

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

Université Saad Dahlab-Blida 1  
Faculté de Technologie  
Département des Énergies Renouvelables



**Projet de Fin d'Études**  
En vue de l'obtention du diplôme de Master

**Option**  
Énergies Renouvelables et Habitat Bioclimatique

**Thème**  
**Simulation Dynamique d'un Système de Chauffage  
Solaire D'une Piscine Privée Extérieure**

**Présenté par :**  
BENKHERFALLAH Mouna

**Soutenu devant le jury composé de :**

BOUKENOUI Rachid	Université de Blida 1	Président
LAAFER Abdelkader	Université de Blida 1	Examineur
SEMMAR Djaffar	Université de Blida 1	Promoteur
SAMI Sabrina	Centre de Développement des ENR	Co-Promotrice

# Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents, *Imane* et *Mohammed*, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai vous remercier assez. Votre affection, votre aide et bienveillance qui m'ont guidé et votre présence à mes cotes qui été la source de ma force et ma patience ;  
Merci d'être toujours là pour moi.

A mes chers frères, *Sidali* et *Ahmed*, qui ont été mes compagnons de vie et mes complices.

A toute ma famille et mes amis ;

C'est avec une immense gratitude que je vous dédie ces pages, en espérant que cela puisse être un témoignage de ma reconnaissance éternelle.

# Remerciement

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon promoteur, **Pr. SEMMAR** pour votre soutien, votre guidance, votre patience et votre compréhension, pour votre expertise et vos conseils avisés qui ont contribué à accomplir ce travail.

Je souhaite également exprimer mes profondes gratitude à **Madame SAMI** qui m'a aidé et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie aussi **Pr. HAMID** et **Mr. KACI** pour votre aide précieuse.

Et toutes autres personnes qui a participé de près ou de loin dans la rédaction de ce mémoire de Master.

## Table des matières

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre1 : État de l'art et problématique.....</b>	<b>14</b>
1.1 Introduction :.....	14
1.2 Énergie Solaire :.....	15
1.2.1 Énergie Solaire Thermique :.....	16
1.2.1.1 Capteur Solaire Thermique :.....	17
1.3 Autres systèmes de chauffage d'eau (pour piscine) :.....	23
1.3.1 Pompe à chaleur électrique :.....	23
1.3.2 Pompe à chaleur à gaz :.....	24
1.3.3 Réchauffeur de piscine :.....	25
1.3.4 Échangeur de chaleur :.....	25
1.3.5 Énergie géothermique :.....	26
1.3.6 Biomasse :.....	26
1.3.7 Tapis solaire (moquette solaire) :.....	26
1.3.8 Couverture des piscines :.....	27
-.....	27
-Couverture piscine solaire (Bâche Solaire) :.....	27
1.4 Stockage d'énergie thermique :.....	28
1.4.1 Stockage par chaleur sensible :.....	29
1.4.2 Stockage par chaleur latente :.....	30
1.4.3 Stockage à long terme :.....	30
1.5 État de l'art.....	31
1.6 Objectifs de la recherche et Problématiques :.....	32
1.7 Conclusion.....	33
<b>Chapitre2 : Modélisation numérique du système de chauffage solaire de la piscine.....</b>	<b>34</b>
2.1 Introduction :.....	34
2.2 Présentation du système :.....	34
2.2.1 Hypothèses simplificatrices :.....	35
2.3 Bilan Thermique de la piscine :.....	36
2.3.1 Puissance utile des capteurs :.....	36
2.3.2 Gains solaires :.....	37
2.3.3 Pertes thermiques :.....	37
□ Pertes par évaporation.....	37
□ Pertes par convection.....	37
□ Pertes par rayonnement.....	38
□ Pertes par conduction.....	38
□ Pertes thermiques par renouvellement de l'eau de la piscine.....	38
□ Pertes thermiques par évaporation.....	39
□ Pertes thermiques surfacique.....	39
2.4 Calcul des émissions de CO <sub>2</sub> :.....	40
2.5 Calcul de rentabilité :.....	40
2.6 Dimensionnement :.....	41
2.7 Conclusion :.....	45

<b>Chapitre3</b>	<b>: Simulation du système de chauffage solaire de la piscine</b>	<b>46</b>
3.1	Introduction :	46
3.2	Présentation du logiciel TSOL :	46
3.2.1	Cas d'étude :	47
3.2.2	Paramètres de site :	47
3.2.2.1	Données météorologiques :	48
3.2.3	Description de l'installation :	49
3.2.4	Dimensions piscine :	50
3.3	Caractéristiques des composants :	51
3.3.1	Capteur solaire plan non vitré :	51
3.3.2	Réservoir de stockage.....	52
3.3.3	Circuit solaire.....	53
3.3.4	Profil de la consommation :	53
3.3.4.1	Consommation en eau chaude sanitaire :	53
3.3.4.2	Pour la piscine :	54
3.3.5	Système d'appoint (chaudière à gaz) :	56
3.3.6	Échangeur de chaleur :	56
3.4	Résultats simulation :	57
3.4.1	Évaluation des pertes thermiques du système :	57
3.4.1.1	Les pertes thermiques des capteurs solaires thermiques :	57
3.4.1.2	Les pertes thermiques au niveau du ballon de stockage :	58
3.4.1.3	Les pertes thermiques de la piscine :	59
3.4.2	Besoins en énergie et Bilan thermique :	59
3.4.2.1	besoins en eau chaude sanitaire :	59
3.4.2.2	Bilan thermique de la piscine.....	60
3.4.3	Températures :	60
3.4.4	Rendements et couvertures solaires .....	60
3.4.5	Couverture solaire.....	61
3.4.6	Énergies des chaudières et pompes :	62
3.4.7	Analyse écologique .....	62
3.4.8	Économies de gaz naturel .....	63
3.5	Interprétation des résultats :	63
3.5.1	Solutions et perspectives :	65
3.6	Conclusion :	65
<b>Conclusion Générale.....</b>		<b>67</b>
<b>Références.....</b>		<b>68</b>

## Listes des tableaux et figures :

<i>Figure 1: composants du rayonnement solaire</i> .....	15
<i>Figure 2: Horace Bénédic de Saussure</i> .....	15
<i>Figure 3: les types de l'énergie solaire</i> .....	16
<i>Figure 4: les types des capteurs solaires</i> .....	17
<i>Figure 5: les composants d'un capteur solaire plan vitré</i> .....	18
<i>Figure 6: bilan thermique du capteur solaire plan</i> .....	19
<i>Figure 7: les configurations de capteur solaire plan</i> .....	19
<i>Figure 8: capteur solaire plan non vitré</i> .....	20
<i>Figure 9: capteurs solaires plans non vitrés</i> .....	21
<i>Figure 10: capteur à tube sous vide</i> .....	21
<i>Figure 11: composants du caloduc</i> .....	22
<i>Figure 12: configurations de montages des capteurs solaires</i> .....	23
<i>Figure 13: composants pompe à chaleur électrique</i> .....	24
<i>Figure 14: pompe à chaleur à gaz</i> .....	24
<i>Figure 15: réchauffeur de piscine</i> .....	25
<i>Figure 16: échangeur thermique piscine</i> .....	25
<i>Figure 17: système géothermique</i> .....	26
<i>Figure 18: système chauffage d'eau par biomasse</i> .....	26
<i>Figure 19: moquette solaire</i> .....	27
<i>Figure 20: couverture piscine</i> .....	27
<i>Figure 21: Bâche solaire</i> .....	28
<i>Figure 22: types de stockage d'énergie thermique</i> .....	29
<i>Figure 23: les matériaux de stockage par chaleur sensible</i> .....	29
<i>Figure 24: les systèmes de stockage d'énergie thermique à long terme</i> .....	30
<i>Figure 25: système de chauffage solaire d'une piscine privée extérieure</i> .....	35
<i>Figure 26 : interface logiciel TSOL 2021</i> .....	47
<i>Figure 27: présentation de la zone d'étude</i> .....	48
<i>Figure 28: Rayonnement global (kWh/m<sup>2</sup>)</i> .....	48
<i>Figure 29: changement de température en (°C)</i> .....	48
<i>Figure 30: la piscine extérieure de la maison (en cours de construction)</i> .....	49
<i>Figure 31: visualisation de la maison + piscine en 3D sur AutoCad 2018</i> .....	49
<i>Figure 32: système de chauffage solaire ECS et piscine sur TSOL</i> .....	50
<i>Figure 33: Visualisation de la piscine étudiée en 3D sur AutoCad</i> .....	50
<i>Figure 34: dimensions de la piscine (échelle 1 : 10) cm</i> .....	50
<i>Figure 35: champ capteur TSOL</i> .....	51
<i>Figure 36: distance minimale entre les capteurs (calculés sur TSOL)</i> .....	52
<i>Figure 37: ballon de stockage</i> .....	52
<i>Figure 38: Tuyauterie</i> .....	53
<i>Figure 39: Période d'exploitation eau chaude sanitaire</i> .....	54
<i>Figure 40: taux d'utilisation d'eau chaude sanitaire d'une maison individuelle (pointe le soir)</i> .....	54

<i>Figure 41: données de la piscine .....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 42: paramètres de la piscine.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 43: donnée de la chaudière à gaz (standard).....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 44: visualisation du système de chauffage TSOL .....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 45: les pertes des capteurs solaires pendant l'année .....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 46: pertes th. du ballon de stockage.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 47: différentes pertes thermiques de la piscine pendant une année.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 48: les besoins et les températures de l'eau chaude sanitaire pendant l'année .....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 49: pertes th. totales, apports th. actifs et apports par rayonnement dans la piscine .....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 50: rendement du système de chauffage.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 51: rendement de champ des capteurs solaire.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 52: quantité d'émission de CO<sub>2</sub> évitée pendant l'année.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 53: Économie de gaz naturel.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 54: énergie solaire et consommation totale.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 1 pouvoir calorifique et facteur d'émission [43] .....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 2: données Méténorm du site étudié à Akbou .....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 1: données météorologiques de Meteonorm.....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 2: autres données sur le champ de capteurs solaires.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 3: Données de circuit de distribution.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 4: Données de consommation en eau chaude sanitaire .....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 5: données de l'échangeur de chaleur .....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 6: les températures moyennes du système.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 7: les taux de couvertures solaires .....</i>	<i>61</i>

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
$Q_u$	Puissance utile	W
$Q_{rad}$	Les gains solaires par rayonnement	W
$Q_p$	Pertes de chaleur	W
m	Masse d'eau	kg
$C_p$	La chaleur spécifique	J/kg.K
dT/dt	La température moyenne sur le temps	K/s
$\eta$	Rendement	%
$T_e$	Température de l'entrée	°C
$T_0$	Température ambiante	°C
I	Irradiation solaire	W/m <sup>2</sup>
$A_c$	Surface totale de captation	m <sup>2</sup>
$\alpha$	Coefficient d'absorption de l'eau	/
$A_s$	Surface de la piscine	m <sup>2</sup>
$Q_{evap}$	Pertes par évaporation	W
$Q_{conv}$	Pertes par convection	W
$Q_{ray}$	Pertes par rayonnement	W
$h_{evap}$	Coefficient d'évaporation	W/m <sup>2</sup> Pa
$P_{v,sat}$	La pression de vapeur saturante	Pa
$P_{v,amb}$	La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ambiant	Pa
$h_{ca}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W/ m <sup>2</sup> °C
V	Vitesse du vent	m/s
$\varepsilon$	Coefficient d'émissivité de l'eau	/
$\sigma$	Constante de Stephan-Boltzmann	W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
$T_{ciel}$	Température du ciel	K
$\dot{m}_{renouv}$	Taux de renouvellement d'eau	kg/s
$\dot{m}_{évap}$	Taux d'évaporation de l'eau	kg/s
$f_{renouv}$	Taux de remplacement d'eau	
$\lambda$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	KJ/kg
$\rho$	Masse volumique de l'eau	kg/m <sup>3</sup>
$V_p$	Volume de la piscine	m <sup>3</sup>
$Q_{pertes\ tot}$	Pertes thermiques totales	kW
$Q_{p,evap}$	Pertes thermiques par évaporation	kW
$T_r$	Température de l'eau désirée	°C
$T_i$	Température initiale de la piscine	°C
$\theta$	Durée de chauffage	h
$Q_{p,surf}$	Pertes thermiques surfaciques	kW

$T_p$	Température de la piscine	°C
$T_{amb}$	Température ambiante	°C
sf	Couverture solaire	%
$Q_{solaire}$	Énergie produite par le capteur	J
$Q_{appoint}$	Quantité de chaleur fournie par système d'appoint	J
$C_{invst}$	Coûts d'investissement	
$F_{annuel}$	Frais d'exploitation annuels	
ECS	Besoins en eau chaude sanitaire	kWh
$T_c$	La température désirée de l'eau chaude sanitaire	°C
PSD	La puissance solaire disponible	kWh
E	L'énergie solaire reçue	kWh/m <sup>2</sup> jour
$S_{capt\ eff}$	Surface de capteur solaire effective	m <sup>2</sup>
$S_{capt}$	Surface de captation	m <sup>2</sup>
$C_i$	Coefficient d'inclinaison des capteurs	
$C_0$	Coefficient d'orientation des capteurs	
$C_c$	Coefficient de correction du fluide caloporteur	
H-Gh	Rayonnement solaire global sur plan horizontal	kWh/m <sup>2</sup>
FF	Vitesse du vent	m/s
RH	Humidité relative	%
$\tau_c$	Taux de couverture solaire	%
$I_{solaire}$	Rayonnement solaire	W/ m <sup>2</sup>
ECET	Efficacité de la conversion énergétique thermique	%
$P_{th,utile}$	Puissance thermique utile	kW
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
$n_{occupants}$	Nombre d'occupants	
$S_{captation}$	Surface de captation	m <sup>2</sup>
N	Nombre de capteurs solaires	
S1	Surface d'un seul capteur	m <sup>2</sup>
$C_{stockage}$	Capacité de stockage d'eau chaude	L

## Résumé

تسخين المياه باستخدام الطاقة الشمسية يقدم حلاً مستداماً وصديقاً للبيئة. من خلال استغلال الإشعاع الشمسي لتسخين مياه الاستخدام الصحي وحوض السباحة، سيتم تقليل اعتمادنا على مصادر الطاقات غير المتجددة.

تركز هذه الدراسة على تقييم إمكانية دمج نظام تسخين شمسي في حوض سباحة خاص في الهواء الطلق بحجم 53 متر مكعب، والواقع في أقبو بولاية بجاية، الجزائر. لتحقيق هذا الهدف، قمنا بنمذجة التوازن الحراري وتقييم التصميم الرقمي لنظام تسخين المياه المستخدمة في المنزل وحوض السباحة. تم استخدام برنامج TSOL للمحاكاة الديناميكية باستخدام قاعدة بيانات من البرنامج Meteonorm.

أظهرت النتائج المحصلة أن النظام المعتمد، المكون من 9 ألواح شمسية ونظام دعم تسخين بالغاز الطبيعي وخزان بسعة 955 لتر، كان قادراً على تلبية جميع احتياجات أسرة مكونة من 4 أشخاص على مدار العام. بالإضافة إلى ذلك، لاحظنا أن هذا النظام قد أدى إلى تحقيق نسبة 39% تغطية شمسية لحوض السباحة. في معدل السنة الواحدة، تجاوزت كفاءة هذا النظام نسبة 30%، مما أدى إلى تأثير بيئي ذو أهمية كبيرة.

أظهر دمج نظام التدفئة الشمسية مع حوض السباحة جدواه وفعاليتها، مع نتائج واعدة فيما يتعلق بتلبية احتياجات المياه الساخنة وتأثير إيجابي على البيئة. تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية الطاقة الشمسية كحلاً مستداماً في مجال تسخين المياه.

Le chauffage d'eau par l'énergie solaire offre une solution durable et écologique. En utilisant le rayonnement solaire pour chauffer l'eau de sanitaire et de la piscine, notre dépendance aux énergies fossiles va être réduite.

Cette étude se concentre sur l'évaluation de la faisabilité et de la pertinence de l'intégration d'un système de chauffage solaire dans une piscine privée extérieure d'un volume de 53 m<sup>3</sup>, située à Akbou dans la Wilaya de Bejaia en Algérie. Pour atteindre cet objectif, nous avons entrepris la modélisation d'un bilan thermique ainsi que la simulation dynamique du système de chauffage pour l'eau sanitaire et la piscine. La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel TSOL, en utilisant les données météorologiques fournies par le logiciel Meteonorm. Les résultats obtenus ont démontré que le système mis en place, composé de 9 capteurs solaires, d'un dispositif de chauffage d'appoint au gaz naturel et d'un réservoir d'une capacité de 955 litres, a été en mesure de répondre à l'intégralité des besoins en eau chaude sanitaire d'un foyer de 4 personnes tout au long de l'année. De plus, il a été constaté que ce système a permis d'atteindre un taux de couverture solaire de 39% pour la piscine. En moyenne annuelle, le rendement de ce système a atteint 30%, engendrant ainsi un impact environnemental significatif. L'intégration d'un système de chauffage solaire dans une piscine privée extérieure a démontré sa viabilité et son efficacité, avec des résultats prometteurs en termes de couverture des besoins en eau chaude et d'impact écologique positif. Cette étude souligne ainsi l'importance de l'énergie solaire comme solution durable dans le domaine du chauffage de l'eau.

---

Solar water heating provides a sustainable and eco-friendly solution. solar radiation can be used to heat domestic and pool water so that our dependence on fossil fuels will be reduced.

This study focuses on investigating the possibility and feasibility of integrating a solar heating system into an outdoor private swimming pool with a volume of  $53\text{m}^3$ , located in Akbou, Bejaia province (Algeria). To achieve this, a heat balance model was used, and a numerical sizing of a hot water sanitary system and pool heating system was evaluated. The TSOL software was then used for dynamic simulation, utilizing meteorological data from the Meteonorm software database. The results demonstrated that a system consisting of 9 solar collectors, a natural gas auxiliary heating system, and a 955-liter tank could meet the entire hot water demand for a house of a family of 4 throughout the year. Additionally, it provided a solar fraction rate of 39% for the pool. Therefore, this system offers an average of 30% annual efficiency rate with a significant ecological impact.

The successful integration of a solar heating system into an outdoor private pool has showcased its viability and effectiveness, with promising outcomes in terms of meeting hot water needs and generating a positive ecological impact. This study underscores the importance of solar energy as a sustainable solution in the field of water heating.

**Mots clés :** chauffage solaire, piscine, TSOL, simulation dynamique, chauffage piscine.

---

# Introduction Générale

Toute action humaine dépend de l'énergie, que ce soit pour se déplacer, pour manger, pour le chauffage et rafraîchissement, pour la fabrication des biens et simplement pour vivre. Cette augmentation de consommation d'énergie et tous les efforts fournis pour minimiser la pollution et l'utilisation des énergies fossiles contribuent à stimuler la recherche des solutions alternatives et durables.

Le monde aujourd'hui est au milieu d'une véritable crise énergétique avec des impacts qui vont être ressentis pour des années. L'invasion de l'Ukraine par la Russie en février a eu des conséquences considérables sur le système énergétique mondial, perturbant les systèmes d'offre et demande et rompant les relations commerciales entre les pays. (1) Une directive du gouvernement fédéral sur les économies d'énergie en Allemagne oblige les gens de ne pas chauffer leurs piscines privées par électricité ou gaz à partir du 1er septembre 2022 jusqu'au 15 avril 2023 après que la Russie a arrêté l'exportation du gaz naturel, ce qui implique l'exigence de retourner vers les énergies renouvelables.(2)

Les énergies renouvelables sont devenues les sources les plus importantes pour couvrir nos besoins quotidiens. L'énergie solaire est utilisée dans une très large gamme d'applications y compris la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage d'habitat et des piscines, la production de l'électricité... Les piscines privées permettent non seulement un confort pendant l'été mais aussi de profiter d'un espace de détente privé sans limite. L'énergie solaire thermique a été choisie pour chauffer les piscines en raison de ses avantages technologiques, économiques et environnementaux ainsi que son abondance à la surface de la planète, on voit donc une augmentation de façon exponentielle dans l'utilisation de chauffage solaire des piscines depuis ces dernières années. (3)

L'Algérie avec une surface de 2381741 km<sup>2</sup> dont 86% est occupé par le Sahara, ainsi qu'une durée d'ensoleillement moyenne qui atteint 3000 heures par an, elle dispose d'un des plus grands gisements solaires au monde avec presque 2149 kWh/m<sup>2</sup> du rayonnement global sur un plan horizontal,(4) le motif pour lequel on doit profiter davantage de cette source naturelle afin de réduire notre dépendance aux énergies fossiles.

Les piscines extérieures sont généralement utilisées pendant la saison estivale lorsque les températures sont élevées et le rayonnement solaire est intense. Dans ces cas, il est possible d'utiliser l'énergie solaire thermique pour compenser les pertes de chaleur et maintenir la température de l'eau.

Le but de ce travail est de modéliser un système de chauffage solaire pour une piscine extérieure privée d'un volume de 53m<sup>3</sup> dans la région d'Akbou wilaya de Bejaïa. Après le premier chapitre qui est consacré à l'état de l'art et quelques

---

généralités sur l'énergie solaire et les système de chauffage d'eau, vient ensuite le dimensionnement numérique des besoins de chauffage en eau chaude sanitaire et de la surface de captation pour la piscine cités dans le deuxième chapitre, et on termine par un dernier chapitre qui comporte la simulation dynamique exécutée à l'aide du logiciel TSOL et quelques interprétations sur les résultats avec des solutions et perspectives proposés.

# Chapitre 1 : État de l'art et problématique

## 1.1 Introduction :

L'urgence de préserver notre environnement est renforcée par les diverses catastrophes environnementales générées par les sources traditionnelles. L'incendie Jharia 1916, les marées noires : la catastrophe de Tchernobyl en avril 1986 et dernièrement, en 2014 l'explosion d'une mine de charbon en Soma à Manisa, Turquie qui a causé au moins 301 morts (5) et plusieurs déversements de pétrole dans le monde, font apparaître ces énergies fossiles non seulement désastreuses pour la planète étant donné leur utilisation, mais également lors de leur production ainsi que leur transport.

Rappelons-nous des différents sommets de la terre, de 1972 à Stockholm, en passant par Kyoto en 1997, Rio en 1992 et à nouveau en 2012 et enfin COP26 en 2021. Dans notre quotidien, on voit : des véhicules neufs électriques, campagnes de sensibilisation pour le tri et la gestion des déchets, une toute panoplie d'aides et de crédits d'impôts pour les économies d'énergie : prêts à taux zéro, classes énergétiques (A, A+), haute qualité environnementale pour les constructions neuves (HQE), bilan et taxe carbone, notions de négaWatts ... Jamais sans doute dans son histoire, l'homme n'a ressenti aussi fortement le besoin impératif de changer ses habitudes du passé.(6)

Les énergies renouvelables représentent une solution à la crise énergétique, elles sont quasiment inépuisables et gratuites, quoique variables selon les latitudes et saisons. Elles sont non polluantes dans leur exploitation et généralement présentes en tous points du globe. Ces énergies peuvent prendre diverses formes et possèdent un très fort potentiel. Elles émanent du soleil, de l'eau, du vent, de la géothermie ou encore de la biomasse.

Cependant ces énergies sont souvent intermittentes, donc nécessitent un stockage qui peut s'opérer de diverses manières selon les besoins d'utilisation et moyens disponibles.

Ce premier chapitre a pour vocation de présenter quelques généralités sur l'énergie solaire thermique et les systèmes de chauffage des piscines qui existent, l'état de l'art sur le chauffage solaire de piscine et du système SPTES, les principaux problèmes et objectifs.

## 1.2 Énergie Solaire :

Le soleil, source de lumière et de chaleur, de puissance et de vie.

L'énergie solaire nous parvient sous forme de rayonnement électromagnétique d'un spectre qui s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible dont les infrarouges sont les vecteurs essentiels de l'énergie thermique et ils couvrent environ 45% de l'ensemble.

La lumière atteint la surface de la terre soit directement ou indirectement. Le rayonnement indirect est appelé « diffus » et signifie les rayons interceptés par des nuages, des molécules d'eau ou gaz atmosphériques. Tandis que, la fraction de ces deux rayons (direct et diffus) qui sera réfléchiée par une surface de la terre représente « l'albédo ».

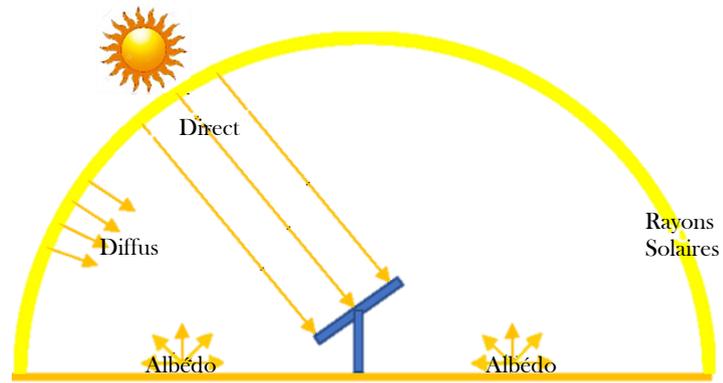


Figure 1: composants du rayonnement solaire

La première application de l'énergie solaire dans le domaine de construction bioclimatique était par le philosophe Socrate en (470-399 avant J.-C.) qui a enseigné l'orientation des maisons vers le Sud pour profiter d'une bonne gestion des zones d'ombre en été et d'une pénétration solaire plus profonde en hiver. Arriver ensuite, Archimède (287-212 avant J.-C.) qui a réussi à concentrer les rayons solaires à l'aide de miroirs géants. Puis en 1767, Horace Bénédicte de Saussure a inventé la « boîte chaude » qui s'intéresse sur l'effet de serre au moyen de vitrages superposés, de ce fait son invention est considérée comme le précurseur du capteur solaire.(6)



Figure 2: HORACE Bénédicte de Saussure inventeur de héliothermomètre

Il existe quatre types de l'énergie solaire : énergie photovoltaïque PV, l'énergie thermique TH, l'énergie aérovoltaïque et l'énergie solaire thermodynamique (système solaire concentré) CSP.

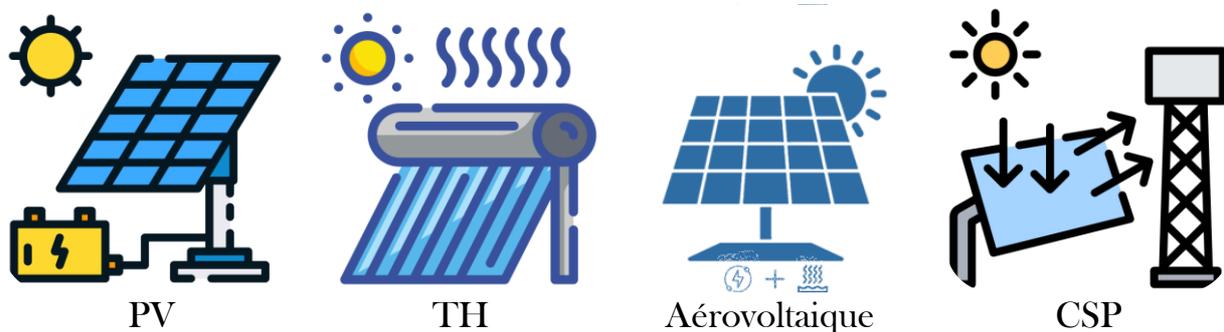


Figure 3: les types de l'énergie solaire

### 1.2.1 Énergie Solaire Thermique :

Le solaire thermique consiste à produire de la chaleur à partir des rayons du soleil d'une manière directe. Il s'agit de dispositifs opérant à basse température (moins de 100 °C) pour les usages de l'habitat, du secteur tertiaire (eau chaude sanitaire et chauffage) et quelques besoins de l'industrie.(7)

On distingue deux types de technologies de l'exploitation d'énergie solaire thermique :

- **La technologie solaire « active » :** désigne l'utilisation des capteurs solaires thermiques
- **La technologie solaire « passive » :** ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi des matériaux de construction et isolation.(8)

### 1.2.1.1 Capteur Solaire Thermique :

Joseph Fourier en 1824 a repris l'idée de H. B. de Saussure à un plus grand échelle intégrant la terre, l'atmosphère et les océans ainsi que des formules plus précises qu'on devine d'après les notions fondamentales de l'effet de serre.(6)

Un capteur solaire thermique est un échangeur de chaleur qui convertit l'énergie du rayonnement solaire incident en une énergie thermique où ces rayons absorbés par une partie du capteur qui est l'absorbeur, vont être transformés en chaleur et transférés ensuite à un fluide caloporteur qui peut être de l'air, de l'eau ou de l'huile.

On distingue plusieurs types de capteurs qui peuvent être utilisés selon le lieu, les conditions météorologiques, les besoins et les températures de fonctionnement :

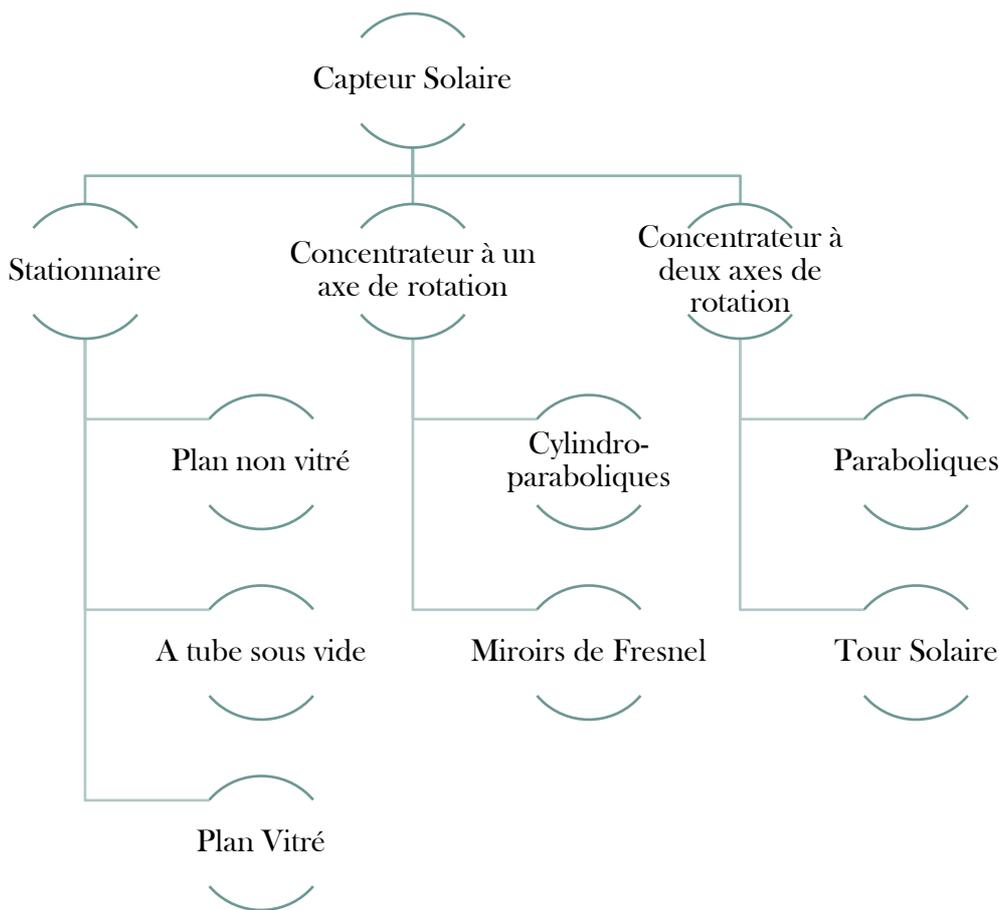


Figure 4: les types des capteurs solaires

### 1.2.1.11 Capteur Solaire Plan

Un capteur solaire plan est le plus commun des capteurs, utilisé dans des systèmes de chauffage d'eau et il est souvent trouvé dans les bâtiments.

Il se compose d'une plaque colorée en noir qui représente l'absorbeur et qui doit emmagasiner la plus grande partie du rayonnement solaire pour la convertir en chaleur avec le moins de pertes possible. L'absorbeur idéal serait ce qu'on appelle un corps noir qui récolte toute l'énergie électromagnétique reçue par lui tout en étant capable de réémettre la totalité du flux. Mais en réalité l'absorbeur parfait n'existe pas, on fait de nos jours de plus en plus souvent appel à des surfaces de captage dites 'sélectives' qui représentent un coefficient d'absorption ' $\alpha$ ' élevé et un coefficient d'émissivité ' $\varepsilon$ ' le plus faible possible. De telles surfaces offrent des bons rendements, impliquant par contre un coût de fabrication très important. Les métaux sous forme de feuilles minces et légères « aluminium, zinc ou acier » sont souvent les plus utilisés comme absorbeur. Par contre, la peinture aérosol noire est plus économique, mais elle est peu recommandée quant aux pertes radiatives. Il existe d'autres matériaux plus performants tel que le 'Thermalox', un produit à base de silicone, sous forme de spray et résistant aux hautes températures. Noircir ou patiner les métaux exige l'utilisation des produits chimiques dangereux et des procédures complexes. Néanmoins, les feuilles d'ardoises qui ont une couleur naturellement sombre, représentent un choix raisonnable malgré sa valeur d'émissivité élevée.

L'énergie solaire va être sous forme de rayonnement visible en traversant le vitrage, donc ce dernier nécessite d'être transparent pour permettre aux rayons d'atteindre l'absorbeur. Le vitrage du capteur consiste également à être opaque aux rayons infrarouges qui se sont produits par l'échauffement de l'absorbeur noir. C'est le phénomène de l'effet de serre qui permet de piéger la chaleur et d'obtenir des températures élevées, dont le fluide circulant peut chauffer l'habitat par l'intermédiaire d'un plancher chauffant adapté (PSD) ou bien réchauffer indirectement l'eau sanitaire. Un vitrage transparent laisse passer une grande partie de la lumière sur sa surface exposée au soleil, on parle donc d'une transmission lumineuse ou TL. Dans le cas des vitrages spéciaux, à faible teneur en oxyde de

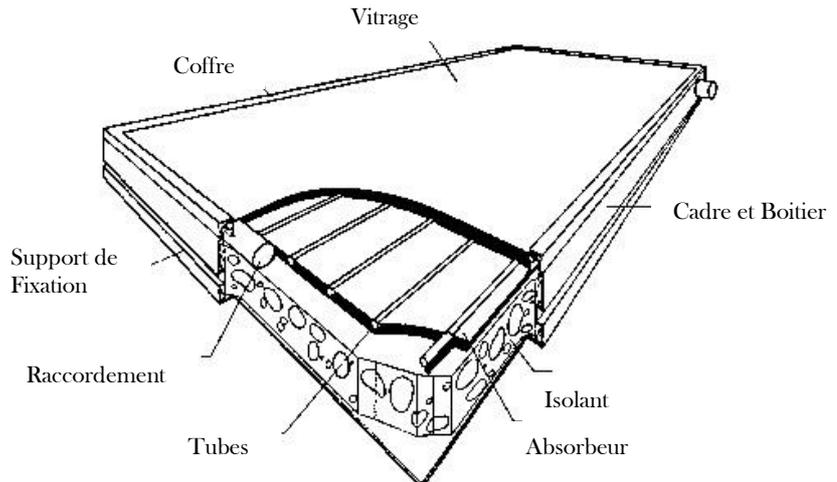


Figure 5: les composants d'un capteur solaire plan vitré

fer, on peut estimer la récupération de 99% de la lumière reçue (selon les fournisseurs).

Un bilan thermique simplifié du capteur plan laisse entrevoir les pertes thermiques. Tandis que, une partie d'énergie réellement captée par l'absorbeur permette de donner une idée du rendement de ce système. (6)

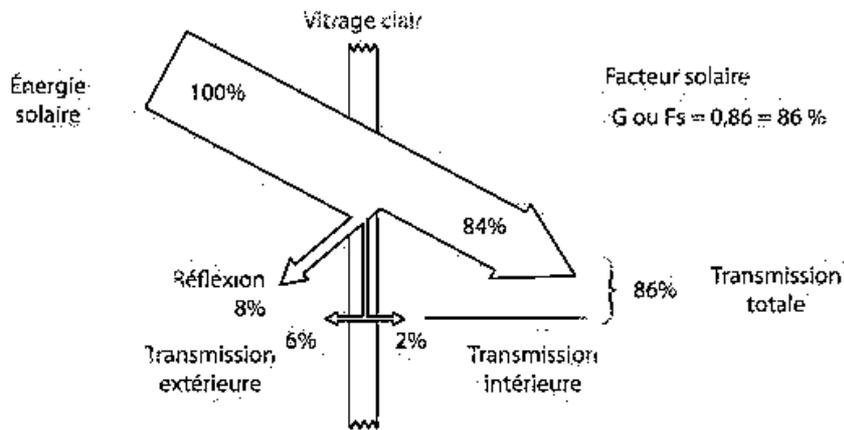


Figure 6: bilan thermique du capteur solaire plan

Le fluide caloporteur qui peut être de l'eau ou de l'air dépendant des besoins, va circuler dans le capteur à travers des tubes collés à la plaque absorbante. Il est très important d'avoir un bon échange thermique entre ces tubes et l'absorbeur pour assurer le chauffage de fluide sans avoir des pertes majeures. Les tubes du fluide sont souvent en cuivre, aluminium ou en acier inoxydable, munis d'ailettes et peuvent avoir différentes configurations : en Serpentin, en Échelle, ... dans le but d'augmenter la surface d'échange thermique.

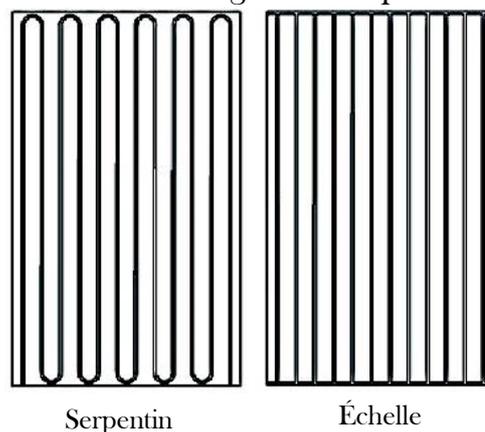


Figure 7: les configurations de capteur solaire plan

Le capteur solaire plan doit évidemment être disposé d'une manière à capter le maximum de rayonnement solaire. Globalement, il doit être orienter vers le sud et tenir compte de l'inclinaison  $\beta'$ , qui est l'angle que forme le soleil avec le plan

## Chapitre 1

de l'équateur terrestre. Cet angle varie selon la latitude et la saison du lieu de l'installation.

En hiver :  $\beta = \text{latitude} + 10^\circ \text{ à } 15^\circ$

En été :  $\beta = \text{latitude} - 10^\circ \text{ à } 15^\circ$

Il faut aussi éviter le maximum d'ombrage sur les capteurs et de préférence choisir des zones exposées.

Pour le capteur solaire plan non vitré qui ne dispose ni de vitrage ni d'isolation ;

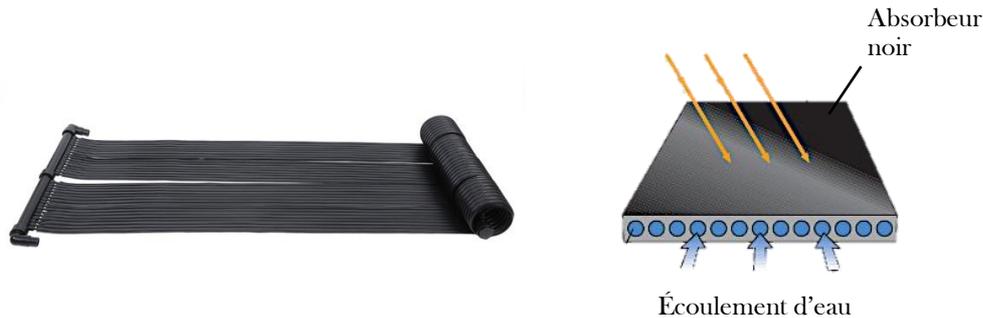


Figure 8: capteur solaire plan non vitré

C'est le capteur à le plus de déperditions thermiques. Mais il peut cependant être très efficace pour les usages de chauffage d'eau à très basse température ( $30^\circ\text{C}$ ). C'est ce qu'une étude en 1984 de Guarracino et Al a démontrée, dont leurs résultats expérimentaux ont été traduits par une relation reliant le rendement instantané à la vitesse du vent et à la couverture nuageuse. Ils ont déduit alors que ce type de capteur sans vitrage ou « capteur moquette » est plus adapté pour le chauffage de l'eau de piscine.(9)

Ce capteur est en matière plastique souple et composé d'un absorbeur que ce soit : deux fines plaques en acier inoxydable ou bien une plaque en matière plastique, caoutchouc ou en polypropylène. Des tubes cylindriques ou ovalisés porteurs de fluide sont collés sur cet absorbeur, ils sont résistants aux rayonnements ultraviolets et aux variations de température.

Le capteur solaire non vitré a une configuration flexible de sorte qu'il peut être placé sur n'importe quelle surface. Sa méthode d'intégration dépend du milieu et des besoins, il peut être posé par-dessus de la toiture, intégré en toiture ou posé sur le sol. (10)



Figure 9: capteurs solaires plans non vitrés

### 1.2.1.12 Capteur A Tube Sous Vide :

En 1988, Albert W. Watkins et Ivan W. Watkins, les inventeurs du capteur solaire à tube sous vide ont utilisé deux tubes concentriques séparés par un vide où la face du tube interne est recouverte d'une surface sélective et le tube externe est en verre trempé (exemple Pyrex). Ce vide est constitué d'un matériau semi-rigide plissé en accordéon (cuivre) qui est relié au tube interne du capteur. Ce matériau est ensuite fusionné à une entretoise thermiquement isolée et étanche à l'air qui est collée au tube externe. (11)



Figure 10: capteur à tube sous vide

Le capteur solaire à tube sous vide est constitué d'un tube cylindrique qui possède une surface sélective entourée par un vide qui sert à minimiser les pertes thermiques. Cette surface sélective à faible émissivité va absorber les rayonnements solaires et transférer la chaleur à un caloduc 'Heat Pipe' ou à un fluide (eau) circulant dans les tubes.

Le caloduc est un tube sous vide avec un taux de transfert thermique 100 fois plus grand que celui de l'argent et il est composé de cuivre sans oxygène TU1. (12)

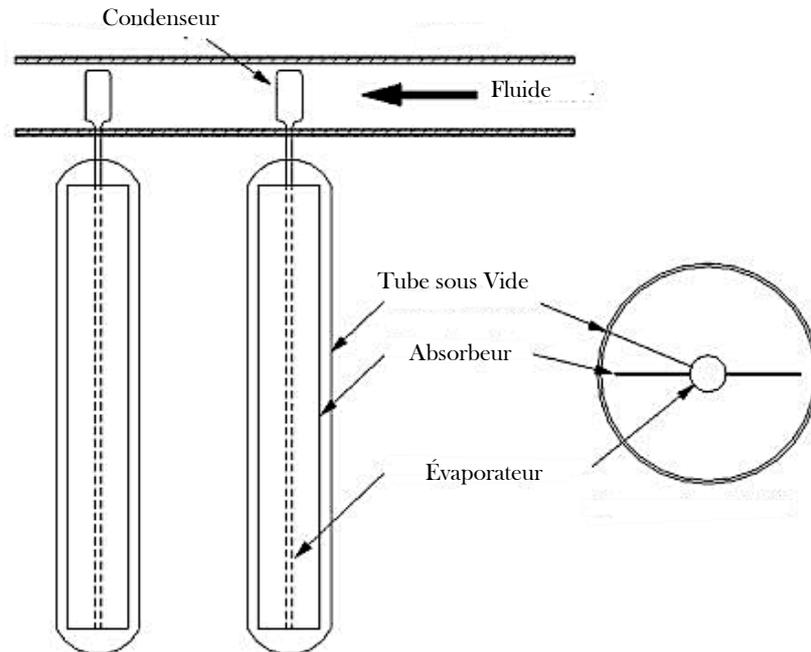


Figure 11: composants du caloduc

- **Fixation des capteurs :**

Avant l'installation il faut bien mettre en considération les montages des capteurs en tenant compte les forces exercées par le vent qui peuvent causer des érosions et dommages, donc il est nécessaire d'assurer que l'installation est conçue pour bien résister.(13)

- **Montage :**

Les capteurs solaires thermiques peuvent être connectés en parallèle, en série, en cascade ou un mixte parallèle/série pour former un champ de capteurs. La configuration optimale dépend de la géothermie, de la surface disponible et les caractéristiques hydrauliques des capteurs (débit de fluide, résistance à la pression, raccords hydrauliques...).

En général, les capteurs solaires thermiques doivent être connectés en parallèle pour éviter l'augmentation de l'énergie de pompe et d'avoir des températures de sortie moins élevées, il permet aussi d'augmenter les températures d'une manière simultanée et indépendante (si un des capteurs présente un problème, le champ va continuer à fonctionner normalement).

D'un autre côté, le montage en série permet d'avoir des températures plus élevées mais risque d'être affecter par un petit problème d'un seul capteur.(13)

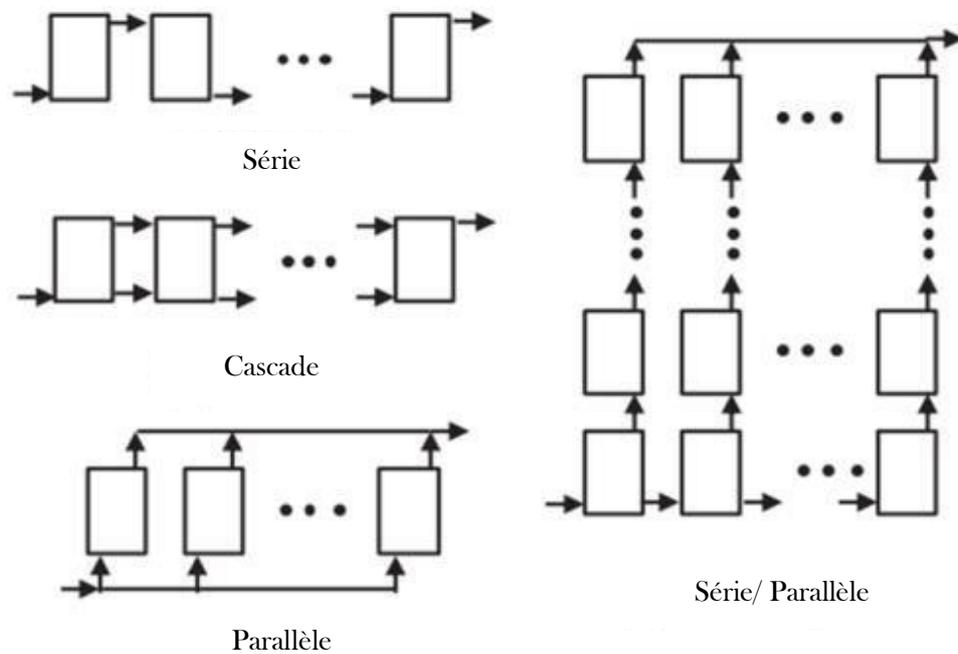


Figure 12: configurations de montages des capteurs solaires

### 1.3 Autres systèmes de chauffage d'eau (pour piscine) :

#### 1.3.1 Pompe à chaleur électrique :

Elle utilise l'électricité pour transférer la chaleur d'un endroit vers un autre et non pas la générer. Une pompe à chaleur à air autonome récupère la chaleur de l'air ambiant et la transfère en une température plus élevée pour chauffer l'eau dans un réservoir de stockage.

Les pompes à chaleur doivent être installés dans des endroits à une plage de température de 4,4 à 32,2 °C durant l'année et au moins 28,3 m<sup>3</sup> d'espace d'air autour de la pompe. L'air passant au-dessus de l'évaporateur peut être évacué dans la pièce ou à l'extérieur.(14)

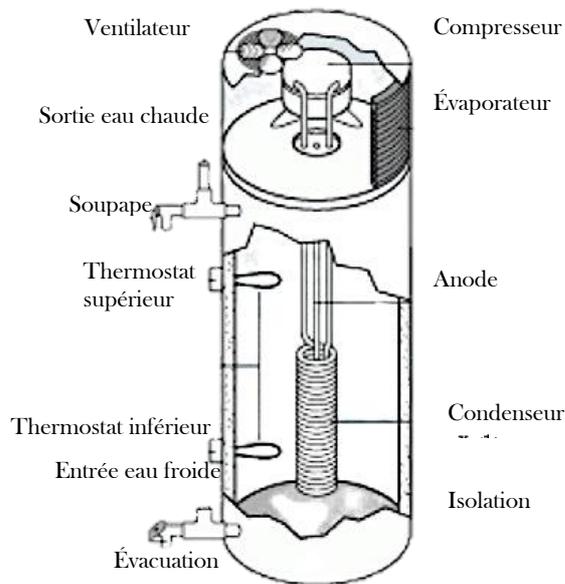


Figure 13: composants pompe à chaleur électrique

### 1.3.2 Pompe à chaleur à gaz :

Une pompe à chaleur à gaz est une pompe à chaleur dont le compresseur est alimenté par la puissance mécanique d'un moteur thermique qui fonctionne au gaz naturel. La différence entre ce composant et la pompe à chaleur électrique est que la consommation d'énergie calculée est traduite en consommation de gaz naturel.(15)

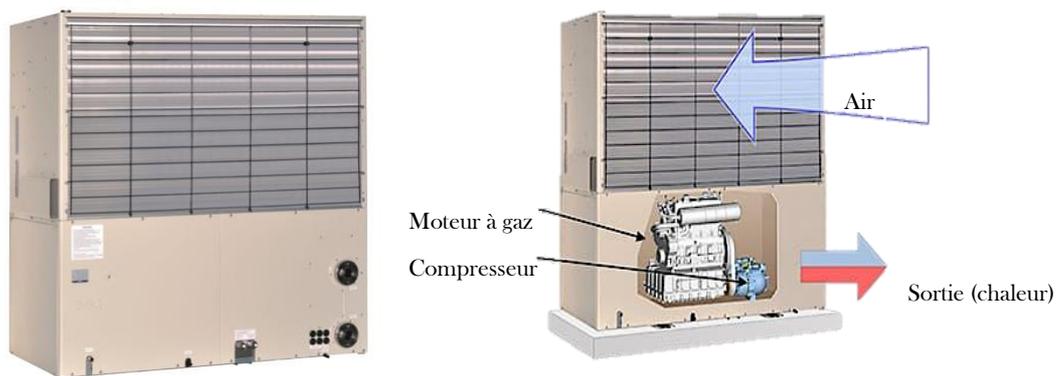


Figure 14: pompe à chaleur à gaz

### 1.3.3 Réchauffeur de piscine :

Il s'agit d'un système d'appoint qui ne peut pas marcher en permanence. Il se compose d'un appareil doté d'une résistance alimentée par l'installation électrique domestique et il se règle à l'aide d'un thermostat.

C'est un système peu performant et peut entraîner des factures d'énergie élevées, c'est pourquoi il est plutôt utilisé pour le chauffage des petites piscines, des piscines hors-sol ou dans les régions chaudes.(16)

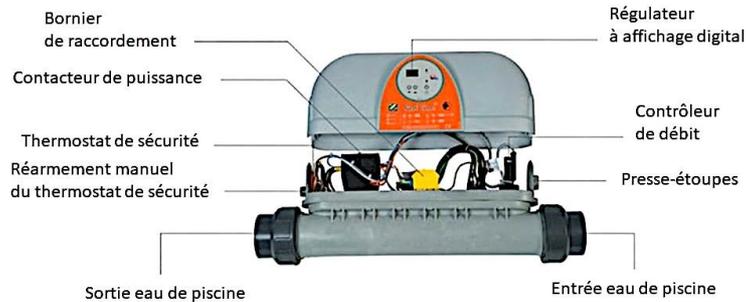


Figure 15: réchauffeur de piscine

### 1.3.4 Échangeur de chaleur :

Un échangeur thermique piscine est un échangeur type eau / eau qui consiste d'une boîte installée directement sur le circuit d'eau de la chaudière domestique.

Il permet de chauffer la piscine rapidement à condition que la piscine et le bâtiment ne sont pas très éloignés l'un de l'autre pour éviter la réduction de son efficacité. De plus, ce système est destiné pour le chauffage dans le cadre d'un projet de construction de l'habitation (compliqué à installer sur une piscine ancienne).

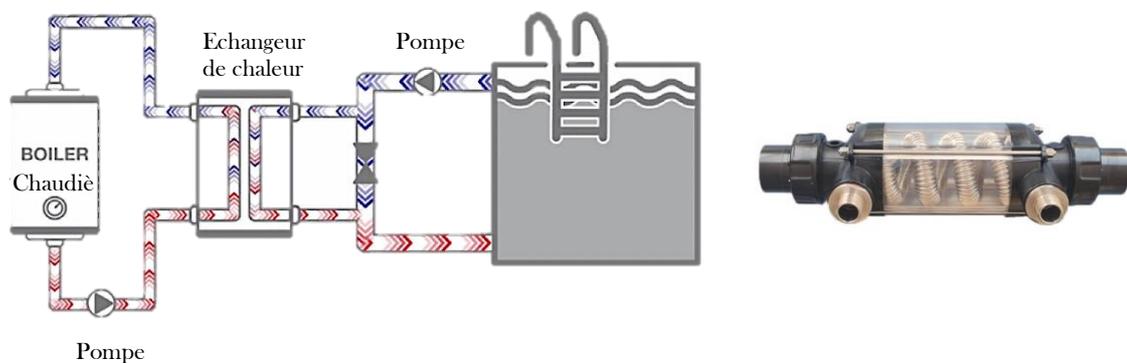


Figure 16: échangeur thermique piscine

### 1.3.5 Énergie géothermique :

Il s'agit d'un système qui récupère la chaleur du sol à une profondeur de 4 mètres. Cette technologie nous permet de maintenir la température de la piscine entre 22°C et 27°C, c'est un système faisable techniquement mais non viable économiquement. (17)

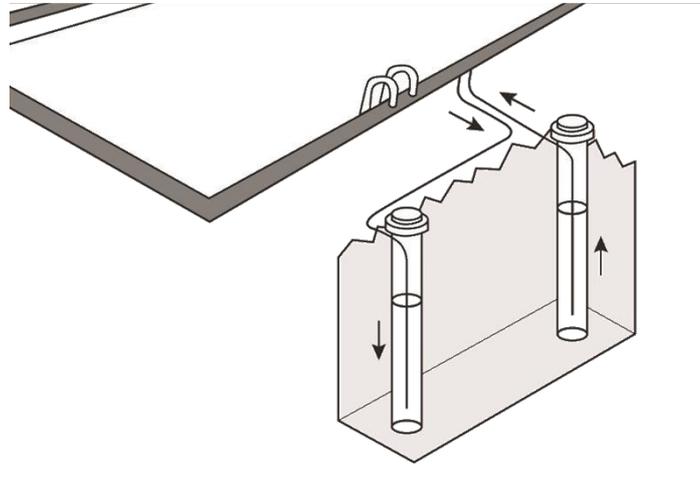


Figure 17: système géothermique

### 1.3.6 Biomasse :

La biomasse représente l'utilisation des résidus organiques pour produire la chaleur. Cette matière organique sera intégrée dans un brûleur (chambre de combustion ou chaudière) où l'air est amené au moyen d'un ventilateur. La chaleur résultante sera donc transférée à la piscine à l'aide d'un échangeur thermique. C'est une technologie qui peut être utilisée comme un système d'appoint pour le chauffage de la piscine par un capteur solaire et cela dans le but d'avoir des résultats plus économiques. (17)

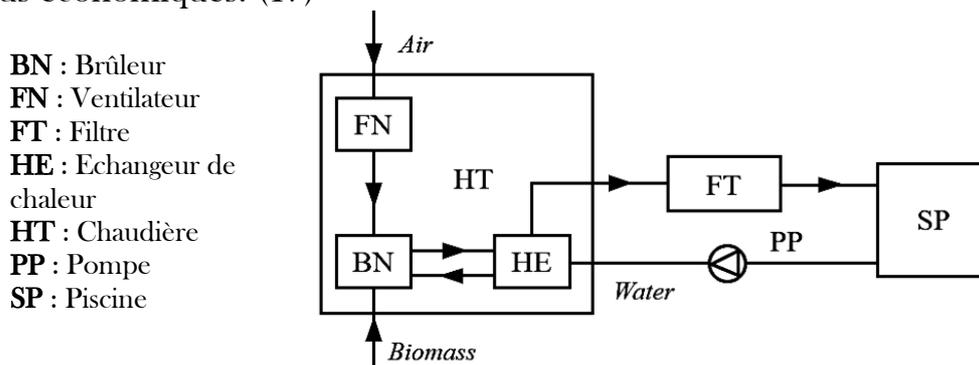


Figure 18: système chauffage d'eau par biomasse

### 1.3.7 Tapis solaire (moquette solaire) :

Il se compose de tuyaux souples noirs assemblés en formant un tapis de faible épaisseur. Il se place près de la piscine et il est branché à une pompe de filtration qui va aspirer l'eau de la piscine, la filtrer et la faire passer ensuite par le tapis solaire pour récupérer la chaleur du rayonnement solaire emmagasinée.

## Chapitre 1

Ce système est efficace seulement dans les régions à de longues durées d'ensoleillement. Son efficacité dépend aussi de sa surface, un mètre carré de tapis permet de chauffer environ cinq mètres cube d'eau. Ce qui veut dire que le tapis solaire est plus adapté pour les piscines de petites dimensions.(18)



Figure 19:moquette solaire

### ***1.3.8 Couverture des piscines :***

Une couverture en plastique placée dans la piscine permet d'augmenter la température de l'eau en réduisant les pertes thermiques tout en laissant passer le rayonnement solaire incident. Cette méthode a été suggérée la première fois par Brooks en 1955 (19)

Ces couvertures peuvent être fabriquées depuis plusieurs matériaux, souvent en PVC, en bâche enduite ou en vinyle. Leur rôle est de protéger la surface de la piscine contre des facteurs environnementaux externes tels que les insectes. Il existe plusieurs types de couvertures pour piscine :

***-Couverture piscine :*** permet de protéger la surface et de réduire le cout de nettoyage mais elle n'est pas assez rigide et nécessite un nettoyage avant l'utilisation. (20)



Figure 20: couverture piscine

***-Couverture piscine solaire (Bâche Solaire) :*** en plus de protéger la piscine des impuretés, elle permet aussi d'augmenter la température de l'eau de la piscine jusqu'à 8°C en captant la chaleur du soleil tout en réduisant

l'évaporation. Elle est légère et facile à utiliser, mais aussi facile à se déchirer.(20)



Figure 21: Bâche solaire

### 1.4 Stockage d'énergie thermique :

Avant le XXe siècle, les gens utilisaient des processus de stockage thermique et de refroidissement tels que le stockage d'objets et de matériaux dans des cavernes en montagnes pour qu'ils restent frais en été et chaud en hiver.(21)

Depuis 2020, la population mondiale a augmenté par 0.8% par an et peut atteindre environ 8.5 milliards en 2030 (22), ce qui est un changement énorme d'où les besoins de consommation d'énergie vont être augmentées également. C'est de là que vient le rôle des systèmes de stockage d'énergie thermique qui servent à éviter le décalage entre la production et consommation de l'énergie. Ces systèmes permettent d'utiliser l'énergie stockée dans n'importe quel moment suivant trois étapes : charge, stockage et décharge.

Les concepts de stockage se présentent sous deux systèmes : système de stockage actif et passif. Un système de stockage actif est défini par un transfert de chaleur par convection forcée dans le matériau, tandis que le système de stockage passif qui peut être direct où le fluide caloporteur représente un moyen de stockage, ou bien indirect lorsqu'on utilise un autre moyen de stockage.

En utilisant un système de stockage d'énergie thermique, on aura pour avantages :

- ♦ Meilleure économie (réduction du coût d'investissement et d'exploitation) ;
- ♦ Meilleure efficacité ;
- ♦ Températures relativement constantes durant la charge et décharge ;
- ♦ Moins de pollution (réduction d'émissions du gaz CO<sub>2</sub>) ;
- ♦ Meilleure performance et fiabilité. (23)

Il existe plusieurs types de stockage d'énergie thermique qui se différencient selon les températures, la durée de stockage et matériaux utilisés :

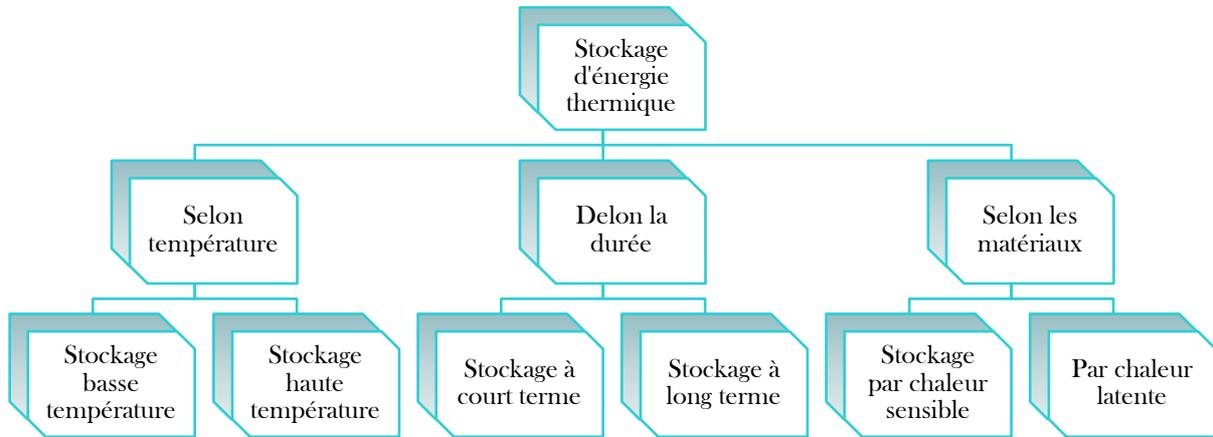


Figure 22: types de stockage d'énergie thermique

**1.4.1 *Stockage par chaleur sensible :***

La chaleur est stockée par le changement de température seulement. Ce système est basé sur l'absorption de la chaleur par les matériaux de stockage en utilisant les phénomènes de transfert de chaleur : conduction, convection ou radiation. Il se compose principalement d'un matériau de stockage, cuve de stockage avec isolation thermique et des dispositifs d'entrée et de sortie. Les matériaux utilisés peuvent être liquides ou solides :

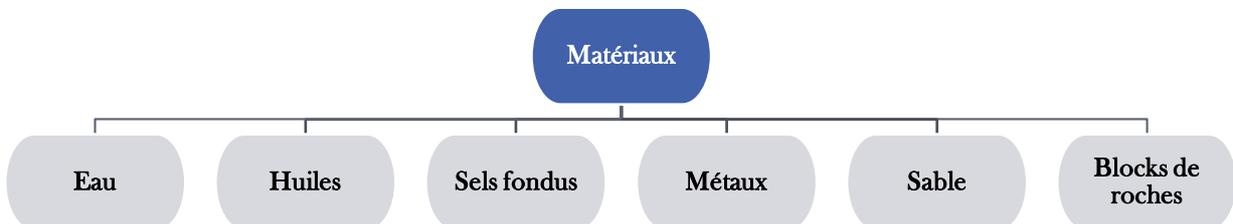


Figure 23: les matériaux de stockage par chaleur sensible

**1.4.2 Stockage par chaleur latente :**

L'énergie thermique est stockée en utilisant le changement d'état des matériaux. Ce système représente le passage de l'état solide à l'état liquide sous effet de chaleur où l'énergie est absorbée lors de la fusion et estimée lors de la solidification.

Les matériaux de changement de phase peuvent être deviser en matériaux organiques (paraffines, acide gras...), inorganiques (sels, métaux, hydrates de sel...) et eutectiques (mélange des matériaux organiques et inorganiques).

On choisit parmi ces matériaux à utiliser selon des propriétés thermodynamiques tels que la température de fusion, une grande chaleur latente, conductivité thermique élevée et faible changement de volume et d'autres propriétés chimiques dont les matériaux doivent être non toxiques, non corrosifs, non inflammable...

**1.4.3 Stockage à long terme :**

Le stockage d'énergie saisonnier ou à long terme utilise la différence de température entre l'été et l'hiver afin de répondre aux demandes de refroidissement et de chauffage durant les deux saisons. Cette technologie devient utilisable dans des centrales de chauffage solaire à grande échelle et elle permet également de réduire la surface de captation solaire. Elle nécessite un grand volume de stockage qui implique aussi une grande énergie stockée.

L'objectif de stockage d'énergie à long terme est d'assurer le chauffage et le refroidissement durant toute l'année.

Les réservoirs de stockage sont la plupart du temps placés au sous-sol ou bien près de la surface. (24)

Il existe plusieurs systèmes de stockage saisonnier de chaud/froid tels que :

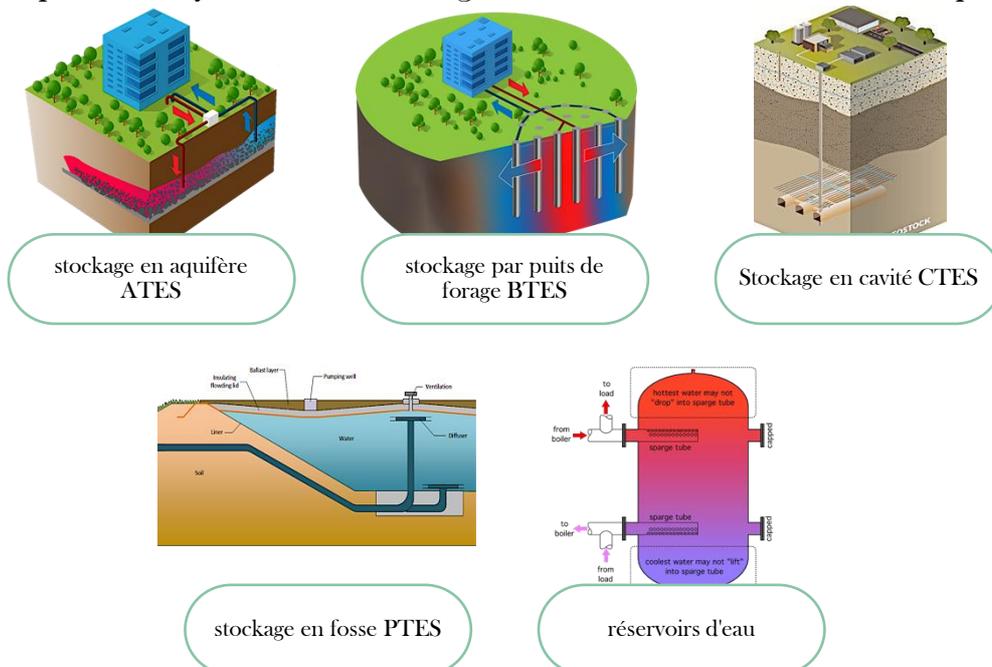


Figure 24: les systèmes de stockage d'énergie thermique à long terme

## 1.5 État de l'art

En 1981, D. GOVAER et Y. ZARM ont développé un modèle analytique dans l'article « Analytical evaluation of direct solar heating of swimming pools » permettant d'estimer les performances thermiques à long terme des piscines ouvertes et fermées. Ce modèle a ouvert la voie au calcul de la charge de chauffage saisonnières des piscines. 25

Cinq ans plus tard, en 1986, WAEL Zein a présenté dans l'article « étude d'un capteur absorbant l'énergie solaire par le fluide caloporteur : application au chauffage des piscines de plein-air » une modélisation des transferts radiatifs spécifiquement pour les composants des capteurs solaires. Sa résolution des équations a permis d'obtenir des lois d'évolution des performances de ces capteurs en tenant compte des conditions radiatives et météorologiques du site. 26

En 1992, ALKHAMIS A. et SHERIF S. ont étudié la faisabilité d'un système de chauffage solaire pour le centre aquatique de l'université de Miami, en utilisant le logiciel TRNSYS. Leur article « performance analysis of a solar assisted swimming pool heating system » a présenté une analyse détaillée, incluant des aspects thermodynamiques et économiques qui a contribué à démontrer l'efficacité et la viabilité de tels systèmes. 27

Puis en 2005, José L. DUOMARCO et Miguel Pérez MAGNOU ont présenté un modèle de programmation macro sur Excel pour évaluer le comportement thermique de piscines en fonction de différents scénarios dans l'article intitulé « Solar heating of swimming pools ». Cette approche a facilité les analyses de performance du système de chauffage.28

En 2014, l'utilisation de MATLAB/Simulink a permis à Matteo DONGELLINI et son équipe de développer un modèle dynamique pour un système de chauffage solaire passif avec divers types de capteurs. Les résultats de leur article « Dynamic simulation of outdoor swimming pool solar heating » ont souligné l'efficacité des capteurs non vitrés dans ce type de système.29

Dans un contexte écologique croissant, les études ont pris en compte des aspects environnementaux. En 2015, KOURIM Zohra a étudié le chauffage solaire d'une piscine extérieure en utilisant le logiciel TRANSOL pour la simulation dans son mémoire de fin d'étude « chauffage solaire d'une piscine extérieure ». Les résultats ont souligné l'efficacité énergétique et l'impact positif sur l'environnement.30

Des chercheurs tels que K. KACI M. MERZOUK S. SAMI et al. ont continué à exploiter le potentiel solaire pour le chauffage des piscines. Leur article « Dynamic simulation of hybrid-solar water heated olympic swimming pool » en 2017 représente une simulation dynamique avec le logiciel TRANSOL en intégrant des systèmes de chauffage fabriqués localement. Les résultats ont démontré un taux de couverture solaire de 27% dans le cas des capteurs solaire vitrés et 47% dans le cas

des capteurs plans non vitrés, avec une quantité de 7149 Kg d'émission de CO<sub>2</sub> évités.<sup>31</sup>

En 2017, A. DOUDOU, M. AADMI et Y. TAHIRI ont utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour étudier la distribution de température dans une piscine chauffée par énergie solaire dans leur conférence « Étude de distribution de température dans une piscine chauffée pour réduire la consommation d'énergie ».<sup>32</sup>

En 2018, BARBATO M. et al. ont abordé le chauffage géothermique des piscines, intégrant les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du site Campi Flegrei « Feasibility study of a geothermal energy system for indoor swimming pool in Campi Flegrei area » leur analyse montre que l'ensemble du système est économiquement satisfaisant, avec un temps de retour sur investissement de 15,4 ans.<sup>33</sup>

R.S. Gonçalves et son équipe ont examiné les performances à long terme des systèmes de chauffage de piscines au Brésil dans l'article « Analysis of swimming pool solar heating using utilizability method » en 2019 considérant les capteurs solaires vitrés et non vitrés pour différentes villes, la simulation avec les capteurs non vitrés a montré une meilleure performance par rapport aux capteurs solaires vitrés.<sup>34</sup>

Durant la même année, Jianzhou ZHAO et al. ont exploré le fonctionnement d'un système de chauffage solaire pour une piscine individuelle typique dans des conditions optimales et faibles « Experimental study of a solar pool heating system under lower flow and low pump speed conditions », ils ont trouvé que le débit massique optimal est de 0.016 kg/s.m<sup>2</sup> par une surface de capteur, cette valeur est obtenue en utilisant une pompe à 3 vitesses fonctionnant à sa plus basse vitesse (2000 tr/min).<sup>35</sup>

Enfin, en 2022 R. GHABOUR, S. HOSSAIN et P. KORZENSZKY ont exploré les différentes configurations pour le chauffage d'eau solaire dans des climats froids dans l'article « Feasibility study of using solar thermal energy for heating swimming pools in central European climate (Hungary) » ils ont prouvé que les systèmes de chauffage solaire des piscines peuvent être utilisés largement dans les pays d'Europe centrale.<sup>36</sup>

### 1.6 Objectifs de la recherche et Problématiques :

Les piscines privées se caractérisent par un taux d'utilisation relativement faible et un coût d'entretien important. Par exemple, si une piscine est utilisée trois heures

par semaine pendant l'été, l'utilisation nette de la piscine n'est que de 0,5 %. Dans certains foyers, la piscine peut exiger la moitié de la consommation d'énergie thermique totale. Ce qu'il faut qu'elle peut être assez coûteuse et énergivore.

L'utilisation de l'énergie solaire pour chauffer et maintenir la température de la piscine permet de prolonger la saison de baignade, c'est un système de chauffage écologique et il permet de réduire les factures de gaz et d'électricité élevées.

Ce travail a pour objectif d'évaluer les performances énergétiques de l'usage d'énergie solaire thermique pour chauffer une piscine extérieure privée sise dans la région d'Akbou wilaya de Bejaia en utilisant le logiciel TSOL (Valentin Software).

### 1.7 Conclusion

Ce chapitre était consacré au cadre théorique en définissant l'énergie solaire, plus particulièrement l'énergie solaire thermique, on a cité également quelques systèmes de chauffage solaire et de chauffage d'eau de la piscine avec une brève présentation des systèmes de stockage thermique. Terminant par une liste des travaux qui ont été fait sur ce domaine de recherche et bien sur les objectifs du travail.

# Chapitre 2 : Modélisation numérique du système de chauffage solaire de la piscine

## 2.1 Introduction :

Les calculs des besoins de chauffage solaire d'une piscine se font par un bilan thermique en comparant ensuite les gains et les pertes du système. Les pertes comprennent des pertes thermiques par évaporation, par conduction, par convection, par rayonnement ainsi que les pertes par l'ajout d'eau froide.

Pour les gains, il existe trois types : gains solaires actifs, gains solaires passifs et les gains du système d'appoint.(37)

## 2.2 Présentation du système :

Le système étudié dans ce travail se compose d'une piscine privée extérieure, d'un champ de capteurs solaire thermiques pour le chauffage d'eau sanitaire d'une maison R+2 d'une seule famille de 4 personnes et pour le chauffage de la piscine, d'une cuve de stockage, des échangeurs de chaleur extérieurs et un système de chauffage auxiliaire.

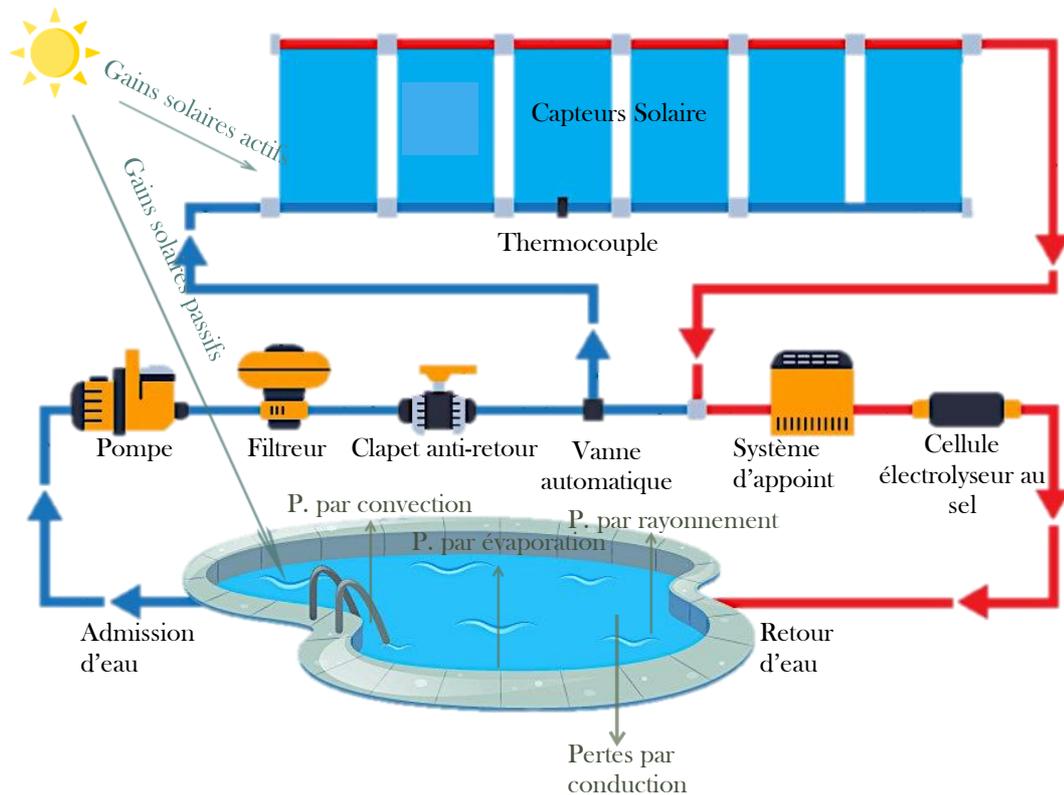


Figure 25: système de chauffage solaire d'une piscine privée extérieure

### 2.2.1 Hypothèses simplificatrices :

- La piscine est considérée comme un corps noir (l'eau comporte presque comme des corps noirs grâce aux coefficients de Fresnel) ;
- L'état stationnaire indépendant du temps ;
- Les parois de la piscine sont isolées thermiquement ;
- Les apports et les pertes énergétiques dues aux baigneurs sont négligeables ;
- Il n'y a pas de pertes énergétiques entre la piscine et le capteur (l'énergie captée par le capteur est entièrement transmise à la piscine) ;
- La masse volumique et la chaleur volumique de l'eau évoluent d'une manière linéaire en fonction de température ;
- Écoulement laminaire, incompressible et la convection naturelle est prise en compte par l'hypothèse de *Boussinesq* ;
- L'eau homogène et isotrope.(32)

Les besoins en chauffage de la piscine sont calculés en faisant le bilan thermique de la piscine et en comparant les pertes et les gains thermiques, (38)

### 2.3 Bilan Thermique de la piscine :

$$\sum Q_u + \sum Q_{rad} - \sum Q_p = mC_p \frac{dT}{dt} \quad 1$$

D'où :

$\sum Q_u + \sum Q_{rad}$  : les apports thermiques

$Q_u$  : la puissance utile fournie par le capteur solaire en (Watt) ;

$Q_{rad}$  : les gains solaires par rayonnement en (Watt) ;

$Q_p$  : les pertes de chaleur en (Watt) ;

$m$  : la masse d'eau de la piscine en (kg) ;

$C_p$  : la chaleur spécifique de l'eau en (J/kg.K) ;

$\frac{dT}{dt}$  : la température moyenne de la piscine sur le temps en (K/s).

#### 2.3.1 Puissance utile des capteurs :

$$\sum Q_u = \eta \times I \times A_c \quad 1.1$$

D'où

$\eta$  : le rendement du capteur solaire thermique sachant que le rendement du capteur solaire thermique plan non vitré (38):

$$\eta = 17.483 \left( T_e - \frac{T_0}{I} \right)^3 - 36.072 \left( T_e - \frac{T_0}{I} \right)^2 - 4.7762 \left( T_e - \frac{T_0}{I} \right) + 0.7102 \quad 1.1.1$$

Avec :  $T_e$  : température de l'eau à l'entrée du capteur ;

$T_0$  : température ambiante ;

$I$  : l'irradiation solaire en ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) ;

$A_c$  : la surface totale de captation en ( $\text{m}^2$ ).

### **2.3.2 Gains solaires :**

Pour une piscine extérieure (39):

$$\sum Q_{rad} = \alpha \times I \times A_s \quad 1.2$$

$\alpha$  : le coefficient d'absorption de l'eau, il dépend de la profondeur de la piscine, de l'absorbance du fond et des parois de la piscine, de l'angle d'incidence et de la clarté de l'eau. Lam et al., Ruiz et al., ASHRAE 2011 ont pris en compte une valeur de coefficient d'absorption égale à 0,85 ;

$A_s$  : la surface de la piscine en ( $\text{m}^2$ ).

### **2.3.3 Pertes thermiques :**

Pour une piscine extérieure (39)

$$\sum Q_p = Q_{evap} + Q_{conv} + Q_{ray} \quad 1.3$$

- **Pertes par évaporation (39):**

$$Q_{evap} = A_s \times h_{evap} \times (P_{v,sat} - P_{v,amb}) \quad 1.3.1$$

$h_{evap}$  : le coefficient d'évaporation en ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Pa}$ )(13,40,41) ;

$$D'où : h_{evap} = \begin{cases} 4.08 + 4.28 \times w & \text{Lam} \\ 89 + 78.2 \times w & \text{ASHRAE 2003} \\ 50.6 + 66.9 \times w & \text{ISO TC 180} \end{cases}$$

Avec  $w$  : vitesse du vent ( $\text{m}/\text{s}$ )

$P_{v,sat}$  : la pression de vapeur saturante en ( $\text{Pa}$ ) ;

$P_{v,amb}$  : la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air ambiant en ( $\text{Pa}$ ).

- **Pertes par convection :**

$$Q_{conv} = A_s \times h_{ca} \times (T - T_0) \quad 1.3.2$$

$h_{ca}$  : le coefficient de transfert de chaleur par convection en (W/m<sup>2</sup>.°C) ;

$$h_{ca} = 1.39 \times V^{0.8} \quad 1.3.2.1$$

$V$  : la vitesse du vent en (m/s).

▪ **Pertes par rayonnement :**

$$Q_{ray} = A_s \times [\varepsilon \times \sigma \times (T^4 - T_{ciel}^4)] \quad 1.3.3$$

$\varepsilon$  : le coefficient d'émissivité de l'eau ;

$\sigma$  : la constante de Stephan-Boltzmann ( $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$  en (W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>)) ;

$T_{ciel}$  : la température du ciel en (K).

▪ **Pertes par conduction :**

Les pertes par conduction sont négligeables par rapport aux autres pertes. Elle est supposée égales à 5% des autres pertes. (37)

▪ **Pertes thermiques par renouvellement de l'eau de la piscine :**

Dans le but de compenser les pertes par évaporation, on rajoute de l'eau à la piscine régulièrement. D'où :

Le taux de renouvellement d'eau pour chaque semaine en (kg/s) est :

$$\dot{m}_{renouv} = \dot{m}_{\text{évap}} + f_{renouv} \frac{\rho \times V_p}{7 \times 86400} \quad 1.3.4$$

$\dot{m}_{\text{évap}}$  : le taux d'évaporation de l'eau en (kg/s) ;

$$\dot{m}_{\text{évap}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{\lambda} \quad 1.3.4.1$$

$\lambda$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau (2454 KJ/kg) ;

$f_{renouv}$  : le taux de remplacement d'eau (inclut le volume d'eau nécessaire pour la compensation) ;

$\rho$  : la masse volumique de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>) ;

$V_p$  : le volume de la piscine en m<sup>3</sup>.(37)

Estimation des pertes thermique totales d'une piscine extérieure en (kW) (42):

$$Q_{pertes\ tot} = Q_{p, evap} + Q_{p, surf} \quad 1.3.5$$

- **Pertes thermiques par évaporation** en (kW):

$$Q_{p, evap} = \frac{\rho \times C_p \times V \times (T_f - T_i)}{\theta \times 3600} \quad 1.3.5.1$$

Avec :

$V$  : le volume de la piscine en (m<sup>3</sup>);

$T_f$  : la température de l'eau désirée en (°C) ;

$T_i$  : la température initiale de la piscine (°C) ;

$\theta$  : durée de chauffage en (heure)

- **Pertes thermiques surfacique** en (kW) :

$$Q_{p, surf} = 0.060 \times S_p \times (T_p - T_{amb}) \quad 1.3.5.2$$

0.060 : coefficient de pertes thermiques en (kW/m<sup>2</sup>K) ;

$S_p$  : la surface de la piscine en (m<sup>2</sup>) ;

$T_p$  : la température de la piscine en (°C) ;

$T_{amb}$  : la température ambiante en (°C).

Pour la simulation numérique de ce système de chauffage, on va utiliser le logiciel TSOL qui va nous permettre de calculer les changements de températures tout au long la période de simulation, dont le bilan thermique représente la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\text{somme des énergies inputs et outputs}}{\text{somme des capacités thermiques}} \quad 2$$

Les énergies inputs (le rayonnement solaire, les gains thermiques au niveau de l'échangeur de chaleur, l'acheminement de la chaleur ...)

Les énergies outputs (les pertes thermiques, le transfert de chaleur dans l'échangeur, ...)

Capacités thermiques de (capteur, des conduites et du ballon de stockage) (43)-Le rendement du système de chauffage :

$$\eta = \frac{\text{énergie produite}}{\text{irradiation solaire collectée}} \quad 3$$

-La couverture solaire :

$$sf = \frac{Q_{\text{solaire}}}{Q_{\text{solaire}} + Q_{\text{appoint}}} \quad 4$$

$$sf = \frac{\text{énergie produite par le capteur solaire}}{\text{quantité de chaleur fournie par (le capteur solaire + système d'appoint)}} \quad 4.1$$

## 2.4 Calcul des émissions de CO<sub>2</sub> :

On peut estimer la valeur d'émission de CO<sub>2</sub> en utilisant des facteurs d'émission en fonction de la ressource énergétique. Les facteurs utilisés dans TSOL (43):

Ressources Énergétiques	Pouvoir calorifique	Facteur d'émission
Carburant	36722 (KJ/l)	7.32748 g de CO <sub>2</sub> /KJ
Gaz naturel	41100 (KJ/m <sup>3</sup> )	5.14355
Chauffage urbain		5.14355
Bois	15490(KJ/kg)	CO <sub>2</sub> neutre

Tableau 1 pouvoir calorifique et facteur d'émission (43)

## 2.5 Calcul de rentabilité :

Suivant ces formules et la méthode de la valeur actuelle, on peut savoir la rentabilité de ce système de chauffage à l'aide du logiciel TSOL (43):

Coûts d'investissement ( $C_{\text{invst}}$ ) :

$$C_{\text{invst}} = \text{coûts de l'installation} - \text{les subventions} \quad 5$$

Frais d'exploitation annuels ( $F_{annuel}$ ) :

$$F_{annuel} = \text{puissance pompe} \times \text{durée fonctionnement} \times \text{coût électricité} \quad 6$$

## 2.6 Dimensionnement :

Pour ce système de chauffage d'eau sanitaire et piscine d'une maison R+2 d'une famille de 4 personnes,

1) Besoins en eau chaude sanitaire (44) en (kWh) :

$$ECS = C_{p(eau)} \times \rho \times V_{eau} \times (T_c - T_f) \quad 7$$

$C_{p(eau)}$  : la capacité calorifique de l'eau (4,18 KJ/kg.K) ou (1,16 kWh/kg.K) ;

$\rho$  : la masse volumique de l'eau (1 kg/l ou 1000 kg/m<sup>3</sup>) ;

$V_{eau}$  : le volume total d'eau chaude sanitaire requis

On estime que dans une maison résidentielle, une personne consomme 50 litres par jour d'eau chaude sanitaire. Alors pour une famille de 4 personnes le volume total d'eau chaude consommée est 200 litres par jour ;(44)

$T_c$  : la température désirée de l'eau chaude sanitaire en (°C ou en K) qui est estimée entre 45°C et 60°C. Donc on prend  $T_c = 50^\circ\text{C}$  pour éviter le développement des bactéries nocives et les risques de brûlures ; (45)

$T_f$  : la température de l'eau froide dans le site en (°C ou K) ;

En utilisant les logiciel Metenorm 8 et TSOL 2021, la température de l'eau froide dans le site étudié (36° 28' 09"N et 4° 32' 31"E) atteint 15°C en février et 19°C en août. Donc on prend  $T_f = 15^\circ\text{C}$ .

Donc :

$$ECS = 4.18 \times 1 \times 200 \times (50 - 15) \quad 7.1$$

➤  $ECS = 29260 \text{ KJ}$

On sait que  $3.6 \text{ KJ} = 1\text{Wh}$

➤  $ECS = 8.1277 \text{ kWh}$

2) La puissance solaire disponible dépend de plusieurs facteurs : l'orientation et inclinaison des capteurs, du site et de fluide caloporteur. Sa valeur est estimée par la formule suivante en (kWh) (44):

$$PSD = E \times \eta \times S_{capt \text{ eff}} \quad 8$$

$E$  : l'énergie solaire reçue en (kWh/m<sup>2</sup>.jour) ;

$\eta$  : le rendement du capteur solaire ;

Exemple pour le capteur du modèle Saunier Duval type (SRV 2.3) a un rendement de 79% (46)

$S_{capt\ eff}$  : surface de capteur solaire effective en (m<sup>2</sup>)

Où

$$S_{capt\ eff} = S_{capt} \times C_i \times C_0 \times C_c \quad 8.1$$

$S_{capt}$  : surface du capteur solaire en (m<sup>2</sup>) ;

$C_i$  : coefficient d'inclinaison des capteurs (valeur adimensionnelle comprise entre 0 et 1, où 0 c'est lorsque le capteur est parallèle au sol et 1 lorsque le capteur solaire est perpendiculaire au sol. Dans ce cas l'inclinaison des capteurs sera 36° donc  $C_i=0.4$ ) ;

$C_0$  : coefficient d'orientation des capteurs (une valeur adimensionnelle aussi comprise entre 0 et 1, où 0 c'est lorsque le capteur est orienté vers l'opposé de l'orientation optimale qui est le Sud pour l'Algérie et la valeur 1 lorsque le capteur est orienté vers le sud);

$C_c$  : coefficient de correction du fluide caloporteur (égal à 1 si on n'utilise pas d'antigel c'est à dire le fluide caloporteur est l'eau seulement).

Et donc :

La puissance solaire disponible par unité de surface en (kWh/m<sup>2</sup>.jour) est :

$$PSD = E \times \eta \times C_i \times C_0 \times C_c \quad 8.2$$

Pour l'énergie solaire reçue dans le site étudié à Akbou, on a obtenu ce tableau à l'aide du logiciel Méténorm 8

Mois	Ta	H_Gh	FF	RH
Janv.	9.0	72	2.6	80.9
Fév.	9.5	88	2.4	78.4
Mars	12.5	131	2.3	74.5
Avr.	15.2	164	2.0	73.3
Mai	18.2	194	1.8	73.9
Juin	22.1	215	1.8	72.0
Juil.	25.0	215	2.0	71.3
Août	25.3	194	1.9	71.7
Sept	22.2	154	1.9	76.2
Oct.	19.0	121	2.1	75.4
Nov.	13.8	79	2.4	75.7
Déc.	10.2	68	2.6	79.1
<b>Année</b>	<b>16.8</b>	<b>1689</b>	<b>2.2</b>	<b>75.2</b>

Tableau 2: données Méténorm du site étudié à Akbou

Où :

Ta : température ambiante en (°C) ;

H\_Gh : Rayonnement solaire global sur plan horizontal en (kWh/m<sup>2</sup>) ;

FF : vitesse du vent (m/s) ;

RH : humidité relative (%).

On prend alors une moyenne d'énergie solaire de  $E = 4.7 \text{ kWh/m}^2$  par jour

$$\text{➤ } PSD = 4.7 \times 0.79 \times 0.4 \times 1 \times 1$$

$$\text{➤ } PSD = 1.4852 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot \text{jour}$$

3) Estimation de la surface de captation pour l'eau chaude sanitaire (44):

$$PSD = S_{\text{captation}} \times \tau_c \times I_{\text{solaire}} \times ECET \quad 9$$

Avec :

$S_{\text{captation}}$  : surface de captation solaire en (m<sup>2</sup>) ;

$\tau_c$  : le taux de couverture solaire (on prend 90%) ;

$I_{\text{solaire}}$  : rayonnement solaire en (W/m<sup>2</sup>) ;

$ECET$  : efficacité de la conversion énergétique thermique (%).

$$ECET = \frac{P_{th,utile}}{I_{\text{solaire}}} \quad 9.1$$

On a la puissance thermique utile en (kW) est égale à :

$$P_{th,utile} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad 9.2$$

$\dot{m}$  : débit massique en (kg/s) ;

Avec

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{\rho \times V}{t} \quad 9.2.1$$

$m$  : masse d'eau en (kg) ;

$t$  : durée de chauffage en (s) ;

$V$  : volume d'eau en (l).

Donc pour une heure de chauffage :

$$\dot{m} = \frac{\rho \times V}{3600} \quad 9.2.2$$

On remplace l'équation 9.2.2 dans l'équation 9.2 :

$$P_{th,utile} = \frac{\rho \times V \times C_p \times \Delta T}{3600} \quad 9.2.3$$

Équation 9 devient :

$$PSD = S_{\text{captation}} \times \tau_c \times P_{th,utile} \times n_{\text{occupants}} \quad 10$$

$$\triangleright PSD = S_{captation} \times \tau_c \times \frac{\rho \times V \times C_p \times \Delta T}{3600} \times n_{occupants}$$

On prend le coefficient  $P_r = \frac{\rho \times V \times C_p \times \Delta T}{3600} = \frac{1 \times 50 \times 4.18 \times (50 - 15)}{3600} = 2.03$  en (kWh)

Alors :

$$S_{captation} = \frac{n_{occupants} \times \tau_c \times 2.03}{PSD} \quad 11$$

$n_{occupants}$  : le nombre de personne dans la maison (dans ce cas d'étude 4 personnes) ;

Donc :

$$S_{captation} = 4.92 \text{ m}^2$$

Donc le nombre de capteurs solaires à utiliser est :

$$N = \frac{S_{captation}}{S1} \quad 12$$

$S1$  : est la surface d'un seul capteur, dans notre cas on prend un capteur de  $2.5 \text{ m}^2$   
Donc le nombre des capteurs est : 2 capteurs solaires thermiques de surface  $2.5 \text{ m}^2$ .

4) Capacité de stockage d'eau chaude sanitaire en litre :

$$C_{stockage} = \text{surface de capteur solaire} \times 50 \text{ (l/m}^2\text{) ou } 75 \quad 13$$

Pour le chauffage de la piscine :

Une étude était faite en Espagne en comparant les surfaces de captation solaire correspondants à 50% de surface de piscine et 100% de la surface de la piscine. Ils ont trouvé comme résultat que pour la surface de 50%, la température de l'eau reste supérieure à  $24^\circ\text{C}$  de début juin jusqu'à mi-septembre avec une augmentation d'environ  $2^\circ\text{C}$  un peu plus faible que les capteurs à surface de 100% surface de piscine.(47)

Donc pour ce cas d'étude on prend :

$$\text{Surface de captation} = 50\% \text{ surface de la piscine} \quad 14$$

Notre surface de la piscine est de :  $35.429 \text{ m}^2$

$\triangleright$  Surface totale de captation pour chauffage de la piscine :  $17.71 \text{ m}^2$

Donc le nombre de capteurs solaires plans à utiliser pour le chauffage de la piscine est : 7 capteurs

### 2.7 Conclusion :

Ce chapitre a fait l'objet de la modélisation numérique du système de chauffage solaire de la piscine et le chauffage d'eau sanitaire pour une maison R+2 d'une famille de quatre personnes, en présentant les formules du bilan thermique, les différentes pertes et gains thermiques, les formules utilisées dans le logiciel TSOL 2021 pour les calculs des émissions de CO<sub>2</sub> et les calculs de rentabilité du système. Enfin, on a fait un dimensionnement du système pour calculer le nombre des capteurs solaires à utiliser pour chacune des utilisations.

# Chapitre 3 : Simulation du système de chauffage solaire de la piscine

## 3.1 Introduction :

Le comportement thermique du système de chauffage solaire de la piscine est évalué et simulé sous le logiciel TSOL 2021.

Dans ce troisième chapitre, on va s'intéresser à la simulation dynamique de notre système présenté en détails après la présentation du logiciel utilisé et du site. Et finir par démontrer les résultats obtenus.

## 3.2 Présentation du logiciel TSOL :

Valentin Software est une entreprise fondée en 1988 par Dr. Ing. Gerhard Valentin en Allemagne. Le logiciel TSOL ou T\*Sol (Thermal Solar) est le premier logiciel qui a été lancé sur le marché en 1993. (48)

C'est un logiciel de simulation spécialisé dans l'analyse et la conception des systèmes de chauffage solaire. Il est utilisé dans le but d'évaluer les performances des systèmes solaires thermiques et d'optimiser leur dimensionnement.

Il nous permet de faire une présentation rapide de l'installation solaire incluant des estimations en termes de rendement et de rentabilité correspondantes, il permet également de déterminer la capacité thermique requise, de dimensionner le nombre de capteurs solaires nécessaire à utiliser et le volume de la cuve de stockage qui correspond à l'installation, il prend en considération l'isolation thermique des matériaux et offre une visualisation graphique qui facilite l'analyse et la compréhension des performances du système.

La simulation sous TSOL est basée sur l'équilibre des flux et sources d'énergie, prenant en compte les émissions de CO<sub>2</sub> et le coût à partir des données météorologiques. C'est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de chauffage solaire qui va nous aider à prendre des décisions pertinentes pour maximiser l'efficacité de notre installation. (43)



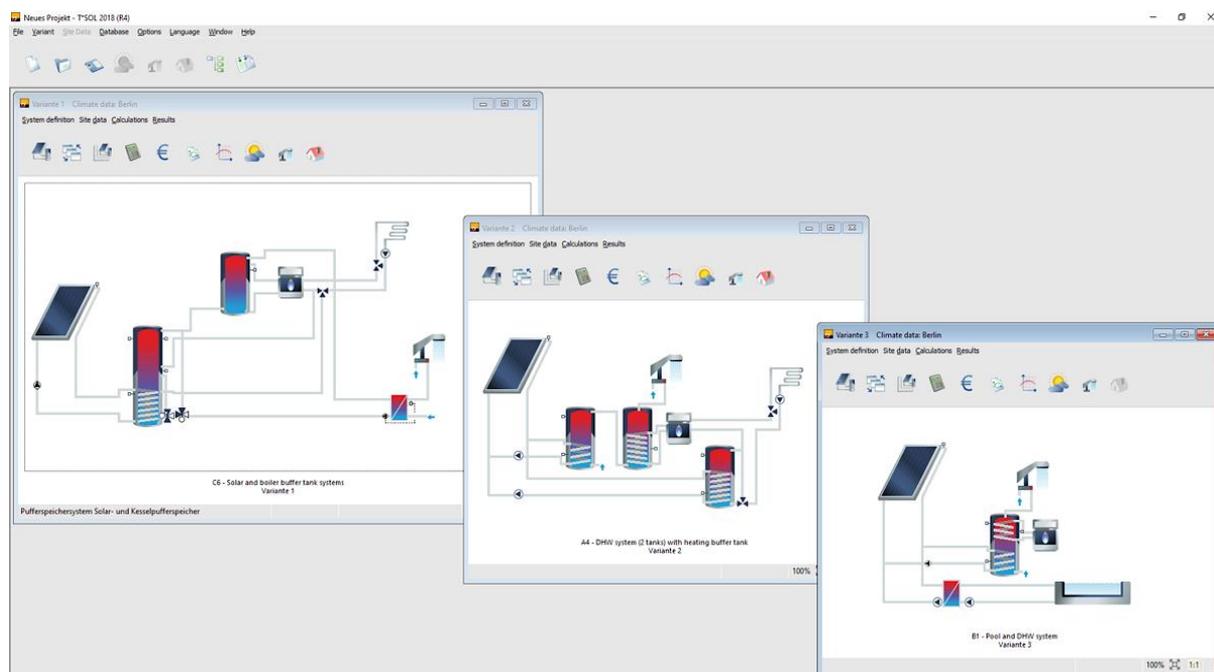


Figure 26 : interface logiciel TSOL 2021

### 3.2.1 Cas d'étude :

La saison de baignade en Algérie est d'avril à septembre. Cependant, durant cette période, les températures de certains jours sont très basses pour nager. L'objectif du chauffage solaire des piscines est de maintenir l'eau à une température agréable et confortable tout au long la période.

Le dimensionnement de ce système de chauffage est déterminé par la puissance solaire disponible, les vitesses du vent, les températures moyennes de la région... la simulation va être appliquer à l'aide du logiciel TSOL suivant les données et étapes suivants :

### 3.2.2 Paramètres de site :

#### Présentation de la zone d'étude :

Notre projet est situé dans la région d'Akbou, Wilaya de Bejaïa en Algérie :

- Latitude : 36° 28' 09" N
- Longitude : 4° 32' 31"
- Altitude : 292 m

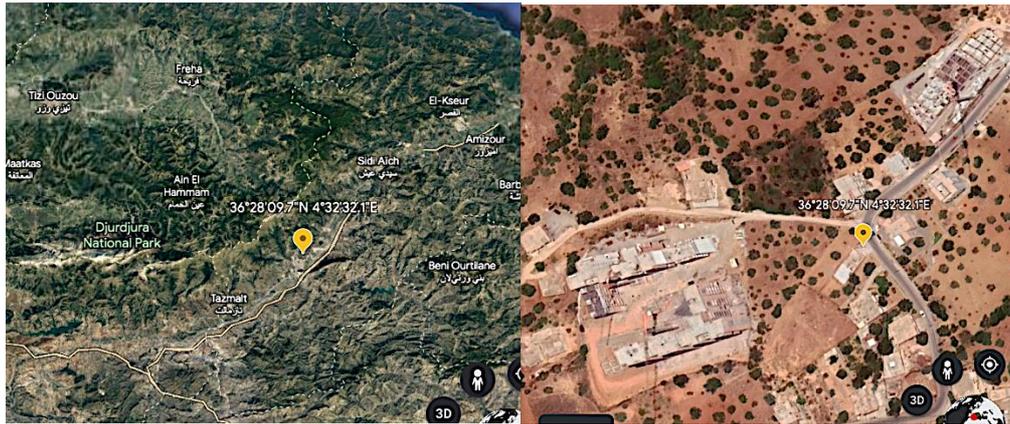


Figure 27: présentation de la zone d'étude

Les sites d'interpolation du rayonnement données par Satellite. Et les stations de l'interpolation de température sont : Bejaia/Soummam (54km), Dar el Beida (119km)

### 3.2.2.1 Données météorologiques :

En utilisant le logiciel Meteonorm 8, on a pu obtenir les données suivantes :

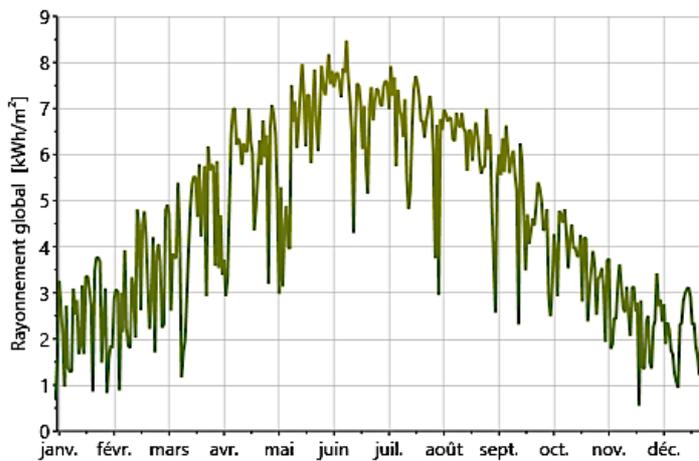


Figure 28: Rayonnement global (kWh/m<sup>2</sup>)

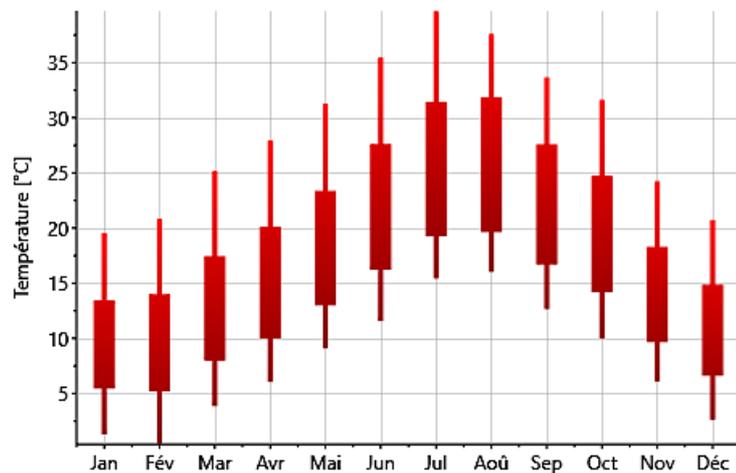


Figure 29: changement de température en (°C)

Quelques données :

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
$T_{min\ amb}$ (°C)	2	0	4	6	7	9	15	16	13	7	4	3
$T_{max\ amb}$ (°C)	20	21	25	27	31	35	42	38	31	30	24	20
Durée ensoleillement (heure)	4.5	5	6.5	7	9	10	11	10	9	7	5.5	4.5

Tableau 3:données météorologiques de Meteonorm

### 3.2.3 Description de l'installation :

L'installation est constituée d'une maison de deux étages en cours de construction, c'est une maison de 4 personnes (un couple et deux enfants) et contient une piscine extérieure de 35.429m<sup>2</sup> de surface avec une forme libre (semi arrondie semi rectangulaire). Le but de cette installation de chauffage solaire est de chauffer l'eau sanitaire pour un usage domestique (douche, vaisselle, linge ...) durant toute l'année et de chauffer une piscine extérieure d'une période entre Mai et Septembre afin d'assurer un confort thermique en maintenant une température entre 25°C et 30°C ainsi que d'augmenter la saison de baignade.



Figure 30: la piscine extérieure de la maison (en cours de construction)

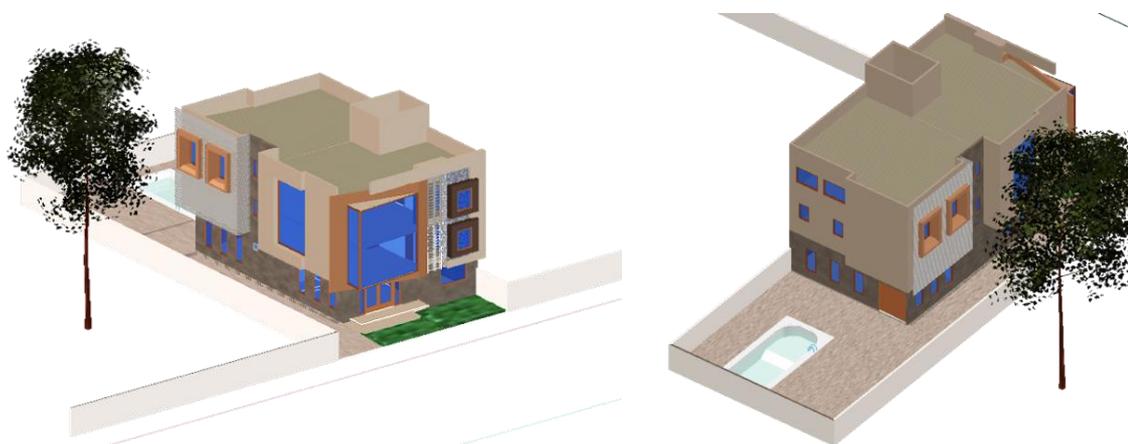


Figure 31: visualisation de la maison + piscine en 3D sur AutoCad 2018

Le système de chauffage comporte :

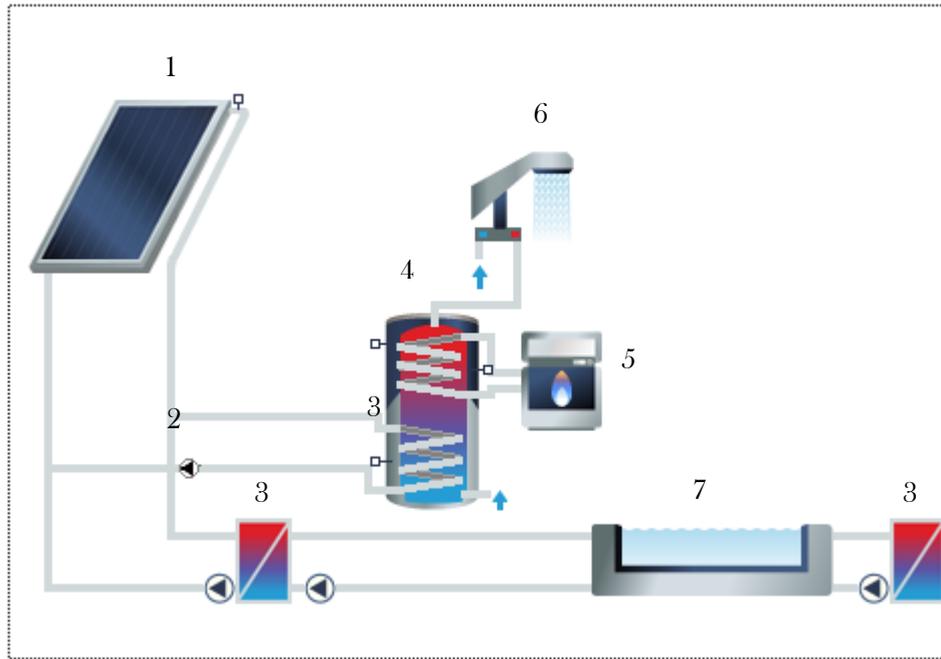


Figure 32: système de chauffage solaire ECS et piscine sur TSOL

- ♦ Un champ de capteurs solaires thermiques ; {1}
- ♦ Circuit de distribution + Pompe ; {2}
- ♦ Trois échangeurs de chaleur ; {3}
- ♦ Une cuve de stockage ; {4}
- ♦ Un système d'appoint (chaudière à gaz) ; {5}
- ♦ Utilisation eau chaude sanitaire ; {6}
- ♦ Une piscine extérieure. {7}

### 3.2.4 Dimensions piscine :

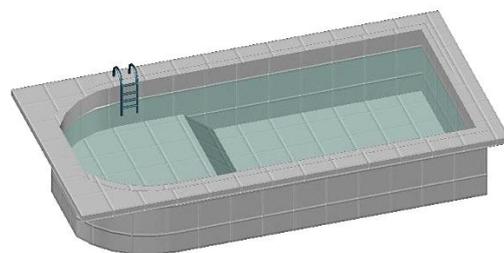
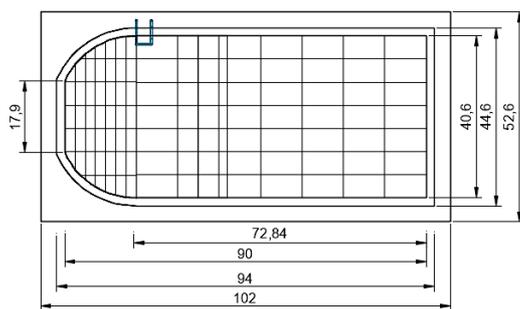


Figure 33: Visualisation de la piscine étudiée en 3D sur AutoCad

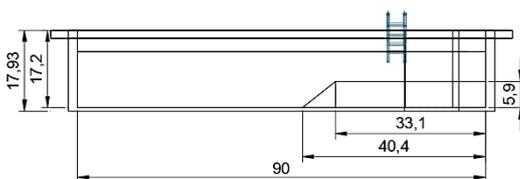


Figure 34: dimensions de la piscine (échelle 1 : 10) cm

Longueur : 9 m

Largeur : 4.06 m

Hauteur moyenne de : 1.6 m

Surface totale de la piscine : 35,429 m<sup>2</sup>

Volume total de la piscine : 52,79 m<sup>3</sup>

### 3.3 Caractéristiques des composants :

#### 3.3.1 Capteur solaire plan non vitré :

 Champ capteur

Paramètres | Inclinaison | Photo Plan | Tuyauterie

**Capteur**

Fabricant: Saunier Duval Sélectionner  
 Type: SRV 2.3  
 Désignation: Capteur plan Paramètres

**Dimensionnement de la surface du capteurs**

Objectif de couverture

bas (45 %)  
 moyen (70 %)  
 haut (90 %)

Suggested number:      Surface de capteur:

La proposition de conception prend en compte qu'un seul circuit de capteurs. Accepter

Nombre de capteurs:       Surface de capteur  
 Brut: 27,61 m<sup>2</sup>  
 de référence: 25,85 m<sup>2</sup>

**Ombrage** Sélectionner

Ombrage Paramètres

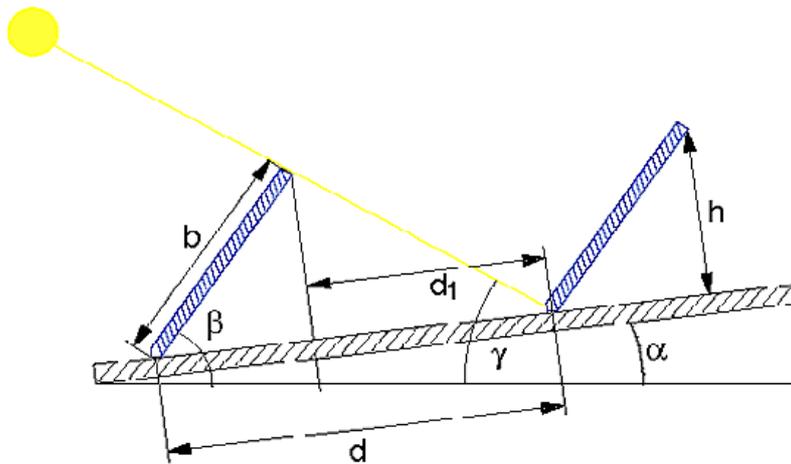
Figure 35: champ capteur TSOL

B	Rendement (%)	Surface brute (m <sup>2</sup> )	Capacité th. Spécifique (J/m <sup>2</sup> K)	Coefficient de transmission th. (W/m <sup>2</sup> K)	Orientation
36	79	2,51	8088	2,414	Sud

Tableau 4: autres données sur le champ de capteurs solaires

Distance minimale entre les capteurs

Distance minimal des capteurs



Par défaut:

Désignation	Valeur	Unité
b	2,04	m
h	1,20	m
Beta	36,00	°
Gamma	30,08	°
Gamma le	21/12/ 12:00	-

Entrées:

Alpha  ° (Alpha < 31,00)

Résultats:

Désignation	Valeur	Unité
d	3,71	m
d1	2,06	m

Figure 36: distance minimale entre les capteurs (calculés sur TSOL)

### 3.3.2 Réservoir de stockage

Ballon ECS bivalent

Paramètres Raccordements Échangeur de chaleur Résistance Réglage

Fabricant:

Type:

Volume:  l Nombre de réservoirs:

Dimensionner le volume du réservoir

Proposition: 950 l

Hauteur =  x Diamètre

Epaisseur de l'isolation:  mm Pertes : 3,78 kWh/Jour

Conduction thermique:  W/(m.K) Taux de perte thermique: 3,50 W/K

Figure 37: ballon de stockage

3.3.3 Circuit solaire

The screenshot shows a software interface for configuring piping. It has several sections:

- Tuyauterie:**
  - Longueur simple:
    - dans le bâtiment: 8 m
    - en dehors: 5 m
    - entre les capteurs: 300 mm / Capteur
  - Conductivité thermique de l'isolation: 0,045 W/(m·K) for all three categories.
- Largeur nominale:**
  - Cond. collectrice: 25 mm
  - entre les capteurs: 15 mm
  - spécifique: calcul issu de la vitesse du flux: 0,5 m/s
- Epaisseur isolation:**
  - dans le bâtiment: 30 mm
  - entre les capteurs: 20 mm
  - en dehors: 30 mm
  - spécifique: 100 % diamètre nominal respectif

Figure 38: Tuyauterie

Le fluide caloporteur : eau à capacité thermique spécifique de 4180 (J/kgK)

Débit Volumique par capteur (l/h/m <sup>3</sup> )	Température départ capteur/ Température de référence réservoir (K) en marche	Température départ capteur/ Température de référence réservoir (K) à l'arrêt
40	8	3

Tableau 5: Données de circuit de distribution

3.3.4 Profil de la consommation :

3.3.4.1 Consommation en eau chaude sanitaire :

Consommation journalière moyenne (L)	Besoins annuels (kWh) (calculé)	Température consigne en eau chaude (°C)	T° de l'eau froide en février (°C) (Meteonorm)	T° de l'eau froide en août (°C) (Meteonorm)
200	2355	50	15	19

Tableau 6: Données de consommation en eau chaude sanitaire

Avec une période d'exploitation :

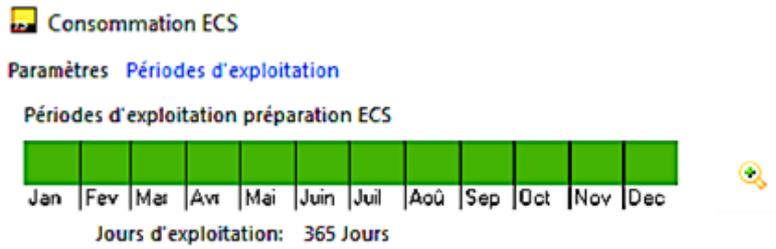


Figure 39: Période d'exploitation eau chaude sanitaire

Et un taux d'utilisation annuel de :

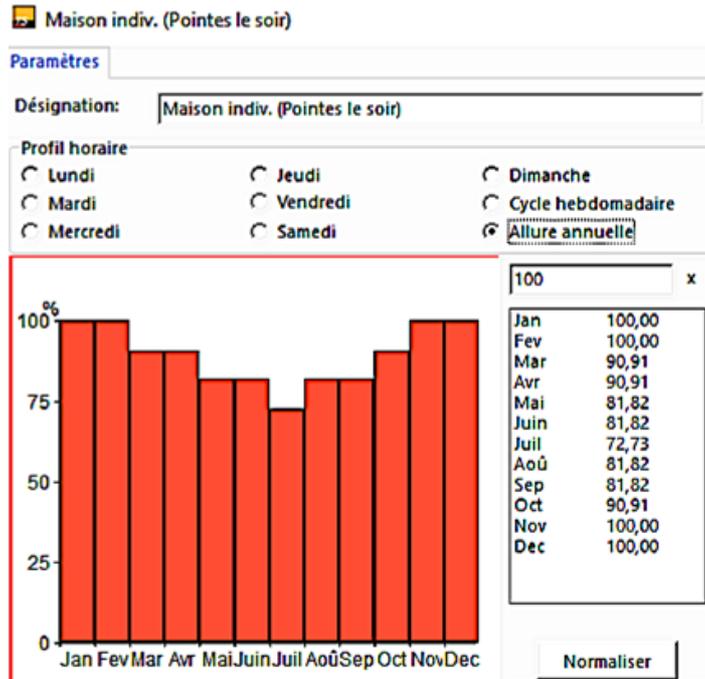


Figure 40: taux d'utilisation d'eau chaude sanitaire d'une maison individuelle (pointe le soir)

### 3.3.4.2 Pour la piscine :

Besoins quotidiens en eau fraîche par jour sont estimés :

$$\text{Besoins eau} = \text{surface piscine} \times \text{baisse de niveau d'eau}$$

1

## Chapitre 3

Baisse niveau d'eau on prend 10 mm par jour.

Donc :

Besoins en eau fraîche par jour est :  $0.35 \text{ m}^3$  qui est aussi : 350L

Et en prenant une période de baignade entre le milieu du mois de Mai et le milieu du mois Septembre.  
à un temps d'utilisation entre 8h du matin et 20h (tous les jours identiques).

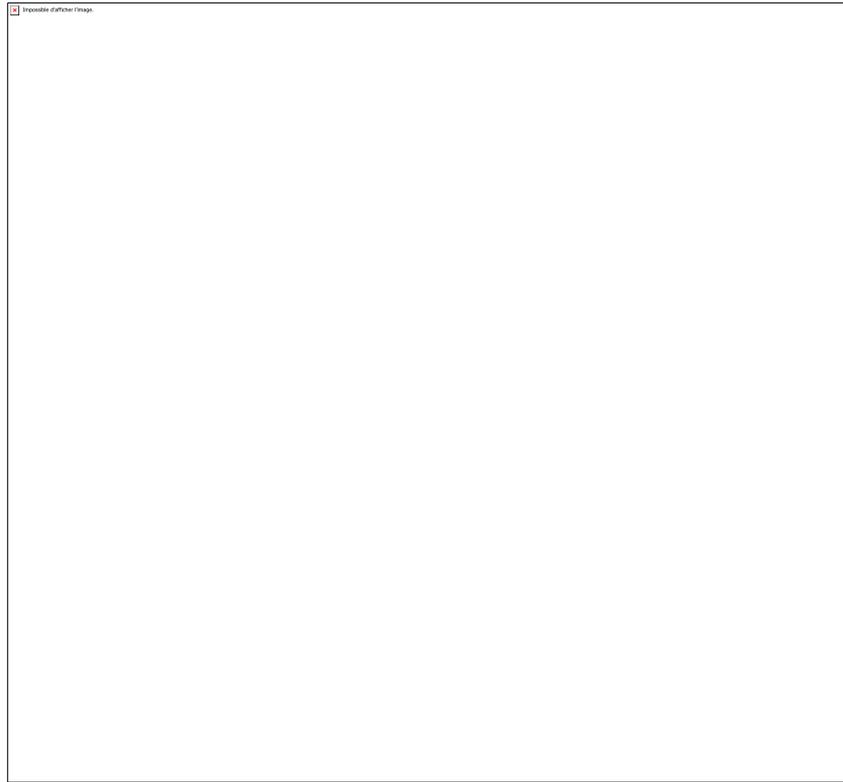


Figure 41: données de la piscine

Avec :

<b>Champ périphérique</b>	
Abris contre le vent :	<input type="text" value="non disponible"/>
Environnement géographique:	<input type="text" value="libre"/>
Ombrage:	<input type="checkbox"/> 
<b>Températures</b>	
Température souhaitée:	<input type="text" value="28"/> °C
température maximum piscine:	<input type="text" value="30"/> °C

Figure 42: paramètres de la piscine

**3.3.5 Système d'appoint (chaudière à gaz) :**

Figure 43: donnée de la chaudière à gaz (standard)

**3.3.6 Échangeur de chaleur :**

Température logarithmique moyenne (K)	Puissance maximale transmise (kW)
5	10,58

Tableau 7: données de l'échangeur de chaleur

-Température logarithmique moyenne est la différence de  $T^\circ$  entre les flux massiques en contrecourants.

-La puissance thermique maximale se calcule en fonction des la taille de système.

### 3.4 Résultats simulation :

Les résultats d'une simulation d'une année

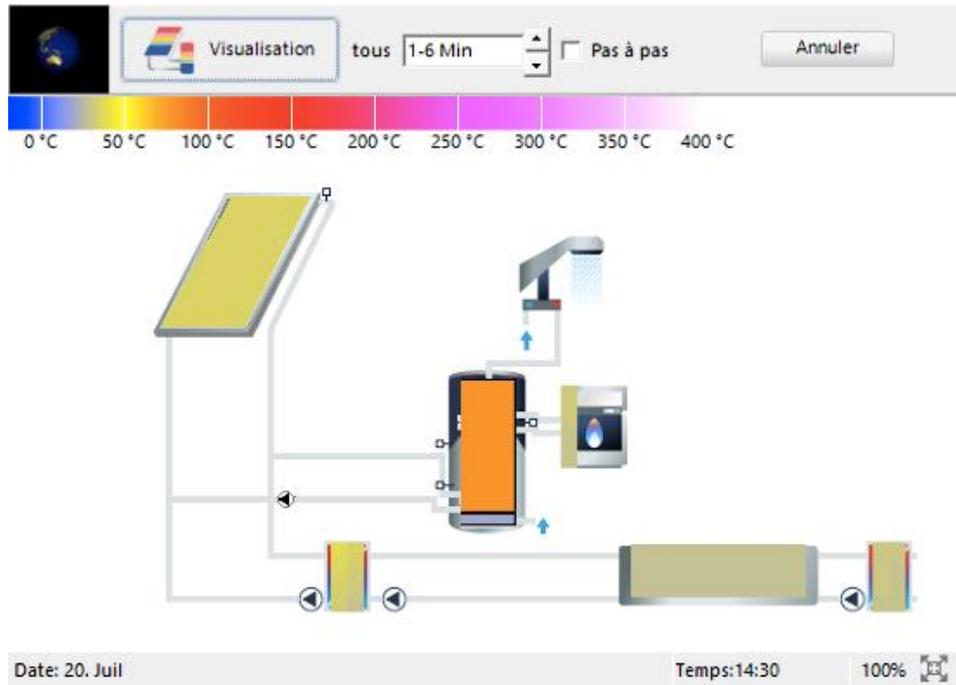


Figure 44: visualisation du système de chauffage TSOL

#### 3.4.1 Évaluation des pertes thermiques du système :

##### 3.4.1.1 Les pertes thermiques des capteurs solaires thermiques :

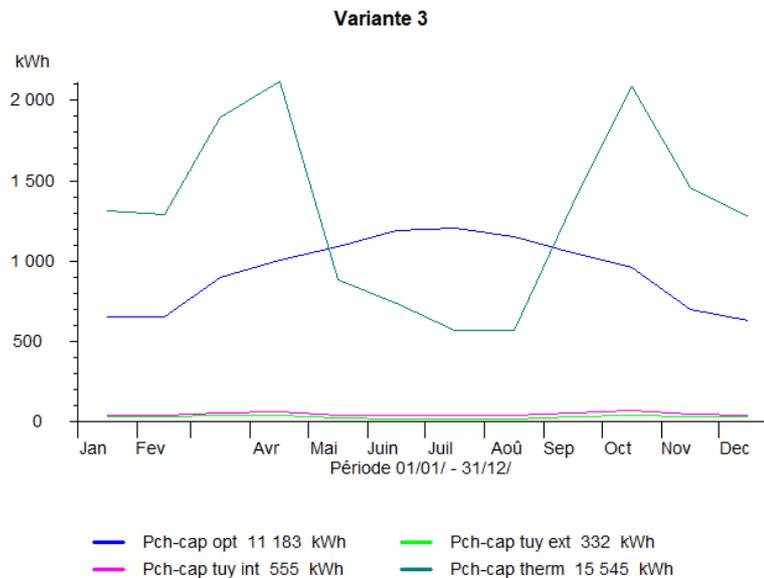


Figure 45: les pertes des capteurs solaires pendant l'année

- ♦ Pch-cap opt : pertes de chaleur optiques des capteurs

- ♦ Pch-cap tuy int : pertes de chaleur dans les tuyauteries intérieures des capteurs
- ♦ Pch-cap tuy ext : pertes de chaleur dans les tuyauteries extérieures des capteurs
- ♦ Pch-cap therm : pertes de chaleur du capteur thermique

### 3.4.1.2 Les pertes thermiques au niveau du ballon de stockage :

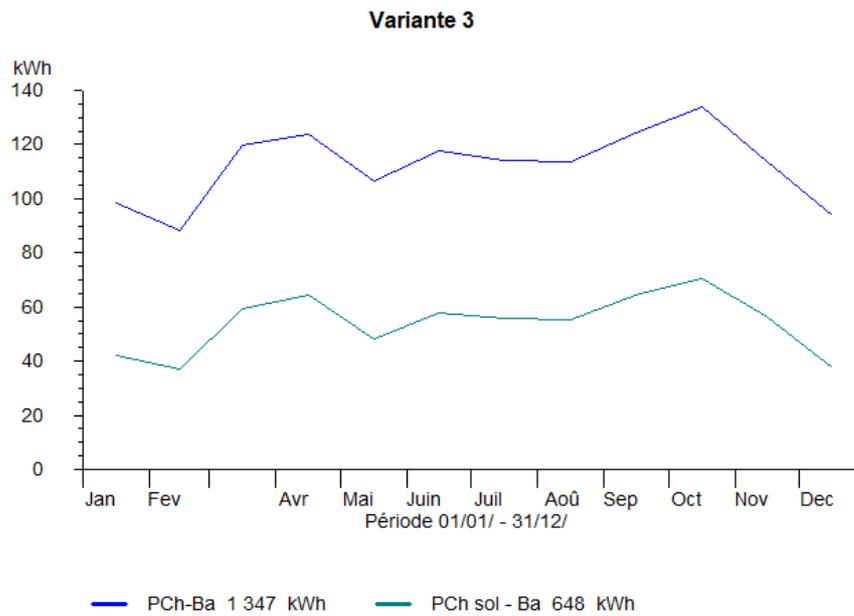


Figure 46: pertes th. du ballon de stockage

### 3.4.1.3 Les pertes thermiques de la piscine :

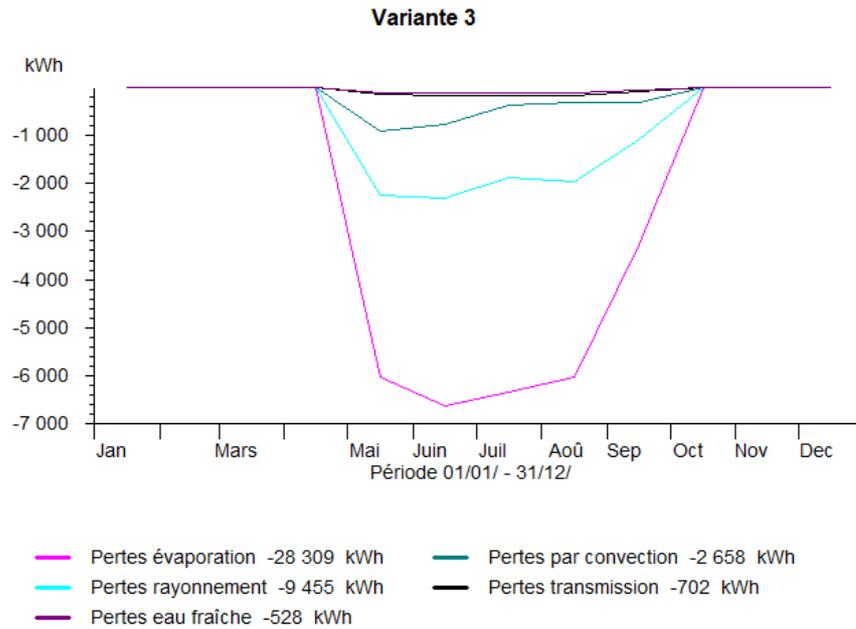


Figure 47: différentes pertes thermiques de la piscine pendant une année

### 3.4.2 Besoins en énergie et Bilan thermique :

#### 3.4.2.1 besoins en eau chaude sanitaire :

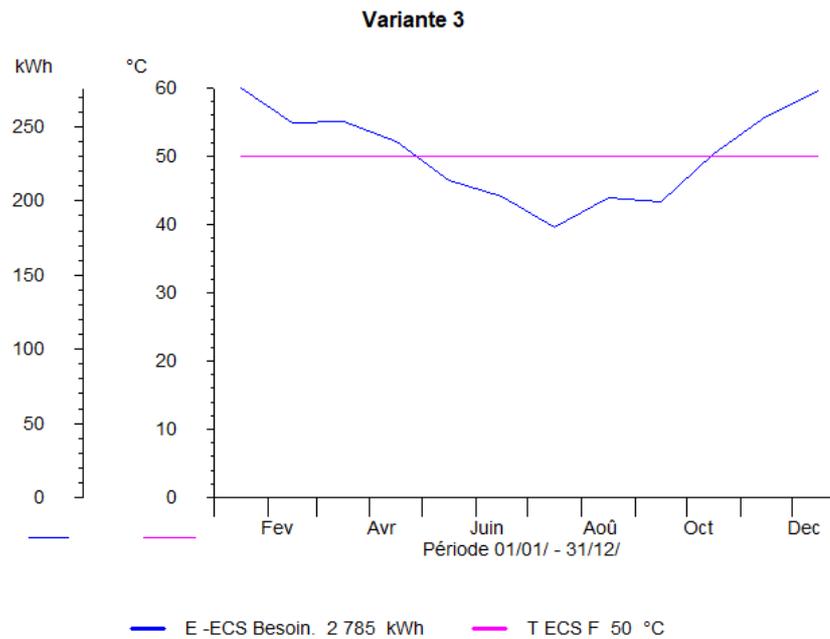


Figure 48: les besoins et les températures de l'eau chaude sanitaire pendant l'année

### 3.4.2.2 Bilan thermique de la piscine

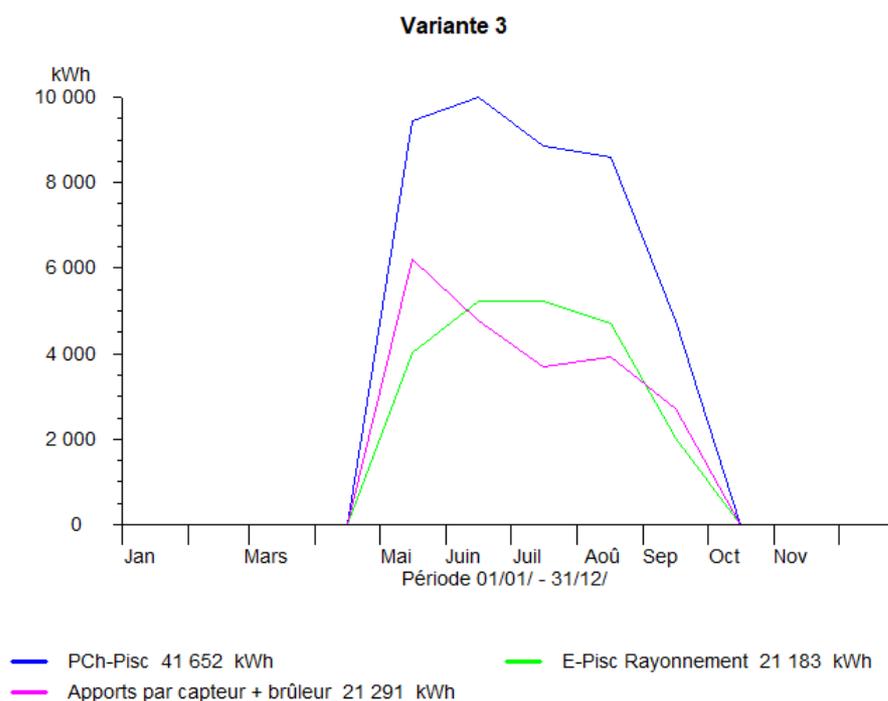


Figure 49: pertes th. totales, apports th. actifs et apports par rayonnement dans la piscine

### 3.4.3 Températures :

T° moyenne de la piscine (°C)	T° moyenne des capteurs solaires (°C)	T° milieu du ballon de stockage (°C)	T° d'eau chaude sanitaire (°C)
28	34	69	50

Tableau 8: les températures moyennes du système

### 3.4.4 Rendements et couvertures solaires

Rendement du système de chauffage solaire :

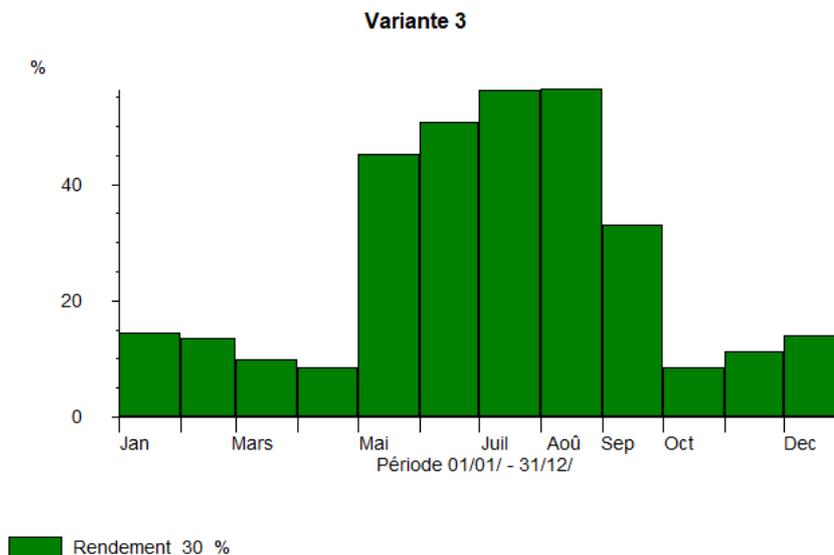


Figure 50: rendement du système de chauffage

Rendement des capteurs solaires thermiques :

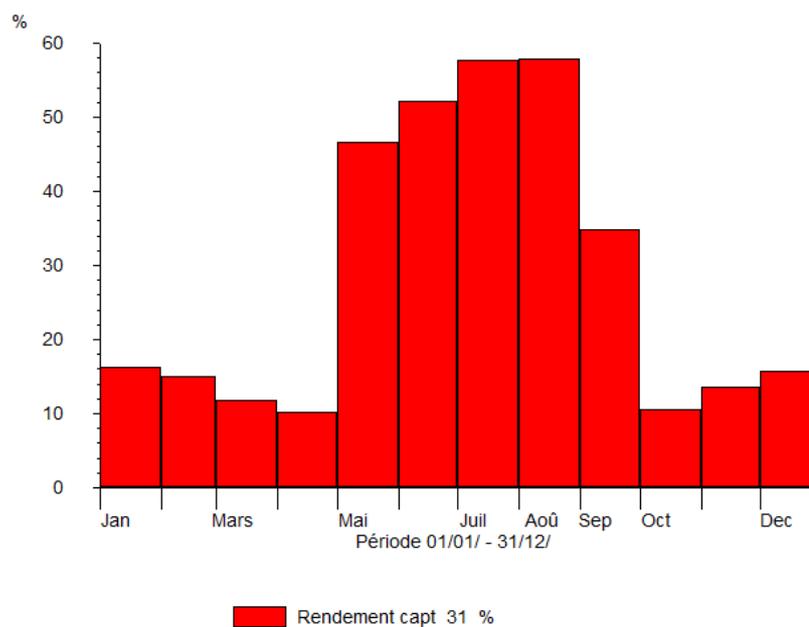


Figure 51: rendement de champ des capteurs solaire

### 3.4.5 Couverture solaire

Taux de couverture solaire d'eau chaude sanitaire (%)	Couverture solaire de la piscine (%)
100	39

Tableau 9: les taux de couvertures solaires

**3.4.6 Énergies des chaudières et pompes :**

-L'énergie totale des chaudières est de 13075 kWh avec une valeur maximale de 4800 kWh au milieu du mois de Mai et nulle dans la période hors saison de baignade.

-L'énergie des pompes de circulation est 258 kWh à une valeur presque constante de 65 kWh durant la période entre 15 Mai et 15 Septembre, et nulle après cette période.

**3.4.7 Analyse écologique**

Émissions de CO<sub>2</sub> évitées

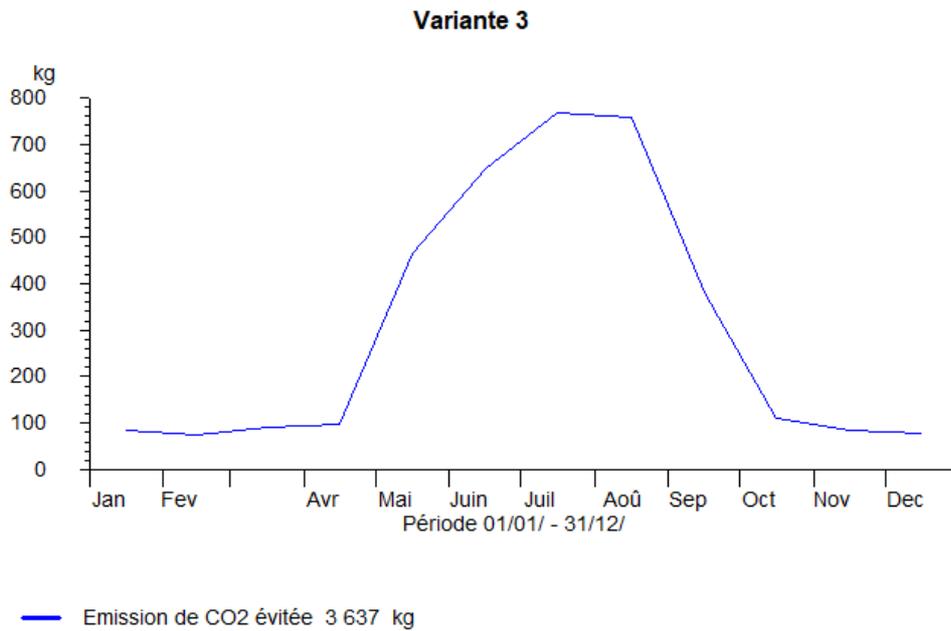


Figure 52: quantité d'émission de CO<sub>2</sub> évitée pendant l'année

### 3.4.8 Économies de gaz naturel

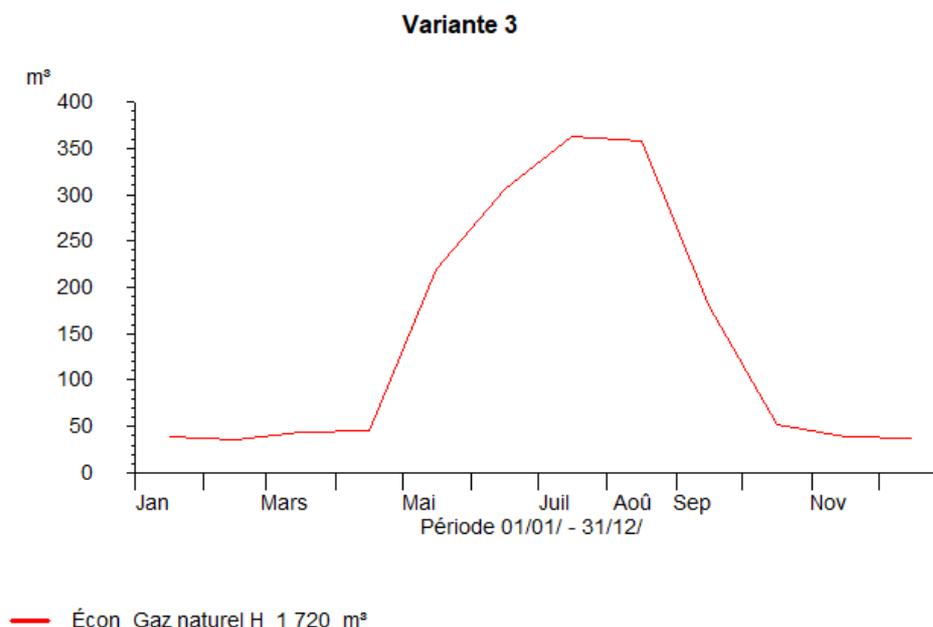


Figure 53: Économie de gaz naturel

## 3.5 Interprétation des résultats :

D'après les résultats de la simulation de cette installation thermique, on remarque que :

- ✧ Pour les pertes thermiques dans le champ des capteurs solaires, les pertes dans les tuyaux intérieurs et extérieurs sont très faibles et que les pertes des capteurs thermiques diminuent durant la période de chauffage de piscine ce qui est le contraire dans le cas des pertes optiques.
- ✧ Les pertes dans le ballon de stockage ne varient pas beaucoup durant l'année. On constate que les pertes de chaleur du ballon de stockage qui représentent les pertes à travers les parois, sont plus grandes que les pertes de chaleur solaire du ballon.
- ✧ Pour les pertes thermiques de la piscine extérieure, on peut voir clairement que les pertes par évaporation sont les plus importantes (presque 35% des pertes totales). Ainsi que les valeurs des pertes par renouvellement d'eau fraîche et par conduction sont presque négligeables par rapport aux autres valeurs. On remarque également que la valeur maximale des pertes thermiques par évaporation se trouve entre le mois de Juin et Juillet à cause des températures élevées.
- ✧ Ce système de chauffage a pu assurer une maintenance de température d'eau chaude sanitaire à 50% et une couverture totale des besoins.

- ✧ En utilisant les valeurs moyennes de pertes totales de la piscine, les apports d'énergie par le capteur et le rayonnement solaire sur la piscine sur l'équation 1 du 2<sup>ème</sup> chapitre, on trouve que

$$mC_p \frac{dT}{dt} = 822 \text{ kWh}$$

- ✧ Les rendements moyens de système de chauffage étudié et du champ des capteurs sont respectivement 30% et 31%, où le rendement maximal du système est 55% durant les deux mois : Juillet et Août. Tandis que le rendement des capteurs solaires thermiques atteint une valeur maximale de 58% durant les mêmes mois.
- ✧ Ce système de chauffage solaire couvre la totalité des besoins d'eau chaude sanitaire et 39% des besoins de la piscine.
- ✧ Ce système nous permet d'estimer une valeur de 3637 kg d'émissions de gaz CO<sub>2</sub> qui a été évitées durant une année de fonctionnement. Où on voit que la quantité de CO<sub>2</sub> évitées est très importante durant le chauffage de la piscine.
- ✧ Pour l'utilisation de gaz naturel pour le chauffage d'eau. Ce système solaire a fait l'objectif d'économiser une totalité de 1720 m<sup>3</sup> de gaz durant l'année.
- ✧ La simulation en utilisant une surface de captation de 70% de celle de la piscine et 100% de la surface de la piscine :

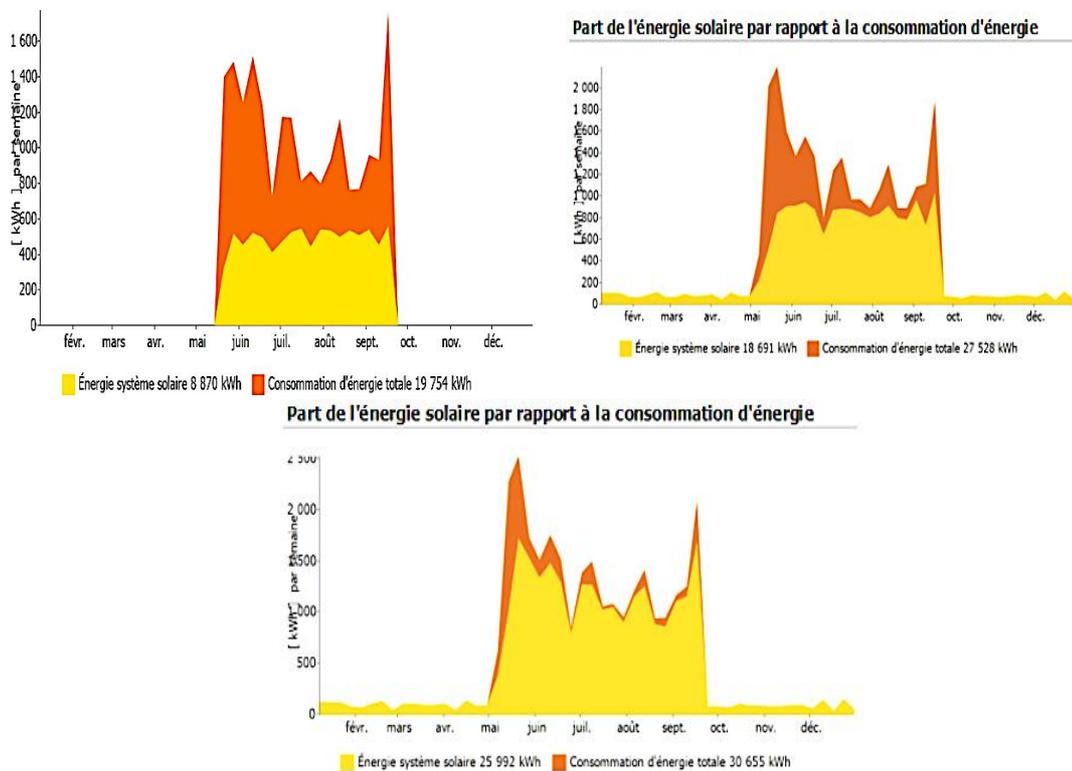


Figure 54: énergie solaire et consommation totale

On remarque que l'énergie produite par le soleil rapproche de la couverture totale des besoins de consommation en eau chaude en augmentant la surface de captation. Mais que le rendement total de système diminue à chaque fois.

### ***3.5.1 Solutions et perspectives :***

En plus d'augmenter la surface de captation, ils existent d'autres solutions pour améliorer le système de chauffage et augmenter le taux couverture solaire, tels que :

- rajouter une isolation thermique à la piscine pour diminuer les pertes par conduction.
- utiliser un abri de piscine ou un volet roulant pour garder la chaleur de la piscine et de la protéger au même temps. Une couverture de piscine installée durant la nuit peut réduire jusqu'à 50% des pertes thermiques.(49)
- implanter des contrôleurs et sondes de température des capteurs solaire thermiques pour une meilleure régulation.

Le directeur général de Piscines Desjoyaux Algérie, M. Hamiani Youcef, indiquait que les ventes des piscines ont passé de 50 piscines à 250 piscines annuellement au cours des 17 ans d'activité en Algérie, en précisant « le plus gros de notre clientèle sont des privés, notamment le Groupe Red Med qui dote ses infrastructures en piscines dans le Sud algérien.(50) ça peut ouvrir les portes aux nouvelles recherches et projets sur les piscines en Algérie dans le but d'économiser et de protéger notre entourage.

## **3.6 Conclusion :**

L'objectif de ce travail et d'examiner les performances de l'énergie solaire dans une piscine privée extérieure avec le chauffage d'eau chaude sanitaire d'une maison située à Akbou (Bejaia). Les deux facteurs techniques et écologique sont pris en considération pour déterminer le meilleur dimensionnement du système de chauffage solaire.

En utilisant 9 capteurs solaires thermiques à une surface totale de 22,59m<sup>2</sup>, on a pu obtenir un taux de couverture solaire total de 44,4 % dont un taux de couverture solaire de 100% d'eau chaude sanitaire, et un rendement du système de 54,2% durant l'été et 30% durant toute l'année. Les capteurs solaires n'ont pas pu couvrir la totalité des besoins de la piscine et ça revient de plusieurs facteurs tels que l'ombrage dans site, le fait que la piscine n'est pas isolée, absence de couverture solaire...

Ce qui implique que le dimensionnement de surface de captation qu'on a utilisé dans ce projet (50% de surface de la piscine) n'est pas suffisant.

Après avoir faire une simulation en changeant la surface de captation solaire à 70% et 100% de surface de piscine, on a obtenu des taux de couvertures solaires de la piscine de 62,7% et 82,2% respectivement. Mais également une diminution de rendement total du système remarquable de 26,7% durant l'année pour le système

de 16 capteurs et 18,5 % pour 32 capteurs, ainsi que l'utilisation d'un grand nombre de capteur reste une solution pas trop économique et pose le problème d'espace. Une des meilleures solutions pour augmenter le rendement du système de chauffage solaire pour piscine extérieure est d'utiliser une couverture piscine qui permet de diminuer les pertes par évaporation.

---

## Conclusion Générale

Au final, on peut dire que le chauffage solaire d'une piscine extérieure privée présente de nombreux avantages tels que prolonger la saison de baignade, améliorer le confort des baigneurs et réduire les coûts énergétiques. Le chauffage solaire offre une solution respectueuse de l'environnement, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en diminuant la dépendance aux combustibles fossiles.

Il est important de prendre en compte les caractéristiques spécifiques du système solaire, de bien entretenir son installation et de prendre en compte les conditions climatiques locales pour optimiser les performances du chauffage solaire de la piscine.

Ce travail était reparti en trois chapitres, où on a cité tout d'abord les principales recherches faites sur ce type de chauffage des piscines ainsi que les différents types de systèmes qui existent pour le chauffage des piscines extérieures.

Dans le deuxième chapitre, on a établi un dimensionnement numérique du système de chauffage solaire de l'eau et on a présenté les modèles et formules utilisés pour le calcul le bilan thermique et les pertes de chaleur.

Pour la simulation dynamique, on a utilisé le logiciel TSOL, qui permet d'évaluer les performances énergétiques du système et d'analyser les résultats de point de vue technique, écologique et économique.

Les résultats affichent un taux de couverture 100% des besoins en eau chaude sanitaire et un taux de 39% pour la piscine. Et un rendement de 30% du système de chauffage.

Ce système de chauffage solaire permet d'éviter une émission de presque 3637 kg de CO<sub>2</sub> dans l'environnement avec réductions de consommation de gaz naturel de 1720 m<sup>3</sup> durant l'année.

En considérant tous ces aspects, le chauffage solaire est une option intéressante pour les propriétaires de piscines extérieures privées, offrant à la fois confort, économies et protection de l'environnement.

# Références

1. World Energy Outlook 2022 : [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/)
2. Häufige Fragen zum Poolheizverbot - endet am 15. April 23 - bsw [Internet]. [cited 2023 Jul 9]. Available from: <https://www.bsw-web.de/2022/08/28/haeufige-fragen-zum-poolheizverbot-ab-1-september/>
3. Ibrahim MM, El Berry A, Ashour K. EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF SMART ENERGY MANAGEMENT SOLAR WATER HEATING SYSTEM FOR OUTDOOR SWIMMING POOL APPLICATION IN EGYPT. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*. 2022;18.
4. Gairaa K, Khellaf A, Benkacilai S, Guermoui M. Solar radiation measurements in Algeria: Case of Ghardaïa station as member of the enerMENA meteorological network. In: *Energy Procedia*. Elsevier Ltd; 2017. p. 50–4.
5. Fossil Fuel disasters: 10 of the Biggest [Internet]. Available from: <https://www.iamrenew.com/environment/fossil-fuel-disasters-10-biggest/>
6. Isabel G. Les capteurs solaires à air Réaliser, Installer, Gérer. Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire [Internet]. 2008 [cited 2023 Apr 14];(Editions Eyrolles):1–118. Available from: [www.editions-eyrolles.com](http://www.editions-eyrolles.com)
7. Le solaire photovoltaïque et thermique| Planète Énergies [Internet]. Available from: <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/deux-formes-solaire-solaire-photovoltaique-solaire-thermique>
8. Énergie solaire thermique : définition, développement par pays, usages [Internet]. Available from: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique>
9. Mechlouch RF, Fethi Mechlouch R, Ben Brahim A, Bourouis M, Coronas A. ETUDE DUN CHAMP DE CAPTEUR SOLAIRE A VIDE DANS LE CLIMAT DE L'ESPAGNE (Tarragona: lat.41°63'N, long.1°15,2'E) SOLEF: Absorption Systems for Simultaneous Refrigeration & Power driven by Thermal Solar Energy or Waste Heat View project photovoltaic optimization View project ETUDE DUN CHAMP DE CAPTEUR SOLAIRE A VIDE DANS LE CLIMAT DE L'ESPAGNE (Tarragona: lat.41°63'N, long.1°15,2'E) [Internet]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/263575904>
10. Flat Plate Solar Collector: Working, Types, Components & Benefits [Internet]. [cited 2023 Apr 21]. Available from: <https://www.solarsquare.in/blog/flat-plate-collector-overview/>
11. US Patent for Evacuated solar collector tube Patent (Patent # 4,987,883 issued January 29, 1991) - Justia Patents Search [Internet]. [cited 2023 Apr 22]. Available from: <https://patents.justia.com/patent/4987883>
12. Caloduc | Cuivre sans oxygène | Cuivre recyclé | Himin [Internet]. [cited 2023 Apr 22]. Available from: <http://himinsolar.fr/2-2-heat-pipe.html>
13. Solar heating-Swimming-pool heating Systems-Dimensions, design and installation guidelines Chauffage solaire-Systemes de chauffage pour piscines-Dimensions, conception et guide pour l'installation.
14. Heat Pump Water Heaters | Department of Energy [Internet]. [cited 2023 May 8]. Available from: <https://www.energy.gov/energysaver/heat-pump-water-heaters>

15. Jordaan M, Narayanan R. A numerical study on various heating options applied to swimming pool for energy saving. In: *Energy Procedia*. Elsevier Ltd; 2019. p. 131–8.
16. Chauffage de piscine : quel système choisir ? PAC, solaire, réchauffeur [Internet]. [cited 2023 May 22]. Available from: [https://www.guide-piscine.fr/pac-et-chauffage-piscine/chauffage-eau-piscine-188\\_A](https://www.guide-piscine.fr/pac-et-chauffage-piscine/chauffage-eau-piscine-188_A)
17. Li Y, Nord N, Huang G, Li X. Swimming pool heating technology: A state-of-the-art review. Vol. 14, *Building Simulation*. Tsinghua University; 2021. p. 421–40.
18. Le tapis solaire pour piscine [Internet]. [cited 2023 Jun 6]. Available from: [https://www.guide-piscine.fr/chauffage-solaire/le-tapis-solaire-pour-piscine-4271\\_A](https://www.guide-piscine.fr/chauffage-solaire/le-tapis-solaire-pour-piscine-4271_A)
19. Francey JLA, Golding P, Clarke' {" R. LOW-COST SOLAR HEATING OF COMMUNITY POOLS USING POOL COVERS. Vol. 25, *Solar Energy*.
20. The Good, Bad, and Ugly of a Pool Cover instead of an Enclosure | sunrooms-enclosures.com [Internet]. [cited 2023 Jun 6]. Available from: <https://www.sunrooms-enclosures.com/company/patio-enclosures-pool-enclosures-blog/the-good-bad-and-ugly-of-a-pool-cover-instead-of-an-enclosure.html#nav>
21. Aisa AM, John's S, Newfoundland C. Modeling and simulation of solar water heating system with Thermal storage. 2017.
22. United Nations D of E and SAPD. *World Population Prospects 2022 World Population Prospects 2022 Summary of Results*. United States; 2022.
23. Cabeza LF, Martorell I, Miró L, Fernández AI, Barreneche C. Introduction to thermal energy storage (TES) systems. In: *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Elsevier Inc.; 2015. p. 1–28.
24. Novo A V., Bayon JR, Castro-Fresno D, Rodriguez-Hernandez J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. Vol. 87, *Applied Energy*. Elsevier Ltd; 2010. p. 390–7.
25. Govaer D, Zarmi Y. Analytical evaluation of direct solar heating of swimming pools. *Solar Energy*. 1981;27(6):529–33.
26. Zein W. Etude d'un capteur absorbant l'énergie solaire par le fluide caloporteur: application au chauffage des piscines de plein-air. [Poitiers]; 1986.
27. Alkhamlst AI, Sheriff SA. PERFORMANCE ANALYSIS OF A SOLAR-ASSISTED SWIMMING POOL HEATING SYSTEM. Vol. 17. 1992.
28. Luis Duomarco AIU J, Duomarco JL, Pérez Magnou M. Solar heating of swimming pools [Internet]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/228704566>
29. Dongellini M, Falcioni S, Martelli A, Morini GL. Dynamic simulation of outdoor swimming pool solar heating. In: *Energy Procedia*. Elsevier Ltd; 2015. p. 1–10.
30. KOURIM Zohra. *Chauffage Solaire D'une Piscine Extérieure*. Blida; 2015.
31. Kaci K, Merzouk M, Merzouk NK, El Ganaoui M, Sami S, Djedjig R. Dynamic simulation of hybrid-solar water heated olympic swimming pool. In: *Energy Procedia*. Elsevier Ltd; 2017. p. 750–7.
32. A. Doudou, Moussa Aadmi, Y. Tahiri. Etude de distribution de température dans une piscine chauffée pour réduire la consommation d'énergie. Conference: 13ème Congrès de Mécanique, Meknès Maroc, 11—14 Avril 2017At: Meknès, Maroc [Internet]. 2017 Apr; Available from: <https://www.researchgate.net/publication/316241155>
33. Barbato M, Cirillo L, Menditto L, Moretti R, Nardini S. Feasibility study of a geothermal energy system for indoor swimming pool in Campi Flegrei area. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018 Jun 1;6:421–5.
34. Gonçalves RS, Palmero-Marrero AI, Oliveira AC. Analysis of swimming pool solar heating using the utilizability method. In: *Energy Reports*. Elsevier Ltd; 2020. p. 717–24.

35. Zhao J, Bilbao JI, Spooner ED, Sproul AB. Experimental study of a solar pool heating system under lower flow and low pump speed conditions. *Renew Energy*. 2018 Apr 1;119:320–35.
36. Ghabour R, Hossain S, Korzenszky PE. Feasibility Study of Using Solar Thermal Energy for Heating Swimming Pools in Central European Climate (Hungary as a Case Study). *Hungarian Agricultural Engineering [Internet]*. 2022;(41):72–8. Available from: <http://real.mtak.hu/155123/>
37. Ressources naturelles Canada. Centre de la technologie de l'énergie de CANMET. Analyse de projets d'énergies propres : manuel d'ingénierie et d'études de cas RETScreen- Chapitre Analyse de projets de chauffage solaire de l'eau. Québec - Québec : Ressources naturelles Canada [2003], ©2001-2004 . 2003;
38. Salgado P, Dorantes R, Orellán G, López A, Jiménez M, González H, et al. Transient thermal rating in a flat-plate solar heating system of a public olympic pool [Internet]. Vol. 59, *Revista Mexicana de Física S*. 2013. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57030970029>
39. Buonomano A, De Luca G, Figaj RD, Vanoli L. Dynamic simulation and thermo-economic analysis of a PhotoVoltaic/Thermal collector heating system for an indoor-outdoor swimming pool. *Energy Convers Manag*. 2015 Jul 15;99:176–92.
40. Lam JC, Chan WW. Life cycle energy cost analysis of heat pump application for hotel swimming pools. *Energy Convers Manag*. 2001 Jul 1;42(11):1299–306.
41. American Society of Heating R and ACE. 2003 ASHRAE handbook : heating, ventilating, and air-conditioning applications. [cited 2023 Jul 4]; Available from: <https://archive.org/details/2003ashraehandbo0000unse>
42. 2011 ASHRAE HANDBOOK HVAC Applications SI Edition Supported by ASHRAE Research [Internet]. Available from: [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org)
43. EnergieSoftware GmbH V. T\*SOL Pro Conception et Simulation Dynamique d'installations solaires thermiques Manuel d'utilisateur [Internet]. 1993. Available from: [www.valentin.de](http://www.valentin.de)
44. Kharchi R, Benyoucef B, Belhamel M, 62 BP, De L'observatoire R, Bouzaréah A, et al. Système solaire combiné Estimation des besoins énergétiques. 2007.
45. LDE+N°23+-+La+surveillance+des+réseaux+d'eau+chaude.
46. SAUNIER DUVAL. Prix en Algérie de U de Capteur solaire thermique pour installation individuelle, sur toiture terrasse. Générateur de prix de la construction. CYPE Ingenieros, S.A. [Internet]. [cited 2023 Jul 6]. Available from: [http://saunier-duval.algerie.prix-construction.info/renovation/Equipements\\_techniques/ECS\\_et\\_chauffage/Capteurs\\_solaires/TCS010\\_Capteur\\_solaire\\_thermique\\_pour\\_inst\\_0\\_0\\_2\\_0\\_1\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0.html](http://saunier-duval.algerie.prix-construction.info/renovation/Equipements_techniques/ECS_et_chauffage/Capteurs_solaires/TCS010_Capteur_solaire_thermique_pour_inst_0_0_2_0_1_0_0_0_0_0_0_0_0_0.html)
47. Ruiz E, Martínez PJ. Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model. *Solar Energy*. 2010 Jan;84(1):116–23.
48. About us | Valentin Software [Internet]. [cited 2023 Jul 4]. Available from: <https://valentin-software.com/en/company/about-us/>
49. Zuccari F, Santiangeli A, Orecchini F. Energy analysis of swimming pools for sports activities: Cost effective solutions for efficiency improvement. In: *Energy Procedia*. Elsevier Ltd; 2017. p. 123–30.
50. Algérie - Le marché de la piscine en pleine croissance - Business France [Internet]. Available from: <https://www.businessfrance.fr/algérie-le-marche-de-la-piscine-en-pleine-croissance>



# Références

1. World Energy Outlook 2022, IEA (International Energy Agency), November 2022.
2. Site allemand : (Häufige Fragen zum Poolheizverbot), août 2022, <https://www.bsw-web.de/2022/08/28/haeufige-fragen-zum-poolheizverbot-ab-1-september/>.
3. *IBRAHIM M. EL BERRY A. ASHOUR K.*, Experimental and theoretical study of smart energy management solar water heating system for outdoor swimming pool application in Egypt, *Frontiers in heat and mass transfer*, 2022.
4. *GAIRAA K. KHELLAF A. BENKACILAI S. GUERMOUI M.*, Solar radiation measurements in Algeria: case of Ghardaïa station, *Energy Procedia*, 2017.
5. 10 of the biggest fossil fuel disasters: <https://www.iamrenew.com/environment/fossil-fuel-disasters-10-biggest/>.
6. *ISABEL G.*, Les capteurs solaires à air : Réaliser /Installer/ Gérer, 2008.
7. Le solaire photovoltaïque et thermique, *Planète Énergie*, <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/deux-formes-solaire-solaire-photovoltaique-solaire-thermique>.
8. Énergie solaire thermique : définition/ développement par pays/ usages, <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique>.
9. *MECHLOUCH RF. FETHI MECHLOUCH R. BEN BRAHIM A. BOUROUIS M. CORONAS A.*, Étude d'un champ de capteur solaire à vide dans le climat de l'Espagne, *SOLEF*, 2014
10. Flat plates solar collector: working/ types/ components & benefits, <https://www.solarsquare.in/blog/flat-plate-collector-overview/>.
11. US patent for evacuated solar collector tube patent, 1991, <https://patents.justia.com/patent/4987883>.
12. Caloduc/ cuivre sans oxygène/ cuivre recyclé, Himin, <http://himinsolar.fr/2-2-heat-pipe.html>.
13. Chauffage Solaire/ Systèmes de chauffage pour piscines/ Dimensions, Conception et Guide pour Installation, ISO TR12596, décembre 1995.
14. Heat pump water heaters/ Department of Energy <https://www.energy.gov/energysaver/heat-pump-water-heaters>.
15. *JORDAAN M. NARAYANAN R.*, A numerical study on various heating options applied to swimming pool for energy saving, *Energy Procedia*, 2019.
16. Chauffage de piscine : quel système choisir ? PAC/ solaire/ réchauffeur, [https://www.guide-piscine.fr/pac-et-chauffage-piscine/chauffage-eau-piscine-188\\_A](https://www.guide-piscine.fr/pac-et-chauffage-piscine/chauffage-eau-piscine-188_A).
17. *LI Y. NORD N. HUANG G. LI X.*, Swimming pool heating technology: a state of art review, Tsinghua University, 2021.
18. Le tapis solaire pour piscine, [https://www.guide-piscine.fr/chauffage-solaire/le-tapis-solaire-pour-piscine-4271\\_A](https://www.guide-piscine.fr/chauffage-solaire/le-tapis-solaire-pour-piscine-4271_A).
19. *FRANCEY JLA. GOLDING P. CLARKE R.*, Low cost solar heating of community pools using pool covers, *Energy Energy*, 2003.
20. The good/ Bad and Ugly of a pool cover instead of an enclosure, [sunrooms-enclosures.com](http://sunrooms-enclosures.com).
21. *AISA M.*, Modeling and simulation of solar water heating system with thermal storage, Newfoundland University, 2017.

22. World Population Prospects 2022 Summary of Results, United Nations D of E and SAPD.
23. *CABEZA LF. MARTORELL I. MIRÓ L. FERNÁNDEZ AI. BARRENECHE C.*, Introduction to thermal energy storage (TES) systems, Elsevier Inc, 2015.
24. *NOVO A V. BAYON JR. CASTRO-FRESNO D. RODRIGUEZ-HERNANDEZ J.*, Review of seasonal heat storage in large basins, Applied Energy, Elsevier Ltd, 2010.
25. *GOVAER D. ZARMI Y.*, Analytical evaluation of direct solar heating of swimming pools, Solar Energy, 1981.
26. *ZEIN W.*, Étude d'un capteur absorbant l'énergie solaire par le fluide caloporteur : application au chauffage des piscines de plein-air, 1986.
27. *ALKHAMLSTAI. SHERIFF SA.*, performance analysis of solar assisted swimming pool heating system, 1992.
28. *LUIS DUOMARCO AIU J. DUOMARCO JL. PÉREZ MAGNOU M.*, solar heating of swimming pools, août 2005.
29. *DONGELLINI M. FALCIONI S. MARTELLI A. MORINI GL.*, dynamic simulation of outdoor swimming pool solar heating, Energy Procedia, 2015.
30. *KOURIM Z.*, Chauffage solaire d'une piscine extérieure, Blida, 2015.
31. *KACI K. MERZOUK M. MERZOUK NK. EI GANAOUI M. SAMI S. DJEDJIG R.*, Dynamic simulation of hybrid-solar water heated olympic swimming pool, Energy Proedia, 2017.
32. *DOUDOU A. AADMI M. TAHIRI Y.*, Etude de distribution de température dans une piscine chauffée pour réduire la consommation d'énergie, Conférence : 13<sup>ème</sup> congrès de mécanique, Maroc, Avril 2017.
33. *BARBATO M. CIRILLO L. MENDITTO L. MORETTI R. NARDINI S.*, Feasibility study of a geothermal energy system for indoor swimming pool in Campi Flegrei area, Thermal Science and Engineering Progress, 2018.
34. *GONÇALVES RS. PALMERO-MARRERO AI. OLIVEIRA AC.*, Analysis of swimming pool solar heating using the utilizability method, Energy Reports, Elsevier Ltd, 2020
35. *ZHAO J. BILBAO JI. SPOONER ED. SPROUL AB.*, Experimental study of a solar pool heating system under lower flow and low pump speed conditions, Renew Energy, 2018.
36. *GHABOUR R. HOSSAIN S. KORZENSZKY PE.*, Feasibility study of using solar thermal energy for heating swimming pools in central European climate (Hungary), Hungarian Agricultural Engineering, 2022.
37. Analyse de projets d'énergies propres : manuel d'ingénierie et d'études de cas RETScreen- Chapitre Analyse de projets de chauffage solaire de l'eau, Ressources naturelles Canada. Centre de la technologie de l'énergie de CANMET, 2003.
38. *SALGADO P. DORANTES R. ORELLÁN G. LÓPEZ A. JIMÉNEZ M. GONZÁLEZ H.* et al., Transient thermal rating in a flat plate solar heating system of a public olympic pool, 2013.
39. *BUONOMANO A. DE LUCA G. FIGAJRD. VANOLI L.*, Dynamic simulation and thermo-economic analysis of a Photovoltaic/Thermal collector heating system for an indoor-outdoor swimming pool, Energy Convers Manag, 2015.
40. *LAM JC. CHAN W.*, Life cycle energy cost analysis of heat pump application for hotel swimming pools, Energy Convers Manag, Juillet 2001.
41. Heating ventilating and air conditioning applications, ASHRAE 2003 Handbook.
42. HVAC applications, ASHRAE 2011 Handbook.
43. T\*SOL Pro conception et simulation dynamique d'installation solaire thermique, Manuel d'utilisateur, 1993.

44. *KHARCHI R. BENYOUCEF B. BELHAMEL M.*, Système solaire combiné/ Estimation des besoins énergétiques, 2007.
45. La surveillance des réseaux d'eau chaude sanitaire, Agence régionale de santé, Les services de l'état dans la manche, France.
46. Saunier Duval/ Prix en Algérie du capteur solaire thermique pour installation individuelle, Générateur de prix de la construction CYPE Ingenieros, <http://saunier-duval.algerie.prix->.
47. *RUIZ E. MARTÍNEZ PJ.*, Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model, Solar Energy, 2010.
48. Valentin Software/ site officiel, <https://valentin-software.com/en/company/about-us/>.
49. *ZUCCARI F. SANTIANGELIA. ORECCHINI F.*, Energy analysis of swimming pools for sports activities: cost effective solutions for efficiency improvement, Energy Procedia, 2017.
50. Algérie : Le marché de la piscine en pleine croissance, Business France, <https://www.businessfrance.fr/algerie-le-marche-de-la-piscine-en-pleine-croissance>.