et développement durable.



*CHAPITRE III :*  
*LES CAPTEURS THERMIQUES*  
*ET SECHOIRS SOLAIRES*

**III.1. Introduction :**

En raison de l'insuffisance de l'échange thermique réalisée dans le capteur solaire plan à air entre le fluide et l'absorbeur il est intéressant à apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique.

Le rendement d'un capteur solaire, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique dépend de sa forme, de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci. Il existe une gamme étendue de capteurs solaires à air avec différentes dispositions de l'absorbeur. F. Mokhtari et D. Semmar [36]. Les capteurs solaires à air sont importants dans les applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux, et le séchage qui est une opération souvent nécessaire dans de nombreux processus (agro-alimentaire, matériaux de construction, bois...).

**III.2. Etat de l'art-travaux scientifiques des capteurs Solaires thermiques****Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) :**

Ce physicien suisse est considéré comme l'inventeur de la « boîte chaude » en 1767 .Il s'intéressa à l'effet de serre au moyen de vitrages superposés et de ce fait son invention est considérée, à juste titre d'ailleurs, comme le précurseur du capteur solaire plan. Nous aurons l'occasion de lui rendre hommage plus loin, notre réalisation n'étant qu'une version améliorée de sa « boîte chaude ». [17] ; à basse température met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé en 1780.[38]

**Joseph Fourier (1768-1830) :** Mathématicien et physicien français Il aborde la notion de chaleur obscure que nous dénommons de nos jours sous le terme d'ondes infrarouges. Il décortique parfaitement le fonctionnement du capteur plan décrit dans cet ouvrage et précise le rôle du vitrage dans la création de l'effet de serre et la capture des calories solaires. [21]

Parmi les travaux scientifiques portant sur la caractérisation et l'étude des performances des capteurs solaires, on peut citer les travaux suivants :

**En 1942 :** la théorie des capteurs, établis par HOTTEL et WOERTZ, Depuis, d'autres d'étude ont été faites notamment celle portant sur la modélisation relative à différentes configurations de capteurs solaire thermique.

**En 1970 :** il faut cependant attendre pour voir apparaître les premiers chauffe- eau solaire en Californie. [38]

**En (1973-1985) :** Comme beaucoup de filières d'énergies renouvelables, le solaire thermique connaît une phase de croissance importante en réaction au choc pétrolier. Mais ce

développement rapide, avec des technologies ou des installateurs déficients, a entraîné de nombreuses contre-performances [38]

**En 1986 :** M. MERZOUK, au centre d'études nucléaires et solaires étudie la contribution à la détermination des performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires sous vide en régime permanent. On peut citer aussi l'étude effectuée, la même année par N. KASBADJI, au CNR de Padoue en Italie, qui porte sur l'étude théorique et expérimentale de trois capteurs solaires en régime permanent.[22]

**En 1990 :** SEMMAR. D contribue à l'étude et la conception d'un capteur solaire à air pour la production d'air chaud au sein du CDER. Il définit un certain nombre de règles et de critères pour les systèmes utilisant l'air comme fluide caloporteur.[22]

**En 2001 :** D.LAFRI étudie dans le cadre d'un magister les performances d'un chauffe –eau solaire pour prévoir le comportement thermique de l'eau dans la cuve de stockage. Il conclue qu'avec une capacité de stockage élevée, le rendement des systèmes solaire croit. [22]

**En 2014:** Vincent Qinglong invente nouvelle génération de capteur plan à concentration. [22]

### III.3. Capteur solaire thermique

Est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur sous forme de chaleur [39]

#### III.3.1 les type des capteurs solaires thermiques :

**III.3.1.1. Capteur plats (vitrés/non vitrés) :** Dans un capteur plat, le fluide caloporteur (eau glycolée) puise ses calories en circulant dans un serpentin en cuivre au contact d'un absorbeur. [40]

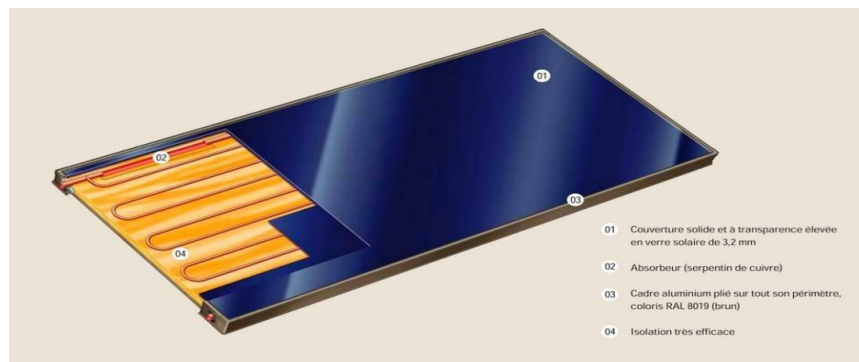


Figure III.1. Capteur plan (vitrés/ non vitrés)

**III.3.1.1.1. Les capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif**

Sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire. Leur principe de fonctionnement est présenté sur la figure.

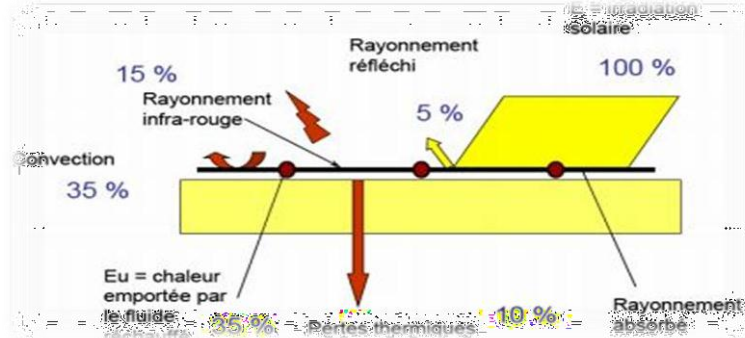


Figure III.2. Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitré

**III.3.1.1.2. Les capteurs plans vitrés:**

Ce type de capteurs peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants (hôtellerie par exemple), la figure (III.3) montre le principe de fonctionnement de ce type

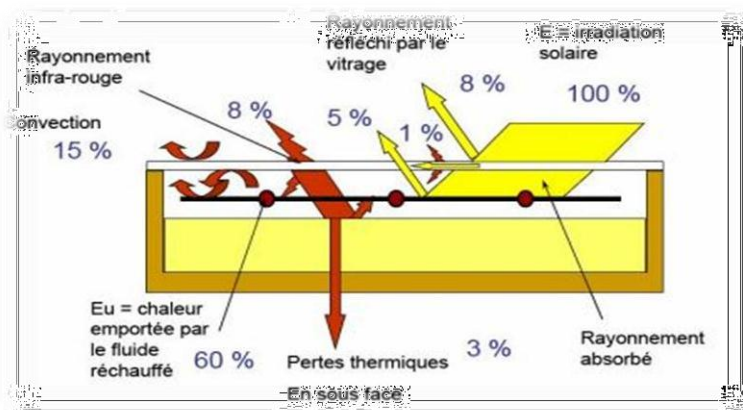


Figure III.3. principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés

**III.3.1.2. Les capteurs solaires à tubes :**

Pour augmenter le rendement du capteur par réduction des déperditions, ce type de capteur solaire est composé de nombreux tubes de verre parallèles sous vide [40]



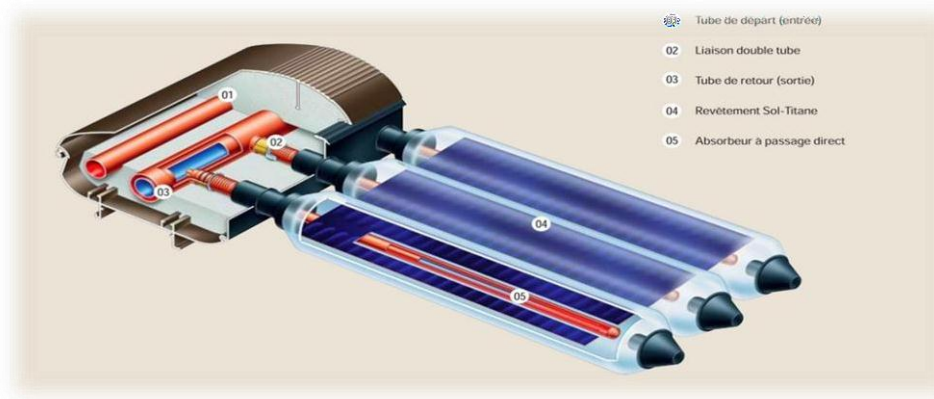


Figure III.4. Capteur solaire à tube

**III.3.1.3. Les capteurs à tubes sous vide:**

Présenté avec son principe de fonctionnement dans la figure (III.5), permet de satisfaire aux applications nécessitant des niveaux de températures plus importants. Il se trouve dans des applications industrielles, mais pour le chauffage et la production d’eau chaude sanitaire, il se trouve aussi dans l’habitat individuel et collectif.

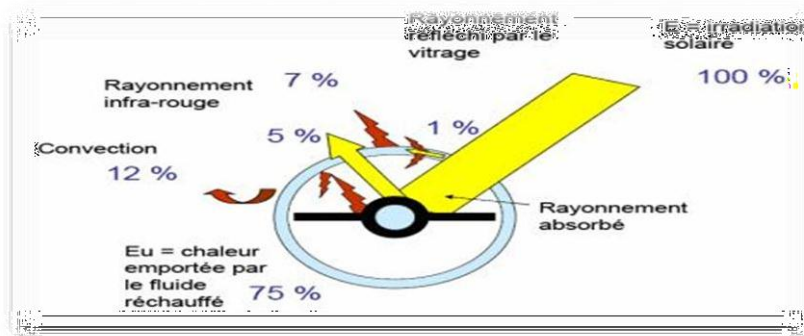


Figure III.5.Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide

**III.3.14. Le capteur cylindro-parabolique**

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques (figure III.6). [27]



Figure III.6. Système à réflecteur cylindro-parabolique [19]

### III.3.1.5. Le capteur parabolique

Il utilise un réflecteur en forme de parabole de révolution. [19]



Figure III.7. Capteur parabolique. [18]

### III.3.1.6. Le capteur solaire à air :

Comme leur nom l'indique produisant de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air, on peut directement faire passer l'air à réchauffer à travers le capteur. Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition, c'est l'avantage par rapport aux capteurs à liquide [17].

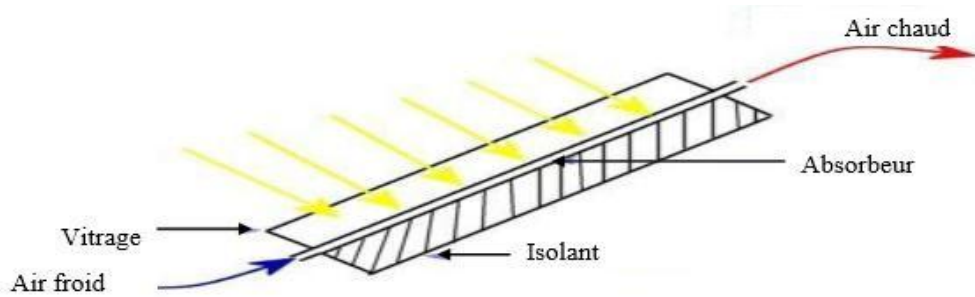


Figure III.8. capteur solaire à air. [31]

### III.3.1.6.1. Composants du capteur solaire à air

#### III.3.1.6.1.1. La couverture transparente

L'intérêt d'une couverture transparente (verre) habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des températures dépassant 70 °C que on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement. [19]

#### III.3.1.6.1.2. L'absorbeur

Plaque plane en métal (cuivre ou acier), Il a pour absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes, il doit être doué d'un coefficient d'absorption le plus élevé possible. [19]

#### III.3.1.6.1.3. Le fluide caloporteur

L'air pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante. [19]

#### III.3.1.6.1.4. L'isolant thermique

Une ou plusieurs couches isolant (la laine de verre, polystyrène), pour limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur. [19]

#### III.3.1.6.1.5. Le cadre

Le cadre doit résister aux agressions des conditions extérieures, aux contraintes intérieures et aux chocs éventuels lors du transport et du montage. Il doit donc être solide, tout en étant le plus léger possible. Le cadre du capteur est en aluminium ou en acier. Le cadre des capteurs

intégrés en toiture est protégé des intempéries et peut ainsi être valablement réalisé en bois. [24]

### III.3.1.6.2. Amélioration des performances du capteur

#### III.3.1.6.2.1. Capteur doté de chicanes

Dans le but d'améliorer les performances des capteurs solaires à air, **K. Aoues et Al** [37] ont introduit dans la veine d'air mobile des chicanes qui jouent un rôle à double aspect, favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur :

- Elles permettent de rendre turbulent l'écoulement à proximité de la plaque chaude.
- Elles prolongent le parcours du fluide caloporteur.

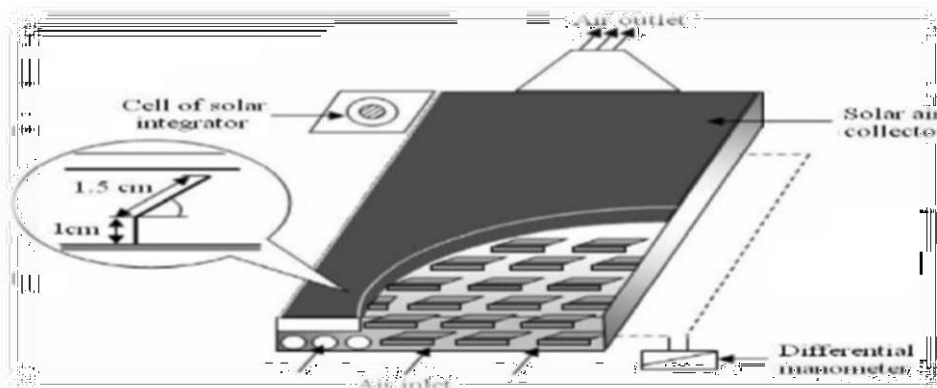


Figure III.9. Dispositif expérimental

La veine d'air dynamique du capteur est de 25mm de hauteur, comprise entre la plaque absorbante et une plaque en acier galvanisé placée sur l'isolant, cette veine est équipée de rangées d'obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l'écoulement de l'air sur la plaque inférieure. Ces obstacles présentent une différence dans la forme résidant dans la partie inclinée d'angle  $\alpha$  respectivement égale à  $60^\circ$  et  $120^\circ$ . Ces chicanes sont espacées d'une distance respectivement à  $d=10$  cm et  $d=5$ cm suivant deux configuration A et B qui se différencient par le nombre de rangés respectivement égale à 152 et 256 chicanes (figure III-10).

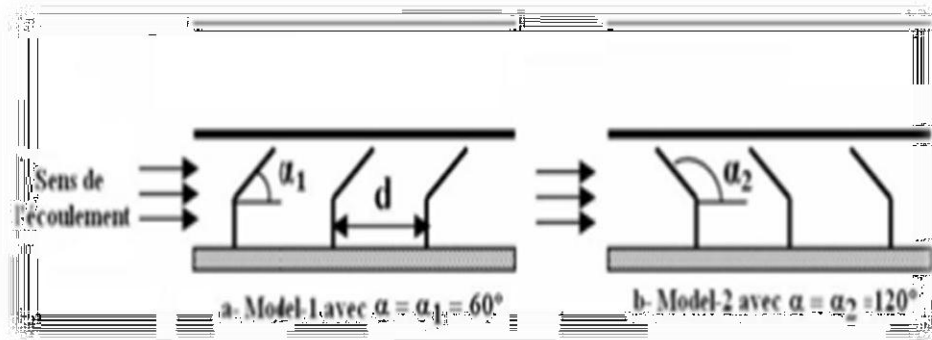


Figure III.10. Schéma descriptif des chicanes

### III.3.1.6.2.2. Influence des chicanes sur la performance d'un capteur solaire à air

L'introduction d'obstacles dans la veine d'air dynamique nécessite un choix judicieux du mode de fixation, il est possible qu'ils soient fixés sur l'isolant ou sous l'absorbeur, ou les combinaisons ensemble. Dans tous les cas les performances thermiques sont nettement améliorées, du fait que la surface d'échange totale mise en jeu se trouve augmentée et la section de passage offerte devant le passage du fluide qui et par conséquent réduite. [23]



Figure III.11. Capteur à air avec les obstacles (chicanes longitudinales). [17]

### III.3.1.6.3. Les applications des capteurs solaires plans à air

#### ✚ Chauffages et climatisation des habitations

Le principe est présenté sur la Figure I.14, consiste à chauffer le fluide dans le capteur solaire, l'air est véhiculé par ventilateur vers des points d'utilisations.

1- Capteur solaire plan à air / 2- Filtre/ 3- Ventilateur

4- Entrées d'air / 5- Sorties d'air

Le système de capteur solaire à air Il s'intègre dans l'habitat de façon modulaire et complète les systèmes de chauffage existants. Il permet de réaliser des économies substantielles d'énergie et d'améliorer le bilan thermique des bâtiments sur la période hivernale et en mi-saison en apportant une source complémentaire de chauffage. Une régulation fait circuler l'air des locaux à travers le panneau dès que la température interne du panneau permet d'obtenir un gain significatif.

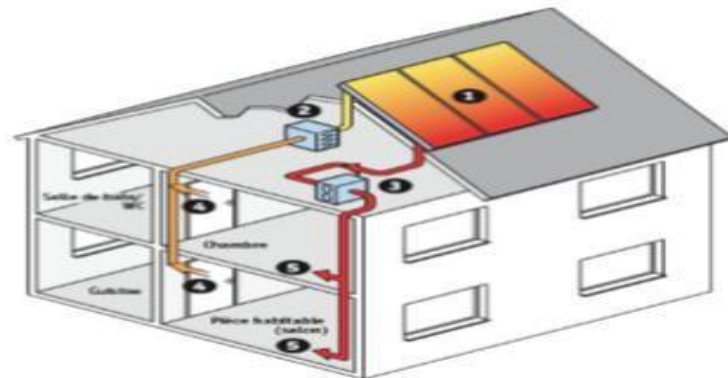


Figure III.12. Chauffage et climatisation des habitations. [34]

**Le séchage :**

Utilisation des capteurs solaire à air pour le séchage des récoltes est idéale dans le cas du thé, du café, des fruits, des fèves, du riz, des épices, du caoutchouc, du cacao et du bois. [20]

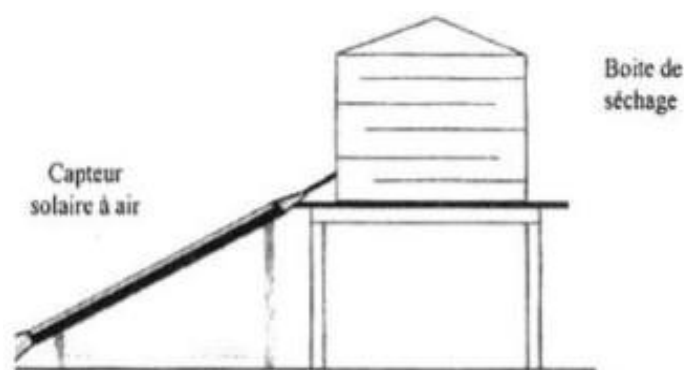


Figure III.13.Séchage solaire. [35]



### ✚ Courbe de rendement des capteurs plans

La figure suivante présente les variations du rendement instantané en fonction de la température réduite  $T = (T_m - T_{ext}) / P$  pour plusieurs types de capteurs.

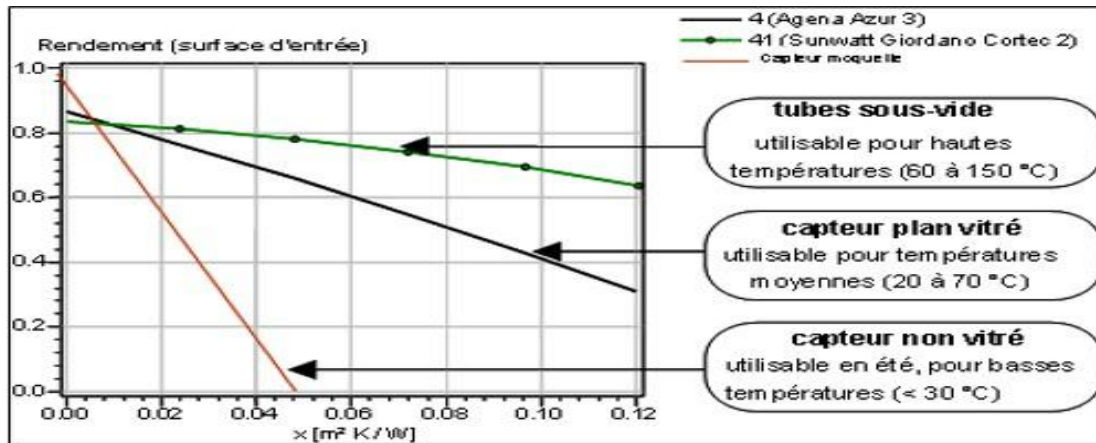


Figure III.14. Rendement des différents types de capteurs selon l'écart de température ( $^{\circ}C$ )[18]

Les courbes de rendement des capteurs montrent que pour un ensoleillement constant, les performances des capteurs baissent lorsque l'on demande au capteur de fonctionner à une température éloignée de la température extérieure. Ceci est dû tout simplement aux déperditions thermiques qui augmentent avec la température (de manière linéaire pour les phénomènes de convection et conduction). Il faut donc, pour tirer meilleur parti des capteurs, utiliser une technologie qui correspond le mieux aux niveaux de températures auxquels on veut travailler. Le capteur plan aura un rendement 75% supérieur à un capteur sous vide (55%) par contre il sera moins performant qu'un capteur non vitré (95%). [22]

#### III.3.1.6.4. Simulation numérique d'un capteur solaire à air sans et avec MCP

On va simuler le capteur solaire à air avec sans matériau à changement de phase puis avec ce dernier pour étudier l'influence de MCP sur le fonctionnement sur le système étudié ; puis on compare les deux résultats (sans et avec).

##### III.3.1.6.4.1. Simulation numérique du capteur solaire à air sans MCP en CN et en CF

Pour étudier le comportement des différentes caractéristiques thermiques du capteur solaire à air sans intégration de matériau à changement de phase.

III.3.1.6.4.1.a Bilan thermique global d'un capteur solaire à air

➤ Principe

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure III.15

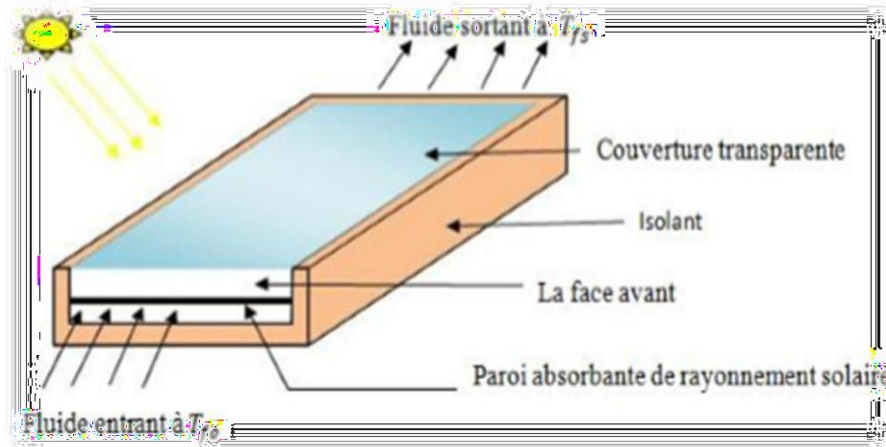


Figure III.15.Schéma de principe d'un capteur solaire plan [10]

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur.

III.3.1.6.5. Propriétés thermo-physiques du capteur solaire à air :

Les propriétés thermo-physiques des éléments constituant le capteur plan à air ainsi que les propriétés des matériaux MCP à envisager dans cette étude, sont exposées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.1. Propriétés thermo-physiques des différents composants d'un capteur [19]

Propriétés physiques						
Matériaux	Masse volumique	Conductivité thermique	Chaleur spécifique	Emissivité	Absorptivité	Epaisseur
	Symbole et valeur					



Verre	$\rho V= 2500$	$\lambda V =0.81$	$cV= 840$	$\varepsilon v=0.93$	$A_v=0.06$	$e_v=0.0032$
Polystyrène	$\rho p =700$	$\lambda P= 0.320$	$cp= 2310$	-	-	-
Cuivre(absorbeur)	$\rho a= 8954$	$\lambda a =401$	$ca= 386$	$\varepsilon a=0.14$	$Aa=0.95$	$ea=0.001$
Aluminium	$\rho A =2719$	$\lambda A= 202.4$	$cA= 871$	-	-	-
Acier inoxydable	7850	$\lambda Ai= 15$	$cAi= 460$	-	-	-
isolation	-	$\lambda i=0.05$	-	-	-	$ei=0.035$
Géométrie du capteur	Longueur 1.93 m		Largeur 0.935m			

**III.3.1.6.6. Bilan thermique global**

Le bilan thermique de la paroi absorbante s’écrit :

$$\phi_{sa} = \phi_{p \rightarrow} + \phi_u + \phi_{st} \quad (W) \tag{III.1}$$

Où :  $\phi_{sa}$  Flux solaire absorbé

$\phi_{p \rightarrow}$  Flux perdu par la paroi absorbante

$\phi_u$  Flux utile transmis au fluide caloporteur

$\phi_{st}$  Flux stocké dans le capteur qui s’écrit :

**Remarque:** en régime dynamique (variation de la Température de sortie avec le temps), il faut ajouter au 2<sup>ème</sup> membre de un terme qui représente l’inertie thermique de l’appareil: ( $\alpha \partial T/\partial t$ ). En phase de démarrage de l’installation, ce terme ne peut être négligé.

**Flux utile :** est celle qui permet de réchauffer le débit de fluide caloporteur  $q$  de la température d’entrée  $T_{f\text{entrée}}$  jusqu’à la température de sortie  $T_{f\text{sortie}}$ :

$$\phi_u = m \cdot cp \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \tag{III.2}$$

**Flux absorbé :** est la puissance absorbée

$$\phi_a = \tau_v \cdot \alpha_A \cdot E \cdot S \tag{III.3}$$

**Remarque.:** le fluide caloporteur (FC) assure la distribution de la puissance utilisable. L’énergie véhiculée est sous la forme de chaleur sensible et/ou chaleur latente. Néanmoins, pour simplifier, il ne sera question dans ce chapitre que de transport d’énergie sous forme de chaleur sensible (i.e. pas de changement d’état du FC)

➤ **Pertes thermiques :**

$$\varphi_p = h_p. (T_{pm} - T_a).S \tag{III.4}$$

- L'expression qui caractérise  $h_p$  est assez complexe, elle tient compte des pertes par convection et rayonnement avec des milieux qui ne sont pas en général à la température ambiante.
- Dans le cas d'un CSP,  $T_{pm}$  peut se mettre sous la forme :

$$T_{pm} = (3T_{fs} + T_{fe})/4 + \Delta T \tag{III.5}$$

$\Delta T$  est un gradient de T qui correspond au transfert de chaleur entre la surface absorbante et le FC (°C)

➤ **Flux stocké :**

$$\varphi_{st} = M_{f\text{air}} (\partial T / \partial t) \tag{III.6}$$

Avec:  $M_f$  est masse en air du capteur définie par :  $M_i c_i = M_f c_{\text{air}}$ ,

$i$  : représentant les différents éléments constitutifs du capteur

**Rendement instantané d'un capteur  $\eta$**

- L'expression du rendement global instantané d'un CSP est :  $\eta_i = \varphi_u / E.C$
- L'expression du rendement interne instantané d'un CSP est :  $\eta_i = \varphi_u / \varphi_a$
- L'expression du rendement optique instantané d'un CSP est :  $\eta_0 = \varphi_p E$

**III.3.1.6.7.1. Capteur solaire à air plan simple**

Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'extérieur dans un capteur solaire couvert que nous appellerons capteur plan simple peuvent être schématisés comme indiquée sur la figure (III.16) [26].

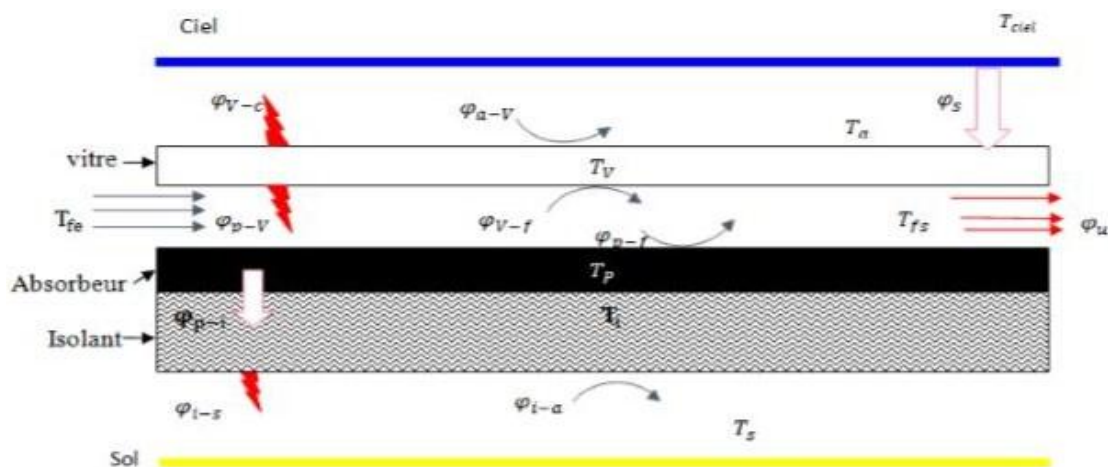


Figure III.16. Différents échanges thermiques dans un capteur à air.[32]

**III.3.1.6.7.1.a. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques**

Pour déterminer les divers coefficients d'échange thermique  $h$ , on introduit les relations suivantes, qu'il s'agit d'un transfert par conduction, rayonnement et convection [21]. Le schéma électrique équivalent des différents transferts thermiques est représenté sur la figure (III. 17)

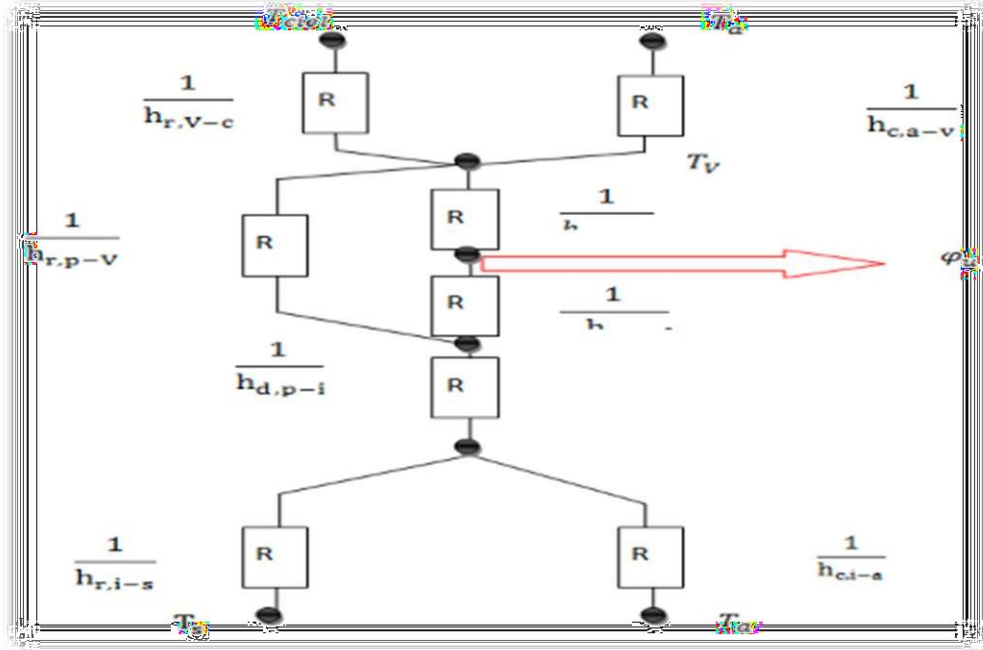


Figure III.17. Schéma électrique des résistances dans un capteur solaire à air.[32]

**III.3.1.6.7.1.b. Echanges thermiques par rayonnement**

Pour le capteur solaire plan, l'échange thermique par rayonnement existe entre :

- ✚ La face extérieur de la couverture vitrée et le ciel  $\phi_{c-v} = h_{r, c-v}.S. (T_v - T_{ciel})$
- ✚ La face intérieur de la couverture vitrée et la face extérieur de l'absorbeur.  $\phi_{v-p} = h_{r, v-p}.S. (T_p - T_v)$
- ✚ La face intérieur de l'isolant et le sol.[29]  $\phi_{v-p} = h_{r, i-s}.S. (T_s - T_i)$

**III.3.1.6.7.1.b.a. Echange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste**

La vitre du capteur solaire échange l'énergie par rayonnement thermique avec le ciel. Le coefficient d'échange radiatif entre les deux s'écrit [14] :

$$h_{r,c-v} = \sigma.S.v. [(T_v + T_{ciel}) - (T_v^2 - T_{ciel}^2) / (T_v - T_{ciel})] / (T_v - T_a) \tag{III.7}$$

➤ Pour un capteur incliné avec un angle  $\beta$ , on utilise la relation suivante [14] :

$$h_{r, c-v} = (\sigma.s.v.1/2)(1 + \cos Q) (T_v + T_{ciel}) (T_v^2 + T_{ciel}^2) \tag{III.8}$$

- La température équivalente du ciel est donnée par la relation de Swinbank [22] :

$$T_{\text{ciel}} = 0.0552 \cdot T_a^{3/2} \quad (\text{III.9})$$

- Une autre relation utilisée par Sarhaddi [22] :

$$T_{\text{ciel}} = T_a + 6 \quad (\text{III.10})$$

#### III.3.1.6.7.1.b.b. Echange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre

Pour l'échange radiatif entre la face intérieur du verre et la face extérieur de la couche de l'absorbeur, le coefficient d'échange est déminé par la relation suivante [22] :

$$Tr, p-v = \sigma \cdot [(T_p + T_v) (T_p^2 + T_v^2)] / [(1/\epsilon_p) + (1/\epsilon_v) - 1] \quad (\text{III.11})$$

#### III.3.1.6.7.1.b.c. Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol

La face arrière du capteur solaire échangée de l'énergie par rayonnement thermique avec le sol avec un coefficient d'échange radiatif donné par relation suivante [22]

$$hr, i-s = (\sigma \cdot i \cdot 1/2) [(1 + \cos Q) (T_i + T_s) (T_i^2 + T_s^2)] \quad (\text{III.12})$$

- La température du sol, est donnée par la relation suivante [14] :

$$T_s = T_a + 2 \quad (\text{III.13})$$

#### III.3.1.6.7.1.c. Echange thermique par conduction

Cet échange s'effectue à travers les corps solides à cause d'un gradient de température, il existe au niveau de plusieurs éléments du capteur :

✚ Au niveau de la couche de verre.  $\varphi_{v-f} = h_{c, v-f} \cdot S \cdot (T_f - T_v)$

✚ Au niveau de la plaque absorbante.  $\varphi_{v-p} = h_{c, v-p} \cdot S \cdot (T_p - T_v)$

✚ Au niveau de l'isolant.  $\varphi_{i-a} = S \cdot h_{c, i-a} \cdot S \cdot (T_a - T_i)$

Le coefficient d'échange thermique par conduction au niveau du composant i s'écrit :

$$h_{d,i} = \lambda_i / e_i \quad (\text{III.14})$$

#### III.3.1.6.7.1.d. Echanges thermiques par convection

- Ceux dus au vent, par rapport aux surfaces avant et arrière du capteur solaire plan.
- Ceux dus au contact entre le fluide caloporteur et le capteur.

**III.3.1.6.7.1.d.a. Echange thermique par convection dû au vent**

Le coefficient de transfert par convection dû au vent est décrit par relation de **Hottel** et **woertz** suivante [22] :

$$hc = 5.67 + 3.86.Uv \quad (III.15)$$

Ou par la relation établie par **watmuffet** [22] :

$$hc = 2.8 + 3.Uv \quad (III.16)$$

Pour un capteur solaire incliné avec un angle  $\beta$ , une autre relation est établie par **Stultz** et **Wen** définie par [22] :

$$hc = 1.((Tv - Ta). \cos\beta)^{1/3} + 2.658.Uv \quad (III.17)$$

C'est cette dernière relation qui intervient dans notre modèle numérique, car elle tient compte de l'effet de l'inclinaison du capteur. [32]

**III.3.1.6.7.1.d.b. Echange thermique par convection dû au fluide caloporteur**

Au cours de la circulation du fluide caloporteur dans la conduite du capteur, ce dernier échange la chaleur par convection avec la couche du verre et de la plaque absorbante. Cet échange dépend de la géométrie des parois, de la vitesse de l'écoulement, des dimensions de la conduit.[22], Le coefficient d'échange thermique par convection est déterminé à l'aide de la relation suivante donnant le nombre de **Nusselt** :

$$Nu = (hc / \lambda_f) \quad (III.18)$$

➤ Écoulement laminaire :  $Re < 2100$  (III.19)

$$-Gr < 100 \Rightarrow Nu = (3.66 + 0.085.Gr) / (1 + 0.047.Gr^{3/2})$$

$$-Gr > 100 \Rightarrow Nu = 0,116.Gr^{1/3} + 0,87.Gr. (1 + 0,045.Gr^{1/3})$$

➤ Ecoulement transitoire :  $2100 < Re < 10^4$  (III.20)

$$Nu = 0,116. (Re^{2/3} - 125). (1 + (D_H / L)^{3/2}. Pr^{1/3})$$

➤ Ecoulement turbulent :  $Re > 10^4$  (III.21)

$$Nu = 0,018.Re^{0.8}. Pr^{0.4}$$

Avec :

$Re = (\rho_f.D_H / \mu). Vf$  ;  $Pr = \mu_f \lambda_f.Cp$  ;  $Gr = (Re.Pr.D_H) / L$  : sont respectivement le nombre **Reynolds**, nombre de **Prandlt** et le nombre de **Gratetz**.

**III.3.1.6.8. Calcul des pertes thermiques**

Le flux solaire reçu sur le module du capteur solaire plan ne se convertit pas totalement en énergie thermique utiles. Une partie de ce rayonnement est perdue sous forme de chaleur et rayonnement, au niveau des surfaces arrière du module. [22]

$$\Phi_p = \Phi_{p, av} + \Phi_{p, ar} \quad (III.22)$$

Avec :

$$\varphi_{p,av} = S.(T_P - T_a)$$

$$\varphi_{p,ar} = S.U_{ar}(T_P - T_a)$$

$U_{av}$  et  $U_{ar}$  sont les coefficients de perte thermique sur la surface avant et arrière du capteur respectivement, tel que :

$$U_{av} = [(1/h_{r,p-v}) + (2/h_{c,p-f}) + (1/(h_{c,v-a} + h_{r,v-c}))]^{-1}$$

$$U_{ar} = [(1/h_{d,p-i}) + (1/(h_{c,i-a} + h_{r,i-s}))]^{-1}$$

Avec :

$U_{av} + U_{ar}$  : est le coefficient global de pertes thermiques. [22]

- $U_L$  : Puissance perdue sera donnée par :

$$\varphi_p = S.U_L(T_p - T_a) \quad (III.23)$$

### III.3.1.6.9. Expressions analytiques du bilan énergétique

#### III.3.1.6.9.1. Pour la couche du verre

➤ Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit comme suit :

$$M_v.C_v. (dT_v/dt) = \alpha_v.\varphi_s + \varphi_{v-a} + \varphi_{v-f} + \varphi_{v-p} + \varphi_{v-c} \quad (III.24)$$

Avec :

$$\varphi_s = E.S$$

$$\varphi_{v-a} = h_{c,v-a}.S. (T_a - T_v)$$

$$\varphi_{v-f} = h_{c,v-f}.S. (T_f - T_v)$$

$$\varphi_{v-p} = h_{c,v-p}.S. (T_p - T_v)$$

$$\varphi_{v-c} = h_{r,v-c}.S. (T_{ciel} - T_v)$$

Finalement cette équation devient :

$$M_v.C_v.(dT_v/dt) = S[\alpha_v. E + (h_{c,v-a}.(T_a - T_v) + h_{c,v-f}.(T_f - T_v) + h_{r,v-p}.(T_p - T_v) + h_{r,v-c}.(T_{ciel} - T_v)] \quad (III.25)$$

#### III.3.1.6.9.2. Pour le fluide caloporteur

➤ Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit comme suit :

$$M_f.C_f. (dT_f/dt) = \varphi_{v-f} + \varphi_{f-p} \quad (III.26)$$

Avec :

$$\varphi_{f-p} = h_{c,f-p}.S. (T_p - T_f)$$

$h_{c,f-p}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide caloporteur et l'absorbeur.

- Le bilan thermique dans cette couche devient :

$$M_f.C_f. (dT_f/dt) = h_{c,-v}.S.(T_V - T_f) + h_{c,f-p}.S.(T_p - T_f) \quad (III.27)$$

### III.3.1.6.9.3. Pour la plaque absorbante

$$M_p.C_p. dT_p d = a_p.p.\phi_s + \phi_{p-i} + \phi_{p-f} + \phi_{V-p} \quad (III.28)$$

$$\phi_{p-i} = h_{d,-i}.S. (T_i - T_p)$$

$h_{d,-i}$  : Coefficient d'échange thermique par conduction entre l'absorbant et l'isolant. [22]

- Le bilan énergétique dans cette couche devient

$$M_p.C_p.(dT_p /dt) = S.[a_p.rv.G + (h_{d,p-i}.(T_i - T_p) + h_{c,p-f}.(T_f - T_p) + h_{r,-p}.(T_V - T_p)] \quad (III.29)$$

### III.3.1.6.9.4. Pour l'isolant

- Le bilan énergétique dans cette couche est :

$$M_i.C_i. (dT_i/dt) = \phi_{p-i} + \phi_{i-a} + \phi_{i-s} \quad (III.30)$$

Avec :

$$\phi_{i-a} = S.h_{c,i-a}.S. (T_a - T_i)$$

$$\phi_{i-s} = h_{r,i-s}.S. (T_s - T_i)$$

$h_{c,-}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'isolant et le milieu ambiant.

$h_{r,-}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol. [22]

- Donc cette équation devient

$$M_i.C_i.dT_i dt = S [h_{d,p-i} (T_p - T_i) + h_{c,i-a} (T_a - T_i) + h_{r,i-s} (T_s - T_i)] \quad (III.31)$$

- Système d'équation global

D'après les équations (III.25), (III.27),(III.29),(III.31), Les équations sont regroupées comme suit (Système S) :

$$*M_v.C_v. (dT_v/dt) = S. [a_v.G + h_{c,v-a} .(T_a - T_v) + h_{c,v-f}.(T_f - T_v) +$$

$$h_{r,v-p} .(T_p - T_v) + h_{r,v-c} .(T_{ciel} - T_v)]$$

$$*M_f.C_f. (dT_f/dt) = h_{c,f-v}.S. (T_v - T_f) + h_{c,f-p}.S. (T_p - T_f)$$

$$*M_p.C_p.(dT_p/dt) = S.[ a_p.rv.G + (h_{d,p-i} .(T_i - T_p) + h_{c,p-f} .(T_f - T_p) + h_{r,v-p} .(T_v - T_p)]$$

$$*M_i.C_i. (dT_i/dt) = S. [(h_{d,p-i} .(T_p - T_i) + h_{c,i-a} .(T_a - T_i) + h_{r,i-s} .(T_s - T_i)]$$

## III.4. Généralités sur le séchage solaire

### III.4.1. Définition du séchage solaire

Le séchage solaire est l'opération qui élimine par évaporation de l'eau d'un corps humide (agricole). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. est donc une

opération de transfert simultané de matière et de chaleur. Un voie existe pour atteindre cet objectif, d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécaniques ou physico-chimiques initiales, soit de faciliter son stockage

### III.4.2. Types de séchage

**III.4.2.1 : Le séchage naturel** Obtenu par exposition du produit humide au soleil, ou par séjour dans une ambiance atmosphérique relativement sèche, permettant au produit de céder à l'air une partie de l'eau en excès qu'il contient.

**III.4.2.2 : Le séchage artificiel** Obtenu en soumettant le produit humide, dans un séchoir, sous l'action d'un courant d'air généralement chaud, obtenu grâce à une source d'énergie calorifique (combustible ou électricité). Il faut savoir que le séchage artificiel est un procédé relativement coûteux en énergie calorifique et mécanique (chauffage et mise en mouvement de l'air).

#### III.4.2.3. Les séchoirs solaires directs (séchoirs-serre)

Dans ce type de séchoirs, l'insolateur (capteur solaire) et le stock (chambre de séchage) forment un seul bloc. Le séchoir est constitué d'un caisson isolé à sa base et recouvert d'une vitre ou d'un plastique clair. Les aliments à sécher reçoivent directement les rayons du soleil à travers la couverture transparente



Figure III.18. Séchoir solaire direct simple [17] Figure III.19. Séchoir solaire direct portable

#### III.4.2.4. Les séchoirs solaires indirects

Ils sont composés d'insolateurs couplés à une chambre de séchage. L'insolateur sert à chauffer l'air et à l'envoyer dans cette dernière. En convection naturelle, ceci ne suffit pas à réchauffer l'air à la température désirée, ce qui explique l'ajout d'une cheminée. L'énergie supplémentaire qui se trouve à la base de la cheminée améliore considérablement le fonctionnement du séchoir en augmentant le débit de l'air dans la masse du produit à sécher.





Figure III.20. Deux types de séchoirs solaires indirects [17]

➤ **Chambre du séchoir solaire indirect**

La chambre de séchage est une boîte en bois de forme cubique dont la quelle existe les produit agro-alimentaire. Elle est isolée thermiquement avec de la laine de verre sur les parois latérales et sur la toiture et les volets servant d'ouverture .En outre elle est munie d'une cheminée cylindrique sur le toit, ainsi que d'une ouverture sur sa base pour l'admission de l'air chaud provenant du capteur.les quatre faces latérales ont une surface de  $1 \text{ m}^2$  chacune.[18]; Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles généralement de tôles galvanisés, de bois et de polystyrène... etc. Pour réaliser un séchoir indirect, il faut couplée le capteur solaire à air avec une enceinte bien calorifugée. [29]



Figure III.21. Chambre du séchoir solaire indirect [33]

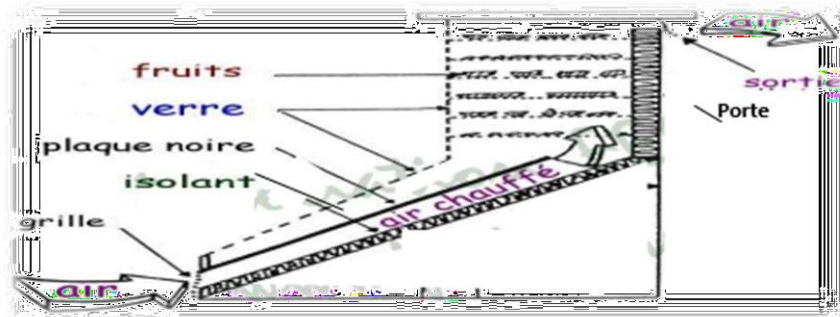


Figure III.22. Schéma descriptif du séchoir solaire indirect [17]

#### III.4.2.5. Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs [18].

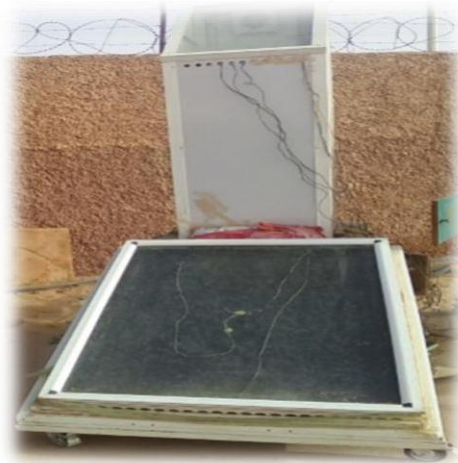


Figure III.23. Séchoir solaire mixte

#### III.4.2.6. Les séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir : -Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet tout simplement de préchauffer l'air. [18]



Figure III.24. Séchoir solaire hybride.[17]

**III.5. L'air humide :** L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, Tant qu'il n'y a pas de changements de phase. Les deux gaz se comportent comme des gaz parfaits et, selon les lois de **Dalton**, aucun des gaz n'est affecté par la présence de l'autre L'air sec est lui-même un mélange de gaz .mais dont les proportions sont invariables, du moins pour les principaux constituants (Azote, Oxygène et Argon). Qui représentent 99.97 en volume de sa composition

#### III.5.1.Principaux paramètres caractérisant l'air humide:

Considérons une masse  $M_h$  d'air humide, occupant le volume  $V$  à la température  $T$  et sous la pression  $P$ .

- La masse  $M_h$  d'air humide contenue dans ce volume est la somme d'une masse  $m_a$  d'air sec et  $m_v$  de vapeur d'eau:

$$M_h = m_v + m_a \quad (\text{III.32})$$

- La pression totale  $p$ , est la somme de la pression paires  $P_a$  de l'air sec et  $P_v$  de la vapeur d'eau:

$$P = P_v + P_a \quad (\text{III.33})$$

#### III.5.1.1. L'humidité absolue :

Appelée aussi humidité spécifique, ou teneur en eau; représentant le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans un volume de l'air humide sur la masse d'air sec contenue dans ce même volume ; la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par  $H_a$  est donnée par la relation suivante :

$$H_a = (m_e/m_s) \quad (\text{III.34})$$

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

$$H_a = (18/29) \left[ \frac{P}{P-P_v} \right] \left[ =0.622 \right] \left[ \frac{P}{P-P_v} \right] \quad (\text{III.35})$$

### III.5.1.2. L'humidité relative:

L'humidité relative c'est le rapport entre la pression de la vapeur d'eau dans l'air sur la pression de saturation de cette vapeur d'eau à la température.

$$H_r = P_v / P_s \quad (\text{III.36})$$

- **Degré de saturation** Soit  $H_a$  la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et  $H_{as}$  la valeur de l'humidité correspondant à l'état de saturation pour la même température; on appelle degré de saturation d'un gaz, le rapport :

$$\Psi = H_a / H_{as} \quad (\text{III.37})$$

Dans le cas où  $P_v$  et  $P_s$  sont tout deux petits devant  $P$  (cas de l'air humide sous la pression atmosphérique et pour des températures peu élevées), on peut écrire :]21,22[

$$\Psi = H_a / H_{as} = P_v / P_s \quad (\text{III.38})$$

### III.5.2. Températures caractéristiques de l'air humide:

#### ❖ La température sèche de l'air:

C'est la température indiquée par un thermomètre ordinaire à l'abri du rayonnement solaire (quelque fois appelée température du bulbe sec). Elle est notée  $t_s$ . Instrument de mesure: On la mesure avec un thermomètre à mercure ou à alcool. Principe utilisé: Dilatation du corps en fonction. ]23[

#### ❖ La température humide de l'air:

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'une gaz mouillée, balayé par de l'air en mouvement et protégée du rayonnement. A la surface du thermomètre à bulbe humide, l'eau se vaporise. La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air. L'ensemble thermomètre sec plus thermomètre humide est appelé psychromètre. ]23[

#### ❖ La température de rosée (Point de rosée)

Dans un mélange de gaz et de vapeur, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas. Quand on refroidit ce mélange sous pression totale constante, la pression partielle de la vapeur demeure inchangée mais par contre, la tension maximale  $P_s$  de la vapeur diminue, tant que cette tension maximale  $P_s$  est supérieure à la pression partielle  $P_v$

de la vapeur dans le mélange, la vapeur reste sèche et l'humidité (absolue) du gaz reste constante. Pour une certaine température  $T_r$ , la tension maximale  $P_s$  devient égale à la pression partielle  $P_v$ . La vapeur devient saturante et les premières traces de phase condensée (liquide généralement) apparaissent à cette température  $T_r$  : on donne le nom de point de rosé. A la température  $T_r$  on a donc  $H_r = 1$ , un refroidissement au-dessous de  $T_r$  provoque une condensation de la vapeur (brouillard) et par la suite une diminution de l'humidité du gaz.

Tel que :

$$T_r = \frac{(\ln H_r * P_s - 6.41)}{(23.69 - \ln H_r * P_s)} \quad (\text{III.39})$$

### III.6. Caractéristiques des solides humides

**III.6.1. Description du solide humide** Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température [18]. L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses. Un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure suivante. [18]

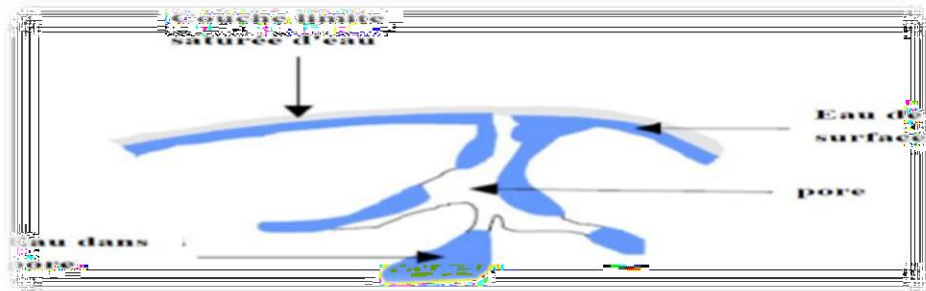


Figure III.25. Description du solide humide [18]

#### III.6.1.1. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau ou humidité à base sèche, ou plus simplement humidité s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche. [27]

$$X = (M_h - M_s) / M_s \quad (\text{III.40})$$

### III.6.1.2. Humidité relative (teneur en eau à base sèche)

L'humidité relative d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.[19]

$$X_r = (M_h - M_s) / M_h \quad (\text{III.41})$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations [17] :

$$X = X_r / (1 - X_r) \quad (\text{III.42})$$

$$X_r = X / (1 + X) \quad (\text{III.43})$$

### III.6.2. Caractéristique d'un solide poreux

La caractéristique du solide est liée à la taille des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermophysiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraits et donc une modification des structures poreuses qui rejaillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croustage, mais aussi bouchage par entraînement de soluté). Il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours de séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités.[26]

#### III.6.2.1. Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique  $\varepsilon$  (figure III.26) est définie par :

$$\varepsilon = \text{volume du pore} / \text{volume apparent de produit} \quad (\text{III.44})$$

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

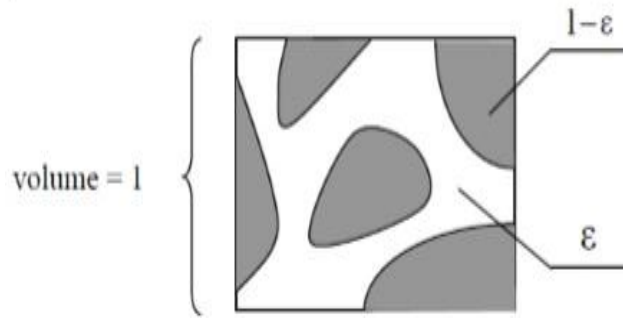


Figure III.26. Volume de contrôle microscopique [26]

### III.6.2.1.1. Mesure de l'humidité

#### III.6.2.1.1.1. Hygromètre à cheveux

Parfois appelé humidimètre permet de mesurer l'humidité relative HR de l'air. Son principe repose sur le fait que la variation de longueur d'un cheveu dépend de l'humidité de l'air ; il est peu fiable étant donné qu'il est aussi fortement sensible à la température. Cependant, on peut corriger ce problème en intégrant un système de bilame qui compense la température. On obtient alors une précision de  $\pm 7\%$  dans une gamme de 10 % à 90 % d'humidité relative. [17]



Figure III.27. Hygromètre à cheveux. [33]

#### III.6.2.1.1.2. Thermo-hygrographe

Un thermo-hygrographe est un instrument qui mesure simultanément la température et l'humidité relative de l'air ambiant en fonction du temps et les enregistre sous forme de





Figure III.28. Thermo-hygrographe. [33]

### III.7. Modes de séchage

On peut distinguer divers procédés de séchage - Les procédés mécaniques (décantation et filtration, centrifugation, compression). [18] -Les procédés thermiques, par élévation de température et diminution de la pression de vapeur et de la phase gazeuse. [18] - Les procédés chimiques, par l'utilisation des produits déshydratants (acide sulfurique  $H_2SO_4$ ), acide phosphorique ( $H_3PO_4$ ); Selon le mode de chauffage de la matière à sécher, Il existe dans la pratique 3 types de séchage:

#### III.7.1. Séchage par conduction

Dans ce mode de séchage, L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. La conduction est la transmission de la chaleur dans le matériel par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement.[18]

➤ **Loi de Fourier:**

$$P = -\lambda.S.\text{grad}(\tau) \quad (\text{III.45})$$

#### III.7.2. Séchage par convection

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur.[18] Lorsque se produit au sein du fluide des courants dû simplement aux différences des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une action mécanique (pompe, ventilateur, etc....), la convection est



dite forcée [30]. Le transfert par convection est régi par la loi de Newton ; Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivante [30] :

$$P = hc.S. (T_p - T_\infty) \quad (\text{III.46})$$

### III.7.3. Séchage par rayonnement

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement. Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible. [18]

➤ **Loi de Stefan –Boltzmann [14]**

$$Q_r = \sigma.T^4 \quad (\text{III.47})$$

### Transfert de la masse

La diffusion est le mécanisme de transport de la matière sous l'effet d'un gradient de concentration, de plus les zones concentrées en matière vers les zones moins concentrées.

➤ **Loi de Fick**

La loi de Fick caractérise la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique  $\rho_f$  dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique. [14], Le paramètre pertinent du milieu est  $D_f$  le coefficient de diffusion moléculaire :

$$J = -\rho_f D_f (d_{cm} / dX) \quad (\text{III.48})$$

### III.8. Choix du procédé de séchage

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné sont basés sur le choix de l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certains facteurs [18] :

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale
- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...). [18]

### III.9. Vitesse de séchage

On appelle la vitesse de séchage, la masse d'eau évaporée par unité de temps et par unité de surface d'évaporation du matériau. La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

-La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.

-La température, l'humidité et la vitesse de l'air sécheur. L'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors [18] :

$$R = -dM_V / S \cdot dt = M_S \cdot dX / S \cdot dt \quad (\text{III.49})$$

$$M_V = M_S \cdot dX \quad (\text{III.50})$$

$$dX = X_e - X_s \quad (\text{III.51})$$

### III.10. Conclusion

On conclue que les différentes notions de base et définition du séchage solaire et ces outils complémentaires, Donc on conclu que le séchage solaire est un domaine de recherche très large et approfondi soit de point de vu théorique ou expérimental ; et c'est l'amélioration des performances des capteurs solaires et obtenir de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique de ce systèmes.



*CHAPITRE IV :*  
*LES APPLICATIONS*

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre de l'étude expérimentale en convection naturelle et en convection forcée et L'utilisation des outils de mesures (l'acquisition, les thermocouples, l'anémomètre et le Pyranomètre) pendant l'expérimentation sur le capteur solaire à air, attendu que en premier lieu, les résultats seront présentés sous forme graphes, comparés et discutés, en un deuxième lieu la validation du modèle de simulation par les résultats expérimentaux du capteur solaire à air étudié dans les deux cas en convection naturelle et en convection forcée

### IV.2. Etude numérique du capteur solaire à air sans MCP en CN

On va simuler la variation temporelle de la température et le rendement du capteur solaire à air sans intégration de matériau à changement de phase.

#### IV.2.1. Les données météorologiques

Les données expérimentales relevées du capteur solaire à air étudié en convection naturelle de la journée 14/06//2021, conçu et réalisé dans l'URER-MS .Adrar dans le cadre d'un mémoire de master en physique énergétique et énergies renouvelables (année 2020/2021).

### IV.3. Etude expérimentale du capteur solaire en convection naturelle

#### IV.3.1. Présentation de banc d'essai du capteur solaire à air étudié sans MCP

**L'expérience1:** on a branché les thermocouples des différents composants du capteur solaire à air avec l'acquisition pour mesurer les températures du fluide entrant et sortant et la température de la plaque et la vitre .....et aussi le Pyranomètre dans le but de mesurer le rayonnement solaire incident ;ce qui illustré dans les photos suivants :



Figure IV.1. Capteur solaire à air étudié sans MCP.

#### IV.4. Les instruments de mesure expérimentale :

Nous avons relié tous les instruments de mesure a un système d'acquisition de données portables « Hydra Fluke ii » : La série Hydra offre une portabilité facile, ainsi que le conditionnement de signal intégré Fluke et le module d'entrée universelle. Cet appareil permet de facilement extraire des données dans les unités Hydra via l'interface RS-232 ou à l'aide d'un modem en mode chargement ou temps réel.

Trois modèles comportant des options de stockage de données sur carte mémoire amovible, de stockage de mémoire interne et de transfert direct de données en temps réel.



Figure IV.2. L'acquisition des données les températures (Hydre Fluke)



Figure IV.3. Image input module

#### IV.4.1. Rayonnement solaire

Nous avons fournit un Pyranomètre pour mesurer le rayonnement solaire



Figure IV.4. Le Pyranomètre mesurant le rayonnement solaire



Figure IV.5. L'anémomètre mesurant la vitesse du vent et la température ambiante

**IV.4.2. La température :**

Pour mesurer les différentes températures nous avons utilisés des thermocouples de type « J ». Définition d'un thermocouple : est un capteur servant à mesurer la température, constituée de deux conducteurs filiformes de deux métaux de natures différentes reliés par une jonction. Quand la jonction des métaux est chauffée ou réfrigérée, une tension variable est produite, La différence de température entre les deux soudures engendre une force électromotrice qui peut être ensuite transcrite en température.

**Tableau IV.1. Les différents types de thermocouple et leurs intervalles**

Calibration	Tem Range	Std. Limits of Error	Spec. Limits of Error
J	0°C to 750°C (32° F to 13382°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
K	-200°C to 1250°C (-328° F to 2282°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
E	-200°C to 900°C (-328° F to 1652°F)	Greater of 1.7°C or 0.5%	Greater of 1.0°C or 0.4%
T	-250°C to 350°C (-328° F to 662°F)	Greater of 1.0°C or 0.75%	Greater of 0.5°C or 0.4%



Figure IV.6. Image du thermocouple de type « J » utilisé

Le schéma de bancs d'essai :

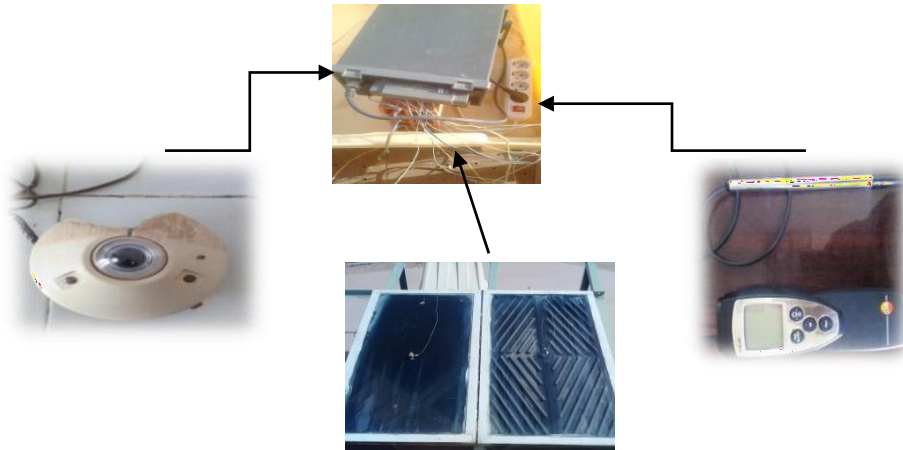


Figure IV.7. Schéma expérimentale

#### IV.5. Résultats expérimentaux et discussions

Afin de connaître l'efficacité du système réalisé, nous avons effectué des tests sur le concentrateur. En état stationnaire (sans poursuite solaire), orienté vers le jour 15/06/2021. Au cours de ces tests expérimentaux, nous avons mesuré les températures dans journée : la température du fluide caloporteur (air), entrant et le sortant ( $T_e$ ,  $T_s$ ), la température ambiante ( $T_{amb}$ ), le rayonnement solaire directe ( $G_h$ ) et plaque absorbant ; de 2 capteurs solaires à air plan (simple et chicaun)

##### Expériences

Calcule le flux :

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T.$$

Q: Flux thermique (utile).

$$\dot{m} = 0.0429 \text{ Kg/s}$$

$C_p$  : Chaleur spécifique de l'air 1005 J/kg. K°

$\Delta T$  : différent de température ( $T_s - T_e$ )



Tableau. IV. 2 : mesures température d'entrée et sortie du Concentrateur en fonction du temps durant le jour 14/06/2021 ; par capteur solaire simple et chicaun à air

Temps	Tech	Tch	Tpch	Tvch	Tsch	Tvs	Tps	Tss	Tes	Gh(w/m <sup>2</sup> )
8,65	43,5626	43,6872	38,1479	42,6	38,8305	0	0,0014	0		487,116
8,66667	38,6781	49,9243	49,9443	40,7646	46,2499	41,6667	51,3602	42,1284	37,2321	489,853
8,68333	39,0443	50,3082	50,388	41,0301	46,7744	41,932	51,7239	42,5718	37,8396	492,59
8,7	39,6325	50,6136	50,7133	41,1566	45,7412	42,0785	52,049	42,3184	37,404	495,326
8,71667	39,7751	50,7752	50,855	41,2189	44,7033	42,1608	52,1906	41,7661	37,2654	497,515
8,73333	39,5906	51,1302	51,1701	41,3753	45,8593	42,3371	52,6051	43,8625	37,7437	500,252
8,75	40,4265	51,4228	51,5822	41,7295	45,4529	42,6511	52,9372	42,888	37,7371	498,61
8,76667	39,1124	51,5523	51,6121	41,6793	44,4827	42,7411	53,1862	42,2408	37,6466	507,915
8,78333	39,9669	52,0025	52,0822	41,9716	47,0737	42,8931	53,5563	43,2349	38,0601	506,273
8,8	39,9284	52,4027	52,5222	42,2939	47,4749	43,2151	53,9961	44,8295	38,3429	508,462
8,81667	39,8612	52,6945	52,834	42,407	47,6477	43,4483	54,3872	44,3797	38,2154	507,915
8,83333	39,1788	52,8338	52,9533	42,4669	47,8872	43,5082	54,4865	43,1419	38,175	512,841
8,85	40,9441	53,1328	53,1527	42,5672	46,7886	43,5484	54,5265	43,2626	38,0346	509,557
8,86667	40,7212	53,4092	53,3893	42,665	46,7862	43,5661	54,8227	43,6634	38,1126	512,841
8,88333	40,5372	53,804	53,804	42,8017	49,1592	43,8028	55,257	45,1386	38,4705	515,577
8,9	41,1387	54,1026	54,0827	42,9819	47,7017	43,9629	55,3564	43,5815	38,2094	517,219
8,91667	41,3374	54,4394	54,3797	43,1805	46,8809	44,1613	55,8123	44,4386	38,6495	522,145
8,93333	40,9515	54,713	54,6731	43,3155	48,9928	44,4164	56,2249	44,6402	38,7247	523,787
8,95	40,1821	55,0639	55,0042	43,5684	51,1799	44,6891	56,6551	45,7592	38,7976	529,807
8,96667	41,012	55,3103	55,1909	43,6563	48,5141	44,7969	56,9809	45,6143	38,6649	534,186
8,98333	39,978	55,3787	55,1201	43,625	49,1816	44,8257	57,1486	44,0703	38,5532	534,733

17,61667	47,8612	66,4268	62,3669	50,9145	56,6887	52,1902	64,289	55,6732	47,8012	183,353
17,63333	48,3775	66,2657	62,1261	50,8119	58,7723	51,9083	64,0286	56,3267	47,5587	179,522
17,65	48,5949	66,1448	62,0843	50,8296	58,4722	51,6869	63,7491	56,4087	47,5565	157,629
17,66667	48,8231	66,0148	61,9539	50,7783	57,8847	51,4164	63,5991	56,2672	47,3652	114,39
17,68333	48,4501	65,8232	61,9206	50,8445	58,8644	51,323	63,3875	57,2521	47,012	103,991
17,7	48,1747	65,4908	61,6867	50,6293	57,1201	50,9882	63,0943	54,4795	46,9362	108,917
17,71667	48,7703	65,3093	61,5842	50,5262	55,5258	50,5461	62,8729	53,368	46,7729	113,843
17,73333	48,2808	65,0219	61,3954	50,3363	56,331	50,0571	62,6644	54,6047	47,0424	131,357
17,75	48,3104	64,8137	61,2066	50,2462	57,8712	49,6876	62,3767	55,2993	46,9921	106,728
17,76667	47,7633	64,4494	60,9012	50,0589	55,9748	49,4403	62,0715	51,4895	47,0242	137,925
17,78333	47,9317	64,0816	60,5129	49,7881	56,7986	49,2293	61,7627	52,4146	46,5131	101,802
17,8	48,1208	63,8334	60,3436	49,5979	53,1863	49,0591	61,4745	52,9681	46,1827	121,505
17,81667	47,6056	63,5007	60,0897	49,4025	57,2096	48,9036	61,1612	51,3318	45,827	122,6
17,83333	47,8911	63,2092	59,897	49,2886	57,2552	48,6898	60,8892	53,2144	46,2327	112,201
17,85	48,6705	62,9919	59,7587	49,1695	53,7545	48,5308	60,6915	53,4659	45,9135	133,547
17,86667	47,7496	62,7319	59,5976	49,1073	55,046	48,4884	60,3717	54,6795	46,3109	128,073
17,88333	47,8529	62,5965	59,5613	49,2105	56,0441	48,6915	60,2362	54,818	46,7941	126,979
17,9	47,5398	62,3453	59,3891	49,217	55,8915	48,7979	59,9846	53,4014	46,6407	116,58
17,91667	47,7342	62,1218	59,1454	49,1118	54,1549	48,7725	59,7808	53,1828	46,4754	117,127
17,93333	47,3905	61,9592	59,0222	49,0679	55,4245	48,7884	59,5385	54,2502	46,6512	118,769
17,95	47,0769	61,7271	58,8097	49,0339	55,1321	48,7744	59,3062	54,2563	46,917	109,464



IV.5.1. Les températures expérimentales du capteur solaire simple à air en CN

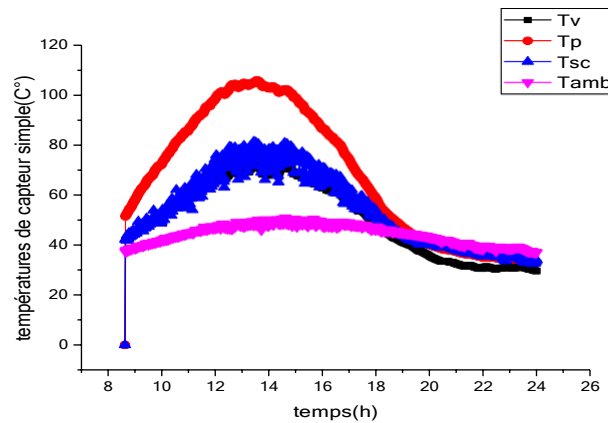


Figure IV.8. La variation temporelle des températures expérimentales

La figure IV.8 montre l'évolution instantané des températures ( $T_{vs}$ ,  $T_{ps}$ ,  $T_{ss}$  et  $T_{es}$ ) mesurées expérimentalement des différents composants du capteur solaire à air en CN en fonction de temps (heurs) dans un jour 14/06/2021, On observe qu'il y a un grand écart entre les deux températures ( $T_{ps}$  et  $T_{es}$ ) où la température  $T_{ps}$  a atteint  $105C^\circ$ , la température ( $T_{es}$ ) varie entre  $(40-50) C^\circ$ , et observe que la  $T_{ss}$  et  $T_{vs}$  même l'évolution atteindre a  $80(C^\circ)$  ; on note que l'évolution des températures très élevée ( $T_{ps}$  et  $T_{ss}$ ) doit accepter maximum de rayonnement solaire

IV.5.2. Les températures expérimentales du capteur solaire du chicaun à air en CN

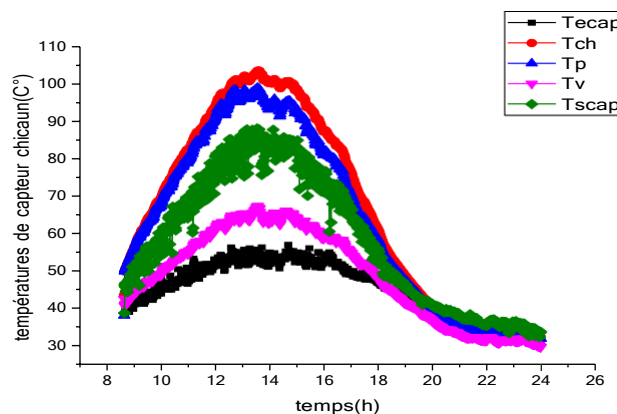


Figure IV.9. La variation temporelle des températures expérimentales

La figure IV.9 montre l'évolution instantané des températures ( $T_{vs}$ ,  $T_{ps}$ ,  $T_{ch}$ ,  $T_{ss}$  et  $T_{es}$ ) mesurées expérimentalement des différents composants du capteur solaire à air en CN en fonction de temps (heurs) dans un jour 14/06/2021, On observe qu'il y a un grand écart des températures ( $T_{pch}$ ,  $T_{ch}$ ) sont presque semblables et prennent la plus grande valeur varie

(95C°-105C°),et observe que un petite écart des températures(Tech et Tvch) est presque semblables d'évolution varie (45C°-65C°), et la température de Tsch est observe moyenne évolution atteindre a 85C°; on note que l'évolution des températures très élevée (Tpch,Tch et Tsch) doit accepter maximum de rayonnement solaire à l'intervalle de temps[ ].

**IV.5.3.Le rayonnement solaire du capteur solaire à air expérimental**

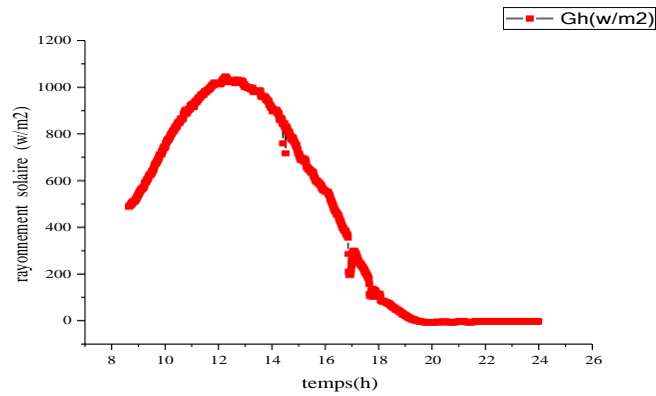


Figure IV.10. La variation temporelle de rayonnement solaire expérimentale

La figure (IV.10) représente la variation de l'éclairement solaire en fonction du temps de la journée 14/06/2021 du site de l'étude (Adrar).On observe que le rayonnement solaire prend la forme elliptique au cours de la journée, attendu qu'il prend la valeur maximale 1000w/m² qui correspond à (temps) ; puis elle diminue.

**IV.5.4.Le flux de chaleur utile (puissance utile) expérimental en CN**

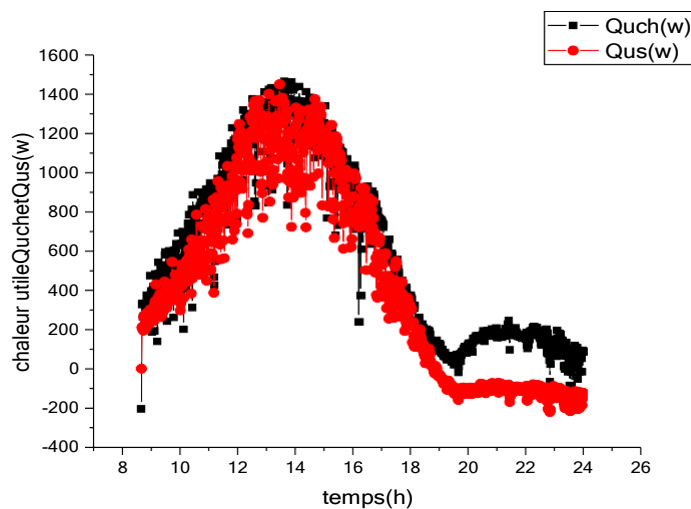
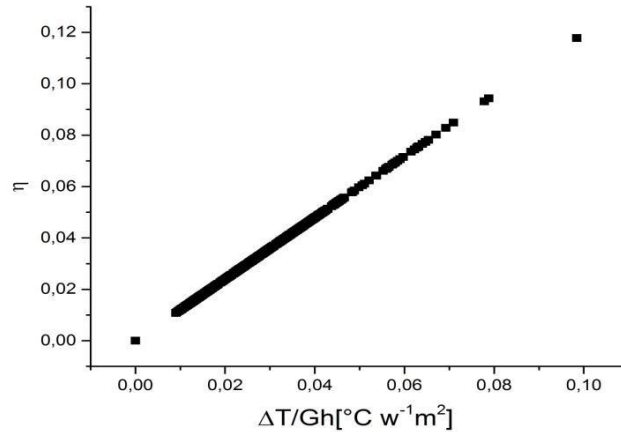


Figure IV.11.La variation de puissance utile de capteur solaire du simple et chicaun

La figure (IV.11) représente la variation horaire de la température de la vitre d'un capteur solaire étudié en convection naturelle, où on remarque que la température du vitrage

commence de se chauffer à partir de (temps) d'une valeur minimale environ 50°C jusqu'à la valeur maximale 65 °C dans l'intervalle [11h-17h], puis elle diminue; à cause de la diminution de la quantité de chaleur rayonnée par le soleil. et observée que les puissances utile semblable.



**IV.5.5. Rendement expérimental en convection naturelle**

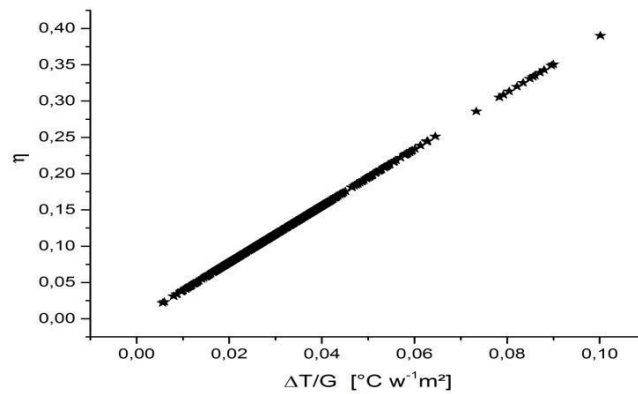


Figure IV.12. La variation instantanée du rendement expérimental du capteur chican en CN

Figure IV.13. La variation instantanée du rendement expérimental du capteur simple en CN

On observe que le rendement commence varie au cours la journée pour atteindre la valeur maximale environ  $0.40.\eta=f(\Delta T/Gh)$

La figure (IV.12) représente l'évolution instantané des températures mesurées expérimentalement des différents composants du capteur solaire à air en convection naturelle ;on note que le graphe sont forme de ligne droite croissant en fonction de variation de température par le rayonnement, et rendement de capteur chicaun est double de capteur simple parce que la température de vitre est très élevée (acceptée les valeurs de rayonnement maximum).

#### IV.6. Conclusion

Au sein de l'unité de recherche et énergies renouvelables en Adrar, nous avons étudié du capteur solaire plan à air, fonctionnant à convection naturelle puis en convection forcée, les températures obtenues par ce capteur solaire à air étudié étaient suffisantes (acceptables) pour le séchage de plusieurs produits.

A travers les résultats d'expérimentale présentés dans ce chapitre, qui étaient attendus et acceptés, nous concluons que notre concentrateur solaire qui a été réalisée valide et bon à utiliser pour séchoir solaire



*CONCLUSION GENERALE*

### Conclusion générale

Nous concluons de cette étude la contribution à l'amélioration des performances du capteur solaire à air plat pour le fonctionnement du séchoir solaire, notamment après l'absence du soleil. Par simulation et expérimentations sur le capteur solaire, en utilisant ou sans changement d'état matériaux afin de stocker l'excès d'énergie thermique latente disponible pendant la journée.

A travers les résultats obtenus, nous concluons que la température acquise au niveau du capteur solaire alimenté en matériaux à changement d'état est meilleure que la température au niveau du capteur solaire ordinaire ; Grâce à l'étude, le captage solaire normal par rapport au deuxième captage solaire que la température du modèle simulé est approprié au modèle expérimental en termes de comparaison (température de la plaque et température de la bouteille (où la durée de fonctionnement était de 3 heures et demie la nuit. Où la température est) 56 degrés Celsius) qui est une température appropriée pour le fonctionnement du séchoir solaire

On peut donc résumer que l'utilisation de matériaux à changement d'état à une température de fusion aide et convient au séchage des aliments pendant la période nocturne



*REFERENCES*  
*BIBLIOGRAPHIQUES*

- [1] Mihoub, Sofiane. Contribution à la modélisation et à l'optimisation des concentrateurs solaires motorisés appliqués aux systèmes thermosolaires. Diss. 30-10-2017.
- [2] Hamidatou, Abderrezzak, and Seddik Bouregba. Simulation d'un système CSP (cylindro-parabolique) à production d'électricité. Diss.
- [3] [http://www.ac\\_grenoble.fr/college/mezenc.pouzin/MG/Fonctionnement\\_D\\_une\\_Eolienne.gif](http://www.ac_grenoble.fr/college/mezenc.pouzin/MG/Fonctionnement_D_une_Eolienne.gif)
- [4] cours Biomasse année 2014/2015 Dr kalloum.S
- [5] organique ; les matériaux sont d'origine vivante
- [6] Mémoire de thème ETUDE COMPARATIVE DE L'ALIMENTATION EN ELECTRICITE D'UN SITE ISOLE PAR VOIE CLASSIQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CAS DE WILYA DE BISKRA LABRECH-TOLGA
- [7] Physique de la conversion d'énergie jean –Marcel Rax
- [8] Comment transforme-t-on la biomasse en énergie? (Moussi Karima) article
- [9] Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications", Applied Thermal Engineering 2003;23:251–283
- [10] Dincer, I., Rosen M.A., "Thermal Energy Storage Systems and Applications", Wiley and Sons Publishing Company, New York, USA 2010.
- [11] Lane G.A., "Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Volume 1: Background and Scientific Principles". CRC Press (May 2, 1983)
- [12] Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D., "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13: 318-345
- [13] Buddhi D., Sawhney, R.L., "Proceeding of thermal energy storage and energy conversion", School of energy and environmental studies. Devi Ahilya University, Indore, India. February 24–25, 1994
- [14] Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A.K., Hallaj S.A., "A review on phase change energy storage: materials and applications", Energy Conversion and Management, 2004;45:1597-1615
- [15] Tyagi V.V., Buddhi D., "PCM thermal storage in buildings: A state of art Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007;11:1146-1166.
- [16] W. Streicher, "Phase Change Material Heat Storage: New Materials and New Solar and Other Applications", Graz University of Technology, Institut of Thermal Engineering, IEA Task 32 Subtask C leader (PCM), 2004.
- [17] <https://www.google.dz/search>
- [18] A.Degla.R.Sioud, « séchage solaire des dattes deglet-nour : simulation numérique », mémoire master académique, domaines sciences thermiques, 6/6/2015, p.3-16.
- [19] Djabouabdellah Abdelmadjid, « Etude et mesure des données solaires d'un Gisement solaire dans une zone isolée », Université d'Adrar Ahmed draia, 2014/2015.



- [20] Amraoui Mohammed Amine, « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité », mémoire de magister en génie mécanique, 2011/2012, p.45-4664-70
- [21] Ben hamza Abderrahmane, « Simulation Numérique d'un capteur solaire plan utilisant des Matériaux à changement de phase », Université KASDI Merbah d' Ouargla, Belkhir ,Soutenu Publiquement , 31/05/2016,p. 5-21
- [22] Younsi sidi ali, « Etude bidimensionnelle d'un capteur solaire à tube sous vide avec un échangeur en épingle » , Mémoire de magister, Université Hassiba Benbouali Chleff, 2011, p. 14-18.
- [23] Bourgueba djaoued, BEKKOUCHE Ismail, « Simulation Numérique du stockage de l'énergie par Chaleur Latente »,Université Abou Baker Belkaid-Tlemcen, 2013-2014, p. 2727-29-30
- [24] Z.Belkacem, « Etude comparative de différentes configurations de capteur solaire plan à air »,Université d'Adrar, Faculté des sciences et de la technologie, Mémoire Master,2013/2014,p.33-59
- [25] <https://www.google.com/search>, la date 31/5/2018,l'heure 18h32.
- [26] Houhou Hatem , « Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire De Certains Produits Agro-alimentaires », Mémoire De Magister En Génie Mécanique , Université De Biskra, p 9-35-39.
- [27] F. Khaldia, Z. Boussaid , « Détermination expérimentale et modélisation des isothermes de sorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) à différentes températures »,mémoire master académique, 2017 université Ahmed draia Adrar p.14.
- [28] <http://www.youtube.com>
- [29] A. Boulemtafes , D. Semmar, « Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect »,Rev énergies renouvelables,(1999)97-100.
- [30] Boumediene Touati, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha virida*) »,Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen , doctorat,11/2008
- [31] A.Ouahab, M.Elkouzani , « Etude Théorique et Expérimentale de deux types de Capteurs Solaires thermiques plans sur Site d'Adrar »,master en physique Energétique, 06/2015,
- [32] <https://www.google.com/search>. Université d'Adrar
- [33] <https://www.google.dz/>
- [34] Tyagi V.V., Pandey A.K., Giridhar G., Bandyopadhyay B., Park S.R., Tyagi S.K., “Comparative study based on exergy analysis of solar air heater collector using thermal energy storage”, International Journal of Energy Research 2012;36:724–736.

- [35] Esakkimuthu S., Hassabou A.H., Palaniappan C., Spinnler M., Blumenberg J., Velraj R., “Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications” , Solar Energy 2013;88:144–153.
- [36] Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijenberg D., Mistriotis A., von Zabeltitz C., Gratraud J., Russo G., Suay-Cortes R., “Review of structural and functional characteristics of greenhouses in the European Union countries: Part I, Design requirements”, Journal of Agricultural Engineering Research 2000;75:1–16.
- [37] Sonneveld, P. J., Holterman H.J., Swinkels G.L.A.M., Tuijl B.A.J. van, Janssen H.J.J., Th. H.Gieling, “PV system intergrated in a solar greenhouse with NIR selective coating”, Wageningen UR Greenhouse Horticulture (1999)
- [38] 2009 Créateur: Florian CRONFALT Rédacteurs: Florian CRONFALT, Florian MULLER, Donovan OLIVER site créé en Novembre 2008
- [39] (en) Duffie, John A. et Beckman, William A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, Inc., 1991, 2e éd., 919 p.
- [40] lillustrations de ce diaporama proviennent de documents techniques édités par les partenaires et les constructeurs suivants : Ademe, Atlantic, Clipsol, EDF, ESTIF, Giordano Industries, INES Education, Viessmann
- [41] Pierre Odru-Le stockage de l'énergie



*ANNEXE*

## Annexe 1 : les modes de transfert de chaleur

**La conduction :** transport d'énergie dans la matière sans déplacement de matière

Transport par les électrons (conducteur) ou les phonons (isolant)

-nécessite un milieu solide de transmission

-transmission faible dans les gaz

La Loi de Fourier:

$$\vec{\phi} = -\lambda \vec{\text{grad}} \tau$$

**La convection :** transport d'énergie dans la matière avec déplacement de matière Transport par écoulement de fluide (liquides, gaz) / différence de masse volumique

-nécessite un milieu fluide de transmission

C'est le transfert de chaleur par des courants de fluides, liquides ou gazeux.

Ce phénomène peut se développer naturellement, les différences de potentiel motrices étant des différences de densité: c'est la CONVECTION NATURELLE.

On peut aussi le générer mécaniquement à l'aide de pompes ou de ventilateurs: c'est la CONVECTION FORCEE.

Convection = transfert de chaleur par déplacement de fluide mécanisme de transfert décrit par la loi de Newton

$$\Phi = hS(T_p - T_\infty)$$

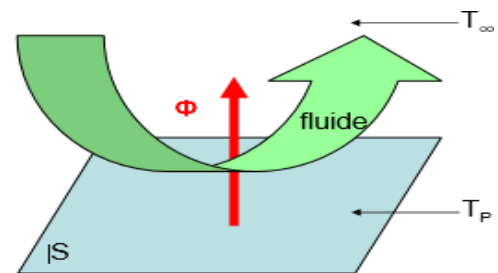
$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par convection [W]

$h$  : coefficient de transfert [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]

$T_p$  : température de la surface d'échange [K, °C]

$T_\infty$  : température du fluide loin de la surface d'échange [K, °C]

$S$  : aire de la surface d'échange solide/fluide [ $\text{m}^2$ ]

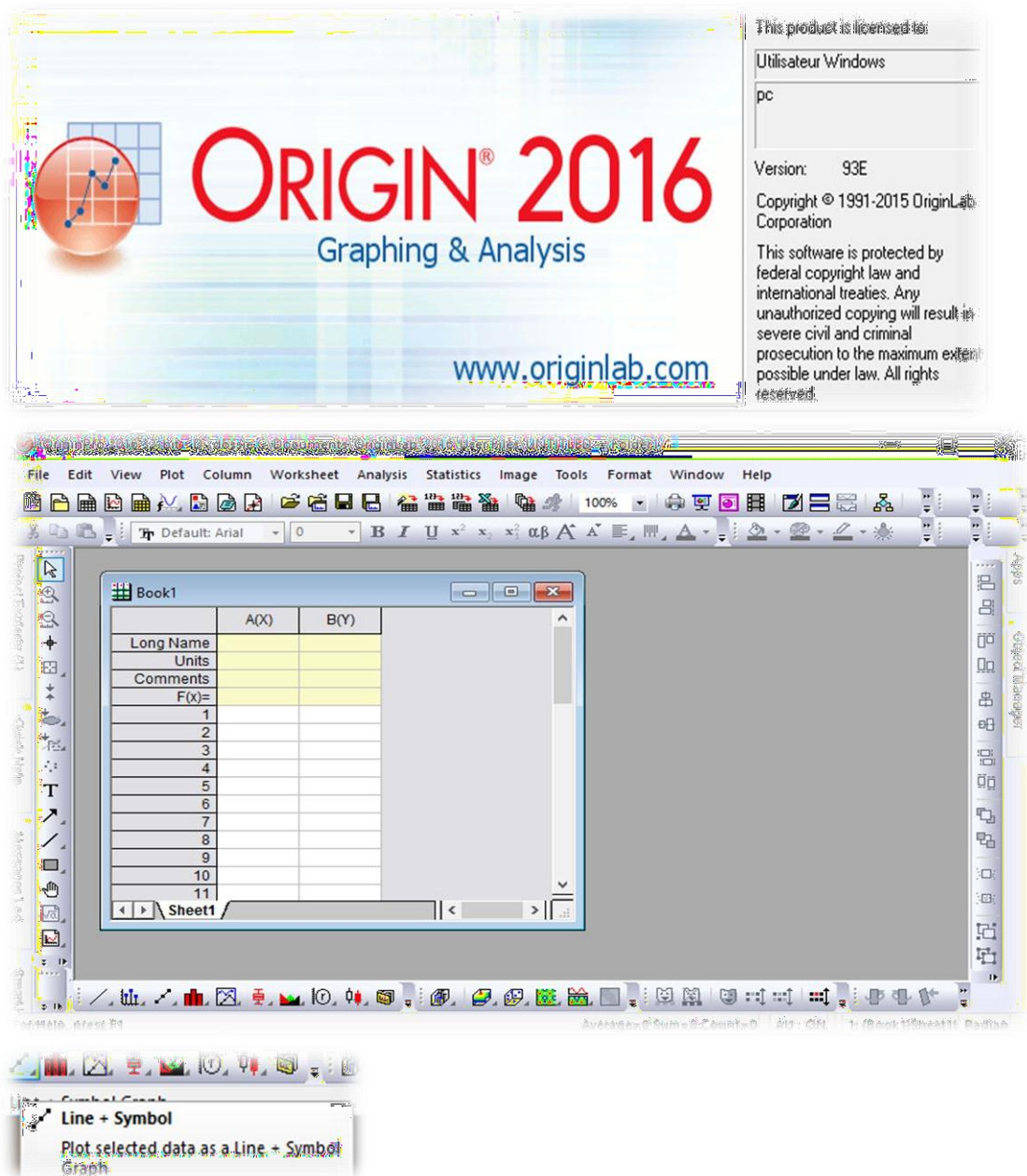


**Le rayonnement :** transport d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques pas de déplacement de matière pas de contact entre les objets ou milieux qui échangent l'énergie

-pas de milieu de transmission nécessaire (dans le vide, ça marche aussi !)

## Annexe 2 : origin

La fenêtre d'origin



## Annexe 3 : programme MATLAB

Programme intrées:

%bilans d'énergies d'un capteur solaire

%passage d'aire au- dessous de la plaque

%par la methode des différences finis implicites

```
function [Tvex, Tpex, Tfsex, Tfex]=chang_t[t, Tv0, Tp0, Tfs0, Tf0]
clc
clear all
A=[];
```

```

b=[];
AA=xlsread('T22.xlsx');
mmax=922;
t=AA(:,1);
Gh=AA(:,14);
Tvex=AA(:,7);
Tpex=AA(:,8);
Tfsex=AA(:,9);
Tfex=AA(:,10);
Tam=AA(:,11);
lv=0.93;
ev=0.0032;
Lv=0.81;
Cv=840;
la=0.14;
ea=0.001;
La=401;
Ca=386;
li=0.6;
Li=0.05;
ei=0.03;
d=1.93;
D=0.935;
j=5.67*10^-8;
BB=30;
Uv=1.7;
Tc=Tam+6;
Ts=Tam+2;
Tv=Tvex;
Ta=Tam;
rrr=((Tv).^2-(Tc).^2);
aaa=((Ta).^2+(Ts).^2);
hrcv=j*lv*[(Tv+Tc)-rrr.*(Tv-Tc)]/(Tv-Ta);
hris=aaa.*[(1+cos(BB))*(Ta+Ts)*(j*li/2)];
hd=Li/ei;
hc=2.8+3*Uv;
%plot(t,Gh)
%hcva=Hconv(Tv,Ta)negligable
%hcvf=Hconv(Tv,Tf)negligable
%hcfp=Hconv(Tf,Tp)negligable
A(1,1)=hcva+hcvf+hrcv;
A(1,2)=-hcvf;
A(1,3)=-hrvp;
A(1,4)=0;
b1=lv*Gh+hcva*Ta+hrcv*Ta;
A(2,1)=-hcvf;
A(2,2)=hcvf+hcfp;
A(2,3)=hcfp;
A(2,4)=0;
b2=0;
A(3,1)=-hrvp;
A(3,2)=-hcpf;
A(3,3)=hdpi+hrvp;
A(3,4)=hdpi;
b3=ep*Gh;
A(4,1)=0;
A(4,2)=0;
A(4,3)=-hdpi;
A(4,4)=hdpi+hcva+hris;
b4=hcva*Ta+hris*Ts;
X0=[Tv0,Tp0,Tfs0,Tf0];
%s=gaus_sied(4);
s=jordan(4);
Tv=s(1);

```

```

Tp=s(2);
Tfs=s(3);
Tf=s(4);
%%%%%%%%%%

```

### programme principale :

```

Tvv=[];Tff=[];Tpp=[];Tfss=[];Tamb=[];tim=[];
A=xlsread('T22.xlsx');
mmax=922;
t=A(:,1);
Gh=A(:,14);
Tvex=A(:,7);
Tpex=A(:,8);
Tfsex=A(:,9);
Tfex=A(:,10);
Tam=A(:,11);
lv=0.93;
ev=0.0032;
Lv=0.81;
Cv=840;
la=0.14;
ea=0.001;
La=401;
Ca=386;
li=0.6;
Li=0.05;
ei=0.03;
d=1.93;
D=0.935;
j=5.67*10^-8;
B=30;
Uv=1.7;
Tc=Tam+6;
Ts=Tam+2;
Tv=Tvex;
Ta=Tam;
Tv0=Tam;
Tf0=Tam+1;
Tp0=Tam+3;
Tfs0=Tam+2;
for t=1:length(t)
    %[Tv,Tf,Tp,Tfs]=chang_t(t,Tv0,Tf0,Tp0,Tfs0);
    [Tvex,Tpex,Tfsex,Tfex]=chang_t(t,Tv0,Tp0,Tfs0,Tf0)
    p=Tp-Tp0;
    Tv0=Tv;
    Tp0=Tp;
    Tf0=Tf;
    Tfs0=Tfs;
end
Tvv=Tv0;
Tff=Tf0;
Tpp=Tp0;
Tfss=Tfs0;
plot(tim,Tvv,'g',tim,Tff,'m',tim,Tpp,'b',tim,Tamb,'r',tim,Tfss,'c');
xlabel('temps local en heure');
ylabel('temperature C°');
title('T');

```