



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1

Faculté de technologie

Département des énergies renouvelables



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : conversion thermique

**Optimisation d'un champ de captation de grande
capacité destiné au chauffage solaire.**

Par

BENHETIT Youcef

Devant le jury composé de :

Dr M.Mustapha	Professeur	U. Blida 1	Président
Dr N. Khelalfa	MCB	U. Blida 1	Examinatrice
M Kaci.Karim	MAA	U. Blida 1	Promoteur

2019/2020

Résumé

Le but de ce travail consiste à une étude d'une installation de chauffe-eau solaire à grande capacité dans différentes zones climatiques en Algérie, l'installation se compose essentiellement d'un champ de captation des capteurs thermique plan réalisé au CDER.

La partie dimensionnement a été réalisée par la méthode F-chart ou nous avons déterminé la surface de captation ainsi que les paramètres optimums de l'installation.

La simulation de cette installation a été réalisée à l'aide du logiciel **TRNSYS** afin d'obtenir la meilleure configuration. Les résultats ont montré que la configuration de quatre capteurs en série était le meilleur choix et la zone de Ghardaia était le meilleur site.

Mots clés :

Chauffage solaire, optimisation, configuration, TRNSYS.

Résumé en arabe

الهدف من هذا العمل هو دراسة تركيب سخانات المياه بالطاقة الشمسية ذات السعة الكبيرة في مناطق مناخية مختلفة في الجزائر، يتكون التركيب بشكل أساسي من حقل تجميع للمجمعات الحرارية المسطحة. حيث حددنا مساحة سطح الالتقاط بالإضافة إلى المعطيات المثلى f-chart تم تنفيذ جزء التحجيم باستخدام طريقة للتثبيت.

للحصول على أفضل تكوين. وأظهرت النتائج أن أربع TRNSYS تم إجراء محاكاة التثبيت باستخدام برنامج ملتقطات متسلسلة على التوالي كان الخيار الأفضل وأن منطقة غرداية كانت المنطقة الأفضل للتثبيت.

الكلمات المفتاحية

TRNSYS، المسخين الشمسي، التحسين، التكوين،

Abstract

The object of this work consists of a study of a large capacity solar water heater installation in different climatic zones in Algeria, the installation consists essentially of a the flat-plate collector.

The sizing part was carried out by the F-chart method where we will determine the capture surface as well as the optimum parameters of the installation.

The simulation of this installation was carried out using the TRNSYS software in order to obtain the best configuration. The results showed that the configuration of four capeturs in series was the best choice and the Ghardaia site was the best site for installation.

Keywords

Solar heating, optimization, configuration, TRNSYS.

Dédicaces

Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange à ALLAH le tout puissant.

*À la prunelle de mes yeux qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse,
qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite : ma Mère*

*À celui qui m'a donné un sens à ma vie durant toutes les années des études :
mon Père*

À toute la famille Benhatit et la famille Boussofa

À tous mes amis, que dieu les garde et les protège

*À mes camarades de la filière Énergies Renouvelables
À tous ceux que j'aime*

Je dédie ce modeste travail

Remerciements

En préambule à ce mémoire

*Je remercie ALLAH qui m'a aidé et m'a donné la patience et le courage
durant ces longues années d'étude.*

*En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur Ms KACI Karim pour ses
précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir
accepter d'examiner ce document et d'évaluer mon travail.*

*Mes remerciements vont également à tous mes enseignants de l'Université
Saâd Dahlab de Blida durant les cinqs années d'études.*

Nomenclature - Symboles-Acronymes

Symbole	Signification	Unité
Q_u	Energie utile récupérée par le fluide caloporteur	[W]
Q_u'	Energie utile transmise au fluide stocké	[W]
Q_{aux}	Energie auxiliaire	[W]
Q_l	Besoins calorifique de l'eau chaude	[W]
Q_s	Perte thermique de la cuve de stockage	[W]
\dot{m}	Débit massique	[kg.s ⁻¹ .m ⁻²]
cp	Chaleur spécifique de l'eau	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
M	Masse de l'eau	[kg]
$(\dot{m}cp)_s$	Débit spécifique de la cuve de stockage	[W.°C ⁻¹]
$(\dot{m}cp)_c$	Débit spécifique du capteur	[W.°C ⁻¹]
$(\dot{m}cp)_{min}$	Débit spécifique minimum	[W.°C ⁻¹]
H_β	Irradiation sur un plan incliné	[Wh.m ⁻²]
A_c	Surface de captation	[m ²]
F_r	Facteur de conductance	-
F_r'	Facteur de correction de l'échangeur de chaleur	-
U_g	Pertes thermiques globales	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
$(\tau\alpha)_e$	Coefficient de transmission- absorption effectif	-
$(UA)_s$	Coefficient de pertes de la cuve de stockage	[W.°C ⁻¹]
$F_r(\tau\alpha)_e$	Rendement optique du capteur	-
$F_r U_g$	Pertes thermiques globales du capteur	-

$F_{av}(\tau\alpha)$	Rendement optique du test	-
$F_{av} U_g$	Pertes thermiques globales du test	-
r	Rapport de correction approchée	-
f	Fraction solaire	[%]
$X ; Y$	Nombres adimensionnels	-
η_0	Rendement optique	-
β	Inclinaison du capteur	[degré]
γ	Déviation azimutale	[degré]
T_e	Température d'entrée de l'eau	[°C]
T_s	Température de stockage	[°C]
T_r	Température de réseau	[°C]
T_a	Température ambiante	[°C]
T_d	Température diurne	[°C]
$T_{réf}$	Température de référence (100)	[°C]
dt	Pas de temps	[heure]

Sommaire

Introduction Générale	12
Chapitre 1 : Etude Bibliographie.....	14
2.1. INTRODUCTION :.....	14
2.2. DIFFERENTS TRAVAUX PORTANTS SUR LES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE SOLAIRES COLLECTIVES :.....	14
2.2.1. <i>Le solaire thermique au niveau mondial</i>	18
2.2.2. <i>Répartition de la capacité installée par type de capteurs</i> :.....	19
2.2.3. <i>Potentiel du solaire thermique dans les processus industriels</i> :.....	20
2.2.4. <i>La demande de la chaleur industrielle</i> :.....	20
2.2.5. <i>Le niveau de température des différents processus des secteurs industriels</i> :.....	21
2.3. CHAUFFAGE SOLAIRE	22
2.3.1. <i>Capteur solaire</i>	22
2.3.2. <i>Capteur à tube sous vide</i>	22
2.3.3. <i>Capteur Plan</i>	25
2.4. DIFFERENT TYPE DES INSTALLATIONS SOLAIRES COLLECTIVES :.....	27
2.4.1. <i>Les chauffe-eau monobloc</i>	27
2.4.2. <i>Les chauffe-eau à thermosiphon</i>	28
2.4.3. <i>Les chauffe-eau à circulation forcée</i> :.....	29
2.4.4. <i>Systèmes intégrés de capteur ou de stockage</i>	30
2.4.5. <i>Systèmes de circulation directe (actifs)</i>	31
2.4.6. <i>Systèmes de chauffage indirect à eau (actifs)</i>	32
2.4.7. <i>Éléments de base d'un système solaire à circulation forcée</i>	33
2.5. Conclusion	36
Chapitre 2 : Modelisation mathematique	37
3.1. Introduction.....	37
3.2. Presentation de la methode F-Chart.....	37
3.3. Conclusion	40
Chapitre 3 : Résultats et discussion	41
4.1. Introduction.....	41
4.2. SIMULATION	41
4.3. Objectif de la simulation.....	41
4.4. Simulation du système	41
4.4.1. <i>Présentation du logiciel</i>	41
4.4.2. <i>Choix des zones climatique</i>	42
4.4.3. <i>Données de la simulation de l'installation</i>	43
4.5. Présentation du schéma de la simulation	44
4.6. Choix de la période de simulation	46
4.7. Variation du débit de circulation	46
4.7.1. <i>Cas de Cinq capteurs en série</i>	46
4.7.2. <i>Cas de 4 capteurs en série</i>	48
4.8. Variation des différentes configurations	51
4.9. Variation des différentes zone climatiques	53
4.10. Conclusion	54
Conclusion générale	55

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1-1 : Puissance installée dans le monde par région économique	17
Figure 1-2 : Répartition de la capacité installée par type de capteurs en 2018	18
Figure 1-3 : Part de demande de la chaleur industrielle par niveau de la température.....	19
Figure 1-4 : capteurs à circulation directe.....	22
Figure 1-5 : Le capteur à tube sous vide à "Caloduc".....	24
Figure 1-6 : Capteur à bouteilles à tubes thermos.....	24
Figure 1-7 : les Composants d'un capteur plan.....	26
Figure 1-8 : Les chauffe-eau monobloc.....	26
Figure 1-9 : schéma d'un système à thermosiphon.....	27
Figure 1-10 : système à circulation forcée.....	28
Figure 1-11 : Systèmes intégrés de capteur ou de stockage.....	39
Figure 1-12 : schéma de principe d'une boucle de recirculation appliquée aux systèmes de chauffage solaire dans un bâtiment commercial.....	31
Figure 1-13 : Le vase d'expansion.....	33
Figure 1-14 : Photo d'un purgeur.....	33
Figure 1-15 : La pompe de circulation.....	34
Figure 1-16 : type de régulation.....	34

Chapitre 2

Figure 2-1: Familles de courbes du taux de satisfaction	38
---	----

Chapitre 3

Figure 3-1: Exemple d'un assemblage TRNSYS	41
Figure 3-2: Modèle du système du TRNSYS (4 en série)	44
Figure 3-3: Modèle du système du TRNSYS (5 en série).....	45
Figure 3-4: La variation de rendement en fonction de temps	48
Figure 3-5: La variation d'énergie utile en fonction de temps	49
Figure 3-6: La variation de rendement en fonction de temps	50
Figure 3-7: La variation d'énergie utile en fonction de temps	51
Figure 3-8: La variation de rendement en fonction de temps	53
Figure 3-8: La variation d'énergie utile en fonction de temps	54
Figure 3-8: La variation d'énergie utile des sites	55

Liste des tableaux

Chapitre

Tableau 1-1 : les processus utilisés classés selon le niveau de température utilisé	
.....	20

Introduction Générale

L'énergie est un facteur indispensable dans l'économie mondiale. La croissance des pays développés s'est fondée depuis 150 ans sur un modèle de forte consommation d'énergie, apparu avec l'évolution industrielle du charbon, puis étendu à l'échelle de la planète avec la diffusion des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autonomes. Elles présentent en outre l'avantage additionnel de se compléter entre elles.

L'Algérie, grâce à sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation de l'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement moyenne annuel de 3000heures /an, est parmi les potentiels les plus élevés au monde.

L'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et industrielle. Pour plusieurs secteurs industriels, une partie des besoins en énergie thermique pour plusieurs processus (nettoyage, séchage, évaporation et distillation...) se situe dans la plage de température basse et moyenne qui peut être efficacement fournie par les capteurs solaires thermiques. Est une des meilleures applications de cette énergie dans ce cadre ; l'installation des chauffages solaires à grande échelle est l'une des diverses solutions qui répondent à l'objectif de notre travail qui est l'étude d'une installation de chauffage solaire industriel.

Les performances d'un système de chauffe-eau solaire est très dépendant de son orientation, les propriétés optiques et géométriques, les climatiques, la situation géographique, les paramètres de fonctionnement et la durée d'utilisation. Dans cette étude, une optimisation d'un champ de captation de grande capacité destiné au chauffage solaire dans un site à Alger a été réalisée quantifier le taux de l'énergie utile qui est acquise.

Notre étude comporte essentiellement sur trois chapitres, une introduction ainsi qu'une conclusion générale constituent l'ossature de ce travail ; au premier chapitre sera consacré à l'état de l'art et problématique plus l'état des lieux de la thermique dans le monde. Puis le chapitre suivant consistera à modélisation le système de chauffage d'eau solaire. Et le

dernier chapitre sera consacré à la simulation sous TRNSYS des performances de notre installation selon la variation des configurations des capteurs plan.

Chapitre 1 : Etude bibliographie

1.1. INTRODUCTION :

Les capteurs solaires plans sont des systèmes les plus utilisés pour capter le rayonnement solaire et transmettre la chaleur à un fluide caloporteur .Dont les chauffe-eaux solaires sont des dispositifs de captage de l'énergie solaire destiné à fournir partiellement ou totalement de l'eau chaude sanitaire.

Nous allons citer dans le présent chapitre Les principaux travaux réalisés à l'international et en Algérie sur les chauffe eau solaires et les différentes installations de chauffage solaire individuelle et collective pour la production d'eau chaude sanitaire.

Parmi ces travaux scientifiques, nous pouvons illustrer les recherches portant sur les installations des chauffe-eaux solaires ainsi leurs ordres chronologiques.

L'état de l'art de ces travaux qui ont été effectués dans le domaine de chauffage d'eau solaire et leurs différentes installations est présenté dans ce chapitre.

Dans la deuxième partie on a défini les chauffages solaires et leur mode de fonctionnement ainsi que les différents composants qui les constituent.

Ensuite on a présenté les différents types de capteurs solaires et on a montré la différence entre chaque capteur.

1.2. DIFFERENTS TRAVAUX PORTANTS SUR LES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE SOLAIRES COLLECTIVES :

Parmi ces travaux scientifiques portant sur les installations des chauffe-eaux solaires collectives, nous pouvons citer en ordre chronologique :

En 1975, S. A. Klein et al, [1] ont étudié la conception des systèmes de chauffage solaires combiné pour des résidences sur le site de Madison en utilisant la méthode F-Chart.

En 1986, le centre de développement des énergies renouvelables de Marrakech au Maroc [2] a réalisé deux installations du chauffe-eau solaire collectif d'une capacité de 3500 litres comprenant 24 capteurs sous vide associés à un ballon de stockage et l'autre

installation compte 8 capteurs de 1,32 mètres carrés chacun associés à un ballon de stockage de 950 litres.

En 1996, B. Zaouri [3] a présenté une étude technico-économique d'une installation solaire collective pour chauffer l'eau sanitaire à l'école nationale.

En 1999, Akinoglu et al, [4] ont étudié la superficie et la capacité de stockage optimales de plusieurs stations en Turquie pour trouver les taux de performance les plus élevés et les plus bas des capteurs solaires.

En 2005, K. Johannes [5] a présenté une optimisation sous TRNSYS sur l'installation solaire collective de la maison de retraite située à Chambéry appliquée pour des faibles débits.

En 2009 : Andersen et Furbo [6] : étude des variations théoriques des performances thermiques de différents capteurs solaires et systèmes solaires combinés en fonction des différentes conditions météorologiques annuelles au Danemark.

En 2014 : A. Calderoni et M. Motta [7] ; Une tentative de modéliser les performances d'un système chauffage solaire industriel intégré au système de chauffage conventionnel et d'estimer l'énergie utile fournie par le système pour une industrie textile en Tunisie.

En 2015 : Uppal A, Kesari J.P [8]; étude de Chaleur solaire industrielle dans l'industrie automobile indienne ; Il est observé qu'il est nécessaire de minimiser les erreurs de conception et d'installation en plus de la réduction des coûts.

En 2016 : Colangelo G et al [9] ; étude de L'innovation dans les capteurs solaires thermiques plans : un bilan de dix dernières années de résultats expérimentaux.

En 2016 : Brown KC [10]; Applications et études des systèmes pour la chaleur industrielle solaire. Plusieurs conceptions possibles et perspectives d'intégration de la production d'eau chaude et de vapeur utilisant l'énergie solaire ont été décrites dans ce rapport.

En 2016 : Cozzinia M et al [11] ; Analyse de la performance d'un champ solaire à capteurs plans pour la chaleur du processus.

En 2016 : Gueira CEC et al [12] ; étude des logiciels de conception des systèmes solaires de chauffe-eau. Cet article présente un développement complet des logiciels pour dimensionner de grands systèmes de chauffe-eau solaires.

Il faut noter qu'en Algérie, il existe des travaux portants sur les installations collectives de chauffage d'eau solaires. On peut citer les travaux suivants :

En 1990, A. Hamid [13] a réalisé et expérimenté des capteurs solaires plans au centre de développement des énergies renouvelables dans le but d'optimiser la surface de captation d'une installation de chauffage d'eau solaire collective à partir de la méthode F-Chart avec une autre étude sur l'économie de cette installation.

En 1993, M. Khoukhi du centre de développement des énergies renouvelables de Bouzareah [14] a étudié une installation de chauffage d'eau solaire collective d'une capacité de 800 litres comprenant 8 capteurs d'une surface effective de 1.5 mètres carrés.

En même année, M. Ouazzane et H . Mekhelouf du centre de développement des énergies renouvelables de Bouzareah [15] ont étudié les différentes configurations de branchement des capteurs pour une installation de chauffage d'eau solaire d'une capacité de 1500 litres à effet thermosiphon comporte 16 capteurs.

En même année, D. Lafri et al [16] ont présenté une simulation numérique d'une installation collective d'eau chaude solaire de capacité de 800 litres au centre de développement des énergies renouvelables à Bouzareah.

En 1999, S. Sami et al [17] ont présenté une étude au niveau du site de Bouzareah sur le comportement thermique d'une installation de chauffage d'eau collective d'une capacité de 400 litres avec un échangeur immergé à l'intérieur de la cuve.

En 2000, F. Feradj, et al de l'université Saad Dahleb de Blida [18] ont présenté une étude du système d'appoint pour les installations collectives de l'eau chaude solaire en utilisant la méthode F-Chart pour calculer la fraction solaire mensuelle de ce système.

En même année, S. Sami et al [19] ont présenté une étude sur la détermination des surfaces optimales pour différents sites algériens destiné pour des installations solaires de chauffage d'eau collective, afin de trouver les critères d'optimisation et la minimisation du coût des différents composants et du prix de l'énergie conventionnelle consommée par le système d'appoint.

En 2002, A. Hamid et al du centre de développement des énergies renouvelables de Bouzareah [20] ont étudié et réalisé une installation de chauffage d'eau solaire collective d'une capacité de 400 litres compte 8 capteurs de 1.2 mètres carrés avec une étude sur l'influence du coût de l'énergie d'appoint pour les différents sites Algériens.

En 2003, S. Sami et al du centre de développement des énergies renouvelables de Bouzareah [21] ont étudié la rentabilité d'une installation solaire de chauffage d'eau collective appliquée à différents sites algériens à partir de la méthode F-Chart pour avoir une minimisation sur le coût total.

En 2010, B. Boutagheriout et al de l'université de Batna [22] ont présenté une étude préliminaire du potentiel de production d'eau chaude par capteurs plans solaires pour une application industrielle dans la région des hauts plateaux, en utilisant des capteurs plans implantés sur le site de Batna.

En 2009, Kalogirou, [23] a rapporté que l'utilisation des capteurs solaires dans le climat méditerranéen peut répondre à une grande partie de la demande intérieure et a démontré un avenir prometteur pour investir dans ce secteur.

En 2012, M. Akssas et al, [24] ont réalisé une analyse techno-économique d'un chauffe-eau solaire pour un centre hospitalier de la province de Batna en Algérie à l'aide du logiciel RETScreen.

En 2016 R. Salami et al, [25] ont étudié le potentiel de marché et les perspectives de développement de capteurs solaires en Algérie.

En 2018, S. Sami et al, [26] ont étudié l'intégration de chauffe-eau solaire in bâtiments résidentiels à haute performance énergétique en Algérie. Leurs emplacements étudiés étaient des maisons dans quatre climats différents en Algérie. Les données météorologiques mensuelles ont été utilisées pour les enquêtes.

SYSTEME DE CHAUFFAGE SOLAIRE

1.2.1. Le solaire thermique au niveau mondial [27]

La capacité solaire thermique cumulée au niveau mondiale en fonctionnement à fin 2018 était de 483 GWth soit une surface équivalente d'environ 690 millions de mètres carrés. Le rendement annuel en énergie solaire thermique correspondant s'élève à 389 TWh.

À la fin de l'année 2019 479 GWth (684 millions de mètres carrés) avaient été installés ; Le marché mondial de l'énergie solaire thermique a reculé d'environ 6% en 2019 par rapport à 2018.

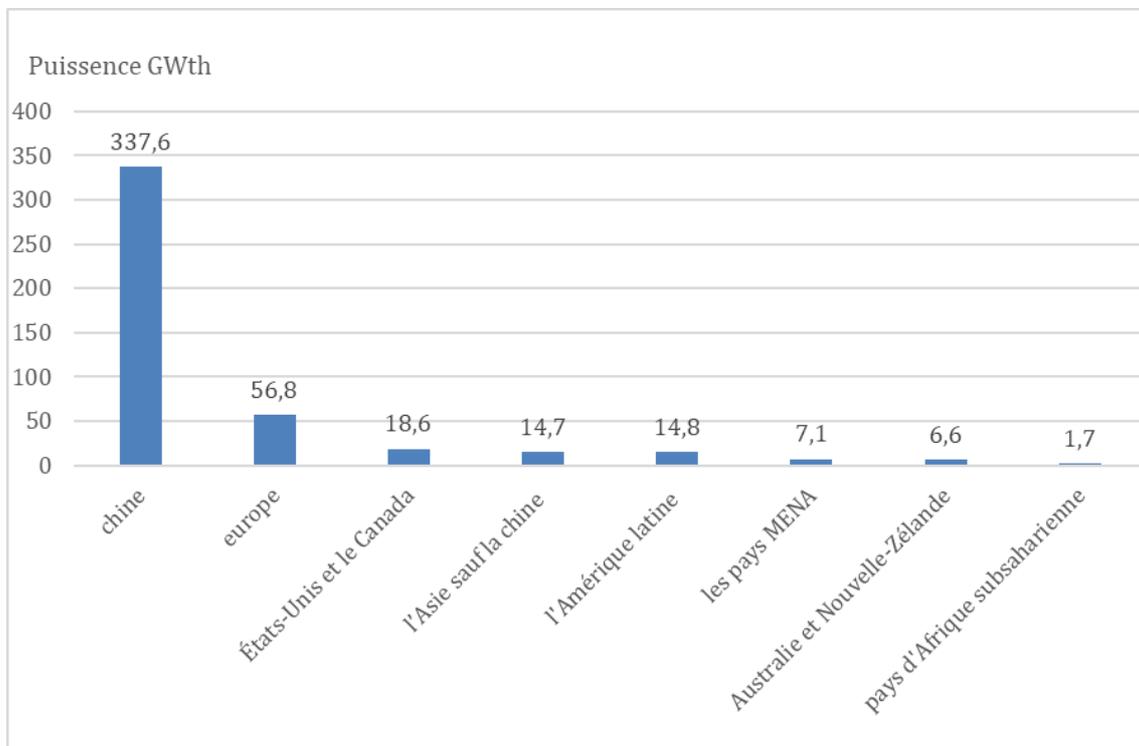


Figure 1- 1 : Puissance installée dans le monde par région économique

La répartition du marché mondial des installations du solaire thermique en 2011, comme la représente sur la figure, selon l'étude réalisée par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), fait ressortir que la chine est largement en tête des pays producteurs de chaleur d'origine solaire avec 337.6 GWth et l'Europe (56.8 GWth), qui représentaient ensemble 81,67% de la puissance totale installée.

Le reste du marché est partagé entre les Etats-Unis et Canada (18.6 GWth), l'Asie sauf la chine (14.7 GWth), les pays de l'Amérique latine (14.8 GWth), le Moyen-Orient représenté par l'Israël, Liban et la Jordanie en plus le Maroc et la Tunisie (7.1 GWth), l'Australie et la Nouvelle Zélande (6.6 GWth),aussi bien qu'entre quelques pays africains (1.7 GWth), à savoir Mozambique, Namibie, Afrique du Sud et Zimbabwe. [27]

1.2.2. Répartition de la capacité installée par type de capteurs :

Avec une puissance totale de 483 GWth installée, la répartition par type de capteur fait ressortir la prédominance des capteurs sous vide avec une capacité de 340.5 GWth (70.5%), suivie par 111.1 GWth pour les capteurs plans (23%), puis les capteurs non vitrés (6%) et dernièrement, les capteurs à air de 0.9 GWth (0.2%). La distribution de la capacité mondiale en fonction des différents types de capteurs solaires est illustrée sur la figure. [27]

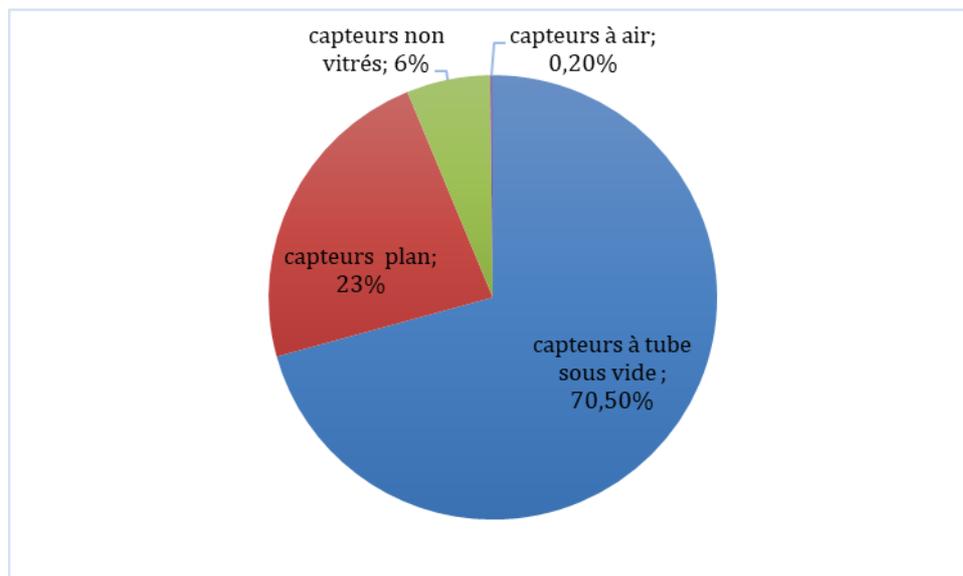


Figure 1- 2 : Répartition de la capacité installée par type de capteurs en 2018

1.2.3. Potentiel du solaire thermique dans les processus industriels :

Le potentiel du solaire thermique est très important surtout pour le secteur industriel car ce secteur couvre environ 28% de la consommation totale d'énergie primaire [29], Sur la demande globale d'énergie thermique, une fraction importante (environ 60%) de l'énergie thermique consommée dans les procédés industriels est apparemment dans la plage de température de 30 - 250 ° C. [28]

La capacité solaire thermique installée actuellement pour la production de la chaleur dans les processus industriels était de 25 TWth en 2006, ce qui représente 0.02% de la capacité totale solaire thermique installée dans le monde. [29]

Actuellement pour la production de la chaleur dans les processus industriels dans le monde en 2018, arrive à une capacité totale presque 100 MWth soit une surface équivalente d'environ 1 million mètres carrés. [27]

1.2.4. La demande de la chaleur industrielle :

Les exigences de température des applications de chauffage solaire industriel vont de 60 ° C à 260 ° C. illustre que 30% de la demande sont exigé aux températures au-dessous de 100°C, 27% entre 100 et 400°C. Alors que pour une température au-dessus de 400°C la demande est de 43%. [27]

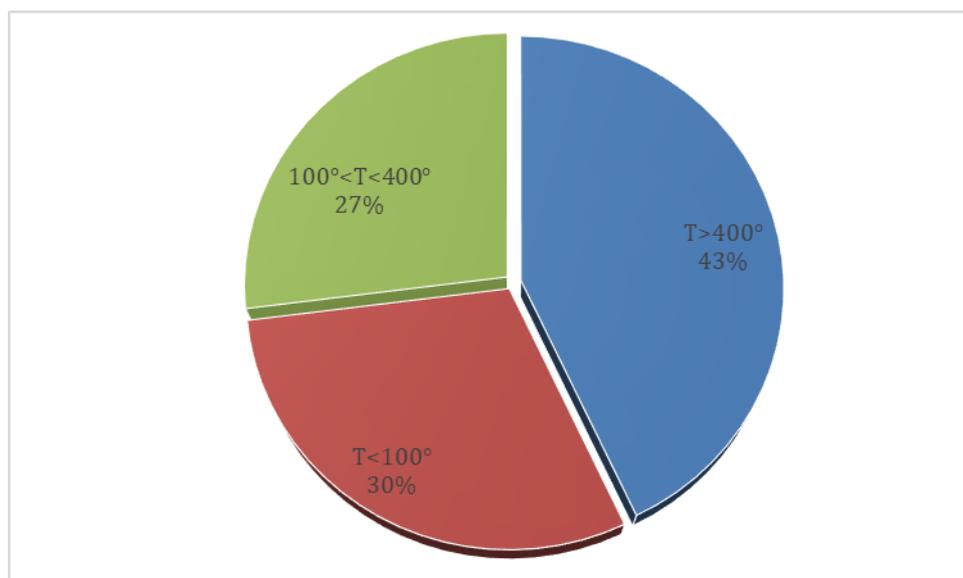


Figure 1- 3 : Part de demande de la chaleur industrielle par niveau de la température

1.2.5. Le niveau de température des différents processus des secteurs industriels :

Le Tableau montre que les domaines les plus importants pour la chaleur solaire sont dans les industries des aliments et boissons, les industries textiles et chimiques, et pour de simples procédés de nettoyage, par exemple lavage.

La raison pour cela est due aux basses températures requises pour les processus dans ces secteurs. Le niveau de la température qui est exigé dans les processus de la production du secteur de la nourriture et boissons est entre 30 et 150°C.

Entre la plage de température de 30-90°C, des capteurs plans sont très efficace. Le tableau montre également un grand potentiel pour les processus dans la plage de températures moyennes jusqu'à environ 300°C.[29]

Tableau 2-1 : les processus utilisés classés selon le niveau de température utilisé [29].

Secteur industriel	Processus	Niveau de température
Nourriture et boissons	Sécher	30-90
	Laver	40-80
	Pasteuriser	80-100
	bouillir	95-105
	Stériliser	140-150
	Traitement thermique	40-60
Industrie textile	Laver	40-80
	Blanchir	60-100
	Teindre	100-160
Industrie chimique	Bouillir	95-105
	Distiller	110-300
	Divers procédés chimiques	120-180
Tous les secteurs	Préchauffage de l'eau pour	30-100
	Chauffage des halls de production	30-80

1.3. CHAUFFAGE SOLAIRE

Chauffage solaire C'est le processus de conversion de l'énergie solaire du soleil en énergie thermique (chaleur) pour chauffer un fluide caloporteur à l'aide d'un capteur solaire thermique.

Composants de chauffage solaire de l'eau

- Capteur
- Réservoir de stockage
- Système de circulation (tuyaux de raccordement) et système de chauffage auxiliaire
- Système de contrôle

1.3.1. Capteur solaire

Le capteur solaire est le cœur d'un système solaire thermique. Il absorbe le rayonnement solaire, le convertit en la chaleur et transfère la chaleur utile au système solaire. Il existe un certain nombre de modèles de différents concepts pour les collectionneurs : outre les simples absorbeurs utilisés pour le chauffage des piscines, plus des systèmes sophistiqués ont également été développés pour des températures plus élevées, tels que systèmes collecteurs de stockage, capteurs plan, capteurs plan évacués et capteurs à tubes sous vide.

1.3.2. Capteur à tube sous vide

A l'intérieur des capteurs plans règne la pression de l'air ambiant, grâce souvent, à des petites ouvertures pratiquées dans l'enveloppe du capteur. La circulation de l'air entre l'absorbeur et la plaque de couverture joue un rôle important dans le cadre des pertes énergétiques au niveau de la plaque absorbante. Il est, toutefois, possible de remédier à cette déperdition par convection en éliminant l'air du capteur, c'est-à-dire en utilisant des capteurs sous vide.

Il y a 4 familles de capteurs sous vide, et chacun dépend d'une technique spécifique [30]:

- Le capteur à tube sous vide à circulation directe
- Le capteur à tube sous vide à " Caloduc"
- Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos"
- Le capteur à tube sous vide "Schott"

- **Les capteurs à circulation directe**

Cette technique a été développée il y a une trentaine d'années afin d'améliorer les performances du capteur plan. En effet, la conception de l'absorbeur et les tuyaux de circulation du fluide caloporteur sont comme un capteur plan (figure 1-4). Dans lesquels s'écoule le fluide caloporteur (parfois ces deux tubes en cuivre sont disposés de manière concentrique). Les différents tubes sont raccordés aux conduites du circuit primaire. Le mode de fonctionnement de ce capteur ne diffère donc fondamentalement pas de celui d'un capteur plan : le fluide caloporteur du circuit primaire continue à circuler dans le circuit de refroidissement de l'absorbeur.

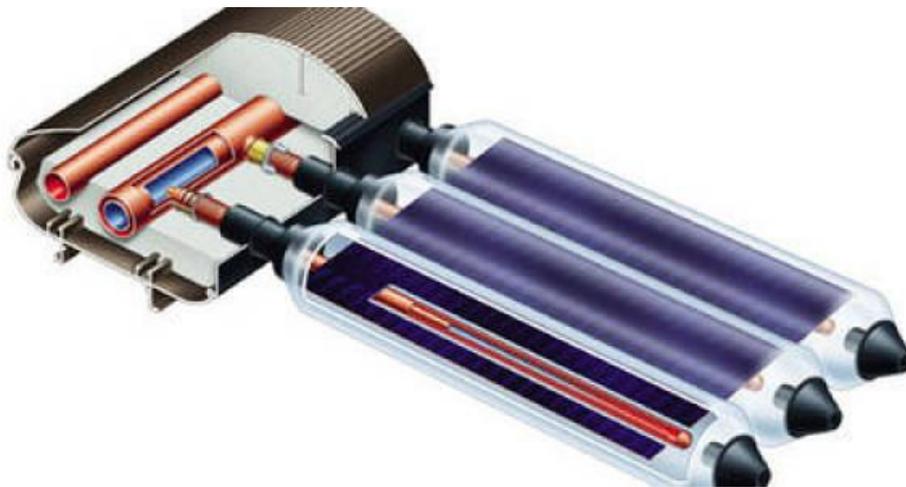


Figure 1- 4 : capteurs à circulation directe [31]

- **Capteur à tube sous vide à caloduc :**

Dans la deuxième variante, nommée Heat-pipe (figure 1-5), l'absorbeur oblong est fixé à un caloduc dont les extrémités sont fermées après avoir y fait le vide. Ce tube est partiellement rempli d'un fluide présentant une courbe d'ébullition intéressante pour l'application visée (souvent 2 g d'eau). L'extrémité fermée en dehors du tube est insérée dans un échangeur de chaleur spécialement conçu à cet effet, dans lequel circule le fluide caloporteur transférant la chaleur vers le ballon de stockage. L'échauffement de l'absorbeur provoque l'évaporation (ébullition) du fluide présent dans le tube fermé, ce qui refroidit l'absorbeur. Les vapeurs formées s'élèvent dans la partie supérieure du tube où se situe l'échangeur de chaleur et s'y refroidissent. Le refroidissement dans cet échangeur a pour effet de condenser la vapeur, qui revient alors dans la partie inférieure du tube et refroidit la bande absorbante. L'échangeur fait donc office ici de condenseur.

Ce système présente l'avantage important de permettre l'installation, dans la section de condensation du caloduc, d'un clapet à fermeture automatique empêchant, à partir de 85°C, les vapeurs d'atteindre le condenseur interdisant, ainsi, toute récupération de chaleur ultérieure. On peut, de la sorte, éviter un échauffement trop élevé du système ou une température trop élevée de l'eau pour le sanitaire.[32]

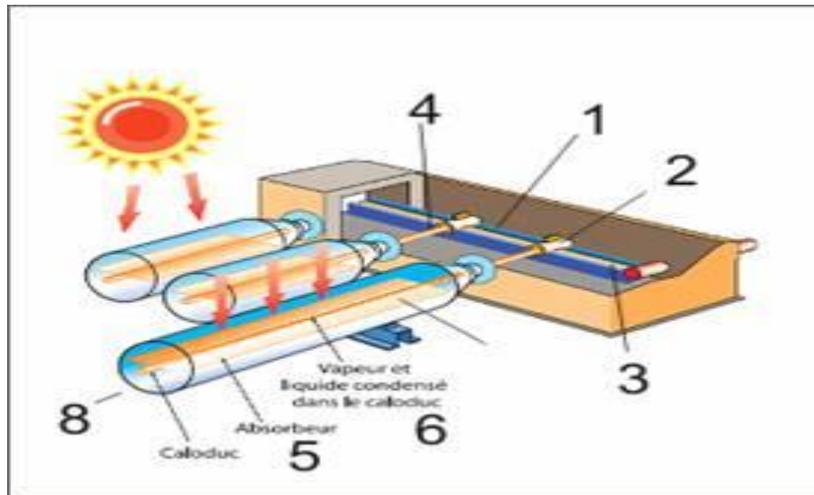


Figure 1- 5 : Le capteur à tube sous vide à "Caloduc"[33]

-Capteur à bouteilles à tubes thermos :

Comme le montre la (figure 1-6), Ces capteurs utilisent une bouteille de verre à double paroi (d'une longueur de ± 2 m et d'un diamètre de ± 10 cm). Les deux parois sont reliées de manière étanche à l'air au niveau du goulot. L'intérieur de la bouteille est soumis à l'air atmosphérique, tandis que l'espace compris entre les deux parois est sous vide.

La paroi extérieure de la bouteille est transparente tandis que la paroi intérieure est pour sa part pourvue, du côté sous vide, d'un revêtement à absorption sélective ; de l'autre elle est en contact avec deux profilés semi-circulaires métalliques, eux-mêmes en contact avec les branches de l'absorbeur en U. La chaleur se créant dans le revêtement absorbant par suite du rayonnement solaire se transmet via les bandes semi-circulaires aux tubes métalliques, d'où elle est évacuée par le fluide caloporteur.

Les deux branches du tube en U sortent du côté du goulot de la bouteille et sont reliées au circuit primaire, cette connexion étant assurée dans un boîtier bien isolé. Plusieurs tubes sont juxtaposés et raccordés au boîtier.

Un réflecteur est parfois installé sous l'ensemble, afin que les rayons solaires puissent se réfléchir sur la partie de l'absorbeur qui n'est pas orientée vers le soleil. De cette manière, on tire un parti optimal de la capacité d'absorption des bouteilles. Dans ce genre de capteur, le revêtement absorbant se trouve dans la partie sous vide, tandis que le

système de refroidissement de l'absorbeur se trouve dans la bouteille thermos, ce qui permet de réduire les déperditions calorifiques.



Figure 1- 6 : Capteur à bouteilles à tubes thermos [32]

- **Capteur à tube sous vide "Schott" :**

Dans ce cas, une partie de la paroi intérieure du tube extérieur est un réflecteur cylindrique et ensuite, le tube intérieur sert comme absorbeur aussi bien qu'échangeur de chaleur avec le fluide caloporteur. L'utilisation des métaux est réduite à des traitements de surface du tube et les différentes pièces du collecteur. [33]

1.3.3. Capteur Plan

Les capteurs plans sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température sans concentration du rayonnement solaire. Le flux d'énergie tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser $1\text{KW}/\text{m}^2$. Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à 100°C . Par contre ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent les composantes directe et diffuse du rayonnement incident. Ils sont principalement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage d'habitations ou des piscines.

Il se compose des parties suivantes :

- un vitrage avant transparent
- Le caisson
- un absorbeur

L'absorbeur ; il est situé à l'intérieur du boîtier du capteur plan pour convertir la lumière du soleil en la chaleur et la transfère à l'eau dans les tubes absorbeurs. Il sert de passage de circulation de fluide. Comme le capteur peut atteindre des températures de

stagnation jusqu'à 200 ° C (c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas d'eau qui coule à travers), tous les matériaux utilisés doivent pouvoir résister à une telle chaleur. Il est généralement en métal ou des matériaux tels que le cuivre, l'acier ou l'aluminium.

Propriétés exigées : réflectivité faible à nulle dans le visible et élevée pour l'infra rouge De même qu'une conductibilité thermique élevée (cuivre ou aluminium ayant subit un traitement de surface sélectif) et une bonne résistance à la corrosion.[Marezouk]

Le caisson ; peut-être en plastique, en métal ou en bois, et le couvercle avant en verre doit être scellé afin que la chaleur ne s'échappe pas et que la saleté, les insectes ou l'humidité ne pénètrent pas dans le capteur lui-même. De nombreux capteurs ont également une ventilation contrôlée, afin d'éviter la condensation à l'intérieur du vitrage avant transparent. Le boîtier du capteur est très isolé à l'arrière et sur les côtés, maintenir les pertes de chaleur faibles. Cependant, il y a encore quelques pertes de chaleur de capteur, principalement en raison de la différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant, et ceux-ci sont subdivisés en pertes de convection et de rayonnement. La convection est causée par les mouvements aériens, alors que ces derniers causée par l'échange de chaleur par rayonnement entre l'absorbeur et l'environnement.

Un vitrage avant transparent (feuille de verre) qui aide à prévenir la plupart des pertes de convection, le collectionneur fait face au soleil. En outre, il réduit le rayonnement thermique de l'absorbeur dans l'environnement d'une manière similaire à celle d'effet de serre. Cependant, le verre reflète également une petite partie de la lumière du soleil, qui n'atteint alors pas du tout l'absorbeur.

Propriétés exigées : transmissivité élevée dans le visible, faible à nulle pour l'infra rouge Ceci en plus d'une résistance au vieillissement.

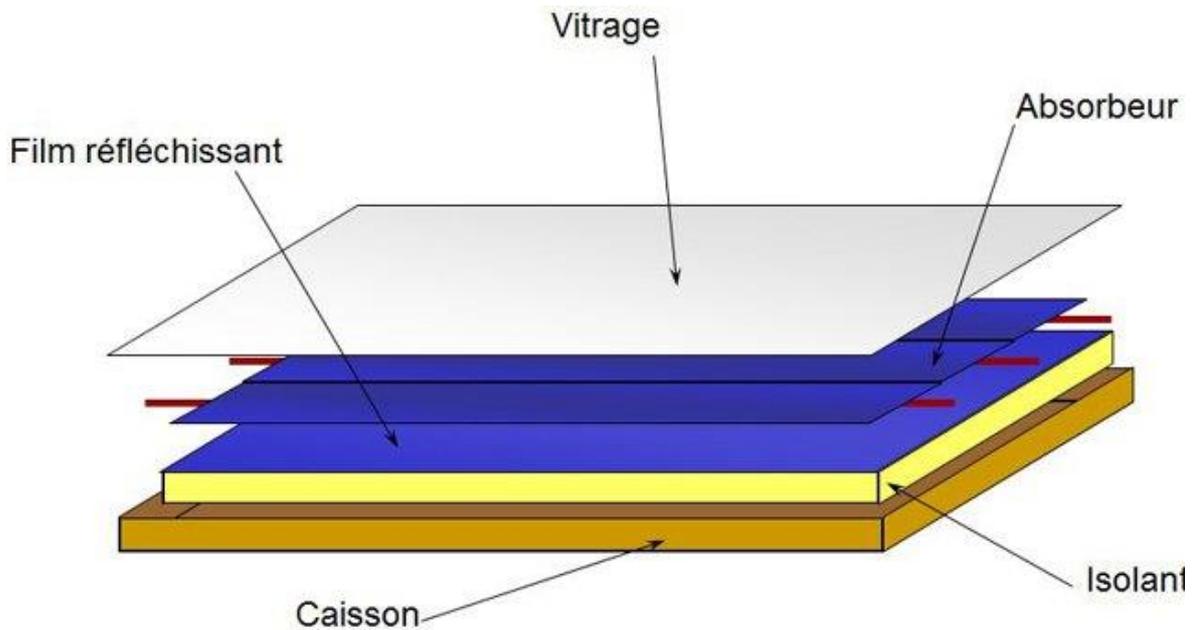


Figure 1- 7 : les Composants d'un capteur plan[34]

1.4. DIFFERENT TYPE DES INSTALLATIONS SOLAIRES COLLECTIVES :

Il existe plusieurs types des installations de chauffe eau solaire collective, à un seul circuit, à double circuit ou à échangeurs.

1.4.1. Les chauffe-eau monobloc

Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce à la différence de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs, (Fig.1-8).

Les capteurs et le ballon sont assemblés en un seul composant, l'installation est simple, le fonctionnement est autonome, Les inconvénients sont les pertes thermiques importantes et son intégration architecturale difficile [31].

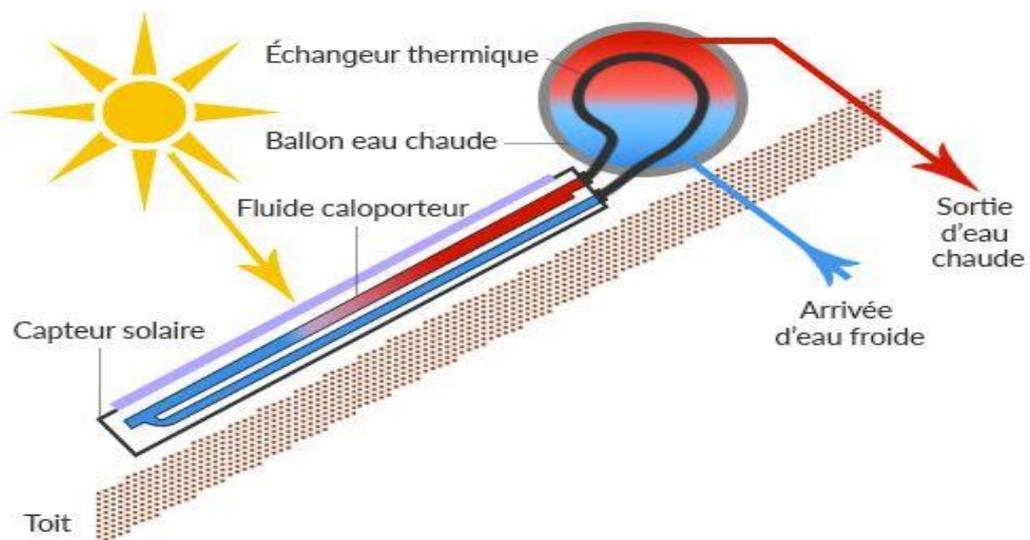


Figure 1- 8 : Les chauffe-eau monobloc [35]

1.4.2. Les chauffe-eau à thermosiphon

Pour éviter les inconvénients du système monobloc, tout en conservant les avantages et la simplicité, on peut séparer les panneaux du ballon d'eau chaude. Tant que les panneaux restent plus bas que le ballon de stockage, l'eau va pouvoir continuer à circuler naturellement par effet thermosiphon. À la sortie du panneau l'eau est plus chaude donc plus légère, et monte vers le ballon.

Il s'agit d'un système passif qui fonctionne sur le principe de la différence de densité pour transporter la chaleur d'énergie. Le fluide caloporteur (c'est-à-dire l'eau) est chauffé par un capteur solaire et la convection conduit l'eau du capteur solaire vers le ballon d'eau chaude. Le système de thermosiphon fonctionne sur l'élévation / différence de température où l'eau froide a une densité spécifique plus élevée que l'eau chaude. L'eau devient moins dense à cause du solaire chauffage et se dilate en fonction de la montée en température. L'eau chaude est acheminée vers le réservoir de stockage, et l'eau relativement plus froide du fond du réservoir est acheminée vers le capteur solaire. Par conséquent, le réservoir de stockage est toujours monté à une hauteur au-dessus du collecteur pour permettre la libre circulation de l'eau à travers les tuyaux.

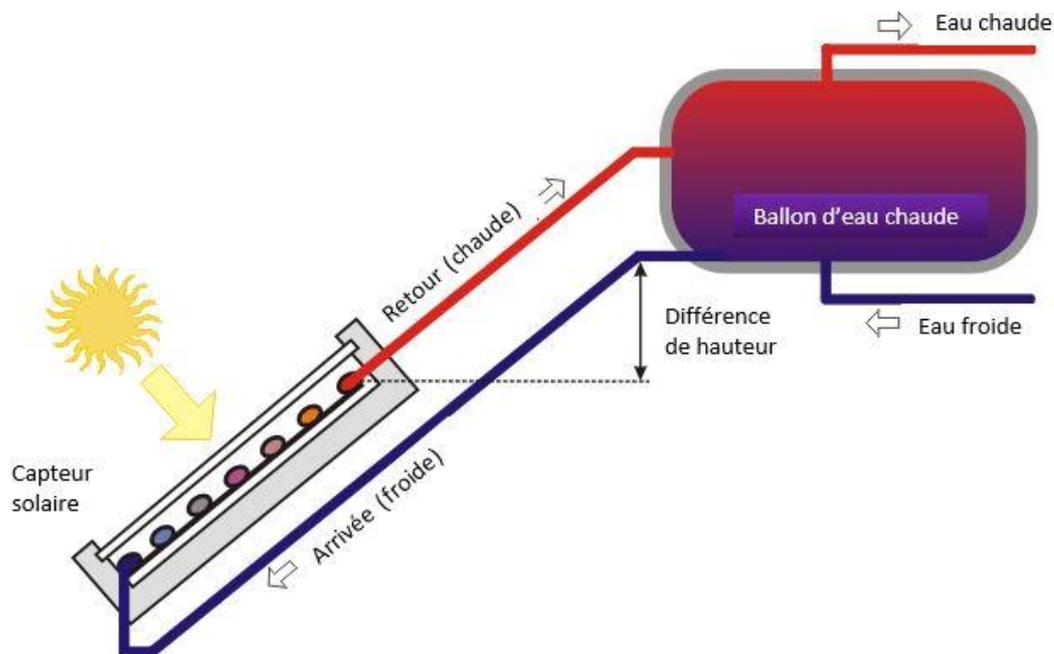


Figure 1- 9 : schéma d'un système à thermosiphon.[3]

1.4.3. Les chauffe-eau à circulation forcée :

Contrairement aux systèmes à thermosiphon, une pompe électrique est nécessaire pour déplacer l'eau à travers le cycle solaire d'un système par circulation forcée. Le capteur et le réservoir de stockage peuvent alors être installés indépendamment, et aucune différence de hauteur entre le réservoir et le capteur n'est nécessaire. Un système utilisant la circulation forcée avec une chaudière conventionnelle pour le chauffage d'appoint.

Deux capteurs de température surveillent les températures dans le capteur solaire et le réservoir de stockage. Si la température du capteur est supérieure à la température du réservoir d'une certaine quantité, la commande démarre la pompe, qui déplace le fluide caloporteur dans le cycle solaire ; les différences de température de mise en marche sont normalement comprises entre 5 ° C et 10 ° C. Si la différence de température diminue en dessous d'un deuxième seuil, la commande arrête à nouveau la pompe. Dans les régions où il y a un risque de gel, un système à double circuit est généralement utilisé. L'eau potable est conservée à l'intérieur du réservoir de stockage, tandis que l'eau du cycle solaire est mélangée avec un agent antigel. Un échangeur de chaleur transfère la chaleur du cycle solaire vers le réservoir de stockage et maintient l'eau potable séparée du mélange antigel.

Les systèmes à circulation forcée peuvent être utilisés pour le chauffage des locaux ainsi que pour le chauffage de l'eau domestique et dans l'industrie. Dans ce cas, les capteurs et les réservoirs de stockage doivent être beaucoup plus grands qu'avec les simples systèmes de chauffage d'eau domestique, où une surface de capteur d'environ 4 m² est suffisante pour la plupart des ménages. De plus grands systèmes ont également été réalisés avec succès avec deux ou plusieurs réservoirs de stockage.

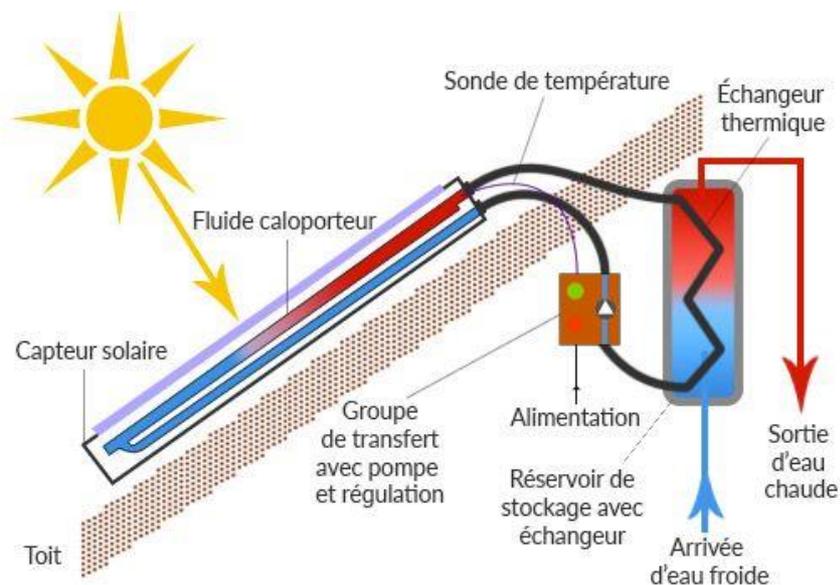


Figure 1- 10 : système à circulation forcée [35]

1.4.4. Systèmes intégrés de capteur ou de stockage

Contrairement au système chauffage solaire conventionnel dans lequel un capteur agit comme un absorbeur de lumière solaire, ce système utilise à la fois le capteur et le réservoir de stockage comme absorbeur pour collecter l'énergie solaire de radiation. Dans la plupart des cas, toute la partie extérieure du réservoir agit comme un absorbeur. Cependant, ces systèmes subissent de fortes pertes de chaleur, notamment en dehors des heures d'ensoleillement. Nombreuses techniques telles que des revêtements de surface absorbants sélectifs, des matériaux isolants et un couvercle en verre à double vitrage a été utilisé pour réduire les pertes de chaleur. Quelques autres techniques ont également tenté d'aboutir à la perte de chaleur : capot de protection mobile, panneau de cloison isolante, et en utilisant un matériau à changement de phase à l'intérieur du réservoir de stockage. Les chercheurs ont également tenté d'utiliser des matériaux isolants transparents pour les parties exposées appropriées. De plus, pour réduire les pertes de chaleur, le réservoir de stockage a été exploité selon des modes de stratification thermique, en tirant l'eau chaude du haut du réservoir de stockage et de l'entrée d'eau froide au fond du réservoir.

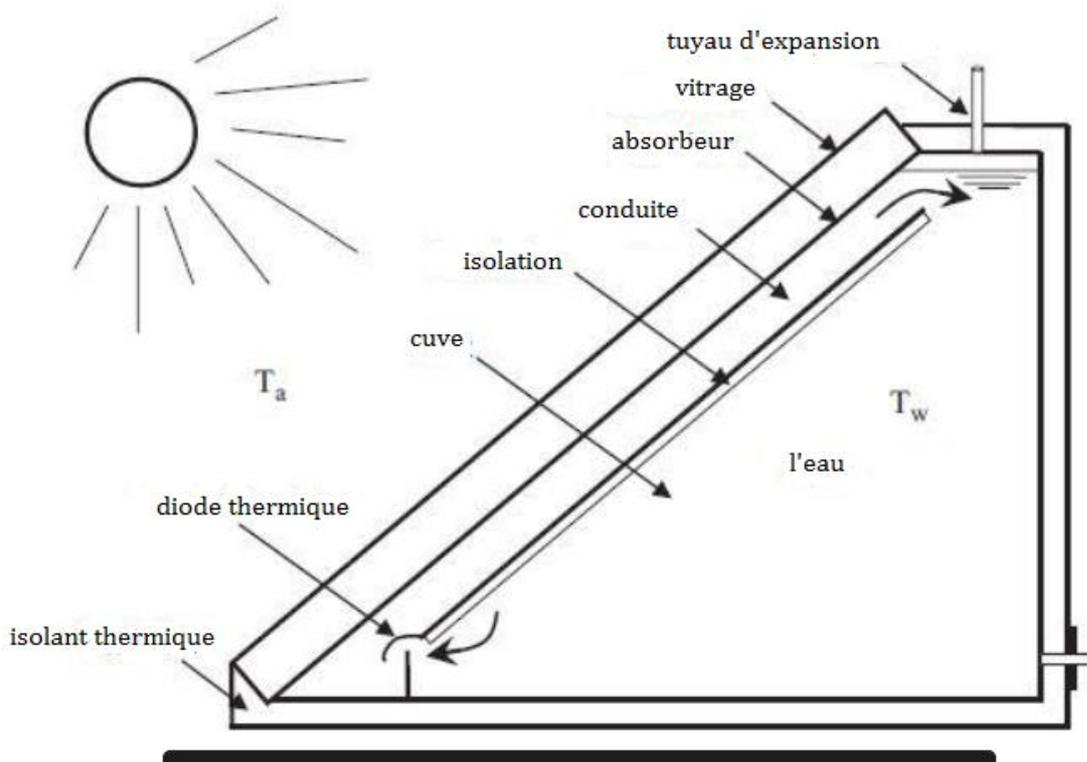


Figure 1- 11 : Systèmes intégrés de capteur ou de stockage

1.4.5. Systèmes de circulation directe (actifs)

Contrairement aux systèmes à thermosiphon, les systèmes à circulation directe nécessitent une pompe pour faire circuler l'eau du réservoir de stockage vers le capteur pour se réchauffer. L'eau chaude qui retourne dans le système de stockage est prête pour l'utilisation finale. La pompe est généralement contrôlée par un thermostat différentiel qui régule l'eau au capteur supérieur par une marge suffisante au fond du réservoir. Un clapet anti-retour empêche la circulation inverse pour éviter les pertes thermiques nocturnes du capteur. Les thermomètres peuvent être positionnés au-dessus ou au-dessous du réservoir de stockage car la pompe est utilisée pour activer la circulation. Le système de circulation directe n'est généralement utilisé que dans des situations où la congélation n'est pas un problème. Parfois, l'eau du réservoir de stockage à froid ou de l'approvisionnement en eau de la ville peut être utilisée directement dans le système. Des précautions doivent être prises lorsque la qualité de l'eau est dure ou acide, peut provoquer un colmatage ou une corrosion des tubes collecteurs. Les systèmes à circulation directe utilisent généralement un seul réservoir de stockage qui est avec un chauffage d'appoint. Cependant, dans quelques études de cas, des systèmes de stockage à deux réservoirs ont également été utilisés. Dans les situations inévitables, lorsque le système de circulation directe doit être utilisé, pour fonctionner dans des conditions météorologiques défavorables, certaines modifications sont apportées à la conception du système chauffage solaire pour surmonter les problèmes de gel. L'une de ces modifications consiste à faire fonctionner le système de circulation directe en mode vidange. Généralement, une pompe intégrée à contrôleur différentiel est utilisée pour faire circuler l'eau du réservoir de stockage vers les capteurs, solaires. Une vanne de vidange assure la fonction de protection contre le gel. Lorsqu'elle est activée par le contrôleur, la vanne isole l'entrée du capteur solaire de la sortie du réservoir de stockage. En même temps, le contrôleur différentiel ouvre une vanne qui permet à l'eau de s'écouler loin du capteur. Afin d'évacuer l'eau du fond des capteurs, un brise-vide est installé en haut de chaque capteur pour permettre la circulation de l'air.

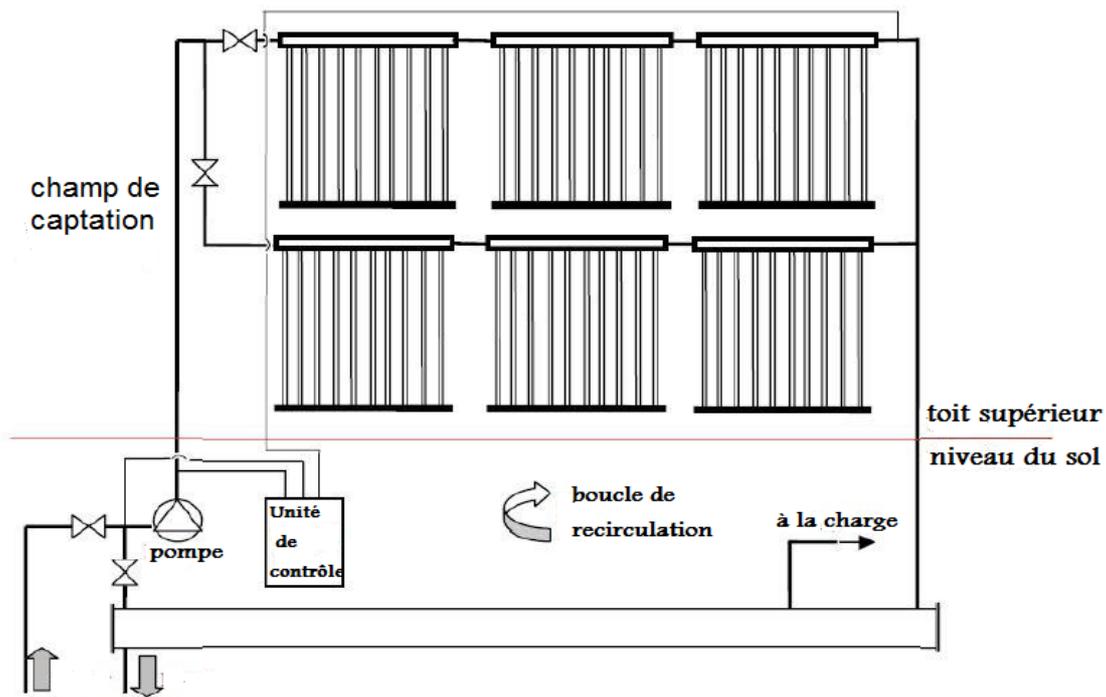


Figure 1- 12 : Schéma de principe d'une boucle de recirculation appliquée aux systèmes de chauffage solaire [36]

1.4.6. Systèmes de chauffage indirect à eau (actifs)

Les systèmes indirects de chauffage solaire de l'eau utilisent deux boucles de circulation pour effectuer le chauffage :

- a) la boucle à capteur fermé
- b) la boucle ouverte du réservoir de stockage.

Habituellement, le fluide caloporteur est mis en circulation dans la boucle à capteur fermé, pour gagner la chaleur et est ensuite passé à travers un échangeur de chaleur où la chaleur est transportée vers l'eau potable qui s'écoule en boucle ouverte vers le réservoir de stockage. Il existe plusieurs types de fluides de travail utilisés en boucle fermée, tels que l'eau, les réfrigérants et les mélanges antigels. L'échangeur de chaleur peut être soit un système interne (placé à l'intérieur du réservoir de stockage d'eau ou à l'extérieur du réservoir de stockage) ou comme un système externe. Un vase d'expansion intégré avec une soupape de surpression est utilisé dans le système à boucle fermée. Dans le système sous pression, le réservoir est fourni (un vase d'expansion supplémentaire) pour contrôler la température et la pression du fluide de travail. Cependant, pour le système non pressurisé.

1.4.7. Éléments de base d'un système solaire à circulation forcée

Le groupe de circulation est un élément essentiel dans les installations solaires thermiques à circulation forcée. C'est l'élément qui permet la circulation du fluide dans le circuit, généralement une pompe.

Le groupe de circulation sera généralement situé dans la partie inférieure de l'accumulateur (zone froide), vers la partie inférieure des collecteurs. De plus, vous aurez les éléments suivants :

Circulateur électromécanique pour circuits fermés, du type utilisé dans les circuits de chauffage.

Clapet anti-retour, pour empêcher la circulation inverse incontrôlée.

Régulateur de débit, qui permettra de régler le débit du circuit.

Filtre qui garantira la durabilité des éléments du circuit. [37]

1) La tuyauterie

La tuyauterie sert au transfert du fluide caloporteur et relier les différents équipements ; le circuit de la tuyauterie doit être le plus simple possible (court et éviter les changements de diamètre), elles doivent être strictement calorifugés. Actuellement le matériau le plus utilisé dans les installations solaires est le PP-R.

Le PP-R est un type de polypropylène fabriqué à base d'un copolymère spécial ; il s'agit donc d'un tuyau multicouche dont les couches intérieure et extérieure composées de matière synthétique séparées par une couche d'aluminium.

Les températures et les pressions en fonctionnement ; le mode de débit et le type du fluide caloporteur limitent, indiscutablement, les conditions suivantes permettant au système de fonctionner de manière satisfaisante :

- Stabilité thermique.
- Compatibilité avec le fluide caloporteur.
- Stabilité des raccordements des tubes sous l'effort thermique et mécanique.[38]

2) Le vase d'expansion

Comme le montre la (figure 1-13), cet élément est un élément important d'une installation solaire, le vase d'expansion placé généralement du côté aspiration de la pompe de circulation, il permet d'absorber les variations de volume et de récolter la totalité du fluide caloporteur expulsé des capteurs en cas de surchauffe. [38]



Figure 1- 13 : Le vase d'expansion [39]

3) Le clapet- anti –retour

C'élément c'est un organe qui permet d'éviter la formation d'un contre-courant de thermo-circulation qui déchargerait le ballon de stockage solaire de sa chaleur.

4) Le purgeur

Le purgeur élimine l'aire en partie haute du circuit lors du remplissage et Des entretiens.



Figure 1- 14 : Photo d'un purgeur [39]

5) Soupape de sécurité

La soupape de sécurité est munie d'un manomètre et destinée à évacuer les surpressions en cas de surchauffe de l'installation, cette soupape et raccordée ou dessus stockage.



Figure 1- 15 : Soupape de sécurité [39]

6) Les vannes

Les vannes d'isolement permettent d'isoler les composants principaux du système en cas d'entretien ou de remplacement.

7) La pompe de circulation

Le rôle de la pompe de circulation ou circulateur est d'assurer la circulation du fluide caloporteur dans la boucle solaire, les circulateur utilisés dans les installations de chauffage central avec radiateurs (résistant à des températures pouvant atteindre 120°C) conviennent aussi pour les installations de chauffe-eau solaire. En figure 1.16, on représente un circulateur solaire en position verticale.



Figure 1- 16 : La pompe de circulation [38]

8) Le système de régulation

Le système de régulation est nécessaire pour toutes les installations solaires, ce système permettra de réguler la température de l'eau de la cuve de stockage du chauffe eau solaire par une action tout ou rien. Ce système permettra d'optimiser le rendement de l'installation solaire. En figure 1.17 est représenté un régulateur solaire destine généralement pour les installations solaires.



Figure 1- 17 : Type de système de régulation [39]

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité les principaux travaux internationaux et en Algérie sur le chauffage solaire à grande capacité, et nous pouvons conclure que nous avons de nombreux travaux présentés dans le cadre de la théorie et de la simulation, ce qui nous aide dans notre projet qui repose sur la théorie et la simulation.

Dans ce chapitre nous avons aussi présenté les différents installations de chauffe eau solaire et les différents composants d'une installation solaire collective. Dans le chapitre précédant, on présentera le dimensionnement de cette installation.

Chapitre 2 : Modelisation mathematique

2.1. Introduction

La méthode appelée f-Chart est l'un des cadres empiriques qui utilise des mesures standard pour caractériser la performance à long terme des systèmes de chauffage solaire. Il a été développé à l'origine par Klein, Beckman et Duffie en 1976. Bien qu'il comporte certaines incertitudes et soit principalement appliqué à la conception standard, il fournit une estimation rapide et robuste des performances du système à l'aide des paramètres du capteur et des données mensuelles moyennes de rayonnement et de température.

Les variables essentielles dans cette méthode sont la surface du capteur, le type de capteur, la capacité de stockage, le débit du fluide et les tailles de la charge et de l'échangeur de chaleur.

2.2. Presentation de la methode F-Chart

On appelle f la fraction de la charge thermique pour la durée de calcul désirée fournie par énergie solaire en fonction de deux paramètres adimensionnels X et Y .

Un bilan thermique sur le système permet d'écrire [41]:

$$(MC_p) \frac{dT_s}{dt} = Q_u + Q_{aux} - (Q_L + Q_S) \quad (1)$$

Avec :

T_s : température du stockage

Q_S : Pertes thermiques de la cuve de stockage et des conduites de raccordement

Q_u ; Energies utile du fluide caloporteur

Q_x ; Energies auxiliaire

Q_L : Besoins calorifique du chauffage

Sur une période d'un mois et un volume de stockage constant, on peut considérer que

$(MC_p) \frac{dT_s}{dt}$ est négligeable devant les différents échanges, d'où on peut écrire que

$$\int_{\Delta t} Q_u dt = \int_{\Delta t} (Q_L + Q_S) dt - \int_{\Delta t} Q_{aux} dt \quad (2)$$

Sachant que l'énergie utile récupérée est donnée par :

$$Q_U = A Fr [(\tau\alpha)_e I_g - U_g (T_e - T_a)] \quad (3)$$

D'une manière générale, la fraction de satisfaction des besoins énergétiques exprimés [42] :

$$f = \frac{1}{L} \int_{\Delta t} A Fr [(\tau\alpha)_e I_g - U_g (T_e - T_a)]^+ dt \quad (4)$$

Cette équation peut être décomposée en deux paramètres adimensionnels, à savoir [43]:

$$Y = \frac{A Fr}{L} \int_{\Delta t} (\tau\alpha)_e I_\beta dt = \frac{A Fr}{L} (\overline{\tau\alpha})_e H_\beta N \quad (5)$$

$$X = \frac{A Fr}{L} \int_{\Delta t} U_g (T_{ref} - T_a) dt = \frac{A Fr}{L} U_g (T_{ref} - \overline{T_a}) \Delta t$$

A : Surface des capteurs (en m²);

Fr : Facteur modifié d'évacuation de la chaleur du capteur solaire

U_g : Coefficient global de pertes thermiques

T_{ref} : Valeur empirique de référence égale à 100°C

$\overline{T_a}$: Moyenne mensuelle de la température ambiante (°C)

L : Besoin de chauffage total mensuel

$(\overline{\tau\alpha})_e$: Moyenne mensuelle du produit de la transmissivité et de l'absorptivité du capteur

H_β: Moyenne mensuelle du rayonnement solaire incident quotidien dans le plan des capteurs;

N : Nombre de jours dans le mois

L'équation (5) peut s'écrire comme suite [42] :

$$Y = \frac{A F_r F'_r (\overline{\tau\alpha})}{L Fr (\tau\alpha)_n} (\tau\alpha)_n H_\beta N \quad (6)$$

$$X = \frac{F_r U_i F'_r}{L F_R} A (T_{ref} - T_a) \Delta t$$

F_r(τ α) et (F_rU_L): Sont spécifiées par l'utilisateur ou choisies parmi les paramètres des capteurs solaires sélectionnés dans la base de données.

La méthode a été élaborée en exploitant les résultats d'un grand nombre de simulations sur TRNSYS avec les conditions suivantes : [41]

Débit massique : $0.015 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Capacité du stockage : $50 \text{ à } 100 \text{ kg/m}^2$ de surface de captation

Efficacité de l'échangeur : $1 < \frac{\varepsilon C_{\min}}{UA} < 5$

En considérant une capacité de stockage de 75 kg/m^2 et :

$$0.6 \leq (\tau\alpha)_e \leq 0.9$$

$$5.0 \leq FrA_c \leq 120 \text{ m}^2$$

$$2.1 \leq U_g \leq 8.3 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$30 \text{ deg} \leq \beta \leq 90 \text{ deg}$$

$$7.2 \leq UA \leq 57.6 \text{ MJ/deg Jour}$$

$$140 \leq m_{ac} \leq 560 \text{ kg/jour}$$

Avec :

m_{ac} : consommation journalière d'eau chaude sanitaire

Alors le taux de couverture solaire est donné par l'expression suivante [41]:

$$f = 1.029 Y - 0.065 X - 0.245 Y^2 + 0.0018 X^2 + 0.0215 Y^3 \quad (7)$$

pour : $0 < Y < 3$ et $0 < X < 18$

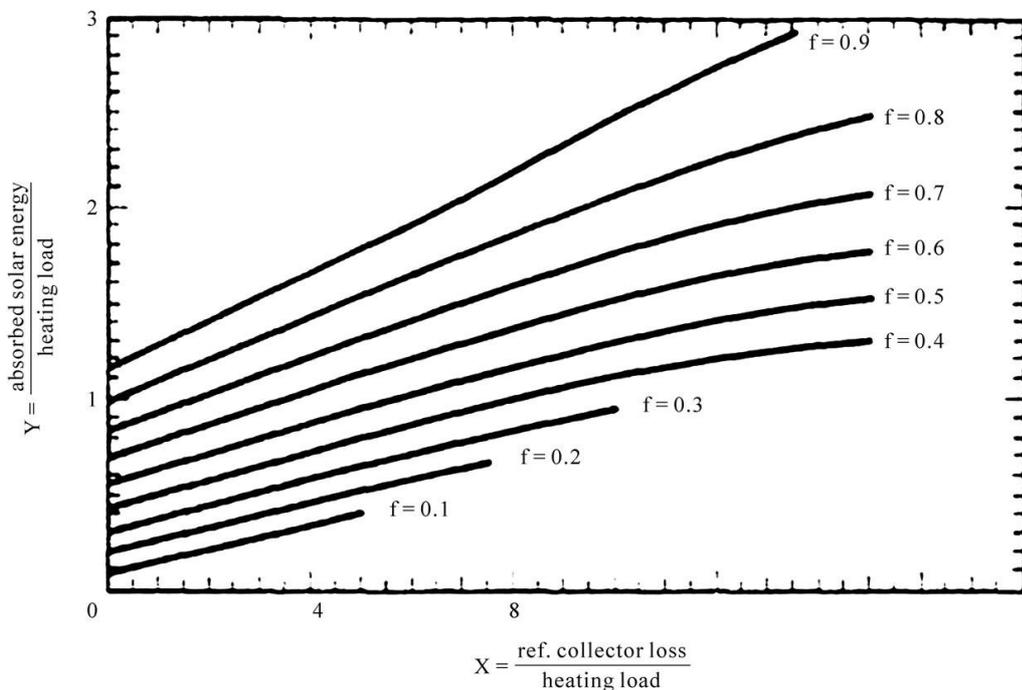


Figure 2-1 : Familles de courbes du taux de satisfaction [41]

X doit être corrigé à la fois en fonction de la dimension du stockage et de la température de l'eau froide. La méthode f-Chart a été développée avec une capacité de stockage

standard de 75litres/m² de capteur solaire. Pour les autres capacités de stockage, X doit être multiplié par un facteur correctif (Xc / X) défini par :

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{\text{Volume réel de stockage}}{\text{Volume standard de stockage}} \right)^{0.25} \quad (8)$$

Pour prendre en considération les fluctuations de la température de l'eau froide (Tf) et pour avoir une température de l'eau chaude minimale acceptable (Tc) (les deux ayant une influence sur la performance du chauffe-eau solaire) X doit être multiplié par un facteur correctif (Xcc / X) défini par :

$$\frac{X_c}{X} = \frac{11.6 + 1.18T_s + 3.86T_r - 2.32\bar{T}_d}{100 - \bar{T}_d} \quad (9)$$

Avec :

Tr : Température du réseau,

Ts : Température du stockage,

Td : Température diurne.

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthode F-chart en détaille, qui nous permet de dimensionner notre système en terme de surface de captation et de stockage.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3.1. Introduction

Après avoir présenté la méthode utilisée et dimensionner notre système en termes de surface et de stockage, nous allons maintenant entamer la simulation de notre système, avec un logiciel trnsys en variant plusieurs paramètres afin de trouver la meilleure configuration.

3.2. SIMULATION

3.3. Objectif de la simulation

Déterminer la configuration optimale du système surtout en termes de connexion des capteurs solaires (série, parallèle...) et déterminer les paramètres optimaux tels que, le débit d'eau, la configuration et le site optimum

3.4. Simulation du système

3.4.1. Présentation du logiciel

Le logiciel TRNSYS (Transient System Simulation) permet de modéliser des systèmes mécaniques et de prédire leur comportement en régime transitoire. Le fonctionnement de TRNSYS est basé sur l'utilisation de composants appelés TYPES. Chaque TYPE modélise un composant spécifique grâce à un système d'équations. Une large bibliothèque de TYPES est disponible avec le logiciel (ex. : capteur solaire, réservoir d'eau, échangeur de chaleur ou encore système de régulation). Les TYPES sont insérés dans la feuille de calcul de TRNSYS puis reliés entre eux par l'utilisateur. Un TYPE possède des paramètres (fixes durant la simulation), des entrées et des sorties. Ainsi, la sortie d'un TYPE pourra être l'entrée d'un autre TYPE. Les informations pouvant être échangées entre les TYPES sont très diverses (ex. : température, débit, taux d'échange de chaleur, signal de régulation, etc.). Le pas de temps et la durée de la simulation sont fixés par l'utilisateur. À chaque pas de temps, le logiciel résout le système d'équations. Une fois la convergence atteinte, il passe au pas de temps suivant.

À la Figure 4.1 est présenté un exemple d'assemblage TRNSYS. Une pompe de circulation alimente un capteur solaire plan. La température et le débit du fluide sortant de

la pompe sont envoyés au capteur. Le fichier météo est utilisé pour lire le fichier météo de la ville considérée. Les informations d'ensoleillement et de température extérieure sont envoyées au capteur. Le TYPE 2b permet quant à lui de contrôler la pompe de circulation en fonction de la température d'entrée et de sortie des capteurs. Et plotter 1 permet de générer un fichier de sortie (ex. : température de sortie du capteur). [40]

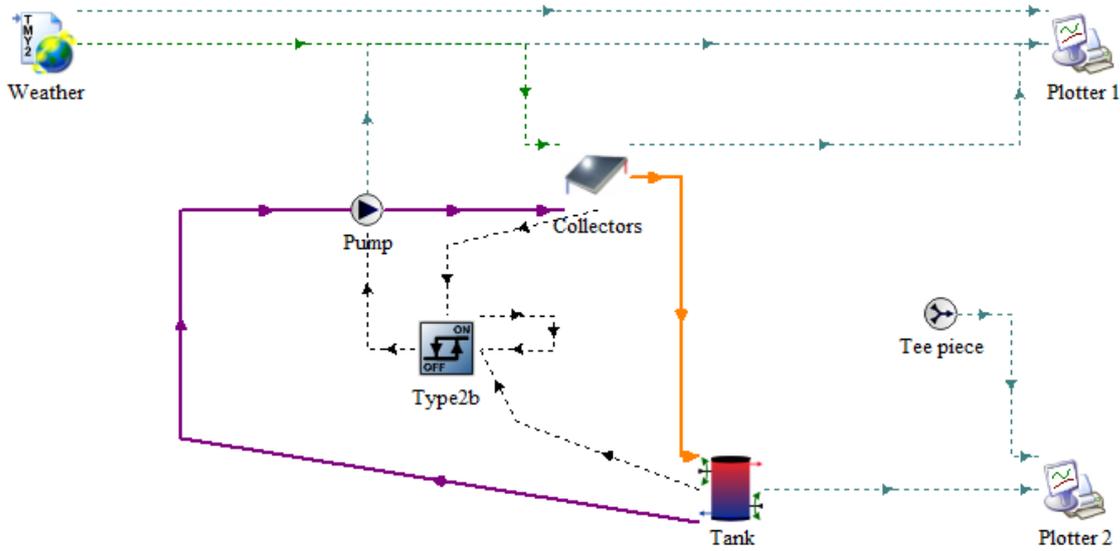


Figure 3-1 : Exemple d'un assemblage TRNSYS

3.4.2. Choix des zones climatique

L'énergie et le rendement du champ solaire ont été simulés par les composants de la bibliothèque dans le logiciel TRNSYS.

Nous avons choisi les 4 zones climatiques suivantes différentes :

Zone A : Alger (Cheraga) ($36.8^{\circ}, 3^{\circ}$)

Zone B : Blida ($36.47^{\circ}, 2.82^{\circ}$)

Zone C : Setif ($36.15^{\circ}, 5.43^{\circ}$)

Zone D : Ghardaia ($32.48^{\circ}, 3.68$)

Pour quatre journées représentatives dans l'année ces journées sont les suivantes :

21 Mars ; $t_1=1896h$; $t_2=1920h$; (équinoxe de printemps)

21 Juin ; $t_1=4104h$; $t_2=4128h$; (solstice d'été)

21 Septembre ; $t_1=6312h$; $t_2=6336h$; (équinoxe d'automne)

21 Décembre ; $t_1=8496$; $t_2=8520h$; (solstice d'hiver)

t_1 est la première heure du jour considéré

t_2 est la dernière heure du jour considéré

3.4.3. Données de la simulation de l'installation

Les données d'entrées nécessaires pour effectuer un calcul sur le logiciel trnsys sont :

- **Situation de stockage :**

Les conditions de stockage est à l'intérieur d'un local bien isolé à une température ambiante de 18 [°C].

- **Consommation :**

- La consommation moyenne journalière : 3500 [litre / jour].[38]

- **Le type d'installation :**

Chauffage solaire forcé avec échangeur à l'extérieur de la cuve de stockage.

- **Température d'utilisation :**

T_u : 60 [°C].

- **Le volume de stockage et le nombre de ballon :**

4000 [Litre / jour], repartis dans un ballon.

- **L'isolation des ballons :**

- Constante de refroidissement : 0,0501 [Wh/jour. L. °C].

- **Type de capteur :**

- Capteur solaire thermique plan réalisé et amélioré au CDER et testé en 1986 [44].

- Surface : 1,6 [m²]

- Rendement optique du capteur ; $B = 0.7$

- Coefficient des pertes global de l'installation ; $K = 6,5$ [W/m². °C]

- **L'inclinaison et l'orientation des capteurs :**

- Inclinaison des capteurs : à latitude du lieu.

- Orientation des capteurs : 0° plein Sud (pour l'hémisphère nord).

• **Donnée sur le type d'installation de la simulation :**

- Surface d'ouverture d'un capteur solaire : 1,6 [m²].
- Nombre de capteur : 80
- Surface total de captation est de $S_{total} = 128$ [m²].

Ces données sont les résultats de la simulation qu'on a réalisé sur un logiciel de dimensionnement sous Matlab élaborer par l'équipe du PNR [44] utilisant toujours la méthode F- chart .

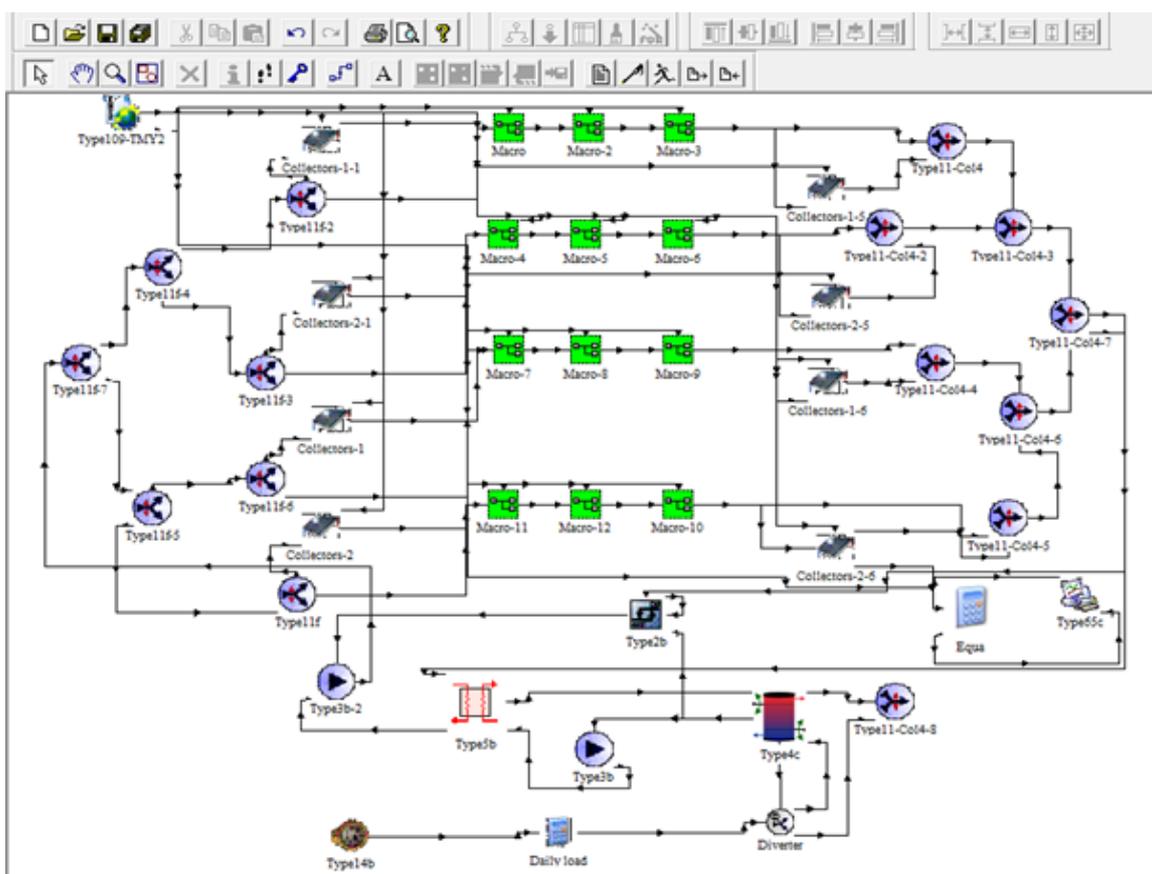
Les principales données d'entrées de ce logiciel sont essentiellement :

- Surface d'un capteur 1.6
- Rendement optique du capteur 0.7
- Coefficient de pertes globales du premier ordre 6.5 W/m²K
- Besoin journalier en eau chaude 3500 litres
- La température de procès 60 C°
- Le mois de référence 12
- Capacité de stockage 4000 Litres.

Le résultat nous a donné un nombre de capteur = 80 (pris comme hypothèse).

3.5. Présentation du schéma de la simulation

En figure 5.2, on présente le modèle du système choisies sur le logiciel en respectons la



configuration déterminée initialement.

Figure 3-2 : Modèle du système du TRNSYS (4 en série)

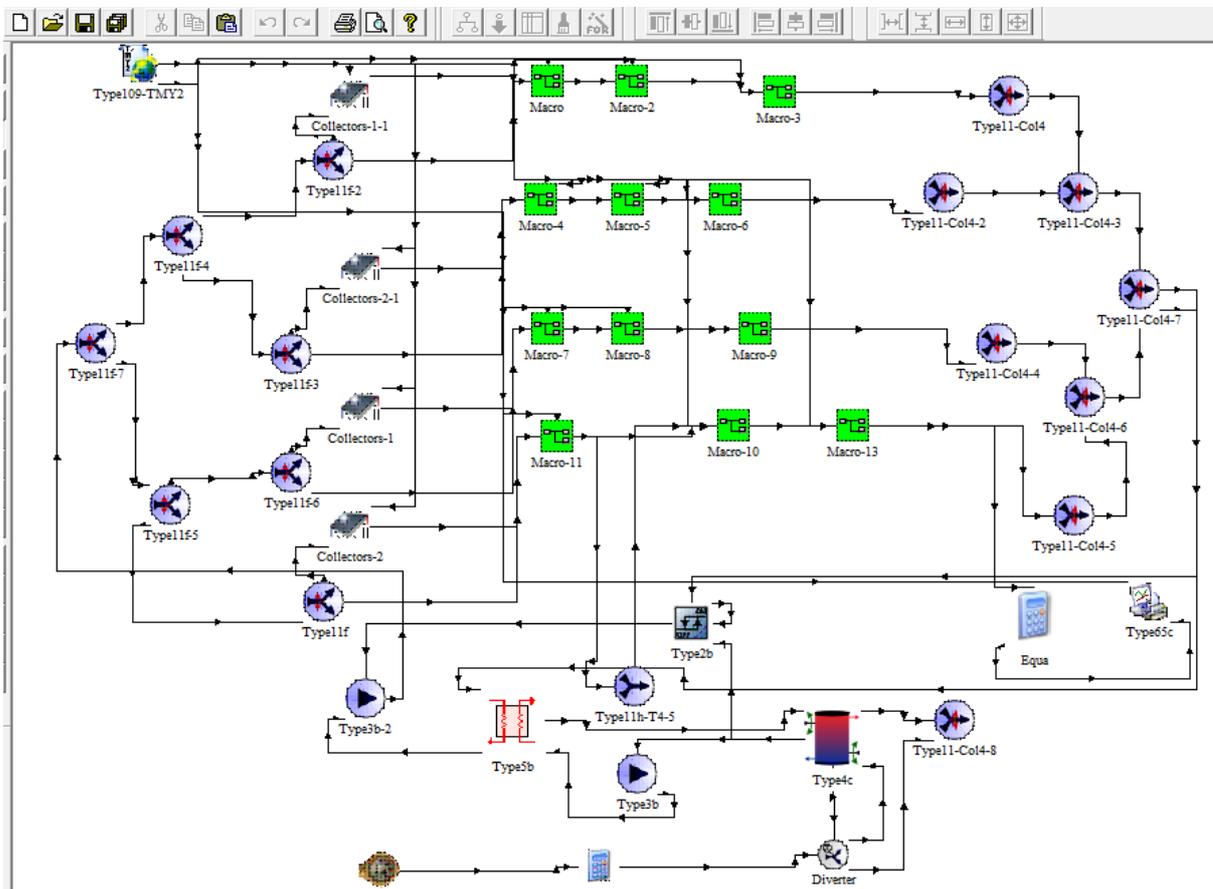


Figure 3-3 : Modèle du système sous TRNSYS

- Le champ de captation on à respectant le dimensionnement initial (80 capteur) avec les raccordements en série et en parallèle.
- Une cuve du stockage intégré. (Type 4c) d'une capacité de 4000 litres avec un appoint
- Un échangeur de chaleur externe (type 5b).
- Une régulation différentielle (type 2b).
- Des diffuseurs de (type 11f) et des mixeurs de (type 11) qui assurant le raccordement des capteurs en parallèle.
- Des macros pour simplifie la complexité du schéma.
- Les pompes de circulation (type 3b).

- Le fichier météo (type 109) a été utilisé pour la zone d'Alger (base de donnée de METEONORM).
- Afficheur des résultats numérique et graphique le (type 65c).

3.6. Choix de la période de simulation

Pour illustrer notre travail, nous avons pris de chaque saison de l'année une journée représentative (solstices 21 décembre et 21 juin) et les équinoxes (21 mars et 21 septembre). On choisi aussi Alger comme site de référence.

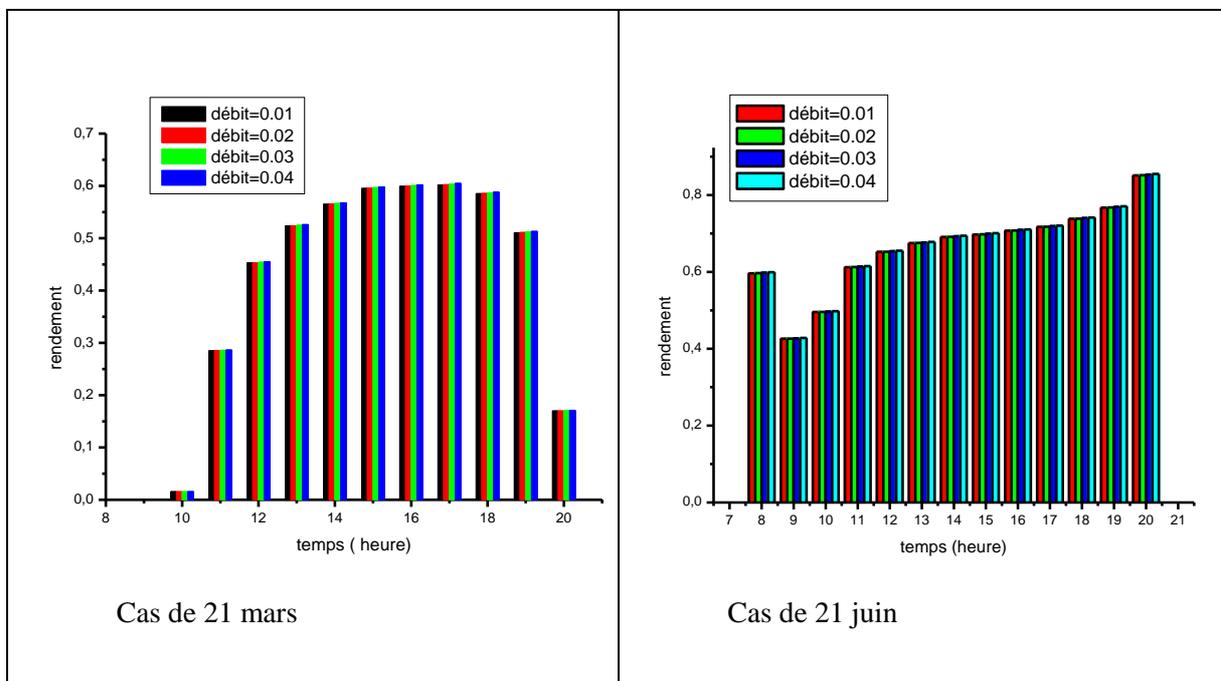
3.7. Variation du débit de circulation

Le dimensionnement de notre installation est basé essentiellement sur la comparaison entre les différentes configurations des capteurs et différentes débit, dont les résultats sont donnés comme suit :

3.7.1. Cas de Cinq capteurs en série

a) Le rendement

On représente dans la figure 3.4 les résultats du rendement du champ de capteur.



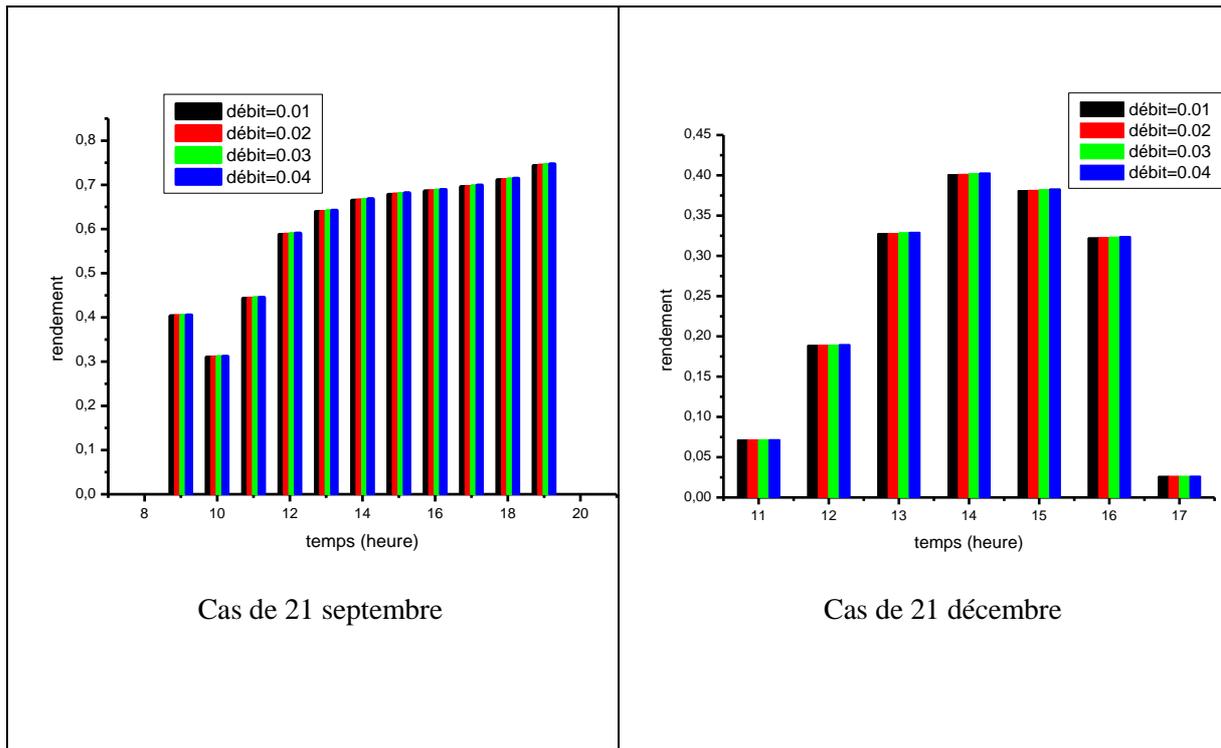


Figure 3-4 : La variation de rendement en fonction de temps

D'après ces graphes on remarque qu'il n'ya pas de grande différence entre ces rendements pour ces différentes valeurs de débits.

On constate aussi que le meilleur débit pour un meilleur rendement est 0.04kg /s m² car son rendement est relativement supérieur aux autres débits, on peut dire alors que plus le débit diminue le rendement diminue aussi.

b) L'énergie utile

On représente dans la figure 3.5 les résultats de l'énergie utile du champ de captation pour des débits différents.

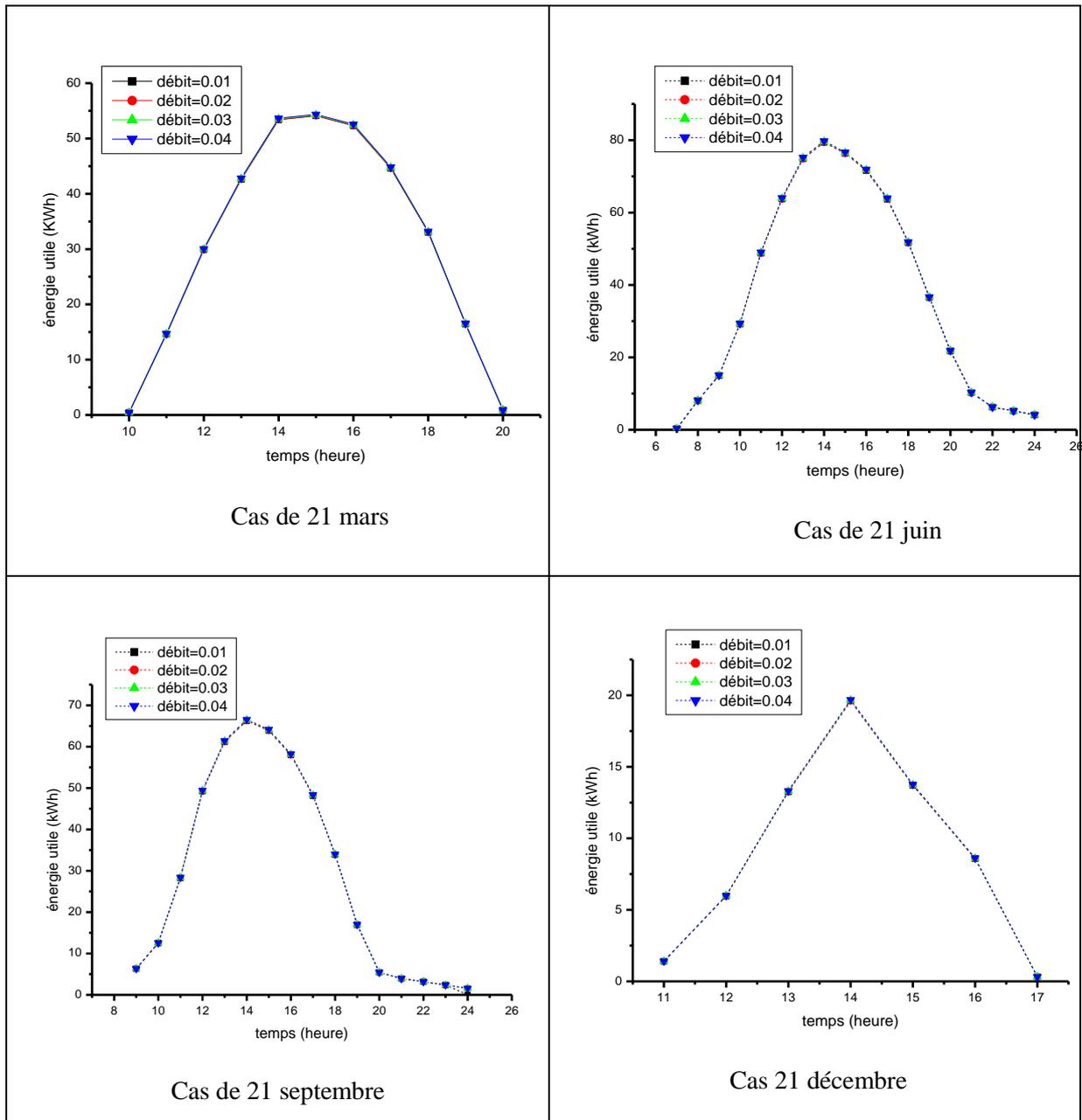


Figure 3-5 : La variation d'énergie utile en fonction de temps

On remarque sur la figure 3.5 que les courbes sont presque similaires ce qui démontrent le bon choix du modèle choisis, elles suivent la forme d'une cloche, elles atteignent le maximum à midi TSV autour de 66,5 kWh pour un débit de 0.04kg/s et 66.3 kWh pour un débit de 0.02kg/s et on a trouve 66.2 kWh par contre un débit de 0.01kg/s, pour le 21 septembre par exemple.

Cela nous permet de conclure qu'un débit de 0,04 kg / s m² est le plus efficace par rapport aux autres débits.

3.7.2. Cas de 4 capteurs en série

a) Le rendement

On représente dans la figure 3.6 les résultats du rendement du champs de capteur .

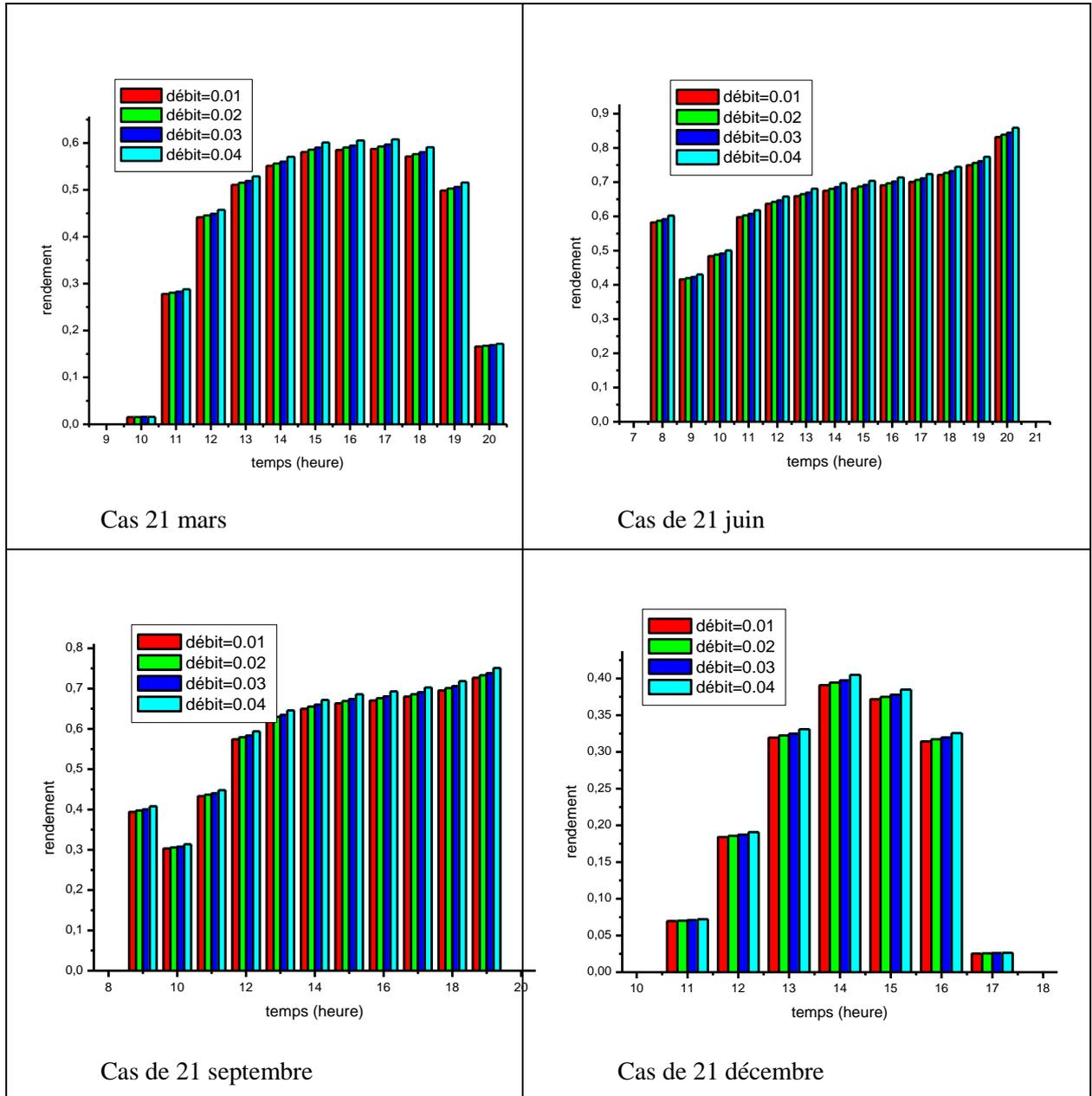


Figure 3-6 : La variation de rendement en fonction de temps

Dans ce cas (4 capteurs en serie), le meilleur debit pour un meilleur rendement reste le meme que celui dans le cas de 5 capteurs en serie (c'est-à-dire 0.04 kg/sm2)

Mais dans ce cas, la défférences entre les valeurs des rendements pour des différentes valeurs du debit est plutôt remarquable, les valeurs ne sont pas assez proches.

b) L'énergie utile

La figure 3.6 représente les résultats de l'énergie utile du champ de captation pour le cas de 4 capteurs en série pour des débits différents.

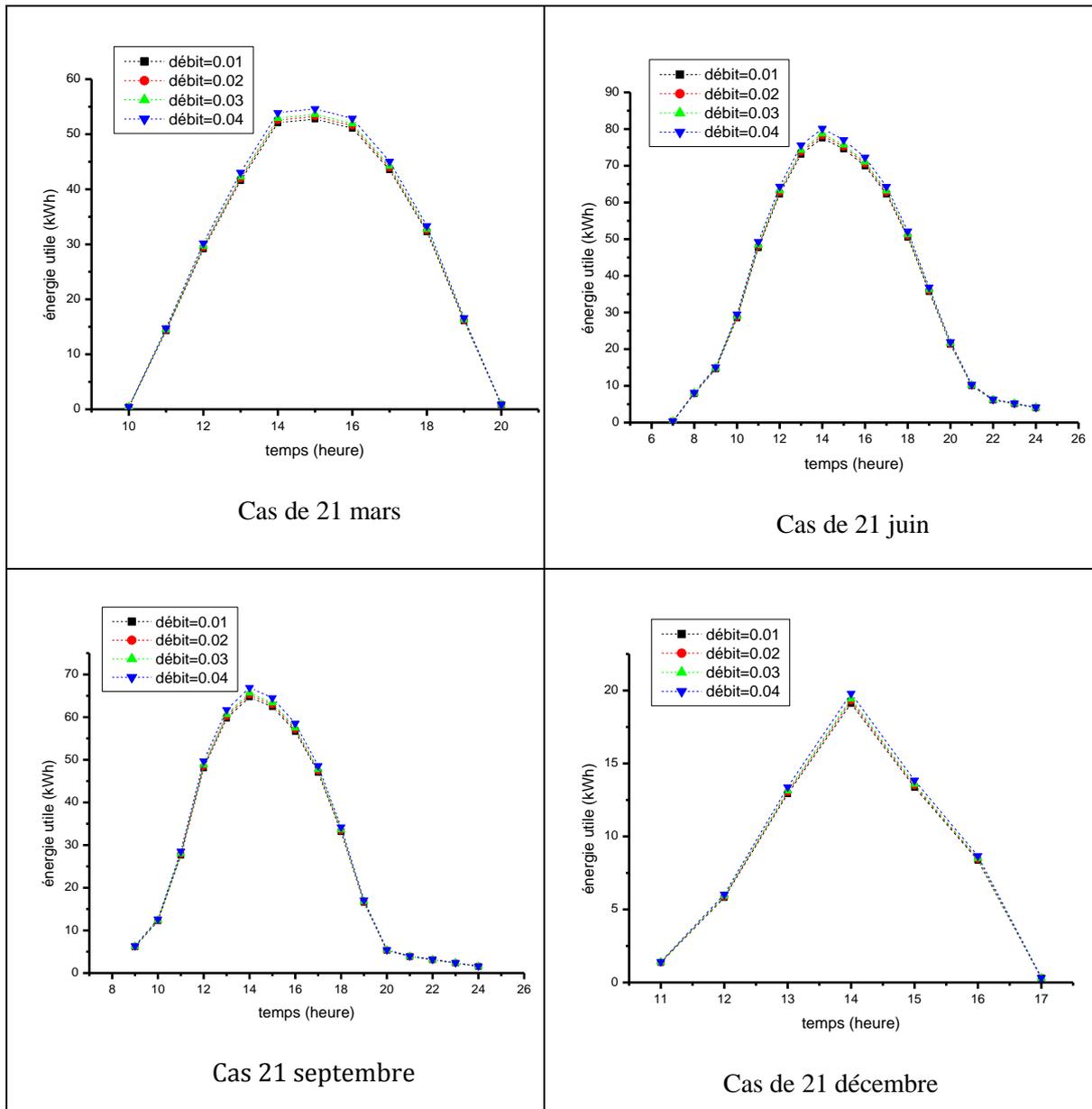


Figure 3-7 : La variation d'énergie utile en fonction de temps

On remarque sur la figure 3.7 que les courbes sont presque similaires, elles suivent la forme d'une cloche, elles atteignent le maximum à midi TSVautour de 66,89 kWh pour un débit de 0.04kg/s et 65.6 kWh pour un débit de 0.02kg/s par contre on a 64.9 kWh pour un débit de 0.01kg/sm². Pour 21 septembre.

Cela nous permet de conclure qu'un débit de 0,04 kg/sm² est le plus efficace par rapport aux autres débits. Ce qui est logique parce que plus débit augmente l'énergie utile augmente.

3.8. Variation des différentes configurations

a) Le rendement

Le dimensionnement de notre installation est basé essentiellement sur la comparaison entre les différentes configurations des capteurs et surtout de choisir la meilleure configuration, dont les résultats sont donnés comme suit :

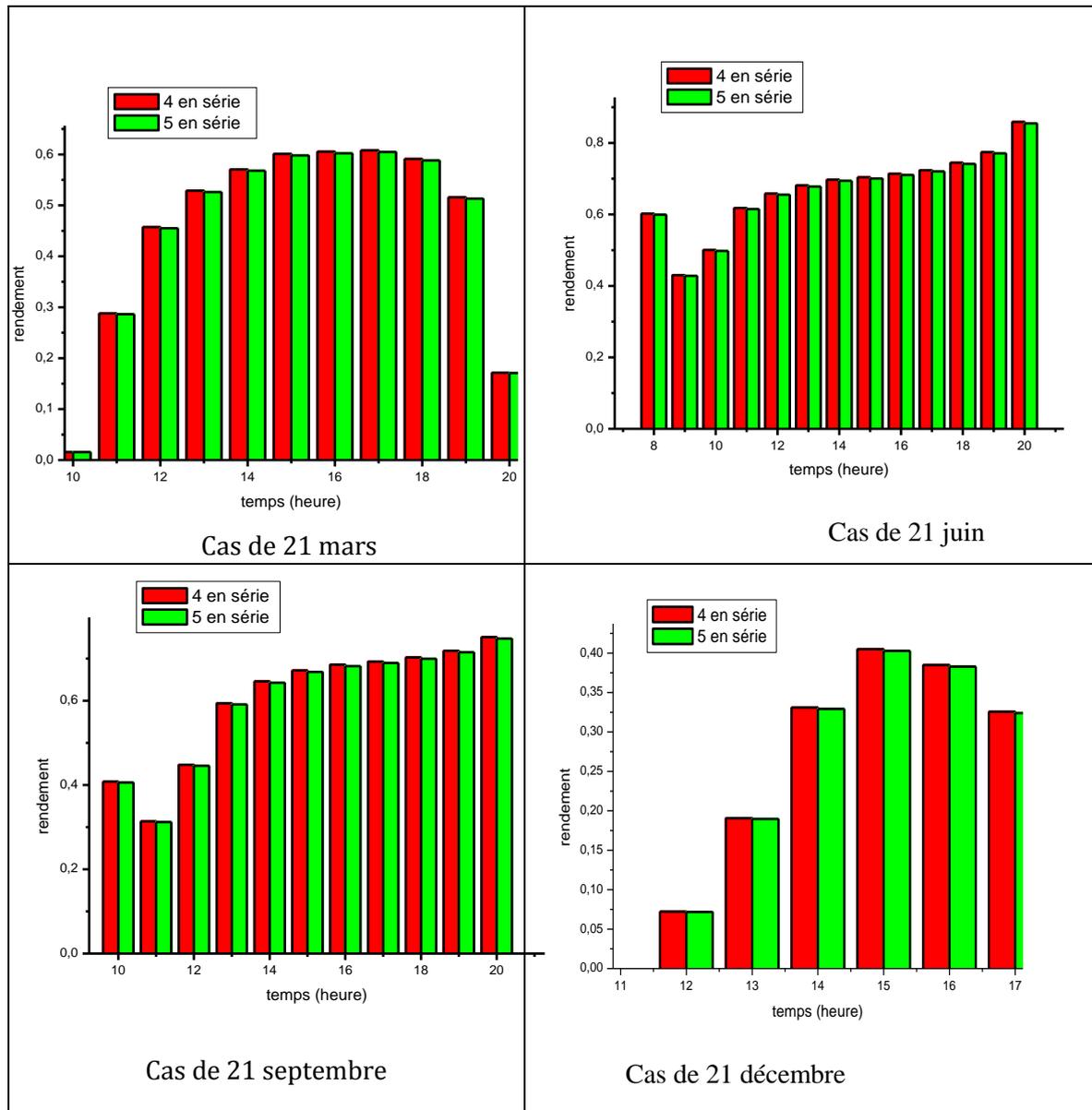


Figure 3-8 : La variation de rendement en fonction de temps

Après avoir calculé les rendements des quatre journées représentatives de chaque saison on remarque que quelque soit la journée ou la saison le rendement dans le cas d'utilisation de 4 capteurs en serie est meilleur à celui des 5 capteurs en serie.

b) L'énergie utile

Dans la figure 3.8, on présente les résultats de l'énergie utile du champ de captation pour le cas de 4 capteurs en série et 5 capteurs en série.

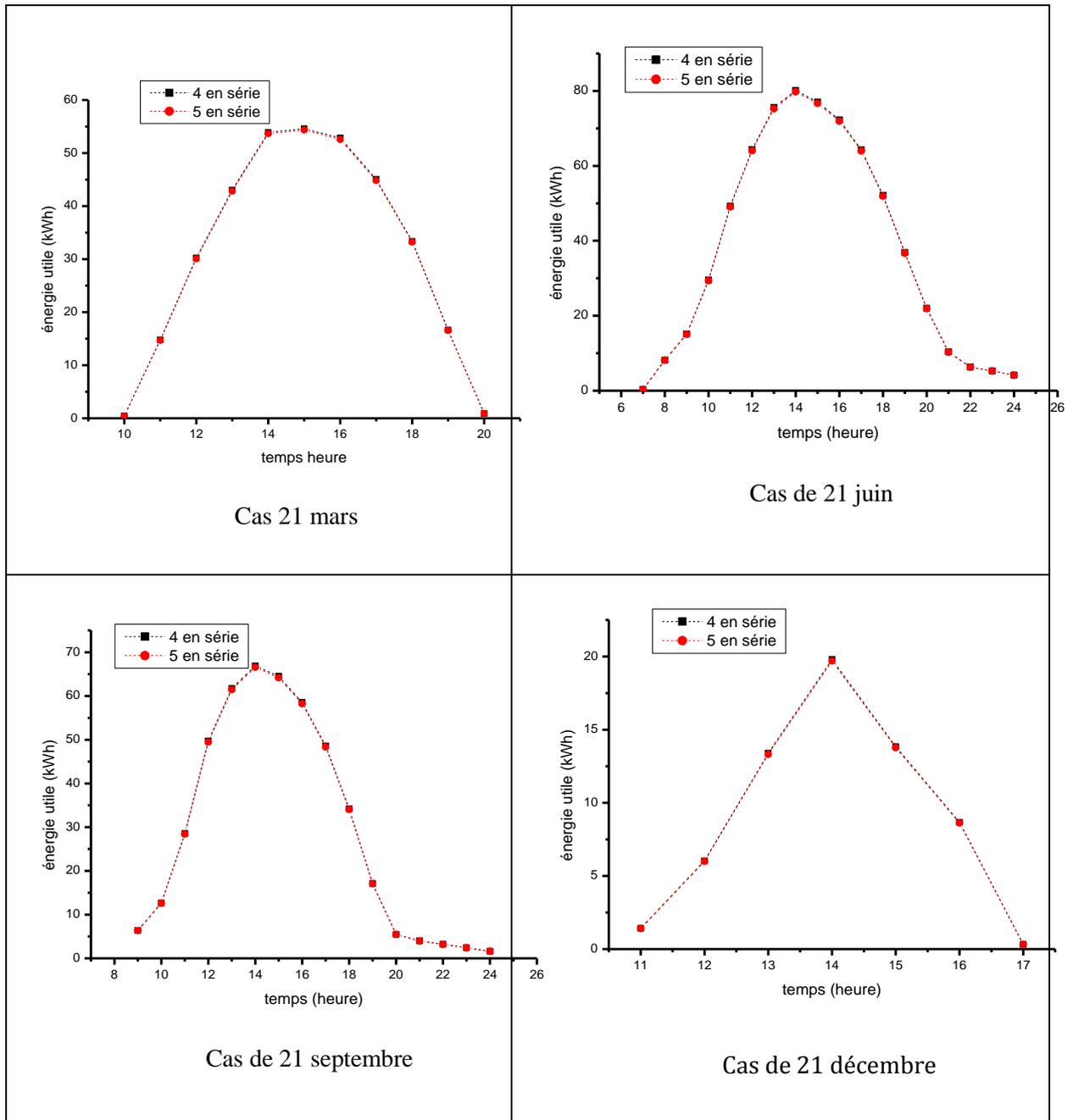


Figure 3-9 : La variation d'énergie utile en fonction de temps

On remarque sur la figure 3.9 que les courbes sont presque similaires mais la configuration de 4 capteurs en série est légèrement supérieure à celle de 5 capteurs en série, elles atteignent le maximum à midi TSV autour de 66,89 kWh pour quatre capteurs en série et 66.5 kWh pour cinq capteurs en série, (pour le cas du 21 septembre par exemple).

La moyenne journalière d'énergie utile de 0.04kg/s est égale 29.1 kWh par contre pour quatre capteur en série est de 28.95 kWh pour cinq capteur en serie.

Cela nous permet de conclure que le montage des capteurs en série diminue la satisfaction du système. En revanche, la configuration de 5 capteurs en serie est une préférence thermique pour l'énergie utile de l'eau à la sortie des capteurs donc la problématique principale est le choix entre elles pour assurer le choix optimum.

3.9. Variation des différentes zone climatiques

On évolue notre installation pour les 4 sites suivants : Alger, Blida, Sétif et Ghardaïa

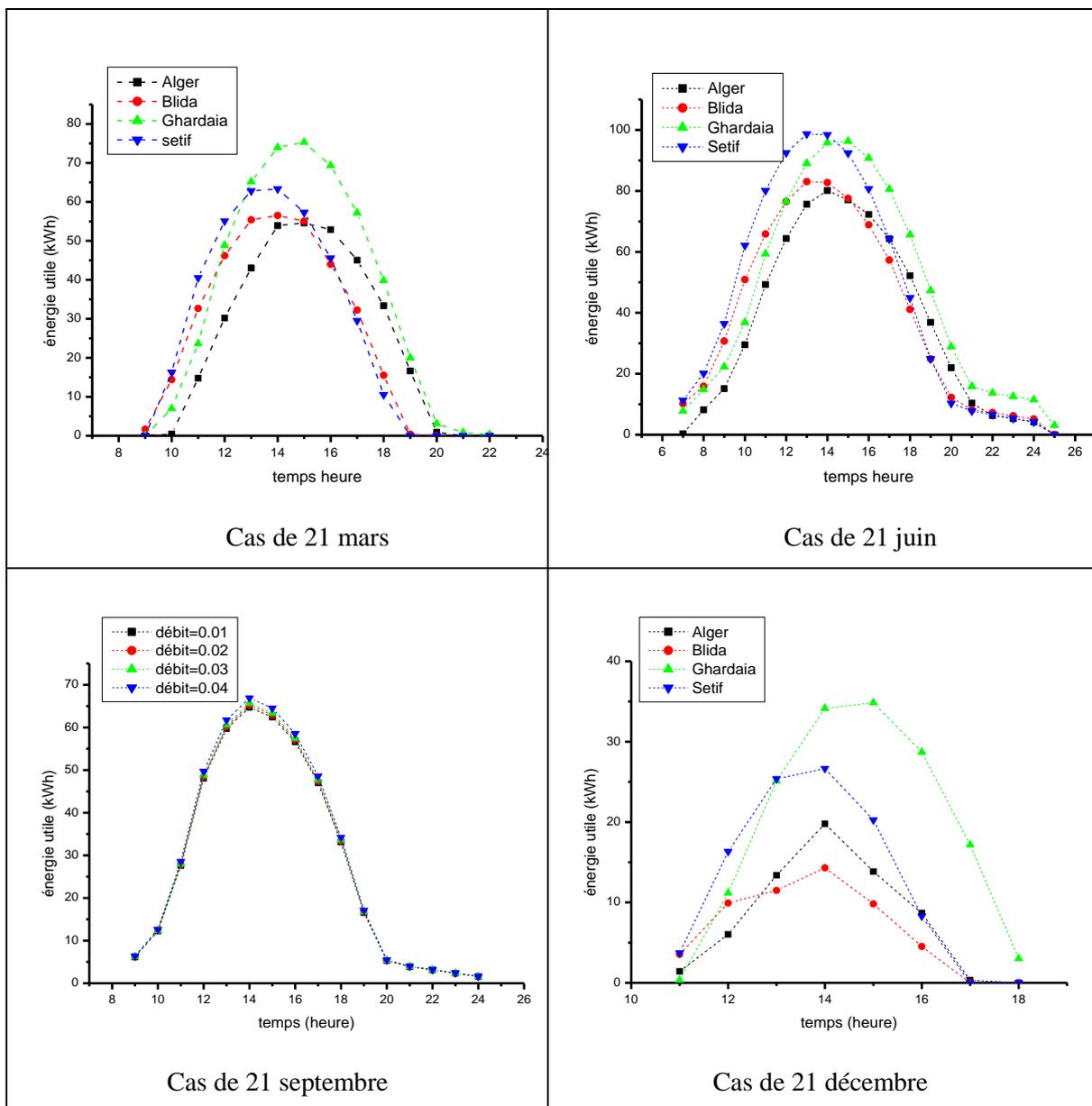


Figure 3-10 : La variation d'énergie utile des sites

On remarque sur la figure 3.10 que les courbes suivent la même allure la forme d'une cloche, elles atteignent le maximum à midi TSVautour de 82.37 kWh pour Ghardaïa ,72.22 kWh pour Sétif et on a trouvé 66.89kWh pour Alger par contre 41.01kWh pour Blida.

La moyenne journalière d'énergie utile de chaque site est comme suit :

Ghardaia : 34 kWh

Setif : 27kWh

Alger : 25kWh

Blida : 16kWh

Cela permet de conclure que Ghardaia le site le plus favorable pour cette insstallation.

3.10. Conclusion

On peut dire que les résultats de la simulation thermique donnent des résultats assez satisfaisants. Le choix de la configuration est un compromis entre la température de stockage la configuration de 4 capteurs en série donne de meilleur énergies utiles et le débit désiré est de 0.04 kg /sm2 par contre le meilleur site est celui de Ghardaïa.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles de l'énergie renouvelable, celle de l'utilisation de l'énergie solaire thermique dans l'industrie, et une étude de modélisation du système solaire thermique.

En premier lieu on a fait la définition et une présentation des principaux travaux nationale et internationale. En deuxième lieu nous avons détaillé les différents composants du système solaire thermique dans l'industrie et leurs principes du fonctionnement, ainsi que les facteurs qui influencent sur le rendement des panneaux, les différentes technologies des capteurs solaires, on fait présentation des différents types de chauffages solaire.

Les résultats ont montré que la priorité du choix de la surface de captation et du rendement global était favorable à la configuration 4 en séries avec un débit de 0.04kg/s avait pour objectif d'augmenter la température de l'eau chaude sanitaire au niveau de la cuve du stockage.

Ce travail a montré aussi que le meilleur site d'implantation de tels systèmes était à Ghardaïa.

Ce travail nous permet de montrer que de telles installations et tels systèmes sont très rentables et très compétitifs, et possédant un avenir très prometteur et peuvent aussi de participer fortement à la réduction des gaz à effets de serres et nous permettent en même de réduire la consommation énergétique notamment du chauffage.

Bibliographie et Webographie

Bibliographique

- [1] :S.A.Klein, P.I.Cooper, T.L.Freeman, D.M.Beekman,W.A.Beckman,J.A.Duffie .
method of simulation of solar processes and its application.1975
- [2] : CDER de Marrakech.« installation de chauffage solaire d'une capacité de 2500 litres et une autre installation de 950 litre». Maroc ; Rapport interne, (1986).
- [3] : B. Zaouari« étude technico-économique d'une installation solaire collective pour le chauffage de l'eau sanitaire à l'école national d'ingénieurs de Monastir» .Tunisie ;(1996).
- [4] : Akinoglu, B.G., Shariah, A.M. and Ecevit, A. (1999). Solar domestic water heating in Turkey. *Energy*, 24(5), 363-374.
- [5] : K.Johannesa, G.Fraissea, G.Acharda, G.Rusaouënb, Comparison of solar water tank storage modelling solutions.2005
- [6] : Andersen E, Furbo S. Theoretical variations of the thermal performance of different solar collectors and solar combi-systems as function of the varying yearly weather conditions in Denmark. *Sol Energy* 2009.
- [7] : Frein A, Calderoni M, Motta M. Solar thermal plant integration into an industrial process. *Energy Procedia* 2014;48:1152–63.
- [8] : Uppal A, Kesari JP. Solar industrial process heat in indian automobile industry. *IJLTEMAS* ; 2015.
- [9] : Colangelo G, Favale E Brown KC. Applications and systems studies for s, Miglietta P, Risi A. Innovation in flat solar thermal collectors : a review of the last ten years experimental results. *Renew Sustain Energy Rev* 2016.
- [10] : Brown KC. Applications and systems studies for solar industrial process heat. Solar Energy and Resource Institute ; 1980, (<http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/481.pdf>), [accessed 22 September 2016].
- [11] : Cozzinia M, Pipicielloa M, Fedrizzia R, Hassineb IB, Pietruschkab D, Robert Söll R. Performance analysis of a flat plate solar field for process heat. *Energy Procedia* 2016.
- [12] : Nogueira CEC, Vidotto ML, Toniazzo F, Debastiani G. Software for designing solar water heating systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2016.

- [13] : A. Hamid « Réalisation et expérimentation des capteurs solaires plans dans le but d'optimiser la surface de captation d'une installation de chauffage d'eau solaire collectif». CDER, Rapport interne ; (1990)
- [14] : KHOUKHI. M, Dimensionnement d'une installation de chauffage d'eau collectif d'une capacité de 800 litres, Centre de développement des énergies renouvelables de Bouzareah, Rapport technique, 1993.
- [15] : M. Ouezzane, H. Makhoulf «Réalisation d'une installation de chauffage eau solaire collective de 1500 litres». CDER, Rapport interne, (1992).
- [16] : Internat LAFRI. D, M. KOUKHI et D. SEMMAR, Simulation numérique d'une installation collective d'eau chaude solaire de capacité de 800 litres, Centre de développement des énergies renouvelables de Bouzareah, Rapport interne, 1996.ionales de Thermique, Marrakech, Maroc, Avril 1995.
- [17] : S. Sami, D. Lafri et A. Hamid « Etude sur le comportement thermique d'une installation de chauffage d'eau collective d'une capacité de 400 litres» ; CDER ; Rapport interne, (1999).
- [18] : FERRADJ. F et D. NIBOU, Etude du système d'appoint pour les installations du chauffage d'eau solaire collectives, Département d'énergétique, Université Saad Dahleb de Blida, Thèse d'Ingénieur d'état, 2000.
- [19] : S.Sami, A.Hamid, D.Lafri et D.Semmar, "optimisation des surfaces de captation des installations solaires de chauffage d'eau collectif", CHEMSS 2000 - Alger 13-15 Mai 2000
- [20] : A. Hamid, S.Sami, D.Semmar, D.Lafri et R.Kharchi « Etude et réalisation d'une installation solaire de chauffage d'eau solaire collectif d'une capacité de 400litres» CDER ; Rev, En, Ren, Zone Arides, 95-100,(2002).
- [21] : S.Sami-Mechri, A. Hamid, M. Belhamel& N.Ait Messaoudene « Etude de la rentabilité d'une installation solaire de chauffage d'eau collective appliquée à différents sites algériens».CDER, Rapport interne ;(2003).
- [22] : B.Boutaghriout, A. GHouai, C. Hamouda & A. Malek, « réalisation d'une étude préliminaire du potentiel de production d'eau chaude par capteurs plans solaires pour une application industrielle dans la région des hauts plateaux». l'université de Batna ; Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 723 – 734(2010)
- [23] : Kalogirou, S. (2009). Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. Solar energy, 83(1), 39-48.

[24] Mounir, A., Rima, Z. and Aziz, N. (2013). Technical-Economic Analysis of Solar Water Heating Systems at Batna in Algeria. *Sustainability in Energy and Buildings*, 22, 787-796.

[25] : Sellami, R., Merzouk, N.K., Amirat, M., Chekrouni, R., Ouhib, N. and Hadji, A. (2016). Market potential and development prospects of the solar water heater field in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 617-625.

[26] : Sami, S., Semmar, D., Hamid, A., Mecheri, R. and Yaiche, M. (2018). Viability of integrating Solar Water Heating systems into High Energy Performance housing in Algeria. *Energy*, 149, 354-363.

[27] : Solar-Heat-Worldwide-2020.

[28] : K. Sharmaa, C. Sharmab,C. Mullicka,C. Kandpala. Solar industrial process heating : A review. India2017.

[29] : Bouakaz .A «Etude du potentiel d'énergie solaire thermique utilisé pour la production de l'eau chaude dans l'industrie agroalimentaire». These magister, université Hadj Lakhdar Batna (2012).

[32] : F. Yettou1, A. Gama1, C. Hamouda et A. Malek. Etude et réalisation d'un banc d'essai pour un chauffe-eau solaire à circulation forcée dans la région des Hauts Plateaux.CDER. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°1 (2008) 119 – 128

[33] : Benakli.S.O, Addad.M, «Simulation d'une installation solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et chauffage pour une maison individuelle». These master, université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou (2013).

[36] RABIU ANIS A. «assignment on water heating».

[38] : Kouadri M, «étude technico-économique d'une installation de chauffage solaire industriel». Université M'Hamed Bougara de Boumerdès 2013.

[40] : Becha.G.Ben Chabane.Salah. «Étude technico-économique d'une installation de chauffe-eau solaire à usage industriel» ; université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.2014

[41] : M.Merzouk «Conversion Thermodynamique Solaire Potentiel, Théorie, Systèmes et Performances, cours pour master 2 énergies renouvelables » ; université Saad Dahleb de Blida (39)

[42] : Duffie J. A. e, W. A. Beckman et J.A.Duffie, *Solar heating design*.

[43] :F. Gama, F.Chekired, N.Aouchiche, C.E.Chitour. Etude, conception et réalisation d'une chauffe eau solaire.Étude technico-économique.

[44] : Merzouk Mustapha, « Etude théorique et expérimentale d'un capteur sous vide», Thèse magister, CNR, (1986).

Webographie

[30] : <http://www.outilssolaires.com/premier/index-sousvide.htm>

[31] <https://www.energiesdouce.com/content/16-conseils-faq-panneaux-capteurs-solaires-thermiques-a-eau>

[34] LE PANNEAU CHAUFFE-AIR SOLAIRE POUR PRÉCHAUFFER L' AIR DE LA MAISON ; <https://www.ecohabitation.com> ;(2012).

[35] <https://www.forumconstruire.com/guides/guide-choisir-chauffe-eau/chauffe-eau-solaire-monobloc-elements-separes.php>.

[37] <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-thermique/eau-chaude-sanitaire/circulation-forcee>

[38] <https://boutique-solaire-diffusion.eu>