

Introduction générale

Introduction générale

La croissance spectaculaire de la population mondiale au cours du dernier siècle ainsi que le développement industriel et l'accélération de l'urbanisme se traduisent par une demande d'énergie en forte expansion

L'Algérie de par sa position géographique dispose de l'un des plus importants gisements solaires dans le monde avec une durée d'insolation sur la quasi-totalité est classée comme un des pays les plus pourvus en énergie solaire.

Fournir de l'énergie propre en quantité suffisante et à un bon prix, constitue de nos jours un impératif majeur pour le développement de toute nation. En effet, l'augmentation de la demande en Energie, la détérioration accélérée de l'environnement liée aux résidus des Ressources énergétiques utilisées, posent de sérieux problèmes à l'échelle globale. L'impact Socioéconomique de ces problèmes ne peut que s'intensifier à court et moyen terme. Face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), en énergie d'origine thermonucléaire (uranium, plutonium...), face aux multiples crises pétrolières, économiques, aux changements climatiques dus à l'effet de serre, la science c'est intéressé aux ressources dites « renouvelables », et particulièrement à l'énergie solaire, qui a l'avantage d'être propre et renouvelable. Les applications de l'énergie solaire sont nombreuses et variées à savoir, le chauffage des habitations, des piscines, des serres, la production d'eau chaude sanitaire, la distillation de l'eau, le four solaire, le séchage, le pompage de l'eau ou la production d'électricité, L'énergie solaire n'a pas besoins d'une technologie de pointe pour son utilisation, propre non polluante, disponible sur l'ensemble du globe terrestre évidemment à différente intensité, durable et inépuisable (si l'on compte le temps en millions d'années). Cependant il y a un certain nombre de facteurs rendent son exploitation difficile, principalement l'intermittence du rayonnement solaire et sa variation journalière et même suivant l'année, en effet l'énergie solaire reste tributaire des conditions météorologiques de plus il y a un déphasage entre les besoins en énergie (chaleur) et les apports générés par l'énergie solaire et vu cette indisponibilité il faut toujours prévoir un appoint en énergie pour chaque utilisation, les systèmes solaires sont souvent assistés énergétiquement.

Les pompes à chaleurs assiste constituent un moyen de chauffage et de refroidissement qui permet de récupérer de la chaleur et sont devenues un moyen de chauffage et refroidissement

Introduction générale

conventionnel, à condition de disposer sur le lieu de leurs utilisations d'une source froide de chaleur abondante et gratuite et à niveau de température acceptable. le présent travail consiste à étudier la simulation dynamique des pompe à chaleur réversible alimentée par des capteurs thermiques. Le système est appliqué à une habitation résidentielle située en Algérie. Comme la pompe à chaleur est réversible, elle est activée en mode chauffage en hiver et en mode rafraichissement en été. L'excès de l'énergie thermique produite par les capteurs thermiques peut être utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire.

Dans ce contexte nous abordons le sujet en trois chapitres :

Chapitre1 : Recherche bibliographique

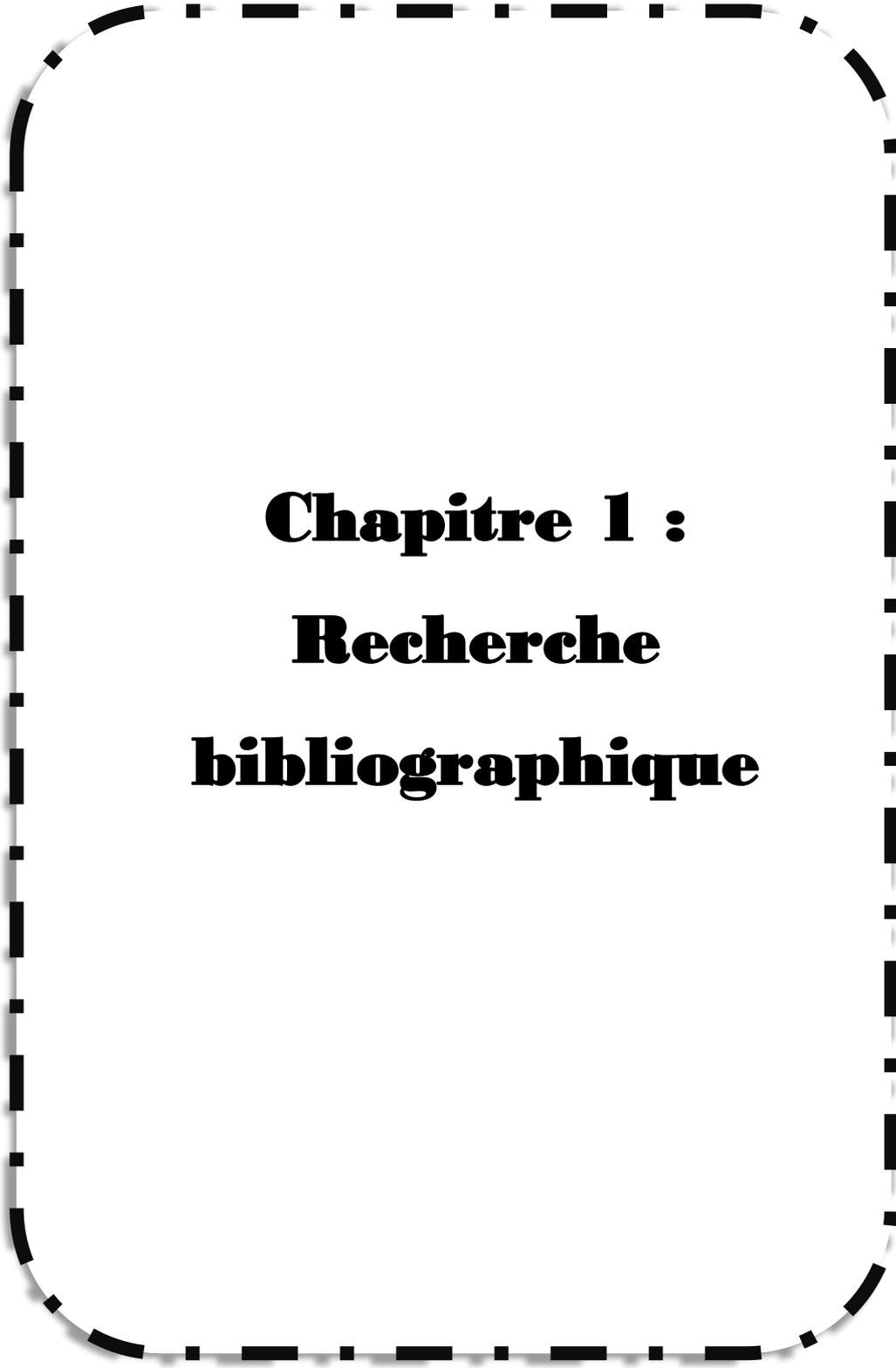
Danscechapitrenousavonseffectuéunerecherchebibliographiquessurles technologies des pompes à chaleurs, voir quelques travaux concernant les pompes à chaleurs assistées par l'énergie solaire(renouvelable)que nous avons effectué.

Chapitre2 : Modélisation d'une pompe à chaleur réversible

Modélisation mathématique des différents composants d'un système de pompe à chaleur couplé à des capteurs thermiques plans ; le système est désigné pour le chauffage et le rafraichissement et la production de l'eau chaude sanitaire pour une maison individuelle située en Algérie.

Chapitre3 : Résultats de simulation et discussion

Simulation dynamique, interprétation et la discussion des résultats obtenus parTRNSYS16, d'un système composé d'une pompe à chaleur réversible couplé à des capteurs thermiques, Voir le comportement thermique et les performances du système proposé.



Chapitre 1 :
Recherche
bibliographique

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

1.1. Introduction :

La technologie des pompes à chaleur est l'une des meilleures solutions pour répondre aux problématiques associées à la forte consommation dans le secteur des bâtiments et les émissions des gaz à effet de serre qui en résultent. Cependant, ces elles sont souvent basées, dans leur fonctionnement, sur l'énergie primaire induisant une forte consommation d'énergie électrique. Le couplage des pompes à chaleur à des capteurs solaires peut réduire considérablement la consommation d'électricité et améliorer par conséquent le rendement global du système.

Dans ce chapitre nous allons effectuer une recherche bibliographique sur les pompes à chaleurs réversible assistée par énergie solaire thermique, et discuter quelques travaux réalisés dans ce domaine.

1.2. Pompe à chaleur :

Une pompe à chaleur (PAC) est une machine thermodynamique qui transfère de la chaleur d'un milieu à une température basse vers un milieu à une température plus élevée. [1]. Ce transfert d'énergie s'effectue par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène [2].

Une pompe à chaleur va utiliser les calories présentes dans l'air, le sol ou même l'eau pour les restituer sous forme de chaleur. Celle-ci peut être diffusée directement dans votre logement ou chauffer de l'eau pour votre circuit de chauffage [3].

1.2.1. Les différents types de pompes à chaleur :

Les principaux types de pompes à chaleur sont :

a) - Pompe à chaleur air/eau

Dans ce type d'installation, la PAC est composée d'un échangeur à air et d'un échangeur à eau. L'échangeur à air permet l'échange de chaleur entre le fluide frigorigène et l'air. Tandis que l'échangeur à eau assure l'échange thermique entre le fluide frigorigène et l'eau de l'installation.[41]

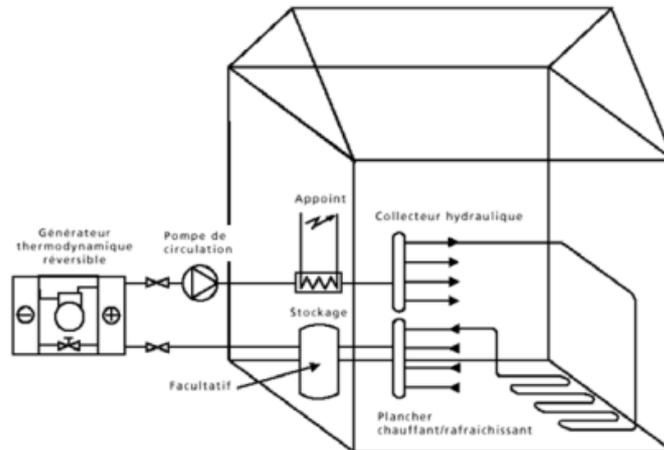


Figure1 .1 : Pompe à chaleur air/eau[41]

b)- Pompes à chaleur eau/eau

Cette installation se compose de deux échangeurs de chaleur à eau qui assurent l'échange de chaleur, d'un côté, entre le fluide frigorigène et l'eau de la source d'énergie et de l'autre côté, entre le fluide frigorigène et l'eau de l'installation de distribution.

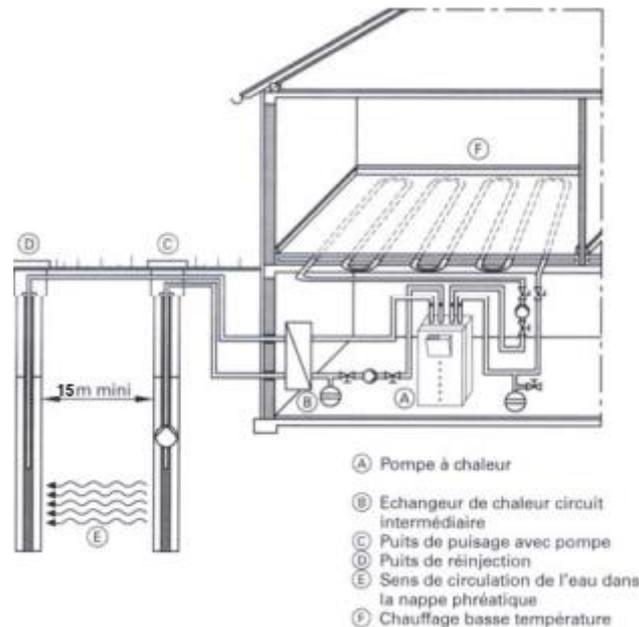


Figure1. 2 :PAC eau/eau [41]

c)- Pompes à chaleur couplées avec le sol ou géothermales

Ce type de PAC est équipé des capteurs enterrés horizontalement ou verticalement dans le sol et un échangeur à eau permettant la distribution de l'eau de chauffage.[41]

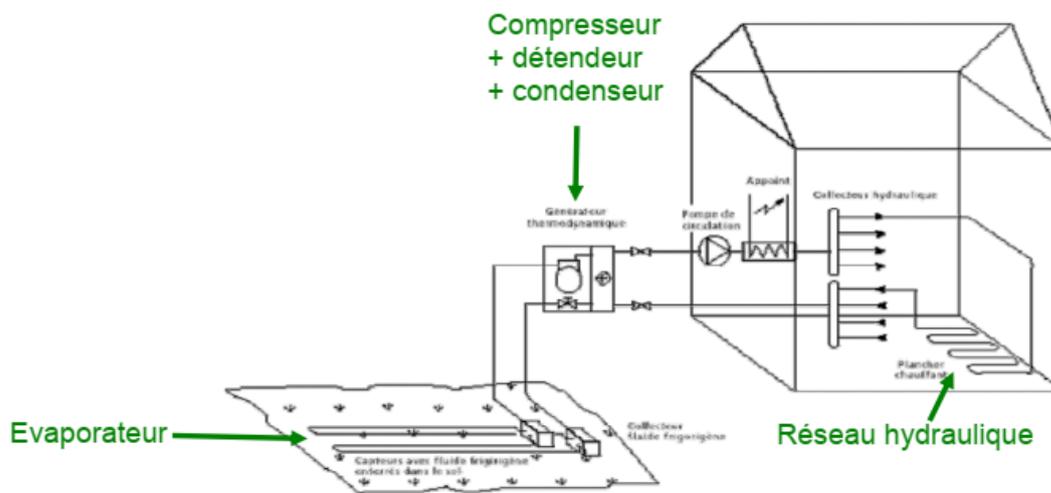


Figure1. 3 : Pompe à chaleur eau/eau[41]

d)- *Pompe à chaleur air/air* :

Les calories sont prélevées dans l'air, et côté utilisation, elles sont restituées dans l'air.[41]
 Une pompe à chaleur air-air utilise l'énergie contenue dans l'air extérieur pour produire de l'air chaud, permettant de chauffer un logement. Installé par un professionnel, ce système de pompe à chaleur (PAC) aérothermique permet de réaliser des économies d'énergie et de participer à la protection de l'environnement.

1.2.2. Les composants d'une pompe à chaleur :

Un circuit d'une pompe à chaleur classique comprend essentiellement 4 éléments (Figure-4) :

Un évaporateur : est un échangeur de chaleur qui permet de capter la chaleur à partir d'une source extérieure (eau, air, ou sol).

Un compresseur : comprime le fluide frigorigène. Cette compression induit une augmentation de température.

Un condenseur : c'est un échangeur de chaleur à surface avec circulation d'un côté du fluide frigorigène à condenser et de l'autre côté de fluide de refroidissement (air, eau, etc...). Le but est donc d'évacuer la chaleur absorbée par l'évaporateur. Cette évacuation de chaleur entraîne la condensation du fluide frigorigène.

Détendeur : Cet élément entraîne une chute de pression. Le fluide frigorigène entre dans cet organe à l'état de liquide à haute pression et sort à l'état de liquide basse pression [1].

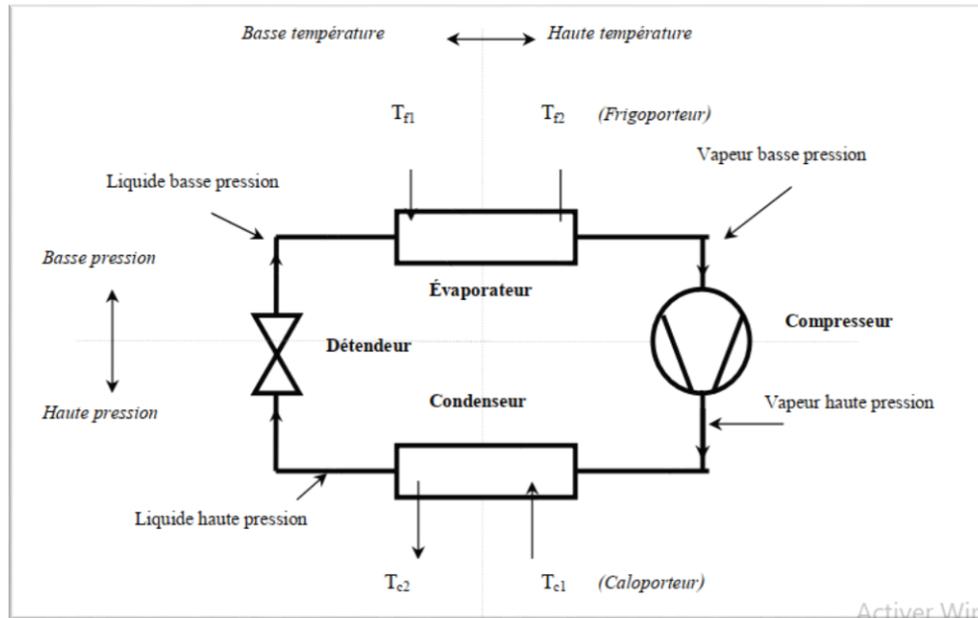
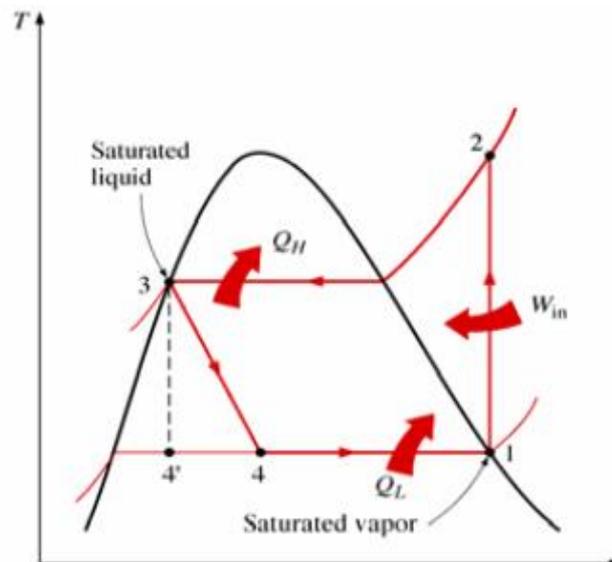


Figure1.4: Composants d'une pompe à chaleur [4]

1.2.3. Le principe de fonctionnement :

Dans la PAC le transfert de chaleur est effectué à l'aide d'un fluide frigorigène qui décrit un cycle fermé inversé, (cycle de Rankine inversé).

La chaleur environnante de l'air ou de la terre ou de l'eau est amenée à l'évaporateur d'où elle sera transmise au milieu de travail de la pompe à chaleur (avec un point d'évaporation très bas), va donc assurer l'échange thermique du fluide extérieur vers le fluide frigorigène. Le prélèvement de chaleur à basse température a pour effet de faire entrer en ébullition le fluide frigorigène liquide admis dans l'évaporateur [4]. L'évaporation s'effectue à la température de vaporisation T_{ev} , correspondant à la pression d'évaporation P_{ev} du fluide frigorigène, ce milieu passe alors à l'état de vapeur. Cette vapeur est comprimée dans le compresseur est aspire, sous la pression P_{ev} , la vapeur de frigorigène issue de l'évaporateur et la comprime jusqu'à la pression P_c pour la refouler dans le condenseur [4] et ainsi chauffée. Dans le condenseur, la vapeur donne sa chaleur au circuit de distribution du chauffage, est de rendre au fluide frigorigène son état liquide qui libère ainsi la chaleur pour chauffer le système (local), va donc assurer l'échange thermique du fluide frigorigène vers le système. [4] Ainsi le milieu est liquéfié toujours à haute pression, qui sera diminué dans le détendeur, est le circuit recommence à zéro.



Etapes de transformation :

- 1-2 : fournie de travaille
- 2-3 : dégage la chaleur
- 3-4 : détente
- 4-1 : absorbe la chaleur

Figure1.5 : Représentation d'un cycle d'une pompe à chaleur simple [2]

1.2.4. Les fluides frigorigènes :

Un fluide frigorigène est un composé chimique facilement liquéfiable dont on utilise les chaleurs latentes (vaporisation ou de condensation) pour produire du froid ou de la chaleur [7]

Les fluides frigorigènes sont choisis pour leurs températures de passage de l'état liquide à l'état gazeux (assuré lors de ses changements de phase), et réciproquement, il faut également tenir compte des pressions à mettre en jeu et de la quantité d'énergie nécessaire pour provoquer ce changement d'état.[5]

La température du fluide caloporteur est la clé de transfert de chaleur [6]

Parmi les fluides réfrigérants on distingue différentes catégories de molécules :[5]

Les chlorofluorocarbones (CFC), R11, R12

Les hydro chlorofluorocarbones (HCFC)

Les hydrofluorocarbures (HFC)

Les hydrocarbures (alcane ou PFC)

Les composés inorganiques ; ammoniac, CO2

Les fluides frigorigènes HFC sont ceux majoritairement utilisés actuellement dans les installations de PAC.

Leurs potentiels de réchauffement global sont élevés donc leurs impacts sur l'effet de serre important si des précautions ne sont pas prises, leur utilisation est très encadrée, la production

à partir de produits connus comme l'ammoniac (R717) ou le propane (R290) ou un nouveau fluide naturel comme le dioxyde de carbone (R744)

Pour une pompe à chaleur de basse et moyenne température (0 à 50 °C) on utilise le plus souvent les fluides R-12, R-22, R-500, R-502, R-134 [7]

1.3. Pompe à chaleur réversible :

Une pompe à chaleur réversible (ou inversable) quand elle peut produire du chaud ou du froid selon la configuration du cycle frigorifique. L'inversion du cycle est assurée par une vanne à 4 voies, figure 1.6. La vanne à 4 voies est un élément important pour le changement du mode de fonctionnement (hiver/été).

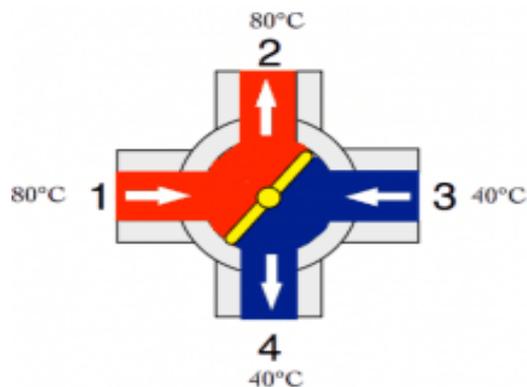


Figure 1.6 : Vanne à 4 voies [31]

1.3.1. Mode chauffage :

Dans ce cas, la chaleur est transférée de l'extérieur à l'intérieur de l'habitation. La chaleur est absorbée par l'évaporateur de l'extérieur et dégagée par le condenseur à l'intérieur.

En mode chauffage, la pompe à chaleur est définie par les caractéristiques suivantes :

- Puissance thermique dissipée au condenseur.
- Puissance électrique totale absorbée.

$$C_{op} = \frac{\text{puissance thermique fournie par la pompe à chaleur}}{\text{consommation électrique}}$$

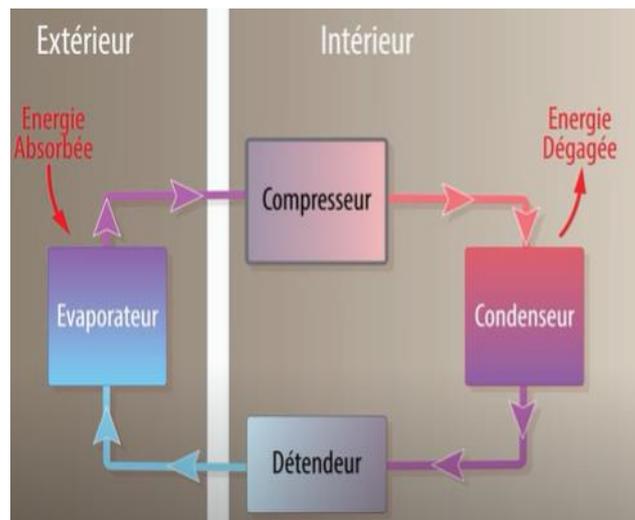


Figure1.7: mode chauffage (hiver)

1.3.2. Mode refroidissement :

Le transfert de la chaleur s'effectue de l'intérieur vers l'extérieur de l'habitation. Le liquide de refroidissement circule donc inversement dans le circuit pour que la chaleur présente à l'intérieur soit rejetée vers l'extérieur. Donc, les rôles du condenseur et de l'évaporateur sont inversés ; l'évaporateur absorbe l'énergie à l'intérieur de l'habitation et le condenseur dégage la chaleur vers l'extérieur.

En mode rafraîchissement, la pompe à chaleur fonctionne en machine frigorifique. Elle est représentée par les caractéristiques suivantes :

- Puissance frigorifique.
- Puissance électrique totale absorbée ou énergie consommée.

$$EER = \frac{\text{Puissance frigorifique}}{\text{consommation électrique}}$$

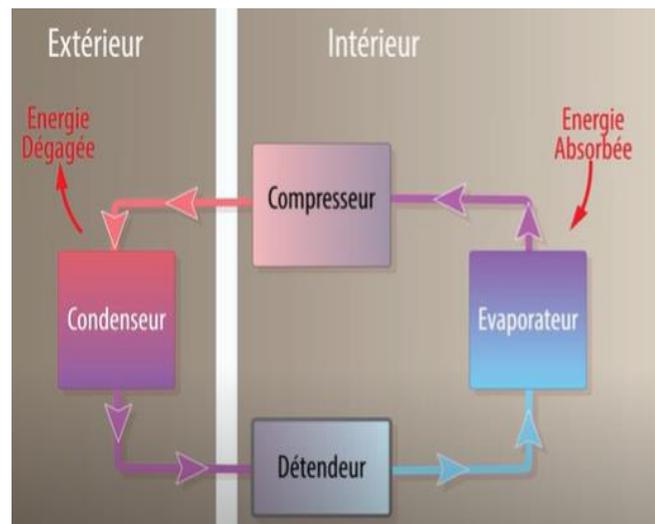


Figure1.8: mode refroidissement (été)

1.4. Système d'une PAC assistée par énergie solaire :

1.4.1. Capteur solaire thermique :

Un capteur solaire thermique est la source de chaleur de l'installation solaire. C'est là que le rayonnement solaire est capté et absorbé pour chauffer le fluide caloporteur [10]. Tous les capteurs visent à convertir le rayonnement solaire en chaleur avec un rendement élevé et à fournir cette chaleur aux consommateurs aussi efficacement que possible. Les divers types diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût [12]. Les capteurs solaires plans (CSP) reposent sur la technologie la plus simple. Ils sont constitués d'une surface réceptrice noire qui absorbe le rayonnement solaire incident de la bande spectrale ($0.3 < \lambda < 3 \mu\text{m}$) [11].

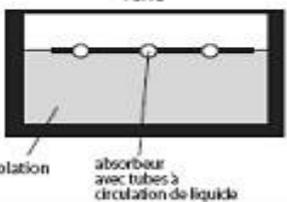
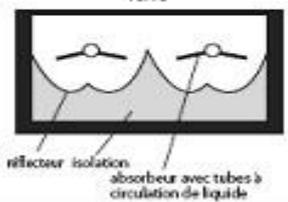
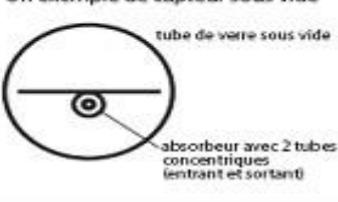
Capteur plan	Capteur plan à concentrateur parabolique	Capteur sous vide
CP	CPC	CSV
		
 <p>verre</p> <p>isolation</p> <p>absorbant avec tubes à circulation de liquide</p>	 <p>verre</p> <p>réflecteur</p> <p>isolation</p> <p>absorbant avec tubes à circulation de liquide</p>	 <p>Un exemple de capteur sous vide</p> <p>tube de verre sous vide</p> <p>absorbant avec 2 tubes concentriques (entrant et sortant)</p>

Figure1.9 : Différents types de capteurs plans

Le meilleur absorbeur n'est pas un corps noir, mais plutôt des couches sélectives qui ont l'avantage d'avoir une émissivité considérable réduite dans le champ des longueurs d'onde du rayonnement thermique, ce qui diminue les déperditions thermiques.

Au-dessus de l'absorbant, un simple ou double vitrage limite les pertes thermiques convectives avec l'air ambiant. Ainsi que les pertes radiatives grâce à l'effet de serre qui repose sur la propriété du verre pratiquement opaque dans l'infrarouge. Un fluide caloporteur (eau, air, glycol,). Une isolation sur la face arrière du capteur limite les pertes thermiques vers le milieu environnant.[14]

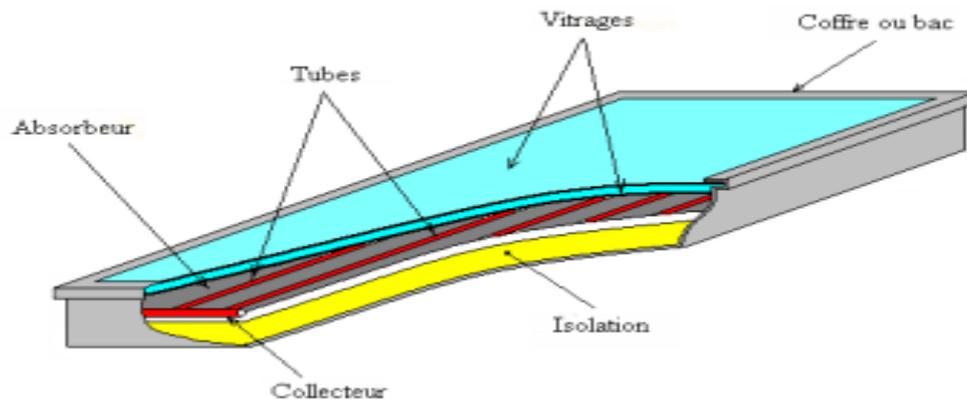


Figure 1.10: schématique en coupe d'un capteur solaire plan [40]

La technologie du capteur plan à eau est la plus largement utilisée dans des applications de chauffe-eau solaire. Dans les cas usuels, le rendement maximum du capteur se situe entre 60 et 80% et décroît quasi linéairement avec la température du fluide [13]. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où la température désirée se situe entre 30 et 70 °C (préparation d'eau chaude sanitaire), et/ou à des applications qui nécessitent de la chaleur au cours des mois d'hiver tel que le chauffage des bâtiments [2]. Les capteurs solaires peuvent être installés au sol, contre le côté d'un édifice ou sur la toiture. Idéalement, ils devraient être orientés vers le sud, à l'écart des zones ombragées, et devraient présenter un angle d'inclinaison qui permet que la surface du capteur soit exposée au maximum à la lumière solaire

1.4.3. Couplage du système :

Ces dernières années, plusieurs travaux ont été menés sur le couplage des pompes à chaleur avec des capteurs solaires dont le but principal d'améliorer ses performances. C'est ce qu'on appelle les pompes à chaleur assistées de l'énergie solaire.

L'avantage de cette combinaison des deux technologies est l'utilisation d'une source d'énergie gratuite, disponible, non polluante, inépuisable, relativement facile à transformer. L'utilisation de l'énergie solaire constitue aussi un atout très intéressant pour répondre aux objectifs fixés en matière de préservation de l'environnement des gaz à effet de serre, en dépit du coût des installations qui demeure assez élevé.

Un système de pompe à chaleur assistée par énergie solaire est une application prometteuse qui offre un grand potentiel pour les applications à basse température (moins de 80°C) comme la préparation d'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage des bâtiments. Cette combinaison

permet de réduire la consommation d'électricité et par conséquent améliorer fortement la performance énergétique du système complet.

1.4.4. Configurations des systèmes PAC :

En fonction de la disposition des capteurs thermiques et la pompe à chaleur, les pompes à chaleur sont classées généralement en deux grandes configurations.

a) -En série

Dans cette configuration, les capteurs thermiques alimentent, directement ou par l'intermédiaire d'un réservoir de stockage, une pompe à chaleur. De plus, une pompe à chaleur montée en série peut être à expansion direct Figure (1.12) ou indirect Figure (1.13).

Dans une PAC à expansion indirect, les capteurs thermiques et la pompe à chaleur sont séparés. L'énergie thermique produite par les capteurs, transportée par un fluide caloporteur, est utilisée pour alimenter l'évaporation de la PAC.

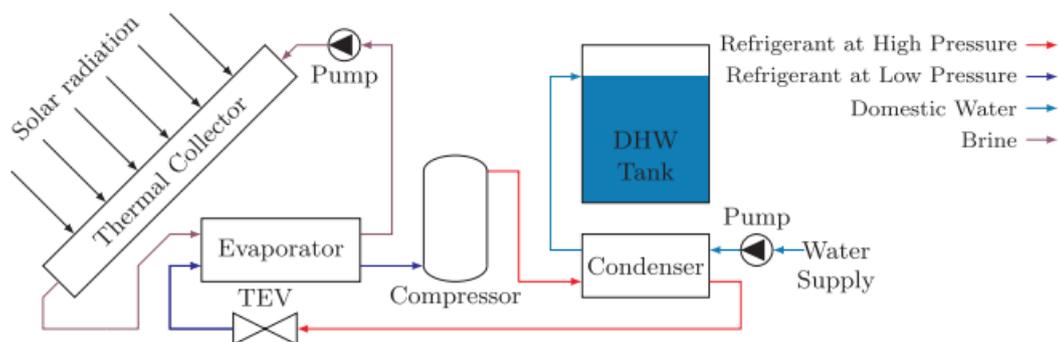


Figure1.11 : schéma d'un système d'une PAC à expansion indirect en série [27]

Dans un système à expansion direct, le capteur thermique joue le rôle de l'évaporateur. Les deux éléments composants le système (PAC et capteurs) sont intégrés pour former un seul composant. Le réfrigérant, à l'état liquide et à basse pression et température, est transféré au capteur-évaporateur où il s'évapore en recevant la chaleur produite par le capteur thermique [28].

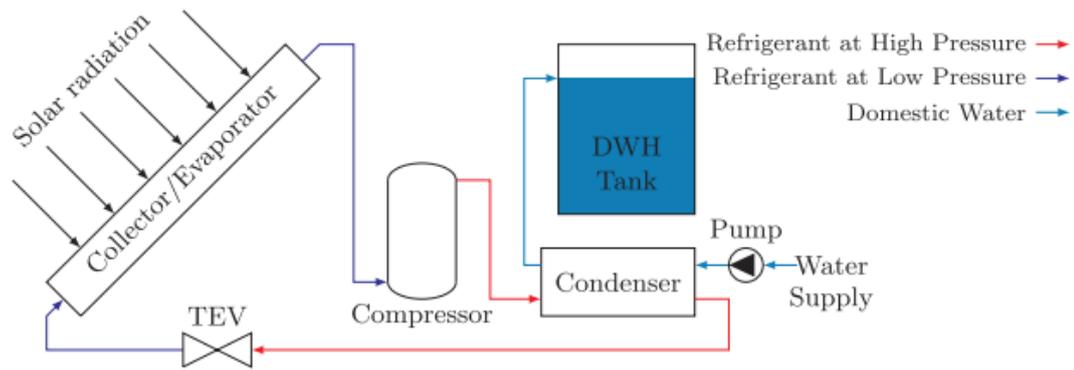
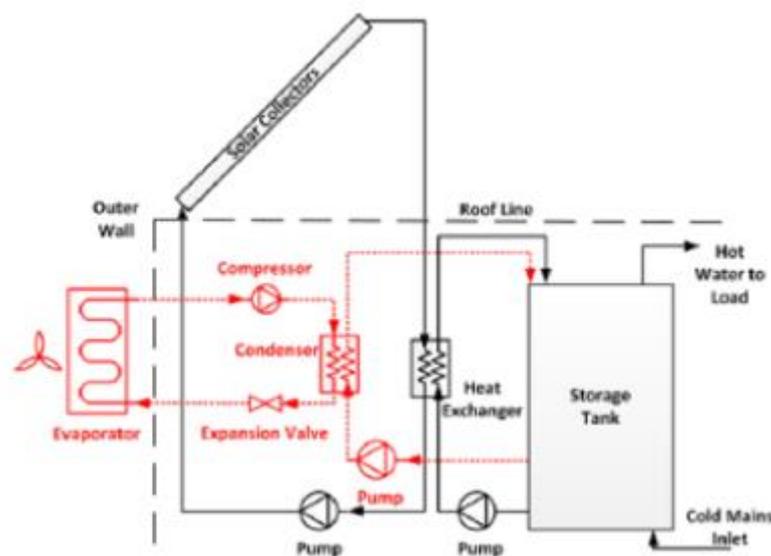


Figure 1.12 : schéma d'un système d'une PAC à expansion direct en série [27]

b)-En parallèle

La pompe à chaleur et les capteurs thermiques fonctionnent indépendamment. Dans un premier temps, les capteurs thermiques alimentent le réservoir d'eau chaude et si le niveau d'énergie est insuffisant, un système d'énergie auxiliaire comme une pompe à chaleur air/eau est activé en parallèle avec les capteurs thermiques pour atteindre le niveau d'énergie nécessaire.



]

Figure 1.13 : schéma d'un système d'une PAC en parallèle [29]

1.5. État d'art :

Au cours des dernières décennies, un grand nombre de travaux ont été consacrés à l'étude des caractéristiques de la technologie des pompes à chaleur à assistance solaire.

Nous nous proposons de faire un survol à travers la littérature existante pour nous faire une idée sur les différents modèles de cette technologie.

❖ Pompe à chaleur à expansion indirect

- Travail de BOULKAMH (2008) :

L'auteur a étudié une pompe à chaleur assistée par énergie solaire (Capteurs plans de types vitres). Le coefficient de performance, la fraction solaire du système et l'efficacité des capteurs solaires pour différentes surfaces $A_c=133m^2$ $A_c = 146m^2$ $A_c= 160m^2$ a obtenus sont : (4.89,78,49 %68.52%) et (5.7, 80.20 %, 64.38%) et (6.9, 82.03%, 59.88%) respectivement [4]. Une comparaison, entre le chauffage du même bâtiment par un système de chauffage solaire ayant les mêmes caractéristiques, a été aussi effectuée.

- Valentin Trillat-Berdal, et al (2004) :

-L'étude expose la conception et le développement de processus qui consiste en la combinaison de pompe à chaleur géothermique réversible avec capteurs solaires thermiques pour le chauffage, le refroidissement et la production d'eau chaude sanitaire. Ils ont conclu que la combinaison des énergies renouvelables telles qu'énergie solaire thermique et énergie géothermique dans un seul système peut rendre concevable la satisfaction des besoins en chauffage, rafraîchissement et eau chaude sanitaire et garantissant un niveau de confort et de qualité sous toutes circonstances.[17]

- S, Eicher et al (2012) :

Dans ce travail, un projet développé dans le cadre de la tâche 44 de l'AIE, a été étudié. Le système implique un prototype de pompe à chaleur assistée solaire (HP) conçue pour la préparation de l'eau chaude sanitaire pour les logements unifamiliaux. Les objectifs généraux du projet sont résumés comme suit :

Développement de la technologie thermique solaire, Amélioration de la performance HP pour la production ECS, Réduction de la consommation d'énergie non renouvelable et réduction des impacts environnementaux. [23]

- Travail de KASSIM (2015) :

L'auteur a présenté une étude sur le chauffage par une pompe à chaleur assistée par un champ de capteurs solaires plans d'un centre commercial situé à Boufarik. Un COP qui passe du simple au double a été obtenu [2].

- Francesco Calise et al (2016) :

Ce travail concerne le couplage d'un PAC réversible (eau/eau) avec un champ solaire équipé de capteurs plans photovoltaïques/thermiques, Le modèle de simulation est conçu pour fournir de l'électricité, du chauffage ou de la climatisation et de l'eau chaude sanitaire pour un petit

immeuble résidentiel. Pendant l'hiver, l'énergie thermique disponible du champ solaire est utilisée comme source de chaleur pour l'évaporateur de la pompe à chaleur et pour produire de l'eau chaude sanitaire. Pendant l'été, la pompe à chaleur fonctionne en mode froid, couplée à une tour de refroidissement en circuit fermé, assurant le refroidissement des locaux du bâtiment, et l'eau chaude produite par les capteurs sert uniquement à produire de l'eau [18]. Les résultats ont montré que les rendements thermique et électrique sont respectivement supérieurs à 40 % et 10 %. Le coefficient de performance de la pompe à chaleur réversible est supérieur à 4 pour les modes chauffage et refroidissement.

- C. Fraga et al, (2017) :

L'objectif du travail est d'analyser expérimentalement et théoriquement le potentiel d'un système solaire combiné et un système de pompe à chaleur. Il est basé sur une étude de cas d'un nouveau complexe de logements situé à Genève (Suisse), dans lequel des collecteurs solaires sont utilisés soit pour une production de chaleur solaire directe, via un échangeur de chaleur ou comme absorbeurs pour la pompe à chaleur.

L'étude expérimentale, sur une année entière (2012), montre que 68,1 kWh / m² de la demande thermique est assurée par le système solaire, soit une fraction de chaleur renouvelable de 68%, avec une consommation d'électricité complémentaire de 32%. L'étude numérique montre qu'un facteur de performance saisonal de 5 peut être achevé pour une nouvelle construction avec une enveloppe à haute performance, une surface de captage allant de 0.2-0.25 m²/m² de surface chauffée [22]

- Travaille de BOUAICHA (2017) :

Le comportement thermique et les performances d'un système de chauffage composé de : les cuves de stockage, une pompe à chaleur, un champ de capteurs thermiques, ont traités dans ce travail. Le système est conçu pour répondre à la demande énergétique en chauffage et les besoins en eau chaude sanitaire d'une maison individuelle située à Blida [3]. Les résultats montrent les capteurs solaires plans sont capables à fournir la température de fonctionnement de l'évaporateur de la pompe à chaleur avec un COP qui dépasse 5.

- Evangelos Bellos, et al (2017) :

L'objectif de cette étude est de comparer énergétiquement et économiquement un système de chauffage par pompe à chaleur alimentée par des capteurs plans avec un système de pompe à chaleur aérothermique classique pour vingt villes européennes, les résultats finaux, les économies d'électricité réalisées grâce au système de pompe à chaleur étudiée varient de 30 %

à 40 %. Le COP dans le système de pompe à chaleur solaires est proche de 4 et pour les systèmes conventionnels à source d'air proche de 2,5.[19]

- Juanli MaAlan, et al (2020) :

Les auteurs ont analysé les performances d'une pompe à chaleur solaire utilisant le CO₂ comme réfrigérant pour le chauffage des locaux en climat froid. Trois modèles de SAHP sont considérés, deux PAC à un étage et à deux étages fonctionnant avec CO₂, et une PAC à un étage avec un cycle R410a pour le chauffage des locaux à Toronto, au Canada [20]. Les résultats obtenus montrent qu'une PAC à deux étages est plus appropriée dans le climat froid, notamment pour des capteurs thermiques de petites tailles. De plus, la sélection de la taille suivable du compresseur est plus important pour la PAC à deux étages.

❖ Pompe à chaleur à expansion direct

- M.N.A. Hawlader (2001) :

Une étude analytique et expérimentale ont été menées sur d'un système d'une pompe à chaleur à expansion direct (DX-SAHP), où des capteurs solaires plats non vitrés servent d'évaporateur pour le réfrigérant R-134a. Le système a été conçu, fabriqué localement et exploité dans des conditions météorologiques à Singapour. Un compresseur à vitesse variable a été utilisé. Les résultats montrent que lorsque la température de l'eau dans le réservoir du condenseur augmente avec le temps, la température de condensation augmente également, les valeurs de COP et l'efficacité du collecteur correspondant diminuent. Les valeurs moyennes de COP variaient d'environ 4 à 9 et variaient entre 40 % et 75 % pour des températures d'eau du réservoir de condenseur comprises entre 30 °C et 50 °C. [24].

- B. J. HUANG(2001) :

Les caractéristiques d'une pompe à chaleur assistée par énergie solaire intégré (ISAHP) ont été étudiées dans ce travail. La ISAHP se compose d'un cycle de réfrigération Rankine et d'un système de chauffage thermosiphon, intégrés ensemble pour former un seul système solaire. L'énergie solaire et l'énergie de l'air ambiant sont absorbées au niveau du collecteur/évaporateur et pompées vers le réservoir de stockage via un cycle de réfrigération Rankine et un échangeur de chaleur thermosiphon.

Le COP de l'ISAHP obtenu dans la présente étude se situe entre 2,5 et 3,7 à une température de l'eau comprise entre 61 et 258 °C. [25]

- F.B. Gorozabel Chata, et al (2004) :

Les auteurs ont analysé expérimentalement les performances d'une pompe à chaleur (DX-SAHP). Plusieurs réfrigérants tels que le R12, R22, R134a, et en utilisant deux types de

capteurs : un sans vitrage et un capteur équipé d'un seul vitrage. Les valeurs de COP obtenues sont dans l'ordre décroissant suivant : (COP) R134a < (COP) R22 < (COP) R12. La cop obtenue varie entre 3 et 3.5 [16].

- Y.H Kuang, et al (2006) :

Une étude expérimentale sur un système une pompe à chaleur (DX-SAHP) pour l'ECS, le chauffage et la climatisation des locaux en hiver situé au nord de la chine, est réalisée par les auteurs. Le système consiste de capteurs thermiques plans, un réservoir, un compresseur à vitesse variable et un plancher chauffant. Les résultats montrent que pendant la période de chauffage, le COP moyen global du système était de 2,19 et le COP moyen de la pompe à chaleur était de 2,55 [15].

- Travail de BENMERIEM (2009) :

L'objectif de ce travail consiste à modéliser un système composé d'un chauffe-eau solaire assisté d'un compresseur. Le fonctionnement de l'installation est-ce d'une pompe à chaleur où l'évaporateur est substitué par un capteur solaire. Une analyse des performances énergétiques de ce système donne un COP égale à 5 [14].

- Elamin Mohamed et al (2017) :

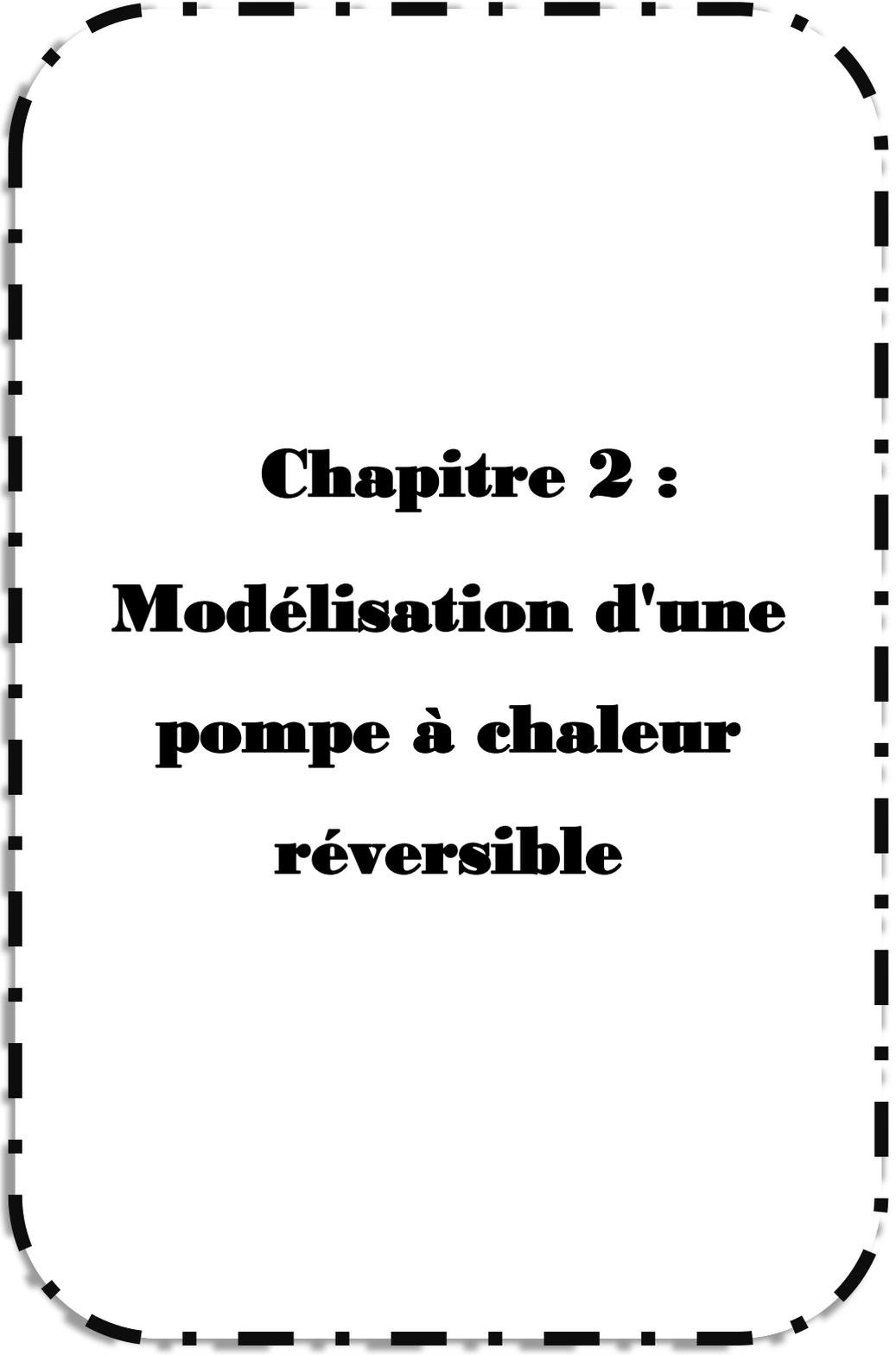
Dans ce travail, une étude expérimentale d'un système d'une pompe (DX-SAHP) a été effectuée. Des capteurs plans non vitrés sont utilisées comme évaporateur, et elles sont composés de deux plaques en aluminium qui sont placées à l'extérieur tandis qu'une autre plaque est montée à l'intérieur dans le grenier de la maison, où le liquide de fonctionnement de la pompe à chaleur est directement évaporé. Les résultats préliminaires montrent que le cycle de réfrigération peut être une alternative prometteuse au chauffage des locaux et à l'eau chaude. [26]

Sabrina N ,Rabela et al (2019) :

Les auteurs ont mené une étude énergétique et économique d'une pompe à chaleur (DX-SAHP) destinée à la production d'eau chaude. Le système se compose d'un capteur solaire/évaporateur plan, construit d'aluminium peint, un compresseur et un condenseur immergé dans un réservoir de stockage. Les résultats montrent que le COP est toujours proportionnel à la taille du capteur et le rayonnement solaire. Une étude de cas a été réalisée pour trois villes différentes et le retour d'investissement obtenu est de l'ordre de 1,77 à 3,24 ans [27]

1.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude bibliographie sur la technologie des pompes à chaleur appliquées aux bâtiments résidentiels notamment les PAC réversibles qui font l'objet de notre étude. Cela nous a permis de voir les différentes définitions et concepts de pompe à chaleur assistée par énergie solaire, et présenter quelques modèles proposés dans la littérature, et comprendre le travail que nous allons effectuer.



Chapitre 2 :
Modélisation d'une
pompe à chaleur
réversible

Chapitre 2 : Modélisation d'une pompe à chaleur réversible

2.1. Introduction :

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments en utilisant différentes méthodes. D'abord, la méthode passive en étudiant différents paramètres qui peuvent contribuer à économiser de l'énergie tels que le choix des matériaux, utilisation de l'isolation thermique, infiltration d'air, et équipements performants etc...). Ensuite, la méthode active qui consiste à installer des systèmes énergétiques tels que les systèmes solaires.

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation d'une installation de chauffage et de rafraîchissement pour alimenter un bâtiment résidentiel. Le système solaire étudié se compose d'une pompe à chaleur intégrée à des capteurs solaires plans.

2.2. Présentation système solaire étudié :

2.2.1. Composants du système :

Le système solaire étudié dans ce travail est représenté dans la figure (2.1). Ce dernier se compose essentiellement de :

- Capteurs thermiques plans
- Deux réservoirs de stockage, le premier (R1) pour alimenter la pompe à chaleur et le deuxième (R2) pour l'eau chaude sanitaire (ECS) ;
- Une pompe à chaleur réversible (eau à eau) ;
- Une tour de refroidissement ;

- Le bâtiment (la charge) ; Des accessoires (vannes, pompes de circulation ...etc.)

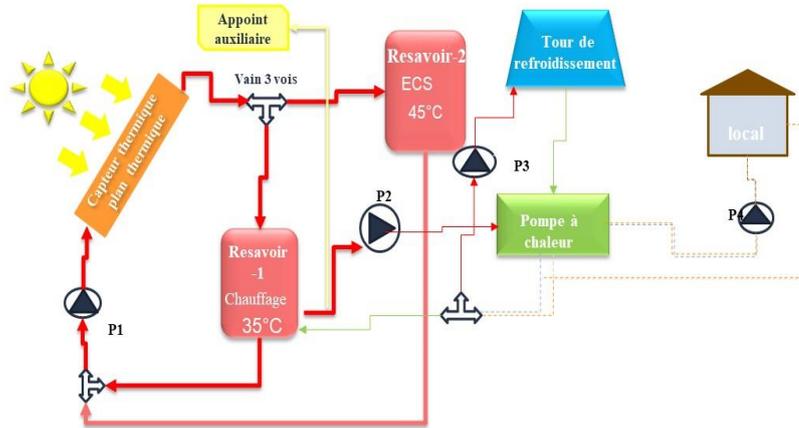


Figure2.1: Système d'une pompe à chaleur réversible eau à eau

2.2.2 fonctionnent :

D'abord, le rayonnement solaire, capté et absorbé par le capteur thermique, chauffe le fluide caloporteur qui chauffe à son tour l'eau du réservoir R1. Durant la période de chauffage, lorsque la température de R1 atteint 35°C, la chaleur produite par les capteurs est pompée par P1 vers R2 pour la production de l'ECS. Quand la température du bâtiment descend au-dessous de la température de consigne de chauffage, l'eau chaude dans R1 est pompée par P2 vers la pompe de chaleur (PAC) qui produit la chaleur nécessaire pour chauffer le bâtiment à travers un plancher chauffant. En cas où la chaleur puisée de R1 est insuffisante pour le bon fonctionnement de la PAC, alors un système de chauffage à gaz est utilisé pour ajuster la température nécessaire.

Durant la période de rafraîchissement, l'eau chaude venant des capteurs est utilisée entièrement pour l'ECS (stockée dans R2). La PAC est activée en mode rafraîchissement et fournit l'eau glacée nécessaire pour refroidir le bâtiment. Une tour de refroidissement est utilisée pour évacuer la chaleur dissipée par la PAC et augmenter sa performance.

Un système de régulation efficace est utilisé pour le fonctionnement des différents éléments du système et la gestion de l'énergie produite par les capteurs solaires.

2.2.3. Les composants TRNSYST :

Le logiciel TRNSYS (TRaNsient System Simulation) (Programme de simulation de systèmes transitoires) permet de modéliser des systèmes énergétiques 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.) [30]. TRNSYS est disponible depuis 1975. Il est développé par le Laboratoire d’Energie Solaire de l’Université de Wisconsin-Madison. [31], Les composants du système étudié en interface TRNSYS sont présentés dans la Tableau (2.1).

Tableau 2.1 : Les types des composants utilisées

Composant	Type	Composant	Type
Un capteur thermique plan	Type73	Appoint	Type 6
Reservoir de stockage	Type60	Pompe à chaleur « eau /eau »	Type 668
Tour de refroidissement	Type51	Données climatiques	Type 15
Régulateur (on /off)	Type2b	Maison	Type56
Pompe de circulation	Type114	Thermostat de la maison	Type8
Période de chauffage /rafraîchissement	Type115	Mélangeur	Type11d
Diffuseur	Type11f	Thermostat de réservoir	Type603
Vanne a 3 voix	Type11b	Profil de consommation d’eau	Type14b
Afficheur des résultats	Type65		

Le schéma du système étudié sous interface TRNSYS est représenté en figure 2.2

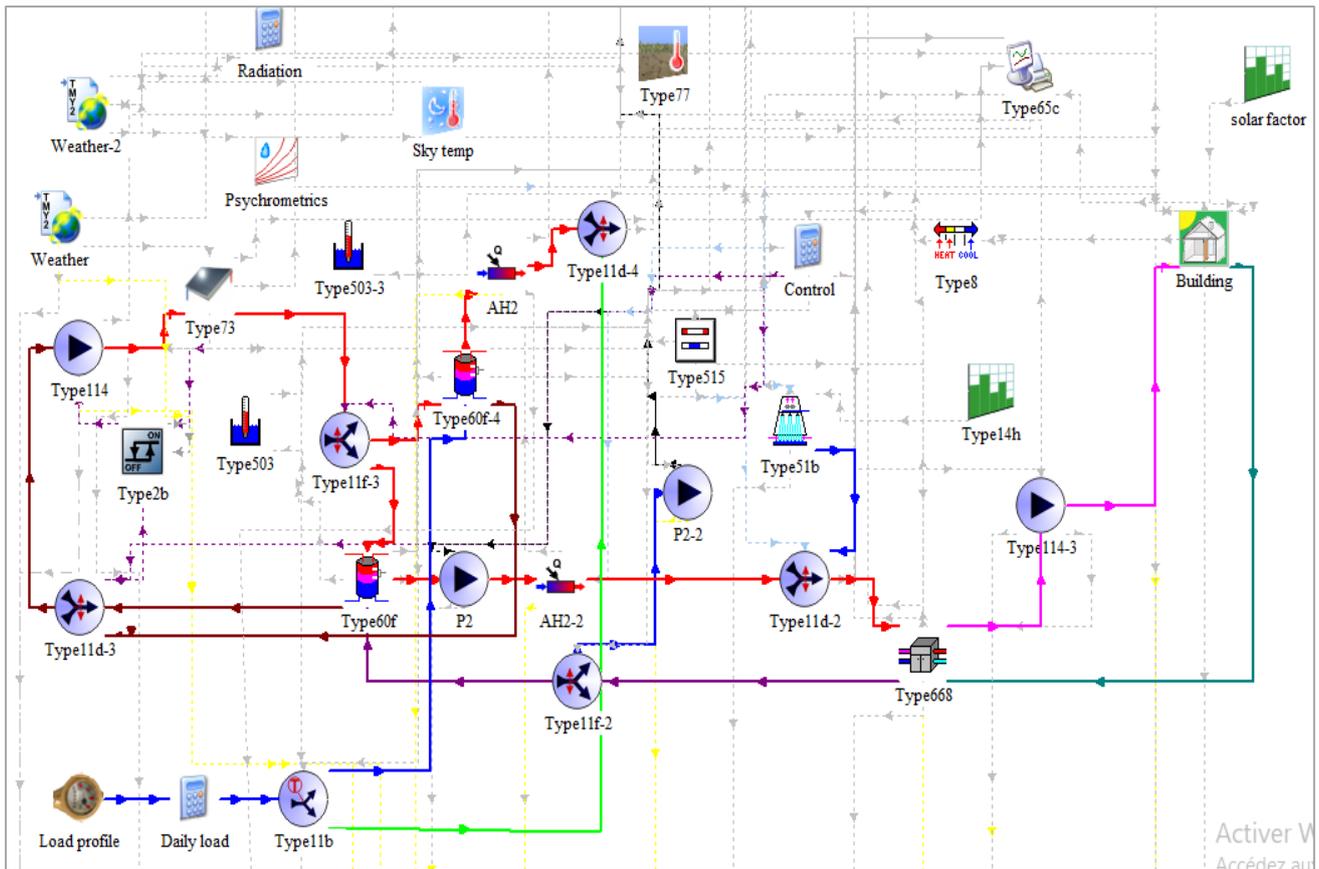


Figure 2.2: Schémas du système étudié sous TRNSYS [38]

2.3. Modèles mathématiques des différents composants

La plupart des modules utilisés proviennent de la bibliothèque TESS (Thermal Energy System Specialists). C'est une bibliothèque additionnelle spécialisée des modèles pour l'outil de simulation TRNSYS [38]

2.3.1. Modèle du bâtiment

Le bâtiment est modélisé par le TYPE 56 (TRnBuild). TRNBUILD est un module du logiciel TRNSYS pour la simulation de bâtiments multi zones. Pour cela dans un premier temps il faut définir des zones thermiques avec plusieurs paramètres : l'orientation de la maison par rapport au soleil, la composition des matériaux pour chaque paroi de la zone, le type de fenêtres et leurs superficies, les températures de consigne et les gains internes. Nous pouvons ainsi créer et modéliser le comportement thermique d'un bâtiment en juxtaposant plusieurs zones, Une fois le bâtiment modélisé sur TRNBUILD le fichier Maison. Buis est créé et sera lu par le TYPE (Building) lors de la première simulation sur TRNSYS.

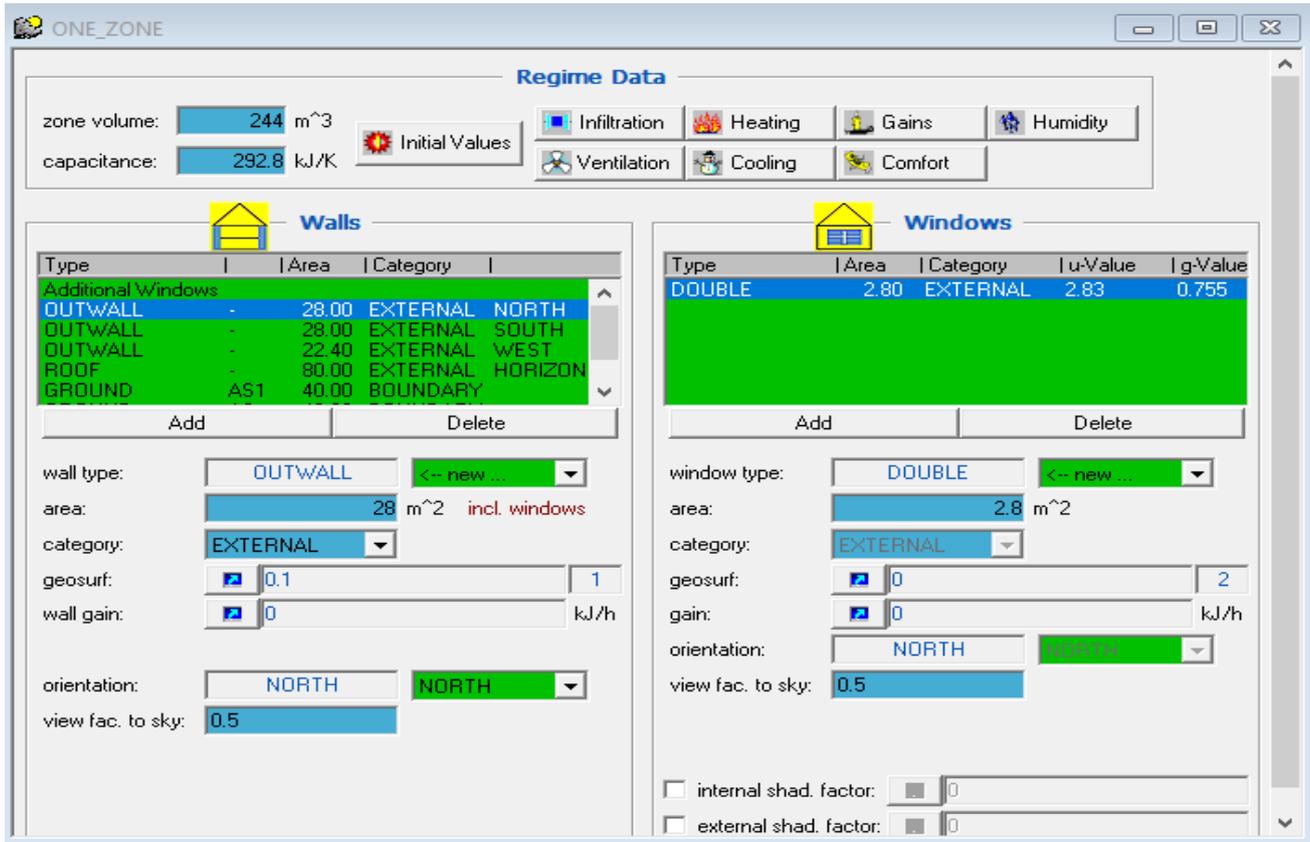


Figure 2.3: Le fichier TRNBUILD [38]

Le bilan thermique de la maison est donné par l'équation suivante :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{surf} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{gain} \tag{2.1}$$

Q_{surf} – Flux de chaleur convectif de toute la surface intérieure

$$Q_{surf} = h_{cv,m} \rho_a C_p a (T_{mur,i} - T_{int}) + h_{cv,p} \rho_a C_p a (T_{plancher} - T_{int}) + h_{cv,t} \rho_a C_p a (T_{toit} - T_{int}) \tag{2.2}$$

Avec : $i = 1, 2, 3, 4$

Q_{inf} – Gain par d'infiltration du flux d'air extérieur

$$Q_{inf} = \dot{m}_{inf} \rho_a C_p a (T_{ext} - T_{int}) \tag{2.3}$$

Q_{vent} – Les gains de ventilation provenant du système HVC

$$Q_{vent} = \dot{m}_{vent} \rho_a C_{p_a} (T_{vent} - T_{int}) \quad (2.4)$$

Q_{gain} – Gains internes de convection (occupation, éclairage et appareils électroménagers)

$$Q_{gain} = h_{cv} \rho_a C_{p_a} (T_{persone} - T_{int}) + h_{cv} \rho_a C_{p_a} (T_{éclairage} - T_{int}) + h_{cv} \rho_a C_{p_a} (T_{appareil} - T_{int}) \quad (2.5)$$

2.3.2. Plancher chauffant :

Le plancher chauffant est modélisé en considérant l'un des couches composant le plancher du bâtiment comme une couche active (active layer).

2.3.3. Capteur thermique plan (type 73) :

Le capteur thermique plan est modélisé par le TYPE 73 de la bibliothèque TRNSYS. Le rendement instantané du capteur solaire plan est donné par le rapport de la quantité de chaleur récupérée par le fluide caloporteur à l'éclairement solaire reçu par le capteur, soit :

$$\eta_{Cap} = \frac{Q_u}{A \cdot I_{\beta}}$$

$$\eta_{Cap} = \frac{m c_p (T_e - T_s)}{A I_{\beta}} = \frac{A F_r (\tau_{\alpha}) e \cdot I_g - F_r u_g (T_e - T_s)}{A I_{\beta}} \quad (2.6)$$

Ou encore :

$$\eta_{Cap} = F_r (\tau_{\alpha}) e - F_r u_g \frac{(T_e - T_s)}{I_{\beta}}$$

La température de sortie est donnée par la formule suivante :

$$T_s = \frac{\eta_{Cap} A I_{\beta}}{m c_p} + T_e \quad (2.7)$$

On a utilisé un capteur solaire thermique Plan Vitré FCS CS 2.0 dans le tableau 2.2[36]

Tableau 2.2: caractéristiques d'un capteur thermique plan

Surface totale du capteur	2,02 m ²
Dimensions (L x l x h)	1730 x 1170 x 83mm
Poids	32 kg
Coefficient de transmission	90,6 % ± 2 %
Débit conseillé	15 à 40 l/h.m ²
Pression Maxi	10 bars
Absorption solaire	95%
Contenance du collecteur	1,4L

2.3.4. Réservoir de stockage (type 60):

Un réservoir à température homogène (un seul nœud) est modélisé par le TYPE 60.

$$MC_p \frac{dT_{moy}}{dt} = \dot{m}_{1e} C_p T_{1e} - \dot{m}_{1s} C_p T_{1s} + \dot{m}_{2e} C_p T_{2e} - \dot{m}_{2s} C_p T_{2s} + UA_s [T_{env} - T_{rés}] \quad (2.8)$$

On a utilisé un réservoir du type Cuve en acier carbone ou acier inoxydable AISI 316L, verticale sur 3 pieds. Le tableau (2.3) [37]

Tableau 2.3 : Caractéristiques de la cuve de stockage [37]

Types de produit	Réservoir	Types de produit	Réservoir
Capacité	500-3000L	Position	Vertical
Pression maximal	10bar	Matière	Acier
Température max	85°C	Hauteur	1550,7mm
Poids	175 Kg	Diamètre	800mm

2.3.5. Pompe à chaleur (type 668) :

Une pompe à chaleur réversible de type eau à eau est modélisée par le TYPE 668.

L'étude de la performance du cycle de chauffage est décrite par l'introduction du concept du coefficient de performance (COP) qui est défini par le rapport :

2.3.5.1. Mode chauffage :

Le COP de la pompe à chaleur en chauffage est donné par l'équation

$$COP_{ch} = \frac{C_{ch}}{\dot{p}_{ch}} \quad (2.9)$$

La quantité d'énergie absorbée par le flux de fluide source lors du chauffage est donnée par l'équation

$$\dot{Q}_{abs} = C_{ch} \cdot \dot{p}_{ch} \quad (2.10)$$

Les températures de sortie des deux courants liquides peuvent alors être calculées à l'aide des équations

$$T_{s,evap} = T_{e,evap} - \frac{\dot{Q}_{abs}}{\dot{m}_{evp} \times c_{p_{eau}}} \quad (2.11)$$

$$T_{s,cond} = T_{e,cond} - \frac{C_{ch}}{\dot{m}_{cond} \times c_{p_{eau}}} \quad (2.12)$$

\dot{m}_{evp} : débit massique de l'eau du côté de l'évaporateur

\dot{m}_{cond} : débit massique de l'eau du côté du condenseur

2.3.5.2. Mode refroidissement

Le COP de la pompe à chaleur en refroidissement est donné par l'équation

$$EER = \frac{C_{ref}}{\dot{p}_{ref}} \quad (2.13)$$

La quantité d'énergie rejetée par le flux de fluide source lors du refroidissement est donnée par l'équation

$$\dot{Q}_{rejeté} = C_{ref} \cdot \dot{p}_{ref} \quad (2.14)$$

$$T_{s,cond} = T_{e,cond} + \frac{\dot{Q}_{rejeté}}{\dot{m}_{cond} \times c_{p_{eau}}} \quad (2.15)$$

$$T_{s, \text{evap}} = T_{e, \text{evap}} + \frac{C_{\text{ref}}}{\dot{m}_{\text{evap}} \times C_{p_{\text{eau}}}} \quad (2.16)$$

2.3.6. Tour de refroidissement :

Une tour de refroidissement est modélisée par le TYPE 51. Pour une efficacité connue :

$$Q_{\text{cell}} = \varepsilon_a \times \dot{m}_a (h_{a, \text{eau}, e} - h_{a, e}) \quad (2.17)$$

La température de sortie d'une cellule de la tour qui est une entrée :

$$T_s = \frac{\dot{m}_e \times C_p \times (T_e - T_{\text{ref}}) - Q_{\text{cell}}}{\dot{m}_s \times C_p} + T_{\text{ref}} \quad (2.18)$$

2.3.7. Pompe de circulation (Type 114) :

Les quatre pompes de circulation sont modélisées par le TYPE 114.

2.3.8. Appoint (Type 6) :

Un système de chauffage auxiliaire d'appoint est modélisé par le TYPE6.

La capacité nominale de l'appoint, chauffage auxiliaire (CH), est calculée sur la base de la demande maximale en chauffage.

$$C_{CH} = \eta_{CH} \cdot \dot{Q}_{ch, \text{max}} \quad (2.18)$$

La quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'entrée du fluide à la température de consigne est donnée par :

$$Q_{CH} = \dot{m}_{\text{eau}} \cdot c_p (T_{\text{consigne}} - T_e) \quad (2.19)$$

La température de sortie du fluide est calculée comme suit : [32]

$$T_s = T_e + \frac{C_{CH}}{\dot{m}_{\text{eau}} \cdot c_p} \quad (2.20)$$

2.3.9. Système de régulation

TYPE 2 : Ce type est utilisé pour réguler la gestion de l'énergie entre les capteurs solaires et les réservoirs de stockage. Ce contrôleur génère une fonction de contrôle γ qui peut avoir une valeur de 0 ou 1 (marche/arrêt).

$\Delta T(10^{\circ}\text{C})$ différence de température entre la température de sortie du capteur et la température du réservoir.

T_H La température haute (capteur)

T_B La température basse (réservoir)

$$\text{Si } \gamma_i = 1 \text{ et } \Delta t \leq (T_H - T_L); \quad \gamma = 1$$

$$\text{Si } \gamma_i = 1 \text{ et } \Delta t > (T_H - T_L); \quad \gamma = 0$$

TYPE 503 : Ce type permet de mesurer la température du fluide à l'intérieur du réservoir et génère un signal (ON/OFF). Dans notre cas, ce thermostat est utilisé pour changer la sortie du fluide à travers la vanne à trois voies. Autrement dit, le fluide sortant du capteur thermique gagne premièrement R1 à travers la première sortie de la vanne à trois voies et, quand la température de R1 atteint 35°C , le fluide est orienté vers R2 à travers la deuxième sortie. Qui représente dans la figure (2.3)

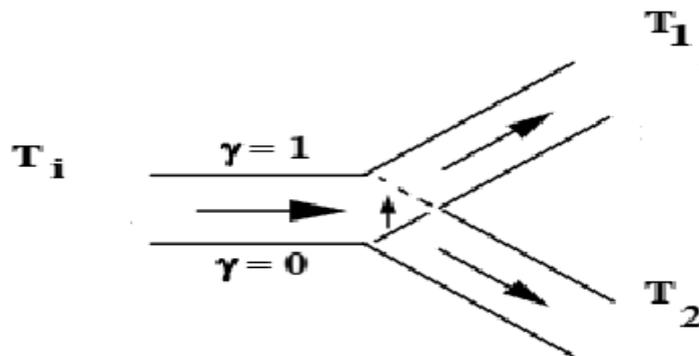


Figure 2.4: schéma représente le fluide sortant du capteur thermique dans la vanne à trois vois

TYPE 8 : Ce type est utilisé pour modéliser un thermostat qui génère des fonctions de contrôle (marche/arrêt) suivant la température intérieure du bâtiment. Elle est utilisée pour garder la température du bâtiment au-dessus de la température de consigne de chauffage en hiver et au-dessous de la température de rafraîchissement en été en agissant (on/off) sur les pompes de circulation.

TYPE 515 : Ce type permet de déterminer les périodes de chauffage et de climatisation en générant un signal (ON/OFF), figure (2.4)

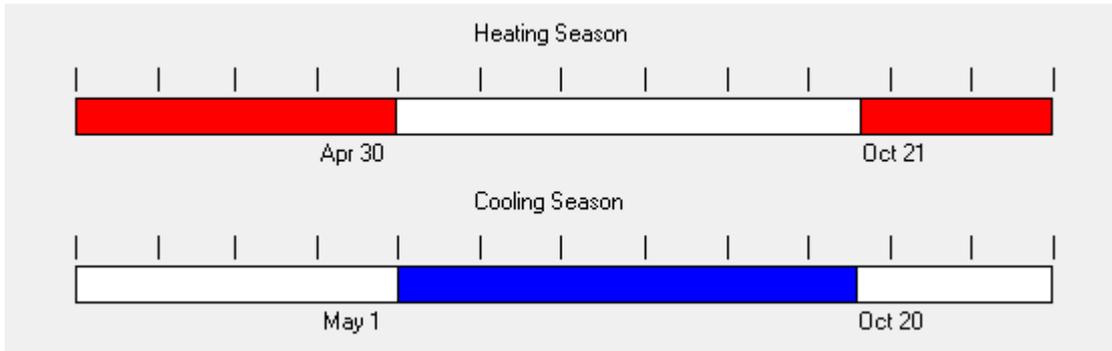


Figure2. 5:Saisons de chauffage et de rafraichissement [38]

2.4. Présentation d'un cas d'étude :

2.4.1. Description de l'habitat étudiée :

Pour notre travail, nous avons choisis une maison individuelle type située à Alger d'une surface habitable de 80m² et occupée par quatre personnes. Elle est construite sur la base d'une architecture simple et composée de deux chambres, un séjour, une cuisine et une salle de bain représenté dans la figure (2.6).

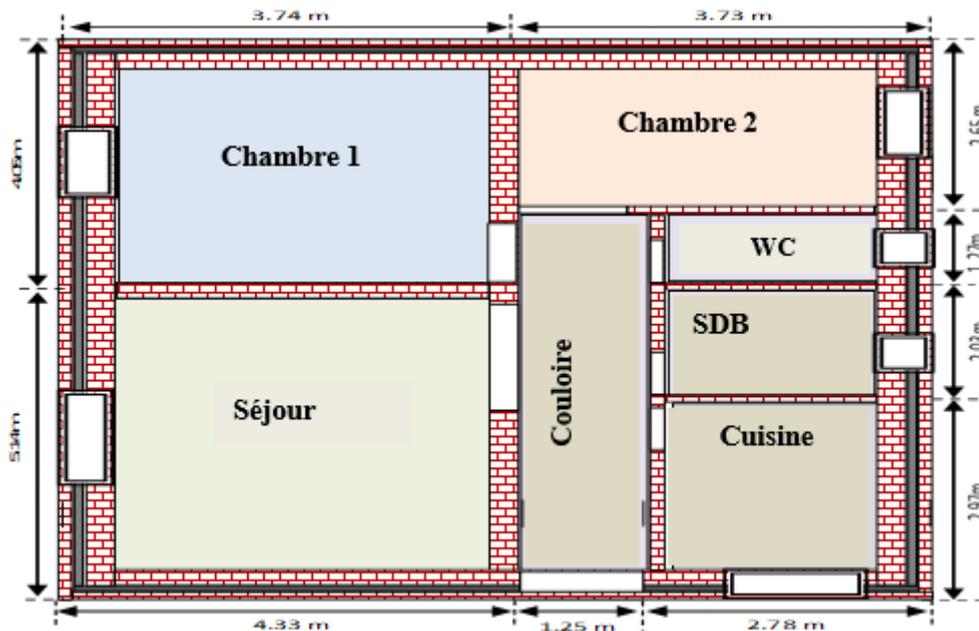


Figure2.6:Plans architecturaux d'habitat étudié

2.4.2. données architecturales :

Les données architecturales de la maison sont mentionnées dans le tableau2.6

Tableau 2.4 : Données architecturales de la maison

Volume (m ³)	244
Surface habitable (m ²)	80
Hauteur de la maison (m)	3
Surface de la porte extérieure (m ²)	2.1
Surface des fenêtres extérieure(m ²)	4.2
Surface de murs extérieures (m ²)	118.6

2.4.3.Données géographiques

Les Données géographiques de la zone d'étude sont données par le tableau (2.5)

Tableau 2.5 : Données géographiques de la zone d'étude

Région	ALGER
Altitude	116m
Latitude(ϕ)	36,45°
Longitude(L)	3,00°

Les parois constituant l'enveloppe de l'habitat sont détaillées dans tableau (2.6). Les coefficients de transmission thermique K sont déduits par la suite pour chaque paroi.

Tableau 2.6 : Les coefficients de transmission thermique pour chaque paroi

Élément	Composition	Epaisseur (m)	Valeur de U [W/(m ² K)]
Mur extérieur	Brique creuse	0.12	0.428
	Polystyrène	0.05	
	Brique creuse	0.10	
	Plâtre	0.015	
Toit extérieur	Polystyrène	0.10	0.369
	Béton lourd	0.10	
	Hourdis	0.10	
	Plâtre	0.02	
Plancher	Béton lourd	0.20	0.459
	Polystyrène	0.05	
	Ciment	0.10	
	Carrelage	0.02	

Fenêtre	Double vitrage		2.83
La porte	Bois opaque		3.5

Tableau 2.7: les différents gains internes

Volume (m ³)		244
Surface habitable (m ²)		80
Débit de renouvellement d'air (Vol/h)		0.6
Température de consigne (°C)	Chauffage	20
	Refroidissement	25
Gains internes	Personne (W/pers)	100
	Éclairage (W/m ²)	55
	Appareils (W)	230

Les différents matériaux sont donnés par la figure :

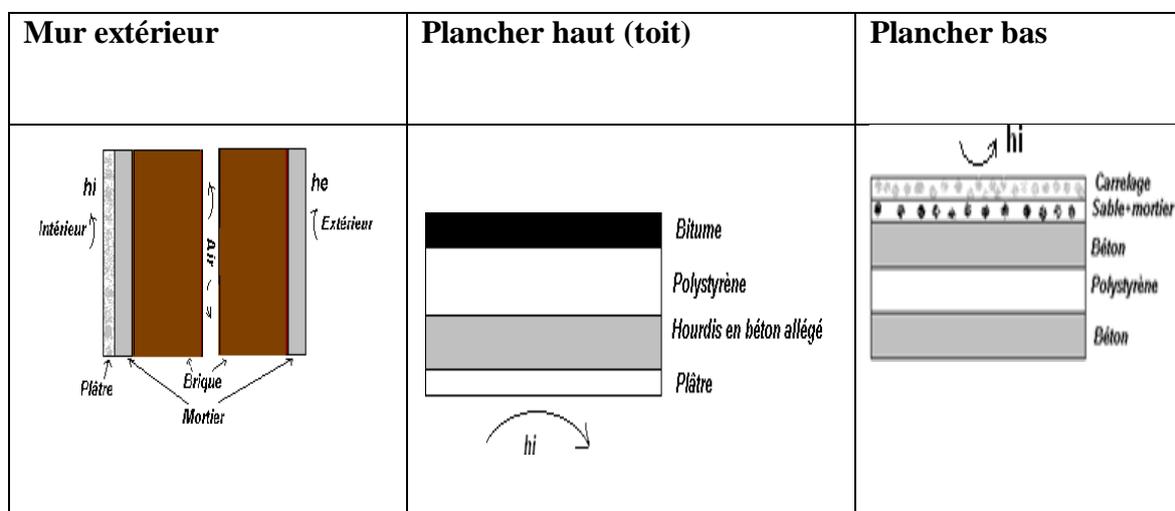


Figure2.7:Les matériaux de constituant le mur extérieur, toit, plancher bas [33]

2.4.4. Données météorologiques

Les données météorologique (température, rayonnement) de la ville d'Alger sont données par la figure

2.7

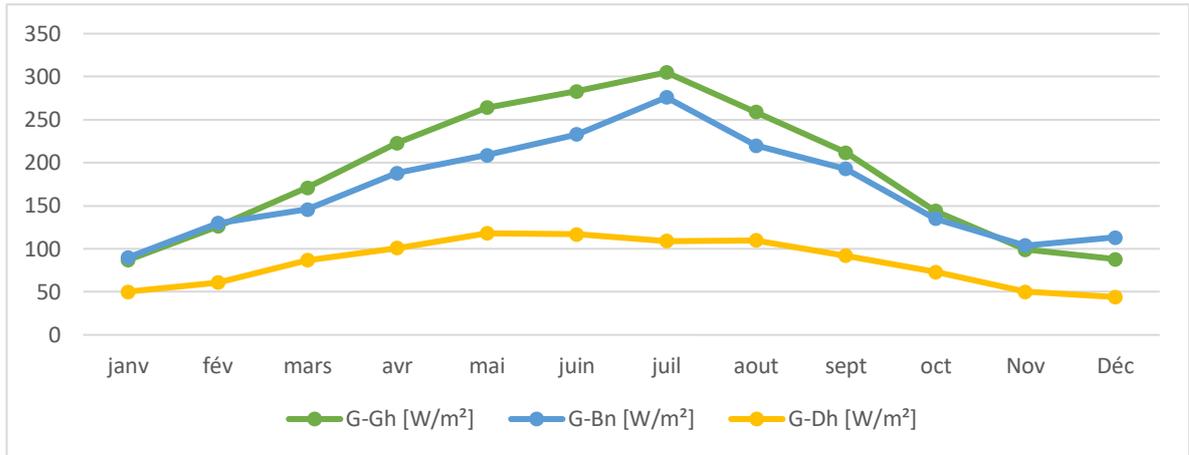


Figure 2.8: représente les irradiations mensuelles de la wilaya de Alger

Gh: Irradiance moyenne Global sur un plan horizontal.

Bn: Irradiance direct normal

Dh: Irradiance diffus horizontal

On peut remarquer l'allure sinusoïdale de l'évolution de l'irradiation mensuelle. Le maximum est atteint en été (environ 300 W/m²) et le minimum pendant les mois d'hiver (50 W/m²), ce qui est un paradoxe vis -à-vis des besoins en refroidissement et chauffage.

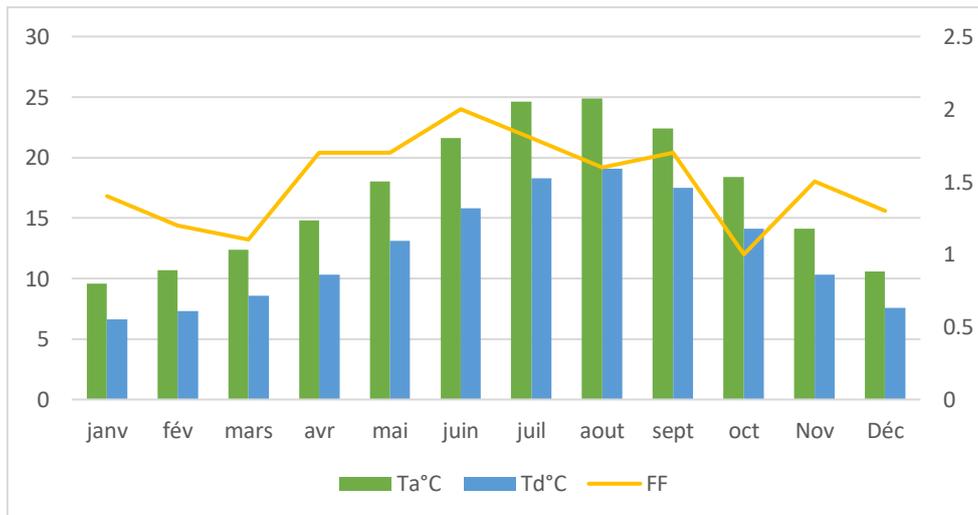


Figure 2.9: La Variation de la température moyenne annuelle

Ta : Température ambiante

Td : Point de rosée

FF : Vitesse du vent

Le graphe montre que la température moyenne annuelle maximum est atteinte en été autour de 25 °C en mois de juillet et août, les mois les plus chauds de l'année. Et le minimum pendant les mois d'hiver, 11 °C en janvier, le mois plus froid de l'année.

2.5. Dimensionnement du système :

2.5.1. Estimation des besoins l'eau chaude sanitaire :

Si Vs est le volume à soutenir et T_{ecs} la température demandée, l'énergie nécessaire Q_{ECS} est donnée par :

$$Q_{ECS} = \rho \times C_p \times V_s (T_{ecs} - T_f) \tag{2.21}$$

C_p : est la capacité thermique massique de l'eau(4200J/Kg.C°).

ρ: La masse volumique(1Kg/L)

T_f: La température de l'eau froide (15°C).

Pour calculer les quantités d'énergie nécessaires à la production d'eau chaude sanitaire à 45°C, il faut d'abord connaître les volumes d'eau chaude à produire. Dans notre exemple on prendra le cas d'une consommation moyenne de (50 litre /jour et par personne). On considère que la température moyenne de réseau de 15°C. Pour tenir compte des différences de consommation en cours d'année, nous allons supposer un profil de consommation de type méditerranéen,[3] comme indiqué sur la figure (2.10)

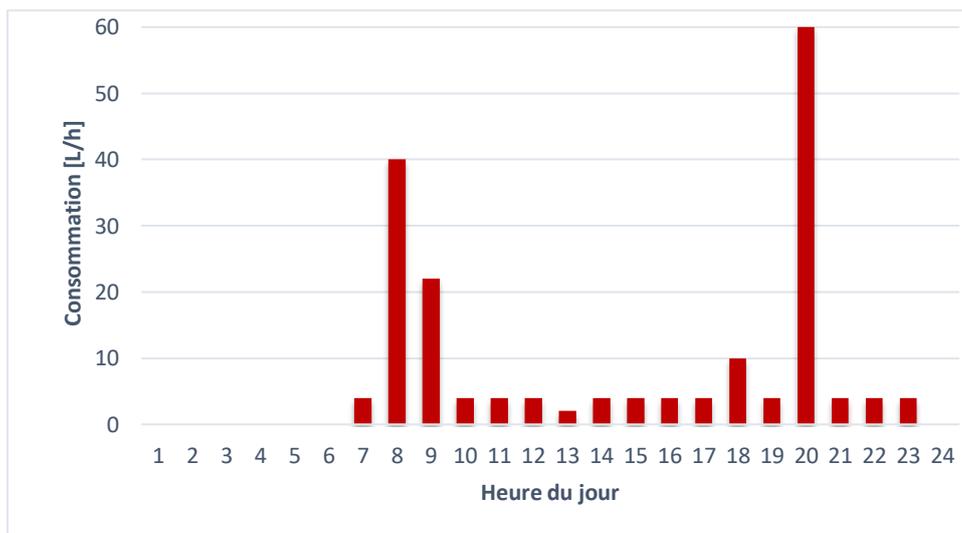


Figure2.10:Profile de consommation horaire journalier d'ECS.

2.5.2. Surface de captation solaire :

La surface de captage est choisie de manière que la production thermique annuelle du capteur satisfaire la demande annuelle en énergie thermique (ECS et énergie thermique nécessaire pour le fonctionnement de PAC), comme indique la figure (2.11)

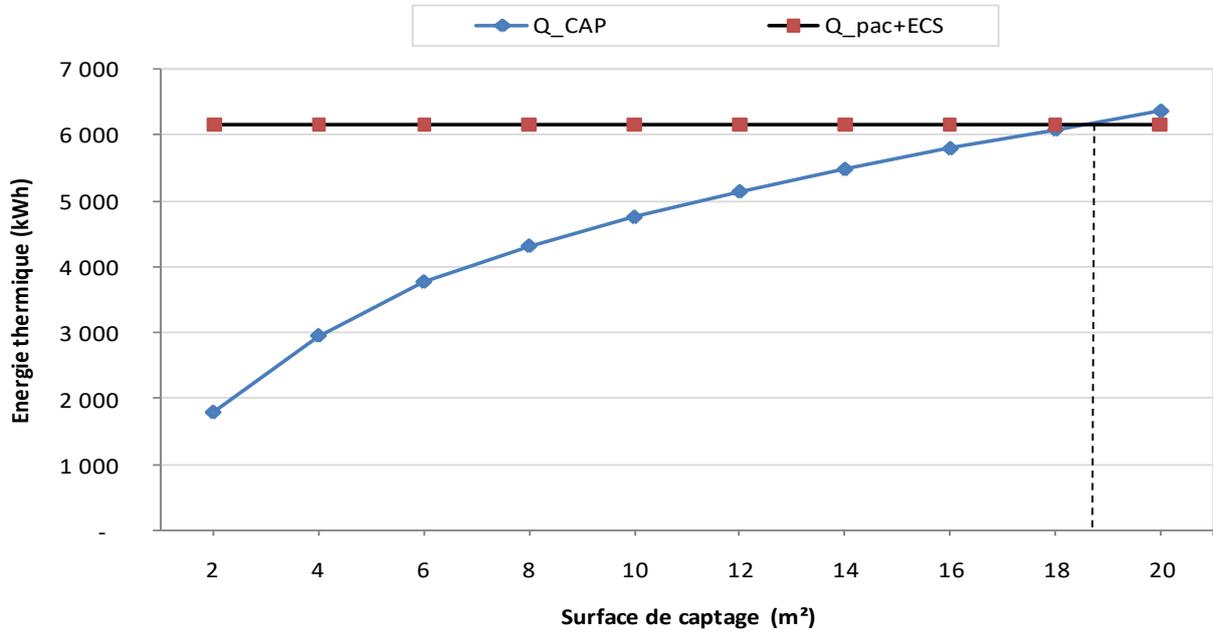


Figure 2.11: Surface de captage en fonction de la demande d'énergie thermique

Le résultat montre que pour puissance demandée de 6000 kWh, nous avons une surface de captation de 20 m².

2.5.3. Pompe à chaleur

Les besoins en chauffage et en rafraîchissement de la maison étudiée sont représentés en figure 2.12

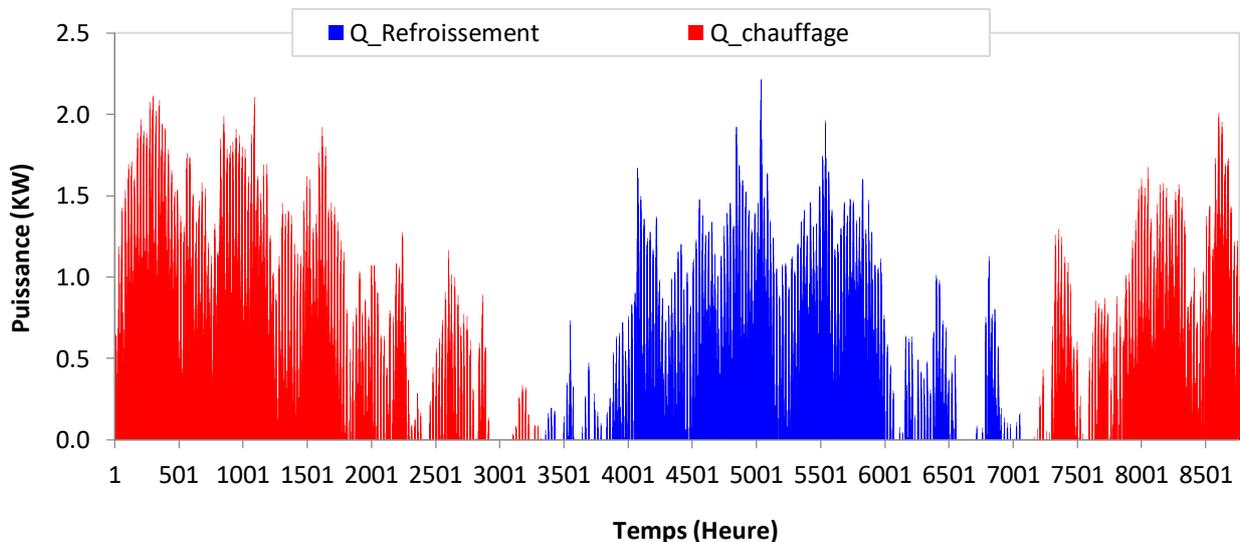


Figure 2.12: Besoin en chauffage et en rafraîchissement de la maison étudiée

On remarque la puissance horaire maximale est de plus de 3kW pour le chauffage et de 2kW pour le rafraîchissement. Par conséquent, une pompe à chaleur de puissance supérieure à 3KW doit être choisi afin de satisfaire la demande thermique de la maison étudiée.

Une pompe à chaleur de 8kW pour le chauffage et 7kW pour le refroidissement ont été choisis pour alimenter l'habitation étudiée. Les performances de la pompe à chaleur considérée sont données dans le tableau (2.8) en mode chauffage et dans le tableau (2.9) en mode rafraîchissement.

Tableau 2.8 : Caractéristiques d'une pompe à chaleur en mode chauffage [39]

		Température de sortie d'eau du condenseur °C								
		40			45			50		
		Ph	Pe	C.O.P	Ph	Pe	C.O.P	Ph	Pe	C.O.P
Température de sortie d'eau de l'évaporateur °C		[KW]			[KW]			[KW]		
	-8	7.54	2.34	3.23	7.41	2.67	2.78	-	-	-
	-6	7.90	2.31	3.43	7.77	2.64	2.95	7.56	3.01	2.51
	-4	8.26	2.28	3.63	8.13	2.61	3.12	7.92	2.99	2.56
	-3	8.44	2.26	3.73	8.31	2.60	3.20	8.10	2.97	2.73
	-2	8.61	2.25	5.83	8.49	2.58	3.29	8.28	2.96	2.80
	0	9.96	2.22	4.03	8.83	2.56	3.46	8.63	2.93	2.94
	2	9.31	2.20	4.23	9.18	2.53	3.63	8.98	2.91	3.09

Le tableau (2.11) donne les caractéristiques d'une pompe à chaleur en mode rafraîchissement.

Tableau 2.9 : Caractéristiques d'une pompe à chaleur en mode refroidissement [39]

		Température de sortie d'eau du condenseur °C								
		25			30			35		
		Pc	Pe	EER	Pc	Pe	C.O. P	Pc	Pe	EER
Température de sortie d'eau de l'évaporateur °C		[KW]			[KW]			[KW]		
	-8	5.29	1.55	3.42	4.97	1.75	2.83	4.66	1.99	2.34
	-6	5.80	1.53	3.79	5.44	1.74	3.13	5.10	1.97	2.58
	-4	6.31	1.52	4.16	5.91	1.72	3.43	5.54	1.96	2.82
	-3	6.56	1.51	4.35	6.15	1.72	3.59	5.76	1.95	2.95
	-2	6.81	1.50	4.54	6.39	1.71	3.74	5.98	1.95	3.07
	0	7.31	1.49	4.92	6.86	1.69	4.05	6.42	1.93	3.32

	2	7.80	1.47	5.29	7.32	1.68	4.36	6.86	1.92	3.57
--	---	------	------	------	------	------	------	------	------	------

2.5.4. Réservoir de stockage :

Le volume du stockage est calculé en fonction de la surface de captage comme suit :

(d'après la littérature et la valeur de θ est en virons de $30(l/m^2)$ [34])

$$V_{resrv} = \theta \cdot A_c \tag{2.24}$$

$$V_{resrv} = 600 \text{ l}$$

θ : Volume par surface de captage (l)

2.5.5. Pompe à circulation :

Débit massique :

- Le débit massique \dot{m}_1 de la pompe du circuit primaire P1 est aussi calculé en fonction de la surface de captage. D'après la littérature $\varphi = 40 \text{ kg/h.m}^2$ [35]

$$\dot{m}_{p1} = \varphi \cdot A_c \tag{2.25}$$

$$\dot{m}_1 = 800 \text{ Kg/h}$$

φ : Volume par surface de captage (kg/h.m^2)

Le débit massique \dot{m}_2 de la pompe du circuit secondaire P2 peut être calculé comme suit :

$$\dot{m}_{p2} = f_{p2} \cdot \frac{\dot{m}_{p4}}{\text{COP}_{pac}} \tag{2.26}$$

$$\dot{m}_{p2} = 100 \text{ Kg/h}$$

COP_{PAC} : Coefficient de performance nominal de la pompe à chaleur

- Le débit massique de (\dot{m}_3) de la pompe P3 dans tour de refroidissement qui doit dissiper la chaleur produite par les processus de condensation dans la PAC

$$\dot{m}_{p3} = f_{p3} \cdot \dot{m}_{p4} \cdot 1 + \frac{1}{\text{COP}_{pac}} \tag{2.27}$$

$$\dot{m}_{p3} = 382.04 \text{ Kg/h}$$

- Le débit massique \dot{m}_4 de la pompe du circuit se conduire P4 est calculé sur la base de la demande maximale.

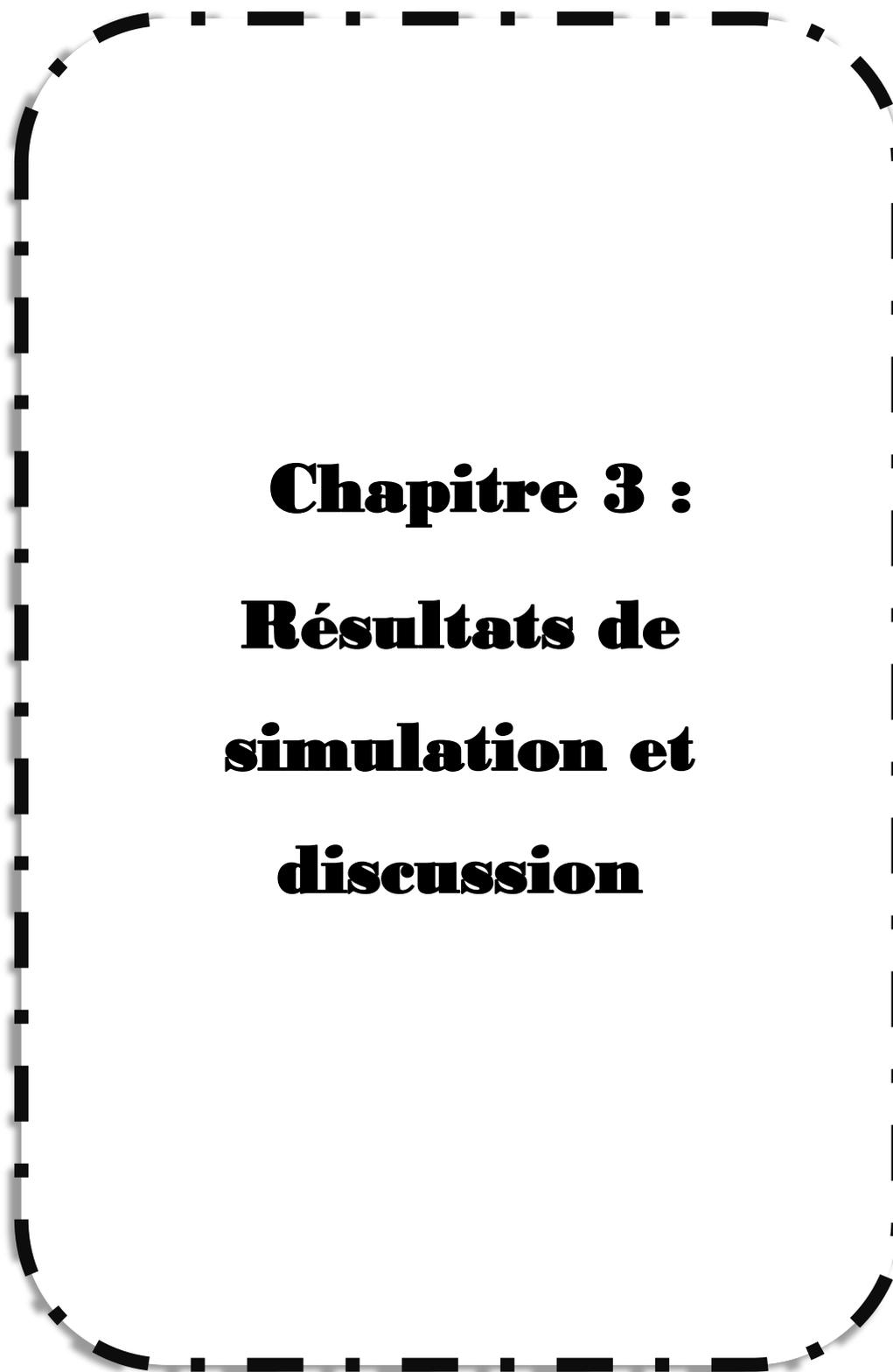
$$\dot{m}_{p4} = \frac{Q_{\text{demende .max}}}{c_p \cdot \Delta_t} \quad (2.28)$$

$$\dot{m}_{p4} = 381.86 \text{ Kg/h}$$

Avec : Différence de température nominale $\Delta T = 5^\circ\text{C}$.

2.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, une modélisation mathématique détaillée des principaux éléments qui composent notre système solaire a été effectuée. Les capteurs thermiques solaires plans, le réservoir de stockage, pompes à chaleur, le tour de refroidissement, l'appoint, système de régulation, les pompes de circulation ainsi qu'un bilan thermique de la maison à laquelle notre système est connecté.



Chapitre 3 :
Résultats de
simulation et
discussion

Chapitre 3: Résultats de simulation et discussion

3.1. Introduction :

Après avoir présenté dans le chapitre 2 la modélisation et le dimensionnement de notre système. Ce chapitre a pour but la simulation thermique dynamique qui permet d'étudier le comportement thermique du système solaire et établir son bilan énergétique et économique. Les performances énergétiques du système sont simulées à l'aide du logiciel TRNSYS. Le système doit assurer le chauffage et rafraîchissement d'une maison individuelle de surface totale de 80 m². D'abord, la maison est simulée à l'aide du module TRNBUILD dans le but d'établir le bilan thermique, ensuite, tous les paramètres des différents composants établis dans le chapitre précédent sont introduits sous "Simulation studio" et en fin le système global est simulé. Le système est étudié sous les conditions climatiques d'Alger pour une période d'une année avec un pas de temps d'une heure.

3.2. Demande énergétique de la maison étudiée :

Pour pouvoir étudier la performance énergétique de notre système solaire, il est nécessaire d'établir la puissance de chauffage et de rafraîchissement à laquelle ce dernier doit répondre. la figure (3.1) et le tableau(3.1) représentent la demande énergétique mensuelle de la maison étudiée (la demande de chauffage et de rafraîchissement et ECS).

On remarque qu'en hiver le besoin en chauffage est maximal en mois de Janvier (751kWh) et minimal en mois mai (10kWh). Plus le mois est plus froid, plus la demande est importante. La demande de chauffage totale est (2800kWh.)

Pour l'été, la demande de rafraîchissement est maximale en mois juillet de (540 kWh) et minimale en mois d'octobre (40 kWh). Plus le mois est chaud, plus la demande est importante. La demande de rafraîchissement totale est(1537kWh)

Concernant la demande en ECS, on peut observer est un peu plus importante en hiver qu'en été ; maximale est en mois de décembre (184 kWh) et minimale en mois de juillet (103 kWh). la demande de ECS totale est(1684kWh).

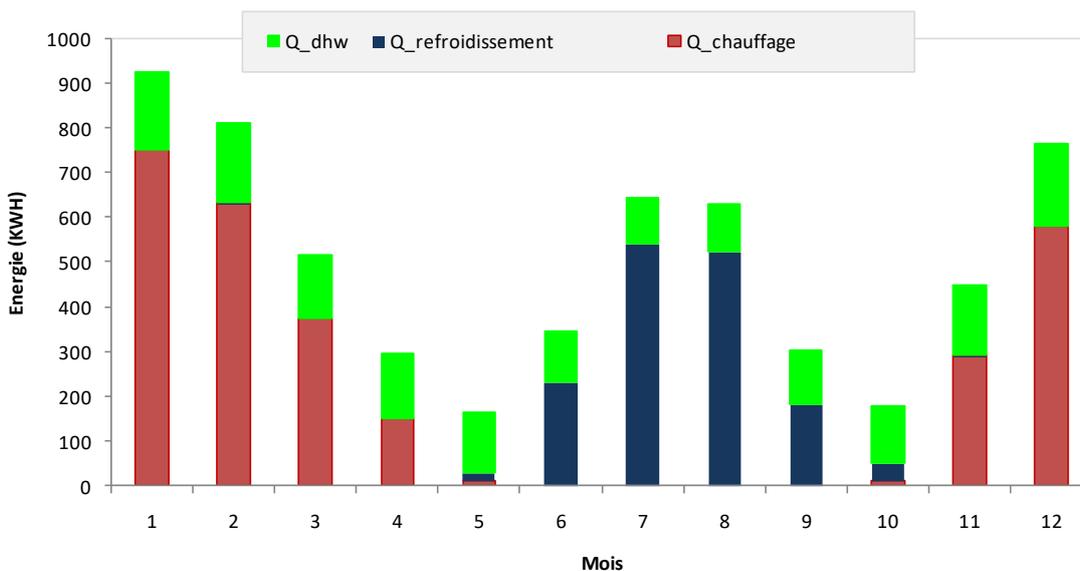


Figure3.1: Demande énergétique de la maison étudiée

Mois	Chauffage Kwh	Rafraichissement Kwh	ECS Kwh
Janvier	751	0	175
Février	634	0	176
Mars	374	0	142
Avril	150	0	144
Mai	10	20	135
Juin	0	231	114
Juillet	0	540	103
Août	0	524	105
Septembre	0	182	119
Octobre	10	40	128
Novembre	291	0	158
Décembre	580	0	184
Total	2800	1537	1684

Tableau 3.1 : la demande énergétique mensuelle en (Kwh)

3.3. Performance du système solaire

Les performances énergétiques du système solaire étudié sont étudiées en considérant :

- Une surface de captage de 20m²
- Un volume de stockage de 600L
- Une pompe à chaleur de puissance nominale de (8kW pour le chauffage et de 7kW pour le refroidissement)
- Un appoint de chauffage de 3kWh.

3.4. Résultats journaliers

Les résultats de simulation journaliers du système solaire sont présentés en analysant les évolutions des températures comme indiquent les Figures (3.2). On remarque que notre système solaire est capable de garder la température intérieure de la maison au-dessus de la température de confort (au-dessus de 20°C en hiver et au-dessous de 25°C en été).

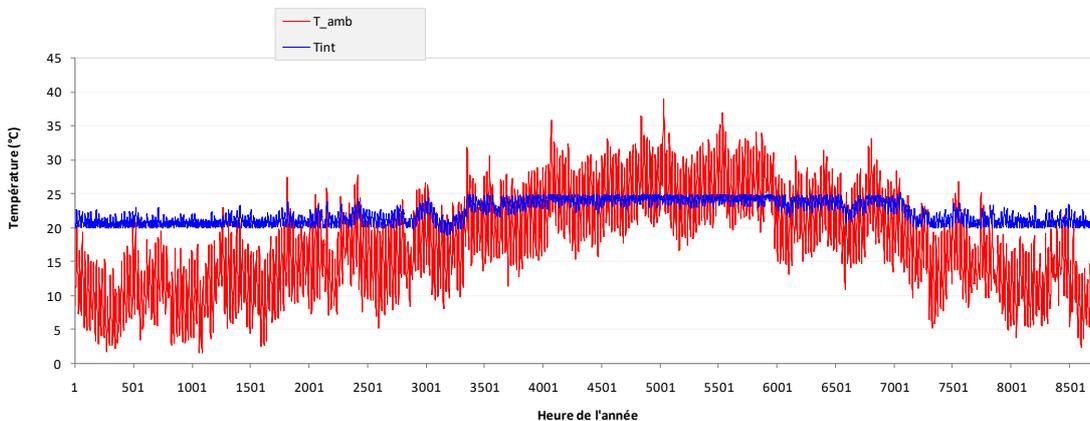


Figure3.2:les évolutions des températures

3.4.1. Période de chauffage :

D'après la Figure3.3, qui montre le profil de températures durant les journées de l'hiver, on observe que durant la nuit et les premières heures du matin (entre 0:00 am et 8:00 am, les températures dans les ballons R1 et R2 sont au-dessous des températures de consigne (35°C pour la PAC et 45°C pour ESC) à cause des pertes thermiques vers l'extérieur et l'absence du rayonnement solaire.

Cependant, la température intérieure de la maison reste au-dessus de la température de confort (20°C) grâce au système auxiliaire qui fournit l'énergie thermique nécessaire pour le fonctionnement de la PAC.

Avec le lever de soleil et la disponibilité du rayonnement solaire, la pompe P1 de circuit primaire est activée par le système de régulation et la température de sortie de capteur augmente. L'énergie thermique est fournie au réservoir R1 et augmente sa température. Quand cette dernière atteint

35°C (à environ 11:00am), l'énergie produite par le capteur thermique est orientée vers le réservoir R2 pour la production de l'ESC. En effet, la température de R2 augmente jusqu'à un maximum de 55°C en fin du jour.

Grâce au système de stockage, les températures de R1 et R2 restent au-dessus des températures de consigne jusqu'à la fin du premier jour. Après, au début de la deuxième journée, la température de R1 diminue fortement à cause de la demande de chauffage. Tandis que, la température de R2 reste au-dessus de la température de consigne parce que la demande de l'ESC est absente. Cette dernière commence à diminuer avec la demande en ESC dès les premières heures du matin.

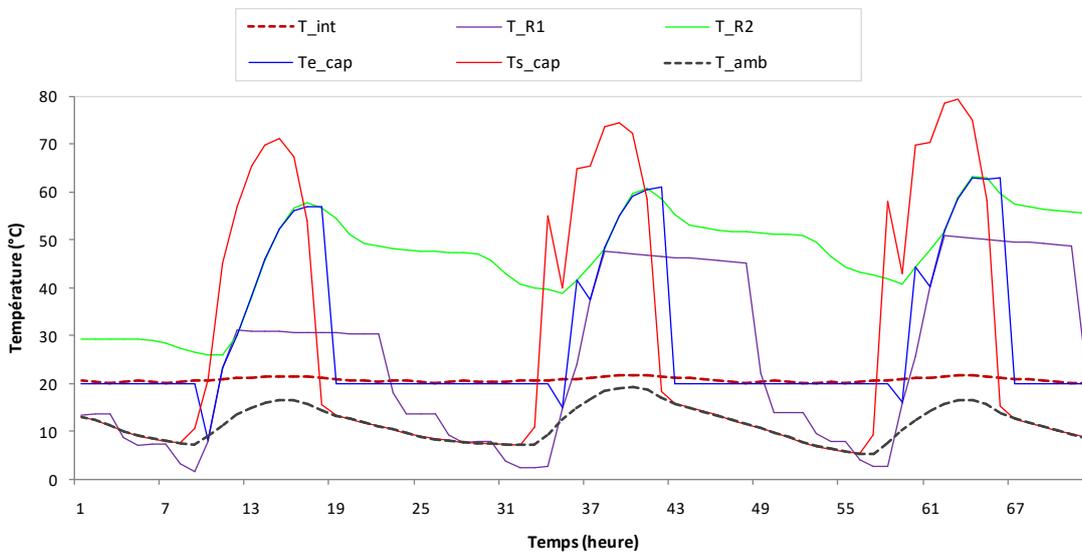


Figure 3.3: Profil de température en hiver

La figure (3.4) représente le profil des températures à l'entrée et à la sortie des différents éléments de la PAC en mode chauffage.

Le rôle de la PAC en hiver est chauffé la maison en produisant la chaleur. Alors, le fluide caloporteur entre à l'évaporateur à la température d'environ 30°C qui est la température de fonctionnement de la PAC et sort à moins de 5°C. Donc, la chaleur produite par les capteurs thermique est absorbée au niveau de l'évaporateur. Tandis que, la température à la sortie du condenseur est environ 50°C. Cela permet de chauffer la maison. Après avoir, cédé sa chaleur, le fluide retourne de la maison et au condenseur à la température d'environ 30°C.

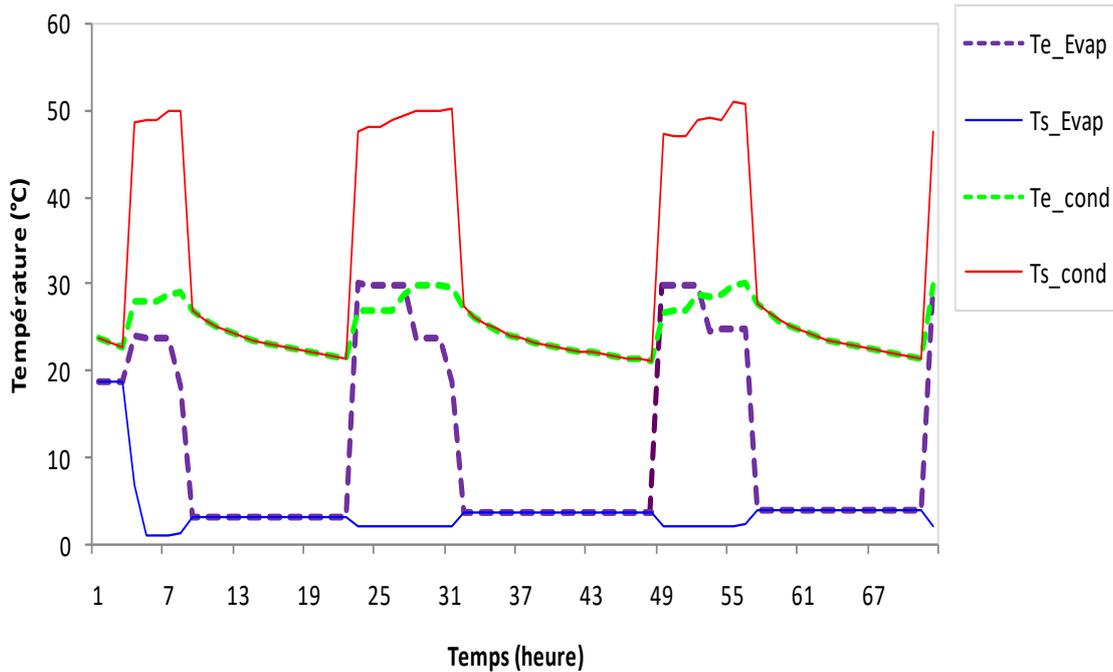


Figure 3.4: Températures à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur et le condenseur de la PAC au mode chauffage

La Figure (3.5) montre les puissances thermiques des principaux composants du système durant les trois journées considérées. On remarque que la disponible du rayonnement solaire ne coïncide pas avec la demande en chauffage. La PAC est activé entre la nuit et les première part du jour (entre 8:pm à 11 :00 am). L'énergie thermique produite par les capteurs thermiques et stockée dans R1 lors de la journée précédente est utilisée pour faire fonctionner la PAC, mais elle est insuffisante. Alors le système de chauffage auxiliaire est activé pour compléter la demande en chaleur. On remarque aussi qu'une grande partie de la production d'ECS est assurée par le système auxiliaire. La contribution de l'énergie solaire intervient en fin du jour (6:00 pm à 8:00 pm) car durant la première part du jour, la production du capteur est fournie à R1.

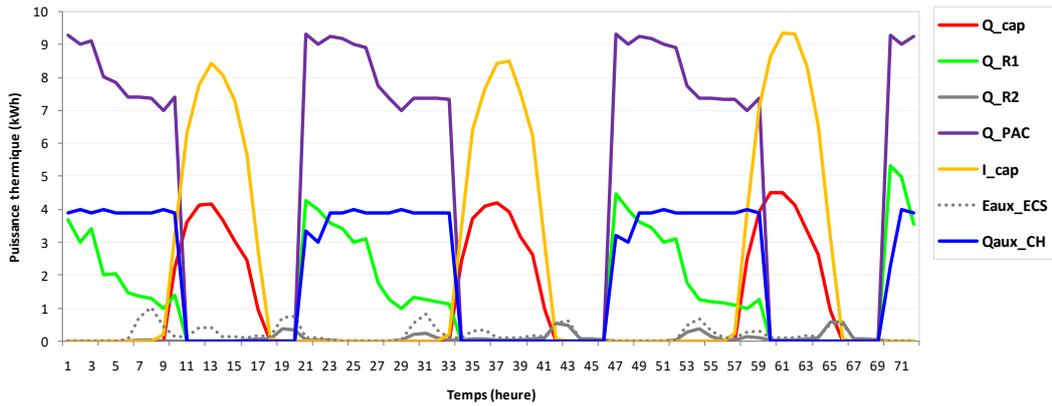


Figure3.5: les évolutions des puissances des principaux composants du système durant une journée type (mode chauffage)

3.4.2.Période de rafraichissement

Durant la période de rafraichissement Figure (3.6) où l'énergie thermique produite par le capteur thermique est utilisée entièrement pour la production de l'ECS, on remarque que la température de R1 reste au-dessus de la température de consigne durant presque toutes les trois journées.

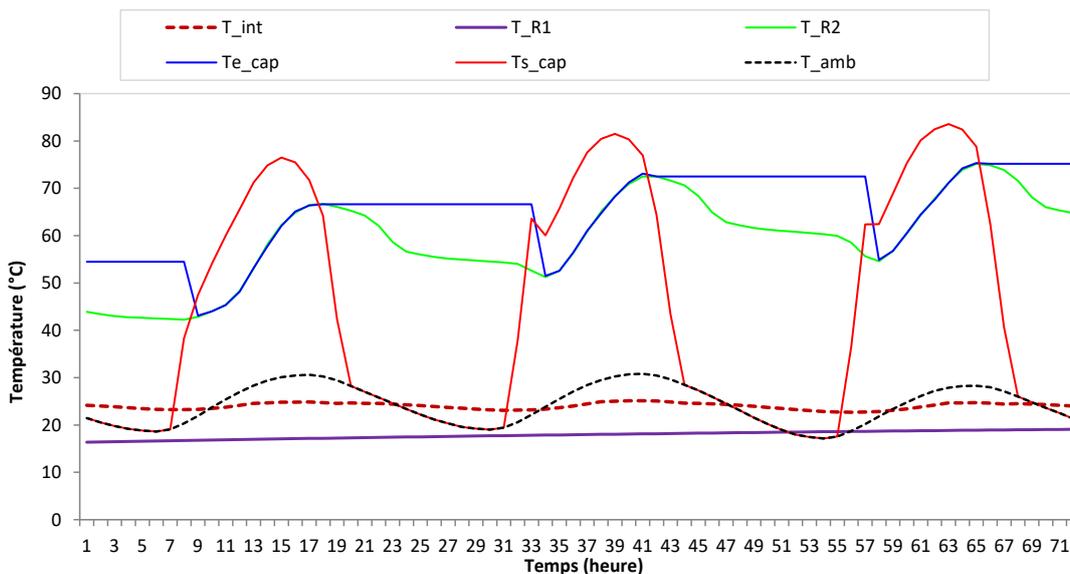


Figure3.6:Profile de température en été

La figure (3.7) montre le profil des températures des différents éléments de la PAC en mode rafraichissement. Le but en été est de rafraichir la maison. Autrement dit, c'est évacuer la chaleur stockée dans la maison. Alors, la température du fluide caloporteur à l'entrée de l'évaporateur (celle qui retourne du plancher de maison), est environ (16°C) et celle de la sortie est de moins de 5°C. En plus, la chaleur dégagée par la PAC doit être évacuée pour améliorer la performance de la PAC. Pour

cette raison, la température du fluide caloporteur à la sortie du condenseur et à l'entrée de la tour de refroidissement est environ 33°C. Elle sort à la température de moins 23°C.

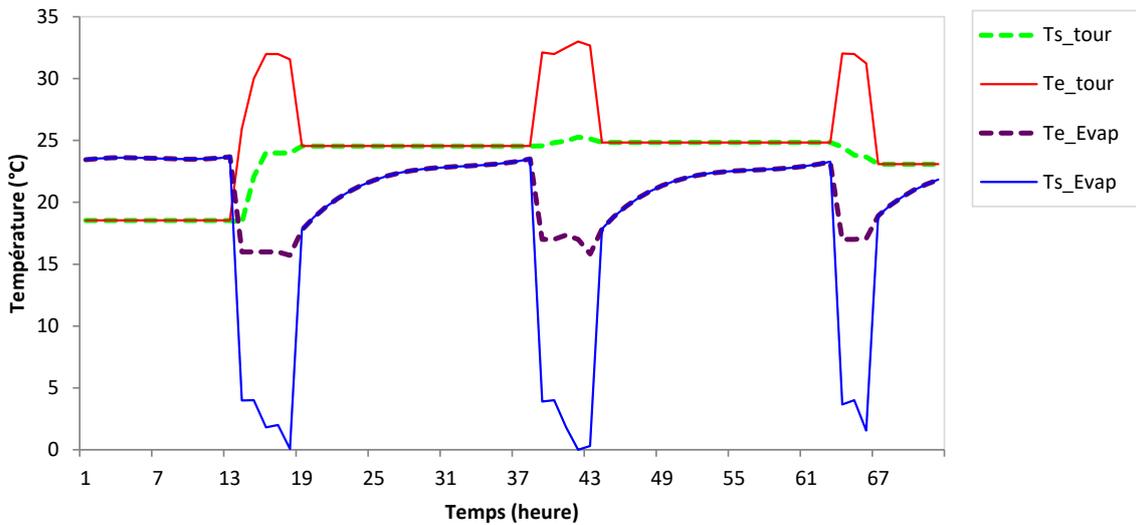


Figure3.7: Températures à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur et le condenseur de la PAC. Au mode refroidissement

La figure 3.8. Montre les échanges thermiques entre les différents composants du système durant trois journées types en été. Comme nous avons indiqué auparavant, l'énergie produite par les capteurs est utilisée uniquement pour la production d'ECS. Alors, cette dernière est assurée entièrement par l'énergie solaire (Q_{R2}) sans recourir au système de chauffage auxiliaire (Q_{aux_ECS} est nulle durant toutes les journées considérées). On remarque aussi que la pompe à chaleur est activée (en mode rafraichissement) entre 14 :00pm et 8 :00 pm pour rafraichir la maison.

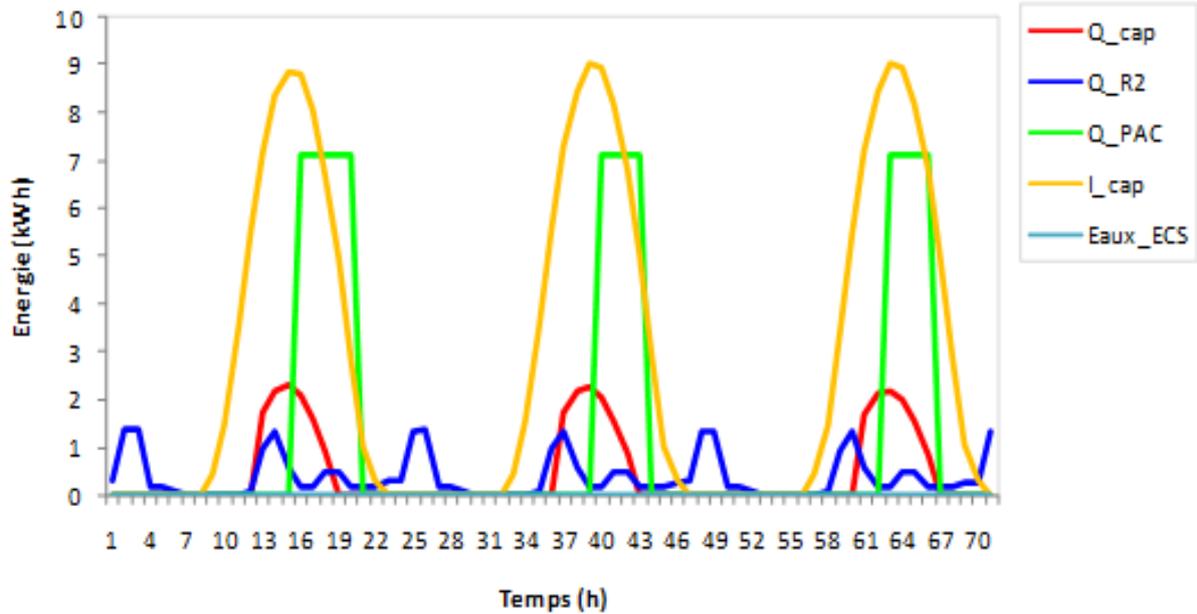


Figure 3.8: les évolutions des puissances des principaux composants du système durant une journée type (mode rafraîchissement)

3.5. Résultats mensuels :

La figure (3.9) montre les résultats mensuels où le rayonnement solaire incident, l'énergie utile du capteur et son rendement thermique sont présentés. On remarque que la production du capteur n'est pas proportionnelle au rayonnement solaire. Autrement dit, la quantité de chaleur produite en hiver est supérieure à celle produite en été en dépit la haute disponibilité du rayonnement solaire pendant la saison estivale. Cela est revient essentiellement à la faible demande (uniquement ECS) en été. Par contre, en hiver la demande est importante (chauffage et ECS). La valeur maximale de la production est enregistrée en Janvier 504 kWh. Par conséquent, le rendement du capteur thermique est faible en été. Par exemple, il atteint 0.39 en Janvier et 0.17 en Juillet.

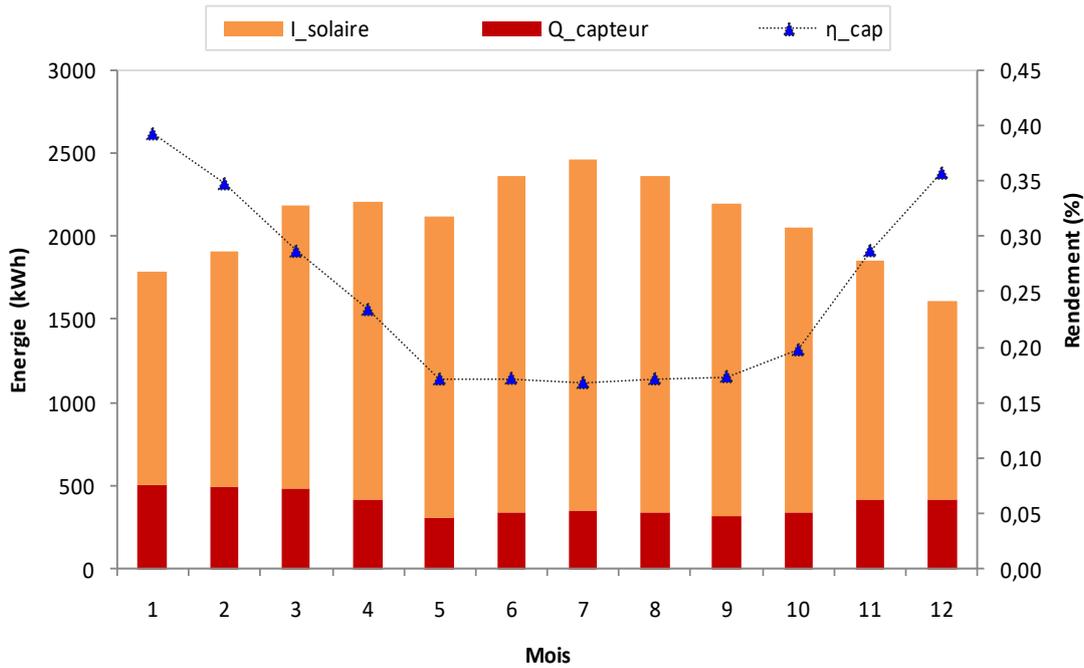


Figure3. 9 : Résultats mensuels Rayonnement solaire incident, énergie utile du capteur et rendement du capteur

La figure (3.10) représente les résultats mensuels où l'énergie thermique fournie par la PAC, sa consommation électrique et sa COP. Le coefficient de performance PAC du système étudié est défini comme le rapport entre l'énergie thermique produite par pompe à chaleur et sa consommation électrique. On remarque qu'en mode chauffage la COP est supérieure à celui en mode de rafraîchissement. Il atteint 5.75 en Janvier et 4.9 en Juillet.

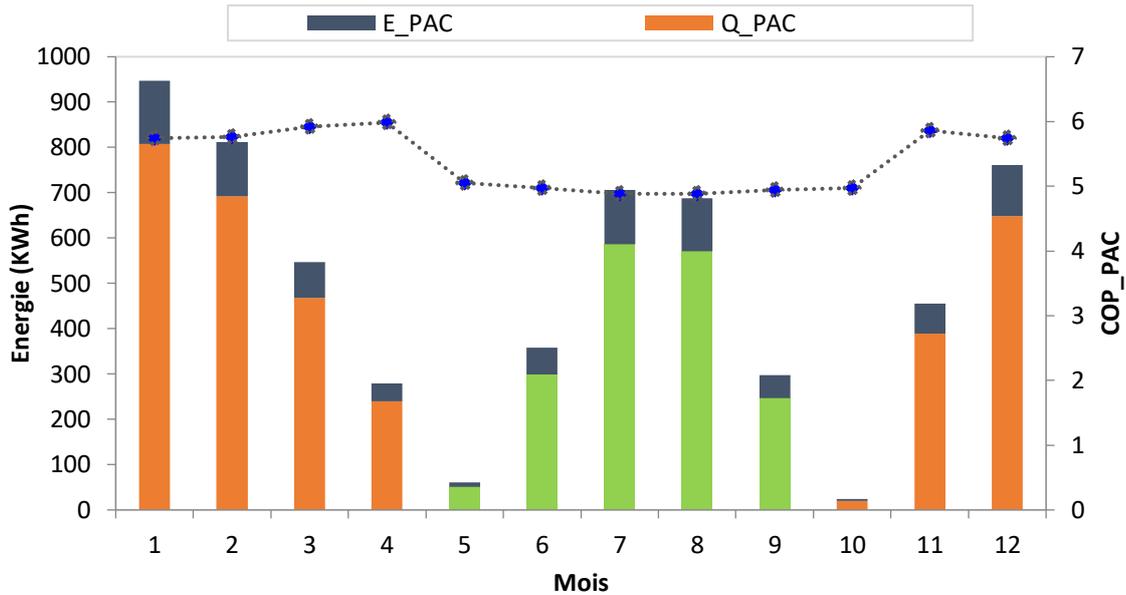


Figure 3.10: Résultats mensuelles énergie thermique fournie par la PAC, sa consommation électrique et sa COP.

La figure (3.11) représente les résultats mensuels, où les quantités de chaleur fournies par le système auxiliaire pour le fonctionnement de la PAC et la production d'ECS et la fraction solaire du système étudié sont présentées. La fraction solaire est déterminée comme le rapport entre l'énergie thermique produite par le capteur thermique et la quantité de chaleur totale. Comme la production d'ECS est assurée entièrement par l'énergie solaire en été, la fraction solaire est 100% durant les mois chauds. Durant la période de chauffage, plus le mois est froid, plus la fraction solaire est faible. Par exemple, 55% en Janvier et 72% en Mars.

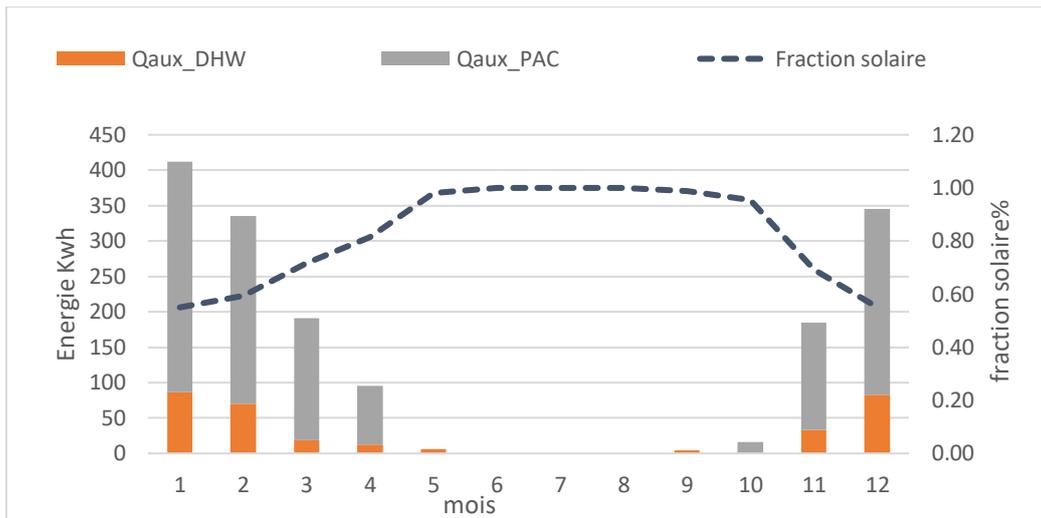


Figure3 .11 :Résultats mensuelles : Energies thermiques fournies par le système auxiliaire pour le fonctionnement de la PAC et la production d'ECS

3.6. Résultats annuels :

Dans le tableau (3.1) est présenté, le bilan total du système PAC en mode chauffage et mode refroidissement. La quantité d'énergie totale produite par les capteurs thermiques est de **4480 kWh**. Cette dernière est incapable de répondre aux besoins totaux pour le chauffage et le besoin en ECS. Donc, le système auxiliaire fournit 2320 kWh pour l'ECS et 1660 kWh pour la PAC. Une fraction solaire de 91.3%, 40.9% et 65.4% pour, respectivement, l'ECS, le chauffage et totale est atteinte. La consommation électrique de la PAC est 574 kWh et 358 kWh pour, respectivement, en mode chauffage et rafraichissement avec un COP de 4.73 et 4.73. Le rendement du capteur annuel est 0.22 (0.27 en hiver et 0.17 en été).

Energie (kWh)	Valeur	Paramètre	Valeur
Q_cap	4480	COP _{ch_PAC}	5.74
I	20339	COP _{ref_PAC}	4.73
Q _{ch_PAC_}	3300	COP	5.35
Q _{ref_PAC_}	1690	η _{ch_cap}	0.27

Q_{aux_ECS}	2320	η_{ref_cap}	0.17
Q_{aux_PAC}	1660	η_{cap}	0.22
E_p	192	SF_tot (%)	65.4
E_{ch_PAC}	574	SF_ECS(%)	91.3
E_{ref_PAC}	358	SF_CH(%)	40.9

Tableau 3.2 :: Bilan total du système PAC en mode chauffage et mode de refroidissement

3.7. Etude paramétrique

3.7.1. Influence de la surface de captage :

Afin de déterminer l'impact de la surface du champ de capteurs sur la performance du système, différentes surfaces sont considérées de 2 à 20 m², tandis que les volumes des deux réservoirs sont considérés constants.

La figure (3.12), montre la variation des performances énergétiques du système en fonction de la surface de captage. On remarque que l'énergie utile du capteur est proportionnelle à la surface de captage. Le contraire est observé pour les énergies thermiques fournies par le système de chauffage auxiliaire pour l'ECS et la PAC, elles diminuent lorsque la surface de captage augmente. L'énergie fournie par la PAC n'est influencée par la variation de la surface de captage car la température de fonctionnement est maintenue constante par le système de chauffage auxiliaire.

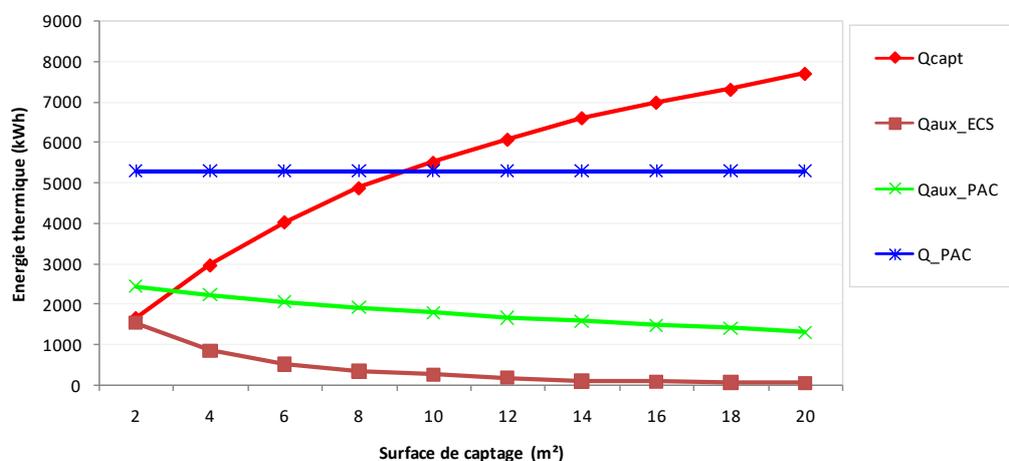
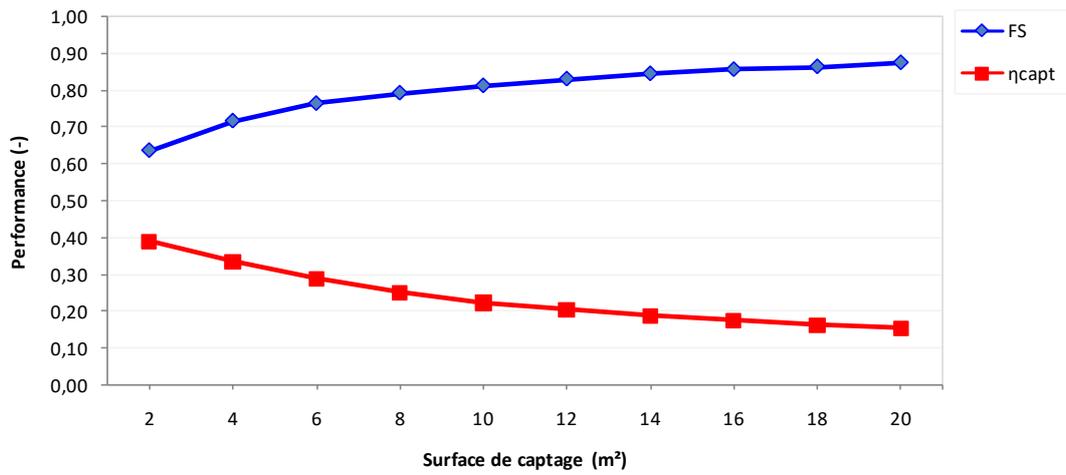


Figure3 .12 : Impact de la surface de captage sur les performances énergétiques du système solaire

La figure 3.13, montre la variation de la fraction solaire et le rendement du capteur en fonction de la surface de captage. La fraction solaire augmente rapidement lorsque la surface de captage augmente de 2 à 6 m² car l'énergie utile du capteur augmente et l'énergie auxiliaire diminue. Après 6 m², l'augmentation devient moins importante. Contrairement, le rendement du capteur diminue lorsque la surface de captage augmente suite à l'augmentation de la température moyenne du capteur thermique.

**Figure3 .13** : Rendement du capteur en fonction de la surface de captage

La figure (3.14) représente la variation du coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur en fonction de la surface de captage. On peut observer que le COP de la PAC en mode chauffage et avec système chauffage auxiliaire est constant (environ 6), tandis que sans système auxiliaire, il augmente avec l'augmentation de la surface de captage suite à l'augmentation de la température de fonctionnement de la PAC. En mode refroidissement, le COP reste constaté à environ 4.7 parce qu'il est indépendant de la production du capteur.

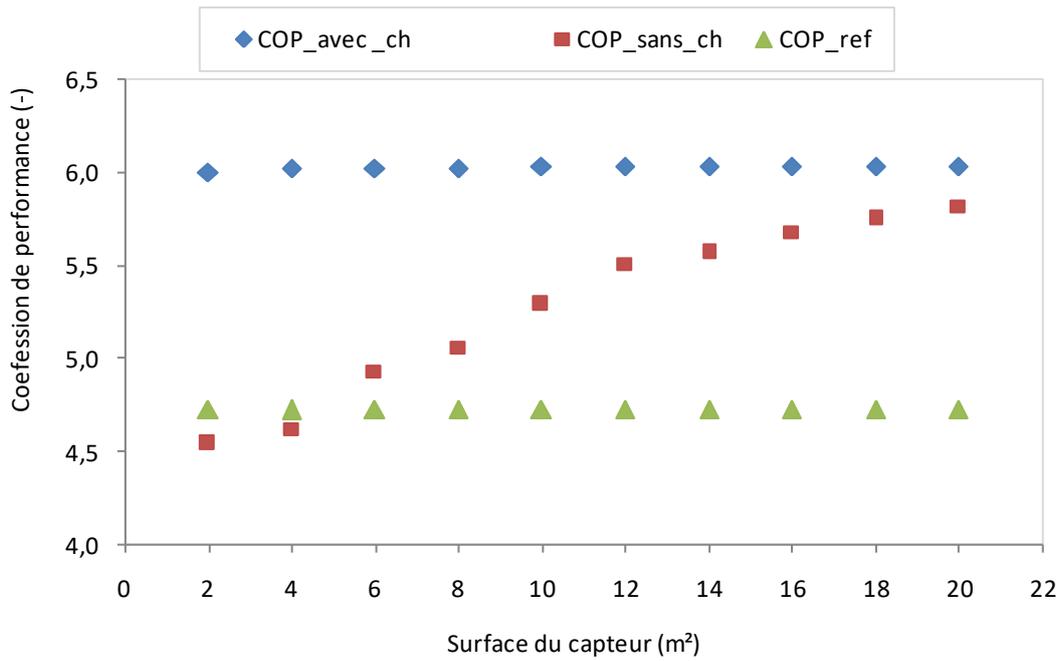


Figure3 .14 : COP de la pompe à chaleur en fonction de la surface de captage

3.7.2. Influence du volume de stockage

Pour étudier l'influence du volume de stockage sur les performances énergétiques du système étudié, on considère des volumes allant de 10kg/h.m² à 100kg/h.m².

La Figure (3.15) représente la variation de l'énergie utile du capteur et l'énergie auxiliaire en fonction du volume R1. On peut remarquer que l'influence du volume de stockage sur les performances du système est moins importante que celle de la surface de captage. Cependant, une augmentation non négligeable est observée pour des volumes variants entre 10 et 40 kg/h.m². Par conséquent, l'énergie auxiliaire fournie à la PAC diminue avec l'augmentation du volume de stockage. Cependant, l'énergie auxiliaire fournie par le système de chauffage auxiliaire pour la production d'ECS augmente.

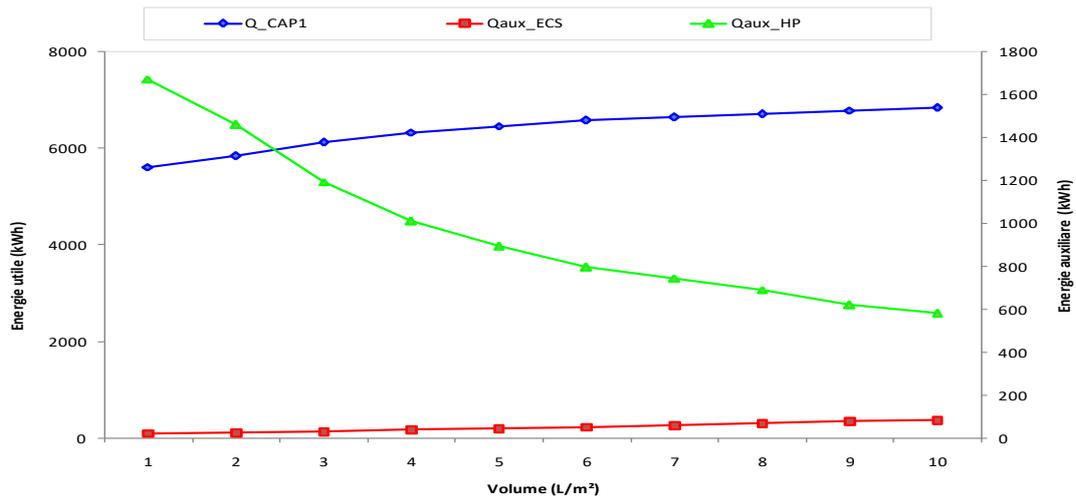


Figure3 .15 : Variation de l'énergie solaire utile et l'énergie auxiliaire en fonction du volume R1

La figure (3.16) représente l'influence du volume de réservoir R1 sur la fraction solaire et COP de la PAC. On remarque une amélioration dans le rendement du capteur suite à réduction de sa température moyenne d'entrée. Une légère augmentation est constatée dans la fraction solaire car l'énergie thermique stockée dans R1 augmente.

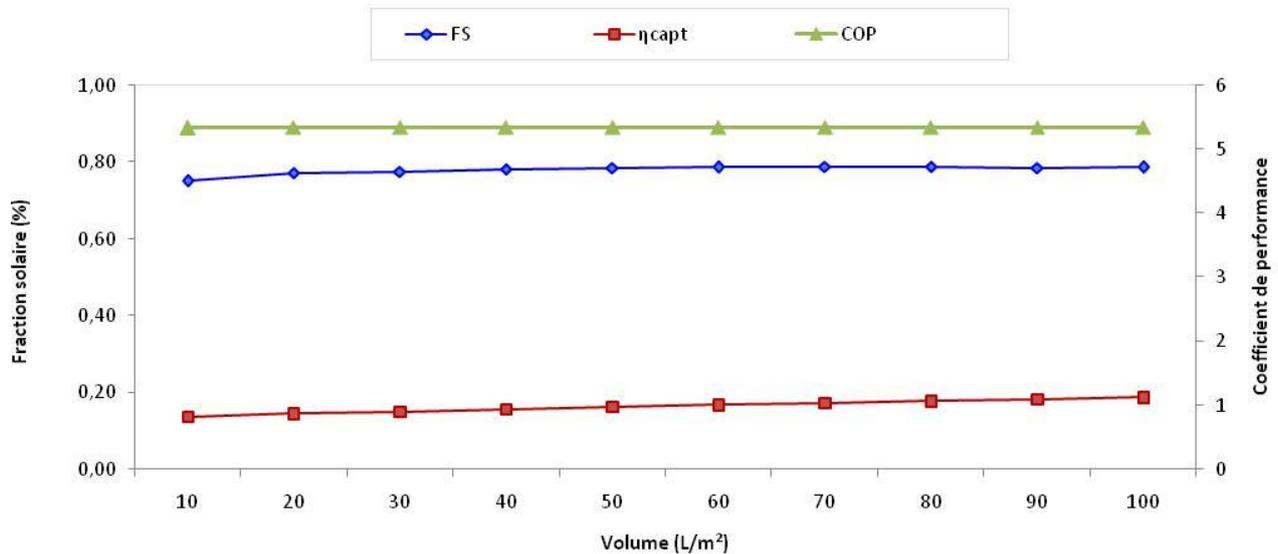


Figure3 .16 : Variation de la fraction solaire et le rendement du capteur en fonction du volume R1

2.8. Etude économique :

L'étude économique du système solaire est évaluée en calculant le retour d'investissement qui tient compte de coût de différents composants solaires, le coût de fonctionnement, et le prix des énergies

fossiles (gaz et électricité). Dans notre cas, on considère un système de référence qui se compose d'un chauffage à gaz et un système de rafraîchissement électrique.

2.8.1. Consommation d'énergie primaire (EP)

La consommation d'énergie primaire du système de référence est calculée en considérant :

- La consommation électrique du système de rafraîchissement électrique (E_{SRE}) et les pompes de circulation ;
- La consommation en gaz naturel du système de chauffage à gaz pour la production d'ECS ($Q_{CG,ECS}$) et pour le chauffage de la maison ($Q_{CG,CH}$).

$$EP_{SR} = \frac{E_{SRE} + E_p}{\eta_{el}} + \frac{Q_{CG,ECS} + Q_{CG,CH}}{\eta_{CG}} \quad (3.1)$$

Où: η_{CG} est le rendement du chauffage à gaz (0.81) and η_{el} est le rendement conventionnel moyenne d'électricité produite au niveau de l'usine (0.4).

L'énergie primaire consommée par le système solaire est calculée considérant :

- La consommation électrique de la pompe à chaleur (P_{AC}) et les pompes de circulation (E_p) ;
- La consommation du gaz naturel du système auxiliaire de chauffage pour la production d'ECS ($Q_{CG,ECS}$) et le fonctionnement de la pompe à chaleur ($Q_{CG,pac}$)

$$EP_{SS} = \frac{E_{PAC} + E_p}{\eta_{el}} + \frac{Q_{CG,ECS} + Q_{CG,PAC}}{\eta_{CG}} \quad (3.2)$$

2.8.2. Economie d'énergie primaire (EPE)

L'énergie primaire économisée est la différence entre l'énergie primaire consommée par le système de référence et celle consommée par le système solaire.

$$EPE = CEP_{SR} - CEP_{SS} \quad (3.3)$$

2.8. 3. Retour d'investissement (RI)

Le retour d'investissement du système solaire est calculé par l'équation suivante:

$$RI = \frac{CI_{SS} - CI_{SR}}{CF_{RS} - CF_{PS}} \quad (3.4)$$

Où : CI_{SR} and CI_{SS} sont les coûts d'investissement du système de référence et du système solaire, respectivement et OC_{SR} et OC_{SS} sont les coûts de fonctionnement du système de référence et du système solaire.

Le coût de fonctionnement des deux systèmes est donné par les équations suivantes :

$$CF_{SR} = CEP_{el,SR} \times C_{el} + CEP_{GN,RS} \times C_{GN} \quad (3.5)$$

$$CF_{SS} = CEP_{el,SS} \times C_{el} + CEP_{NG,PS} \times C_{NG} \quad (3.6)$$

Où, C_{el} et C_{GN} représentent les prix d'électricité (0.048 €/kWh) et de gaz naturel (0.004 €/kWh), respectivement.

Dans le tableau 3.3, sont donnés les résultats obtenus :

Considérant un cycle de vie de 20 ans pour le système solaire, on remarque que le retour d'investissement de ce dernier supérieur à son cycle de vie. Cela est dû essentiellement au:

- Coût d'investissement élevé du système solaire à cause de la cherté des équipements solaires en Algérie ;
- Le faible prix du gaz et d'électricité, résultant à une faible économie d'énergie primaire.

Energie (kWh) et coût (euro)	Valeur
Coût du système de référence	1700
Coût du système solaire	12843
CEP_SS	3429
CEP_SR	10500
EPE	7083
CF_SS	64
CF_SR	211
RI (années)	64

Tableau 3.3 : Le coût de fonctionnement des deux systèmes

Dans le but d'optimiser notre système étudié, une étude paramétrique est effectuée en analysant l'impact de la surface de captage sur le retour d'investissement. D'après la figure3.17, le meilleur retour d'investissement est obtenu à une surface de captage de 4m².

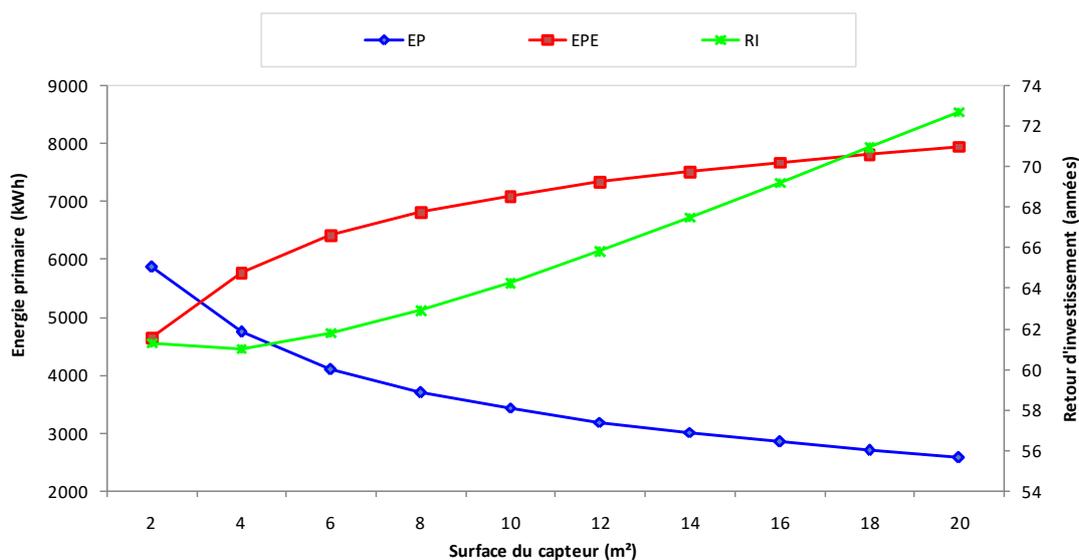


Figure3.17 : Variation du retour d'investissement en fonction de la surface de captage

2.9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté et discuté les résultats de la simulation dynamique de notre système solaire étudié. Les résultats montrent que le système solaire est capable de fournir une grande part des besoins de chauffage et rafraîchissement et d'ESC de la maison étudiée. La fraction

solaire obtenue est de 65.4 %. Le reste pour la demande énergétique est compléter par le système d'appoint notamment durant les mois les plus froids.

Les résultats de simulation montrent aussi que la surface de captage a une grande influence sur les performances énergétique et économique du système. Tandis que l'influence du volume de stockage est moins importante. D'après l'étude économique, la surface de captage optimale est de 4m²

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a porté sur l'étude, la modélisation et la simulation dynamique d'une installation solaire composée d'une pompe à chaleur assistée par un champ de capteurs plans. Notre étude a mis en évidence l'intérêt énergétique du couplage d'une pompe à chaleur à un champ de capteurs plans pour le chauffage en hiver, le rafraîchissement en été et la production d'ECS d'une habitation unifamiliale typique Algérienne de surface habitable totale de 80 m² sous les conditions climatiques de la région d'Alger. Dans le premier chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique qui a permis de voir les définitions des différents concepts de pompe à chaleur coupler a des capteurs thermiques. Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous avons fait une modélisation mathématique des différents équipements du système solaire étudié ainsi que l'habitation considérée. Enfin le dernier chapitre est consacré à la simulation thermique dynamique qui permet d'étudier le comportement thermique du système solaire et établir son bilan énergétique et économique. Les performances énergétiques du système sont simulées à l'aide du logiciel TRNSYS.

Les résultats de simulation fournis dans ce travail montrent que notre système solaire étudié est capable de répondre à une part importante de la demande de chauffage et rafraîchissement de la maison. Mais, l'utilisation de l'appoint est nécessaire pour chauffer la maison durant la nuit et lorsque le rayonnement solaire est insuffisant surtout durant les mois les plus froids de l'année (Décembre et Janvier). La quantité d'énergie totale produite par les capteurs thermiques est de **4480 kWh** avec un rendement thermique du capteur est de **0.22 (0.27 en hiver et 0.17 en été)**. Cette quantité d'énergie est incapable de répondre aux besoins totaux pour le chauffage et le besoin en ECS. Donc, le système auxiliaire fournit **2320 kWh** pour l'ECS et **1660 kWh** pour la PAC. Une fraction solaire de **91.3%, 40.9% et 65.4%** pour, respectivement, l'ECS, le chauffage et totale est atteinte. La consommation électrique de la PAC est de **574 kWh** en mode chauffage et **358 kWh** en mode rafraîchissement avec un COP de **4.73 et 4.73**, respectivement. Les résultats de simulation montrent aussi que la surface de captage a une grande influence sur les performances énergétique et économique du système.

Pour les premières surfaces allant de **2 m² à 6 m²**, une amélioration de **13 %** dans la fraction solaire est obtenue. Pour des surfaces de captage supérieure à **6m²**, l'augmentation de la fraction solaire devient faible (**11%** de **6m² à 20m²**). Tandis que l'influence du volume de stockage sur les performances du système est moins importante mai non négligeable. Une amélioration de **19%** est enregistrée pour des volumes allant **10 à 100 kg/h.m²**. D'après l'étude économique, le retour d'investissement est influencé fortement par la surface de captage car elle représente une fraction

Conclusion générale

importante (**23%**) du coût total du système. Le meilleur retour d'investissement est obtenu à une surface de captage de **4 m²**. Cependant, à cette surface, le retour d'investissement du système est supérieur à son cycle de vie (20 ans). Cela est dû essentiellement au coût d'investissement élevé du système solaire à cause de la cherté des équipements solaires en Algérie et le faible prix du gaz et d'électricité, résultant à une faible économie d'énergie primaire.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] les pompes à chaleur 2^e édition -r. dumon chrysostome
- [2] k. mouna « étude du couplage d'un champ de capteurs solaires plans à une pompe à chaleur pour le chauffage d'un centre commercial » mémoire de master 2015
- [3] B. hadjer « chauffage par pompe à chaleur assistée par panneaux solaire » mémoire de master 2017
- [4] B. mourad « contribution à l'étude, la simulation et l'analyse des pompes à chaleur assistée par l'énergie solaire » mémoire de magister 2008
- [5] les pompes à chaleur 2^{em} édition jean lemale
- [6] langlois antoine « pompes à chaleur géothermiques utilisant des banques thermiques à matériau à changement de phase » mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées .2010
- [7] j. béatrice et m. abdoulaye ndiaye, « la pompe à chaleur théorie simplifiée constitution classification et application », au lycée paul langevin de Martigues (bouches du Rhône)
- [8] r. charbel de mémoire de docteur « conception d'une PAC air/eau à haute efficacité « énergétique pour la réhabilitation d'installation de chauffage existantes » (2006)
- [9] f. bruno mémoire de doctorat « étude des possibilités de récupération de la chaleur par voie thermodynamique pour la réhabilitation des maisons individuelles » paris (2009)
- [10] m. derkaoui mawloud « contribution à l'analyse du couplage d'un séchoir agro-alimentaire à une machine thermique fonctionnant à l'énergie solaire » mémoire de magister - 2012
- [11] f. benmeriem, « contribution à l'analyse de la faisabilité énergétique d'une installation de production de l'eau chaude sanitaire par voie solaire » mémoire de magister. Uhbc ,2009
- [12] t. salem, « intégration des composants solaires thermique actifs dans la structure bâtie » thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de lyon ,2007
- [13] t.a. muriel, « recherche d'un nouveau procédé de conversion thermodynamique de l'énergie solaire, en vue de son application à la cogénération de petite puissance » thèse de doctorat, université de pau.2007
- [14] F. benmeriem « contribution à l'analyse de la faisabilité énergétique d'une installation de production de l'eau chaude sanitaire par voie solaire » mémoire de magister ,2009
- [15] y.h. kuang «experimental study on solar assisted heat pump system for heat supply
“energy conversion and management 44 (2003) 1089–1098

- [16] f.b. gorozabelchata, et al, «analysis of a direct expansion solar assisted heat pump using different refrigerants », *energy conversion and management* 46 (2005) 2614–2624
- [17] j.p. morel « groupe frigorifique à compression couplé mécaniquement et Thermiquement sur un moteur solaire » n° 5 éditions (1978)
- [18] Francesco calise et al «thermoeconomic optimization of a solar-assisted heat pump based on transient simulations and computer design of experiments »*energy conversion and management* 125 (2016) 166–184
- [19] evangels bellos, et al «energetic and financial sustainability of solar assisted heat pump heating systems in Europe» *sustainable cities and society* 33 (2017) 70–84
- [20] juanli ma, et al« performance analysis of indirect-expansion solar assisted heat pump using co2 as refrigerant for space heating in cold climate» *solar energy* 208 (2020) 195–205
- [21] F. djebbi « étude des fluides d’un immeuble à usage d’habitation ecole supérieur des sciences et technique de tunis -master professionnel ingénierie et management des systèmes industriels-spécialité énergétique 2016
- [22] C. fraga; et al «solar assisted heat pump system for multifamily buildings: towards a seasonal performance factor of 5 numerical sensitivity analysis based on a monitored case study» *solar energy* 146 (2017) 543–564
- [23] sara Eicher, et al «solar assisted heat pump for domestic hot water production »*energy proedria* 30 (2012) 571 – 579
- [24] m.n.a. hawaladar et al «the performance of a solar assisted heat pump water heating system» *applied thermal engineering* 21 (2001) 1049–1065
- [25] b. j. Huang et al «performance characteristics of integral type solar- assisted heat pump “department of mechanical engineering, national taiwan university, Taipei, taiwan received 27 September 1999; revised version accepted 31 may 2001
- [26] E. Mohamed “low-temperature solar-plate-assisted heat pump: a developed design for domestic applications in cold climate *international journal fore frigeration* 81(2017) 134-150
- [27] Sabrina n. Rebello «economic analysis and design optimization of a direct expansion solar assisted heat pump »*solar energy* 188 (2019) 164–174
- [28] f.b., gorozabel, et al «two-stage direct expansion solar-assisted heat pump for high temperature applications”, *applied thermal engineering*, 2008.
- [29] m. sami bukeret, et al «solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: a systematic review » *renewable and sustainable energy reviews* 55 (2016) 399–413

- [30] fraisse, gilles. « La régulation thermique des bâtiments tertiaires » application de la logique floue à la régulation centrale du chauffage en régime intermittent. insu de lyon, 1997. Thèse de doctorat.
- [31] k. Michael, « trnsys a transient system simulation program ». university ofWisconsin madison solar energy laboratory, 2004. p. 82
- [32] calise et al., «transient analysis and energy optimization of solar heating and cooling systems in various configurations., » solar energy 84 (2010) 432–449.
- [33] r. kharchi thèse de doctorat « étude énergétique de chauffage, rafraichissement et eau chaud sanitaire d'une maison type en Algérie » (2013),
- [34] a. Beckman et al., «solar heating design by the f-chart method».
- [35] a. klein et al., «a design procedure for solar heating systems, » sol. energy 18 (1976) 113, john wiley, New York, 1977.
- [36] www.france-chauffage-solaire.fr
- [37] www.lacaze-energies.fr
- [38] Solar Energy Laboratory.W., Madison, TRNSYS. A transient system simulation program
- [39] [www .aermec. com](http://www.aermec.com)
- [40] m. merzouk, conversion thermodynamique solaire Potentiel, Théorie, Systèmes et Performances .

