

Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2009 – 19

Conversion de l'énergie solaire



Etudiants :

Manon ASSALI

Adem CHABANE

Blandine DERAUGLAUDRE

Diane LIPPENS

Marine MUDRY

Enseignant-responsable du projet :

François GUILLOTIN

Date de remise du rapport : **22/06/09**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2009 – 19**

Intitulé du projet : ***Conversion de l'énergie solaire***

Type de projet : ***expérimental, recherche bibliographique***

Objectifs du projet :

Notre projet comportait principalement trois objectifs :

- ***Étudier l'effet de serre à l'aide d'une serre plastique réaliser pour un projet antérieur***
- ***Construire un chauffe eau solaire thermique***
- ***Tester son efficacité et sa rentabilité par rapport à l'achat d'un chauffe eau solaire industriel***

TABLE DES MATIÈRES

1.Introduction.....	7
2.Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3.Dossier.....	9
3.1.Le soleil.....	9
3.1.1.Quelques définitions.....	9
3.1.2.Inclinaison de l'axe.....	10
3.1.3.Transferts thermiques.....	12
3.1.3.1. Conduction.....	12
3.1.3.2. Rayonnement	13
3.1.3.3. Convection.....	13
3.1.4.L'effet de serre.....	14
3.1.4.1. Théorie.....	14
3.1.4.2. Expérience.....	15
3.2.Le panneau solaire thermique.....	18
3.2.1.Principe et réalisation d'un panneau solaire thermique.....	18
3.2.1.1. Explication du principe.....	18
3.2.1.2. Réalisation d'un panneau solaire thermique.....	20
3.2.2.Circuit global.....	21
3.2.2.1. Les modes de circulation du fluide caloporteur.....	21
3.2.2.2. Les différents circuits du système.....	23
3.2.2.3. Notion de vase d'expansion.....	24
3.2.3.L'intérêt économique des chauffe-eau solaires.....	26
3.2.3.1. Construire un panneau solaire thermique en France.....	26
3.2.3.2. L'auto-installation, une solution ?.....	26
3.2.3.3. Application à notre panneau solaire : coût de revient.....	27
4.Conclusions et perspectives.....	29
5.Bibliographie.....	31
6.Annexes	33
6.1.Propositions de sujets de projets	33

1. INTRODUCTION

Chacun a entendu parler du réchauffement de la planète, des gaz à effet de serre, de l'épuisement des ressources. Le fait que l'homme épuise la planète, notamment pour couvrir ses besoins en énergie n'est plus à prouver. Il convient donc dans ce contexte de rechercher d'autres sources d'énergie qui soient plus respectueuses de l'environnement, moins polluantes, plus durables. Néanmoins, pour faire face aux réalités économiques du monde d'aujourd'hui, ces nouvelles sources doivent être économiquement rentables, d'autant plus si l'on veut convaincre les particuliers d'adapter leur installation domestique. Dans cette optique, le chauffe eau solaire est une des solutions d'avenir. Utilisant l'énergie du soleil, le chauffe eau solaire thermique permet en effet de chauffer l'eau courante ou même l'air si on installe un plancher chauffant.

C'est dans ce contexte que nous avons décidé de réaliser une installation thermique. Nous prévoyons donc de fabriquer un panneau solaire thermique ainsi que le réseau hydraulique associé, afin de simuler une installation réelle.

Dans le cadre de ce dossier, et afin de rendre compte de ce qui a été réalisé, nous nous pencherons donc tout d'abord sur les caractéristiques du rayonnement solaire afin de poser les bases théoriques puis nous étudierons le chauffe eau solaire et enfin donnerons quelques informations sur sa rentabilité.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Dans notre projet, les rôles ont été assez équilibrés. Au début nous nous sommes séparés en deux groupes pour mener d'un côté l'expérience sur l'effet de serre et de l'autre commencer la construction du panneau solaire thermique. Lorsque l'expérience a pris fin, le groupe s'est rejoint pour travailler autour du panneau solaire, qui constitue la partie centrale de notre projet.

Les principaux retards que nous avons connus ont été liés à la nécessité d'acheter le matériel. Ainsi chaque séance se déroulait de cette façon : fixation des éléments achetés, calcul des dimensions nécessaires pour les parties suivantes puis recherche de ces éléments sur internet.

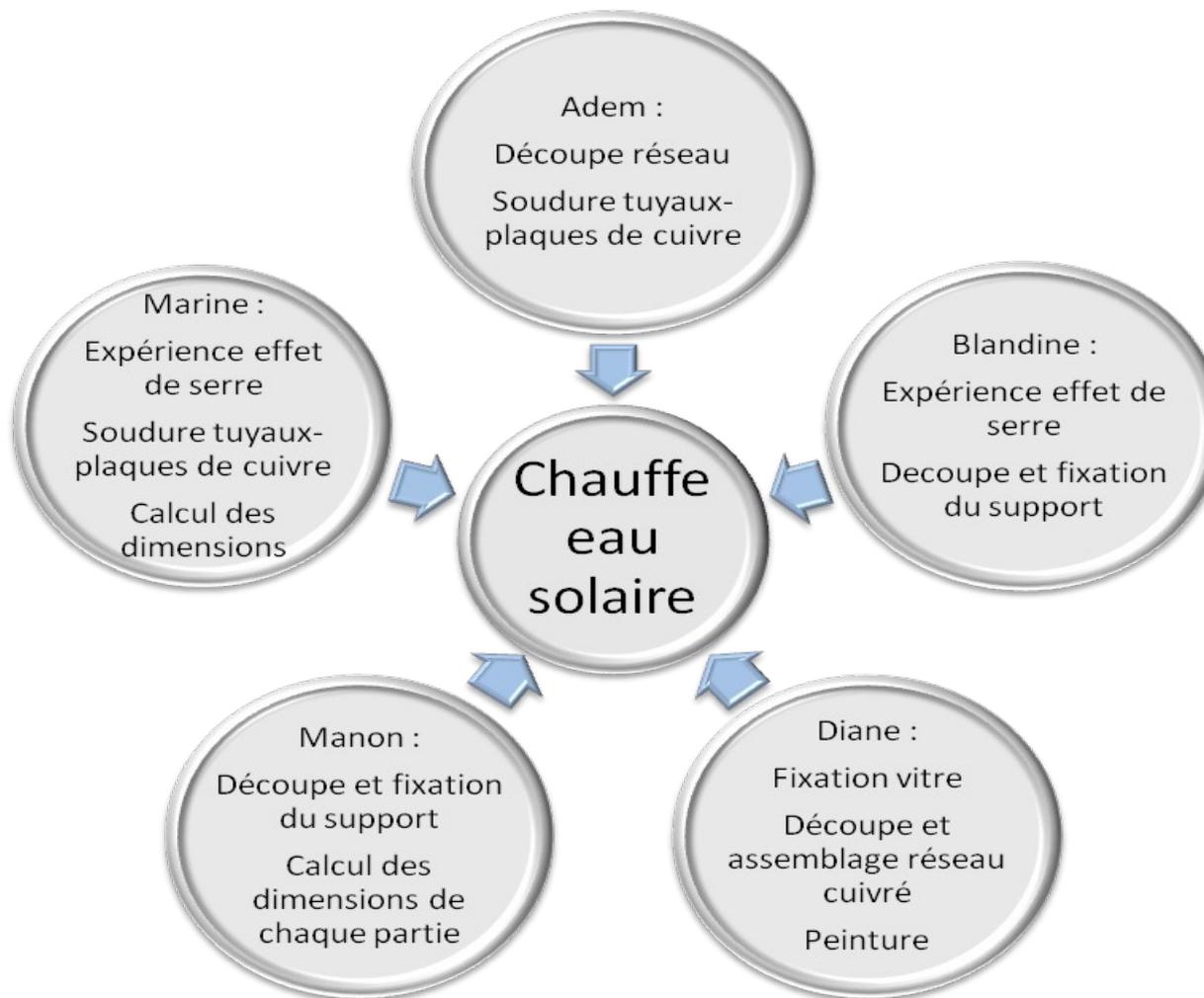


Tableau 1: Répartition des taches

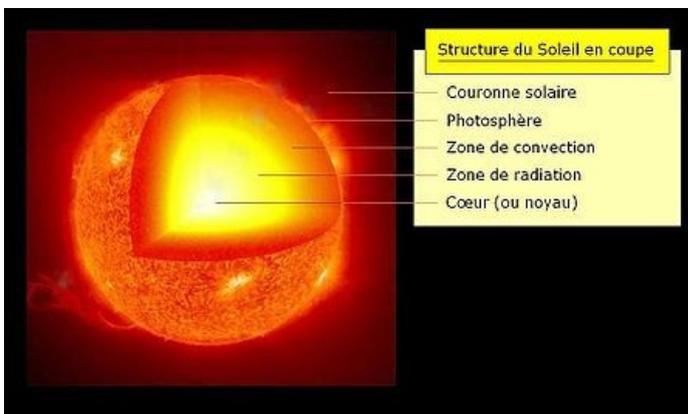
3. DOSSIER

3.1. Le soleil

3.1.1. Quelques définitions

L'univers est composé de plusieurs galaxies, elles-mêmes composées de plusieurs systèmes planétaires. On appelle notre système planétaire le système solaire ; le Soleil en est l'étoile centrale. Autour de celle-ci gravitent la Terre, sept autres planètes, cinq planètes naines, des astéroïdes, des comètes et de la poussière. Le Soleil représente à lui seul 99,86 % de la masse du système solaire ainsi constitué.

Le Soleil tire son énergie des réactions de fusion nucléaire qui transforment, en son noyau, l'hydrogène en hélium (composés principaux du Soleil). Le cœur est la seule partie du Soleil qui produise une quantité notable de chaleur : le reste de l'étoile tire sa chaleur



uniquement de l'énergie qui en provient. Dans l'état actuel du Soleil, à chaque seconde, plus de 4 millions de tonnes de matière sont transformés en énergie qui s'échappe dans l'espace sous forme de rayonnement électromagnétique (lumière, rayonnement solaire) et de flux de particules (vent solaire).

Cette énergie solaire, transmise par rayonnement, rend possible la vie sur Terre par apport de chaleur et de lumière, permettant la présence d'eau à l'état liquide et la

Illustration 1: Le Soleil

photosynthèse des végétaux. Le rayonnement du Soleil est aussi responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur notre planète.

Les principales radiations émises par le Soleil sont les ultraviolets, la lumière visible et les infrarouges. Les principales radiations émises par le Soleil sont les ultraviolets, la lumière visible et les infrarouges.

Les infrarouges (IR), invisibles, transportent de l'énergie. Ils sont responsables, avec certains gaz de l'atmosphère terrestre, de l'effet de serre (cf 3.1.4 Effet de serre).

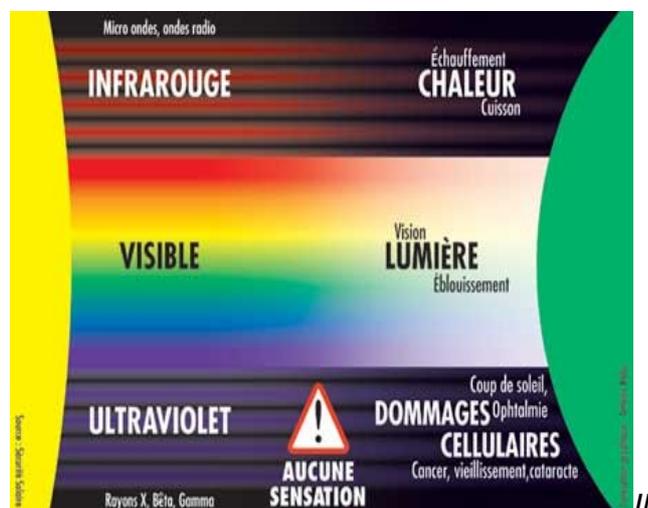
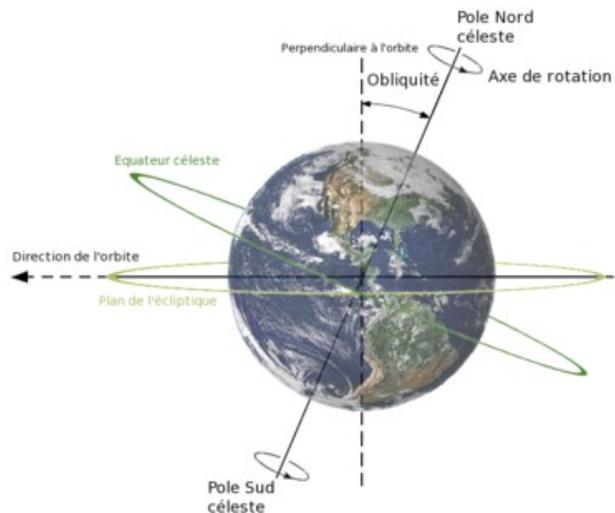


Illustration 2: Rayonnement émis par le Soleil

3.1.2. Inclinaison de l'axe



L'inclinaison de l'axe ou obliquité est une grandeur qui donne l'angle entre l'axe de rotation de la Terre et une perpendiculaire à son plan orbital (plan de l'écliptique).

L'axe de rotation de la Terre est incliné d'environ 23 degrés par rapport à son orbite autour du Soleil. En arrivant sur Terre, les rayons solaires, de par la distance, sont tous parallèles, c'est donc l'inclinaison de la Terre par rapport à son orbite autour du soleil qui détermine les effets de ces rayons.

Illustration 3: Inclinaison de la Terre

On peut noter quatre points particuliers sur la trajectoire d'une planète en fonction de son inclinaison : le solstice de juin (jour le plus court pour l'hémisphère Sud), le solstice de décembre (jour le plus court pour l'hémisphère Nord), les équinoxes de printemps et d'automne (durée du jour égale celle de la nuit).

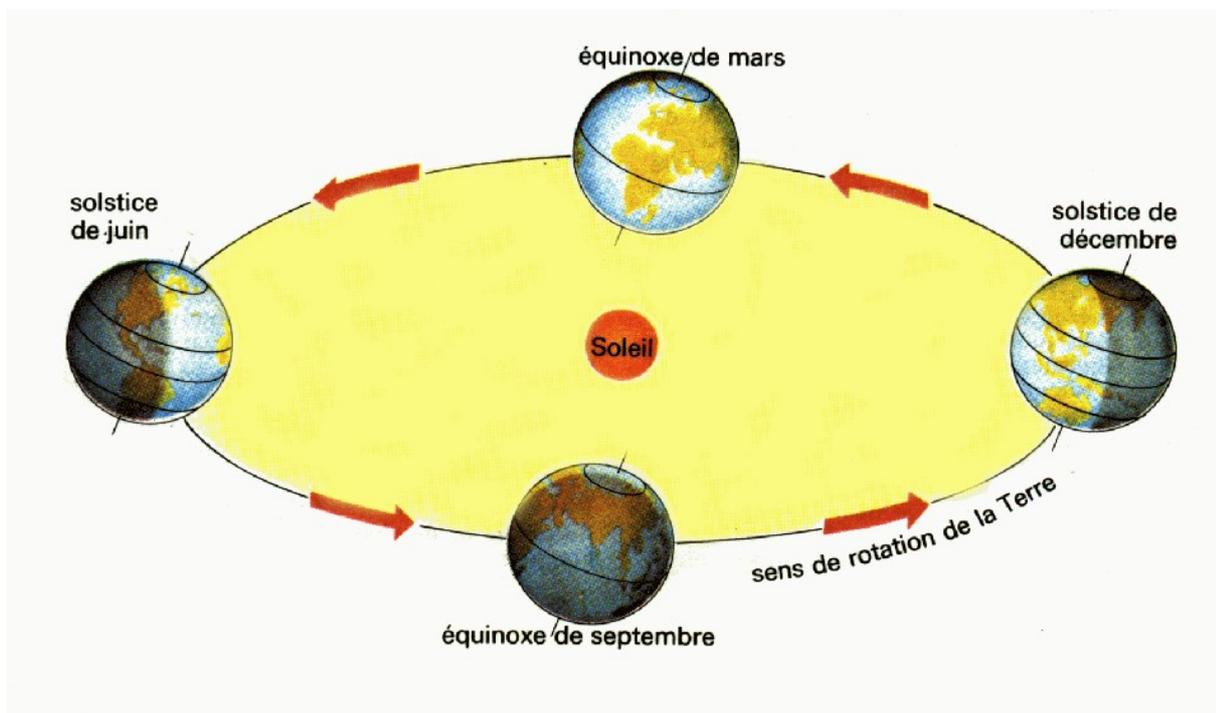


Illustration 4: La course du Soleil

À un même moment, les rayons du Soleil peuvent arriver plus perpendiculairement au Nord et plus obliquement au Sud, c'est alors l'été dans l'hémisphère Nord et l'hiver dans l'hémisphère Sud. Lorsque les rayons arrivent perpendiculairement par rapport au sol, ils sont répartis sur une petite surface, ils sont plus concentrés, il fait plus chaud que lorsqu'ils arrivent de façon oblique. (cf schéma) Il faut aussi tenir compte de la durée de l'éclairement solaire (apport de chaleur) qui est plus long en été qu'en hiver.

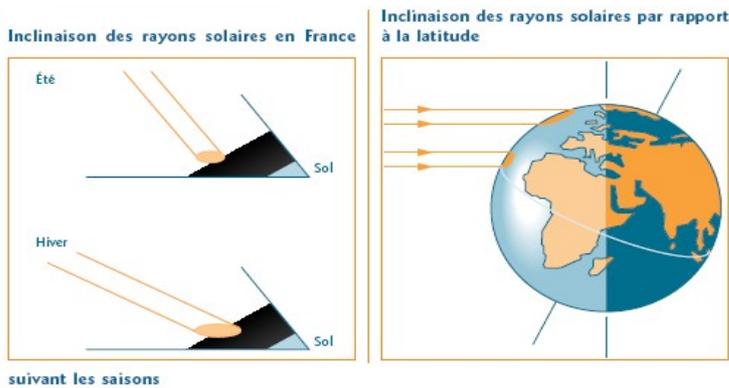


Illustration 5: Application à la Terre suivant les saisons

À l'échelle humaine nous remarquons que la position du Soleil dans le ciel est aussi un indicateur de chaleur. Effectivement, en hiver, le soleil est bas, il fait plus froid. Dans une même journée, c'est à midi qu'il fera le plus chaud quand le soleil est haut dans le ciel.

L'énergie récupérée par un capteur plan sera maximum s'il est orienté perpendiculairement au rayonnement direct. En moyenne, sur une année, l'énergie maximale récupérée sera obtenue pour une inclinaison égale à la latitude avec une orientation vers l'équateur. Une inclinaison plus forte que la latitude augmente l'énergie récupérée en hiver aux dépens de celle récupérée en été. Inversement, une inclinaison plus faible que la latitude augmente l'énergie récupérée en été aux dépens de celle récupérée en hiver. Pour illustrer cela, prenons l'exemple de l'ensoleillement en France. Ce graphique simplifié nous permet de déduire l'orientation optimale du panneau solaire.

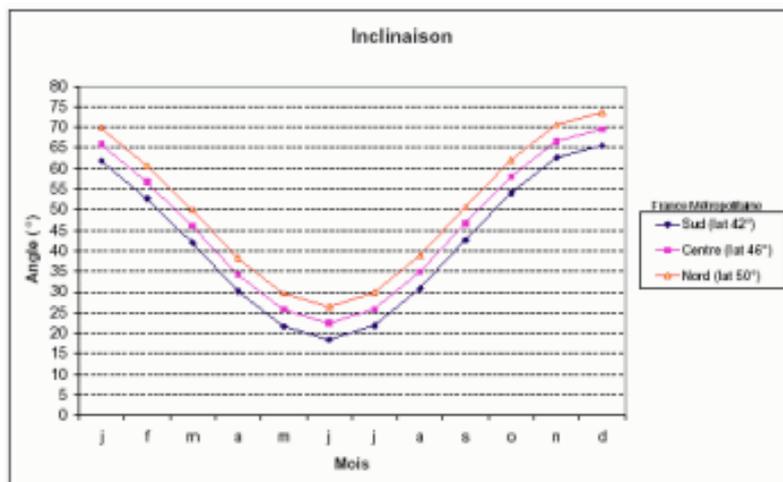


Illustration 6: Inclinaison du panneau vs mois

Si l'on prend l'exemple de Rouen, situé bien évidemment au Nord de la France, le capteur devrait être incliné au mois de juin de 27° en moyenne pour que l'ensoleillement du panneau soit maximal. L'inclinaison du panneau suit la loi suivante :

$$\text{Inclinaison} = (\text{latitude du lieu}) - \arcsin(0,4 * \sin(N * 360 / 365))$$

avec N = nombre de jours entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré, de signe négatif vers la saison froide.

Si l'on fait l'application à Rouen, pour le 20 juin, N=90 et latitude 49°, on trouve une inclinaison optimale de 25°.

3.1.3. Transferts thermiques

Dans cette partie, nous allons présenter les trois principaux phénomènes d'échange de chaleur au niveau du sol.

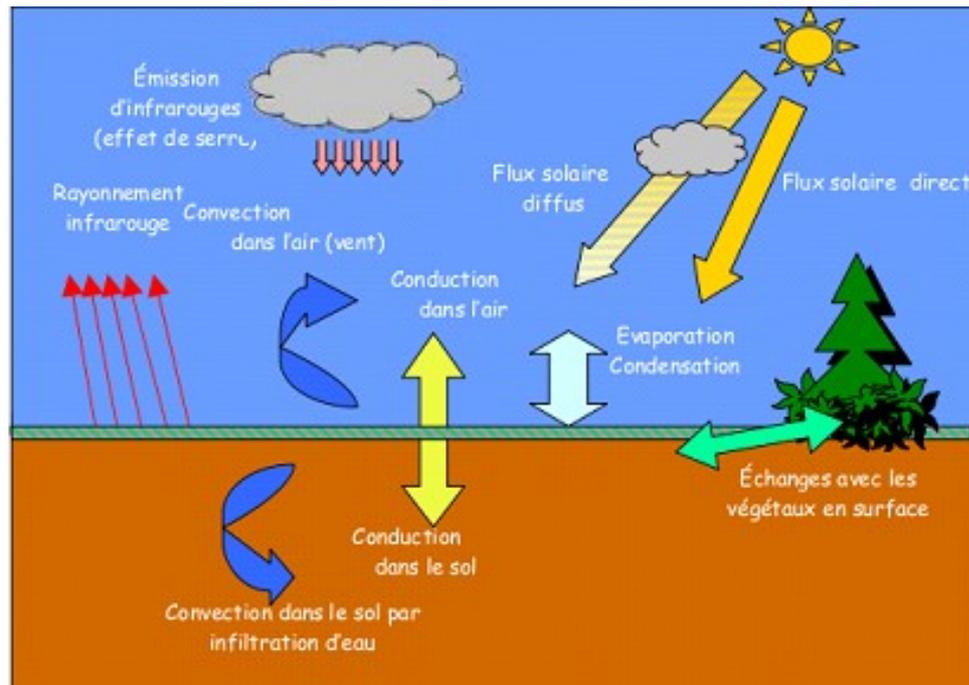


Illustration 7: Les transferts thermiques sur Terre

3.1.3.4. Conduction

La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement de matière. C'est en fait l'agitation thermique qui se transmet de proche en proche, une molécule ou un atome cédant une partie de son énergie cinétique à son voisin.

Selon l'expérience de Fourier, pour un régime permanent, un flux de chaleur Q dans une géométrie de section S et de longueur L est exprimé comme suit :

$$Q_{cond} = -\frac{\lambda \cdot S}{L} * (T_2 - T_1)$$

T₁ et T₂ étant les températures de surface aux extrémités du matériau en K, λ étant la conductivité thermique du matériau exprimée en W.K⁻¹.m⁻¹

Dans le cas de régimes transitoires, les transferts de chaleur par conduction sont régis par l'équation générale de la conduction. La température est alors définie pour tout point de l'espace à tout instant t par :

$$\lambda * \nabla(T) + \dot{q} = \rho * C_p * \frac{\partial T}{\partial t}$$

\dot{q} étant la source interne en $W.m^{-3}$ (quantité de chaleur générée, dans un volume de matière délimité, durant un laps de temps prédéfini), ρ la masse volumique en $kg.m^{-3}$ et C_p la chaleur spécifique en $J.K^{-1}.kg^{-1}$ (quantité de chaleur à apporter pour élever d'un degré un kilogramme de matériau).

3.1.3.2. **Rayonnement**

Tout corps porté à une température T supérieure au zéro absolu émet de l'énergie sous forme de rayonnement. Contrairement aux deux autres modes d'échanges d'énergie que sont la conduction et la convection, le transfert par rayonnement ne nécessite pas un support matériel. Il peut se propager dans le vide.

Selon la loi de déplacement de Wien, le produit de la température d'un corps noir par la position du maximum d'émission en longueur d'onde est une constante :

$$\lambda_{max} * T = 2897.8 * 10^{-6} \text{ K.m}$$

Sous notre latitude, la température du sol est comprise entre 250 K et 310 K, ce qui correspond à une longueur d'onde entre 9 μm et 12 μm . C'est l'intervalle de l'infrarouge thermique.

De plus, toute surface qui émet un rayonnement est caractérisée par un coefficient σ compris entre 0 et 1 (corps noir) appelé émissivité (capacité d'un matériau d'absorber et rayonner l'énergie) et ρ la constante de Stéfán-Boltzmann. La loi de Boltzmann permet de relier quantité d'énergie Q , la température et l'émissivité :

$$Q_{ray} = \rho * \sigma * T^4$$

3.1.3.3. **Convection**

La convection correspond à un phénomène de conduction dans un milieu en mouvement. Elle concerne principalement l'interface entre un solide et un fluide à températures différentes. Par exemple, la convection met en œuvre l'action des mouvements d'air des couches très basses de l'atmosphère sur la température de surface du sol.

On utilise une loi simplifiée : la loi de Newton qui exprime la quantité de chaleur échangée Q en fonction de la différence de température entre le solide(sol) et le fluide(air), h étant le coefficient de convection en $W.K^{-1}.m^{-2}$. Il dépend de beaucoup de paramètres dont la viscosité, le coefficient de dilatation du fluide et la vitesse moyenne du fluide.

$$Q_{conv} = h * (T_{sol} - T_{air})$$

3.1.4. L'effet de serre

3.1.4.1. Théorie

Pour aborder l'effet de serre dans le capteur solaire thermique, il convient d'énoncer tout d'abord quelques généralités concernant le comportement des corps dans le rayonnement lumineux.

Il existe trois types de réaction d'un corps au rayonnement. Il peut réfléchir, absorber ou être traversé par le rayonnement.

Chaque corps est donc caractérisé par trois coefficients décrivant ces propriétés :

- 1 - R, le coefficient de réflexion, calculé en divisant la quantité d'énergie réfléchie par la quantité d'énergie incidente.
- 2 - a, le coefficient d'absorption, calculé en divisant la quantité d'énergie absorbée par la quantité d'énergie incidente.
- 3 - T, le coefficient de transmission, calculé en divisant la quantité d'énergie transmise par la quantité d'énergie incidente.

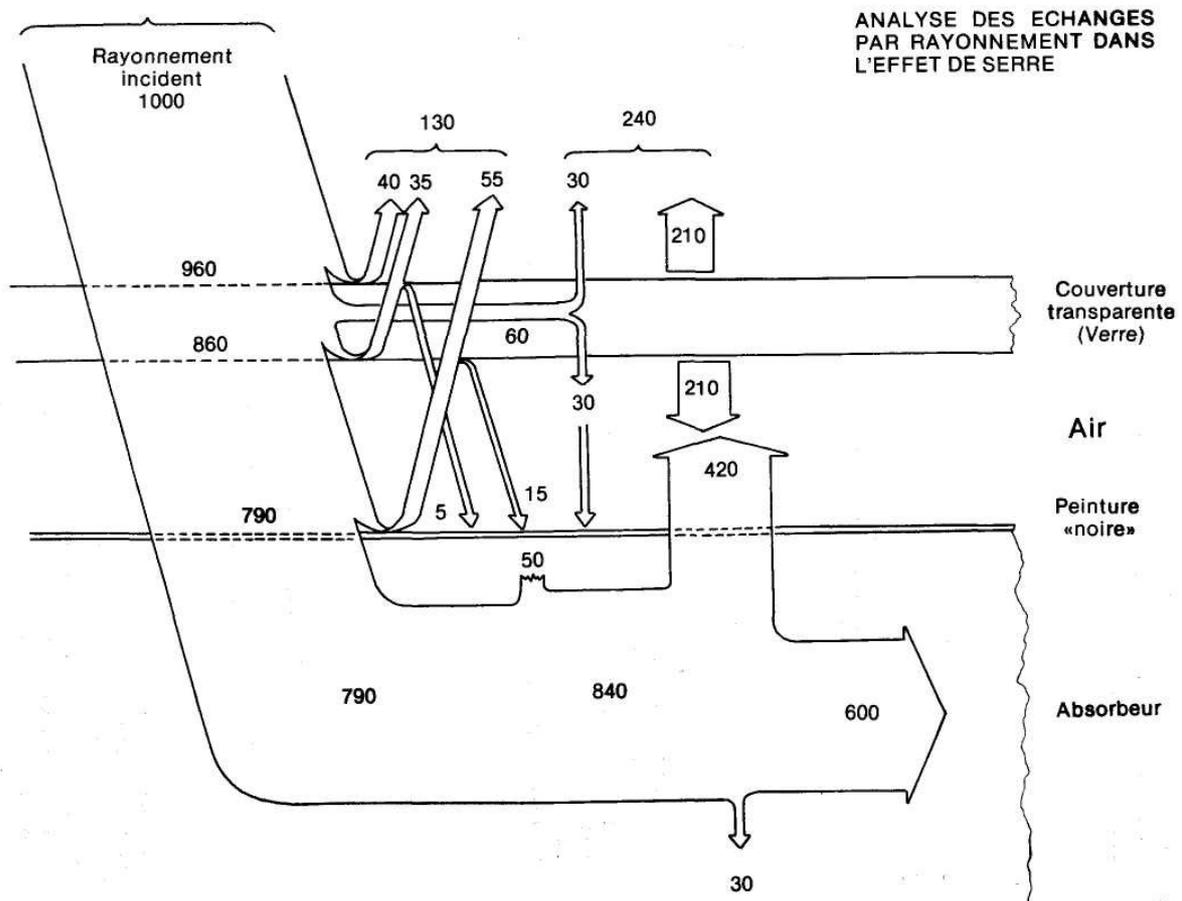
Un miroir parfait serait tel que $R=1$, un corps noir tel que $a=1$ et un corps transparent tel que $T=1$, mais en vérité aucun de ces corps n'existe. Chaque corps est tel que $R+a+T=1$ et réagit différemment en fonction des longueurs d'onde auxquelles il est exposé.

Il faut également noter que si les corps assimilables à des corps noir absorbent le rayonnement qu'ils reçoivent, ils s'échauffent et réémettent donc un rayonnement lié à l'agitation moléculaire. La longueur d'onde de ce rayonnement est directement liée à la température selon la loi de Wien : $\lambda_{\max}T = 2,89.10^{-3} \text{ K.m}$. Pour des températures sous lesquelles l'eau reste liquide, soit de 273.15 K à 373.15 K, on obtient $7,74.10^{-6}\text{m} < \lambda_{\max} < 1,06.10^{-5}\text{m}$ soit un rayonnement infrarouge.

Enfin, le verre et certains types de plastique ont la particularité d'être transparent au rayonnement visible et d'être des corps noir pour le rayonnement infrarouge.

Le rayonnement arrive donc initialement sur le toit de la serre, la traverse presque intégralement et est absorbé par le fond choisi pour être assimilable à un corps noir. Ce corps chauffe et émet en réponse des infrarouge qui vont être absorbés par le verre qui réémettra à son tour des infrarouges dans toutes les directions. Le corps noir recevra donc le rayonnement initial ajouté à la moitié du rayonnement infrarouge du verre. La serre est de plus parfaitement isolée pour éviter toute perte de chaleur. C'est cet effet de serre que l'on utilise dans un capteur solaire plan. A cela s'ajoute le phénomène de convection expliqué précédemment.

La figure suivante est tirée du livre Le chauffe eau solaire de Thierry CABIROL, Albert PELISSOU et Daniel ROUX et explique tous les échanges par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur pour un fonctionnement courant 40°C.



3.1.4.2. **Expérience**

- Matériel

Lampe 1000W

Serre plastique avec parois de couleur interchangeables

Deux capteurs de température

Boîtier d'acquisition

Ordinateur avec le logiciel synchronie

- Expérience

La lampe de 1000W est placée à une hauteur de 70 cm, lui permettant d'éclairer une surface d'environ un mètre carré, produisant ainsi un éclairage de 1000 W/m², soit l'équivalent de l'éclairage solaire sur Terre.

La serre, au sol, est placée dans le rayonnement avec différentes couleurs de « toit » et de fond selon les expériences. Un capteur est placé à l'extérieur du boîtier et un autre à l'intérieur, sensiblement à la même hauteur.

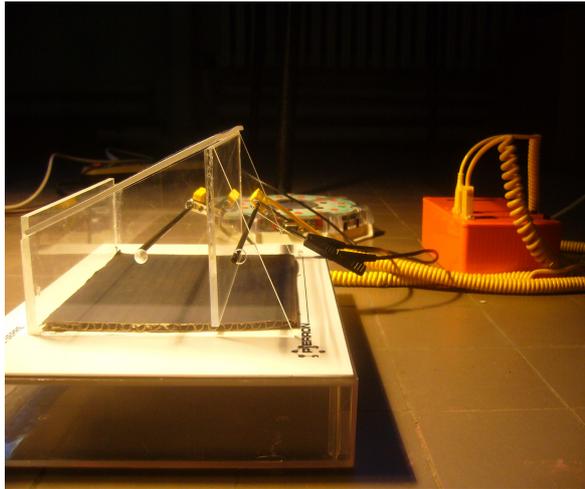


Illustration 9: Montage pour évaluer l'effet de serre

Les résultats sont ensuite enregistrés durant 45 minutes par synchronie grâce au boîtier d'acquisition. Celui-ci est calibré de façon à diminuer les bruits liés au déplacement des personnes, à la sensibilité des capteurs ou encore aux variations de l'éclairage extérieur qui filtre dans la pièce. Pour les mêmes raisons, les capteurs ont été reliés à la terre par l'intermédiaire de pinces crocodiles et d'un fil électrique. Les résultats transmis par le boîtier doivent être multipliés par un facteur cent pour être considérés comme des degrés Celsius. Enfin les résultats sont lissés sur le logiciel synchronie pour clarifier les courbes et en faciliter la lecture.

- Résultats

Première expérience : Le fond et le toit du boîtier sont transparents.

On observe au terme des 45 minutes d'expérience une température de 41°C, soit une variation de température $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}} = 41 - 29 = 12^\circ\text{C}$.

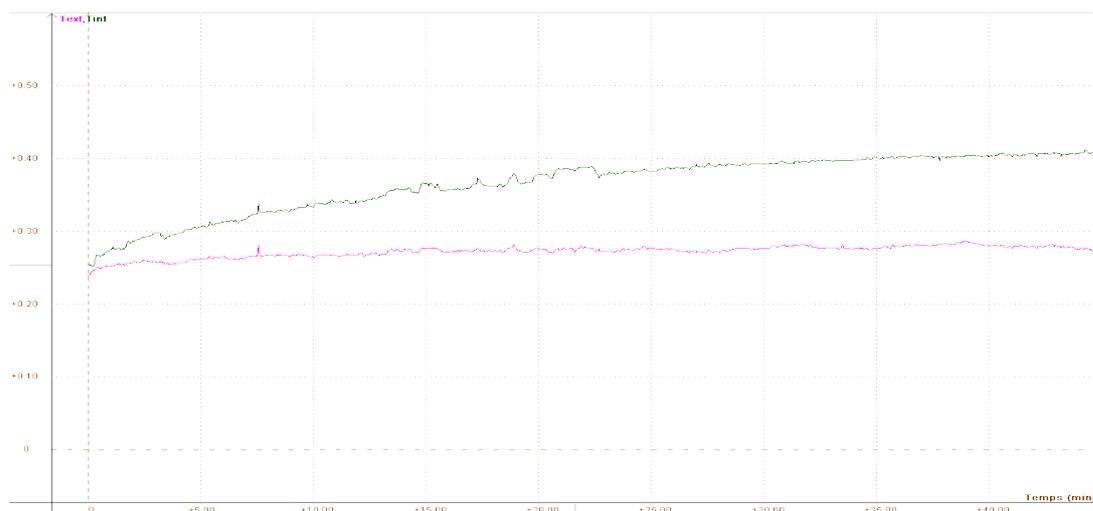


Illustration 10: Résultat expérience 1

Deuxième expérience : On observe au terme des 45 minutes d'expérience une température de 47.2°C, soit une variation de température $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}} = 47.2 - 29 = 18.2^\circ\text{C}$

C'est cette configuration de la serre qui modélise le mieux l'effet de serre terrestre, la Terre étant assimilable à un corps noir et l'atmosphère à un corps transparent

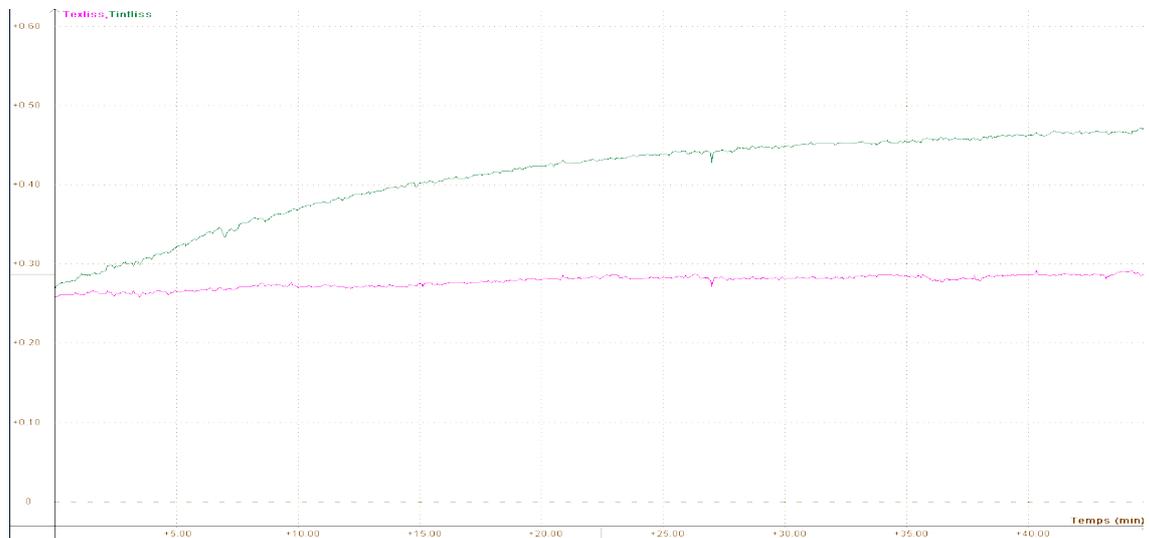


Illustration 11: Résultat expérience 2

La température extérieure est assez élevée car bien que ne subissant pas l'effet de serre, l'air extérieur reçoit le rayonnement direct. Néanmoins, cette température restant constante tout au long de l'expérience, on peut considérer qu'elle n'altère pas les résultats

- Analyse des résultats

Ainsi, on observe dans l'expérience qu'en seulement 45 min, la température dans une serre sous un éclairage équivalent à l'éclairage naturel augmente de 12°C à 18.2°C selon ses caractéristiques. Cette petite expérience illustre donc bien l'importance de l'effet de serre dans un système thermique même si les conditions d'expérimentations ne permettent pas d'obtenir des résultats aussi conséquents que ceux observés sur Terre. On observe également qu'un corps foncé soumis à l'effet de serre chauffera plus qu'un corps clair (ici transparent) s'ils sont faits de la même matière.

3.2. Le panneau solaire thermique

Après avoir réalisé une étude théorique sur le rayonnement, nous allons maintenant nous pencher sur une des applications qui utilise les principes précédemment cités : le panneau solaire thermique.

Où que l'on soit en France, même dans notre contrée reculée qu'est la Normandie, le Soleil brille un grand nombre d'heure par an. On peut donc tirer partie de son rayonnement afin de produire de l'énergie propre tout au long de l'année. Actuellement, il apparaît que les installations de chauffe-eau solaire qui utilisent des panneaux solaires thermiques sont très utilisées par les particuliers. Nous allons donc dans un premier temps étudier ces panneaux solaires thermiques pour en comprendre le fonctionnement, puis nous parlerons du circuit global permettant d'obtenir de l'eau chaude sanitaire, et enfin, nous ferons le point sur la rentabilité d'un tel produit en Normandie.

3.2.1. Principe et réalisation d'un panneau solaire thermique

Les panneaux solaires thermiques, appelés aussi capteurs solaires, fonctionnent principalement grâce aux phénomènes de rayonnement et de conduction et grâce au phénomène de l'effet de serre (cf. I.2, Lois de la physique ; I.3, Effet de serre). Le principe est assez simple : il s'agit de recueillir l'énergie provenant du soleil et de la transmettre, grâce à un système absorbant, à un fluide caloporteur sous la forme de chaleur.

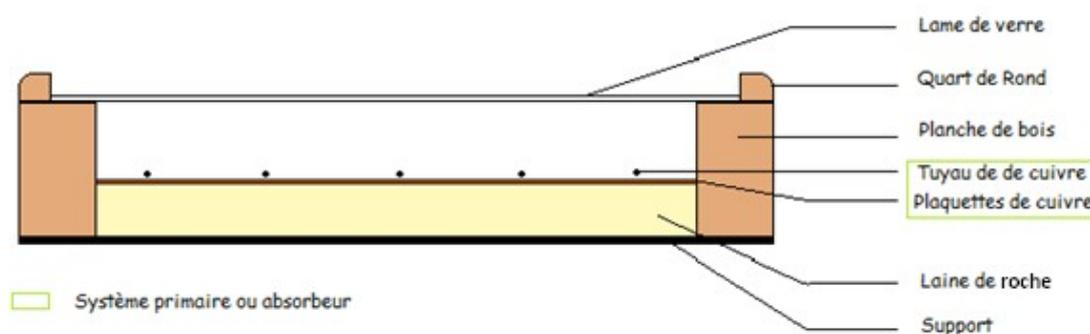
3.2.1.1. Explication du principe.

Le panneau solaire thermique est conçu pour récupérer l'énergie du soleil, qui nous provient sous forme de rayonnements, et de la transmettre à un fluide caloporteur, qui comme son nom l'indique, va capter cette énergie sous forme de chaleur et la transporter dans un circuit fermé.

L'installation comporte donc deux parties :

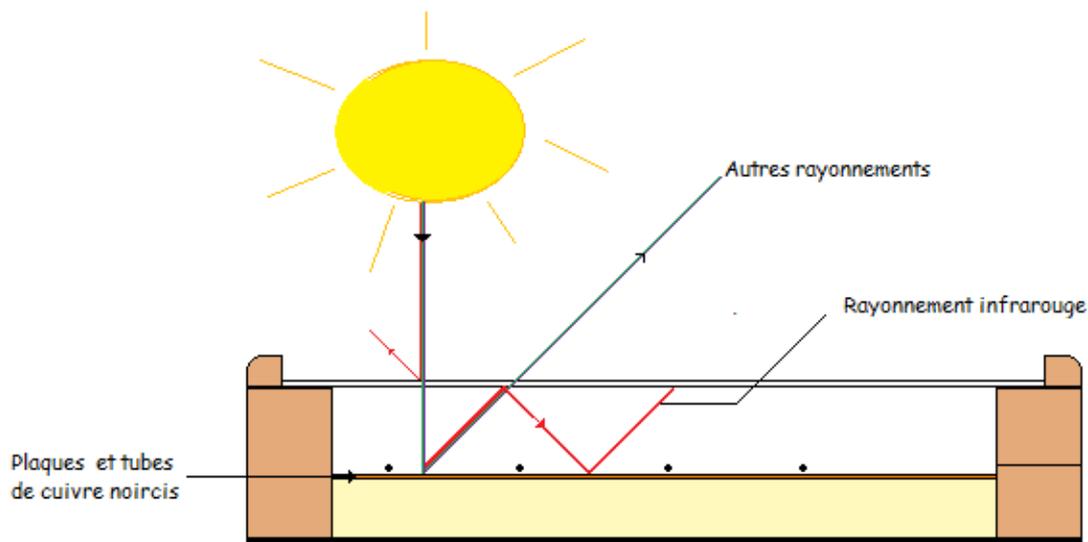
La première partie constitue "l'enveloppe" du système. Ce cadre en bois est surmonté d'une vitre qui retient le rayonnement infrarouge réémis par le système primaire (c'est à dire l'absorbeur, voir ci après). De plus, une épaisseur de laine de roche, très bon isolant, est placée entre l'absorbeur et le cadre, ce qui permet de limiter les pertes de chaleur.

Dans la deuxième partie se trouve l'absorbeur, qui est le cœur du système. Constitué de plaques de cuivre et de tubes métalliques transportant le fluide caloporteur, cet ensemble, qui a été préalablement peint en noir, reçoit le rayonnement solaire, et va ensuite s'échauffer.



Dessin 1: Les différents composants du panneau

Lorsque que les rayons du soleil vont traverser la plaque de verre et venir frapper le système primaire, ce dernier, qui rappelons le, a été peint en noir, va réémettre un rayonnement, dans le domaine de l'infrarouge cette fois (cf 1.3 Effet de Serre et Propriété du Corps noir). Cependant, les infrarouges ne traversent pas le verre; ce rayonnement va donc rester piégé à l'intérieur de notre système, qui va par conséquent s'échauffer par cet apport d'énergie. Ici, il y a donc échauffement par rayonnement.



Dessin 2: Le rayonnement infrarouge dans le panneau

Cependant, le cuivre est un métal très conducteur, électriquement comme thermiquement. Nous exploitons ici cette deuxième propriété. Le système de tubes de cuivre s'échauffe sous l'effet du rayonnement et par conduction, avec le réseau de plaques noircies. Un fluide caloporteur, ici l'eau, circule en circuit fermé dans les tuyaux de cuivre. Ce fluide va lui aussi s'échauffer au contact du cuivre et ressortir avec une température très élevée par rapport à sa température d'entrée. Il est alors conduit vers le bassin de stockage d'eau que l'on souhaite réchauffer. Nous verrons cela plus en détail dans la partie suivante.

3.2.1.2. Réalisation d'un panneau solaire thermique

Dans le but de vérifier l'efficacité d'un tel système, nous avons entrepris de fabriquer notre propre panneau solaire thermique. Il faut savoir qu'un tel projet nécessitait un achat conséquent de matériel. Cependant, cela nous a permis d'aborder la rentabilité d'un panneau solaire réalisé soi-même par rapport au kit solaire vendu dans des magasins traditionnels de bricolage.

Pour commencer, nous avons besoin d'un support pour notre panneau; nous avons utilisé une plaque de contreplaqué que nous avons trouvé dans l'atelier. Cette plaque de 91,5 cm sur 60 cm nous permet donc d'avoir une surface éclairée de 0,467 m². En effet, il faut tenir compte des planches de bois de largeur 2,8 cm sur 60 cm et 86 cm de longueur que nous avons du fixé pour délimiter notre panneau. Ces planches ont été collées puis vissées au support de bois, avant d'être fixées entre elles par les cotés. Cependant, seuls trois cotés furent préalablement fixés car il nous fallait pouvoir insérer le système métallique ainsi que la laine de roche. De plus, les deux faces opposées, de plus grande taille furent percées à une hauteur de 4,8cm du bord (trous opposés suivant la planche) afin d'y placer le réseau de tuyaux métalliques. Étant donné le danger et la difficulté pour souder les tuyaux entre eux, nous n'avons pas pu réaliser ce travail qui fut effectué par M. D. Fillatre. Après avoir placé la laine de roche sur le support, l'avoir recouvert des plaques de cuivre préalablement découpées et après avoir insérer le système hydraulique, nous avons pu fixer la dernière planche.

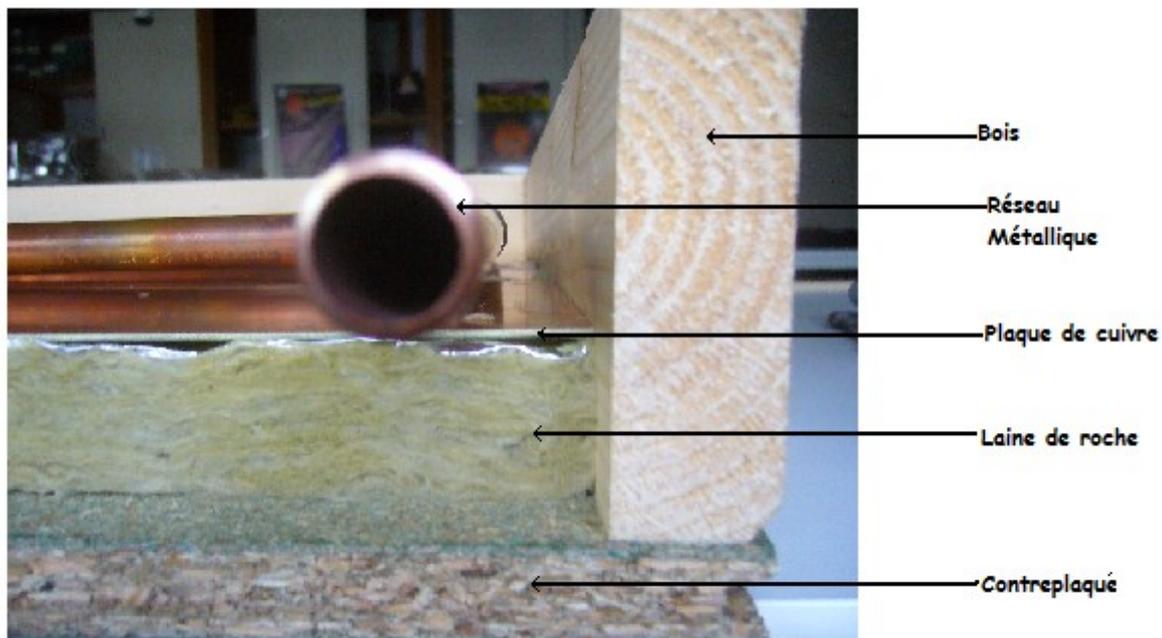


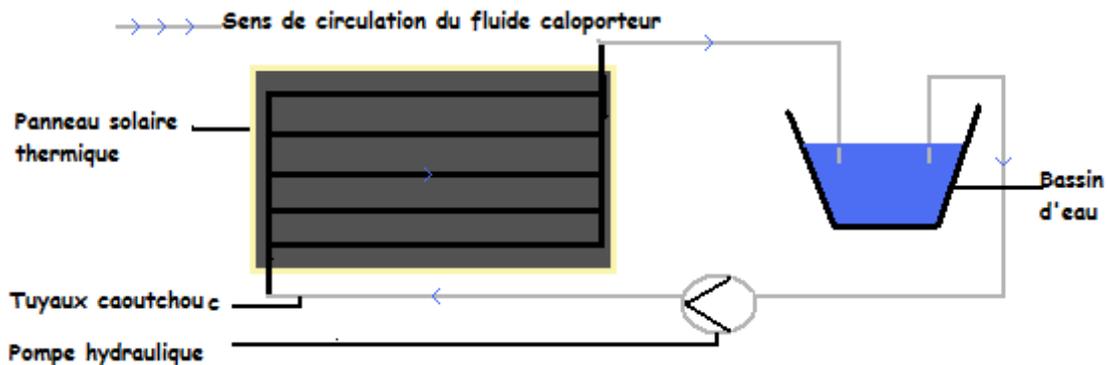
Illustration 12: Début du montage

Il nous fallait maintenant souder les plaques au tuyau. Ceci fut la plus grande difficulté du projet car nous n'avions pas le matériel adéquat. Après quelques malheureuses tentatives au fer à souder basique, nous avons du renoncer. En effet, le cuivre étant très conducteur, la chaleur se dispersait très vite lorsque l'on appliquait le fer à souder sur les plaques. Nous avons donc eu recours à la lampe à souder. Ce travail fut réalisé par M. Guillotin du fait de sa dangerosité. Ensuite, nous avons peint le système en noir grâce à une bombe de peinture, initialement utilisée pour les pots d'échappement, ce qui nous garantissait le fait que la peinture soit résistante à de très hautes températures. Enfin, nous avons dû trouver un système de fixation pour la vitre; nous avons cloués des carrelets sur les planches latérales afin de soutenir la vitre. De plus, elle sera bloquée à chaque coin par des cales triangulaires vissées dans les planches. Comme on peut le constater, la vitre n'est pas fixée trop solidement afin de ne pas l'endommager. En effet, lorsqu'elle chauffera, la vitre va se dilater. Et si son extension n'est pas possible, elle risque de se briser.

Pour limiter le phénomène de surchauffe à l'intérieur du panneau (les températures pouvant monter jusqu'à 100°C), aucun joint n'a été réalisé, ni au niveau de la vitre, ni au niveau des

trous des tuyaux. Le peu d'air qui circulera permettra donc une circulation d'air minimale mais nécessaire pour ne pas endommager le matériel (vitre par exemple).

Le panneau solaire en lui-même est alors terminé. Cependant, il nous faut maintenant réfléchir au moyen de transporter le fluide caloporteur. Il faut savoir qu'au début de notre projet, nous pensions réaliser un véritable système hydraulique (panneau solaire thermique et bassin d'eau à chauffer) qui nous permettrait de simuler une véritable installation. Cependant, par manque de temps, nous nous sommes limités à la construction du panneau solaire.



Dessin 3: Le circuit primaire

3.2.2. **Circuit global**

Nous allons maintenant étudier le système global de production d'eau chaude sanitaire, que l'on trouve chez les particuliers. D'autres systèmes existent comme le Système Solaire Combiné (qui en plus de produire de l'eau chaude sanitaire, participe aussi à la production d'électricité). Cependant, nous restreindrons notre étude au chauffe eau solaire "simple".

Le circuit global utilise le même type de panneau solaire thermique que celui que nous avons fabriqué. Il se vend déjà monté, ou comme nous, le particulier peut choisir de fabriquer son propre panneau. C'est ce qui se passe la plupart du temps par soucis d'économie (en utilisant des matériaux recyclés par exemple).

3.2.2.1. **Les modes de circulation du fluide caloporteur**

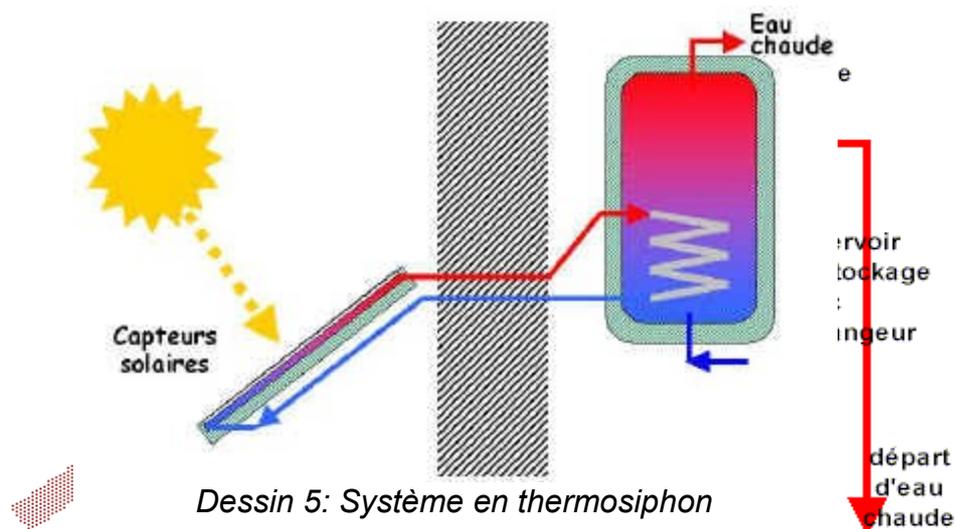
Il existe deux façons de faire circuler l'eau à l'intérieur du circuit. Mais avant, il semble important de souligner que ce système, appelé circuit primaire, fonctionne en circuit fermé. Le fluide caloporteur n'est en aucune manière en contact avec l'eau chaude sanitaire. La transmission de la chaleur se fait par conduction.

Revenons maintenant au mode de circulation du fluide caloporteur.

La plupart des systèmes fonctionnent suivant la technique de **circulation forcée**; ces circuits comportent une pompe qui impose le sens de circulation du fluide. En général, celle-ci est placée à la sortie du ballon de stockage: l'eau alors refroidie est envoyée vers le panneau solaire thermique pour être chauffée puis renvoyée vers le ballon de stockage etc. Lors de l'installation de la pompe, il faut prendre un certain nombre de précautions. Il faut d'abord s'assurer que la pompe résiste à des températures élevées car en sortie du ballon, il se peut que le fluide caloporteur soit encore très chaud. Il ne faudrait donc pas abimer le matériel déjà coûteux. Ensuite, la vitesse de circulation doit être bien réglée. En effet, si celle-ci est trop rapide, le fluide caloporteur n'aura pas le temps de chauffer dans le panneau solaire ce qui induira forcément une température très basse dans le ballon. De même, si elle est trop lente, le fluide caloporteur n'arrivera pas à se déplacer jusqu'au panneau qui rappelons le, est placé sur le toit des maisons à plusieurs mètres au dessus du sol. Il faut

donc lui fournir assez d'énergie pour permettre le déplacement. Enfin, il ne faut pas oublier que ce système nécessite un apport d'électricité afin de faire fonctionner la pompe. Certains panneaux solaires sont ainsi groupés avec des **panneaux photovoltaïques**. En effet, ils permettent de fournir de l'électricité "propre", et respecte ainsi le principe général de la démarche qui est de ne pas polluer et de ne pas dépenser d'énergie inutile.

L'autre système utilisé est la méthode à **thermosiphon**. Cette technique utilise un principe simple: quand l'eau est chauffée dans le panneau solaire, elle va se dilater, faisant baisser sa masse volumique. Plus légère, l'eau chaude va avoir tendance à monter. Cela crée un mouvement dans le circuit hydraulique. Cependant, on se rend bien compte que la position du panneau solaire thermique ne doit pas être irréfléchie. Pour que ce système soit efficace, il faut qu'il soit placé en dessous du ballon de stockage, à l'inverse donc de ce qui est réalisé pour les systèmes en circulation forcée. L'eau chaude "montera" donc en direction du ballon dans lequel elle réchauffera l'eau chaude sanitaire. Enfin, avec ce système, il faut penser à placer un **clapet anti-retour** en sortie de panneau si l'on ne veut pas que le phénomène s'inverse pendant la nuit, c'est à dire que l'eau du ballon vienne chauffer le panneau solaire !



Dessin 5: Système en thermosiphon

Dessin 4: Circulation forcée

3.2.2.2. Les différents circuits du système

Le système final comporte plusieurs circuits d'eau et de fluides caloporteurs qu'il semble judicieux d'expliquer.

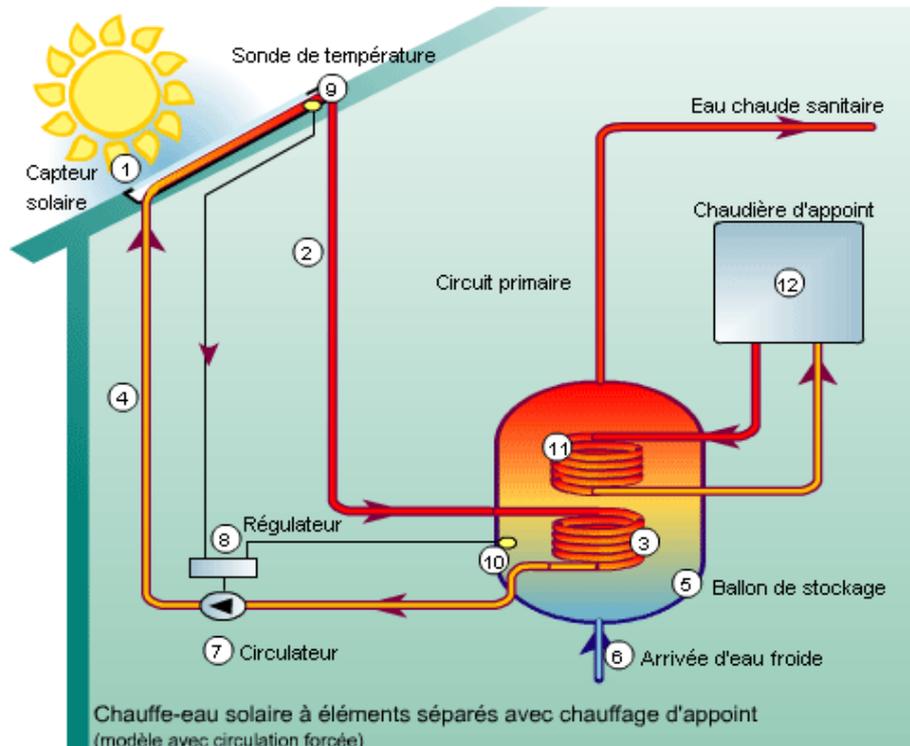


Illustration 13: Le circuit global

La première partie est constituée du **circuit primaire** (capteur solaire (1), pompe(7), régulateur(8)..) qui fonctionne en circuit fermé. Son rôle est bien entendu de chauffer l'eau chaude sanitaire contenue dans le ballon(8), grâce à un **échangeur thermique** (serpentin que l'on place dans le ballon de stockage, qui transportera, toujours en circuit fermé, le fluide caloporteur). Ce circuit comporte presque toujours une **sonde de température** en sortie du panneau. Celle-ci, reliée au **régulateur**, l'informe de la température de sortie du fluide. En effet, le fluide caloporteur doit être capable d'assurer son rôle, c'est à dire réchauffer l'eau chaude sanitaire. Si sa température de sortie n'est pas suffisante pour réaliser cette fonction (la nuit par exemple), alors le régulateur va stopper la circulation de ce fluide en éteignant la pompe. Cela a pour but d'empêcher le fluide d'aller, au contraire, refroidir l'eau du ballon. Ceci répond à une exigence primordiale : l'eau sanitaire doit atteindre une certaine température pour éliminer certaines bactéries qui comme pour la légionellose pourraient entraîner des maladies graves. De plus, cela pourrait être ennuyeux car cela empêcherait d'avoir de l'eau chaude en début de journée par exemple, ou pendant la nuit.

Le deuxième circuit est le **circuit d'eau sanitaire**, celle-ci même qui entre dans le ballon. Le réservoir est approvisionné en eau froide (6), qui par conduction au contact du réseau primaire, va s'échauffer et être stockée dans le ballon. Quand le robinet d'eau chaude est ouvert, l'eau chaude est pompée et amenée jusqu'à lui.

Enfin, le dernier circuit présent dans une installation complète et parfaitement réfléchi est le **circuit secondaire**, ou **circuit d'appoint**. En effet, il arrive souvent que l'on ne capte pas suffisamment le rayonnement du Soleil pour produire de l'eau chaude (brouillard, pluie, nuit...), surtout en Normandie. Il faut ainsi prévoir un système qui comblera ce manque. Aussi, une **chaudière d'appoint** doit être reliée au ballon de stockage. Quand

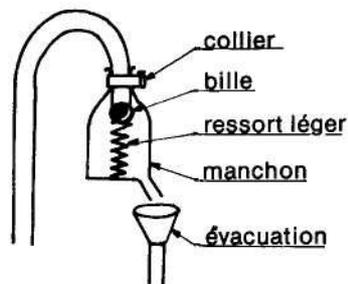
les conditions météorologiques ne permettent pas au panneau solaire d'être efficace, la chaudière d'appoint se chargera de chauffer l'eau sanitaire. Le système est basé sur le même principe que le circuit primaire. Le fluide caloporteur de la chaudière d'appoint va circuler en circuit fermé jusque dans le ballon de stockage. Par échange thermique, l'eau chaude sanitaire va se réchauffer et le fluide caloporteur ainsi refroidi repart dans la chaudière d'appoint.

3.2.2.3. *Notion de vase d'expansion*

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'eau va avoir tendance à se dilater en chauffant; le volume d'eau dans le circuit va donc augmenter. Il faut donc prévoir un système, au niveau du circuit primaire, qui permettrait de gérer ce volume supplémentaire. C'est pour cela que dans la majorité des cas, il va falloir placer en sortie du panneau solaire thermique, un **vase d'expansion**. Il est important de noter que ceci est inutile au niveau du ballon d'eau chaude car celui-ci n'est jamais "plein". Le problème ne se pose donc pas.

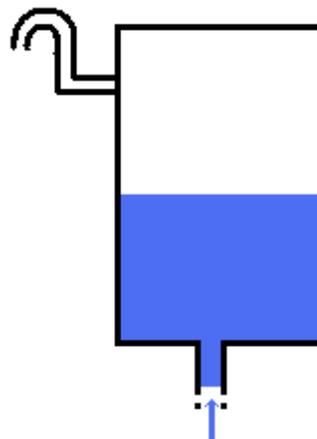
Il existe deux types de vase d'expansion: ouvert ou fermé.

Le vase d'expansion ouvert doit être placé au dessus de l'installation {panneau solaire-ballon}. En effet, s'il était placé en dessous, tout le liquide caloporteur serait envoyé dans le vase d'expansion. Grâce à cet appareil, le trop plein d'eau qui circulera dans le système primaire sera stocké dans le vase d'expansion, voir même évacué. Cependant, il faut faire attention à l'évaporation qui pourrait se produire à la surface libre. Cela pourrait être dangereux pour le système si la quantité évacuée est vraiment importante. En effet, en refroidissant, l'eau va se "contracter", il risque alors de ne plus avoir assez de liquide dans le système primaire, ce qui, au final, pourrait causer une dépression dans le circuit et même endommager la pompe (surchauffe). Pour remédier à cela, on réalisera un système assez simple :



Dessin 7:

Vase d'expansion ouvert

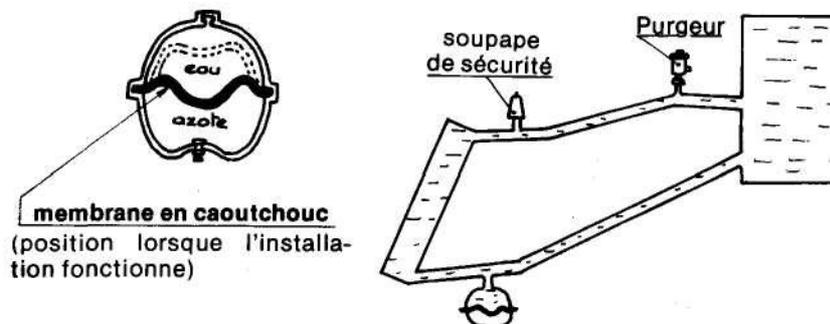


Dessin 6: Le recourbement

Grâce à ce système, le fluide sera obligé d'exercer une pression sur la bille et donc sur le ressort pour sortir. Ceci n'est réalisable que si la force exercée est suffisamment forte pour faire bouger le ressort, ce qui est bien sûr impossible dans le cas de quelques gouttes de vapeur. Enfin, étant à l'air libre, il ne faut pas oublier que le fluide caloporteur peut geler. On pourra alors rajouter de l'antigel afin d'éviter cela.

Le vase d'expansion fermé sera quand à lui placé en entrée du panneau solaire thermique (afin que l'eau chaude ne vienne pas le détériorer) et sera couplé avec une soupape de sécurité. Ce type de vase est constitué d'une membrane en caoutchouc qui

délimite deux domaines ; l'un contenant le fluide caloporteur et l'autre de l'azote. Lorsque le fluide se dilate, il va faire pression sur la membrane en caoutchouc qui va alors se déformer. L'azote va alors se comprimer. Quand la masse volumique de l'eau va diminuer, la pression sur la membrane va se relâcher, l'azote va se dilater et la membrane reprendra sa place initiale (en pointillé sur le schéma).



Dessin 8: Le vase d'expansion fermé

La soupape de sécurité servira, quant à elle à relâcher la pression dans le cas où celle-ci serait trop forte (phénomène de surchauffe). Ce type de vase d'expansion présente cependant un inconvénient; il est naturellement plus cher.

Pour conclure cette partie, il semble important de souligner que quelque soit le système utilisé, il est bien évidemment recommandé de mettre de l'antigel dans le système primaire afin d'éviter l'explosion des canalisations ou le blocage des canalisations en hiver.

3.2.3. L'intérêt économique des chauffe-eau solaires

3.2.3.1. Construire un panneau solaire thermique en France

Le chauffe eau solaire permet de réaliser des économies d'énergie considérables, rien qu'en Europe occidentale, un chauffe-eau solaire permet de réaliser environ deux tiers, soit 66 % d'économie sur les besoins en eau chaude donc son impact économique serait d'autant plus considérable dans les pays proche de l'équateur, qu'il s'agisse de maisons individuelles ou de structures collectives. Le gain correspond au taux de couverture solaire, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie fournie par la partie solaire d'une installation et sa consommation totale en électricité.

L'amortissement de l'installation dépend du rendement, autrement dit, de la quantité d'énergie économisée et du coût de l'installation. En l'absence de primes et autres avantages il faut parfois compter une vingtaine d'année, cette durée est fonction de la zone géographique et du taux d'ensoleillement. En effet lors de l'absence de soleil, c'est l'électricité qui prend le relais. Cependant si on tient compte du régime fiscal et des primes que cette installation permet d'obtenir dans certains états ou régions le temps de retour sur investissement peut être largement réduit.

En France, le matériel doit être homologué par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) afin de pouvoir bénéficier du crédit d'impôt (50 % du prix du matériel) et de faire poser le matériel par un installateur agréé pour pouvoir bénéficier des autres abattements et subventions existants à l'échelle régionale, départementale et locale.

Les avantages fiscaux accordés par l'État en matière d'installation solaire sont nombreux :

- Crédit d'impôt
- Prime de la majorité des Conseils Régionaux en France est généralement de 700 euros
- Une TVA à 5,5 % peut être attribuée aux habitations de plus de 2 ans et ce sont les occupants du logement qui ont droit aux subventions et au crédit d'impôt même si ceux-ci sont simples locataires. Cela concerne les habitations individuelles et collectives.

Cependant, il faut savoir que les subventions ont leurs limites:

- L'argent doit être avancé car les aides sont généralement versées à la fin des travaux et du paiement pour des raisons de trésorerie.
- Certains installateurs et fabricants de matériel profitent des aides attribuées et de la tendance écologique actuelle pour augmenter leur prix.
- Enfin, pour bénéficier de ces subventions sur le matériel il faut obligatoirement passer par un installateur agréé, pour s'assurer de la qualité de l'installation .

3.2.3.2. *L'auto-installation, une solution ?*

Il semble nécessaire de préciser que les aides financières ne sont pas très faciles à obtenir. De plus les installateurs ne sont pas forcément issus d'une formation fiable et les prix du matériel sont de plus en plus élevés ainsi de nombreux foyers ont décidé d'opter pour l'alternative de l'auto-installation. Le bilan économique est parfois intéressant car il est flexible et permet d'étaler la construction et donc le financement sur plusieurs années (par exemple en augmentant progressivement la surface des coûteux capteurs jusqu'à la surface prévue au départ). Pour faciliter ceci une entraide importante a lieu chez les "auto constructeur" et des associations d'entraide se sont créées afin de permettre une diminution des coûts du matériel via des achats groupés.

Cependant, la formation des installateurs agréés est de courte durée et aucune vérification post-installation n'est effectuée par un organisme de contrôle, ce qui entraîne parfois des installations de mauvaise qualité. En effet, les problèmes rencontrés sont par exemple des erreurs de dimensionnement entraînant l'utilisation d'un ballon surdimensionné par rapport à la surface de capteur, des erreurs de positionnement ou encore de mauvaises inclinaisons. En effet les capteurs étant généralement montés sur la toiture, c'est l'inclinaison de celle-ci qui est utilisée, alors qu'on devrait adapter l'inclinaison en fonction de la latitude : 40 à 50° pour un chauffe eau produisant toute l'année, 60 à 70° pour un chauffe solaire devant produire en hiver et intersaison.(voir précédemment)

3.2.3.3. *Application à notre panneau solaire : coût de revient*

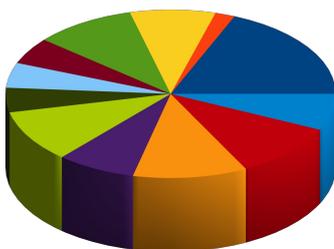
Il est évident que nous avons dû acheter beaucoup de matériel pour construire ce panneau solaire. Essayons de chiffrer son coût de revient. Pour cela, nous chercherons à savoir le prix exact et non pas tous les coûts engendrés dus à un excès de matériel.

Matériaux	Dimension	cout en euros
Tubes Écroui	longueur:5m diamètre:16mm	12,5
2 coudes à souder en cuivre	diamètre:18mm	1,3
8 tés à souder	diamètre:18mm	5,6
Barre à Z	longueur:2m70	6,65
Dalle de plancher en agglo	0,5 m2	3,42
Panneau aggloméré	epaisseur:10mm	3,22
Laine de roche	0,5 m2	3,16
2 bobines d'étain à souder		6,7
Peinture à aérosol		5,2
Lampe à souder		7,5
Tablette de verre	Longeur:80cm,largeur:55cm	7
Lammes de scies	Diametre :16 mm	4,7

Cout total
66,95 euros

Tableau 2: Les caractéristiques du panneau

Proportions



■ Tubes Écroui	■ 2 coudes à souder en cuivre	■ 8 tés à souder	■ Barre à Z
■ Dalle de plancher en agglo	■ Panneau aggloméré	■ Laine de roche	■ 2 bobines d'étain à souder
■ Peinture à aérosol	■ Lampe à souder	■ Tablette de verre	■ Lammes de scies

Tableau 3: Répartition des frais

D'après les données commerciales, il semblerait qu'un panneau solaire en auto-construction coûte moins cher qu'un panneau solaire en vente directe. Seulement, il faut prendre en considération le fait que les panneaux vendus dans le commerce ont une surface

éclairé trois à quatre fois plus importante que le notre. Le coût de revient n'est donc pas si éloigné. Cependant, grâce à l'utilisation de matériaux de récupération (ce à quoi nous n'avions pas accès ici) permet de réduire considérablement le coût du panneau.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure ce dossier, nous aimerions tout d'abord revenir sur le travail qui a été réalisé durant ces seize semaines. Bien qu'au départ, notre but était de réaliser une installation complète avec circuit primaire et simulation d'eau chaude sanitaire, nous nous sommes limités à la seule construction du panneau par manque de temps. En effet, l'avancement du projet dépendait beaucoup du matériel qu'il fallait rechercher, commander et aller acheter, ce qui prenait beaucoup de temps. D'ailleurs, M. Guillotin a eut la gentillesse de faire de nombreux aller-retour dans les divers magasins de bricolage afin de nous procurer le matériel. En étalant sur plusieurs séances, nous fixions le matériel disponible puis nous recherchions sur Internet le matériel qu'il nous fallait pour les étapes suivantes. Nous sommes maintenant conscients que cela a grandement freiné notre avancée, et que certaines parties auraient pu être achetées dès le début. Cependant, cela nous a permis de réfléchir sur la nécessité de tel ou tel matériau. En effet, prenons l'exemple de la laine de roche. Au début du projet, nous avons prévu de mettre de la laine de verre pour isoler et limiter les pertes de chaleur. Or, nous avons pris le temps de nous documenter pour en arriver à la conclusion que la laine de roche serait plus adaptée à notre panneau, notamment car cette matière est hydrophobe, et donc ne devient pas conductrice de chaleur, à l'inverse de la laine de verre lorsque celle-ci est humide. Notre panneau n'étant pas étanche pour laisser circuler l'air, l'utilisation de la laine de roche était donc plus adaptée. Nous avons eu le même raisonnement pour les plaques de cuivre par exemple. Bien qu'un peu déçus de ne



*Illustration 14: Les
panneaux types
vendus dans le
commerce*

pas avoir réalisé de test de fonctionnement, nous sommes quand même fiers du résultat accompli et nous espérons qu'il sera utilisé pour des projets ultérieurs.

Sur le plan personnel, il est indéniable que ce projet fut bénéfique.

Dans un premier temps, cela nous montre la nécessité de gérer son temps dans un projet afin d'arriver à son but. Dans notre cas, bien que l'on ait pas effectué les tests, nous sommes parvenu à finir le panneau solaire thermique qui était l'objectif principal du projet. Cela nous montre aussi la nécessité de prendre en compte la contrainte temps, et à la mettre en parallèle avec les difficultés pratiques et techniques rencontrées (commande du matériel, interdiction de manier certains outils comme la scie sauteuse...etc).

Dans un second temps, ce projet nous a appris qu'il était nécessaire de bien se renseigner et de maîtriser un temps soit peu les connaissances théoriques afin de les mettre en application. En effet, prenons l'exemple de la peinture noire. Bien que nous connaissions déjà cela, il est évident que si le sujet de l'effet de serre et des corps noirs nous était inconnu, nous n'aurions pas pensé à peindre le panneau en noir. Or, en faisant cela, nous avons essayé de recréer les conditions du corps noir qui est grand émetteur de rayonnement infrarouge, et donc nécessaire pour générer et amplifier l'effet de serre.

Enfin, ce projet avait évidemment pour but le travail de groupe. Dans notre cas, la ligne directrice fut celle de permettre aux membres d'accomplir le travail qui les motivait le plus, que cela soit au niveau du contenu (effet de serre, rayonnement, chauffe-eau...) ou au niveau pratique (travail manuel ou travail de recherches). Cependant, il est important de souligner que chaque personne du groupe a participé à chacune des deux parties (pratique ou théorique), mais bien sûr en différentes proportions. Enfin, nous avons une nouvelle fois pris conscience que la bonne entente entre les membres de l'équipe ainsi que le respect de chacun envers le travail à effectuer est primordial pour la mise en œuvre des choses. Chacun doit être consciencieux dans son travail afin de ne pas gêner la bonne marche du groupe.

Pour conclure ce projet, nous souhaiterions proposer quelques idées afin que notre panneau solaire puisse finalement servir ces prochaines années, grâce à un nouveau sujet qui pourrait lui être consacré.

Tout d'abord, il faut concevoir la fin du circuit primaire en assemblant les tuyaux avec les raccords bicones déjà en notre possession. Puis, il faut prévoir l'achat d'une pompe résistante aux fortes températures (et l'achat d'une batterie peut être). Nous en avons trouvé une qui pourrait correspondre aux attentes, la référence sera disponible en fin de dossier pour les futures personnes travaillant sur le projet (lien [10] de la bibliographie).

Il est évident que des tests préliminaires sont à prévoir afin de vérifier l'étanchéité du circuit primaire, la bonne résistance de la vitre à la chaleur, la circulation d'air etc. Sachant que le panneau n'est pas parfaitement isolé (il existe notamment une fente entre la vitre et les planches latérales), il est donc possible d'y glisser un thermomètre afin de prendre des mesures de températures et ainsi constater l'évolution de la chaleur au sein du panneau thermique.

Enfin, il s'agit de concevoir la fin de l'installation. Dans un premier temps, il faut prévoir de raccorder le circuit primaire à un serpentin qui baignera dans l'eau à chauffer (équivalent de l'eau chaude sanitaire dans les installations) et donc acquérir le matériel adéquat (seau, batterie, pompe...). Pour finir, il faudrait construire un support pour ce matériel ainsi qu'un support pour le panneau solaire. En effet, il faut penser au fait que le panneau doit être incliné d'un certain angle afin de recueillir le rayonnement solaire optimal. Une recherche plus poussée sur l'inclinaison d'un tel panneau en Normandie pourrait donc être très bénéfique.

Bien sur, si un tel sujet venait à être conçu, ce que nous espérons vivement, nous souhaiterions être invités pour les essais !

5. BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

[1] R. Bernard, G Menguy, M Schwartz “Le Rayonnement solaire, conversion thermique et application”, 1980.

[2] T. Cabirol A. Pelissou, D. Roux, “Le Chauffe eau solaire”, Collection Technologies Douces, 1980

Sites Internet

[3] Les thermosiphons : <http://www.outilssolaires.com/premier/prin-thermosiphon.htm> (valide à la date du 16 juin 2009)

[4] Construction : panneau solaire : <http://www.apper-solaire.org/Pages/Experiences/Barra%20Lionel%2013/Essai%20de%20revetements%20pour%20absorbeurs/index.pdf> (Valide à la date du 16 juin 2006)

[5] Vases d'expansion : <http://www.thermexcel.com/french/ressourc/expansion.htm> (Valide à la date du 16 juin 2009)

[6] Le chauffe eau solaire individuel, site de l'ADEME :
<http://www.agirpourenvironnement.org/pdf/AdemeficheChauffeEau.pdf>

(Valide à la date du 16 juin 2009)

[7] Explication panneaux solaires thermiques : <http://www.terrasource.info/thermique.html>
(Valide au 16 juin 2009)

[8] Informations effet de serre : <http://www.futura-sciences.com/fr>

[9] Référence de la pompe : <http://www.castorama.fr/store/circulateur-grundfoss-3-vitesses-ups-PPRDm288011.htm>

[10] Information cout du panneau solaire et auto-installation: <http://www.devissimo.fr/>

<http://www.sodeer.fr/fr/actualites/id-2-temoignages-de-clients>

[11] Système solaire: http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/univers-1/d/soleil_3727/
(valide à la date du 21 juin 2009)

[12] Ensoleillement: <http://pagesperso-orange.fr/lgb-sections-sti/ensoleillement.htm> (valide à la date du 21 juin 2009)

[13] Lois d'échange de chaleur:
http://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_aux_transferts_thermiques/Modes_de_transfert_de_chaleur (valide à la date du 21 juin 2009)

[14] Lois d'échange de chaleur: <http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/TTE/DocsTTE/Divers/Rayonnement%20et%20convection.pdf> (valide à la date du 21 juin 2009)

6. ANNEXES

6.1. Propositions de sujets de projets

La réalisation d'un circuit complet d'eau chaude sanitaire par utilisation d'un chauffe eau solaire thermique, sujet expérimental et bibliographique