

Projet de Physique P6
STPI/P6/2022 – 033

**ÉTUDE DE FAISABILITÉ D'UNE
INSTALLATION D'EAU CHAUDE
SANITAIRE DANS UN HÔTEL DE
DISNEYLAND**



Etudiants :

Chloé BRINGUIER

Ethan FOSSE

Wentai FU

Alexandre DANTAS

Clémentine FRANCOIS

Guillaume GODINEAU

Enseignant-responsable du projet :

Mohammed Amine Zainine

Date de remise du rapport : **11/06/2022**

Référence du projet : **STPI/P6/2022-032**

Intitulé du projet : **Étude de faisabilité d'une installation solaire dans un hôtel de Disneyland Paris**

Type de projet : **Simulation, calcul et bibliographie.**

Objectifs du projet :

L'objectif de ce projet est d'étudier la faisabilité d'une installation solaire d'eau chaude sanitaire. Pour cela nous allons dimensionner une installation solaire thermique.

Ce sujet est particulièrement d'actualité, puisqu'il est important de s'affranchir des énergies fossiles, et de privilégier les énergies renouvelables.

Ainsi, nous avons choisis l'étude de cas d'une hôtel à Disneyland Paris, ayant une demande en eau chaude relativement importante.

Mots-clefs du projet : *installation solaire, étude de faisabilité.*

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **xxx**

TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1. Principe de fonctionnement.....	7
3.2. Partie analytique.....	7
3.3. Transferts thermiques au sein des panneau solaire.....	9
3.4. Calcul de la surface d'installation nécessaire.....	9
3.5. Types d'installations solaires.....	10
3.6. Les composants.....	11
3.7. Dimensionnement d'une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire.....	15
3.8. Étude économique.....	19
4. Conclusions et perspectives.....	21
Bibliographie.....	22
5. Annexes	23
5.1. Dimensionnement chauffe eau solaire suivant la zone géographique.....	23
5.2. CESI à éléments séparés à circulation forcée.....	23
5.3. CESI à éléments séparés à thermosiphon.....	24
5.4. CESI avec un monobloc.....	24
5.5. CESI avec un fonctionnement optimisé.....	24
5.6. Principe CESC.....	25
5.7. Principe chauffe eau sanitaire semi-collectif.....	25
5.8. Capteurs.....	26
5.9. Pompes.....	27
5.10. Échangeur caloduc.....	28
5.11. Échangeur à plaques.....	28
5.12. Effet de serre.....	28
5.13. Graphiques associés aux tableaux.....	29
5.14. Courbe de l'évolution de la production en fonction du stock pour différentes surfaces de capteurs.....	30
5.15. Devis.....	31

NOTATIONS, ACRONYMES

Fluide caloporteur : un fluide qui transporte la chaleur

ECS : eau chaude sanitaire

CESC : chauffe eau sanitaire collectif

CESI : chauffe eau sanitaire individuel

Circulateur : pompe de circulation d'une installation de chauffage d'eau chaude sanitaire

PER : Polyéthylène Réticulé haute densité

PPR : Polyéthylène Réticulé

PVC-C : Polychlorure de vinyle surchloré

IGP : irradiation global dans le plan

IBP : irradiation directe dans le plan

IDP : irradiation solaire diffuse dans le plan

IRP : irradiation solaire réfléchie dans le plan

Solo : logiciel pour dimensionner les installations solaires thermiques

1. INTRODUCTION

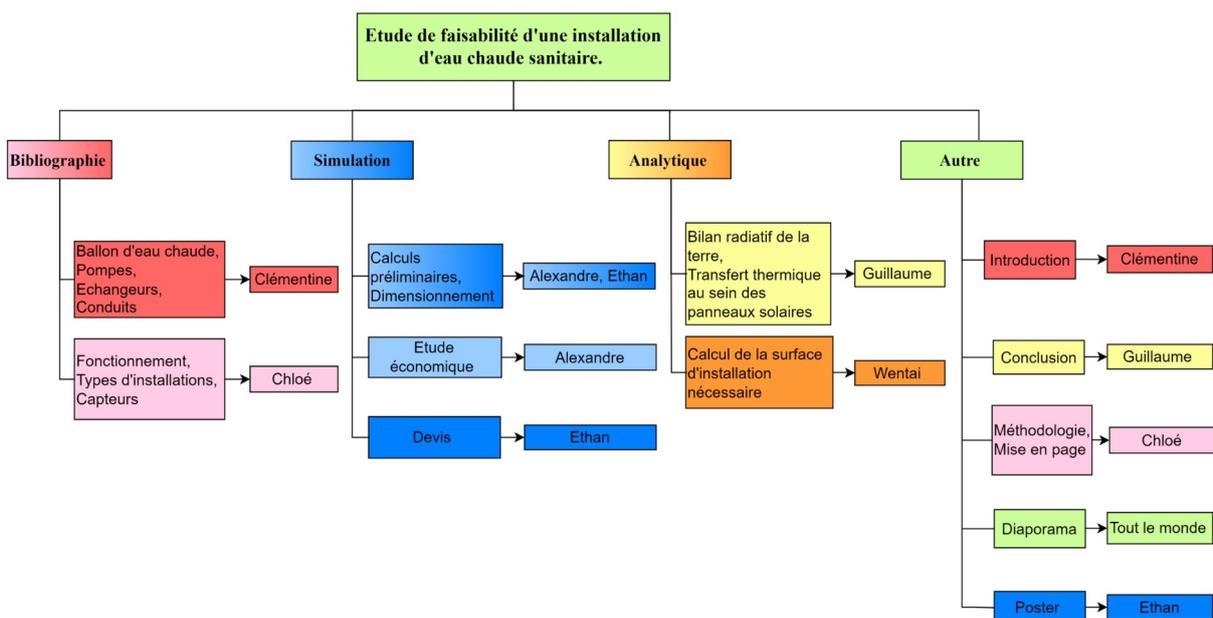
Dans notre société actuelle, la réduction de l'utilisation des énergies fossiles est une priorité. Pour cela il est très intéressant de se tourner vers une énergie dont nous disposons en quantité illimitée : l'énergie solaire. En effet, les rayons du soleil, possédant une grande énergie, nous permettent de disposer d'installations solaires pour alimenter en eau chaude ou en électricité de nombreux foyers. En 2020, 2,6 % de l'électricité française était produite à l'aide du soleil, et ce pourcentage ne cesse d'augmenter. Il est effectivement prévu, dans le cadre de la transition écologique, d'équiper 4 millions de foyers français en panneaux photovoltaïques, contre 110 000 en 2021. Il s'agit donc d'un marché en plein essor.

De surcroît, un système de chauffage d'eau ou de production d'électricité fonctionnant grâce au soleil ne rejette pas de CO₂ ni de polluants et ne demande que peu d'énergie pour fonctionner. Dans le contexte de crise écologique que nous traversons et des fortes émissions de gaz carboniques dans l'air, il est donc très important de se diriger vers ce type d'installation.

Dans ce rapport, il va être question d'étudier le principe de fonctionnement d'une installation solaire, de faire une analyse mathématique et physique de ce type d'installation, d'étudier les aspects techniques des différents types d'installations et des composants d'une installation solaire comme celle que nous allons étudier, ainsi qu'une étude de faisabilité et de rentabilité dans le cadre d'un hôtel de Disneyland Paris.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour mener à bien ce projet, sous les conseils de notre encadrant, nous avons décidé de nous diviser en 3 sous-groupes pour chaque grand domaine du projet dans l'objectif d'être le plus efficace et complet possible. Chloé et Clémentine se sont occupées de la bibliographie, Ethan et Alexandre de la simulation et prise en mains des logiciels. Enfin Guillaume et Wentai se sont occupés de tout l'aspect mathématique du projet. Nous nous sommes répartis suivant nos envies et compétences ainsi chaque individu a pu apporter ses connaissances et idées au projet. Chaque sous groupe n'a pas eu la même organisation puisque certaines parties pouvaient être traitées par une seule personne (*exemple* : recherche) alors que les parties avec les logiciels nécessitaient la présence de deux personnes simultanément afin d'échanger et de s'entraider. Notre rendez-vous hebdomadaire avec Monsieur Zainine, nous a permis de nous tenir au courant de l'avancée du projet mais aussi d'apporter nos idées sur une autre partie que la notre. Ce projet s'est réalisé dans la bonne entente et la convivialité.



Organigramme de l'organisation du projet

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Principe de fonctionnement

Une installation solaire permet de convertir la lumière du soleil en eau chaude sanitaire. Cette eau nous sert en grande partie à nous laver.

Ce type d'installation thermique utilise des capteurs solaires. Ces derniers permettent de **capter le rayonnement du soleil et de le transformer en énergie thermique**, en effet, un fluide caloporteur, circulant sous les panneaux, va être chauffé par cette dernière. Ensuite, ce fluide circulant dans un tube, est acheminé vers un échangeur thermique situé dans un ballon de stockage. Via cet échangeur l'énergie du fluide caloporteur va être cédée à l'eau sanitaire. Ainsi de l'eau chaude sanitaire va être produite et le fluide va repartir une fois refroidi, en direction des capteurs. Tant qu'il y a suffisamment de soleil ce processus s'effectue en boucle, mais dès lors qu'il n'y a plus suffisamment d'ensoleillement un système d'appoint prend le relais. C'est le système de régulation qui permet de gérer l'énergie solaire et celle d'appoint.

Il est important de ne pas confondre les **panneaux Thermiques** et les **panneaux Photovoltaïques**, dans les deux cas, ils servent à produire de l'énergie à l'aide du soleil, mais pour deux utilisations complètement différentes. Les premiers permettent de produire de l'eau chaude alors que les autres produisent de l'électricité.

Les installations solaires de production d'eau chaude sanitaire ont de nombreux avantages ; réduire ses factures d'eau chaude, être moins dépendant des fournisseurs, favoriser et participer à la transition écologique, son fonctionnement ne consomme pas de CO₂.

Cependant, pour maximiser son rendement, il faut prendre en compte certains facteurs comme **l'inclinaison** et **l'orientation des panneaux**, mais aussi **l'ensoleillement de la région**. En effet en France, il est peu probable qu'un système de panneaux solaires puisse subvenir à une consommation d'eau chaude sanitaire quotidienne.

3.2. Partie analytique

L'objectif de cette partie est de comprendre les différents mécanismes physiques qui entrent en jeu dans l'utilisation d'une installation solaire ainsi que les différents calculs permettant de dimensionner l'installation en fonction de nos besoins.

3.2.1. Bilan radiatif de la Terre

Dans un premier temps nous allons chercher à comprendre d'où provient l'énergie qui est utilisée par les panneaux solaires et comment celle-ci évolue en fonction du temps et de l'espace.

3.2.1.1. La puissance surfacique solaire reçue par la Terre

Le Soleil émet un rayonnement d'une puissance moyenne totale de $3,87 \cdot 10^{26}$ Watt. Ce rayonnement se propage uniformément dans toutes les directions de l'espace. Au niveau de la Terre cette puissance est donc répartie sur une sphère de rayon égal à la distance terre soleil.

$$P_s = \frac{P_{\text{soleil}}}{S_{\text{sphère}}} \quad \text{AN : } P_s = \frac{3,87 \cdot 10^{26}}{4 \cdot \pi \cdot d_{TS}^2} = 1370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Cette valeur correspond à la puissance reçue par une surface orthogonale au rayonnement solaire. La puissance réel moyenne est $342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, division par 4 liée au rapport entre la surface d'un disque et d'une sphère.

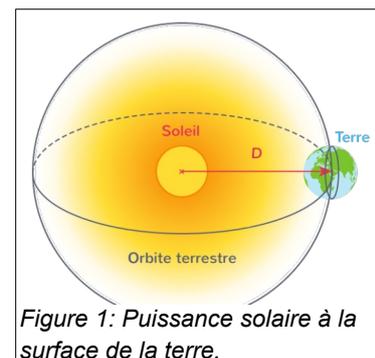


Figure 1: Puissance solaire à la surface de la terre.

3.2.1.2. Albédo terrestre

La Terre va ensuite absorber une partie de cette puissance et en réfléchir l'autre. La grandeur physique qui caractérise la capacité de la Terre à réfléchir les rayonnements est appelée l'albédo terrestre. L'albédo dépend de la nature du sol.

La neige par exemple va beaucoup plus réfléchir les rayonnements que les océans.

Type de surface	Océan	Forêt	Culture	Sable	Glace	Neige
Albédo	0,07	0,1	0,2	0,35	0,35	0,8

Tableau 1: Albédo les plus courants sur la terre.

En sommant l'albédo de chaque surface multiplié par la proportion de celles-ci sur la Terre nous obtenons que l'**albédo terrestre vaut environ 0,3**. Nous pouvons ainsi calculer la puissance réfléchiée et absorbée par la Terre.

$$P_{\text{réfléchiée}} = P_s * 0,3 = 107 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$P_{\text{absorbée}} = P_s * (1 - 0,3) = 235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

3.2.1.3. Effet de serre

Après avoir absorbé le flux thermique solaire, la terre va à son tour transférer cette puissance thermique vers l'atmosphère par convection et par rayonnement. Cette puissance émise est de $559 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Dans l'atmosphère cette puissance émise va être absorbée par les gaz à effet de serre comme l'eau, le dioxyde de carbone ou le méthane. Ces gaz vont ensuite émettre des rayonnements dont une partie en direction de la Terre ($342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

$$P_{\text{émise}} = P_{\text{émise surface Terre}} - P_{\text{renvoyé par l'atmosphère}} = 559 - 342 = 235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Nous remarquons que la puissance totale émise par la terre est égale à celle qu'elle absorbe. **La Terre est donc dans un équilibre thermodynamique.**

3.2.1.4. Variation de la puissance solaire reçue

Pour repérer la position du soleil nous avons choisi d'utiliser les coordonnées horizontales car c'est le système le plus utilisé. Ses plans de références sont l'horizontale du lieu d'observation et le plan méridien. Ensuite nous définissons la position du soleil grâce à deux coordonnées : l'azimute (w) et la hauteur (h).

Les rayons solaires sont rarement orthogonaux à une surface définie sur la Terre. La puissance surfacique reçue par cette surface dépend donc de l'angle h entre celle-ci et les rayons.

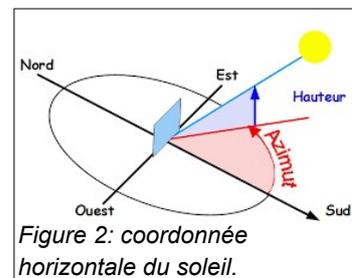


Figure 2: coordonnée horizontale du soleil.

$$S = AB \cdot BC = \frac{1}{\sin(h)} \cdot \frac{1}{\cos(w)} \Rightarrow P_{\text{reçue}} = P_s \cdot \frac{1}{S} = P_s \cdot \sin(h) \cos(w)$$

Le moment dans la journée, la latitude du lieu ainsi que le jour de l'année ont une influence sur l'azimute et sur la hauteur du soleil et donc sur l'éclairement du panneau. Comme l'axe nord-sud de la Terre forme un angle d'environ $13,5^\circ$ avec les rayons du Soleil. **La Terre n'est pas irradiée de la même façon toute l'année.** En effet en été l'hémisphère nord est irradié plus longtemps et avec un angle plus faible donc la puissance moyenne quotidienne reçue est plus importante. Nous remarquons aussi que la **latitude a un impact très important sur l'éclairement.** Plus la surface éclairée est proche de l'équateur, plus l'éclairement de celle-ci sur une année sera importante.

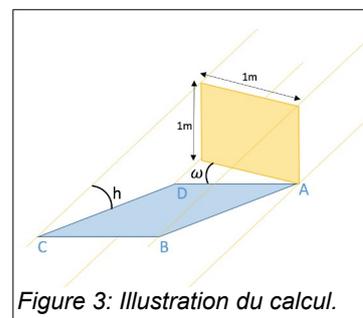


Figure 3: Illustration du calcul.

En conclusion, il est nécessaire de bien choisir le type de capteur et l'orientation de ceux-ci selon notre besoin et notre lieu d'installation.

3.3. Transferts thermiques au sein des panneau solaire

Nous allons, maintenant, chercher à **calculer la surface de panneaux solaires** que nous devons installer selon nos besoins et selon le type de capteurs choisi. Le capteur solaire que nous avons choisi a un rendement de 59%. Ce rendements est dû à 3 transferts thermiques principaux :

- La réflexion des rayons lumineux du soleil: l'albédo du panneau est de 0,05.
- Le rayonnement propre du panneau.
- Les pertes par convection avec l'air ambiant.

Donc $P_{transmise \text{ à l'eau}} = 0,59 \cdot P_{reçue}$

Nous avons vu que notre besoin quotidien est de 160 000 L d'eau chauffée à 60°C.

Pour simplifier les calculs, nous supposons que nous chauffons chaque jour un ballon de 160 000 L **totalemment calorifugé**.

Bilan thermique :

$$P_{crée} = P_{échangée} + P_{stockée} \text{ et } P_{crée} = 0 \text{ W} \Rightarrow P_{échangée} = -P_{stockée} = -P_{transmise} \quad P_{stockée} = \int \int \int_V \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dV$$

Nous faisons l'hypothèse que **l'augmentation de la température est supposée linéaire par rapport au temps**, et que la **température est uniforme** dans le ballon.

ρ : masse volumique de l'eau = 997 kg/m³

C: capacité thermique de l'eau = 4 185 J/K/kg

$T(t=0) = T_{eau courante} = 15^\circ C$ et $T(t=24 h) = T_{voulu} = 60^\circ C$

$$T(t) = \frac{60-15}{24 \times 3600} t + 15 \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{60-15}{24 \times 3600} = \frac{1}{1920} \Rightarrow P_{stockée} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} V \text{ et } P_{transmise} = P_{stockée}$$

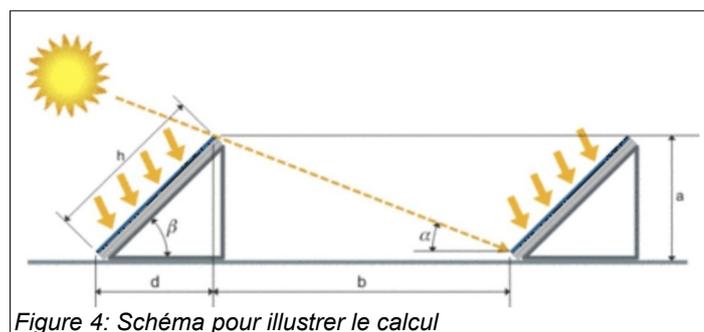
$$AN: P_{stockée} = 997 * 4 \frac{185 * 1}{1920} * 160 = 347 703 \text{ W} \text{ et } P_{reçue} = \frac{347 703}{0,59} = 589 328 \text{ W}$$

$$S_{nécessaire} = \frac{P_{reçue}}{P_{surfaique solaire moyenne}} = \frac{589 328}{342} = 1723 \text{ m}^2$$

3.4. Calcul de la surface d'installation nécessaire

Les capteurs sont placés en biais, **nous devons calculer la distance entre les capteurs pour nous assurer qu'ils reçoivent 100 % de la lumière du soleil** à tout moment de la journée et tout au long de l'année.

Pour Paris, c'est le 21 décembre que le soleil est le plus bas de l'année. Ainsi, l'angle azimute (α sur le schéma) est de 18° à Paris. Nous avons choisi cet angle pour calculer la distance minimale b entre deux panneaux pour ne pas que les panneaux se fassent de l'ombre entre eux.



Largeur du capteur : $h = 2,058 \text{ m}$, longueur du capteur : $l = 4,902 \text{ m}$, angle d'inclinaison du capteur : $\beta = 30^\circ$, largeur au sol d'un panneau : $d = h \cdot \cos(\beta) = 1,78 \text{ m}$, hauteur d'un panneau : $a = h \cdot \sin(\beta) = 1,03 \text{ m}$, longueur entre deux panneaux : $b = a / \tan(\alpha) = 3,17 \text{ m}$, surface du bâtiment : $200 * 26 = 5 200 \text{ m}^2$

Maintenant que nous avons toutes ces informations, **nous pouvons calculer la surface de panneau solaire maximale pouvant être installée sur le toit** du bâtiment.

$$d+b = 4.95$$

Nombre de rangée sur la largeur: $5 * 4,95 + 1,25 = 26$

Nombre de capteurs sur la longueur: $4,902 * 40 + 3,92 = 200$, soit 40 en ligne

Nombre de capteur : $40 * 5 = 200$

Surface disponible : $200 * (2.058 * 4.902) = 2\ 018\ m^2$ et $2018 > 1723 \Rightarrow S_{disponible} > S_{nécessaire}$

La surface de panneaux solaires que nous pouvons installer sur le toit de notre bâtiment est supérieure à la surface de panneaux dont nous avons besoin donc **l'installation est théoriquement faisable.**

3.5. Types d'installations solaires

3.5.1. Individuel

Le CESI est l'installation **la plus simple à mettre en place**, elle permet de chauffer en partie l'eau chaude sanitaire d'une **maison**. Il existe plusieurs techniques permettant la mise en place de cette installation.

3.5.1.1. CESI à éléments séparés

Les capteurs se situent à l'extérieur du bâtiment, par exemple sur le toit d'une maison ou d'un parking, alors que le chauffe-eau est placé à l'intérieur de l'habitation. Ce système a l'avantage d'être plus esthétique qu'un monobloc et il protège l'eau des intempéries telles que le gel, neige, chaleur, etc. Le fluide caloporteur est composé d'eau et de glycol, par conséquent, il est **parfaitement adapté pour un bâtiment en métropole**, l'eau chaude sera toujours disponible avec un débit élevé. Cependant, si le ballon ne se situe pas dans une pièce fermée, le stockage de l'eau peut entraîner des déperditions de chaleur. De plus, il faut que la distance capteur-ballon soit assez courte pour minimiser les pertes thermiques.

3.5.1.1.1. Circulation forcé

Le modèle de circulation forcée se compose d'une pompe électrique qui fait la liaison entre les capteurs solaires et le ballon. Avec l'aide d'un régulateur la pompe entraîne la circulation du fluide caloporteur suivant les températures de l'eau sanitaire déjà contenue dans le ballon et du capteur déterminées par des sondes de température. Autrement dit si l'eau contenue dans le ballon est plus chaude que la température captée par la sonde au niveau des panneaux solaires alors la circulation du liquide s'arrête. Et inversement, la circulation du liquide recommence si l'eau du ballon est plus froide que la température des capteurs solaires. **L'avantage de ce modèle** est que nous pouvons décider de placer le ballon de stockage où nous le souhaitons dans la maison dans la limite du raisonnable (grenier, cave, etc), car le fluide est sous pression et qu'une pompe appelée circulateur permet de transporter le liquide entre l'échangeur contenu dans le ballon et les panneaux solaires.

Il est important que le liquide caloporteur n'entre jamais en contact avec l'eau chaude sanitaire, c'est pourquoi le rôle de l'échangeur est capital, il permet d'isoler ce fluide de l'eau sanitaire. En effet, nous utilisons la plupart du temps de l'eau glycolée pour que même stagnante l'eau ne gèle pas, alors que l'ingestion de glycol est très toxique pour notre santé. Une particularité d'un chauffe-eau à circulation forcée est qu'il intègre deux circuits, l'un permet le réchauffement du fluide dans les panneaux solaires et l'autre transporte l'eau jusqu'au robinet. Évidemment le changement de circuit se fait dans le ballon, qui permet de stocker l'ECS.

3.5.1.1.2. Thermosiphon

Le modèle de circulation en thermosiphon autrement dit, sans pression, n'est pas composé d'un circulateur ni d'un régulateur contrairement au système vu précédemment. La circulation du fluide caloporteur s'effectue par convection naturelle. Le fluide se déplace à cause de la différence de température du fluide, le principe est simple. L'eau froide glycolée arrive dans la partie inférieure du ballon, puis elle descend jusqu'aux capteurs solaires, où elle est réchauffée ce qui provoque la diminution de sa densité et naturellement elle va remonter. Une fois arrivée dans le ballon, elle va chauffer l'eau sanitaire déjà stockée et le cycle se re-

produit. Par conséquent, le ballon de stockage de l'ECS doit se trouver plus haut que les panneaux solaires à 50 cm minimum, d'après les normes en vigueur, nous pouvons par exemple le mettre dans les combles.

La circulation en thermosiphon implique de **plus grandes pertes de chaleur** que le système précédent. Effectivement la plupart du temps, il ne se trouve pas dans une pièce chauffée (comble, etc.). Ce système est simple, de plus il est plus avantageux que celui à circulation forcée d'un point de vue économique, cependant il est un peu moins performant en hiver, et il est difficile à mettre en place.

3.5.1.2. Monobloc

Le système monobloc fonctionne suivant le même principe que celui du thermosiphon vu précédemment. Il a une spécificité, c'est d'être composé d'un seul bloc comme son nom l'indique. Le ballon d'eau chaude est situé sur le toit, il est relié aux panneaux solaires, mais il est toujours au-dessus d'eux. Ce type d'installation est donc peu recommandé si le toit est très pentu et il faut également faire attention au poids total de l'installation. Ce chauffe-eau solaire est le moins coûteux parmi ceux étudiés précédemment. De plus, il est facile à mettre en place. Néanmoins, il présente des désavantages non-négligeables, le ballon étant situé à l'extérieur, il est exposé aux intempéries. Il faut donc faire attention à l'isolation de celui-ci au risque que l'eau se refroidisse rapidement et d'avoir un rendement faible.

En conclusion, ce système n'est **pas adapté pour une utilisation quotidienne d'ECS en France métropolitaine**, mais il peut être utile pour des maisons de vacances avec un faible besoin d'ECS ou alors tout simplement dans des pays chauds.

3.5.1.3. Optimisé

Nous avons vu dans les exemples précédents que chaque système engendre des pertes de chaleur plus ou moins importantes, ce qui est un inconvénient majeur. Pour minimiser, il existe un CESI optimisé. Son principe est le suivant : l'eau stockée dans le ballon est tout d'abord chauffée par le système solaire, ensuite cette eau passe dans un système d'appoint (*exemple : chaudière*) et il se met en fonctionnement si l'eau n'est pas à la température souhaitée, c'est-à-dire qu'il la régule.

Ce système est **parfaitement adapté pour des petites maisons** avec une seule salle de bains dans le cas contraire, il faudra utiliser des CESI à éléments séparés.

3.5.2. Collectif

Le CESC est l'installation à privilégier pour les hôpitaux, hôtels avec un besoin journalier en ECS important. Globalement, elle repose sur le même principe que le CESI sauf qu'elle permet d'alimenter plusieurs points d'eau (*exemple : chambres d'hôtel*). Cette solution peut comporter plusieurs ballons de stockage, sans compter les systèmes d'appoints, montés en série contrairement au CESI où il y a un seul ballon, mais avec une grande capacité. Il est important de pouvoir relier tous les points d'eau au ballon pour cela un retour de bouclage et un réseau de distribution d'ECS sont mis en place.

Le retour de bouclage est une technique qui permet d'assurer une distribution d'eau chaude quasi-instantanée au niveau d'un point d'usage éloigné du système de production. L'eau n'est pas stockée dans le robinet, mais directement renvoyée dans le ballon. Ainsi, il permet de limiter le gaspillage de l'eau, car nous n'attendons pas que l'eau chauffe, et d'améliorer le confort des usagers. Un schéma de ce dispositif est disponible en annexe.

Il existe aussi des **installations semi-collectives**, ce qui correspond à du résidentiel, où chacun possède son propre ballon d'eau chaude, mais les panneaux solaires permettant de chauffer l'eau sont communs à tous.

3.6. Les composants

3.6.1. Les capteurs

Il existe différents types de capteurs, mais les **capteurs plans vitrés sont les plus courants**. Les capteurs se trouvent la plupart du temps sur le toit, néanmoins ils peuvent aussi

être situés sur un parking, le sol, un mur, etc. Ils sont soumis aux intempéries donc ils doivent être les plus résistants possible.

3.6.1.1. Capteurs plans

3.6.1.1.1. Non vitrés, opaques

Les capteurs plans opaques sont les plus simples sur le marché et par conséquent les moins chers. Leurs faibles coûts s'expliquent par le fait qu'ils ne possèdent pas d'isolation, ce qui rend leurs rendements assez faibles. Ces capteurs s'utilisent principalement l'été pour chauffer les piscines, mais ils ne sont **pas adaptés pour un système d'eau chaude sanitaire d'une maison** sauf dans les pays chauds. Ils sont constitués de peu de composants ; une plaque absorbante de couleur sombre et un tuyau pour transporter le fluide caloporteur.

3.6.1.1.2. Vitrés

Les capteurs plans vitrés sont les plus répandus, pour un usage au quotidien. Contrairement aux capteurs vus précédemment, ils **conviennent parfaitement pour chauffer l'eau chaude sanitaire d'une maison**. Ils se composent de plusieurs éléments que nous pouvons retrouver sur le schéma en annexe 8. Le vitrage crée un effet de serre et permet de transmettre les rayons lumineux à la plaque absorbante qui permet de les convertir en énergie thermique.

3.6.1.2. Capteurs à tubes sous vide

Les capteurs à tubes sous vides sont les **plus efficaces** des trois types de capteurs étudiés, mais aussi les **plus chers**. Ces capteurs sont de formes cylindriques sur une certaine longueur, leur particularité est que leur isolation est améliorée par le vide d'air du tube ce qui crée moins de perte de chaleur. Mais ils sont fragiles et peuvent perdre leurs étanchéités rapidement à cause des conditions extérieures, ce qui implique une chute de leurs rendements. Il existe 2 types de capteurs à tubes sous vide suivant la position de l'absorbant soit sur une ailette de cuivre soit sur le support en verre.

En annexe 7, un graphique représente l'évolution du rendement des différents capteurs en fonction de la température de celui-ci.

3.6.1.3. Raccordement des capteurs

Pour que les capteurs aient un fonctionnement optimisé, il faut faire attention à leurs placements respectifs. Il existe plusieurs types de câblages entre deux capteurs.

Le montage en série permet d'additionner les tensions (volt). Autrement dit, la montée en température est plus importante, mais s'accompagne de pertes thermiques plus importantes. De plus, la montée progressive de la température au fil des capteurs diminue grandement le rendement. Un grand nombre de capteurs branchés en série n'est donc pas une solution optimale.

Le montage en parallèle permet d'additionner les intensités (ampère). En sachant que l'intensité est la puissance générée, ce montage a un meilleur rendement énergétique que le précédent. Cependant, ce type de raccordement n'est pas adapté si nous avons besoin d'une tuyauterie de longueur importante.

Le montage combiné (= boucle de Tichelmann, est une combinaison du montage en série et celui en parallèle) permet à l'ensemble des capteurs de s'équilibrer naturellement, c'est-à-dire sans utilisation de vannes. Ce type de montage permet de répartir en proportions identiques les pertes de charge dans chaque capteur. Pour ce faire, la longueur du tuyau est identique pour n'importe quel capteur. Ainsi, quel que soit le capteur emprunté par le fluide caloporteur, il parcourt la même distance, à la même vitesse. Donc le fluide récupère la même quantité d'énergie par unité de surface soumise aux rayons du soleil peu importe le capteur traversé. Ce type de raccordement est idéal pour un meilleur fonctionnement de l'installation d'eau chaude sanitaire.

En conclusion, **la meilleure solution est de combiner le raccordement en série et en parallèle, afin de tirer parti des différents avantages des deux montages** (une tension et intensité précise), c'est la boucle de Tichelmann vu précédemment.

3.6.2. Les Ballons d'eau chaude

L'installation d'un dispositif d'ECS solaire nécessite un ballon d'eau chaude adapté. En effet un ballon classique ne suffit pas car il faut un ballon qui soit vraiment bien isolé thermiquement et qui résiste à de hautes températures. Le ballon permet de stocker l'eau chaude, et donc une distribution rapide vers les foyers concernés. Néanmoins, nous pouvons utiliser l'installation déjà existante comme système d'appoint. Il existe plusieurs ballons qui peuvent convenir pour la production ECS solaire.

3.6.2.1. Revêtement intérieur

Pour ces ballons, plusieurs types de revêtement intérieurs sont possibles. Ils peuvent être en cuivre, très résistant à la corrosion mais conducteur thermique (donc cela augmente les pertes thermiques) ou en acier, moins résistant à la corrosion mais permettant moins de pertes thermiques. Si le revêtement est en acier, il conviendra donc de recouvrir celui d'émail (principalement composé de silice) pour justement limiter la corrosion. Cet émail forme par ailleurs des dépôts au fond du ballon, qui l'entartent donc, et nécessite l'intervention annuelle d'un professionnel afin de nettoyer l'appareil.

3.6.2.2. Ballon serpentin extérieur

Le ballon avec un serpentin extérieur est un ballon peu commun, utilisé lorsqu'on souhaite éviter les problèmes d'encrassement ainsi que faciliter le ménage, puisque le serpentin permettant de chauffer l'eau stockée à l'intérieur, est à l'extérieur du ballon, enroulé autour de celui-ci. Le serpentin va donc avoir le rôle d'échangeur, puisqu'il va transmettre la chaleur de l'eau chauffée par le soleil au ballon, et donc à l'eau qu'il contient. Il y a donc une grosse couche d'isolation à l'extérieur du ballon, afin d'éviter les pertes de chaleur vers l'extérieur. Ils ne conviennent pas spécialement à l'usage sanitaire.

3.6.2.3. Ballon spécial thermosiphon

Ce type de ballon ne possède pas de serpentin, ni d'échangeurs, mais un accumulateur. Cela permet, notamment dans les pays très chauds, d'éviter l'utilisation d'eau glycolée, qui risque de caraméliser dans des conditions de chaleur extérieures assez extrêmes. Il permet aussi de minimiser l'encrassement à l'intérieur du ballon.

3.6.2.4. Ballon échangeur : ballon serpentin intérieur

Il s'agit d'un ballon en acier inoxydable, traversé par un serpentin métallique. Ce serpentin contient l'eau chauffée directement par le système à capteurs solaires, et c'est le transfert de chaleur vers l'eau froide du ballon qui va la réchauffer rapidement par contact. Ce type de ballon s'utilise avec de l'anode de magnésium pour éviter la corrosion dans le ballon, mais cela laisse des résidus au fond du ballon, ce qui peut poser des problèmes sur le long terme, et nécessite l'intervention annuelle d'un professionnel pour nettoyer le système.

3.6.2.5. Ballon accumulateur

Ce type de ballon est particulier, puisqu'un thermostat coupe la circulation du fluide caloporteur lorsque l'eau est à bonne température, et l'y maintiendra par ouverture ou fermeture de la circulation après chaque diminution du niveau d'eau. Un échangeur à serpentin ou à plaques est donc situé dans ce type de ballon. Les avantages de ce ballon sont que l'eau chaude est disponible en grande quantité de manière instantanée. Il est aussi durable, puisque la longévité du matériel est bonne. Par ailleurs, sa montée en température est longue et la quantité d'eau chaude est limitée par le volume du ballon. De plus, malgré les progrès en terme d'isolation, de grandes pertes thermiques de stockage sont à prévoir.

3.6.3. Pompe

La pompe a un rôle essentiel dans ce type d'installation. En effet, les pompes permettent d'assurer la circulation du fluide caloporteur dans l'installation, et donc de garantir un fonctionnement optimal. Il existe deux grands types de pompes, celles dites de surface, et celles dites immergées.

3.6.3.1. Pompe de surface

La pompe de surface est positionnée au dessus du point d'eau, d'où son nom de pompe de surface, et elle possède une entrée, nécessaire pour l'aspiration ainsi qu'une sortie permettant le refoulement. L'inconvénient de cette pompe est que la hauteur de l'aspiration ne peut pas dépasser entre 3 et 7 mètres suivant le modèle, ce qui peut se révéler être insuffisant. De plus, le fonctionnement de celle-ci amène une montée en température, car elle est en contact direct avec le soleil, puisqu'elle se situe à la surface.

C'est ce type de pompe que nous allons utiliser car la pompe sera remplie d'eau constamment, donc nous ne serons pas confrontés aux problèmes de surchauffe du dispositif.

3.6.3.2. Pompe immergée

Cette pompe, comme son nom l'indique, est directement immergée dans l'eau, donc l'aspiration se fait directement au niveau de la pompe et il n'y a pas de sortie pour le refoulement, puisque la pompe est immergée dans l'eau. Avec un pompage au fil du soleil, il est donc préférable d'utiliser une pompe immergée, qui a l'avantage d'être refroidie par l'eau pendant son fonctionnement.

3.6.4. Échangeurs

Le rôle d'un échangeur thermique est de transférer la chaleur d'un fluide à un autre fluide. Ces échanges de chaleur peuvent se réaliser de deux façons : **par convection** (échange entre fluides et parois) ou **par conduction** (échange à travers une paroi métallique). Nous allons donc étudier les différents modèles d'échangeurs, ainsi que leur principe de fonctionnement global.

3.6.4.1. Échangeurs caloduc

Il fonctionne avec le changement d'état : liquide-gaz. Un fluide est placé dans un tube fermé et en captant la chaleur absorbée par le capteur (particulièrement par l'ailette), le fluide va se transformer en vapeur. Il monte alors dans la partie haute du tube et va se condenser par contact avec le fluide caloporteur qui circule justement en partie haute. Il cède alors sa chaleur. Il va alors de nouveau se liquéfier, et retourner dans la partie basse du tube.

3.6.4.2. Échangeur à tubes calanques

Un échangeur de chaleur immergé, positionné à l'intérieur du ballon d'eau chaude est utilisé afin d'optimiser le transfert de calories et le rendement des capteurs : la récupération d'énergie solaire fonctionne de façon optimum sur l'eau la plus froide. L'appoint (ballon, échangeur instantané, etc) est positionné en aval du solaire pour compléter l'apport calorifique si nécessaire. Les avantages de ce type d'échangeurs sont qu'il n'y a que très peu de pertes de chaleurs externes, ainsi que l'unicité de la pompe, ce qui permet une régulation très simple du dispositif. Par ailleurs, il est indispensable d'étudier les limites de puissance de ces dispositifs avant d'opter pour ce type d'échangeur.

3.6.4.3. Échangeur à plaques

Un échangeur à plaques est constitué de plaques en aluminium, en acier inoxydable ou en matériaux synthétiques, ces plaques étant fabriquées gaufrées, afin de maximiser l'échange convectif. Les plaques sont très fines et séparées par de faibles espaces, faciles d'entretien.

Nous utilisons dans notre cas un échangeur à circulation forcé car ils sont plus faciles à nettoyer, mais aussi car nous sommes dans le cas de l'alimentation en eau d'un hôtel, et les échangeurs monoblocs à thermo-tubes sont complexes et peu développés.

3.6.5. Conduits

Les conduits permettent au fluide caloporteur de se déplacer entre les différentes parties de l'installation. Il faut donc s'assurer que ceux-ci sont fabriqués dans le bon matériau, ainsi qu'ils aient la bonne longueur. Il existe différents matériaux possibles pour les conduits. Ceux-ci doivent résister aux contraintes de température (allant de - 20°C à 150°C) ainsi qu'aux contraintes de pression. Les conduits reliant les différents éléments entre eux, sont faits en cuivre, car c'est un matériau qui ne se dilate que très peu, et nous devons prendre

en compte la dilatation lors du dimensionnement des conduits. Afin d'isoler ce type de conduits, il est nécessaire de mettre une couche isolante sur l'extérieur de ceux-ci, afin de minimiser les transferts de chaleur avec l'extérieur. Il est donc conseillé d'utiliser un polyuréthane synthétique en mousse, afin d'isoler les conduits des très hautes températures.

Les conduits du chauffage quant à eux, sont en multicouches. Le multicouche, pouvant être du PER, PPR ou PVC-C enfermant une couche d'aluminium, est hautement résistant aux températures très élevées, et est donc idéale dans le cas de notre installation sanitaire. Ils ont sensibles aux UV, ce qui rend nécessaire leurs protections avec une plaque en acier.

3.7. Dimensionnement d'une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire

3.7.1. Calculs et choix préliminaires

Tout d'abord, il est nécessaire d'effectuer des études préliminaires qui nous permettront de connaître l'angle optimal d'inclinaison des capteurs solaires, les besoins prévisionnels d'eau chaude sanitaire pour l'hôtel, la température de l'eau froide en fonction des mois de l'année et la température de consigne. Toutes ces études, nous permettront d'effectuer ensuite le dimensionnement de l'installation solaire le plus précisément possible.

3.7.1.1. Choix de l'angle d'inclinaison du capteur solaire

Lors de cette première étude, nous allons chercher à déterminer **le meilleur angle d'inclinaison pour nos capteurs solaires**. Pour cela, nous allons analyser l'IGP qui est l'énergie lumineuse réelle reçue du soleil à la surface de la terre sur le plan dont l'inclinaison et l'orientation ont été définies. Cette valeur est la somme de l'IBP, l'IDP et l'IRP.

Nous effectuons ces mesures à Paris le Bourget qui est la zone de référence la plus proche de l'hôtel. Nous remplissons alors un tableau avec les valeurs de l'IGP (en kWh/m²/jour) mois par mois et en fonction de l'inclinaison du plan.

Nous considérerons que les capteurs seront orientés vers le sud et placés sur de la terre dans un premier temps puis sur du béton dans un second. La différence entre la terre et le béton réside dans leur albédo qui est la capacité d'un corps à réfléchir la lumière. Dans notre cas, l'étude sur du béton sera plus adaptée étant donné que nous comptons installer les capteurs solaires sur le toit de l'hôtel.

A l'aide du site Ines solaire nous obtenons les tableaux ci-dessous et les graphiques associés se trouvent en annexes 15 :

Mois	jan	fév	mars	avril	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	Moy
Horizontale	0.87	1.52	2.88	3.92	5.01	5.59	5.33	4.44	3.38	1.98	0.99	0.72	3.06
10°	1.01	1.69	3.13	4.07	5.06	5.58	5.35	4.56	3.62	2.22	1.14	0.85	3.2
20°	1.13	1.83	3.32	4.14	5.03	5.48	5.29	4.61	3.8	2.42	1.26	0.97	3.28
30°	1.23	1.94	3.44	4.13	4.92	5.3	5.14	4.56	3.89	2.57	1.36	1.07	3.3
40°	1.3	2	3.49	4.05	4.72	5.04	4.9	4.44	3.91	2.66	1.44	1.14	3.26
50°	1.34	2.03	3.47	3.89	4.44	4.69	4.59	4.23	3.84	2.7	1.48	1.19	3.16
60°	1.36	2.01	3.38	3.66	4.09	4.28	4.21	3.95	3.7	2.68	1.49	1.22	3.01
70°	1.35	1.96	3.22	3.37	3.68	3.81	3.76	3.6	3.48	2.6	1.47	1.22	2.8
80°	1.31	1.86	2.99	3.02	3.23	3.3	3.28	3.19	3.19	2.47	1.42	1.19	2.54
Verticale	1.24	1.73	2.71	2.63	2.74	2.78	2.76	2.75	2.85	2.29	1.34	1.13	2.25

Tableau 2: Relevé de l'IGP à Paris le Bourget pour différentes inclinaisons du plan en orientation du plan Sud pour un albédo de 0.2 (Terre) en kWh/m²/jour.

Mois	jan	fév	mars	avril	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	Moy
Horizontale	0.87	1.52	2.88	3.92	5.01	5.59	5.33	4.44	3.38	1.98	0.99	0.72	3.06
10°	1.01	1.69	3.14	4.07	5.07	5.59	5.36	4.57	3.63	2.23	1.14	0.85	3.2
20°	1.14	1.85	3.35	4.17	5.08	5.53	5.34	4.65	3.83	2.44	1.27	0.98	3.31
30°	1.24	1.97	3.5	4.21	5.02	5.42	5.25	4.65	3.96	2.61	1.38	1.08	3.36
35°	1.29	2.02	3.55	4.2	4.96	5.33	5.18	4.63	4	2.68	1.43	1.13	3.37
40°	1.33	2.06	3.59	4.18	4.89	5.23	5.09	4.59	4.03	2.73	1.47	1.17	3.37
50°	1.39	2.11	3.63	4.1	4.71	4.99	4.88	4.47	4.02	2.81	1.53	1.23	3.33
60°	1.43	2.13	3.59	3.95	4.47	4.7	4.6	4.28	3.95	2.83	1.57	1.27	3.24
70°	1.44	2.11	3.5	3.75	4.18	4.36	4.29	4.04	3.81	2.8	1.57	1.29	3.1
80°	1.42	2.05	3.35	3.51	3.85	4	3.94	3.74	3.61	2.72	1.54	1.28	2.92
Verticale	1.37	1.96	3.14	3.22	3.49	3.62	3.56	3.41	3.36	2.59	1.49	1.24	2.71

Tableau 3: Relevé de l'IGP à Paris le Bourget pour différentes inclinaisons du plan en orientation du plan Sud pour un albédo de 0,5 (Béton) en kWh/m²/jour

Nous savons que les périodes de grandes affluences au parc Disney se situent entre Avril et Août. Il faut donc favoriser les inclinaisons qui nous donnent les meilleures valeurs entre Avril et Août, on remarque que **sur la terre, il faut favoriser une inclinaison de 20° et sur le béton, une inclinaison de 30°.**

3.7.1.2. Calcul des besoins prévisionnels en ECS

Comme nous l'avons mentionné dans la première étude, l'infrastructure étudiée est le Disneyland Hôtel situé à Paris, celui-ci possède environ **500 chambres**, chaque chambre peut accueillir **4 personnes**. Pour cette installation, nous nous concentrerons uniquement sur l'eau chaude sanitaires des chambres et non pas d'autres infrastructures présentes dans l'hôtel telles que les piscines, spa, etc.

Il est important de noter que les différents recouvrements effectués par **TECSOL** France préconisent une valeur de **80 litres d'ECS à 60°C/nuitée dans les hôtels.**

Ainsi pour calculer la consommation journalière d'ECS, nous utiliserons la formule suivante :

$$\text{Consommation ECS} = \text{NombreDePersonnes} * 80 * \text{TauxOccupation}$$

Le nombre de personne que l'hôtel peut accueillir est de $500 * 4 = 2\,000$ personnes. Sachant que pour des raisons économiques, les hôtels ne donnent pas de taux d'occupation mois par mois et ne donnent que des valeurs approximatives de leurs taux d'occupation, alors nous considérons le pire des cas, autrement dit nous prenons le taux d'occupation maximal.

Finalement, la formule nous donne le résultat suivant :

$$\text{Consommation ECS} = 2000 * 80 * 1 = 160\,000 \text{ L. jour}^{-1}$$

3.7.1.3. Température de l'eau froide

Nous **cherchons à présent la température moyenne de l'eau froide mois par mois** qui est importante puisque celle-ci nous permettra ensuite à l'aide de SOLO de faire les différentes simulations. Nous utiliserons la méthode EMS 2 préconisée par SOLO pour calculer la température de l'eau froide mois par mois.

Nous obtenons le tableau ci-dessous que nous utiliserons lors du dimensionnement.

Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
7,01	7,36	9,06	10,61	12,46	14,01	14,96	14,71	13,41	11,11	8,86	7,51

Tableau 4: Tableau des valeurs moyennes journalières mois par mois de la température de l'eau froide par la Méthode EMS2 du logiciel "SOLO" à Paris Le Bourget.

3.7.1.4. Température de l'eau chaude sanitaire (température de consigne)

Pour conclure les études préliminaires, nous **recherchons la température de consigne de l'eau**. L'eau doit se trouver à une température de 60°C pour éviter la légionelle, également connue sous le nom de "maladie du légionnaire". La contamination a lieu par inhalation de gouttelettes d'eau contenant des bactéries, en suspension dans l'air. Nous remarquons que la légionelle se développe principalement dans les eaux dont la température est comprise entre 25 et 47 °C. Les légionelles ne se reproduisent plus à 55 °C et sont détruites à partir de 60 °C. La légionelle tient son nom d'une épidémie de pneumonie parmi des anciens combattants à une convention de l'American Legion dans un hôtel à Philadelphie en 1976 où la bactérie s'était propagée par le biais du système de climatisation de l'hôtel, ce qui a provoqué 29 décès.

Par conséquent, il faut faire attention à placer la température de consigne du chauffe-eau à 60°C sinon la légionelle pourra se développer dans l'eau.

3.7.2. Dimensionnement de l'installation solaire avec le logiciel SOLO

Comme nous l'avons vu lors de la première partie, pour des raisons économiques et concurrentielles, les hôtels tel que celui de Disneyland ne donnent pas de valeurs mois par mois, ni de valeurs précises.

Nous utiliserons la valeur suivante : $Consommation\ Moyenne\ ECS = 160\ 000\ L \cdot jour^{-1}$

A partir de cette valeur, nous allons donc calculer à présent le volume de stockage minimal et maximal. Pour cela, on prendra respectivement 50% et 150% de la consommation moyenne, ratio donné par : TECSOL France.

Nous obtenons alors : $ValeurStockageMin = 160\ 000 * 0,5 = 80\ 000\ L \cdot jours^{-1}$

$$ValeurStockageMax = 160\ 000 * 1,5 = 240\ 000\ L \cdot jours^{-1}$$

Par conséquent nous avons intervalle de stockage compris entre 80000 et 240000 L.jour⁻¹.

Nous savons que le volume de stockage solaire devrait être compris entre 50 et 100 litres par m² de capteurs solaires, ratio donné par : TECSOL France.

Nous calculons désormais la surface de $SurfaceCaptationMin = 80\ 000 / 50 = 1\ 600\ m^2$ captation minimale et maximale.

$$SurfaceCaptationMax = 240\ 000 / 50 = 4\ 800\ m^2$$

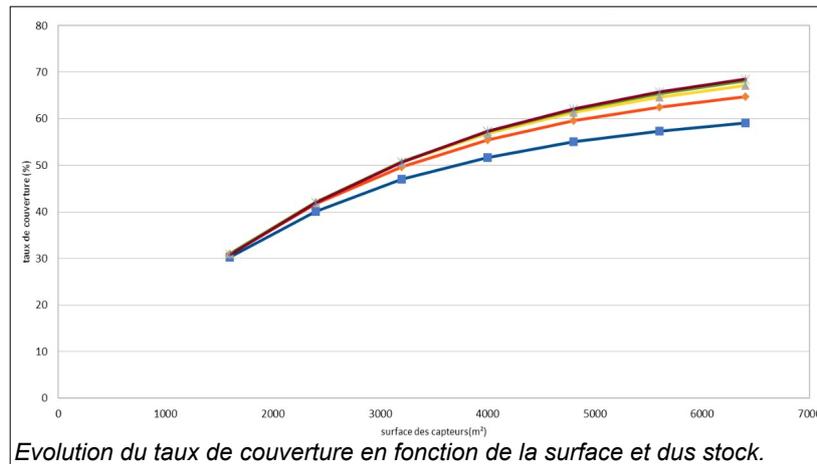
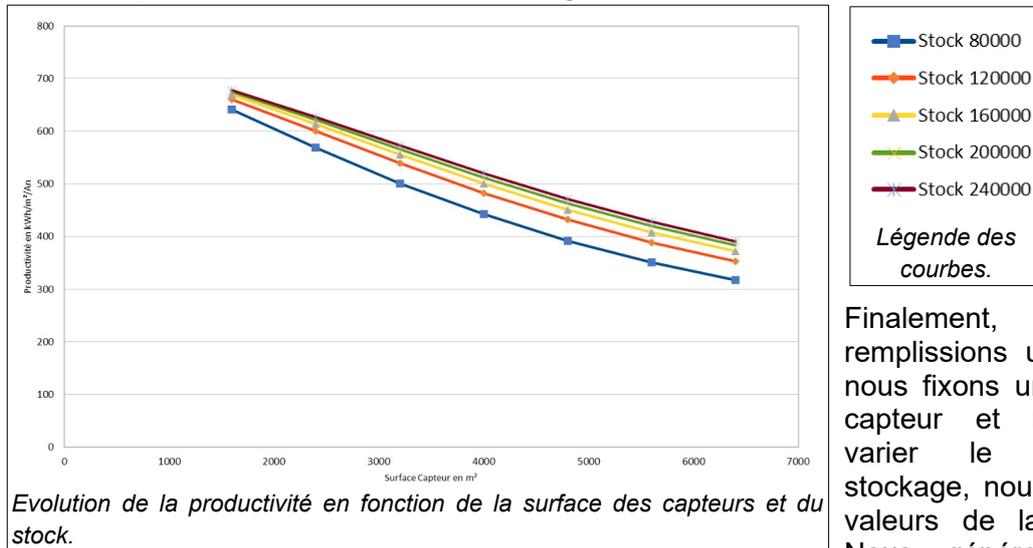
Par conséquent nous avons intervalle de surface de captation compris entre 1 600 et 4 800 m².

Nous cherchons à présent à savoir **où est-ce que l'on peut placer les capteurs**. A l'aide de Google Maps, nous pouvons déterminer la surface des toits plats de l'hôtel, nous obtenons alors approximativement une surface de **5200 m² disponible** qui est suffisante pour installer les capteurs. Une fois que toutes les étapes précédentes ont été effectuées, nous rentrons les différentes données dans le logiciel SOLO.

Pour tracer les courbes d'analyses, nous fixons un volume de stockage, nous commençons par 80 000 L, puis nous faisons varier la surface de captation, nous prenons 1 600 m² au début puis nous la faisons varier de 800 en 800 m². Nous avons choisi d'aller plus loin que les 4 800 m² de surface de captation pour pouvoir observer correctement la stabilisation des écarts. Une fois la simulation faite avec SOLO, nous récupérons la productivité et le taux de

couverture et nous les plaçons dans deux tableaux différents. Nous obtenons deux tableaux ainsi que les courbes associées.

- Le premier tableau nous donne la **productivité en fonction de la surface des capteurs et du volume de stockage**.
- Le deuxième nous donne le **taux de couverture en fonction de la surface des capteurs et du volume de stockage**.



Enfinement, nous remplissons un tableau où nous fixons une surface de capteur et nous faisons varier le volume de stockage, nous relevons les valeurs de la productivité. Nous générons alors la courbe de l'évolution de la production en fonction du stock pour différentes surfaces de capteurs disponible en annexe.

Nous remarquons avec les graphiques que le **taux de couverture solaire augmente en fonction de la surface des capteurs**. Cependant les écarts se stabilisent pour des surfaces supérieures à 4 000m² surtout

pour les stocks 240 000, 200 000 et 160 000 litres. Nous remarquons aussi que ces derniers stockages auront pratiquement le même résultat quant aux taux de couverture solaire. La productivité (kWh/m²/an) diminue lorsque la surface des capteurs augmente, et la productivité devient quasiment identique pour un stockage supérieur à 160 000 litres.

Cela nous conduit à retenir dans un premier temps une variante qui comporte : 4 000 m² de capteurs solaires et un stockage de 160 000 litres. Le volume étant très élevé, nous allons le découper en plusieurs chaufferies, nous allons donc à présent étudier l'une des chaufferies.

L'objectif sera de ne pas dépasser le volume de 30000 L pour une chaufferie, donc

$$\text{VolumeStockMax} = 30\,000\text{ L}$$

$$\text{VolumeStockMoyen} = 20\,000\text{ L}$$

$$\text{VolumeStockMin} = 10\,000\text{ L}$$

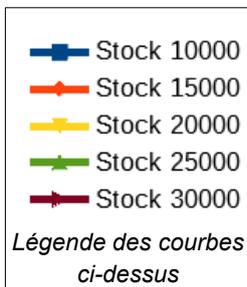
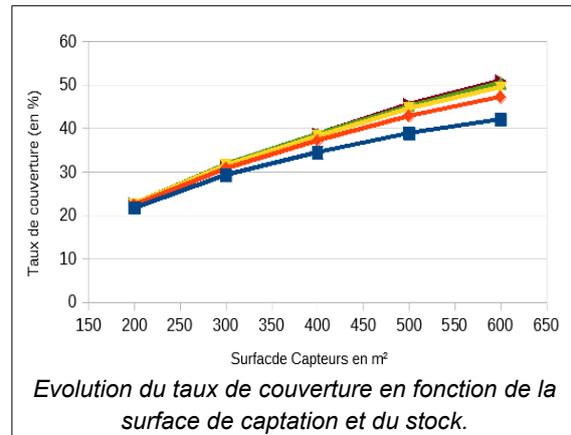
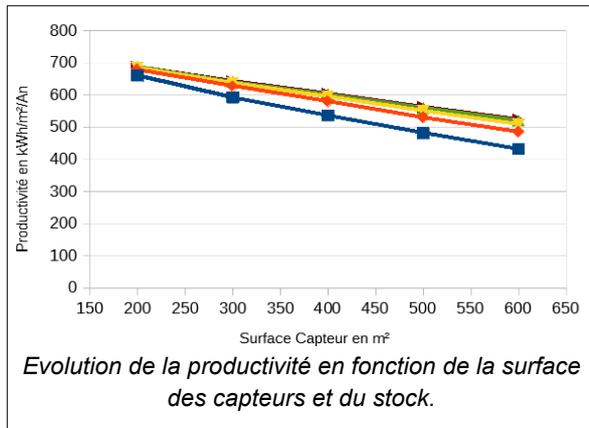
Par conséquent nous avons intervalle de volume de stockage compris entre 10 000 et 30 000 L.

$$\text{SurfaceCaptationMin} = 10\,000/50 = 200\text{ m}^2$$

$$\text{SurfaceCaptationMax} = 30\,000/50 = 600\text{ m}^2$$

Par conséquent nous avons intervalle de surface de captation compris entre 200 et 600 m².

Nous traçons à présent les différentes courbes en suivant le même procédé que précédemment, cependant **les valeurs des stocks sont désormais comprise entre 10000 L et 30000 L**, avec un pas de 5000 L et les **surfaces de captation sont comprise entre 200 et 600 m²**, avec un pas de 100 m². Nous obtenons les courbes ci-dessous.



Nous pouvons conclure de cette étude SOLO que la chaufferie la plus adaptée sera composée d'un stockage de 20 000 L (soit deux ballons de 10 000 L) pour une surface de capteurs de 400 m². Étant donné notre besoin initial, nous devons donc **nous munir de 8 chaufferies comme celle-ci pour un total au final de 160 000 L de stockage et de 3200 m² de capteurs solaires.**

3.8. Étude économique

L'installation d'une chaufferie coûte 169 700 euros, le devis complet menant à ce montant est disponible en annexe 18, or il nous faut 8 chaufferies. Finalement un montant de **1 357 600 euros** est nécessaire pour mener à bien l'opération.

L'investissement fixe s'élève à 928 400 euros et l'investissement variable s'élève à 429 200. Par conséquent, le coût de l'installation par m² (hors investissement fixe) s'élève à :

$$\text{Coût} = \text{Montant Investissement Variable} / \text{Surface Capteurs} = 429\,200 / 3\,200 = 134.125 \text{ euros} \cdot \text{m}^{-2}$$

Dans un second temps, nous rassemblons les données relatives à l'installation conventionnelle existante et à l'énergie utilisée.

Nous savons que le rendement du système classique, d'après les mesures effectuées par les experts-auditeurs sur des chaufferies : leurs rapports donnent des valeurs de rendement variant entre 45 à 60% comptes tenues, surtout des surpuissances des chaudières souvent rencontré et la boucle de circulation d'ECS. La plupart du temps, une valeur de rendement de 50% est utilisée.

D'autre part, pour le prix de l'énergie utilisée, nous prendrons le prix du kWh Gaz Naturel: **0,1121 euros.**

$$\text{Investissement Total} = \text{Investissement fixe} + \text{contrôle et étude} + (\text{coûts} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{surface par m}^2)$$

$$\text{Investissement Total} = \text{Investissement fixe} + \text{variable} + \text{contrôle et étude}$$

$$\text{Investissement Total} = 1\,357\,600 + 40\,000$$

$$\text{Investissement Total} = 1\,397\,600 \text{ euros}$$

Nous calculerons ensuite les économies réalisées par l'installation solaire :

$$\text{Économies} / \text{An} = 210\,500 \text{ kWh} \cdot 0.1121 \cdot 2 = 47\,194,1 \text{ euros par chaufferie}$$

Soit 377 552.8 euros d'économies par An pour les 8 chaufferies.

Nous chercherons finalement le nombre d'année pour avoir un retour sur investissement :

- Sans subventions

$$\text{Retour sur Investissement} = \text{InvestissementTotal} / \text{Economie}$$

$$\text{Retour sur Investissement} = 3,70$$

Nous en déduisons qu'au bout de 4 ans, l'installation sera rentabilisée.

- Avec subventions

Calcul des kWh cumac: $kWh\ cumac = B * T * 0.196 = PES * 100 * 0.196 = PES * 19,6$

B : le besoin annuel en eau chaude sanitaire à produire par l'énergie solaire en kWh.

T : le taux de couverture du chauffe-eau solaire collectif en %, $T = (PES / B) * 100$

PES : la production solaire utile en kWh/an.

$$PES = 210\,500\ kWh / an \Rightarrow kWh\ cumac = 210\,500 * 19,6 = 4\,125,800\ MWh\ cumac$$

Le prix des **CEE** correspond à **8 euros/ MWh cumac**.

Les subventions pour 1 chaufferie : $Subvention_{1\ chaufferie} = 4\,125,8 * 8 = 33\,006,4\ euros$

Autrement pour nos 8 chaufferies : $Subvention_{tot} = 264\,051,2\ euros$

Nous obtenons la contribution client en retirant les subventions à l'investissement total :

$$\text{ContributionClient} = \text{Investissement}_{Total} - \text{subvention}_{Total}$$

$$\text{ContributionClient} = 1\,397\,600 - 264\,051,2 = 1\,133\,548,8\ euros$$

$$\text{Retour sur Investissement} = \text{ContributionClient} / \text{Economie}$$

$$\text{Retour sur Investissement} = 1\,133\,548,8 / 377\,552,8 = 3,002$$

Nous en déduisons qu'en presque 3 ans, l'installation sera rentabilisée. L'opération est plus rentable avec des subventions.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons pour objectif d'étudier la faisabilité d'une installation solaire pour les besoins en eau chaude sanitaire d'un hôtel.

Pour ce faire, nous avons commencé par faire une étude analytique des différents mécanismes physiques qui entrent en jeu dans une installation solaire. Puis nous avons fait des recherches sur les différents types d'installations solaires ainsi que sur leurs composants. Ces recherches nous ont permis d'appréhender au mieux le fonctionnement de l'installation solaire que nous avons dimensionnée. Enfin nous avons simulé nos besoins afin de dimensionner notre installation et de budgétiser cette dernière. Nous avons pu observer que dimensionner une telle installation est complexe et fait intervenir beaucoup de paramètres.

D'après nos simulations et nos recherches, un chauffage d'eau chaude sanitaire solaire est viable pour l'hôtel que nous avons choisi. Nous sommes très contents d'avoir mené notre projet à son terme.

Ce projet a été très **enrichissant personnellement**. Il nous a permis d'une part, d'apprendre à travailler avec des personnes que nous ne connaissons pas, nous avons développé des compétences inhérentes au travail de groupe comme l'organisation, l'écoute et la communication. Nous avons réussi à nous répartir le travail rapidement ce qui nous a permis d'être efficace dès les premières séances et de ne pas procrastiner. Nous avons fait régulièrement des mises en commun afin de nous entraider et de voir l'avancement du projet.

D'autre part, ce projet nous a apporté une **culture technologique et scientifique** qui nous sera très probablement utile dans notre cursus scolaire puis plus tard dans notre métier.

Pour une éventuelle poursuite de ce projet nous avons pensé à l'**étude écologique de cette installation**. En effet, bien que les panneaux solaires utilisent une énergie renouvelable, ceux-ci nécessitent des ressources fossiles pour leur fabrication, doivent être renouvelés au bout de quelques années et ne sont que partiellement recyclables. Il serait donc intéressant de comparer l'impact écologique de cette installation avec une sans panneaux solaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] lien internet : <http://www.chauffe-eau-solaires.net/chauffe-eau-solaire-a-thermosiphon> (valide à la date du 24/05/2022)
- [2] lien internet : <https://ma-solution-chauffage.viessmann.fr/eau-chaude-sanitaire-accumulee-serpentin-ou-systeme-de-charge> (valide à la date du 24/05/2022)
- [3] lien internet : <https://ma-solution-chauffage.viessmann.fr/systeme-chauffage/electricite> (valide à la date du 24/05/2022)
- [4] lien internet : <http://www.developpementdurable.org/guide/enr/chauffe-eau-solaire.html> (valide à la date du 24/05/2022)
- [5] lien internet : <https://blog.elyotherm.fr/2011/09/bouclage-eau-chaude-sanitaire-ecs.html> (valide à la date du 24/05/2022)
- [6] lien internet : <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-chaaleur/solaire-thermique> (valide à la date du 24/05/2022)
- [7] lien internet : <https://www.ecoenergiesolutions.com/solutions/solaire/thermique/chauffe-eau-solaire-individuel> (valide à la date du 24/05/2022)
- [8] lien internet : <https://gennergies.fr/chauffe-eau-solaire/chauffe-eau-solaire-collectif-individualise/> (valide à la date du 24/05/2022)
- [9] lien internet : <https://www.lamaisonsaintgobain.fr/guides-travaux/renovation-energetique-habitat-durable/chauffe-eau-solaire-individuel> (valide à la date du 24/05/2022)
- [10] lien internet : <https://www.qualit-enr.org/solutions/chauffe-eau-solaire-collectif-a-stockage-et-appoint-individualises/> (valide à la date du 24/05/2022)
- [12] lien internet : <https://librairie.ademe.fr/cadic/1760/guide-pratique-chauffage-et-eau-chaude-solaires.pdf?modal=false> (valide à la date du 24/05/2022)
- [13] lien internet : https://energieplus-lesite.be/techniques/eau-chaude-sanitaire11/differents-preparateurs/capteur-solaire-a-eau-chaude-d1/#Les_differeents_types_dinstallation (valide à la date du 24/05/2022)
- [14] lien internet : http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Capteur_solaire_plan (valide à la date du 24/05/2022)
- [15] lien internet : https://conseils.xpair.com/actualite_experts/installations-solaires-collectives-ecs-conception-partie1.htm (valide à la date du 24/05/2022)
- [16] lien internet : <https://www.encyclopedie-energie.org/les-echangeurs-de-chaaleur/> (valide à la date du 24/05/2022)
- [17] lien internet : [CalSol - gisement solaire \(free.fr\)](http://www.calculsol.com/) (valide à la date du 24/05/2022)
- [18] lien internet : <https://www.parc-attraction-loisirs.fr/disneyland-paris/affluence-frequentation-disney/> (valide à la date du 24/05/2022)
- [19] lien internet : [https://tarifgaz.com/tarifs#:~:text=Le%20prix%20du%20kWh%20de%20gaz%20naturel%20est%20de%200.0880,2%20\(la%20plus%20r%C3%A9pandue\)](https://tarifgaz.com/tarifs#:~:text=Le%20prix%20du%20kWh%20de%20gaz%20naturel%20est%20de%200.0880,2%20(la%20plus%20r%C3%A9pandue)) (valide à la date du 24/05/2022)
- [20] lien internet : <https://www.calculcee.fr/article/kWh-cumac/> (valide à la date du 02/06/2022)
- [20] lien internet : <https://calculateur-cee.ademe.fr/user/fiches/BAT> (valide à la date du 02/06/2022)

5. ANNEXES

5.1. Dimensionnement chauffe eau solaire suivant la zone géographique

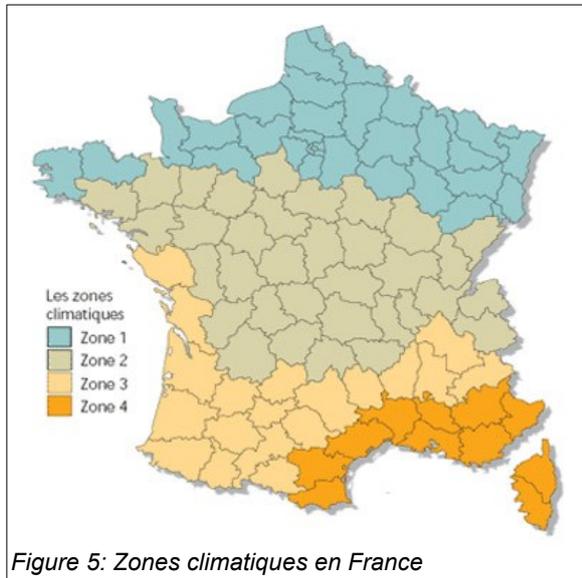


Figure 5: Zones climatiques en France

Nombre d'occupants	1 ou 2	3 ou 4	5 ou 6	7 ou 8
Volume du ballon solaire ¹ (en litres)	100 à 150	100 à 250	250 à 350	350 à 500
Volume total du ballon ² (en litres)	100 à 250	250 à 400	400 à 550	550 à 650
Zones climatiques	Surface des capteurs (en m ²)			
Zone 1	2 à 3	3 à 5,5	4 à 7	5 à 7
Zone 2	2 à 3	2,5 à 4,5	3,5 à 6,5	4,5 à 7
Zone 3	2 à 2,5	2 à 4	3 à 5,5	3,5 à 7
Zone 4	2 à 2,5	2 à 3,5	2,5 à 4,5	3,5 à 6

1 : pour un chauffe-eau solaire sans appoint
2 : pour un chauffe-eau solaire avec appoint

Figure 6: Dimensionnement chauffe eau solaire

5.2. CESI à éléments séparés à circulation forcée

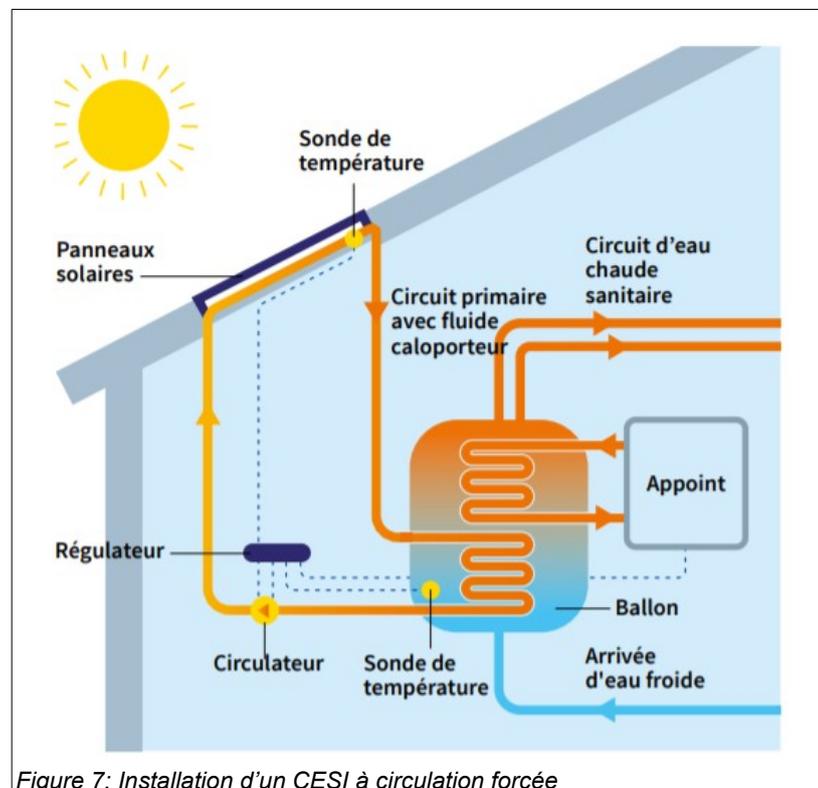


Figure 7: Installation d'un CESI à circulation forcée

5.3. CESI à éléments séparés à thermosiphon

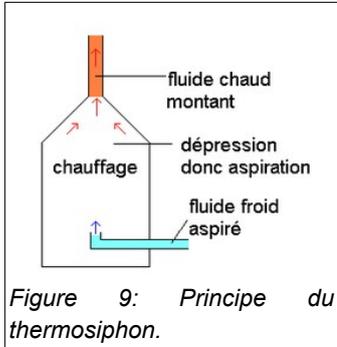


Figure 9: Principe du thermosiphon.

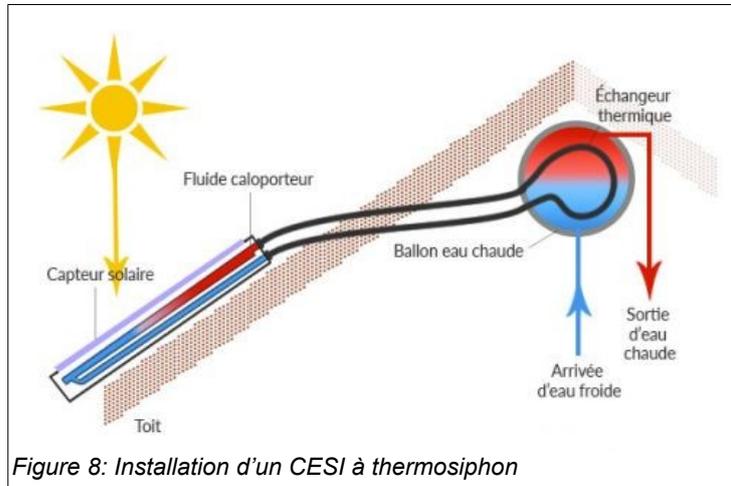


Figure 8: Installation d'un CESI à thermosiphon

5.4. CESI avec un monobloc



Figure 11: Photo d'un système monobloc

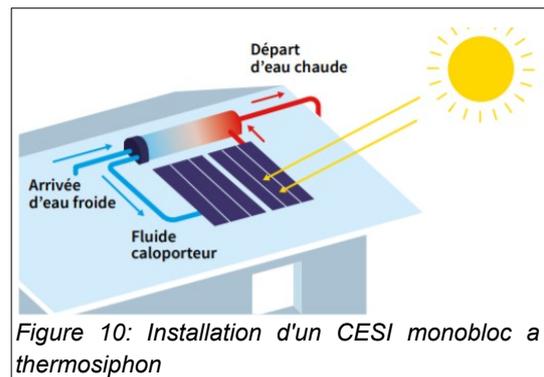


Figure 10: Installation d'un CESI monobloc à thermosiphon

5.5. CESI avec un fonctionnement optimisé

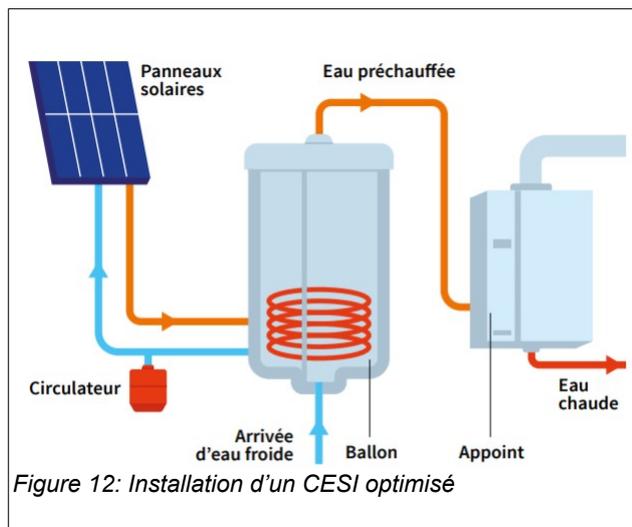


Figure 12: Installation d'un CESI optimisé

5.6. Principe CESC

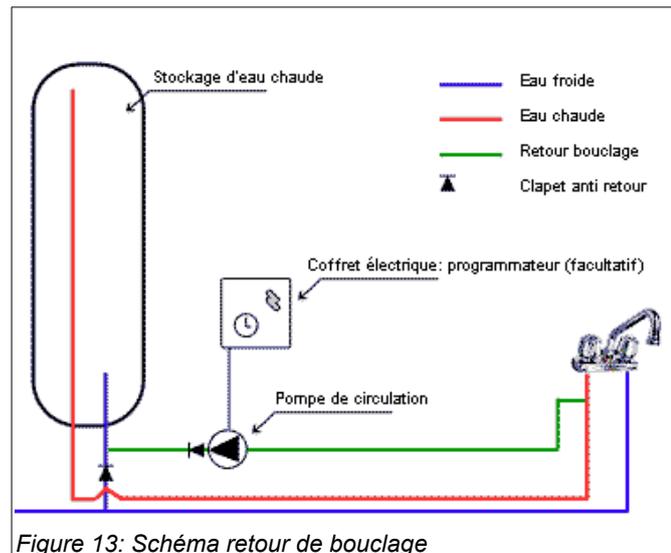


Figure 13: Schéma retour de bouclage

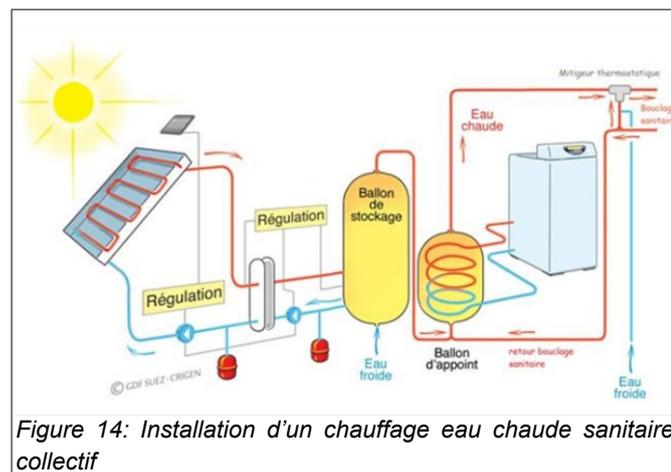


Figure 14: Installation d'un chauffage eau chaude sanitaire collectif

5.7. Principe chauffe eau sanitaire semi-collectif

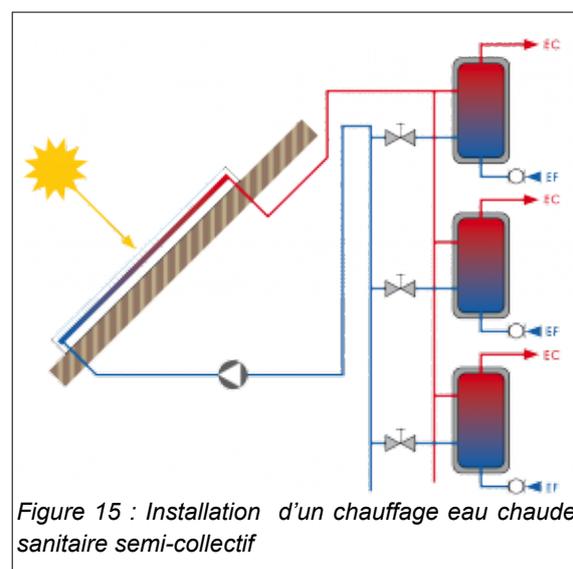


Figure 15 : Installation d'un chauffage eau chaude sanitaire semi-collectif

5.8. Capteurs

5.8.1. Capteur plan vitré

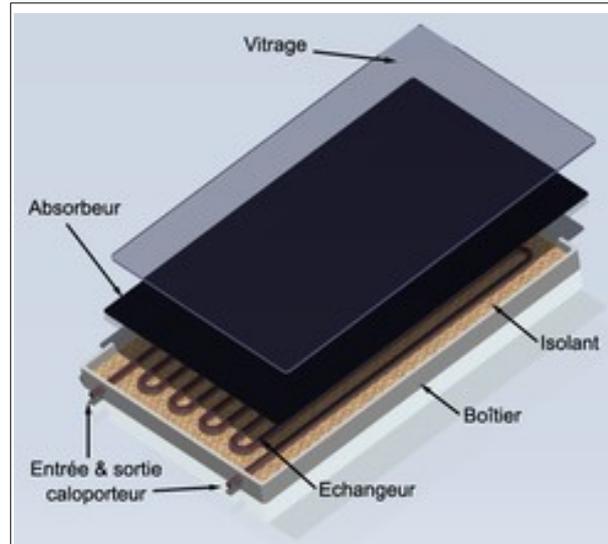


Figure 16: Structure d'un capteur plan vitré

5.8.2. Rendement des différents types de capteurs

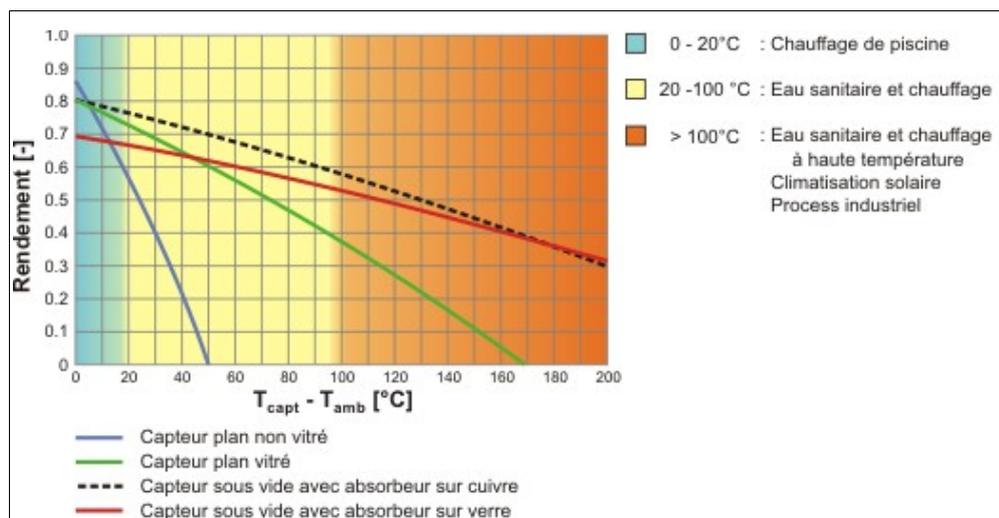


Figure 17: Graphique représentant l'évolution du rendement des différents capteurs en fonction de la température

5.8.3. Raccordement des capteurs

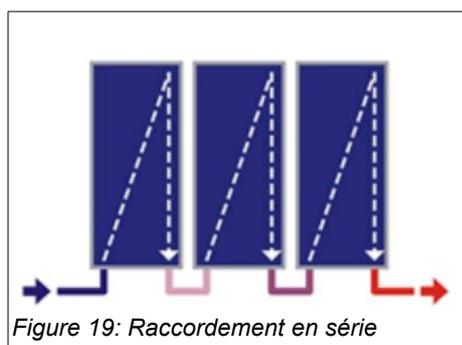


Figure 19: Raccordement en série

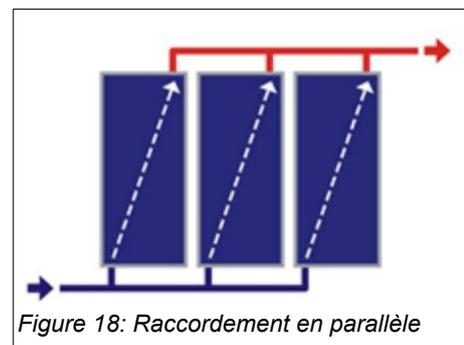


Figure 18: Raccordement en parallèle

5.9. Pompes

5.9.1. Pompe de surface

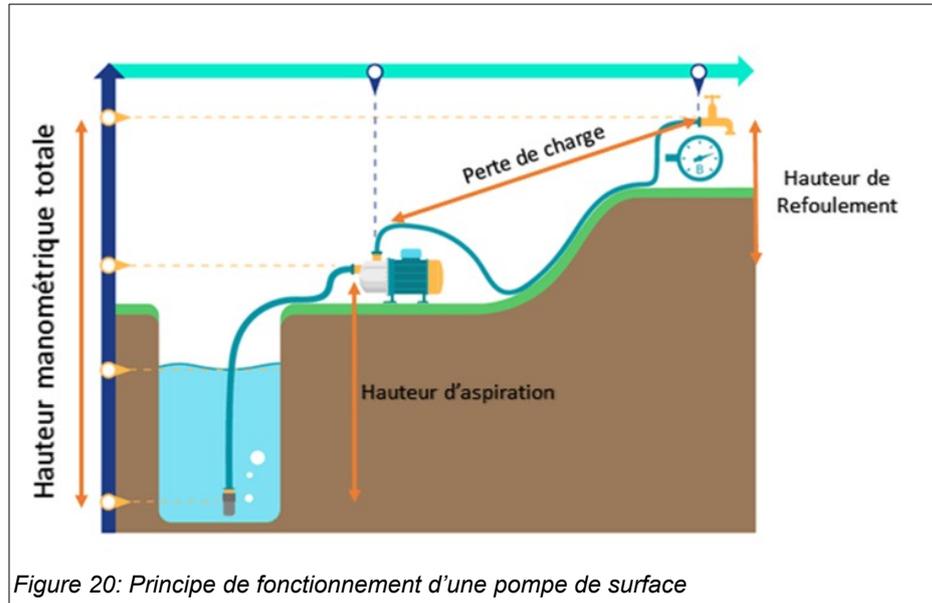


Figure 20: Principe de fonctionnement d'une pompe de surface

5.9.2. Pompe immergée

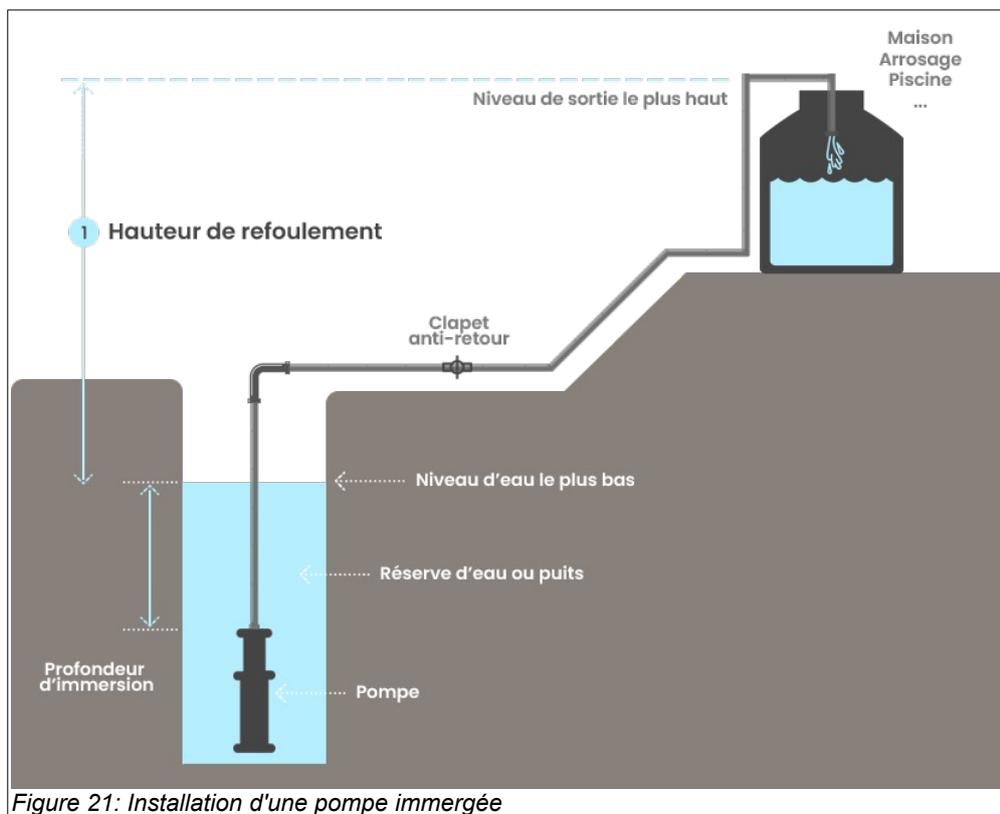


Figure 21: Installation d'une pompe immergée

5.10. Échangeur caloduc

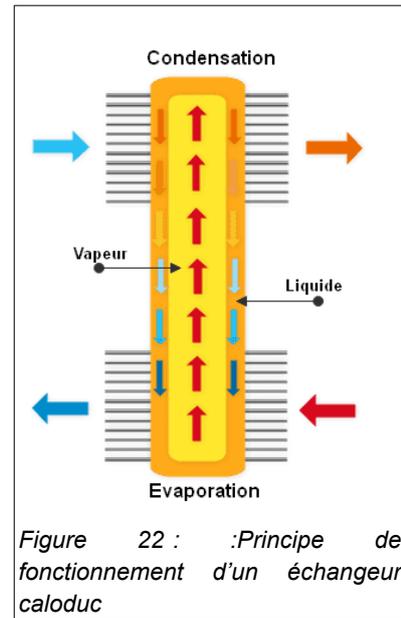


Figure 22 : Principe de fonctionnement d'un échangeur caloduc

5.11. Échangeur à plaques

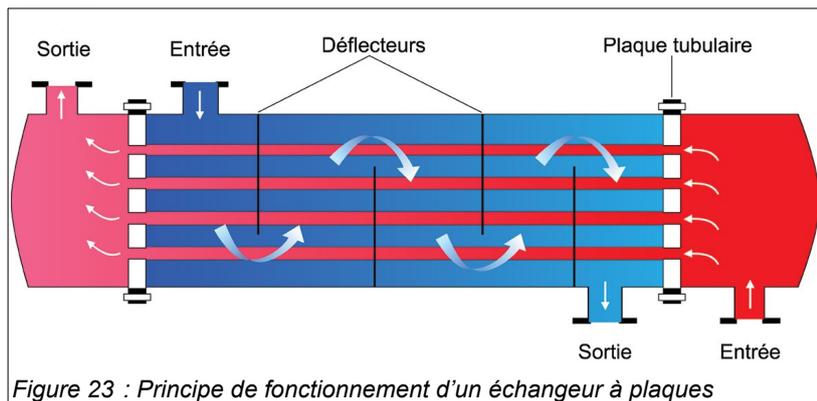


Figure 23 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques

5.12. Effet de serre

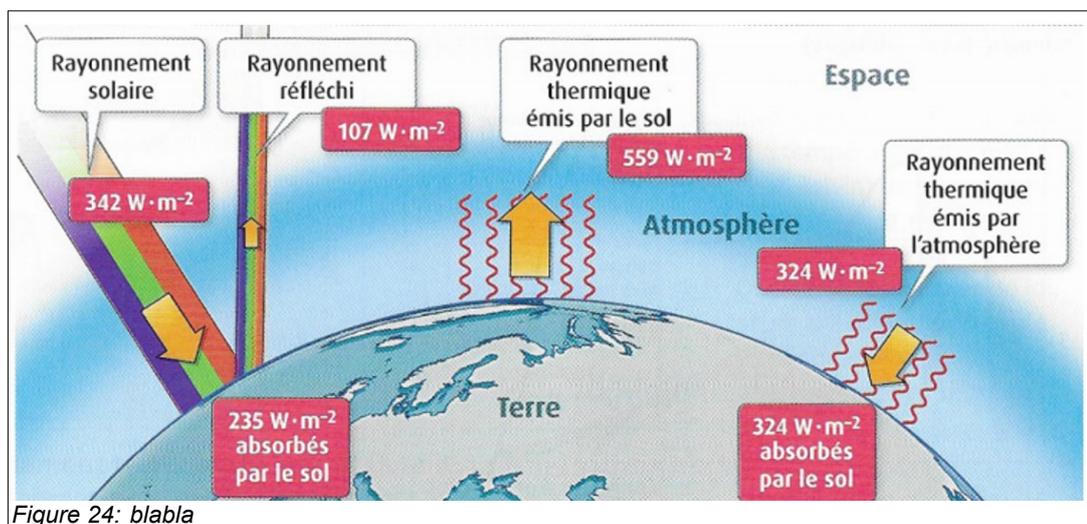
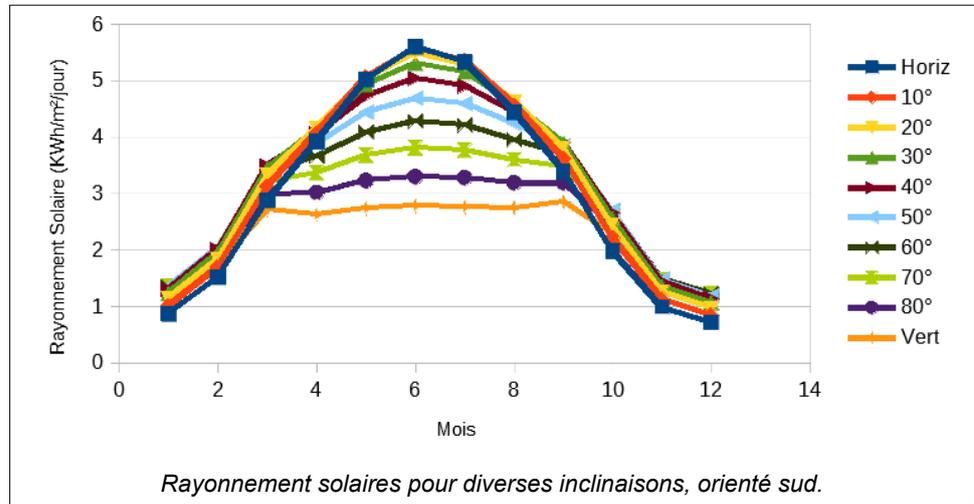


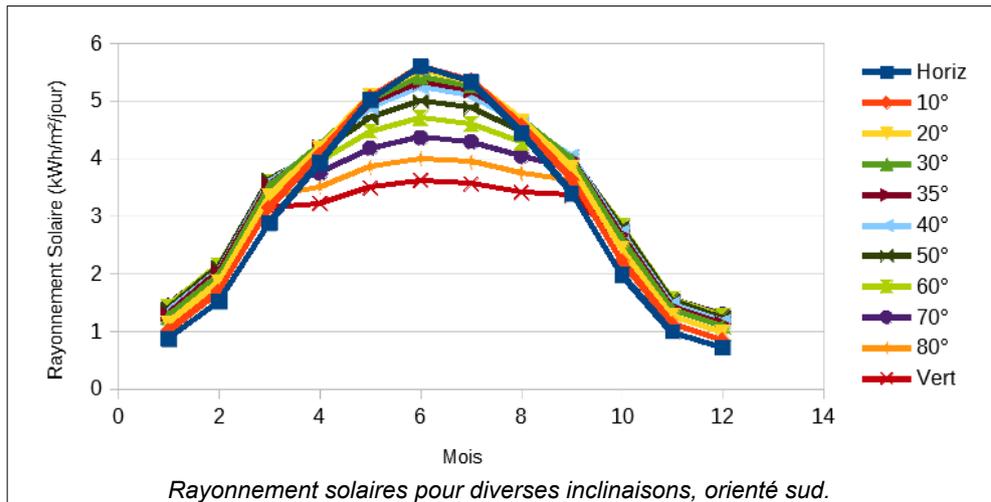
Figure 24: blabla

5.13. Graphiques associés aux tableaux

5.13.1. Tableau 1

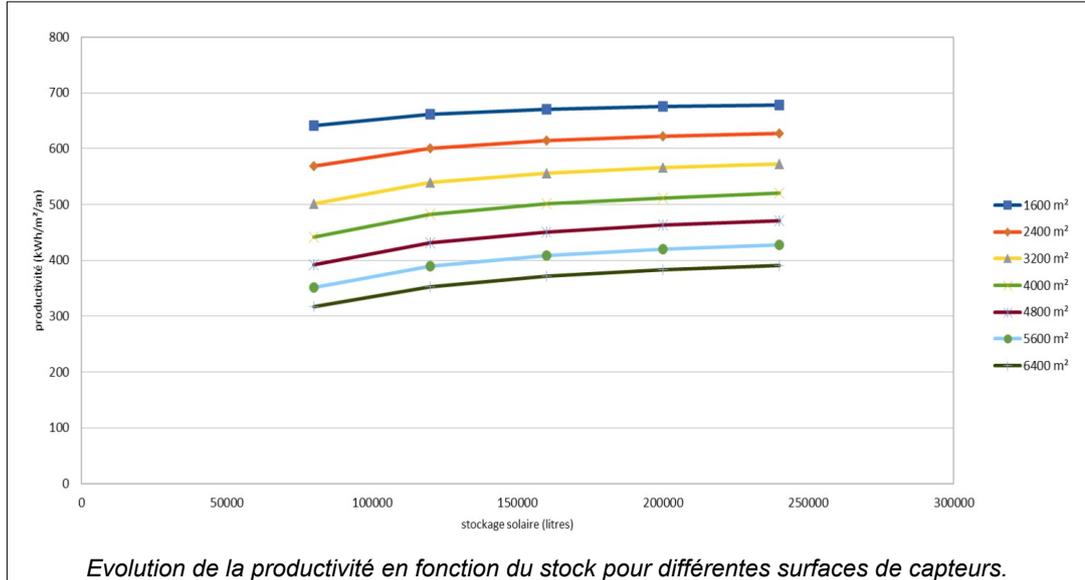


5.13.2. Tableau 2

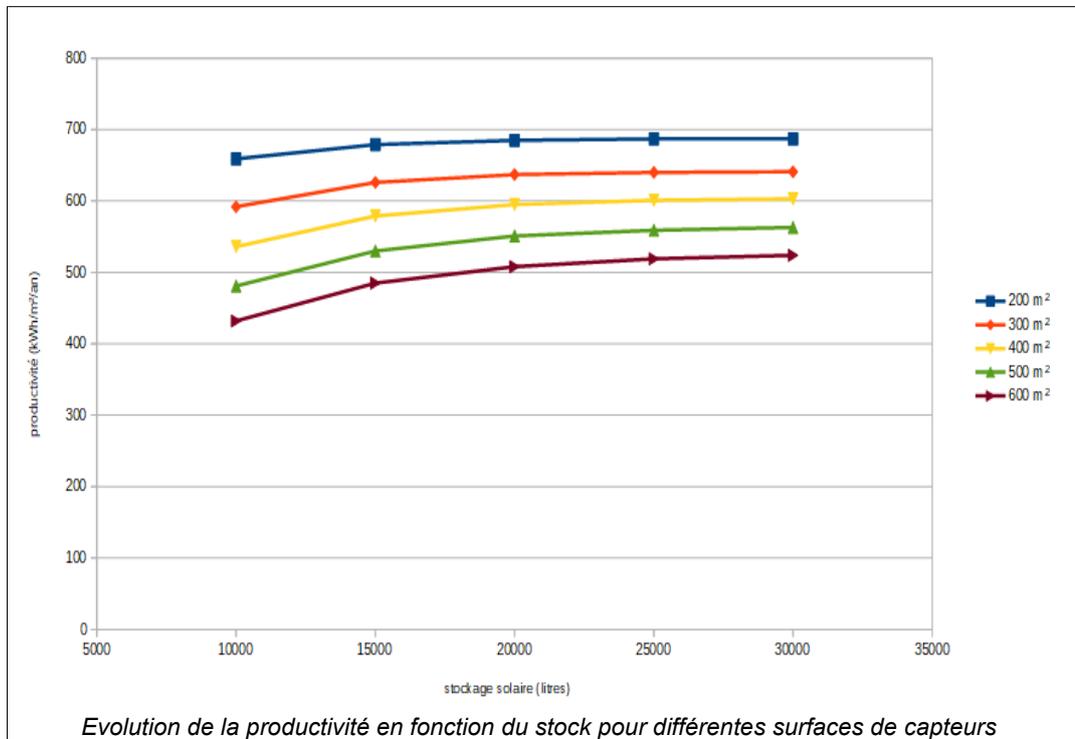


5.14. Courbe de l'évolution de la production en fonction du stock pour différentes surfaces de capteurs.

5.14.1. Surface de captation entre



5.14.2. Surface de captation entre 200 et 600 m²



5.15. Devis

Nature de prestations Fourniture & main d'œuvre	Coût budgété (Euro HTVA) à titre indicatif	Caractère de l'investissement
Maçonnerie: -Socle capteurs -Socle ballon -Socle échangeur -L'ensemble	2 000 euros	Fixe
Capteurs solaires: -Surface des capteurs (400 m ²) -Supportage -L'ensemble	40 000 euros	Variable
Ballons de stockage -Nombre (2) -Capacité unitaire (10000 litres) -Capacité totale (20000 litres) -L'ensemble	70 000 euros	Fixe
Echangeur de chaleur -Puissance (1200 kW) -L'ensemble	700 euros	50% Fixe 50% Variable
Pompe de circulation:(2) Pompes jumelées	1 000 euros	Fixe
Pompe de remplissage	1 500 euros	Fixe
Tuyauterie et calorifugeage - Longueur :72/63 ml -Diamètre : du 50/52 au 20/22 -L'ensemble	19 000 euros	30% Fixe 70% Variable
Electricité et régulation -Armoire de commande -Régulation différentielle - L'ensemble	10 000 euros	Fixe
Vannerie & accessoires -Vanne d'équilibrage -Robinet à passage direct -Clapet, purgeur, vase d'expansion... -L'ensemble	10 000 euros	Fixe
Télé contrôle & suivie -Matériel & logiciels -L'ensemble	15 500 euros	Fixe
Total pour une chaufferie	169 700 euros	

Tableau 5: Liste de prix des différents composants de l'installation solaire.