

Liste des Notations

Notation	Désignation	Unité
ϕ	Latitude du lieu	Angle en $^{\circ}$
L	Longitude du lieu	Angle en $^{\circ}$
Z	Altitude du lieu	m
ω	Angle horaire	Angle en $^{\circ}$
δ	Déclinaison	Angle en $^{\circ}$
j	Numéro du jour de l'année tel que j = 01 pour le premier Janvier de l'année	—
h	Hauteur du soleil	Angle en $^{\circ}$
A	Azimut	Angle en $^{\circ}$
ET	Equation du temps	mn
TU	Temps Universel	h
TL	Temps Légal	h
DH	Décalage horaire	h
TSM	Temps Solaire Moyen	h
CL	Correction de Longitude	h
TSV	Temps Solaire Vrai	h
i	Angle d'inclinaison du capteur	Angle en $^{\circ}$
γ	Angle d'orientation du capteur	Angle en $^{\circ}$
S*	Eclairement solaire direct sur un plan récepteur (i, γ)	W/m ²
D*	Eclairement solaire diffus sur un plan récepteur (i, γ)	W/m ²
G*	Eclairement solaire globale sur un plan récepteur (i, γ)	W/m ²
I*	Eclairement solaire direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire	W/m ²
Io	Eclairement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite de l'atmosphère en fonction du jour de l'année	W/m ²
Csol	Constante solaire	W/m ²
G	Irradiation solaire journalière	Wh/m ² .j
m _{air}	Masse d'air optique relative	m
Patm	Pression atmosphérique	Pa
TL	Facteur de trouble de Linke	—
β	Coefficient de trouble atmosphérique	—
Pv	Pression partielle de vapeur d'eau	mmHg
Hr	Taux moyen d'humidité relative	%
Pvs	Pression de vapeur saturante	mmHg
Tair	Température de l'air	$^{\circ}$ C
σ_R	Epaisseur optique de Rayleigh	m ⁻¹
Ci	Coefficient d'incidence	—
n	Coefficient de nébulosité	—
D jour	Durée du jour	h

d	Durée d'ensoleillement	h
K _c	Facteur d'atténuation des couches nuageuses	—
φ	Flux de chaleur transmit	W
λ	Conductivité thermique d'un milieu	W.m ⁻¹ . °C ⁻¹
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	m ²
h _c	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W.m ⁻² . °C ⁻¹
G _r	Nombre de Grashof	—
ρ	Masse volumique du fluide	kg/m ³
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
μ	Viscosité dynamique du fluide	Pa.s
ΔT	Ecart de température paroi-fluide	°C
β	Coefficient de dilatation volumique du fluide	°C ⁻¹
Nu	Nombre de Nusselt	—
Pr	Nombre de Prandtl	—
Ra	Nombre de Rayleigh	—
C	Coefficient dépendant du régime de convection et de la géométrie	—
H	Distance entre la partie haute du capteur et la partie basse du ballon	m
g	Equivalent de l'accélération de la pesanteur	N/kg
P	Pression hydro-motrice	Pa
λ	Longueur d'onde du rayonnement incident	μm
ρ _T	Facteur de réflexion	—
α _T	Facteur d'absorption	—
τ _T	Facteur de transmission	—
C	Vitesse de la lumière C = 2,9979.10 ⁸	m/s
h	Constante de Planck : h = 6,6261. 10 ⁻³⁴	J.s
σ	Constante de Stefan : σ = 5,675.10 ⁻⁸	W.m ⁻² .K ⁻⁴
k	Constante de Boltzmann : k = 1,38065. 10 ⁻²³	J/K
E _{λT}	Emittance monochromatique du corps noir	W.m ⁻³
E _T	Emittance totale du corps noir	W.m ⁻²
M _T	Emittance total d'un corps non noir	W.m ⁻²
ε	Facteur d'émission total ou émissivité	—
Q	Flux de chaleur échangé	W
T	Température	°C
V _{ve}	Vitesse du vent	m/s
h _r	Coefficient d'échange par rayonnement	W/ m ² .°C
e	Epaisseur	m
Ω	Coefficient de Darcy	—
d _i	Diamètre intérieur du tube	m
L	Longueur du tube	m
V	Vitesse moyenne du fluide	m/s
m _v	Masse	kg
C _{p eau}	Chaleur massique de l'eau : C _{p eau} = 4180	J/kg .K

U_{av}	Coefficient de perte thermique vers l'avant du capteur	$W/ m^2.K$
U_{ar}	Coefficient de perte thermique vers l'arrière du capteur	$W/ m^2.K$
U_{lat}	Coefficient de perte thermique latérale	$W/ m^2.K$
U_L	Coefficient de perte thermique globale	$W/ m^2.K$
S_{lat}	Surface latérale du capteur	m^2
S_C	Surface du capteur	m^2
Q_u	Puissance utile récupéré par le fluide caloporteur	W
η	Rendement instantané du capteur	—
Be_{ecs}	Besoin en eau chaude sanitaire	Wh
Q	Quantité d'eau à chauffer	L
DT	Différence de température entre l'eau considérer chaude et l'entrée d'eau froide	$^{\circ}C$
C	Contenance du réservoir	L
S_{ech}	Surface de l'échangeur	m^2
L_{ech}	Longueur de l'échangeur	m
N_S	Nombre de spire de l'échangeur	—
H_{ech}	Hauteur de l'échangeur	m
D_S	Diamètre de la spire de l'échangeur	cm

Indice	Désignation
v	Vitre
$cvam$	Convection entre le vitrage et l'air ambiant
am	Air ambiant
ve	Vent
rvc	Rayonnement entre le vitrage et le ciel
ab	Absorbeur
$cabv$	Convection entre l'absorbeur et le vitrage
air	Air
$rabv$	Rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage
$cdabis$	Conduction entre l'absorbeur et l'isolant
is	Isolant
isl	Isolant latéral
$cabf$	Convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur
f	Fluide caloporteur
abf	Absorbeur et le fluide caloporteur

Abréviations

CES :	Chauffe-eau solaire
UV :	Ultra-Violet
PPR :	Polypropylène Réticulé
JIRAMA :	Jiro sy Rano Malagasy
TVA :	Taxe sur la Valeur Ajouté
DRI :	Délai de Récupération de l'Investissement

Liste des figures

Figure 1: Les coordonnées géographiques terrestres	4
Figure 2: Angle horaire du soleil	5
Figure 3: Repérage du soleil par sa hauteur h et son azimut A	6
Figure 4: Rayonnement solaire reçu au sol.....	9
Figure 5: Carte d'ensoleillement de Madagascar	14
Figure 6: Schéma d'un transfert de chaleur conductif.....	15
Figure 7: Schéma de principe du thermosiphon	17
Figure 8: Réception du rayonnement par un solide	21
Figure 9: Facteur d'émission, d'absorption et de réflexion de quelques matériaux	23
Figure 10: Coefficient de réflexion de quelques métaux en fonction de la longueur d'onde	24
Figure 11: Chauffe-eau solaire monobloc	26
Figure 12: Chauffe-eau solaire à circulation forcée.....	26
Figure 13: Chauffe-eau solaire type capteur-stockeur	27
Figure 14: Un capteur plan vitré	28
Figure 15: Capteur plan non vitré	28
Figure 16: Capteur tubulaire sous vide	29
Figure 17: Echangeur à plaque et à serpentin	30
Figure 18: Schéma d'un réservoir	30
Figure 19: Système d'appoint.....	31
Figure 20: Absorbeur en échelle monté sur une plaque absorbante	34
Figure 21: Les différents échanges thermiques dans le capteur plan vitré	35
Figure 22: Propriétés radiatives des matériaux utilisés	46
Figure 23: Schéma d'un carton à double cannelure	48
Figure 24: Plan du capteur	51
Figure 25: Coupe du capteur plan vitré	52
Figure 26: Dimension et forme de l'échangeur	53
Figure 27: Données géographiques et climatiques de la région d'IVATO par RETScreen	65
Figure 28: Schéma fonctionnel du modèle de Perrin de Brichambaut	66
Figure 29: Irradiation solaire reçue suivant différente inclinaison du capteur	69
Figure 30: Comparaison de l'énergie solaire reçue pour $i = 30^\circ$, 40° et 50°	70
Figure 31: Irradiation solaire reçue suivant différente orientation du capteur	72

Figure 32: Comparaison de l'énergie reçue pour $\gamma = -10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\gamma = 10^\circ$	73
Figure 33: Rose d'orientation du capteur	73
Figure 34: Schéma fonctionnel du diagramme solaire	74
Figure 35: Diagramme solaire de l'année 2016	75
Figure 36: Diagramme solaire du mois de Septembre.....	76
Figure 37: Diagramme solaire avec masque pendant les jours d'expérimentation	77
Figure 38: Méthode de mesures des masques éventuelles.....	78
Figure 39: Evolution de la température de l'eau du réservoir durant la première série de test.....	84
Figure 40: Evolution de la température de l'eau du réservoir durant la deuxième série de test.....	87
Figure 41: Evolution générale des températures de l'eau chaude du réservoir	88

Liste des tableaux

Tableau 1: Coefficient de trouble atmosphérique.....	11
Tableau 2: Coefficient de nébulosité	13
Tableau 3: Dimension du réservoir.....	43
Tableau 4: Surface du capteur	43
Tableau 5: Nombre du capteur.....	44
Tableau 6: Dimension du coffre	44
Tableau 7: Dimension de l'absorbeur en échelle	45
Tableau 8: Propriétés radiatives du cuivre.....	46
Tableau 9: Dimension de la plaque absorbante	47
Tableau 10: Propriétés radiatives de l'acier galvanisé	47
Tableau 11: Dimension de l'isolation	48
Tableau 12: Propriétés radiatives de la feuille d'aluminium.....	49
Tableau 13: Dimension du vitrage.....	50
Tableau 14: Dimension du serpentin	52
Tableau 15: Dimension des tuyaux de conduite du circuit primaire	54
Tableau 16: Dimension du chauffe-eau solaire	62
Tableau 17: Facteur d'atténuation des couches nuageuses moyen de chaque mois.....	67
Tableau 18: Gisement solaire d'Ivato.....	68
Tableau 19: Irradiation solaire reçue en fonction de l'inclinaison du capteur	69
Tableau 20: Irradiation solaire reçue en fonction de l'orientation du capteur	71
Tableau 21: Données des angles de l'effet de masque	78
Tableau 22: Horaire de l'effet de masque	79
Tableau 23: Heure du lever et coucher du soleil pendant les jours d'expérimentation...	80
Tableau 24: Volume du liquide dans le chauffe-eau solaire.....	82
Tableau 25: Résultat de la première série de test.....	83
Tableau 26: Résultat du second test.....	86
Tableau 27: Evaluation du prix du réservoir	90
Tableau 28: Evaluation du prix des conduites de connexion du circuit primaire.....	90
Tableau 29: Evaluation du prix du capteur	91
Tableau 30: Evaluation du prix des accessoires de plomberie	92
Tableau 31: Evaluation du prix de la main d'œuvre	92
Tableau 32: Prix de revient du chauffe-eau solaire	93
Tableau 33: Calcul de l'amortissement de l'investissement	94

Liste des photos

Photo 1: Mesure et découpe des planches du coffre	55
Photo 2: Perçage et mis en place des vis à bois	55
Photo 3: Coffre du Capteur	56
Photo 4: Coffre incliné sur son support	56
Photo 5: Trous de réception des tuyaux verticaux 12-1.....	56
Photo 6: Forme en échelle de l'absorbeur	57
Photo 7: Fixation de l'absorbeur sur la plaque absorbante.....	57
Photo 8: Absorbeur peint en noir mate	57
Photo 9: Surface réfléchissante en dessous du capteur	58
Photo 10: Isolation des côtés inférieurs et supérieurs du capteur	58
Photo 11: Isolation du bas du coffre	59
Photo 12: L'isolation et la surface absorbante	59
Photo 13: Mise en place des éléments du capteur dans le coffre.....	60
Photo 14: Découpage du chauffe-eau électrique	60
Photo 15: Support du réservoir	61
Photo 16: Réalisation de l'échangeur	61
Photo 17: Mise en place de l'échangeur dans le réservoir	62
Photo 18: Le Chauffe-eau solaire à thermosiphon à capteur plan vitré.....	63
Photo 19: Le thermomètre digital	81

Table des matières

Remerciements.....	i
Liste des Notations.....	iii
Abréviations.....	vi
Liste des figures	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des photos	x
Table des matières	xi
Introduction.....	1
PREMIERE PARTIE : Etudes Bibliographiques	
Chapitre I : LE GISEMENT SOLAIRE	3
I.1 LES PARAMETRES DE POSITION.....	3
I.1.1 Les coordonnées géographiques terrestres	3
I.1.2 Les coordonnées célestes	4
I.1.3 Le diagramme solaire.....	6
I.2 LES PARAMETRES DE TEMPS [18]	7
I.2.1 L'équation du temps ET	7
I.2.2 Le temps universel TU.....	7
I.2.3 Le temps légal TL	7
I.2.4 Le temps solaire moyen TSM.....	7
I.2.5 Le temps solaire vrai TSV	8
I.2.6 Lever et coucher du soleil.....	8
I.2.7 La durée du jour.....	8
I.3 LE RAYONNEMENT SOLAIRE RECU SUR LA TERRE.....	9
I.3.1 Le modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT [9] [7]	9
I.3.2 Le rayonnement solaire direct.....	10
I.3.3 Le rayonnement solaire diffus	12
I.3.4 Le rayonnement global	12
I.3.5 Le facteur d'atténuation des couches nuageuses [21].....	12
I.3.6 L'irradiation solaire journalière [9]	13
I.4 GISEMENT SOLAIRE DE MADAGASCAR [10]	13
Chapitre II : LES TRANSFERTS THERMIQUES MIS EN JEU.....	15
II.1 TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION	15
II.2 TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION [11]	16
II.2.1 La convection naturelle.....	16
II.2.2 Le thermosiphon	17
II.3 TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT	18
II.3.1 Lois fondamentales de rayonnement des sources noires	18

II.3.2	Rayonnement des corps opaques non noirs	19
II.3.3	Définitions relatives aux récepteurs.....	20
II.3.4	Flux de chaleur transmis par rayonnement	21
II.3.5	Rayonnement réciproque entre deux corps quelconques séparés par un milieu transparent	22
II.3.6	Aperçu des propriétés de quelques matériaux vis-à-vis du rayonnement.	22
Chapitre III : LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE		25
III.1	GÉNÉRALITÉS SUR LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE.....	25
III.1.1	Classification des chauffe-eau solaires	25
III.1.2	Les éléments constitutifs d'un chauffe-eau solaire.....	27
III.2	LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE À THERMOSIPHON À CAPTEUR PLAN VITRE.....	32
III.2.1	Le choix du thermosiphon	32
III.2.2	Les éléments constitutifs du capteur plan vitré.....	32
III.2.3	Les pertes thermiques mises en jeu dans le capteur [1].....	35
III.2.5	Le réservoir et l'échangeur	40
III.2.6	Détermination du circuit primaire et secondaire.....	40
DEUXIEME PARTIE : Etudes Expérimentales.....		3
Chapitre IV : CONCEPTION DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE.....		42
IV.1	BESOIN EN EAU CHAUDE.....	42
IV.2	DIMENSIONNEMENT ET CHOIX DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE	42
IV.2.1	La cuve de stockage	42
IV.2.2	Le capteur	43
IV.2.3	L'échangeur	52
IV.2.4	Dimension des tuyaux de conduite du circuit primaire	53
IV.3	REALISATION DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEUR PLAN VITRE À THERMOSIPHON	55
IV.3.1	Le capteur	55
IV.3.2	Réalisation du réservoir et l'échangeur	60
IV.3.3	Raccordement du circuit primaire de l'ensemble	62
IV.3.4	Résultat final	62
Chapitre V : ETUDE EXPERIMENTALE DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE		64
V.1	ESTIMATION DU GISEMENT SOLAIRE	64
V.1.1	La région d'étude	64
V.1.2	Le modèle de Perrin de Brichambaut	65
V.1.3	Gisement solaire annuelle d'Ivato – Antananarivo.....	68
V.1.4	Inclinaison optimale du capteur	68
V.1.5	Orientation optimale du capteur	71
V.1.6	Construction du diagramme solaire	74

V.2	TEST DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE.....	81
V.2.1	Appareil de mesure de température	81
V.2.2	Montage expérimentale.....	81
V.2.3	Prise de températures	82
V.2.4	Interprétation général des résultats obtenus.....	89
V.3	ETUDE ECONOMIQUE.....	90
V.3.1	Le prix de revient du chauffe-eau solaire	90
V.3.2	Délai de récupération de l'investissement (DRI).....	93
	Conclusion	95
	Références Bibliographiques	96
	Webographies	98
	ANNEXES.....	I
	RESUME	

Introduction



La maîtrise de l'énergie est la clé de l'épanouissement du monde moderne. Actuellement, la satisfaction de la quasi-totalité des besoins de la société passe par l'utilisation d'une source d'énergie. Elle est donc devenue incontournable. On peut classer ses sources en deux types : les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables. Le premier type d'énergie ; constitué entre autre par les combustibles fossiles comme le pétrole, les gaz naturels, le charbon de terre, est le plus utilisé à l'échelle mondiale. Certes elle est prépondérante, mais pas pour autant inépuisable. En plus, son utilisation est une source d'émission de gaz à effet de serre important et de divers polluants pour l'environnement. De ce fait, la production d'énergie s'oriente donc progressivement vers les énergies renouvelables, tels que l'énergie solaire, éolienne, biomasse, et géothermique, pour ne citer que les plus connues.

Madagascar connaît une forte dépendance aux énergies fossiles, principalement vis-à-vis du pétrole et de ses dérivés, qui sont importés. Les produits pétroliers sont destinés principalement au secteur du transport et à l'électricité. En 2011, 45 % de la production en électricité à Madagascar dépendait des produits pétroliers importés dont le gasoil et le fuel lourd, consacrés à l'alimentation des centrales thermiques. Après le bois et ses dérivées, l'électricité constitue la source d'énergie la plus utilisée par les ménages malgaches. La consommation moyenne en électricité est environ de 1,025 MWh/ménage/an. Dans certain ménage, l'utilisation des chauffe-eaux électriques pour le besoin sanitaire constitue une part de cette consommation. Ces derniers qui ne sont pas encore accessibles à la majorité de la population compte tenu de leur coût toujours élevé.

Cette situation paraît invraisemblable lorsqu'on connaît le potentiel de l'énergie renouvelable que Madagascar possède. L'île dispose d'un potentiel hydroélectrique important pour lequel uniquement 127 654 kW sur une totalité de 7800 MW sont exploités. Ajouté à cela le potentiel éolien qui est estimé à 2000 MW. Et puis, le gisement solaire du pays estimé à 2000 kWh/m², avec plus de 2800 heures d'ensoleillement annuel. En effet, l'énergie solaire est l'une des énergies nouvelles les plus facilement exploitables. Elle est propre, gratuite et inépuisable. Toutefois, l'utilisation des systèmes énergétiques solaires demeure encore marginale. Ceux que l'on trouve dans le commerce sont la plupart des produits importés.

Ce mémoire est donc consacré à la résolution des difficultés liées au chauffage de l'eau sanitaire. L'exploitation de l'énergie solaire disponible sera au cœur de ce travail. Pour ce faire, les connaissances des systèmes de chauffe-eau solaire, des matériaux et de leurs propriétés sont fondamentales pour la conception d'un appareil de chauffage de l'eau. L'utilisation de matériaux adéquats pour la construction du dispositif ainsi qu'une bonne connaissance des conditions optimales d'utilisation permettent d'optimiser au maximum ses performances et d'en réduire le coût.

L'objectif du travail était de démontrer qu'il est possible de fabriquer localement un chauffe-eau solaire à coût réduit, qui peut répondre pleinement aux besoins en eaux chaudes d'un foyer, ayant des performances similaires avec celles des produits d'importation.

Cinq chapitres, une introduction ainsi qu'une conclusion générale constituent l'ossature de ce manuscrit.

Les trois premiers chapitres sont issus d'une étude bibliographique :

- Le premier chapitre décrit les éléments nécessaires à l'établissement du gisement solaire.
- Le second chapitre donne un rappel sur les différents transferts thermiques mise en jeu au sein du dispositif.
- Le troisième chapitre concerne les généralités sur le chauffe-eau solaire et le choix du modèle à réaliser.

Les deux chapitres restants sont destinés aux études expérimentales :

- Le quatrième chapitre traite la conception du chauffe-eau solaire
- Enfin le cinquième et dernier chapitre est consacré à l'étude expérimentale, la détermination des conditions optimales d'orientation et d'inclinaison, les résultats des tests et l'étude économique.

PREMIERE PARTIE :
Etudes Bibliographiques

Chapitre I : LE GISEMENT SOLAIRE

Le soleil a toujours eu un rôle prédominant dans les différentes activités naturelles de l'Univers, en particulier sur la Terre, pour la formation des sources d'énergie fossile et renouvelable [1].

Le gisement solaire est l'ensemble des caractéristiques de la ressource en énergie solaire disponible, en tout point de la surface terrestre.

La connaissance du gisement solaire est essentielle pour le calcul des diverses performances des systèmes liés au soleil comme les panneaux solaires photovoltaïques, l'isolation thermique d'une construction, le chauffage de locaux par l'intermédiaire exclusif du rayonnement solaire. Notre travail ici concerne les chauffe eaux solaires.

I.1 LES PARAMETRES DE POSITION

Pour pouvoir dimensionner correctement une installation solaire, il faut connaître, pour un site donné et à chaque instant, la position du Soleil dans le ciel et les coordonnées géographiques du lieu considéré. Pour cela, on aura donc besoin de connaître les deux systèmes de coordonnées suivantes :

- Les coordonnées géographiques terrestres
- Les coordonnées célestes

I.1.1 Les coordonnées géographiques terrestres

Les coordonnées géographiques terrestres servent à repérer les lieux sur la surface du globe. Elles ont comme bases l'équateur et l'axe des pôles.

- **La latitude ϕ** : c'est l'angle formé par le plan équatorial et le rayon joignant le centre de la terre à un lieu considéré (point local). Elle varie de 0° à l'équateur, 90° au pôle Nord et -90° au pôle Sud.
- **La longitude L** : c'est l'angle entre le plan méridien passant par un lieu (point local) avec la méridienne origine de GREENWICH en Angleterre. Elle varie de -180° à $+180^\circ$ d'Ouest en Est, en partant de 0° au méridien de référence Greenwich.

La longitude peut aussi être exprimée en heure, minute, et seconde par cette relation de conversion : 24h équivaut à 360°

D'où $1h = 15^\circ$ $1mn = 15'$ $1s = 15''$

- **L'altitude Z** : qui correspond à la distance verticale entre un point et une surface de référence, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer.

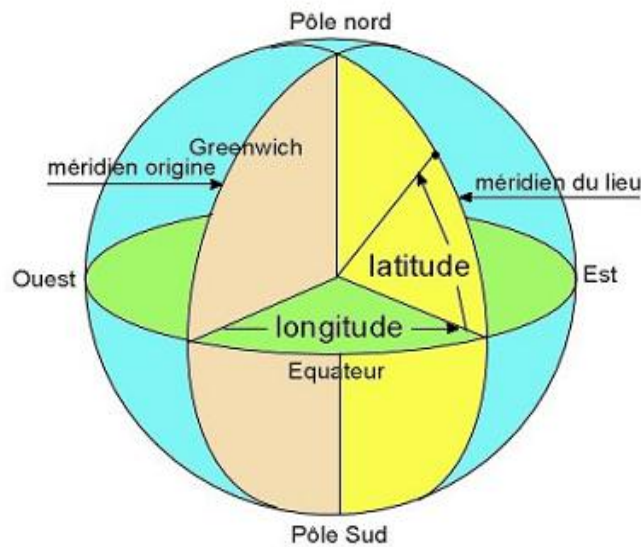


Figure 1: Les coordonnées géographiques terrestres

I.1.2 Les coordonnées célestes

La position du soleil est déterminée à un chaque instant par ses coordonnées célestes. Celles-ci sont réparties en :

- Coordonnées horaires
- Coordonnées azimutales ou horizontales

I.1.2.1 Les coordonnées horaires

Dans ce repère, l'horizon est basculé de façon à amener la direction du zénith dans la direction du pôle .L'ancien horizon se nomme alors équateur céleste [2].

A partir de cette nouvelle référence, on définit les 2 angles nécessaires au repérage : **l'angle horaire et la déclinaison.**

- **L'angle horaire ω**

L'angle horaire du soleil est déterminé par la rotation diurne de la Terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Il mesure donc la course du soleil dans le ciel. Chaque heure correspond à une variation de 15° , car la Terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures. L'angle horaire sera compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'Est et positivement le soir lorsqu'il est à l'Ouest.

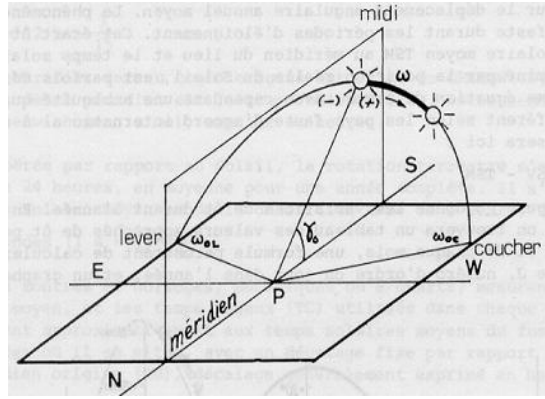


Figure 2: Angle horaire du soleil

Il est donné par la formule suivante :

$$\omega = 15^\circ \times (\text{TSV} - 12) \quad (1)$$

- La déclinaison du soleil δ

On appelle déclinaison, l'angle formé par l'axe Terre-Soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. Elle varie entre $23^\circ 27'$ au solstice d'été, à $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver de manière sinusoïdale. Elle est nulle aux équinoxes [1],[3]. Cela est dû à l'inclinaison de l'axe de la Terre de $23^\circ 27'$ par rapport au plan de l'écliptique.

La déclinaison varie suivant l'équation de COOPER [4] :

$$\delta = 23,45^\circ \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (j - 81)\right) \quad (2)$$

I.1.2.2 Les coordonnées azimutales

Le repérage du soleil défini en un point de la surface terrestre se fait grâce à deux angles :

- La hauteur
- L'azimut
- **La hauteur h**

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu d'observation. Elle est exprimée en degré et varie de 0° à 90° selon la position du soleil. L'horizon a une hauteur de 0° .

On peut calculer la variation de la hauteur du soleil au cours de la journée en fonction de la déclinaison δ du jour considéré, de l'angle horaire ω et de la latitude ϕ par cette équation [5] :

$$\sin(h) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (3)$$

- L'azimut A

L'azimut est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. L'origine des azimuts correspond à la direction du Sud dans l'hémisphère Nord et donc la direction du Nord dans l'hémisphère Sud. L'angle d'azimut est compris entre -180° et 180° compté positivement vers l'Ouest.

On peut la définir en fonction de la déclinaison δ du jour considéré, de l'angle horaire ω et de la hauteur h par la relation :

$$\sin(A) = \frac{\sin(\omega) \cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (4)$$

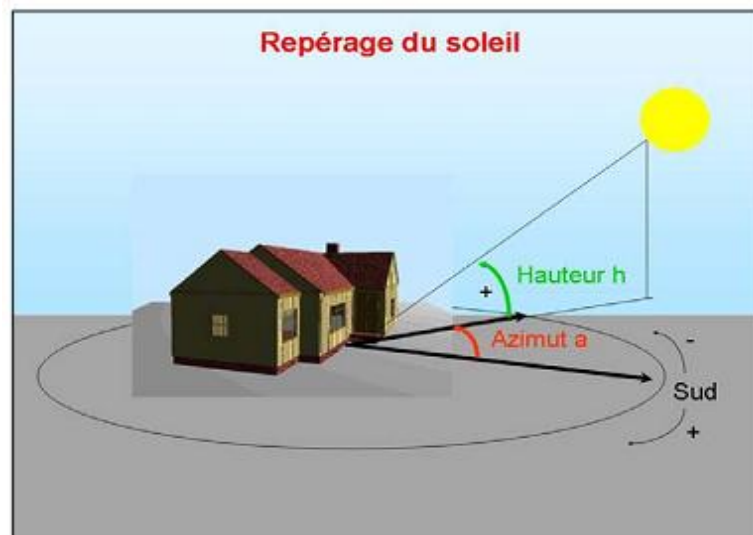


Figure 3: Repérage du soleil par sa hauteur h et son azimut A

I.1.3 Le diagramme solaire

Pour évaluer les paramètres solaires rapidement et sans calculs fastidieux, on utilise des diagrammes ou des abaques qui fournissent des valeurs approchées. Le diagramme solaire est représenté par l'azimut en abscisse et par la hauteur en ordonnée. Il sert à :

- Etablir la durée du jour selon les mois
- Déterminer la courbe quotidienne de l'ensoleillement moyen
- Vérifier que le site choisi est adapté par rapport aux obstacles qui peuvent faire de l'ombre sur les capteurs.

I.2 LES PARAMETRES DE TEMPS [18]

On distingue :

I.2.1 L'équation du temps ET

L'angle au-delà de 360° que la rotation de la Terre doit couvrir pour que le Soleil revienne dans le plan méridien local varie au cours de l'année, autour d'une valeur moyenne proche d'un degré. De ce fait le temps vrai s'écarte de façon périodique du temps moyen : cet écart est décrit par l'équation du temps ET, qui donne l'avance du temps moyen sur le temps vrai en fonction du jour de l'année.

L'équation du temps corrige donc le temps solaire de plus ou moins 15 minutes et elle est donnée par la formule [19]:

$$ET = 7,35 \cos(B) + 1,5 \sin(B) - 9,87 \sin(2B) \quad (5)$$

Avec $B = \frac{360}{365} \times (j - 81)$

I.2.2 Le temps universel TU

Le temps universel est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich.

I.2.3 Le temps légal TL

Le temps légal TL est le temps officiel d'un état. C'est le temps donné par la montre.

I.2.4 Le temps solaire moyen TSM

Le temps solaire moyen est parfois appelé temps local. Il est donné par la formule suivante :

$$TSM = TU + CL \quad (6)$$

L'intervention de la correction de longitude CL se fait lorsqu'on prend en compte des lieux distants en longitudes à l'intérieur du même fuseau horaire.

Pour un lieu considéré situé à une longitude L par rapport à la longitude du méridien d'origine Greenwich, la correction de longitude s'obtient par la formule qui suit :

$$CL = \pm \frac{L}{15} \quad (7)$$

La correction de longitude est positive pour les longitudes à l'Est de Greenwich et négative pour les longitudes à l'Ouest du méridien d'origine.

Clicours.COM

I.2.5 Le temps solaire vrai TSV

Le temps solaire vrai est défini à partir de la rotation de la terre sur elle-même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. La terre fait un tour complet en 24h. Il est midi (12h) lorsque le soleil est au zénith, à cet instant l'angle horaire du Soleil est nul [20].

Elle est obtenue par cette formule [6] :

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (8)$$

- Lorsque $\omega = 0$, TSV = 12 heures
- Si $\omega < 0$, c'est la matinée et si $\omega > 0$, c'est l'après midi

On peut aussi exprimer le temps solaire vrai en fonction du temps légal, de l'équation du temps, du décalage horaire et de la longitude par la relation suivante [19]:

$$\text{TSV} = \text{TL} - \text{DH} + \left(\frac{4L - ET}{60} \right) \quad (9)$$

Le décalage horaire « DH » est compté positivement pour les régions à l'Est de Greenwich et négativement à l'Ouest. A Madagascar il est égal à + 3 heures.

I.2.6 Lever et coucher du soleil

Les heures du lever et du coucher du soleil sont obtenues en faisant $h = 0$ dans l'équation (3) [20] : $\sin(h) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)$

Donc
$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (10)$$

Cette équation n'a de solution que si $-1 \leq \tan \delta \tan \phi \leq 1$. Dans le cas contraire le soleil ne se lève ni se couche. La latitude du lieu considéré doit donc être comprise entre : $\pm 66^{\circ}23'$

Donc à partir de la latitude et de la déclinaison, on peut avoir l'heure solaire vraie du lever et du coucher du soleil [7]:

$$\text{TSV lever} = 12 - \frac{\cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)}{15} \quad (11)$$

$$\text{TSV coucher} = 12 + \frac{\cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)}{15} \quad (12)$$

I.2.7 La durée du jour

La durée du jour est obtenue par cette formule :

$$D \text{ jour} = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (13)$$

I.3 LE RAYONNEMENT SOLAIRE RECU SUR LA TERRE

Lors de sa traversée dans l'atmosphère, le rayonnement solaire est soumis à des phénomènes de diffusion et d'absorption par des molécules gazeuses comme les aérosols, les gouttelettes, les cristaux, et poussière diverses en suspension. Le rayonnement reçu au sol se décompose en [8] :

- Rayonnement direct : les rayons parallèles qui viennent directement du soleil
- Rayonnement diffus : provenant du ciel et ou du sol (Albédo)
- Rayonnement global qui est l'ensemble du rayonnement direct et diffus

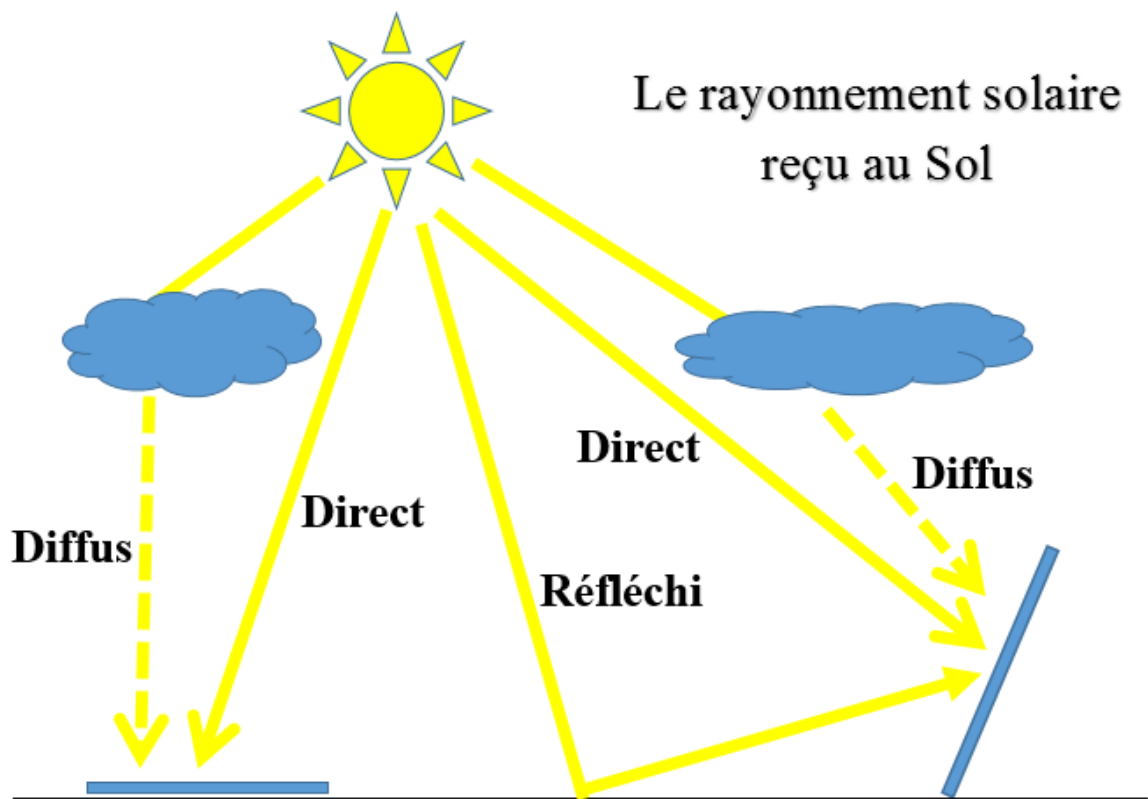


Figure 4: Rayonnement solaire reçu au sol

Pour estimer le rayonnement solaire reçu sur un plan incliné d'un angle « i » par rapport à l'horizontal et orientée vers une direction faisant un angle « γ » avec la direction Nord (γ compté positivement vers l'Ouest), on va utiliser le modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT.

I.3.1 Le modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT [9] [7]

Le modèle de Perrin de Brichambaut est une méthode pour estimer l'ensoleillement journalier sur un plan horizontal ou incliné au temps donné d'un lieu. Il est fonction des paramètres météorologiques du lieu.

Le modèle, basé sur le facteur de trouble de Linke TL, est étalonné par des échantillons des points de mesures sur terrain. Ces points sont définis suivant les zones climatiques de la région.

I.3.2 Le rayonnement solaire direct

Le rayonnement solaire direct est le rayonnement incident sur un plan donné provenant du soleil. Il parvient en ligne droite et par temps clair, sans subir aucune déviation.

I.3.2.1 Le rayonnement solaire direct I*

Il s'agit de l'éclairement solaire reçu sur un plan récepteur normal aux rayonnements solaires. Il est donné par la formule suivante :

$$I^* = I_0 \times e^{(-m_{air} \cdot TL \cdot \sigma_R)} \quad (14)$$

- Calcul d'I₀

I₀ désigne l'éclairement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite de l'atmosphère en fonction du jour de l'année. Il est exprimé par la relation :

$$I_0 = C_{sol} \times \left(1 + 0,0334 \times \cos \left(\frac{360 \times (j - 2,7206)}{365,25} \right) \right) \quad (15)$$

Avec C_{sol}, la constante solaire qui est l'éclairement reçu sur une surface hors atmosphère normale au rayonnement solaire. La valeur de cette constante est **1367 W/m²**.

- Calcul de m_{air} : Masse d'air optique relative

La masse d'air d'optique relative est définie comme l'augmentation relative de la longueur du chemin parcouru par les rayons solaires au travers de l'atmosphère dans la direction du soleil.

$$m_{air} = \frac{P_{atm}}{101325 \times \sin(h) + 15198,75 \times (3,885 + h)^{-1,253}} \quad (16)$$

Avec la pression atmosphérique :

$$P_{atm} = 101325 \times (1 - 2,26 \times 10^{-5} \times Z)^{5,26} \quad (17)$$

- Calcul du facteur de Trouble de Linke TL

Le facteur de trouble de Linke est obtenu par la relation :

$$TL = 2,4 + 14,6\beta + 0,4(1 + 2\beta) \ln(P_v) \quad (18)$$

Les valeurs prises par le coefficient de trouble atmosphérique sont données ci-dessous.

Tableau 1: Coefficient de trouble atmosphérique

LIEU	Valeur de β
Montagne	0,02
Rural	0,05
Urbain	0,10
Industriel (atmosphère polluée)	0,20

Le dernier terme de la formule de TL est obtenue par :

- **Pression partielle de vapeur d'eau**

$$P_v = P_{vs} \times H_r \quad (19)$$

Et on a la pression de vapeur saturante :

$$P_{vs} = 2,165 \times \left(1,098 + \frac{T_{air}}{100}\right)^{8,02} \quad (20)$$

- **Calcul de σ_R : Epaisseur optique de Rayleigh**

$$\sigma_R = \frac{1}{0,9 m_{air} + 9,4} \quad (21)$$

I.3.2.2 Le rayonnement solaire direct sur un plan incliné S^*

L'éclairement solaire reçu sur un plan incliné d'un angle « i » par rapport à l'horizontal et orientée vers une direction faisant un angle « γ » avec la direction Nord est :

$$S^* = I^* \times C_I \quad (22)$$

- **Le coefficient d'incidence C_I**

C'est l'angle formé par le rayonnement solaire avec le plan perpendiculaire d'une surface. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil et son azimut et d'autre part par l'orientation et l'inclinaison du plan récepteur.

$$C_I = \sin(i) \times \cos(h) \times \cos(\gamma - A) + \cos(i) \times \sin(h) \quad (23)$$

I.3.3 Le rayonnement solaire diffus

C'est le rayonnement solaire qui arrive sur le plan récepteur après avoir été réfléchi par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol. On suppose que le rayonnement solaire diffus n'a pas de direction prédominante (donc isotrope) de ce fait, l'orientation du plan récepteur n'a pas d'importance, seule son inclinaison en a.

L'éclairement solaire diffus est obtenu par :

$$D^* = 125 \times \sin(h)^{0,4} \times \left(1 + \frac{\cos(i)}{2}\right) + 211,86 \times \sin(h)^{1,22} \times \left(1 - \frac{\cos(i)}{2}\right) \quad (24)$$

Le coefficient de la fraction du rayonnement solaire renvoyé par le sol appelé albédo a été déjà intégré dans la formule ci-dessus. L'albédo est fonction de la nature du sol, de sa température et de sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire.

I.3.4 Le rayonnement global

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

$$G^* = S^* + D^* \quad (25)$$

I.3.5 Le facteur d'atténuation des couches nuageuses [21]

Ce facteur met en évidence l'action des couches nuageuses sur l'irradiation reçu au sol.

Il est donné par la relation :

$$K_c = 1 - 0,75 \left(\frac{N}{8}\right)^{3,4} \quad (26)$$

- **N : Le degré de nébulosité [22]**

C'est le rapport entre la surface de la voûte céleste couverte par des nuages, et la surface totale. Ses valeurs dépendent donc du taux de couverture du ciel. Il est exprimé par les prévisionnistes en octas (huitième de ciel, une valeur de 8 indique que le ciel est complètement opaque et une valeur de 0 qu'il est complètement dégagé).

Le tableau suivant donne un aperçu des termes utilisés dans les prévisions météorologiques pour décrire le degré de nébulosité.

Tableau 2: Coefficient de nébulosité

Termes utilisé	Partie du ciel non visible du fait de la présence de nuages (en octas)
Ciel serein	0
Légèrement nuageux	1 à 2
Partiellement nuageux	3 à 5
Très nuageux	6 à 7
Couvert	8

I.3.6 L'irradiation solaire journalière [9]

L'irradiation solaire journalière est l'énergie reçue par un plan récepteur pendant une journée. Elle est donnée par la formule :

$$G = \frac{(K_c \times 2 \times G^* \times d)}{\pi} \quad (27)$$

I.4 GISEMENT SOLAIRE DE MADAGASCAR [10]

De par sa situation géographique, Madagascar dispose d'un très bon gisement solaire.

L'île bénéficie d'un gisement solaire estimé à 2000 kWh/m² par an, et est constitué par plus de 2800 heures d'ensoleillement annuel sur toutes les régions du pays. Dans certaines régions, l'ensoleillement quotidien est supérieur à 5,5 kW/m². La puissance de l'énergie solaire est de 7 kW.

La carte d'ensoleillement de Madagascar fournit quelques informations sur le gisement solaire existant.

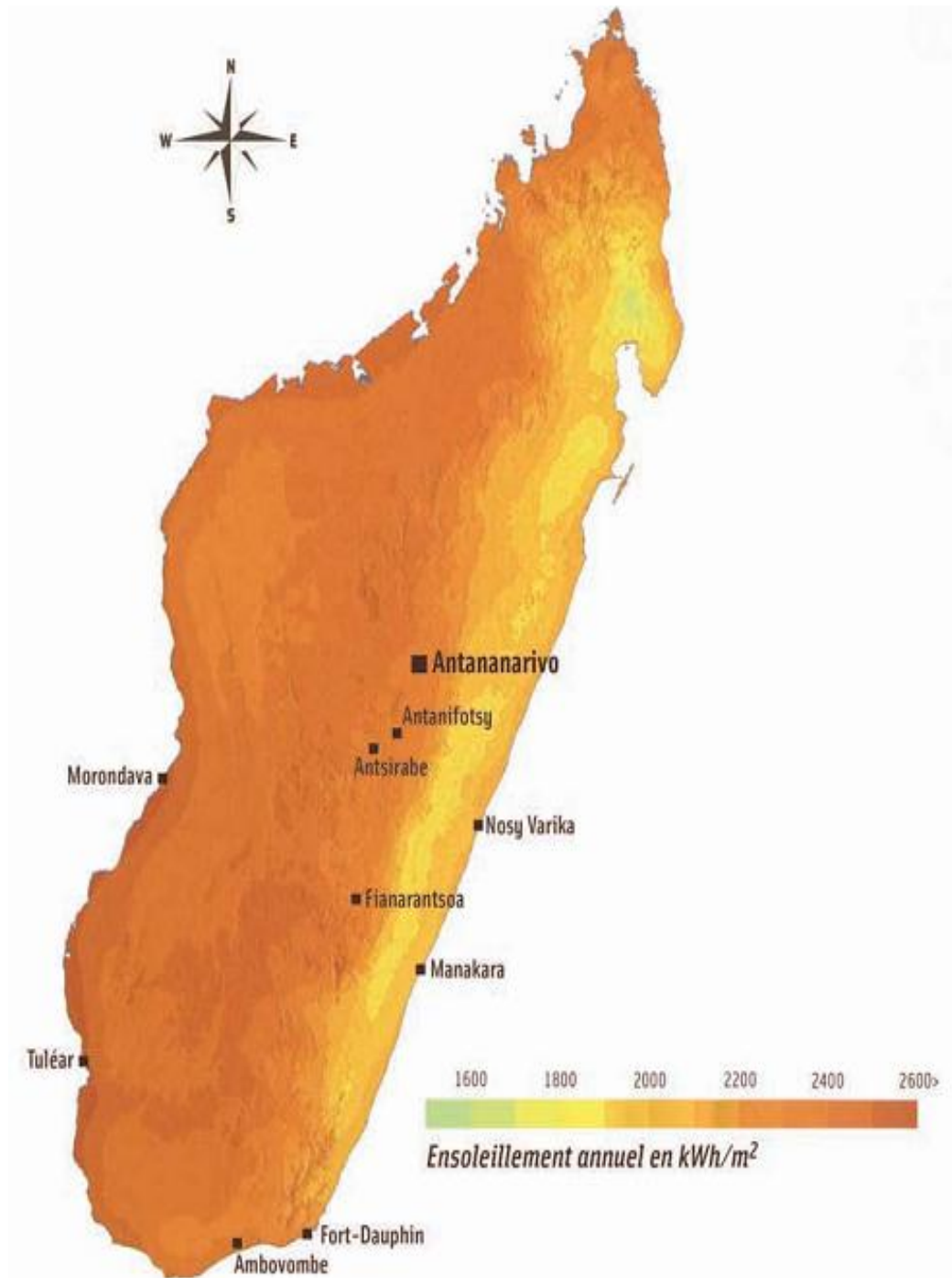


Figure 5: Carte d'ensoleillement de Madagascar

Il est donc très important de connaître le gisement solaire d'un site avant d'y construire une installation utilisant l'énergie solaire.

Chapitre II : LES TRANSFERTS THERMIQUES

MIS EN JEU

L'existence d'une différence de température entre deux systèmes, quel que soit le milieu qui les sépare, même le vide, fait intervenir un échange d'énergie connu généralement sous le nom de « transfert de chaleur ».

Les calculs des systèmes solaires utilisant la conversion thermique de l'énergie font appel à quelques formules de base relatives aux transferts de chaleur.

Dans le but de concevoir un chauffe-eau solaire, il nous paraît donc indispensable de voir les phénomènes mis en jeu que nous utiliserons dans notre travail.

II.1 TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de FOURIER : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (28)$$

Dans le cas d'un transfert de chaleur monodimensionnel :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (29)$$

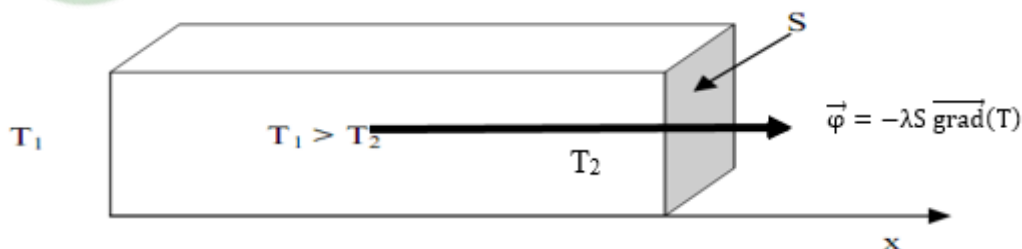


Figure 6: Schéma d'un transfert de chaleur conductif

On peut voir en **Annexe 1** les valeurs de la conductivité thermique λ de quelques matériaux parmi les plus courants utilisés dans les systèmes de chauffe-eau solaire.

II.2 TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION [11]

Ce mode de transfert est basé sur l'existence d'un déplacement de matière : il ne concerne donc que les fluides (liquide et gaz). Contrairement à la conduction où le transfert de chaleur se fait par contact, dans le fluide, la possibilité de déformation sous l'effet de la température permet de mettre en œuvre des mouvements de ce fluide plus ou moins importants. Ces mouvements sont dus à des différences de pression et ou des différences de température.

Si l'écoulement est dû à des forces extérieures (pompe, ventilateur,...), on est alors dans des conditions de **convection forcée**. C'est ce mode qui est généré lorsque l'on veut améliorer l'échange thermique.

L'écoulement peut aussi se faire naturellement : il est dû à la différence de densité des différentes zones du fluide. Ce phénomène est très courant et s'appelle **convection naturelle**.

La convection est régie par la loi de NEWTON:

$$\dot{Q} = h_c S (T_1 - T_2) \quad (30)$$

C'est le cas de la convection naturelle qui nous intéresse le plus dans ce mémoire, car notre chauffe-eau n'utilisera pas de pompe ni de circulateur.

II.2.1 La convection naturelle

Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo-circulation ou thermosiphon.

- Grandeur caractéristique

Le nombre de GRASHOF : $G_r = \frac{l^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu}$ (31)

Le nombre de GRASHOF est à la convection naturelle ce que le nombre de REYNOLDS est à la convection forcée.

Si $G_r > 10^9$: on a une convection turbulente

$$G_r \text{ critique} = 10^9$$

$G_r < 10^9$: on a une convection laminaire

- Expression du nombre de NUSSELT

La relation est de la forme $N_u = C. (G_r P_r)^n$ (32)

- $n = 1/4$ pour la convection laminaire
- $n = 1/3$ pour la convection turbulente

Le coefficient C dépend du régime de convection et de la géométrie

- convection laminaire : $0,2 < C < 0,6$
- convection turbulente : $0,07 < C < 0,15$

II.2.2 Le thermosiphon

- Principe du thermosiphon :

Une circulation de fluide peut être assurée par le seul effet du champ de pesanteur si la température du fluide n'est pas uniforme. Les forces d'Archimède agissent différenciellement sur les masses des fluides dont les plus chaudes (les moins denses) sont sollicitées vers le haut pendant que les plus froides descendent.

Si le fluide est contenu dans une boucle avec un réchauffage en position basse (point A de la figure ci-dessous) et un refroidissement en position haute (point B), ce qui est le cas dans un système de chauffe-eau, le fluide circule sous l'action motrice de la pesanteur [12].

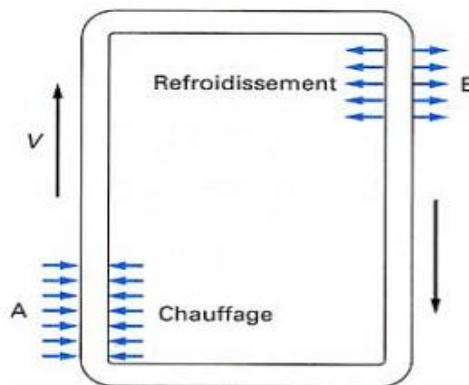


Figure 7: Schéma de principe du thermosiphon

Le mouvement du fluide en thermosiphon est caractérisé par la pression hydro-motrice [23] :

$$P = H \times g \times (\rho_f - \rho_c) \quad (33)$$

On devra respecter une certaine différence de hauteur entre le haut du capteur et la base du réservoir pour garantir une bonne mise en place de la pression hydro-motrice ou charge.

On a l'effet thermosiphon dès que $H = 0,30 \text{ m} = 30 \text{ cm}$

L'effet thermosiphon dépend donc de la charge H et de la différence de température ΔT

II.3 TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT

Contrairement à la convection ou la conduction, le rayonnement est un mode d'échange d'énergie qui ne nécessite pas l'existence d'un support. C'est une émission d'énergie susceptible de se transmettre dans le vide. C'est donc le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un autre à basse température lorsque ces corps sont séparés dans l'espace, ou même lorsqu'un vide existe entre eux.

II.3.1 Lois fondamentales de rayonnement des sources noires

II.3.1.1 Corps noir

C'est un corps qui absorbe intégralement tout le rayonnement qu'il reçoit et n'en réfléchit ou n'en transmet rien et ceci indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Les corps noirs rayonnent de la même manière. A la même température, un corps noir rayonne plus qu'un corps non noir.

On utilise le corps noir comme une référence à laquelle on compare les caractéristiques du rayonnement des autres corps.

II.3.1.2 Loi de PLANCK

Dans un intervalle centré autour d'une longueur d'onde λ , le flux d'énergie émise par un corps noir à la température T augmente très rapidement avec la longueur d'onde λ , atteint un maximum puis retombe très vite encore. Cette émission d'énergie en fonction de λ dépend seulement de sa température mais non pas de la nature de la matière avec laquelle interagit le rayonnement. Cette loi s'écrit :

$$E_{\lambda T} = \frac{2\pi h C^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1} \quad (34)$$

II.3.1.3 Loi de STEFAN-BOLTZMANN

L'intégration de la formule de Planck pour toutes les longueurs d'onde donne l'émittance totale E_T du corps noir qui n'est plus fonction que de la température T . Cette émittance totale est donnée par la loi de Stefan Boltzmann :

$$E_T = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (35)$$

II.3.2 Rayonnement des corps opaques non noirs

Le corps noir est l'émetteur idéal. Les corps opaques n'émettent qu'une fraction de $E_{\lambda T}$.

- **Facteur d'émission ou émissivité**

On définit les propriétés émissives des corps réels par rapport aux propriétés émissives du corps noir dans les **mêmes conditions de température et de longueur d'onde** et on les caractérise à l'aide de coefficients appelés facteurs d'émission ou émissivités.

- Facteur d'émission monochromatique

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda T}}{E_{\lambda T}} \quad (36)$$

- Facteur d'émission totale

$$M_T = \int_0^{\infty} M_{\lambda T} d\lambda = \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} E_{\lambda T} d\lambda < \int_0^{\infty} E_{\lambda T} d\lambda = E \quad (37)$$

On peut définir le facteur d'émission total dépend en principe de la température :

$$\epsilon = \frac{M_T}{E_T} \quad (38)$$

L'émittance totale d'un corps noir à la température T est donnée par la relation :

$$E_T = \sigma T^4 \quad (39)$$

L'émittance totale d'un corps non noir à la température T est donnée par la relation :

$$M_T = \epsilon_T \sigma T^4 = \epsilon_T E_T \quad (40)$$

II.3.2.1 Loi de KIRCHOFF

Cette loi établit un rapport entre le coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ϵ d'une même surface. A une température T donnée et pour une longueur d'onde λ donnée, le rapport $\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}$ est le même pour tous les corps.

Pour le corps noir : $\alpha_{\lambda T} = 1$ et $M_{\lambda T} = E_{\lambda T}$

Le rapport est donc égal à l'émittance monochromatique du corps noir. Par suite :

$$\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} = E_{\lambda T} \Rightarrow M_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} E_{\lambda T} \quad (41)$$

L'émittance monochromatique de tout corps est égale au produit de son pouvoir absorbant monochromatique par l'émittance monochromatique du corps noir à la même température, d'où l'intérêt de connaître le rayonnement émis par le corps noir.

II.3.2.2 Cas des corps gris : Loi de KIRCHHOFF généralisée

Dans le cas du corps gris, on a : $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$, donc :

$$M_T = \int_0^{\infty} M_{\lambda T} d\lambda = \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda T} E_{\lambda T} d\lambda = \alpha_T \int_0^{\infty} E_{\lambda T} d\lambda \Rightarrow M_T = \alpha_T E_T \quad (42)$$

L'émittance totale M_T d'un corps gris à la température T est égal au produit de son pouvoir absorbant α_T par l'émittance totale E_T du corps noir à la même température.

Or, pour un corps non noir : $M_T = \varepsilon E_T$

D'après la loi de Kirchhoff, on montre que : $\alpha_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T}$

Ils sont caractérisés par $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$ soit d'après ce qui précède : $\varepsilon = \varepsilon_{\lambda T}$

Donc $\alpha = \varepsilon$

II.3.2.3 Signification de la loi de KIRCHHOFF généralisée pour un corps gris

Soit une surface grise dS à la température T . Cette surface reçoit un flux $d\phi$ dont elle absorbe $\alpha d\phi$. Simultanément, elle émet un flux $d\phi = M_T ds$. A l'équilibre le bilan est nul :

$$\alpha d\phi - \varepsilon \sigma T^4 ds = 0 \quad (43)$$

Si $d\phi$ provient d'une source noire à la même température : $d\phi = \sigma T^4 ds$, les conditions d'équilibre sont satisfaites (échange de chaleur nul) :

$$\alpha \sigma T^4 - \varepsilon \sigma T^4 = 0 \quad (44)$$

Ainsi, cette loi signifie que quand un corps gris absorbe 30% de l'énergie qu'il reçoit, simultanément il émet 30 % de l'énergie qui aurait été émise par un corps noir à la même température.

II.3.3 Définitions relatives aux récepteurs

II.3.3.1 Eclairement

Le flux d'énergie par rayonnement reçu par unité de surface réceptrice, en provenance de l'ensemble des directions, est appelé éclairement. C'est l'homologue de l'émittance pour une source.

II.3.3.2 Réception du rayonnement par un solide

Quand un rayon incident d'énergie ϕ_λ frappe un corps à la température T , une partie de l'énergie incidente $\phi_\lambda \rho_{\lambda T}$ est réfléchi par la surface S , une autre partie $\phi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste $\phi_\lambda \tau_{\lambda T}$ est transmis et continue son chemin.

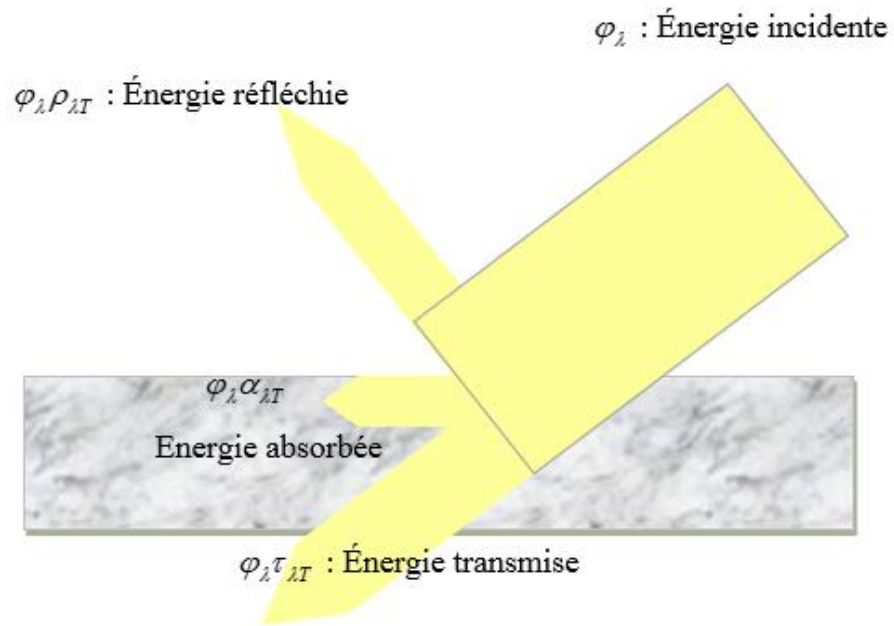


Figure 8: Réception du rayonnement par un solide

$$\varphi_\lambda = \varphi_\lambda \rho_{\lambda T} + \varphi_\lambda \alpha_{\lambda T} + \varphi_\lambda \tau_{\lambda T} \Rightarrow 1 = \rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} + \tau_{\lambda T} \quad (45)$$

On définit ainsi les pouvoirs monochromatiques :

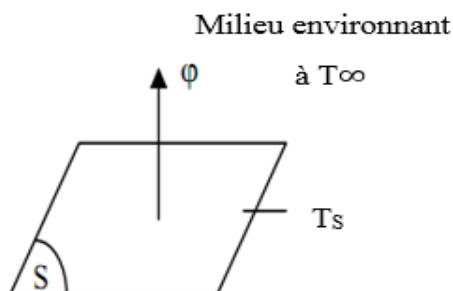
- réfléchissant $\rho_{\lambda T}$ appelé encore facteur ou coefficient de réflexion ou réflectivité
- absorbant $\alpha_{\lambda T}$ ou coefficient d'absorption ou absorptivité
- filtrant $\tau_{\lambda T}$

Ils sont fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T , de la longueur d'onde λ du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

Si l'on considère l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde, on obtient les pouvoir réfléchissant ρ_T , absorbant α_T et filtrant τ_T totaux qui sont également appelés facteur de réflexion, facteur d'absorption et facteur de transmission.

II.3.4 Flux de chaleur transmis par rayonnement

Le flux de chaleur transmis par rayonnement entre un solide et le milieu environnant est donné par la relation :



$$\Phi = \sigma \cdot \epsilon_s \cdot S (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (46)$$

II.3.5 Rayonnement réciproque entre deux corps quelconques séparés par un milieu transparent

Un corps ne peut être généralement isolé dans l'espace ; il est entouré d'autres corps à températures habituellement différentes de la sienne. Des échanges de chaleur par rayonnement ont alors lieu et il est important de pouvoir les évaluer.

Le flux d'énergie échangé par rayonnement entre deux corps $C_1 (S_1, T_1, \varepsilon_1)$ $C_2 (S_2, T_2, \varepsilon_2)$ s'exprime par :

$$\Phi = S_1 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot f(S_1, S_2) \quad (47)$$

f est un nombre sans dimension qui dépend de la forme propre des corps C_1 et C_2 et de leur position relative

II.3.6 Aperçu des propriétés de quelques matériaux vis-à-vis du rayonnement

- Absorption du rayonnement par des matériaux

La majorité des matériaux solides absorbent pratiquement tout le rayonnement sur une couche de surface très fine, moins de 1,25mm d'épaisseur.

- Transmission du rayonnement par les matériaux

Les corps qui ne transmettent pas le rayonnement sont appelés opaques et pour ceux-ci, l'équation (45) se réduit à : $1 = \rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T}$

Le verre, le sel de roche et d'autres cristaux non organiques sont des exceptions parmi les solides car, malgré leur forte épaisseur, ils restent jusqu'à un certain point transparents au rayonnement de certaines longueurs d'onde.

Beaucoup de liquides et de gaz sont aussi transparents.

- Réflexion du rayonnement par les matériaux

La réflexion du rayonnement peut être soit régulière, soit diffuse :

- Si une surface est bien polie et lisse, la réflexion du rayonnement sera similaire à celle d'un rayon lumineux : l'angle d'incidence sera égal à l'angle de réflexion. C'est **la réflexion régulière**.
- La plupart des matériaux utilisés dans l'industrie sont « rugueux » parce que leurs surfaces présentent des aspérités qui sont grandes par rapport à une longueur d'onde. La réflexion du rayonnement à partir d'une surface rugueuse se dirige pratiquement dans toutes les directions. C'est **la réflexion diffuse**.

Les grandeurs $\rho_{\lambda T}$, $\alpha_{\lambda T}$ et $\tau_{\lambda T}$ ne dépendent pas seulement du matériau, de son épaisseur et de son état de surface, mais varient aussi avec la longueur d'onde du rayonnement.

Sur la figure suivante, on peut voir les facteurs d'émission, d'absorption et de réflexion de quelques matériaux vis-à-vis du rayonnement [13].

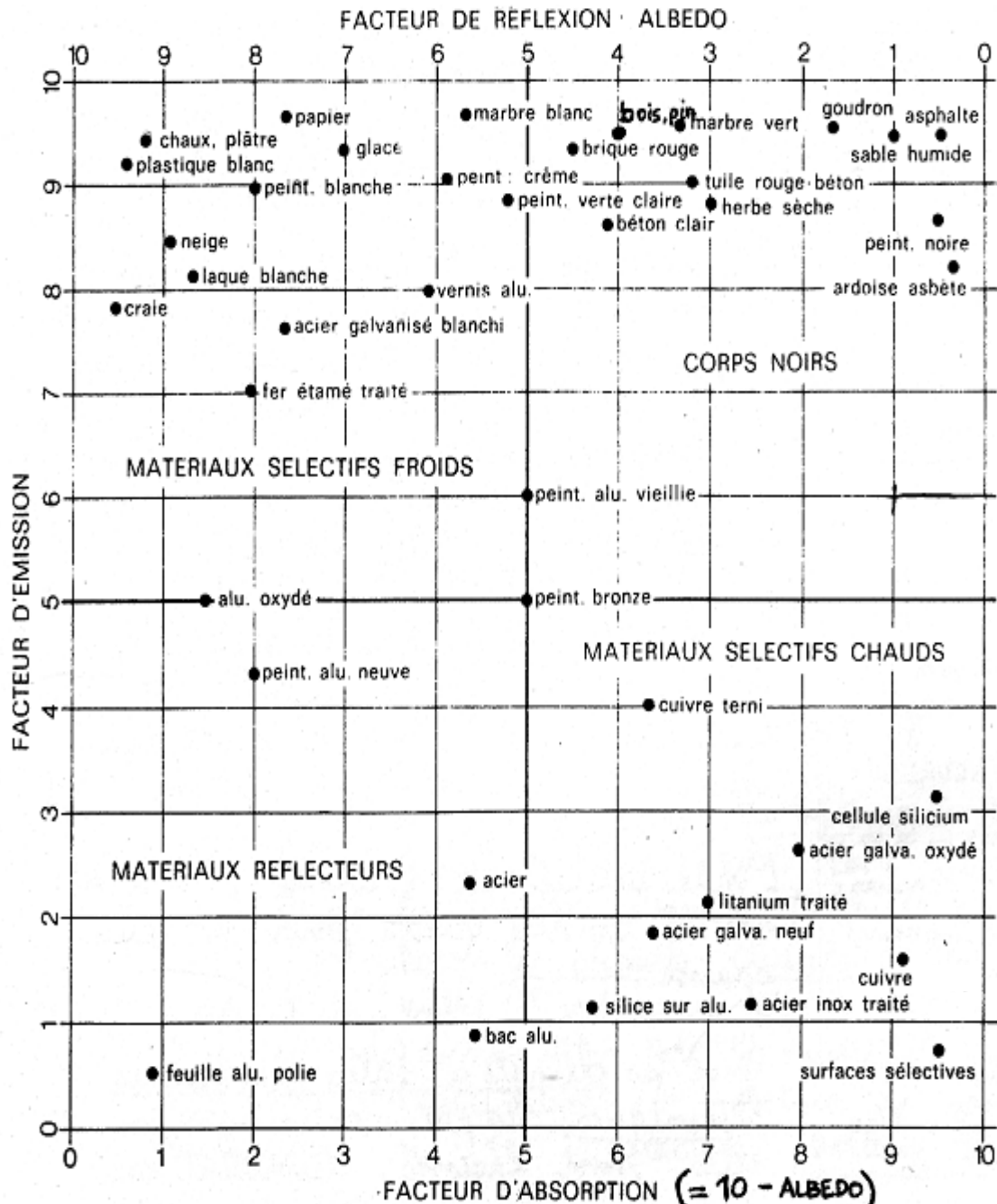


Figure 9: Facteur d'émission, d'absorption et de réflexion de quelques matériaux

Le coefficient de réflexion de quelques métaux en fonction de la longueur d'onde du rayonnement est montré dans la figure ci-dessous :

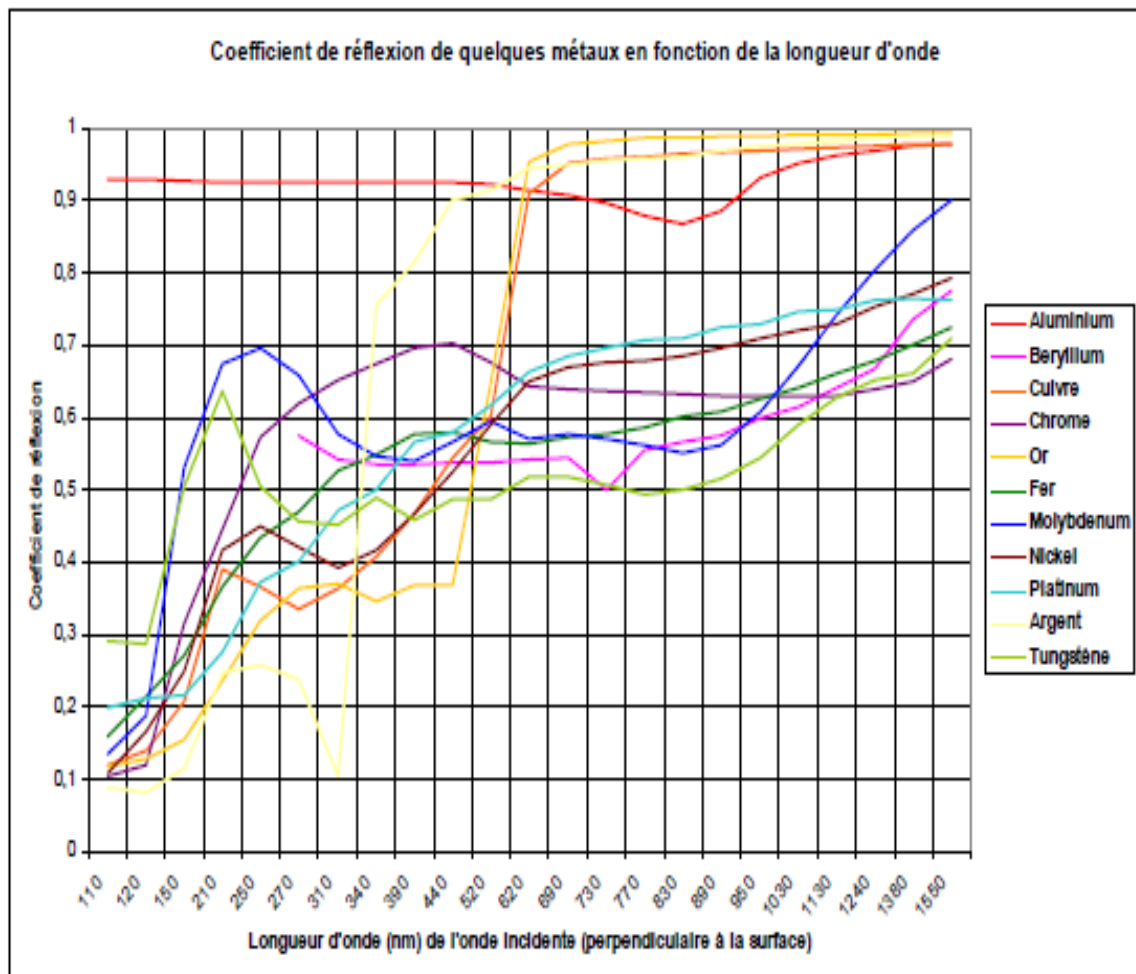


Figure 10: Coefficient de réflexion de quelques métaux en fonction de la longueur d'onde

Chapitre III : LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE

III.1 GÉNÉRALITÉS SUR LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE

Le chauffe-eau solaire ou CES est un système permettant de produire de l'eau chaude par conversion de l'énergie solaire. L'eau chaude produite peut être utilisée à des fins domestiques (par exemples pour les toilettes, la lessive, la vaisselle,...), à des besoins industriels ou encore à des usages collectifs ou commerciaux (hôpitaux, hôtels,..) pour des consommations plus importantes.

Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire est simple, il consiste en un transfert de l'énergie solaire absorbé par les capteurs (système de captation de l'énergie solaire) vers un système de stockage. Le tout est bien sûr relié par un système de transfert hydraulique.

III.1.1 Classification des chauffe-eau solaires

On peut distinguer trois types de chauffe-eau solaire selon le mode de production. Il y a :

- Le chauffe-eau solaire à thermosiphon
- Le chauffe-eau solaire à circulation forcée
- Le chauffe-eau solaire capteur-stockeur

III.1.1.1 Chauffe-eau solaire à thermosiphon

Le chauffe-eau solaire à thermosiphon utilise le principe du thermosiphon mentionné au paragraphe II.2.2 du chapitre II. Ils sont très répandus dans le monde car leur système thermique est performant, robuste et fiable.

Dans un chauffe-eau à thermosiphon, on place obligatoirement le ballon de stockage plus haut que le capteur. Le fluide s'échauffe dans le capteur, s'y échappe par la sortie haute et monte régulièrement jusqu' à l'échangeur. Quand le fluide chauffé entre dans l'échangeur, il se refroidit en réchauffant l'eau du ballon, et redescend donc en prenant la sortie basse de l'échangeur pour rejoindre l'entrée basse du capteur pour être réchauffé à nouveau. Et la boucle est bouclée, il est en train de se réchauffer et repart pour un tour, tant qu'il y a du soleil [24]. Il s'en suit donc une circulation naturelle du fluide, sans pompe donc sans risque de panne entre le capteur et le ballon où l'eau chaude est stockée.

Néanmoins la construction de ces chauffe-eau doit se faire dans les règles de l'art pour permettre l'amorçage du thermosiphon.

Il existe deux types de chauffe-eau thermosiphon :

- **Les chauffe-eau monoblocs**

Dans ce premier type, le ballon de stockage d'eau chaude disposé horizontalement est solidaire au capteur.



Figure 11: Chauffe-eau solaire monobloc

- **Les chauffe-eau à éléments séparés**

Dans ce second type, le capteur et le ballon de stockage sont placés séparément. Le capteur reste à l'extérieur mais le ballon de stockage peut se mettre à l'intérieur de l'habitation (par exemple dans les combles). Cependant, il faut que le ballon soit toujours placé au-dessus du capteur pour permettre la circulation naturelle de l'eau chaude.

III.1.1.2 Chauffe-eau solaire à circulation forcée

Le principe de la circulation forcée repose sur l'utilisation d'une pompe électrique commandé par un dispositif de régulation. Il met en mouvement le fluide dès que sa température est supérieure à celle de l'eau du ballon.

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur est installé à l'intérieur du logement.

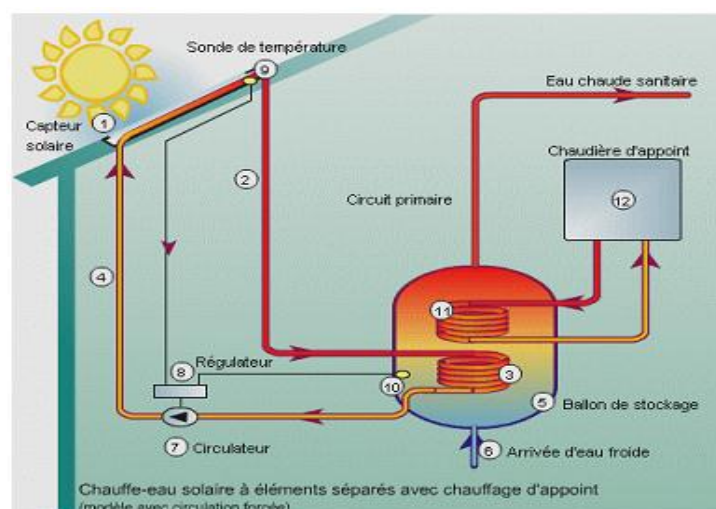


Figure 12: Chauffe-eau solaire à circulation forcée

III.1.1.3 Chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur

Le principe de fonctionnement est très simple. Comme montré sur la figure ci-dessous, un réservoir d'eau est placé dans un bac thermiquement isolé vers l'extérieur.

Il reçoit le rayonnement sur sa face avant qui est recouverte d'un vitrage pour créer l'effet de serre et minimiser les pertes calorifiques par convection. Ce réservoir absorbe une partie du rayonnement solaire incident sur sa surface et la transmet, par conduction, à l'eau stockée. Après une exposition au soleil durant toute la journée et quand l'isolation thermique est suffisante, ce genre de dispositif permet de garder l'eau stockée assez chaude pour une exploitation durant le soir ou bien le lendemain au matin. Ce type de chauffe-eau est particulièrement adapté aux régions isolées et ou pauvres [14].

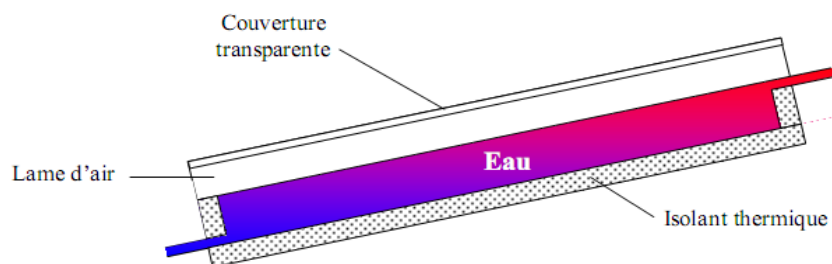


Figure 13: Chauffe-eau solaire type capteur-stockeur

III.1.2 Les éléments constitutifs d'un chauffe-eau solaire

Une installation de production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire est généralement constituée par :

- Un ou plusieurs capteurs solaires à circulation de liquide qui effectuent la conversion du rayonnement électromagnétique émis par le soleil en chaleur, et permettent le transfert de cette énergie calorifique en la cédant à un fluide caloporteur.
- Un système de transfert qui permet le transport des calories depuis le capteur vers le lieu de stockage.
- Un réservoir de stockage utilisé pour l'accumulation de l'énergie reçue du soleil, avec le module hydraulique de transfert, et des fois même un système d'appoint.

III.1.2.1 Le capteur

Le capteur solaire constitue le lien entre l'énergie solaire incidente et le consommateur. Il transforme aussi efficacement que possible le rayonnement solaire en chaleur. C'est l'élément de base d'un chauffe-eau solaire et sa dimension dépend de la quantité d'eau à chauffer.

Il existe principalement trois types de capteurs solaires : le capteur plan vitré, le capteur plan non vitré et le capteur tubulaire sous vide.

- **Le capteur plan vitré**

Il est recommandé pour une plage de températures comprises entre 30 et 80 °C et convient particulièrement au chauffage de l'eau sanitaire. C'est le modèle le plus courant dans le monde entier. Le capteur plan vitré est constitué d'un coffre isolant à l'intérieur duquel est disposée une plaque métallique noire destinée à absorber l'énergie solaire. Le processus utilisé est dit « processus de l'effet de serre ». Les rayons du soleil traversent la couverture transparente supérieure en verre puis frappent l'absorbeur. Celui-ci étant habituellement en noir, absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent se réchauffe. La chaleur reste prisonnière du capteur. Un liquide caloporteur circule dans un tuyau situé dans le capteur et conduit la chaleur emprisonnée vers l'unité de stockage [15]. Ce type de capteur est montré par la figure suivante.

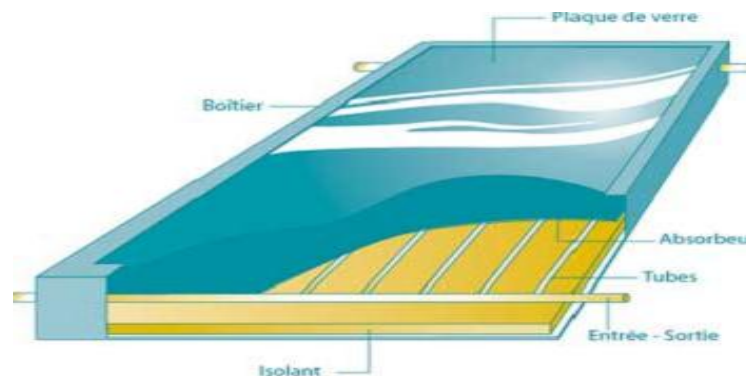


Figure 14: Un capteur plan vitré

- **Le capteur plan non vitré**

Le capteur plan non vitré est principalement utilisé pour des températures peu élevées telles que le chauffage des piscines ou le préchauffage de l'eau sanitaire. Ils sont habituellement fabriqués en un plastique noir (par exemple le polyéthylène haute densité) qui a été stabilisé afin de résister aux rayons ultraviolets. Comme ces capteurs ne possèdent pas de vitrage, une grande partie de l'énergie solaire est absorbée. Cependant, parce qu'ils ne sont pas isolés, une grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a du vent et que la température extérieure n'est pas assez chaude [7].



Figure 15: Capteur plan non vitré

- **Le capteur tubulaire sous vide**

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 120°C). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif. Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques du capteur. Il a aussi l'avantage de pouvoir être disposé suivant n'importe quelle inclinaison, ce qui facilite son intégration.

Ces capteurs conviennent bien à la production d'eau chaude en industrie, en montagne ou dans les pays avec un climat froid compte tenu de leur bon rendement pour des températures extérieures basses.

On peut distinguer deux types de capteur tubulaire sous vide :

- Le capteur à absorbeur sous vide : l'absorbeur est inséré dans un tube en verre sous vide. Les différents tubes arrivent en leur sommet dans un collecteur qui les rassemble
- Le capteur à tube bouteille thermos : Les deux parois sont reliées de manière étanche à l'air au niveau du goulot. L'intérieur de la bouteille est soumis à l'air atmosphérique, tandis que l'espace compris entre les deux parois est sous vide.



Figure 16: Capteur tubulaire sous vide

III.1.2.2 Le système de transfert

On utilise un échangeur de chaleur dans le réservoir pour pouvoir céder les calories stockées par le fluide caloporteur dans les capteurs.

L'échangeur de chaleur est un appareil dans lequel circulent deux fluides séparés par une paroi et qui échangent de la chaleur entre eux. L'un se refroidit pendant que l'autre s'échauffe sans qu'il n'y ait contact direct avec les deux fluides.

A cause de sa fonction de transfert thermique, l'échangeur doit offrir une surface de contact la plus grande possible entre les fluides.

Le plus souvent, il est intégré dans la cuve de stockage mais il peut aussi être disposé à l'extérieur. Les échangeurs externes seront des échangeurs à plaques et les échangeurs internes auront l'aspect d'un serpent.



Figure 17: Echangeur à plaque et à serpent

III.1.2.3 Le réservoir de stockage

C'est un élément essentiel dans une installation de chauffe-eau solaire. Le stockage de l'énergie captée permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire. L'accumulation de l'énergie dans le réservoir se traduit par une élévation de sa température. Comme son nom l'indique, il permet de stocker l'eau chaude produite pour la restituer au moment des besoins d'utilisation. Il doit être bien isolé pour éviter les pertes thermiques vers le milieu extérieur.

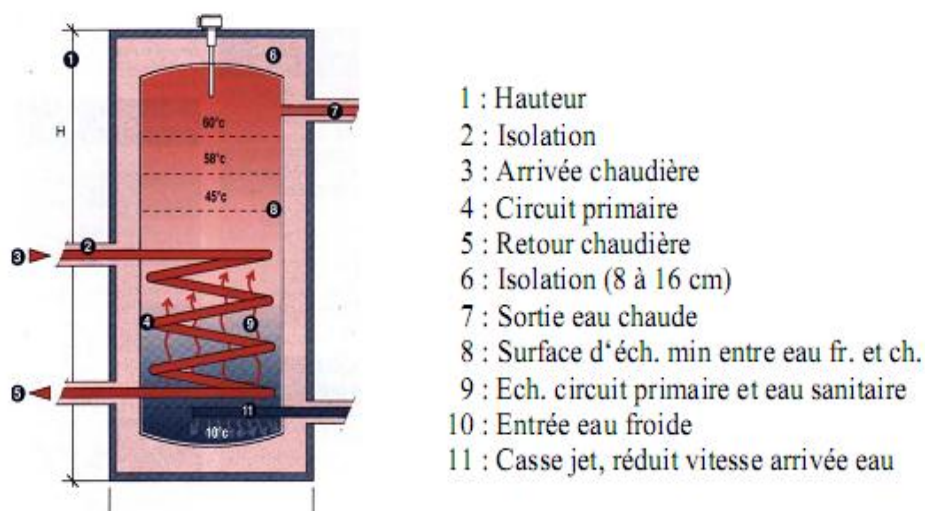


Figure 18: Schéma d'un réservoir

III.1.2.4 Le module hydraulique de transfert

Le module hydraulique de transfert prend en charge tout ce qui concerne les canalisations, la circulation du fluide dans l'installation, et tous les branchements assurant le bon fonctionnement du système. Il est constitué par :

- la pompe ou circulateur utilisé dans le cas d'une installation à circulation forcée et qui est en charge de la circulation du fluide caloporteur dans le circuit primaire
- la vase d'expansion : qui est destinée à contrôler les variations de pression et de volume du liquide caloporteur dans le circuit primaire lorsque le chauffe-eau est en marche. Elle absorbe le volume du fluide caloporteur excédentaire lors de la phase de chauffage. On la place au point haut du circuit primaire.
- le système de régulation qui se met en marche lorsqu'il y a une différence de température entre la température du fluide à la sortie des capteurs et celle du bas du réservoir. Le but est d'avoir une utilisation maximale de l'apport solaire.
- le purgeur : c'est un moyen de sécurité pour l'évacuation d'une éventuelle surchauffe et d'une surpression à l'intérieur du ballon.
- la soupape de sécurité : munie d'un manomètre et qui est destinée à évacuer la surpression dans un circuit fermé du chauffe-eau
- Les raccords de toutes sortes pour les canalisations

III.1.2.5 Le système d'appoint

L'énergie solaire ne pouvant pas assurer sur une année la totalité de la production d'eau chaude, un système d'appoint prend le relais lorsque l'énergie solaire est insuffisante. Le principe du système d'appoint est de réchauffer le tiers supérieur de la cuve de stockage. Trois systèmes d'appoints peuvent être envisagés :

- l'appoint électrique
- l'appoint instantané au moyen d'une chaudière murale au gaz
- l'appoint chaudière au gaz ou au mazout

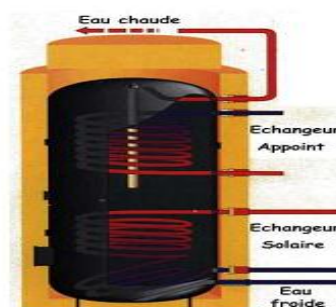


Figure 19: Système d'appoint

III.2 LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE À THERMOSIPHON À CAPTEUR PLAN VITRE

Le choix du chauffe-eau solaire dépend des besoins de chacun et du rapport qualité-prix. Pour un pays comme Madagascar, le chauffe-eau solaire à thermosiphon à capteur plan vitré répond en général aux attentes souhaitées.

Fiabilité de fonctionnement, facilité de conception, rentabilité de l'installation, tous ses points nous ont poussés à nous tourner vers la réalisation ce type de chauffe-eau.

III.2.1 Le choix du thermosiphon

On a choisi le système thermosiphon car il est totalement autonome. Son fonctionnement est simple et les risques de pannes sont faibles. Il permet d'éviter l'utilisation de l'énergie électrique à cause de l'absence de pompe et de circulateur dans l'installation. Les coûts sont donc restreints mais les performances surtout dans les régions ensoleillées restent excellentes.

III.2.2 Les éléments constitutifs du capteur plan vitré

Les éléments principaux du capteur solaire vitré que nous allons étudier et réaliser dans ce mémoire sont :

- la couverture transparente : assure l'effet de serre et réduit les pertes par convection
- l'élément absorbeur : corps opaque recouvert la plupart du temps d'un revêtement sélectif
- le fluide caloporteur : transporte l'énergie jusqu'à l'extérieur du capteur
- l'isolation thermique : arrière et latérale
- le coffre ou cadre

III.2.2.1 La couverture transparente

La couverture est l'élément par lequel se fait le maximum d'échange d'énergie. Elle joue un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur, mais elle a aussi une fonction de protection de l'absorbeur.

La particularité intéressante du vitrage est sa transparence au rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (le visible et le proche de l'infrarouge), et son opacité aux rayonnements de grandes longueurs d'onde (infrarouge éloigné) d'un émetteur tel que celui de l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : « c'est l'effet de serre ».

Les fonctions essentielles de la couverture transparente sont de: [25]

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante
- Transmettre la plupart du rayonnement reçu
- S'opposer aux déperditions thermiques par conduction et rayonnement

III.2.2.2 L'absorbeur

De tous les éléments qui constituent le capteur, l'absorbeur détient le rôle le plus important. C'est l'élément central du capteur solaire. C'est généralement un corps noir qui absorbe tous les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. Il convertit le rayonnement solaire capté en énergie calorifique.

Les absorbeurs doivent être conçus de façon à conserver dans le temps leurs caractéristiques physiques (traitement de surface, dilatations, ...), thermiques (conductivité, liaison absorbeur fluide, ...) et hydrauliques (pertes de charge, encrassement, purge, ...).

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- un bon coefficient d'absorption : aussi voisin que possible de l'unité
- un pouvoir émissif dans l'infrarouge aussi faible que possible
- une bonne conductivité thermique
- une bonne résistance à la corrosion

Le choix du matériau et le mode de construction de l'absorbeur a donc une grande influence sur la qualité du capteur.

Il existe de nombreux types d'absorbeur comme : l'absorbeur à coussin, l'absorbeur Rollbond, l'absorbeur en échelle à ailettes ... C'est ce dernier type qui nous intéresse et que nous avons choisi.

- L'absorbeur en échelle à ailettes : Constitué par l'assemblage de tube dressé verticalement, limité de haut en bas par deux tubes collectionneurs de plus grands diamètres et montés sur une plaque absorbante. La meilleure forme est celle imitant la « **boucle de Tickelman** ».

Le montage en **boucle de Tickelman** permet une égale répartition du fluide et des pertes de charges dans le capteur. Le fluide caloporteur parcourt la même distance à la même vitesse et récupère ainsi la même quantité d'énergie par unité de surface insolée [26].

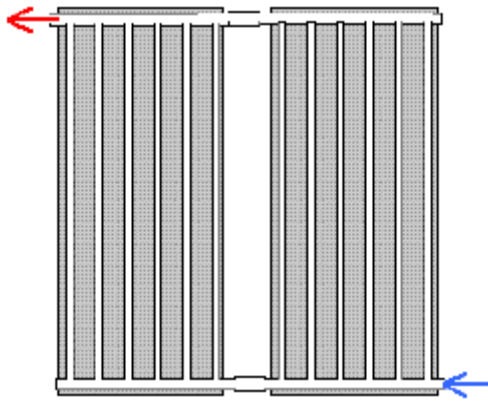


Figure 20: Absorbeur en échelle monté sur une plaque absorbante

- Pour renforcer encore plus le caractère absorbant de l'absorbeur, on applique sur ce dernier un revêtement. Il y a plusieurs types de revêtement possible comme : la peinture noire, l'oxyde de chrome, ou bien un traitement sous vide.

III.2.2.3 Le fluide caloporteur [27]

Les fluides caloporteurs sont souvent des liquides, que l'on fait circuler pour transporter, extraire et dissiper de l'énergie sous forme de chaleur, d'une source d'énergie à une charge thermique. Autrement dit, il véhicule la chaleur de l'absorbeur vers l'échangeur.

Chaque fluide caloporteur est choisi en fonction de ses propriétés physicochimiques, telles que la viscosité, la capacité thermique volumique, la chaleur latente de vaporisation ou de liquéfaction en cas de changement de phase et la conductivité thermique. Le fluide caloporteur est également sélectionné selon ses propriétés anticorrosives et son coût.

Dans les installations de chauffe-eau solaire, plusieurs types de fluide caloporteur peuvent être utilisés mais dans notre cas nous avons retenu l'utilisation de « l'eau ».

- **L'eau** : elle est considérée comme le meilleur fluide caloporteur grâce à ses propriétés, mais elle ne peut être utilisée que s'il n'y a pas de risque de baisse importante de température qui peut entraîner du gel. Ces caractéristiques sont :
 - Une basse viscosité cinématique
 - Une bonne capacité calorifique
 - Une accessibilité facile
 - Une inoffensivité à l'environnement.

On verra les valeurs de ces caractéristiques en **Annexe 2**.

III.2.2.4 L'isolation thermique

L'isolation est d'une importance capitale dans les applications thermiques. Ici, l'isolant est placé sous l'absorbeur, et sur les parties supérieures et inférieures du capteur.

Il est en général opaque au rayonnement visible et toujours opaque à l'infrarouge de grande longueur d'onde.

Vers l'avant c'est une lame d'air qui fera office d'isolant.

Pour choisir un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés :

- la masse volumique
- la température maximale d'utilisation en régime permanent
- la résistance au feu, à la putréfaction et aux rongeurs
- la sensibilité à l'humidité et son coût

III.2.2.5 Le coffre du capteur

Le coffre du capteur renferme les différents éléments actifs. Son rôle est d'assurer une protection efficace contre les agents atmosphériques à long terme, aux chocs éventuels et à l'humidité. Il doit donc être solide tout en étant le plus léger possible.

III.2.3 Les pertes thermiques mises en jeu dans le capteur [1]

Dans le chapitre précédent, on a déjà pu voir les trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et enfin le rayonnement.

Dans un capteur solaire, ces trois phénomènes sont mis en jeu simultanément. Cela est montré par la figure suivante.

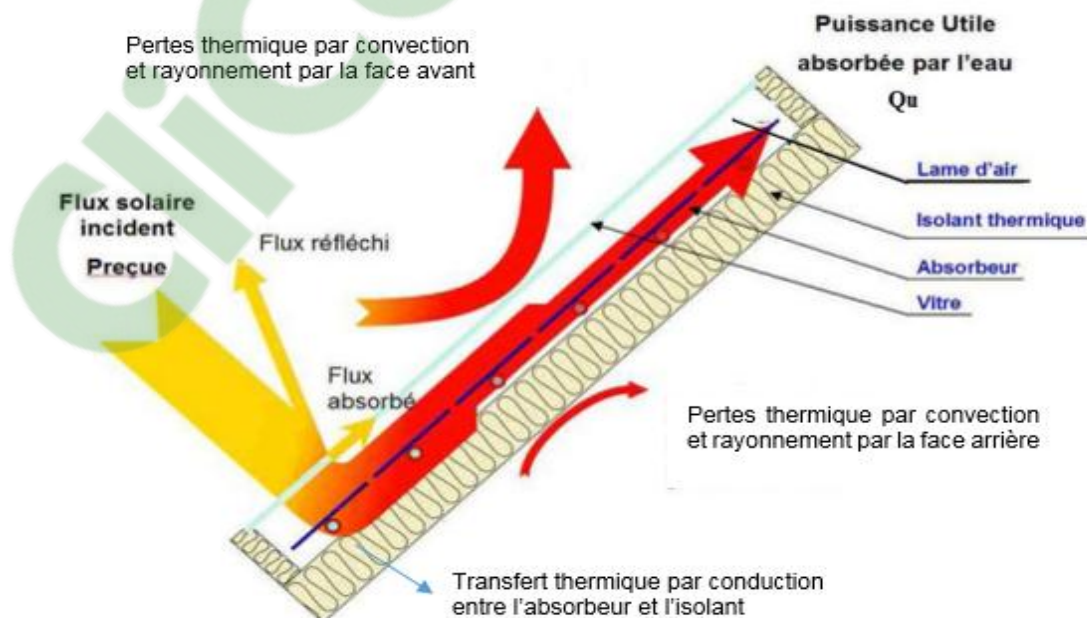


Figure 21: Les différents échanges thermiques dans le capteur plan vitré

Nous allons voir successivement les échanges thermiques au niveau de chaque partie du capteur plan vitré.

III.2.3.1 Echanges thermiques au niveau de la vitre

En plus du flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage, il existe un autre flux de chaleur incident Q_v qui sera absorbé par la vitre mais avec peu d'importance.

$$Q_v = \alpha_v \cdot S_v \cdot G^* \quad (48)$$

- **Le flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'air ambiant (indice cvam) est donné par l'équation :**

$$Q_{cvam} = h_{cvam} \cdot S_v \cdot (T_v - T_{am}) \quad (49)$$

h_{cvam} : Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant. Ce dernier est dû entièrement à la vitesse du vent

On pourra utiliser la corrélation de HOTTEL et WOERTZ pour déterminer h_{cvam} tel que :

$$h_{cvam} = 5,67 + 3,86 \cdot V_{ve} \quad (50)$$

- **Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre le vitrage et le ciel (indice rvc) :**

$$Q_{rvc} = h_{rvc} \cdot S_v \cdot (T_v - T_{ciel}) \quad (51)$$

h_{rvc} : Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel

$$h_{rvc} = \epsilon_v \cdot \sigma \cdot (T_{ciel} - T_v) \cdot (T_v^2 + T_{ciel}^2) \quad (52)$$

$$T_{ciel} = 0,0552 \cdot T_{am}^{1,5}$$

III.2.3.2 Echanges thermiques au niveau de l'absorbeur

- **Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le vitrage (indice cabv) :**

$$Q_{cabv} = S_{ab} \cdot h_{cabv} \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (53)$$

h_{cabv} : Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur. Obtenu par l'équation :

$$h_{cabv} = Nu \frac{\lambda_{air}}{e_{air}} \quad (54)$$

L'expression du nombre de Nusselt est obtenue grâce à cette relation :

$$Nu = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708(1,8 \sin(i))^{1,6}}{Ra \cdot \cos(i)} \right) \left(1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos(i)} \right) - \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos(i)}{5830} \right)^{0,666} - 1 \right] \quad (55)$$

Le nombre de RAYLEIGH : $Ra = Pr \times Gr$ (56)

- **Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage (indice rabv) :**

$$Q_{rabv} = S_{ab} \cdot h_{rabv} \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (57)$$

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage :

$$h_{rabv} = \frac{\sigma \cdot (T_{ab} + T_v) \cdot (T_{ab}^2 + T_v^2)}{\left(\frac{1}{\epsilon_{ab}} \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right) - 1} \quad (58)$$

- **Le flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolant (indice cdabis) :**

$$Q_{cdabi} = \frac{(T_{ab} - T_{is})}{\left(\frac{e_{ab}}{S_{abis} \cdot \lambda_{is}} \right) + \left(\frac{e_{is}}{S_{abis} \cdot \lambda_{ab}} \right)} + \frac{(T_{ab} - T_{isl})}{\left(\frac{e_{ab}}{S_{abisl} \cdot \lambda_{isl}} \right) + \left(\frac{e_{isl}}{S_{abisl} \cdot \lambda_{ab}} \right)} \quad (59)$$

Eventuellement, $\lambda_{is} = \lambda_{isl}$, si on a le même isolant sur la surface arrière et latérale.

- **Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau) (indice cabf) :**

$$Q_{cabf} = h_{cabf} \cdot S_{abf} \cdot (T_{ab} - T_f) \quad (60)$$

Le coefficient d'échange de chaleur par convection à l'intérieur des tubes h_{cabf} est calculé suivant la méthode de GNIELINSKI . GNIELINSKI a exploité un grand nombre de données expérimentales sur le transfert de chaleur dans les tubes et il a proposé une corrélation utilisable pour le régime de transition et pour le régime turbulent en tenant compte de la longueur d'établissement de l'écoulement. Les propriétés physiques sont calculées à la température moyenne de l'eau.

$$Nu = \frac{\Omega}{8} \left(\frac{(Re - 10^3) \cdot Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{\Omega}{8} \right)^{0,5} (Pr^{2/3} - 1)} \right) \left(1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right) \quad (61)$$

Cette corrélation est utilisable pour $0,6 < Pr < 2000$ et $2300 < Re < 10^6$. Le nombre de Reynolds est donné par :

$$Re = \rho \frac{di \cdot V}{\mu} \quad (62)$$

Pour un écoulement turbulent hydraulique lisse, le coefficient de DARCY est donné par des relations différentes, suivant le nombre de Reynolds.

- Si $2300 \leq Re \leq 10^5$, on applique **la formule de BLASIUS** :

$$\Omega = 0,0316 Re^{-0,25} \quad (63)$$

- Si $10^5 \leq Re \leq 10^6$, on applique **la formule de HERMAN** :

$$\Omega = 0,0054 + 0,3964 Re^{-0,3} \quad (64)$$

Enfin le coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur est donné par :

$$h_{cabf} = Nu \frac{\lambda_f}{di} \quad (65)$$

- **Le flux de chaleur incident reçu par l'absorbeur (indice ab) :**

$$Q_{ab} = \alpha_{ab} \cdot \tau_v \cdot S_{ab} \cdot G^* \quad (66)$$

III.2.3.3 Bilan thermique du capteur solaire plan en régime transitoire

Le bilan total qui donne le comportement thermique du capteur, et qui fournit les températures moyennes de l'absorbeur, la vitre et le fluide caloporteur, est donné par le système d'équation formé par les équations du bilan thermique de chaque partie du capteur :

- **Vitre :**

$$m_v C_{p_v} \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v \cdot S_v \cdot G^* + S_{ab}(h_{cabv} + h_{ravb})(T_{ab} - T_v) - h_{cvam} \cdot S_v(T_v - T_{am}) - h_{rvc} \cdot S_v(T_v - T_{ciel}) \quad (67)$$

- **Absorbeur :**

$$m_{ab} \cdot C_{p_{ab}} \frac{dT_{ab}}{dt} = \alpha_{ab} \cdot \tau_v \cdot S_{ab} \cdot G^* - S_{ab}(h_{cabv} + h_{ravb})(T_{ab} - T_v) - (\psi_1 + \psi_2)(T_{ab} - T_i) - h_{cabf} \cdot S_{abf}(T_{ab} - T_f) \quad (68)$$

Avec l'expression de ψ_1 et ψ_2 :

$$\psi_1 = \frac{1}{\left(\frac{L_{ab}}{S_{abis} \cdot \lambda_{is}}\right) + \left(\frac{L_{is}}{S_{abis} \cdot \lambda_{ab}}\right)} \quad (69)$$

$$\psi_2 = \frac{1}{\left(\frac{L_{ab}}{S_{abisl} \cdot \lambda_{isl}}\right) + \left(\frac{L_{isl}}{S_{abisl} \cdot \lambda_{ab}}\right)} \quad (70)$$

- **Fluide caloporteur :**

$$m_f \cdot C_{pf} \frac{dT_f}{dt} = h_{cabf} \cdot S_{abf} \cdot (T_{ab} - T_f) = Q_{cabf} \quad (71)$$

III.2.3.4 Perte global d'énergie au niveau du capteur

Les pertes thermiques au niveau du capteur sont essentiellement causées par la différence de température entre l'absorbeur et le milieu ambiant. Plus la différence de température est importante, plus les pertes le sont aussi.

Elles se divisent en trois catégories: les pertes vers l'avant du capteur, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales.

- **Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur**

Le coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur est donné par l'équation :

$$U_{av} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{rvc} + h_{cvam}}\right) + \left(\frac{1}{h_{cabv} + h_{rabv}}\right)} \quad (72)$$

- **Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur**

Grâce à une bonne isolation de l'arrière du capteur, le coefficient de perte thermique est peu important en arrière par rapport à celui de l'avant.

L'expression évaluant ce coefficient est donné par :

$$U_{ar} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \quad (73)$$

- **Coefficients de pertes latérales**

Si on compare la valeur de ce coefficient et celle du coefficient de perte arrière, on constate qu'il est plus petit. Cela est dû à une surface latérale du capteur moins importante.

Il est donné par l'équation : $U_{lat} = \left(\frac{\lambda_{isl}}{e_{isol}}\right) \left(\frac{S_{lat}}{S_c}\right) \quad (74)$

- **Coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur**

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur est la somme des trois coefficients :

$$U_L = U_{av} + U_{ar} + U_{lat} \quad (75)$$

III.2.3.5 Rendement instantané du capteur solaire [16]

L'analyse faite dans ce domaine par Hottel, Willier, Wortz et Bliss permet d'aboutir à une équation unique donnant le rendement instantané du capteur que l'on définit par le rapport suivant :

Puissance de sortie = Puissance captée – Pertes

$$\eta = \frac{\text{Puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{Flux solaire incident sur le plan du capteur}}$$

$$\eta = \frac{Q_u}{S_c \cdot G^*} \quad (76)$$

Tel que Q_u est donné par la relation :

$$Q_u = \tau_v \cdot \alpha_{ab} G^* \cdot S_{ab} = Q_{ab} \quad (77)$$

III.2.5 Le réservoir et l'échangeur

Le rôle du réservoir est déjà mentionné au paragraphe III.1.2.3. Dans notre travail, le réservoir est un ancien chauffe-eau électrique que l'on a aménagé pour recevoir l'échangeur en forme de serpent. Le serpent sera placé à l'intérieur du ballon.

III.2.6 Détermination du circuit primaire et secondaire

- Le circuit primaire de notre installation est formé par :
 - le capteur
 - l'échangeur de chaleur dans le ballon
 - les conduites qui relient le capteur à l'échangeur

Il contient quelques litres du liquide caloporteur enfermé dans un circuit étanche. Le liquide en mouvement dans les tuyaux s'échauffe au niveau du capteur et cède les calories solaires obtenues à l'eau sanitaire du ballon grâce à un échangeur. Le liquide ainsi refroidi retourne alors au capteur.

- Le circuit secondaire correspond à la partie de consommation de l'eau chaude sanitaire. Elle est constitué par :
 - l'entrée d'eau froide et d'eau chaude du réservoir
 - le Groupe de sécurité pressurisé à 3 bars qui sera installé pour éviter une surpression à l'intérieur du ballon. Cet élément sera posé seulement lorsque les séries de tests seront finis et que le chauffe-eau aura un emplacement fixe et aura été branché sur le circuit de distribution d'eau de la Jirama.

Voilà donc tous les points importants qui nous seront utiles pour la conception de notre installation solaire.

DEUXIEME PARTIE :
Etudes Expérimentales

Chapitre IV : CONCEPTION DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE

Le premier volet de ce chapitre traite du dimensionnement de notre chauffe-eau et du choix des matériaux à utiliser pour ses différentes parties.

Toutes les étapes de construction de l'installation sont décrites et illustrées dans la seconde partie.

IV.1 BESOIN EN EAU CHAUDE

Il est important de connaître les besoins des utilisateurs pour éviter un surdimensionnement ou un sous-dimensionnement de l'installation. Dans les deux cas, cela entraîne une perte pour le consommateur.

Ici, nous avons basé nos calculs sur les besoins en eau chaude d'un couple. Les besoins sanitaires sont les principales utilisations du chauffe-eau. Le besoin énergétique en eau chaude sanitaire est donc estimé par la relation :

$$Be_{ecs} = Q \times DT \times 1,16 \quad (78)$$

1,16 : Facteur de conversion de 1 kcal en Wh

Généralement, on considère qu'un ballon de 50 litres est suffisant pour le besoin journalier en eau chaude de deux personnes.

IV.2 DIMENSIONNEMENT ET CHOIX DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE

Un bon dimensionnement de l'installation et une utilisation adéquate des matériaux sont les sources d'un bon fonctionnement et d'une longévité du chauffe-eau solaire. Ils permettent d'obtenir un bon rendement sur le chauffe-eau solaire [17].

IV.2.1 La cuve de stockage

La cuve de stockage de notre chauffe-eau solaire est un ancien chauffe-eau électrique de 50 litres que l'on a modifié en fonction des besoins du chauffe-eau solaire.

Le ballon possède donc les mêmes caractéristiques que celui de chauffe-eau électrique initial, à savoir :

- une capacité de 50 litres
- une installation verticale
- une résistance blindée de 1500 W (déjà usée mais pourra être remplacé pour servir d'appoint)
- une anode sacrificielle en Magnésium
- une cuve bien calorifugée par de la mousse de polyuréthane expansé et un revêtement intérieur anticorrosion

Tableau 3: Dimension du réservoir

Dimension de la cuve	Intérieur	Extérieur
Diamètre [cm]	40	43
Hauteur [cm]	44	50

Dans la suite, nous allons donc dimensionner notre installation en fonction de cette cuve de stockage.

IV.2.2 Le capteur

Déjà mentionner plus haut, on va utiliser un capteur plan vitré car ce genre de capteur est bien adapté pour répondre à nos besoins.

IV.2.2.1 Surface du capteur

La relation utilisée pour déterminer la surface du capteur est la suivante :

$$S_c = \frac{C}{R_{at}} \quad (79)$$

Rat : c'est la valeur du Ratio définie comme étant le rapport entre la capacité de l'eau à chauffer, par la surface totale du capteur dans l'intervalle de [75 l/m²-100 l/m²].

La valeur prise dans les calculs est **Rat = 75 litres/m²**

Tableau 4: Surface du capteur

		Surface du capteur [m ²]
Contenance du réservoir [litre]	50	0,66
Ratio [litres/m ²]	75	Pour faciliter nos calculs on prendra : 0,64 Le capteur aura donc la forme d'un carré de côté = 0,8 m

IV.2.2.2 Nombre du capteur

Le nombre de capteur est obtenu grâce à cette relation :
$$N_c = \frac{c}{Rat \times s_c} \quad (80)$$

Tableau 5: Nombre du capteur

		Nombre du capteur
Contenance du réservoir [litre]	50	01
Ratio [litres/m ²]	75	
Surface du capteur [m ²]	0,64	

IV.2.2.3 Le coffre

Le coffre du capteur est fait en bois.

Tableau 6: Dimension du coffre

Côté du coffre		Fond du coffre	
Nombre de planche	04	Nombre de planche	06
Epaisseur de la planche [cm]	1,5	Epaisseur de la planche [cm]	1,5
Largeur de la planche [cm]	10	Largeur de la planche [cm]	14
Longueur de la planche [cm]	80		10
Profondeur de la planche [cm]	10	Longueur de la planche [cm]	80

• Choix du Bois

On a choisi le bois pour le matériau de construction du coffre tout simplement à cause de ses bonnes propriétés physiques et mécaniques. À résistance mécanique égale, le bois est le matériau de structure le plus léger. Ses principaux atouts sont :

- **Durabilité** : c'est un matériau qui résiste bien aux attaques du milieu extérieur. Il ne craint pas la corrosion. La règle fondamentale de durabilité demeure toujours la même : assurer la sécheresse du bois.
- **Résistances mécaniques** : il résiste bien à la compression et à la traction parallèle au fil du bois, ainsi qu'à la flexion.
- **Résistance thermique** : le bois possède une faible conductivité thermique. Ce qui est très utile pour l'isolation thermique du capteur.
- **Accessibilité** : il n'est pas difficile de trouver un bois qui répond aux caractéristiques souhaitées sur le marché.
- **Teneur en humidité** : le coffre du capteur est exposé à l'extérieur sans couverture ni abri donc la teneur en humidité H se situera entre : $20\% < H < 25\%$

IV.2.2.4 L'absorbeur

Les caractéristiques de l'absorbeur sont montrées au paragraphe III.2.2.2 du chapitre III. D'abord, on va voir l'absorbeur en échelle et ensuite la plaque absorbante.

- **Les tubes de l'absorbeur sont faits en « Cuivre ».**

Tableau 7: Dimension de l'absorbeur en échelle

		Tube horizontal 22-1	Tube verticale 12-1
Diamètre [mm]	Intérieur	20	10
	Extérieur	22	12
Epaisseur [mm]		1	1
Longueur d'un tube [m]		0,80	0,60
Nombre		02	10
Longueur total [m]		1,60	06

- **Choix du Cuivre**

Le Cuivre est sans aucun doute le matériau idéal pour la construction de l'absorbeur. Ses principaux atouts sur les autres matériaux sont :

- **Conductivité thermique** : après l'argent, c'est le cuivre qui possède la valeur la plus élevée du coefficient de conductivité thermique. Avec une conductivité thermique de l'ordre de 386 W/m. °C. C'est le matériau le mieux adapté pour une installation dont le but est de capter et de transférer de l'énergie thermique.
- **Résistance à la corrosion** : le cuivre résiste à la corrosion par l'eau douce et la vapeur ainsi qu'aux solutions salines, aux minéraux non oxydants, aux acides organiques et aux solutions caustiques. La résistance du cuivre à la corrosion vient de la formation d'un film adhérent à la surface du matériau.
Ces films sont relativement imperméables à la corrosion et protègent ainsi le métal de base contre des attaques ultérieures.
- **Malléabilité et plasticité** : c'est un matériau extrêmement ductile. On peut le cintrer à froid. Ils se prêtent bien aussi à la déformation à chaud.
- **Soudabilité** : le cuivre se soude bien, qu'il s'agisse de soudure autogène, de brasage ou de soudage à l'étain.
- **Faible dilatation thermique** : il se dilate de 1,7 mm par mètre pour 100 ° C, ce qui est très faible mais néanmoins non négligeable.

- **Ses propriétés radiatives** : Elles sont très intéressantes car c'est l'absorbeur qui reçoit la plus grande part de rayonnement solaire. Sur la figure 9 du chapitre II, nous relevons les propriétés du cuivre par rapport au rayonnement.

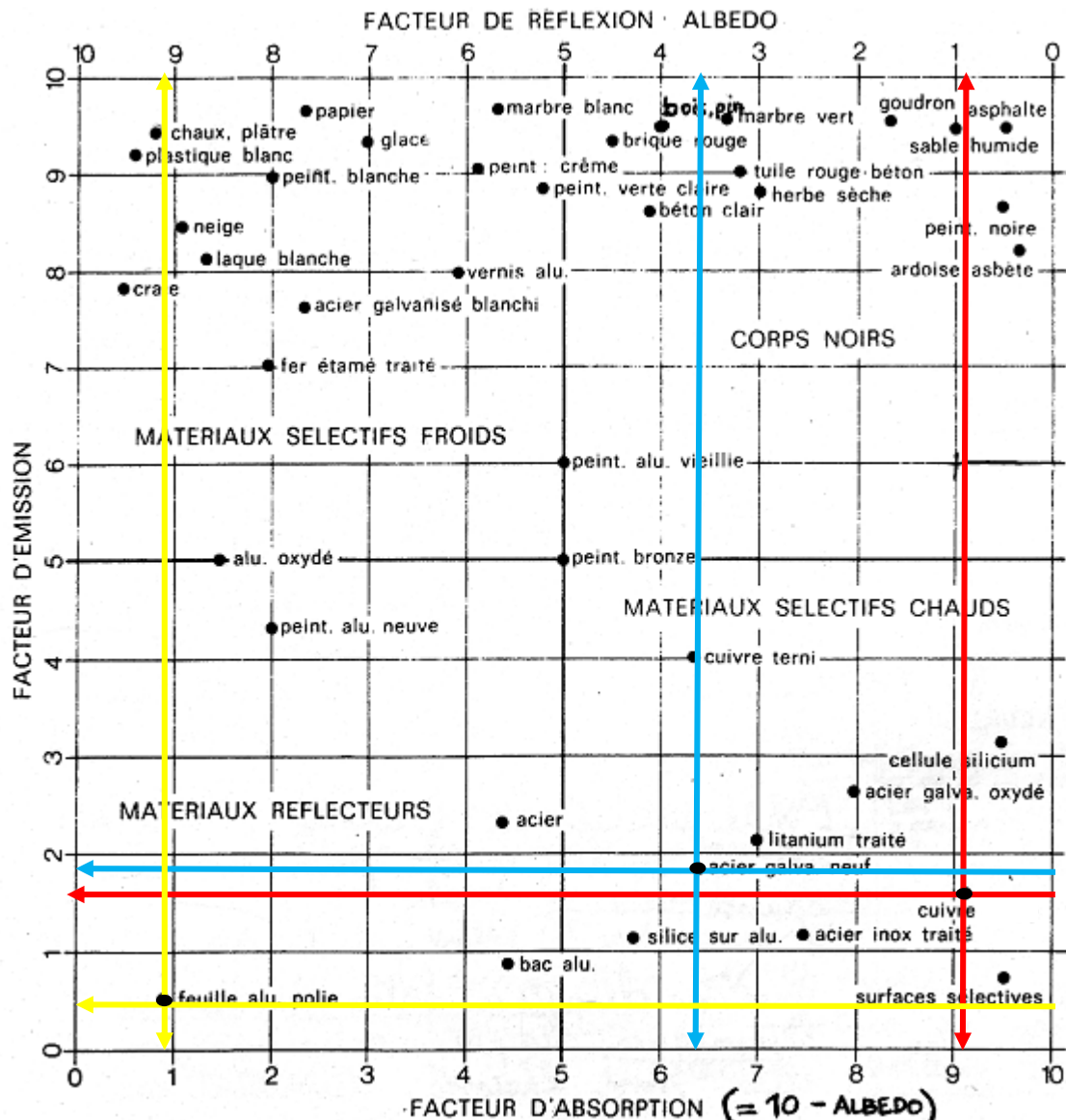


Figure 22: Propriétés radiatives des matériaux utilisés

- **Interprétation de la figure** : Les valeurs des facteurs d'absorption, d'émission et de réflexion du cuivre sont montrées par « **les flèches rouges** » de la figure ci-dessus.

Tableau 8: Propriétés radiatives du cuivre

CUIVRE		
Facteur d'absorption	Facteur d'émission	Facteur de réflexion
0,9	0,17	0,09

Avec un facteur d'absorption proche de l'unité (≈ 1), et un facteur d'émission et de réflexion proche de 0, le cuivre absorbe presque totalement le rayonnement qui le frappe et n'en émet et n'en réfléchit que très peu. C'est donc un matériau de premier choix pour l'absorbeur, car il permet de capter le maximum du rayonnement incident et de le transmettre.

- **La plaque de l'absorbeur : Elle est réalisée en « acier galvanisé ».**

Tableau 9: Dimension de la plaque absorbante

	Plaque absorbante
Epaisseur [mm]	0,5
Longueur [m]	0,68
Largeur [m]	0,58
Surface [m ²]	0,3944

- **Choix de l'acier galvanisé**

Le choix de l'acier galvanisé est basé sur :

- **Les propriétés radiatives** : On va utiliser la figure 22 pour montrer les propriétés radiatives de l'acier galvanisé. Elles sont données par « **les flèches en bleu ciel** ».

Tableau 10: Propriétés radiatives de l'acier galvanisé

ACIER GALVANISE		
Facteur d'absorption	Facteur d'émission	Facteur de réflexion
0,64	0,19	0,38

L'acier galvanisé possède aussi de bonne propriété radiative.

- **La résistance à la corrosion** : elle est extrêmement longtemps. Dans des conditions normales, la galvanisation protège l'acier de la corrosion pour plus de 40 ans. La durée de protection qu'il fournit est plus de 25 ans, même dans les conditions difficiles (aux conditions d'industrie et au bord de la mer). L'acier galvanisé est dure et résistante aux impacts et à la détérioration.
- Il peut être recyclé et réutilisé facilement et sa production n'endommage pas l'environnement

- **Traitement de surface :**

Pour rendre l'absorbeur plus performant, on va le peindre avec de la peinture mate noire du commerce qui permet d'obtenir un coefficient d'absorption de **0,95**. Même si le degré d'émission reste encore assez élevé **0,85**, le vitrage va bloquer le rayonnement émis par l'absorbeur pour renforcer l'effet de serre.

IV.2.2.5 L'isolation du capteur

Les isolations de notre capteur sont faites avec du « **Carton ondulé** ». Une surface réfléchissante a été aussi mise en place en dessous de l'absorbeur. Les parties des isolants en surface ainsi que la surface réfléchissante sont en « **carton recouvert par du papier Aluminium** ».

Tableau 11: Dimension de l'isolation

	Isolation sur les côtés supérieurs et inférieurs	Isolation au-dessous de l'absorbeur	Isolation au-dessus de l'absorbeur
Epaisseur [cm]	2,5	5	—
Longueur	77	77	—
Profondeur [cm]	10	—	—
Surface [m ²]	—	0,5544	—
Epaisseur lame d'air [cm]	—	1	2

- **Choix du carton**

Le carton est un matériau facile à travailler, technique, bon marché, écologique car issu en grande partie du recyclage et peut parfaitement jouer le rôle d'un bon isolant. Les caractéristiques du carton ondulé qui nous ont poussées à l'utiliser sont :

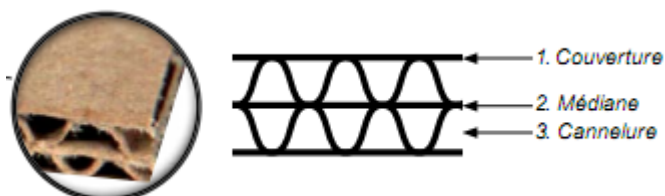


Figure 23: Schéma d'un carton à double cannelure

- **La forme en sandwich du matériau** : c'est un matériau constitué par une ou plusieurs feuilles de papier cannelé collées sur une ou plusieurs feuilles de papier plan. On peut le définir en trois parties distinctes :
 - La couverture : c'est la ou les feuilles planes extérieures. Elles participent à la résistance mécanique et thermique de l'emballage.
 - La médiane : c'est la feuille plane intérieure qui sépare les différentes feuilles cannelées.
 - La cannelure : c'est la feuille cannelée qui accroît la rigidité, la flexion, l'élasticité à l'écrasement et la résistance à la compression de l'ensemble.
- **Propriété thermique du carton** : avec une conductivité thermique de $0,07 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$, on peut dire que le carton est une solution des plus rentables au niveau économique, écologique mais aussi au niveau de l'efficacité de l'isolation.
- **Durabilité** : c'est un matériau qui a une longue durée de vie.

- **Choix de la feuille d'aluminium**

La surface réfléchissante en dessous de l'absorbeur ainsi que les faces supérieures des isolants exposés au rayonnement ont été recouvertes par du papier l'aluminium. Le but est de refléter le maximum de rayonnement en direction de l'absorbeur et bien sûr d'en absorber le minimum.

On va encore une fois se rapporter à la figure 22, mais cette fois ci, nous allons suivre « **les flèches jaunes** » de cette figure.

Tableau 12: Propriétés radiatives de la feuille d'aluminium

FEUILLE D'ALUMINIUM		
Facteur d'absorption	Facteur d'émission	Facteur de réflexion
0,09	0,05	0,91

La valeur du facteur de réflexion est très élevée (0,91), proche de l'unité, et les facteurs d'absorption et d'émission sont très faibles, cela implique que la feuille d'aluminium remplit très bien sa fonction de réflecteur. Elle réfléchit presque la totalité du rayonnement incident, n'absorbe et n'émet que très faiblement.

IV.2.2.6 La couverture transparente

La couverture du capteur est faite avec du « **verre ordinaire** ».

Tableau 13: Dimension du vitrage

	Couverture transparente
Epaisseur [mm]	3
Longueur [m]	0,80
Largeur [m]	0,80
Surface [m ²]	0,64

- **Choix du verre**

Le verre a été choisi comme couverture transparente du capteur à cause de ses propriétés physiques mais surtout à cause de son comportement face au rayonnement (effet de serre).

Le verre se distingue par sa grande perméabilité au rayonnement dans le spectre du solaire :

- **Transparence** : le verre à vitre a un facteur de transparence égal à environ 0,87, c'est à dire que 87 % du rayonnement solaire le traverse. Le verre est surtout transparent au rayonnement de longueur d'onde inférieure à 2,5 μm telle que les UV, le visible et le proche infrarouge.
- **Opaque** au rayonnement infrarouge lointain réémis par l'absorbeur : l'absorbeur émettra un rayonnement de longueur d'onde supérieur ou égal à 4 μm . L'énergie solaire se trouvera donc piégé dans le capteur, et celui-ci aura tendance à s'échauffer.
- Le verre a une durée de vie plus longue comparé aux autres matériaux pouvant faire office de couverture transparente. Il peut durer environ 40 ans et même plus s'il n'est pas soumis à des chocs pouvant provoquer leur casse. Il résiste bien aux intempéries.
- C'est aussi un matériau accessible facilement sur le marché.

IV.2.2.7 Plan et coupe des éléments du chauffe-eau solaire

Les plans et coupes présentés ici ont été dessinés sur « **AUTOCAD** ». Les dimensions des différentes parties sont indiquées en marge.

Le plan du Capteur :

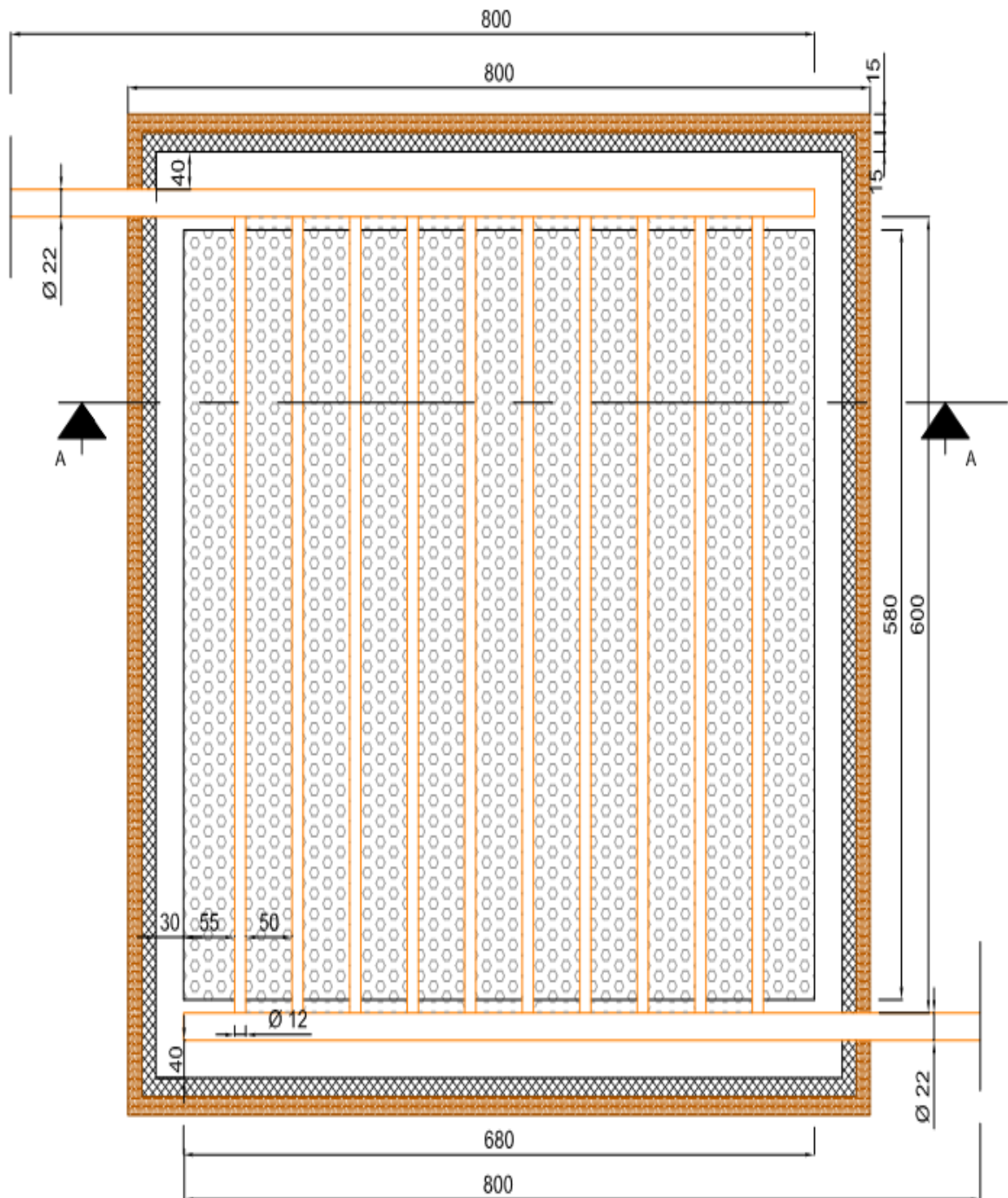


Figure 24: Plan du capteur

La figure qui suit représente une coupe du capteur suivant le trait de coupe du plan ci-dessus.

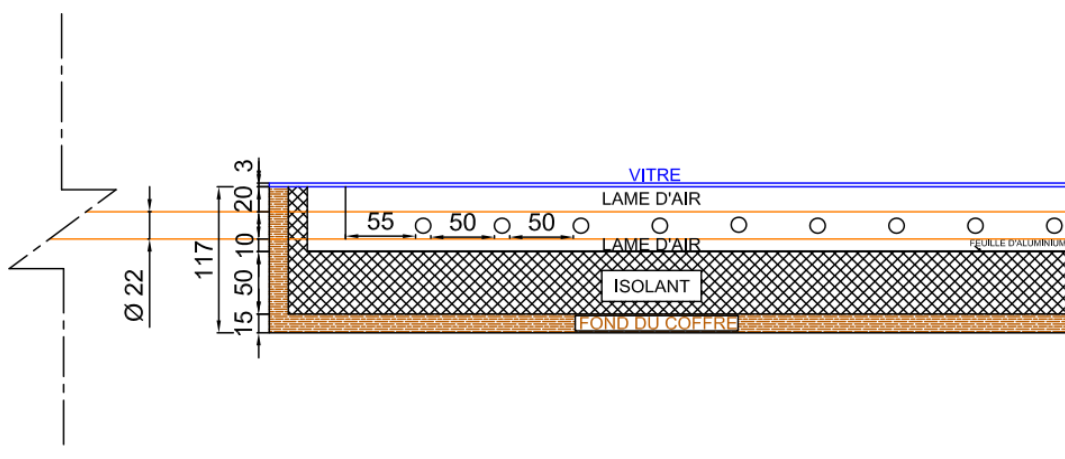


Figure 25: Coupe du capteur plan vitré

IV.2.3 L'échangeur

C'est un échangeur en serpentin que nous avons utilisé. Le matériau de construction de l'échangeur est « **le cuivre** » (tube de cuivre 22-1). Ses dimensions sont données dans ce tableau.

Tableau 14: Dimension du serpentin

Echangeur	Formule	Valeur
Surface [m ²]	$S_{ech} = \frac{S_c \cdot N_c}{3}$	0,213
Longueur [m]	$L_{ech} = \frac{S_{ech}}{\pi(D_i + e)}$	3,22
Nombre de spire	$N_s = \frac{L_{ech}}{\pi D_s}$	4
Hauteur [cm]	$H_{ech} = (2N_s - 1)(D_i + e)$	14,7
Longueur du tuyau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur dans le réservoir [cm]	—	30
Diamètre [cm]	—	25

Voici la figure détaillée de l'échangeur dans le réservoir. Cette figure est également fait sur le logiciel de dessin AUTOCAD.

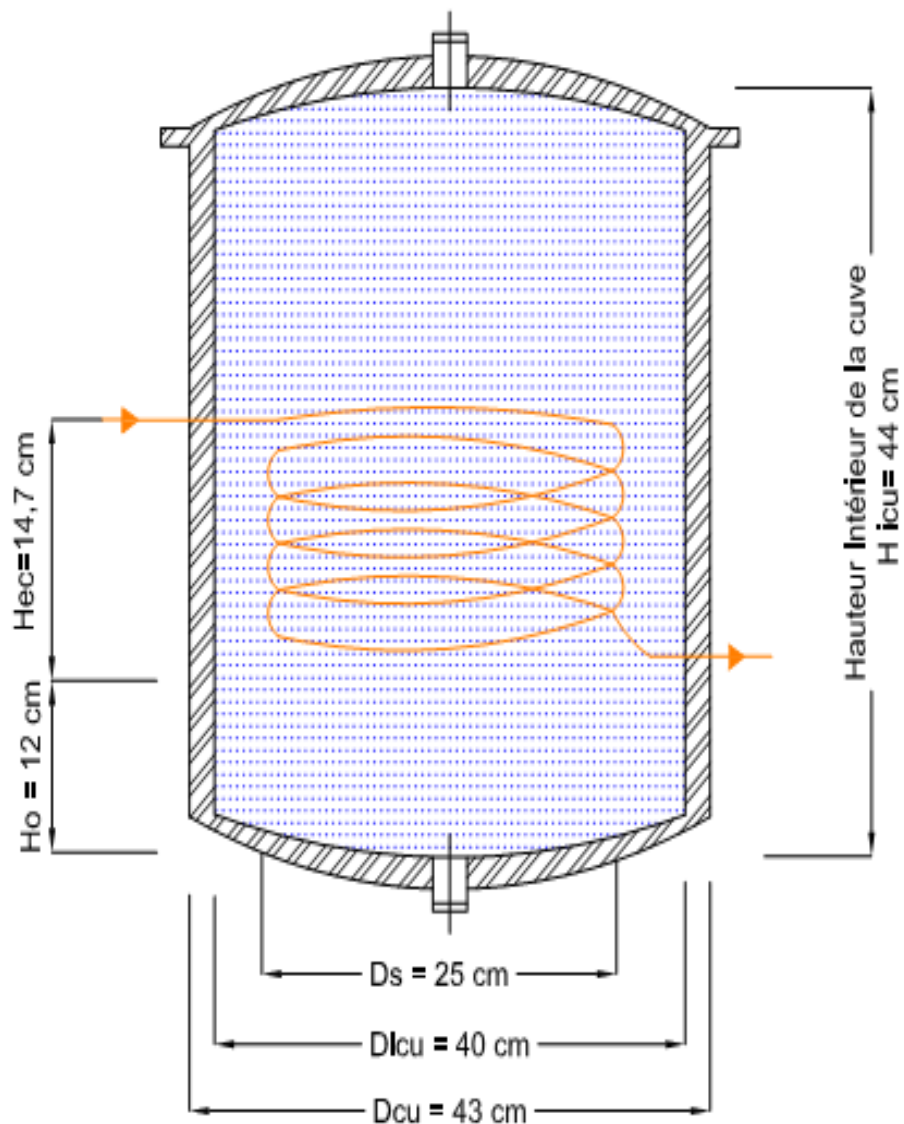


Figure 26: Dimension et forme de l'échangeur

IV.2.4 Dimension des tuyaux de conduite du circuit primaire

Ce sont les tuyaux qui relient le capteur à l'échangeur. Ils transportent le liquide caloporteur dans le circuit bouclé.

Ces tuyaux sont calorifugé et protégé par de l'ARMAFLEX.

Tableau 15: Dimension des tuyaux de conduite du circuit primaire

	Conduite en cuivre (à la sortie supérieure du capteur)	Conduite en PPR (retour du fluide caloporteur vers le bas du capteur)
Diamètre [mm]	22-1	25
Longueur [m]	1,20	1,30

- **Choix du cuivre**

On a déjà vu les propriétés du cuivre au paragraphe **IV.2.2.4**. C'est la grande conductivité thermique et la résistance à la corrosion du cuivre qui nous intéresse dans cette partie, car la conduite doit pouvoir transporter les calories reçues dans le capteur sans trop de perte de charge et résister à la corrosion.

- **Choix du PPR : Polypropylène Réticulé**

Pour le tuyau de retour du liquide caloporteur du circuit primaire vers le capteur, le PPR est le matériau qui nous semblait être le mieux adapté. En voici les raisons :

- **Neutralité** : c'est un matériau totalement neutre à toute agression quelle que soit sa nature, gazeuse ou liquide, donc non corrosif
- **Absence de corrosion** : les tuyaux de PPR résistent à l'eau dure et aussi aux substances acides et alcalines (valeurs du pH supportée : entre 1 et 14)
- **Absence d'entartrage** : la surface interne du tube est très lisse ce qui évite tout risque d'entartrage
- **Déperdition calorifique limitée** : le PPR est un mauvais conducteur de chaleur et constitue donc un bon isolant thermique
- **Faible perte de charge** : ils ont des pertes de charge réduites car leur surface est lisse et ne s'entartre pas
- **Durée de vie** : les tuyaux en PPR ont une durée de vie supérieure à 20 ans en fonction de la température et de la pression de service
- Le tuyau en PPR résiste à une pression de 10 Bars et une température maximum d'utilisation de 90 ° C.

IV.3 REALISATION DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEUR PLAN VITRE À THERMOSIPHON

Après avoir obtenu tous les dimensions et identifié les matériaux utiles pour les différentes parties de notre chauffe-eau solaire, on va maintenant passer à la réalisation qui va être illustrée à l'aide de photos prises pendant le montage de l'installation.

IV.3.1 Le capteur

Le capteur du chauffe-eau solaire a été entièrement réalisé. Toutes les mesures données au paragraphe IV.2.2 ont été respectées.

IV.3.1.1 Le coffre

Pour pouvoir recevoir le capteur du chauffe-eau solaire, le coffre est le premier élément construit. La réalisation du coffre en bois est relativement facile, l'ensemble des opérations à durée environ 5 heures. On a procédé comme suit :

- Mesure et découpe des planches : on a découpé les planches de bois pour avoir les quatre côtés du coffre et ceux qui ont servi au fond.



Photo 1: Mesure et découpe des planches du coffre

- Perçage sur les extrémités et mise en place des vis à bois pour renforcer le cadre: cela c'est fait à l'aide d'une perceuse électrique



Photo 2: Perçage et mis en place des vis à bois

- Enfin, on a procédé à la construction du fond du coffre, constitué par l'assemblage de plusieurs planches clouées sur les côtés du cadre.



Photo 3: Coffre du Capteur

- La construction du support du coffre se résume au sciage et à la soudure des fers cornières L de 25 mm et des fers rond $\varnothing 8$ mm pour les tendeurs. La détermination de l'angle d'inclinaison du capteur est détaillée au chapitre suivant. La photo suivante montre le coffre du capteur sur son support incliné.



Photo 4: Coffre incliné sur son support

IV.3.1.2 L'absorbeur en échelle sur la plaque absorbante

L'opération s'est déroulée comme suit :

- Découpage des tuyaux de cuivre
- Perçage des tuyaux collectionneurs 22-1 aux dimensions des tuyaux de 12-1



Photo 5: Trous de réception des tuyaux verticaux 12-1

- Brasage des tuyaux de diamètre 12-1 en parallèle dans les trous des tuyaux de collection pour avoir la forme de l'échelle.



Photo 6: Forme en échelle de l'absorbeur

- Fixation de l'absorbeur en échelle sur la plaque absorbante avec du fil recuit.

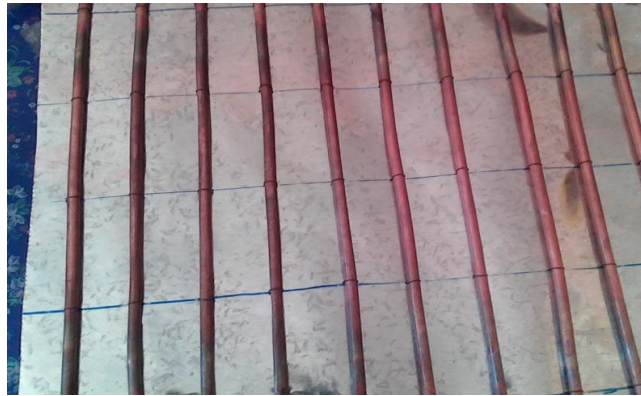


Photo 7: Fixation de l'absorbeur sur la plaque absorbante

- Enfin, on a peint la surface de l'ensemble c'est-à-dire l'absorbeur en échelle et la plaque absorbante avec une bombe aérosol de couleur noire mate résistante aux hautes températures en guise de traitement de surface.

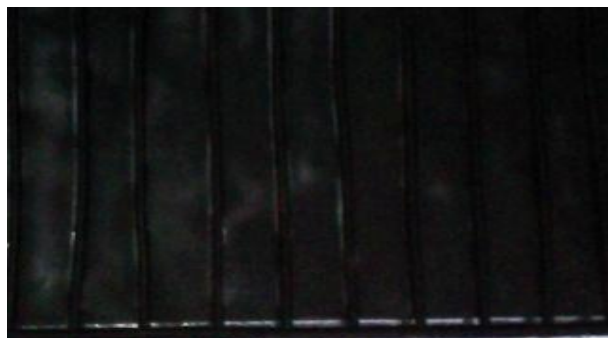


Photo 8: Absorbeur peint en noir mate

La réalisation de l'absorbeur du capteur a nécessité beaucoup de matériel et de minutie. Cette partie a duré une journée entière.

IV.3.1.3 La surface réfléchissante et les isolants

Ces éléments sont aussi très importants pour le bon rendement du système.

- La surface réfléchissante :

Constituée par l'assemblage à la colle à bois de deux feuilles de carton ondulé à double cannelure recouvertes par du papier aluminium. Elle a été faite de façon à épouser parfaitement l'intérieur du cadre du capteur.



Photo 9: Surface réfléchissante en dessous du capteur

- Les isolations sur les côtés supérieurs et inférieurs sont faites par le collage de 3 feuilles de carton à double cannelures et recouvertes également par du papier aluminium.



Photo 10: Isolation des côtés inférieurs et supérieurs du capteur

- L'isolation sous l'absorbeur : On a découpé le même carton en fine lamelle pour tapisser le fond du coffre sur une épaisseur de 2 cm. Ensuite, pour éviter que les morceaux de carton ne se tassent dans la partie basse du coffre, on y a mis une séparation en bois à mi-hauteur. Pour renforcer encore plus l'isolation thermique, on a disposé au-dessus une autre couche de carton.



Photo 11: Isolation du bas du coffre

- Enfin on a mis en place la surface réfléchissante au-dessus de l'isolation.



Photo 12: L'isolation et la surface absorbante

La réalisation de cette partie a nécessité environ 4 heures.

IV.3.1.4 Mise en place de l'absorbeur dans le coffre

Après avoir bien disposé toute l'isolation du coffre, l'absorbeur a été posé. Au préalable, nous avons construit les deux points d'entrée et de sortie de l'absorbeur dans le coffre. Une ouverture sur le côté supérieur gauche et une autre sur le côté inférieur droit du capteur.

Ensuite le tout est fixé pour éviter tout mouvement des constituants interne du capteur.

Enfin on installe la couverture transparente permettant de reproduire l'effet de serre indispensable au bon fonctionnement du capteur.



Photo 13: Mise en place des éléments du capteur dans le coffre

IV.3.2 Réalisation du réservoir et l'échangeur

Ces deux parties sont reliées entre elles car l'échangeur est à intégrer dans le réservoir.

IV.3.2.1 Le réservoir

Pour la construction du réservoir, on a tout d'abord enlevé le couvercle supérieur du chauffe-eau électrique. Cela s'est fait facilement.

Ensuite, à l'aide d'une meule électrique, on a découpé la partie haute de la cuve intérieure du chauffe-eau. Ce découpage a été nécessaire, car on va introduire le serpentin, qui va servir d'échangeur, à l'intérieur de ce réservoir.

Evidemment, on a nettoyé l'intérieur de la cuve car il y avait la présence de tartre et un petit peu de rouille.



Photo 14: Découpage du chauffe-eau électrique

Le réservoir est destiné à être placé en hauteur. Donc, nous avons procédé à la construction d'un support métallique.

La construction de ce support se résume au découpage des tubes d'acier et de fer cornière, à la soudure de l'ensemble et à la peinture de ce dernier.



Photo 15: Support du réservoir

IV.3.2.2 L'échangeur

On a donné au tuyau de cuivre 22-1 la forme d'un serpentín de diamètre extérieur 25 cm. A l'aide d'une cintruse spéciale et par le chauffage au chalumeau du tuyau, on a pu obtenir la forme et le diamètre souhaité. Il a fallu bien sûr mettre du sable fin dans le tube avant le cintrage pour éviter les coudes trop prononcés qui pourraient empêcher la bonne circulation du liquide dans le circuit primaire.



Photo 16: Réalisation de l'échangeur

IV.3.2.3 Mise en place du serpentin dans le réservoir :

C'était une étape délicate et assez difficile à réaliser, car il a fallu percer le réservoir sur les ses deux côtés et y faire sortir les tuyaux de raccordement du serpentin vers l'extérieur. Tout cela en évitant de plier l'échangeur. Mais après une bonne heure de travail, le résultat a été satisfaisant.



Photo 17: Mise en place de l'échangeur dans le réservoir

IV.3.3 Raccordement du circuit primaire de l'ensemble

Les points de raccordement du circuit primaire ont été faits par soudure brasage. On a bien sûr utilisé des accessoires de plomberie en cuivre tels que les raccords, les manchons, le robinet d'arrêt,... La soudure de ses parties rend le capteur et le ballon unie de manière permanente.

Pour l'isolation des tuyaux, on a recouvert le tout par de l'ARMAFLEX.

Enfin pour solidariser l'ensemble, et pour pouvoir déplacer le chauffe-eau solaire, un tendeur en fer cornière est placé sur la partie basse du support du capteur et du ballon. De cette façon l'ensemble est unifié. Cette opération permet d'éviter une éventuelle rupture des tuyaux du circuit primaires si l'on déplace le chauffe-eau solaire.

IV.3.4 Résultat final

Après quelques journées de travail, le chauffe-eau solaire à capteur plan vitré à enfin pris forme. Pour pouvoir donner une mesure à l'ensemble, on l'a assimilé à une forme cubique ayant les dimensions suivantes :

Tableau 16: Dimension du chauffe-eau solaire

Chauffe-eau solaire à capteur plan vitré en thermosiphon		
Hauteur [m]	Longueur [m]	Largeur [m]
1,55	1,30	1,10

Voici le résultat final de la réalisation.



Photo 18: Le Chauffe-eau solaire à thermosiphon à capteur plan vitré

Chapitre V : ETUDE EXPERIMENTALE DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE

Après la réalisation, l'étude expérimentale du chauffe-eau solaire constitue la dernière partie de notre travail.

Dans un premier temps, on a estimé le gisement solaire de la région de l'implantation du dispositif. Nous avons ensuite déterminé l'angle d'inclinaison et l'orientation optimale du capteur. Le diagramme solaire pour les périodes d'expérimentation du chauffe-eau a été également construit, diagramme qui a servi par la suite à l'analyse de l'effet de masque.

Les séries de test de fonctionnement de l'installation sont exposées. Les résultats obtenus sont interprétés et commentés.

Enfin, une étude économique du chauffe-eau solaire est réalisée et dressée dans la dernière partie de ce chapitre,

V.1 ESTIMATION DU GISEMENT SOLAIRE

V.1.1 La région d'étude

De nombreuses étapes sont nécessaires pour pouvoir estimer le potentiel solaire d'une région. Il s'agit ici d'une estimation, les valeurs exactes ne pourront être obtenues que par l'intermédiaire de mesure prises sur le site.

La région d'étude est celle d'ANALAMANGA plus particulièrement celle d'IVATO – ANTANANARIVO.

On a choisi ce site tout simplement car nous habitons dans cette partie de la ville et c'est bien sûr dans cette région que nous allons utiliser et expérimenter notre chauffe-eau solaire.

Grâce au logiciel RETScreen, qui est un logiciel d'analyse de projets d'énergies propres basé sur Excel, on peut avoir les données géographiques et climatiques du site considéré.

Les données inscrites dans RETScreen sont bien sûr des moyennes des données réelles prises sur le terrain pendant un temps donné. Cependant, elles peuvent quand même être utilisées et prises comme référence de calcul pour les différents projets liés au solaire.

Pays - région
Province / État
Lieu des données climatiques
Latitude
Longitude
Élévation
Température extérieure de calcul de chauffage
Température extérieure de calcul de climatisation
Amplitude des températures du sol

Madagascar

Antananarivo/Ivato

Voir carte

°N

-18,8

°E

47,5

Source

m

1276

Sol

°C

8,9

Sol

°C

28,2

Sol

°C

13,9

NASA

Mois	Température de l'air	Humidité relative	Rayonnement solaire quotidien - horizontal	Pression atmosphérique	Vitesse du vent	Température du sol	Degrés-jours de chauffage 18 °C	Degrés-jours de climatisation 10 °C
	°C	%	kWh/m²/j	kPa	m/s	°C	°C-j	°C-j
Janvier	20,5	79,0%	5,22	89,7	3,1	23,8	0	326
Février	20,7	79,8%	5,08	89,6	3,1	22,8	0	300
Mars	20,1	79,5%	4,77	89,8	3,1	22,3	0	313
Avril	19,2	77,0%	4,33	89,9	2,8	21,3	0	276
Mai	16,8	78,3%	3,81	90,1	2,5	19,6	37	211
Juin	14,6	78,2%	3,48	90,3	2,5	17,4	102	138
Juillet	14,1	76,5%	3,51	90,4	3,1	17,3	121	127
Août	14,5	74,1%	4,18	90,4	3,4	18,9	109	140
Septembre	16,3	70,2%	5,10	90,2	3,4	22,4	51	189
Octobre	18,5	68,8%	5,68	90,1	3,4	24,9	0	264
Novembre	19,7	71,1%	5,65	90,0	3,1	26,3	0	291
Décembre	20,2	77,6%	5,42	89,8	2,8	25,5	0	316
Annuel	17,9	75,8%	4,68	90,0	3,0	21,9	420	2 889
Source	Sol	Sol	Sol	NASA	Sol	NASA	Sol	Sol

Mesuré à

m

10

0

Figure 27: Données géographiques et climatiques de la région d'IVATO par RETScreen

Les données dont on a besoin dans RETScreen sont :

- La latitude, la longitude et l'altitude
- La température de l'air
- L'humidité relative
- Le rayonnement solaire quotidien à l'horizontale

V.1.2 Le modèle de Perrin de Brichambaut

Nous allons utiliser ce modèle pour estimer l'ensoleillement journalier d'un plan incliné au temps donné, d'un lieu. Il est détaillé dans le **paragraphe I.3** du premier chapitre.

V.1.2.1 Schéma fonctionnel du modèle de Perrin de Brichambaut

Le déroulement de toutes les opérations est montré par l'intermédiaire de cet organigramme. Notre but est d'obtenir l'irradiation solaire globale journalière du site.

Toutes les relations qui permettent de déterminer les valeurs de ces calculs sont données au chapitre I. Et tous nos calculs ont été effectués sur « **EXCEL** ».

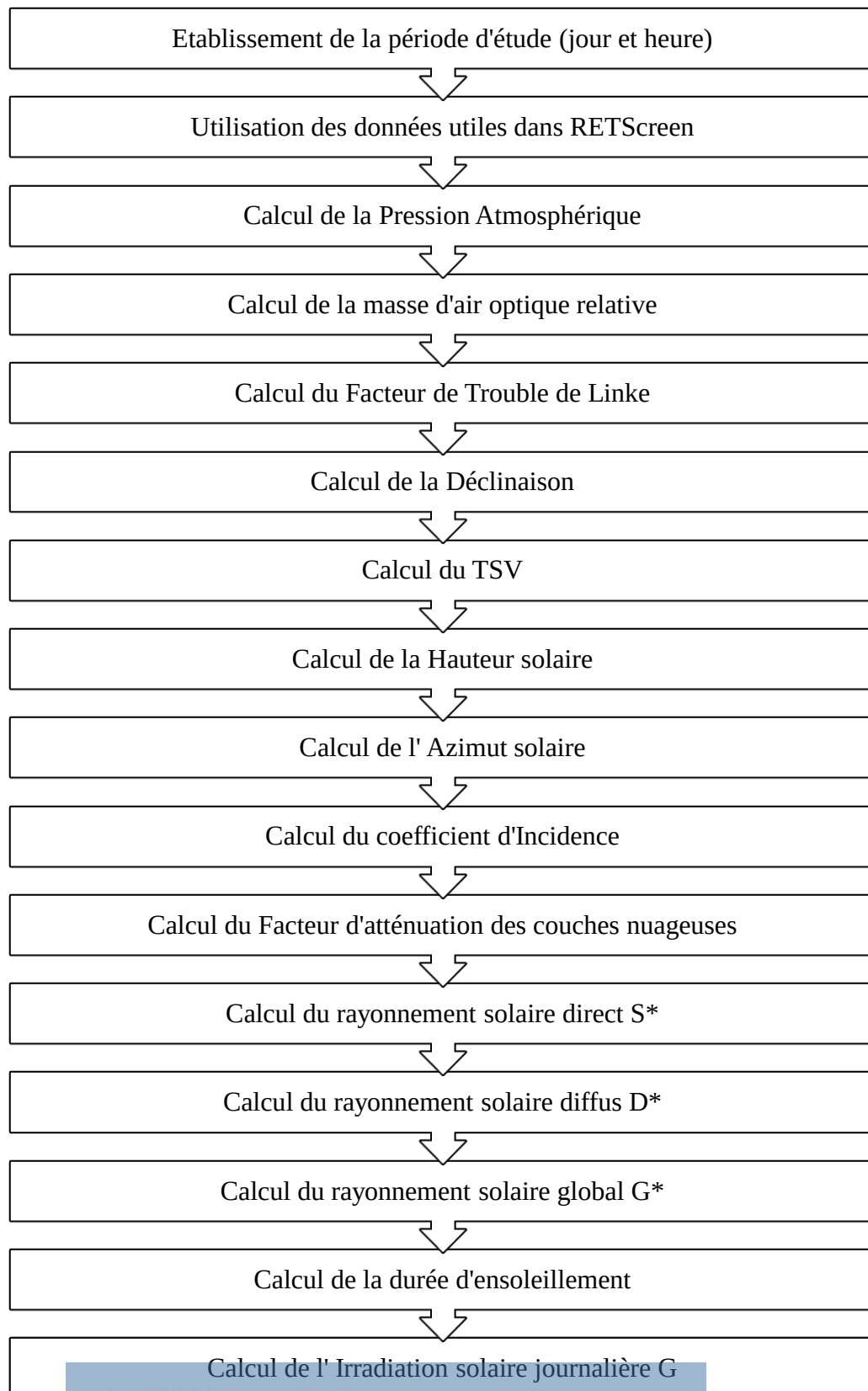


Figure 28: Schéma fonctionnel du modèle de Perrin de Brichambaut

- **Utilisation de l'organigramme**

- L'organigramme ci-dessus est utilisé pour obtenir la valeur de l'irradiation solaire globale à l'horizontale d'un temps donné, par exemple à 12 h temps légal.
- D'abord, nous prenons un jour, puis on va calculer l'irradiation pendant toutes les heures de la journée.
- Nous allons donc obtenir, la valeur de l'irradiation pour un jour.
- On va considérer un mois de l'année, et répéter cette opération pour chaque jour du mois.
- Ensuite, en faisant la moyenne des irradiances reçues tous les jours, nous allons obtenir l'irradiation solaire moyenne globale à l'horizontale du mois considéré.
- Enfin, on va appliquer ce processus pour obtenir l'irradiation solaire de tous les mois de l'année.

- **Facteur important dans nos calculs de l'irradiation**

Les principaux facteurs sont :

- La durée d'ensoleillement : Ici nous avons pris cette durée égale à la durée du jour
- Le facteur d'atténuation des couches nuageuses : Pour calculer ce facteur, on a établi le degré de nébulosité moyenne pour chaque mois de l'année. On a obtenu ses valeurs sur l'observation annuelle des conditions nuageuses à Antananarivo.

Tableau 17: Facteur d'atténuation des couches nuageuses moyen de chaque mois

Mois	Degré de nébulosité N	Facteur d'atténuation des couches nuageuses Kc
Janvier	5	0,848
Février	5	0,848
Mars	5	0,848
Avril	3	0,973
Mai	2	0,993
Juin	4	0,928
Juillet	4	0,928
Août	3	0,973
Septembre	2	0,993
Octobre	2	0,993
Novembre	5	0,848
Décembre	5	0,848

V.1.3 Gisement solaire annuelle d'Ivato – Antananarivo

Grâce à l'utilisation du modèle de Perrin de Brichambaut, nous avons pu estimer l'irradiation solaire globale à l'horizontale de la région d'étude.

Tableau 18: Gisement solaire d'Ivato

	Irradiation solaire globale moyen à l'horizontale par le modèle [kWh/m ² /jr]	Irradiation solaire globale moyen à l'horizontale par RETScreen [kWh/m ² /jr]
Janvier	5,39774	5,22
Février	5,08977	5,08
Mars	4,51894	4,77
Avril	4,31259	4,33
Mai	3,71999	3,81
Juin	3,17932	3,48
Juillet	3,34271	3,51
Août	4,11507	4,18
Septembre	4,99183	5,10
Octobre	5,74214	5,68
Novembre	5,84707	5,65
Décembre	5,48883	5,42

On peut constater dans ce tableau que les valeurs de l'irradiation solaire globale à l'horizontale données par RETScreen sont plus ou moins égales aux valeurs obtenues par le modèle de Perrin de BRICHAMBAUT. Ce modèle permet donc d'avoir une estimation de l'irradiation solaire valable et utilisable pour nos calculs.

V.1.4 Inclinaison optimale du capteur

Pour calculer l'inclinaison optimale du capteur du chauffe-eau solaire, nous avons étudié l'irradiation solaire moyenne qu'il reçoit pendant l'année pour une inclinaison variable.

On a adopté le même modèle de calculs que celui utilisé précédemment, mais en faisant varier l'angle d'inclinaison de $\{i = 0^\circ ; 20^\circ ; 25^\circ ; 30^\circ ; 35^\circ ; 40^\circ ; 45^\circ ; 50^\circ\}$. Cependant, on a gardé une orientation fixe $\gamma = 0^\circ$, c'est-à-dire plein Nord.

Lorsque cet angle d'inclinaison varie, le coefficient d'incidence, le rayonnement global et l'irradiation solaire globale varient également.

On obtient donc l'irradiation solaire globale en fonction de l'inclinaison du capteur.

Tableau 19: Irradiation solaire reçue en fonction de l'inclinaison du capteur

	Irradiation solaire reçue en fonction de l'inclinaison du capteur							
	$i = 0^\circ$	$i = 20^\circ$	$i = 25^\circ$	$i = 30^\circ$	$i = 35^\circ$	$i = 40^\circ$	$i = 45^\circ$	$i = 50^\circ$
Janvier	5397,74	5382,89	5308,54	5206,75	5078,28	4924,12	4745,44	4543,61
Février	5089,77	5007,56	4921,60	4810,48	4675,06	4516,37	4335,60	4134,14
Mars	4518,94	4644,03	4615,10	4562,24	4485,87	4386,57	4265,08	4122,34
Avril	4312,59	4744,00	4789,09	4812,71	4808,90	4779,63	4725,12	4645,77
Mai	3719,99	4326,11	4423,05	4496,43	4545,68	4570,42	4570,48	4545,85
Juin	3179,32	3795,15	3901,61	3987,22	4051,34	4093,47	4113,30	4110,67
Juillet	3342,71	3935,53	4034,19	4111,30	4166,27	4198,68	4208,29	4195,02
Août	4115,07	4612,45	4617,38	4718,40	4733,79	4723,90	4688,82	4628,81
Septembre	4991,83	5234,62	5227,52	5193,10	5131,63	5043,56	4929,57	4790,53
Octobre	5742,14	5689,54	5602,25	5486,30	5342,56	5172,13	4976,32	4756,60
Novembre	5847,07	5791,78	5702,13	5583,17	5435,80	5261,14	5060,53	4835,50
Décembre	5488,83	5543,75	5484,70	5397,11	5281,65	5139,19	4970,81	4777,80

Ces valeurs permettent de construire le graphique ci-dessous.

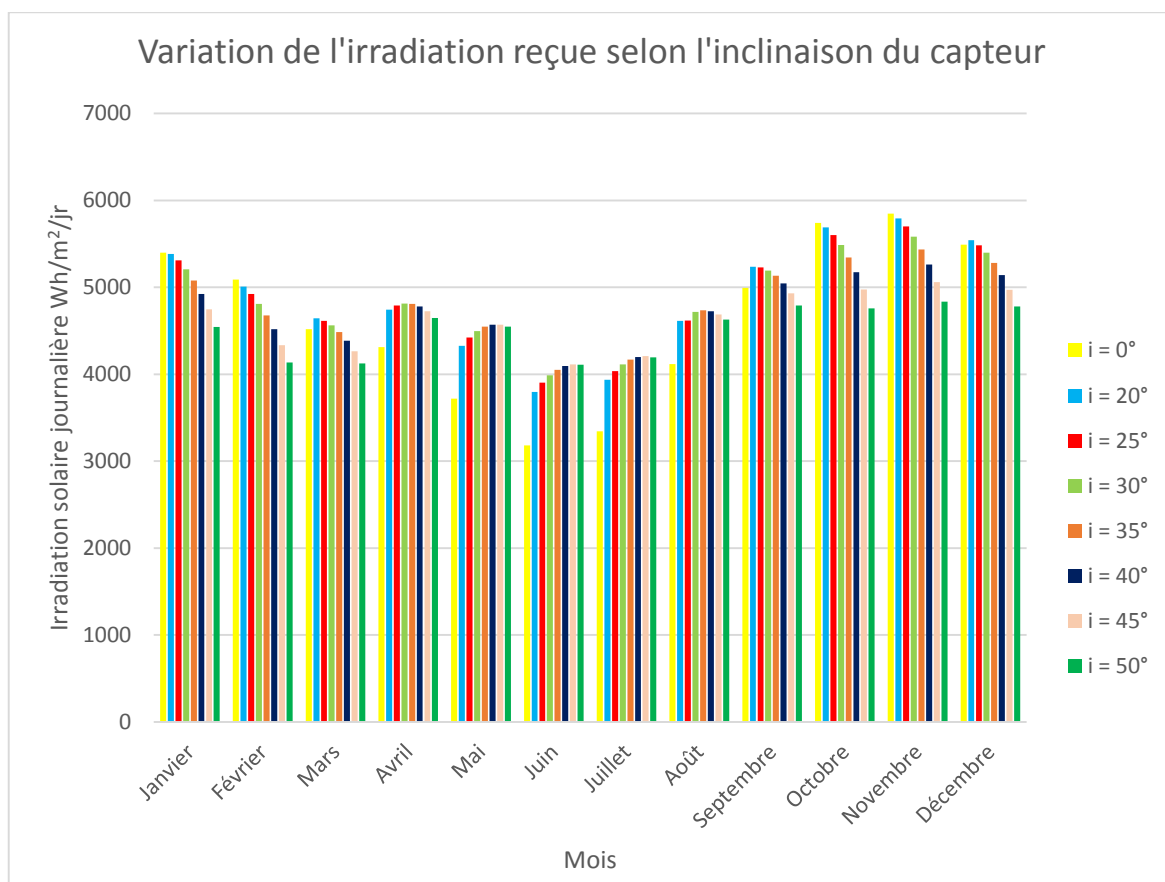


Figure 29: Irradiation solaire reçue suivant différente inclinaison du capteur

- **Interprétation du graphique**

Dans cet histogramme, on peut voir que:

- L'irradiation solaire quotidienne moyenne pour chaque mois varie en fonction des angles d'inclinaison du capteur. A chaque angle correspond une valeur différente de l'irradiation.
- Les capteurs inclinés d'un angle $0 \leq i \leq 25^\circ$ reçoivent une irradiation plus élevée pendant la période estivale en comparaison avec ceux inclinés de $30^\circ \leq i \leq 50^\circ$.
- Et inversement, ils reçoivent une irradiation plus faible en période hivernale.
- Le meilleur angle à adopter est donc celui qui permet de capter le maximum d'énergie pendant toute l'année.
- Nous savons qu'un chauffe-eau sera plus utile en période hivernale qu'estivale, l'angle que nous allons utiliser pour la conception de notre capteur doit donc tenir compte de ce facteur.
- Trois angles permettent de recevoir une énergie optimale pendant toute l'année.
 $i = 30^\circ$, $i = 40^\circ$ et $i = 45^\circ$.

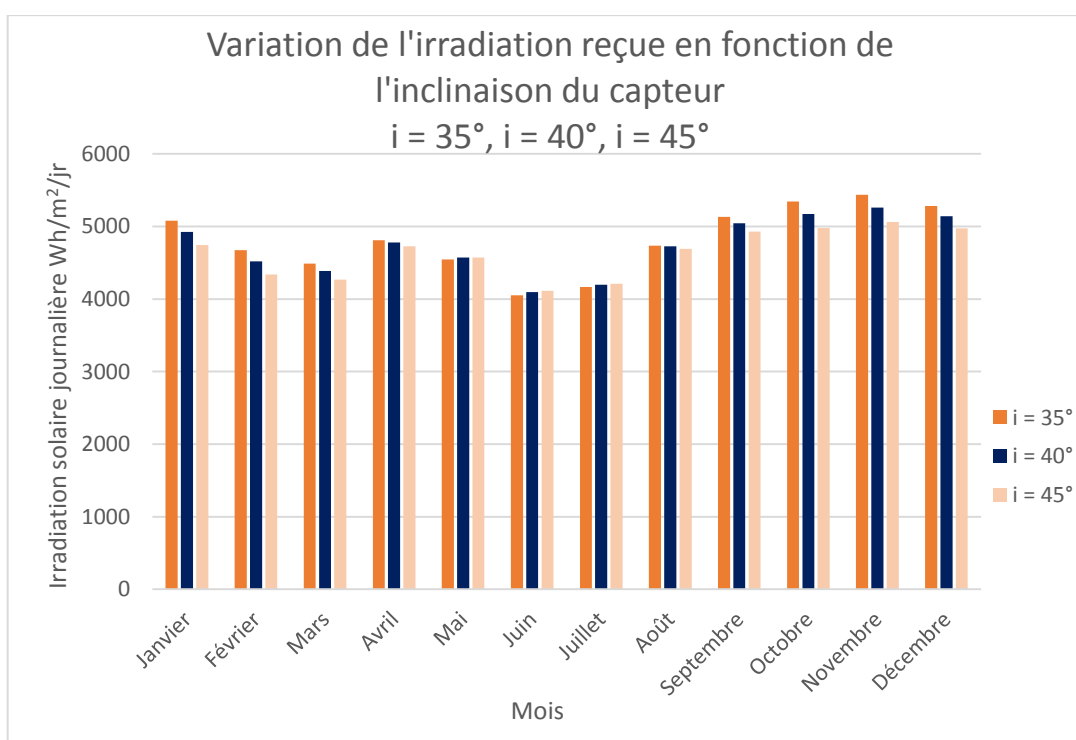


Figure 30: Comparaison de l'énergie solaire reçue pour $i = 30^\circ$, 40° et 50°

- **Résultat**

On peut donc conclure à partir de ce graphique que l'angle d'inclinaison optimale pour capter le maximum d'énergie pendant toute l'année est de 35° .

Notre capteur est donc incliné d'un angle « $i = 35^\circ$ » par rapport à l'horizontale.

V.1.5 Orientation optimale du capteur

Pour trouver l'orientation optimale du capteur, on a utilisé le même principe que celui adopté pour avoir l'inclinaison optimale du capteur.

L'inclinaison de notre capteur est maintenant fixe $i = 35^\circ$, on fait ensuite varier l'angle d'orientation de $\{\gamma = -20^\circ ; -10^\circ ; 0^\circ ; 10^\circ ; 20^\circ ; 30^\circ ; 40^\circ\}$. Rappelons qu'une orientation $\gamma = 0^\circ$ correspond à une orientation plein Nord.

On obtient donc les résultats suivants :

Tableau 20: Irradiation solaire reçue en fonction de l'orientation du capteur

Irradiation solaire reçu en fonction de l'orientation du capteur							
	$\gamma = -20^\circ$	$\gamma = -10^\circ$	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 10^\circ$	$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 40^\circ$
Janvier	5057,50	5073,11	5078,28	5072,85	5056,98	5031,16	4996,18
Février	4661,42	4671,43	4675,06	4672,21	4662,96	4647,60	4626,59
Mars	4452,03	4476,68	4485,87	4479,33	4473,59	4420,29	4418,29
Avril	4745,47	4792,31	4808,90	4794,76	4750,31	4676,89	4576,75
Mai	4469,89	4526,62	4545,68	4526,49	4469,66	4376,89	4251,00
Juin	3977,47	4032,92	4051,34	4032,19	3976,04	3884,60	3760,65
Juillet	4093,54	4148,02	4166,27	4147,74	4092,98	4003,67	3882,51
Août	4664,22	4715,55	4733,79	4718,37	4669,78	4589,48	4479,92
Septembre	5083,30	5118,60	5131,63	5121,97	5089,93	5036,47	4963,23
Octobre	5323,45	5337,59	5342,56	5338,20	5324,66	5302,33	5271,90
Novembre	5416,52	5430,82	5435,80	5431,31	5417,50	5394,79	5363,85
Décembre	5253,33	5274,55	5281,65	5274,41	5253,06	5218,23	5171,00

Ces données vont être utilisées pour construire un graphique permettant de voir les valeurs de l'irradiation reçue par le capteur en fonction de son orientation.

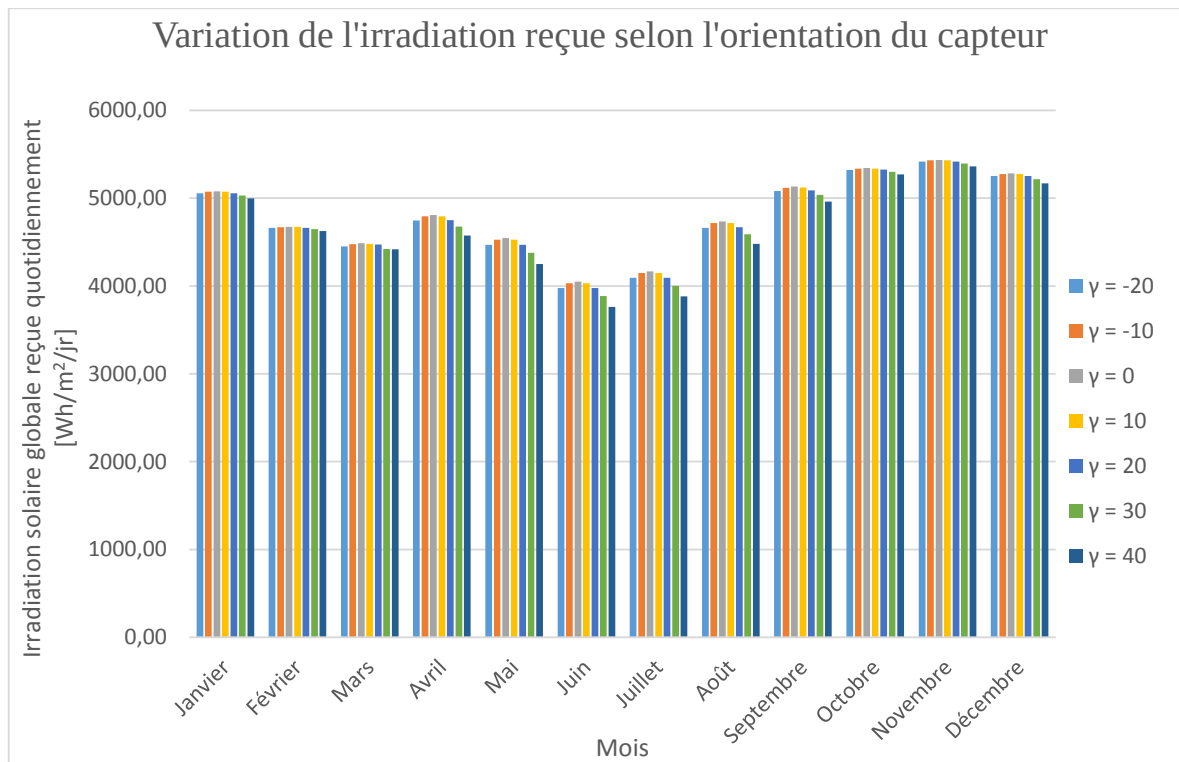


Figure 31: Irradiation solaire reçue suivant différente orientation du capteur

- **Interprétation du graphique**

On peut voir sur le graphique que :

- Une orientation dans un intervalle de $[-20^\circ \text{ à } 40^\circ]$ présente peu de différence sur l'irradiation reçue à partir du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mars.
- On commence à avoir une légère différence pour les mois d'Avril à Septembre.
- Tout au long de l'année, une orientation du capteur entre $[-20^\circ ; 20^\circ]$ sera donc jugé comme favorable pour une installation solaire.
- Cependant, on va quand même comparer l'irradiation reçue pour trois angles d'orientation du capteur pour savoir quelle est la meilleure orientation.

$\gamma = -10^\circ ; \gamma = 0^\circ ; \gamma = 10^\circ$

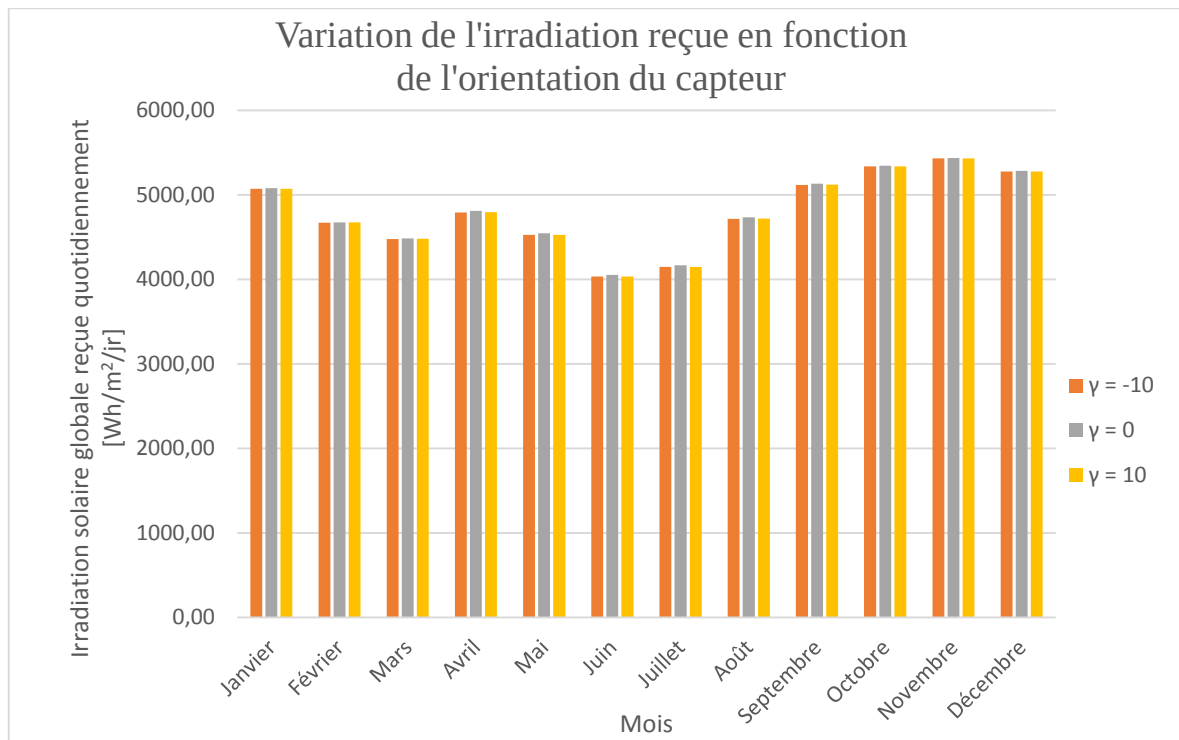


Figure 32: Comparaison de l'énergie reçue pour $\gamma = -10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\gamma = 10^\circ$

• Résultat

La meilleure orientation du capteur pour recevoir le maximum d'énergie pendant toute l'année est donc de : $\gamma = 0^\circ$. C'est-à-dire une orientation « **plein Nord** ».

La rose d'orientation ci-dessous nous montre donc les orientations les plus favorables pour notre chauffe-eau solaire : c'est la zone coloré de la rose d'orientation.

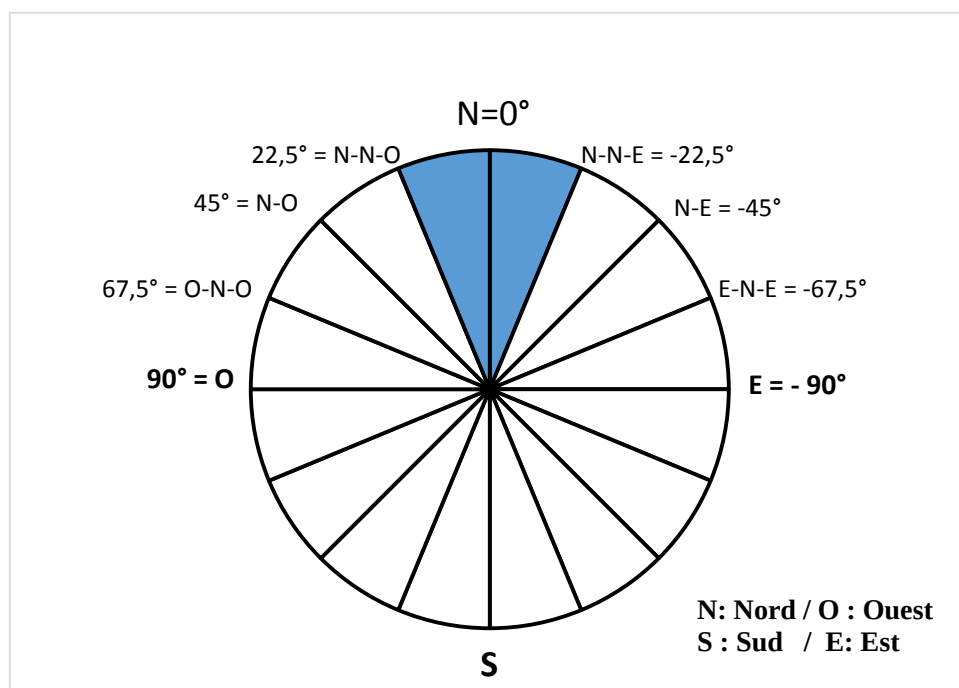


Figure 33: Rose d'orientation du capteur

V.1.6 Construction du diagramme solaire

Le diagramme solaire est très utile pour déterminer la courbe quotidienne du soleil durant la période de test. Grâce au diagramme, on peut vérifier toutes les conditions d'expérimentation du site considéré. Comme par exemple, les heures d'ensoleillement, les heures de lever et coucher du soleil, les masques et obstacles qui peuvent faire de l'ombre au capteur solaire.

La construction se fait également sur « **EXCEL** ». Pour construire un diagramme solaire, on va suivre le schéma fonctionnel ci-dessous :

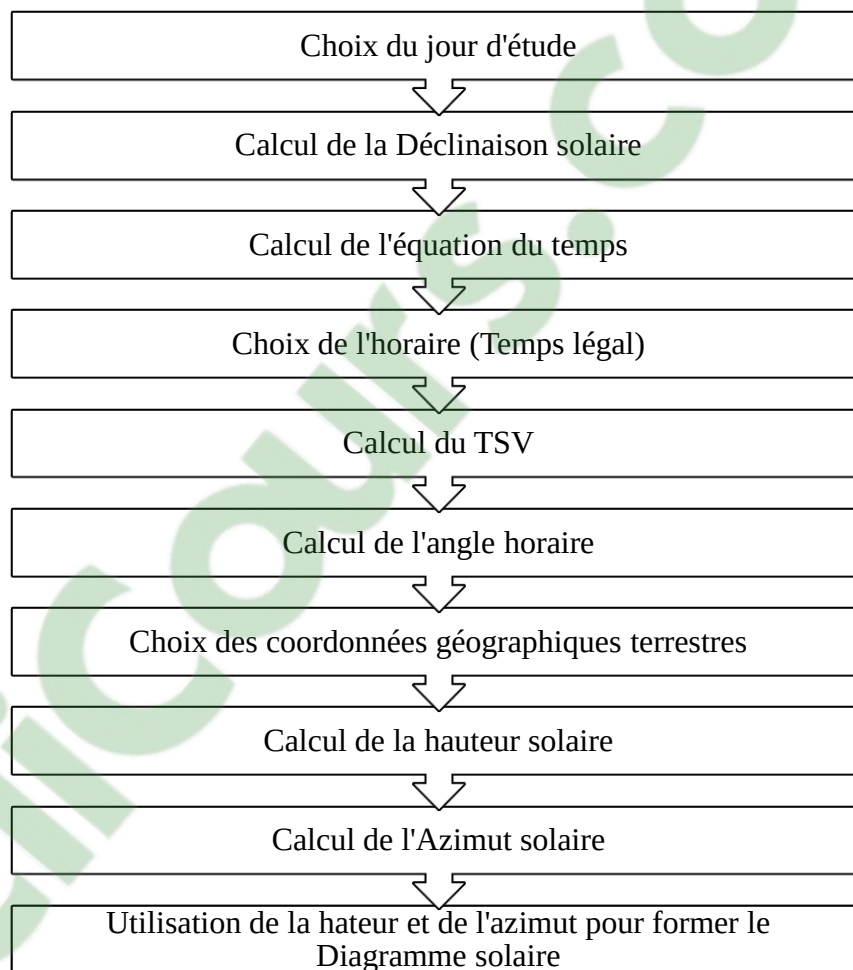


Figure 34: Schéma fonctionnel du diagramme solaire

Toutes les formules utilisées sont données au Chapitre I.

V.1.6.1 Diagramme solaire de l'année

Notre chauffe-eau solaire sera utilisé durant toute l'année, il sera donc utile de construire le diagramme solaire pour une année entière. Le but est de suivre le déplacement du soleil, et de voir l'évolution du rayonnement global reçue au niveau du site considéré.

Pour construire ce diagramme, nous avons dressé dans un petit tableau les données utilisées :

Année	Lieu	Latitude	Jour	Horaire
2016	Ivato – Antananarivo	-18,8 °	Chaque 11ème jour du mois	5 h – 18 h Heure légale

On a obtenu le résultat ci-dessous.

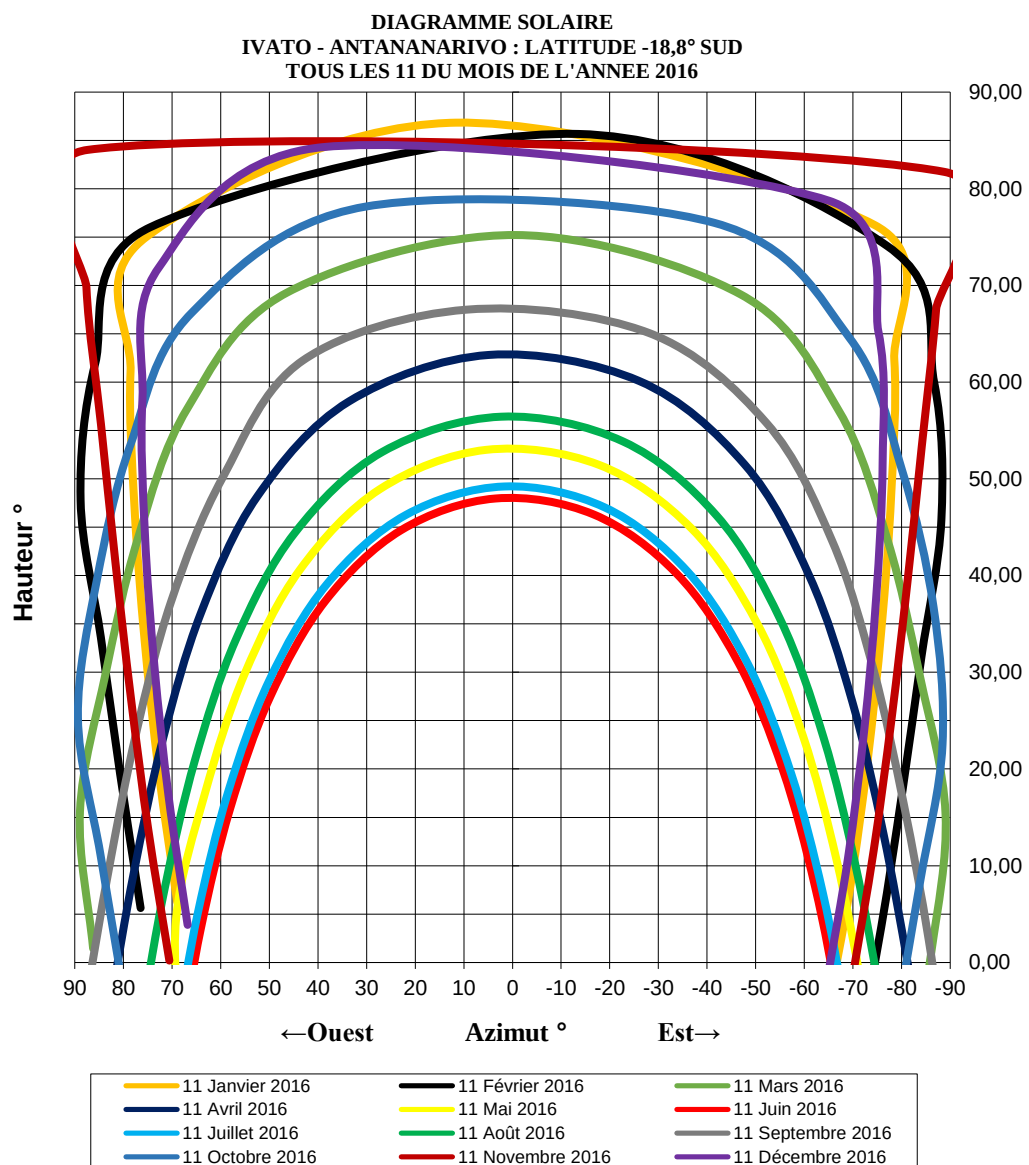


Figure 35: Diagramme solaire de l'année 2016

Interprétation du diagramme :

- La courbe du mois de Juin représenté en trait rouge est la plus basse sur le diagramme, cela signifie qu'à ce moment de l'année le soleil est très bas (hauteur solaire), la durée du jour est réduite et donc l'ensoleillement reçu quotidiennement assez faible.
- A l'opposé, celles de Novembre, Décembre ou encore Janvier sont situées très haut sur le diagramme. Cela veut dire que le soleil reste plus longtemps dans le ciel, donc on reçoit beaucoup plus d'énergie solaire.
- Les courbes plus basses correspondent à la trajectoire du soleil en période hivernale, et celles en hauteurs à la période estivale.
- Ces estimations sont bien sûr indépendante des couvertures nuageuses ou autres masques pouvant perturber l'ensoleillement.

V.1.6.2 Diagramme solaire du mois de Septembre

Comme la période de test correspond au mois de Septembre, on a construit le diagramme solaire de ce mois pour montrer le déplacement quotidien apparent du soleil.

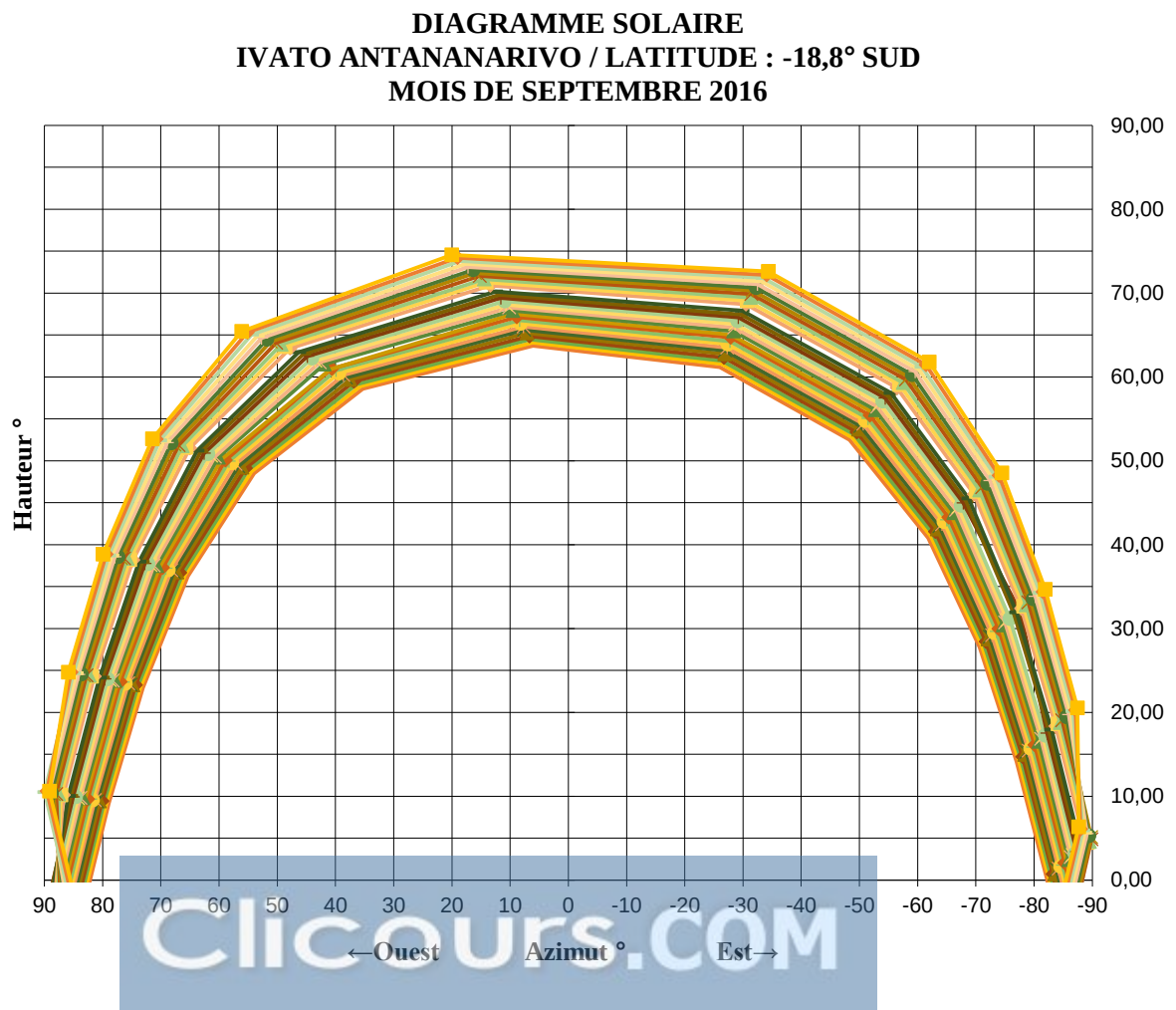


Figure 36: Diagramme solaire du mois de Septembre

V.1.6.3 Lieu d'emplacement de chauffe-eau solaire pour le test

Le chauffe-eau solaire est posé au sol sur une place entouré de part et d'autres par des bâtiments et des arbres qui peuvent causer de l'ombre sur le capteur. Cependant, il est quand même bien exposé au soleil durant la journée.

Sur le diagramme solaire, le chauffe-eau solaire est assimilé à un objet placé sur l'axe de l'azimut en son centre (0°).

Nous pouvons voir les effets de ces masques sur le capteur à l'aide du diagramme solaire des jours d'expérimentation.

V.1.6.4 Période d'expérimentation et masque sur le capteur

Nous avons entrepris nos tests de fonctionnement du chauffe-eau solaire pendant cinq jours. Voici le diagramme solaire de cette période sur lequel on a ajouté les effets de masques que le capteur du chauffe-eau solaire subit. C'est la courbe « **en noire** » sur le diagramme.

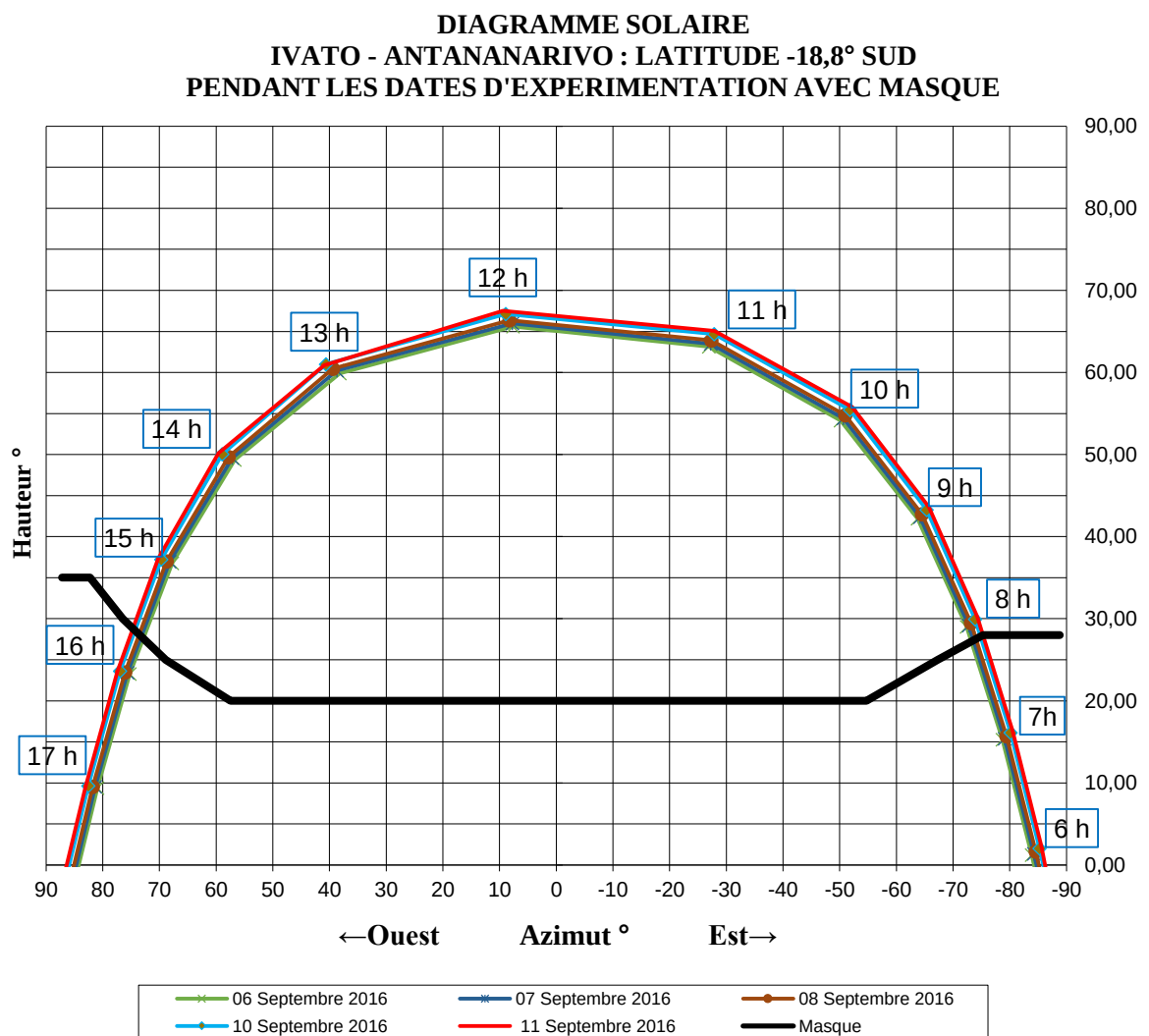


Figure 37: Diagramme solaire avec masque pendant les jours d'expérimentation

- **Obtention de la courbe de l'effet de masque**

Pour obtenir la courbe de l'effet de masque, on a fait quelques relevées :

- Il faut s'équiper d'une boussole (nous avons utilisé une application Android sur le téléphone), d'un rapporteur, d'un niveau à bulle (avec cale éventuelle), et bien sûr d'un diagramme solaire.
- La méthode utilisée est donnée par cette figure.

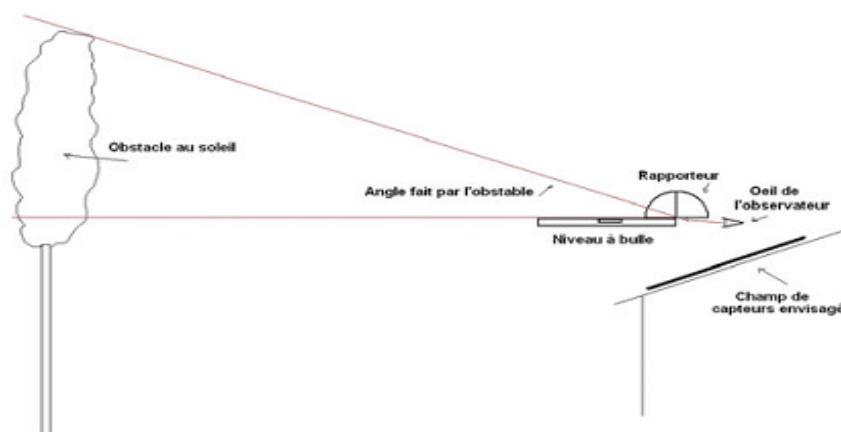


Figure 38: Méthode de mesures des masques éventuelles

On a obtenu les données suivantes :

Tableau 21: Données des angles de l'effet de masque

	Masque													
Hauteur	28	28	28	28	25	20	20	20	20	20	25	30	35	35
Azimut	-88,8	-86,3	-81,2	-75,2	-67,2	-54,7	-32,4	3,5	37,1	57,4	68,9	76,4	82,2	87,20

- **Interprétation et utilisation de la courbe d'effet de masque :**

- Lorsque les courbes du trajet du soleil sont coupées à des endroits par la courbe de l'effet de masque, cela signifie qu'en dessous de ces points d'intersection, le capteur est caché par des zones d'ombres causés par les obstacles environnants.
- Le premier point d'intersection à l'Est marque l'heure de la fin de l'effet de masque pour le matin
- Le second point d'intersection à l'Ouest par contre donne l'heure du début de l'effet de masque pour l'après-midi.
- L'heure solaire vraie est montrée par des points marqués sur la courbe du trajet du soleil.

- Grâce à ces horaires, on peut donc déduire l'heure légale au moment où le capteur est partiellement ou totalement soumis à un effet de masque.

V.1.6.5 Heure d'apparition de zone d'ombre sur le capteur :

Pour pouvoir, déterminer le moment où le capteur est éclipsé par de l'ombre, nous allons procéder comme suit :

- Prendre les coordonnées des points d'intersections entre la courbe du soleil et celle de l'effet de masque : Hauteur, Azimut et Déclinaison
- Utiliser la relation suivante pour trouver l'heure solaire vraie :

$$\text{TSV masque} = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{\sin A \times \cos h}{\cos \delta}\right)}{15} + 12 \quad (81)$$

- Enfin en déduire l'heure légale.

Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 22: Horaire de l'effet de masque

		Azimut [°]	Hauteur [°]	Déclinaison [°]	TSV masque [h, mn, s]	Temps Légal [h, mn, s]
06/09/16	Matin	-73,5	27	5,40	8h 3mn 36s	7h 52mn 43s
	Soir	73,5	27	5,40	15h 56mn 24s	15h 47mn 17s
07/09/16	Matin	-74	27,4	5,01	8h 4mn 12s	7h 53mn 21s
	Soir	74	27,4	5,01	15h 55mn 48s	15h 46mn 39s
08/09/16	Matin	-74,5	27,6	4,61	8h 4mn 12s	7h 53mn 20s
	Soir	74,5	27,6	4,61	15h 55mn 49s	15h 46mn 40s
10/09/16	Matin	-75,2	27,9	3,82	8h 4mn 19s	7h 53mn 30s
	Soir	75,2	27,9	3,82	15h 55mn 34s	15h 46mn 29s
11/09/16	Matin	-75,9	28,2	3,42	8h 4mn 23s	7h 53mn 33s
	Soir	75,9	28,2	3,42	15h 55mn 34s	15h 46mn 27s

- **Interprétation du tableau**

Prenons la journée du Mardi 06 Septembre 2016 :

- Le matin : l'effet de masque débute dès le lever du jour et prend fin à 7h 52mn 43s. Donc à partir de ce moment, le capteur n'est plus caché par un quelconque ombrage.
- Le soir : l'effet de masque débute à 15h 47mn 17s. C'est-à-dire que le soleil commence à être caché par les obstacles autour du capteur.

Le principe est le même pour tous les jours de test.

V.1.6.6 Heure de lever et coucher du soleil pendant les jours d'expérimentation

On va déterminer l'heure solaire vraie du lever et du coucher du soleil en utilisant les formules du paragraphe I.2.6 du chapitre I.

Tableau 23: Heure du lever et coucher du soleil pendant les jours d'expérimentation

	Jour d'expérimentation				
	06/09/16	07/09/16	08/09/11	10/09/16	11/09/16
Latitude	-18,8	-18,8	-18,8	-18,8	-18,8
Longitude	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5
Déclinaison	5,40	5,01	4,61	3,82	3,42
ET	-0,040	-0,046	-0,052	-0,064	-0,070
TSV	6,12	6,11	6,10	6,08	6,07
Lever du soleil	↓ 6h 7 mn 12s	↓ 6h 7mn 6s	↓ 6h 6 mn	↓ 6h 4mn 48 s	↓ 6h 4 mn 12s
TSV	17,88	17,89	17,90	17,92	17,93
Coucher du soleil	↓ 17h 52mn48s	↓ 17h 53mn 24s	↓ 17h 54mn	↓ 17h 55mn 12s	↓ 17h 55mn 48s
Durée du jour	11,76	11,78	11,80	11,84	11,86
TL	5,91	5,90	5,88	5,85	5,84
Lever du soleil	↓ 5h 54mn 36s	↓ 5h 54mn	↓ 5h 52mn 48s	↓ 5h 51mn	↓ 5h 50mn 24s
TL	17,675	17,677	17,68	17,685	17,69
Coucher du soleil	↓ 17h40mn 30s	↓ 17h 40mn 38s	↓ 17h40mn48s	↓ 17h 41mn 6s	↓ 17h 41mn 24s

V.2 TEST DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE

V.2.1 Appareil de mesure de température

La prise de température est effectuée à l'aide d'un thermomètre digital à lecture immédiate. Voici ses caractéristiques :

- Display digital
- Sonde en acier inoxydable
- Températures mesurables allant de : - 50 ° à 200 ° C
- Etui protectrice en plastique
- Batterie LR44
- Idéal pour les usages domestiques et industriels



Photo 19: Le thermomètre digital

Mode d'emploi du thermomètre :

- On enlève l'étui protecteur en plastique
- On appui sur ON/OFF
- On introduit la sonde a environ 7 cm
- Pour obtenir une lecture exacte de la température, attendre jusqu'à ce que les chiffres ne meuvent plus (environ 5-10 secondes).

V.2.2 Montage expérimentale

A cause de cette partie expérimentale, on n'a pas encore scellé la partie haute du réservoir. En effet, pour mesurer la température à l'intérieur de la cuve de stockage, on doit ouvrir le couvercle du haut et plonger notre thermomètre dans le réservoir d'eau chaude. Pendant cette opération, il y a une petite perte de chaleur par convection entre l'intérieur du ballon et le milieu extérieur.

Toutefois nous avons veillé à ce que la cuve soit bien renfermée et isolée à chaque fois que l'on a fini de prendre la température de l'intérieur.

V.2.3 Prise de températures

Nous avons à chaque fois déterminer l'**heure légale** car nos relevés de température se font à des horaires donnés par la montre.

Elle débute à **8 heures** à cause de l'effet de masque vue au **paragraphe V.1.6.5**. Elle prend fin à **17 heures**.

Le volume de liquide contenu dans tous le circuit est résumé dans le tableau qui suit :

Tableau 24: Volume du liquide dans le chauffe-eau solaire

Volume d'eau dans le circuit primaire [litre]	Volume d'eau dans le réservoir [litre]
2,55	45

V.2.3.1 Première série de test : Capteur orienté Plein Nord

On a effectué une première série de test durant 03 jours successifs : Mardi 06, Mercredi 07 et Jeudi 08 Septembre 2016.

Le processus de l'expérience s'est déroulé comme suit :

- Chaque jour, on remplit le circuit primaire et le réservoir par de l'eau de la JIRAMA. La température initiale de l'eau au départ du test correspond donc à cette température de remplissage.
- Les températures initiales ne sont pas les mêmes pour les trois jours, cependant elles ne diffèrent que de très peu (environ 1°).
- Le fluide caloporteur (eau) et celui du réservoir sont donc à la même température de départ
- On procède ensuite à la prise de température pendant la journée
- Les mesures sont prises durant la journée à des horaires plus ou moins fixes, à une heure d'intervalle.
- En fin de journée, on vide le circuit primaire et le réservoir. Et on déplace le chauffe-eau solaire dans le garage pour des raisons de sécurité. (le vol éventuel du dispositif)
- On répète l'opération pendant les 03 jours prévus pour le test de fonctionnement.
- Les températures mesurées sont :
 - o La température ambiante extérieure autour du chauffe-eau solaire
 - o La température régnant à l'intérieur du capteur
 - o La température de l'eau dans le réservoir

Tableau 25: Résultat de la première série de test

Jour	Horaire	Température ambiante extérieure [°C]	Température régnante à l'intérieure du capteur [°C]	Température de l'eau à l'intérieur du réservoir [°C]
Mardi 06/09/16	08 :00	15,3	34,8	21
	09 :00	18,4	39,1	24,5
	10 :00	19,6	41	25,8
	11 :00	23,5	48,2	29,2
	12 :00	25	54,9	33,4
	13 :00	26,8	63,2	38,7
	14 :00	27,5	65,7	41
	15 :00	28	54,5	44,9
	16 :00	25,1	29,9	43,2
	17 :00	22,6	21,1	42,6
Mercredi 07/09/16	08 :00	18	38,5	19,7
	09 :00	21,3	44	25
	10 :00	23,9	48,8	27,7
	11 :00	25	56	33,1
	12 :00	29	70,2	40,3
	13 :00	27,4	69,8	44,3
	14 :00	28	70	47,8
	15 :00	30,4	57,6	49,5
	16 :00	27,1	30,8	47
	17 :00	25,2	24,9	46,1
Jeudi 08/09/16	08 :00	18,6	39	20,4
	09 :00	21	45,2	26,8
	10 :00	24,5	50	28,2
	11 :00	26,8	59,30	34,2
	12 :00	28,5	66,9	40,1
	13 :00	28,7	73,3	44,7
	14 :00	31,6	70,6	48,5
	15 :00	28,2	55	50,2
	16 :00	28,6	34,6	48,9
	17 :00	24,9	23,3	46,4

Les résultats de la première série de test sont utilisés pour construire un graphique.

Ce graphique est donc composé des trois courbes de variation des températures atteintes par l'eau à l'intérieur du réservoir.

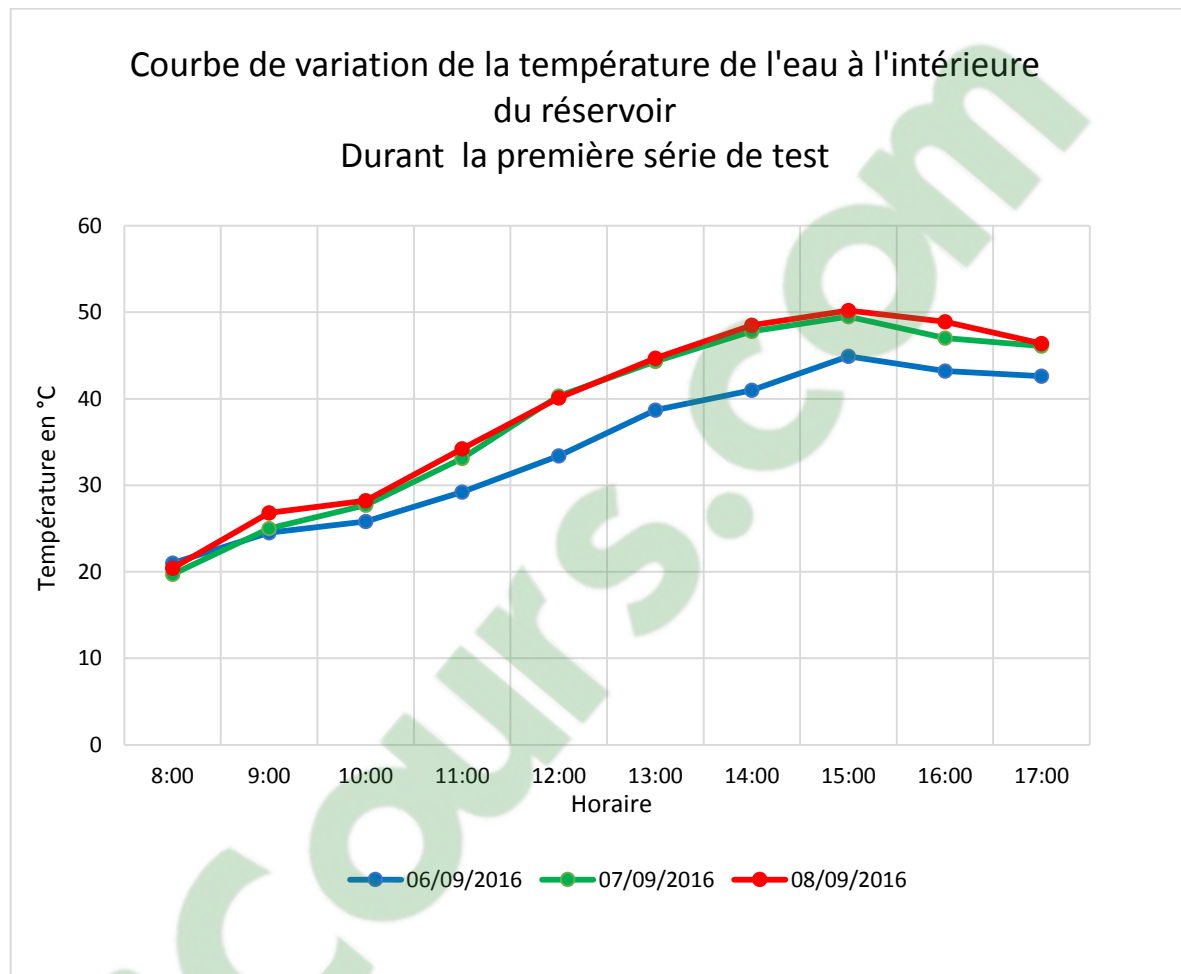


Figure 39: Evolution de la température de l'eau du réservoir durant la première série de test

- **Interprétation des résultats :**

- On peut voir qu'au cours de la journée, la température de l'eau chaude du réservoir augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum, puis redescend.
- On constate également une augmentation plus rapide de la température dans l'intervalle de temps [10 : 00 à 15 : 00]. Cela s'explique par l'ensoleillement important durant cette période favorisant les échanges de chaleur par rayonnement à l'intérieur du capteur.
- La température maximale est atteinte au environ de 15 : 00 heures. Ensuite, elle décroît doucement. Cette décroissance est causée par la baisse de l'ensoleillement mais aussi par la baisse de la température régnant à l'intérieur du capteur.

Le liquide caloporteur ne reçoit plus assez d'énergie pour pouvoir réchauffer l'eau du réservoir.

- L'effet de serre joue aussi un rôle principal dans le processus car lorsque la température régnante à l'intérieur du capteur est élevée, la température de l'eau du réservoir augmente aussi.
- Si on compare la première courbe (en bleu) aux deux autres (verte et rouge), on remarque que durant cette expérience l'évolution de température est moins importante. Elle n'a même pas atteint 45 °C. Cela s'explique tout simplement par un ciel assez couvert le jour du test.

V.2.3.2 Deuxième série de test :

Cette deuxième série de test est effectuée pendant 02 jours : Samedi 10 et Dimanche 11 Septembre 2016.

Les nouvelles conditions du test sont :

- On remplit le circuit primaire et le réservoir un peu tard dans la matinée, vers 10h du matin.
- Les températures initiales de début de test sont très voisines (écart de 0,5 °C)
- On a pris les températures de la même manière que dans la première série de test (intervalle d'une heure pour chaque relevé).
- Le chauffe-eau est placé toute la soirée dehors jusqu'au lendemain matin.
- Nous avons arrêté la prise de température à 21h du soir et on a vérifié la température le lendemain à 6 h.
- L'orientation du capteur est différente pour les deux jours d'essai :
 - o Samedi 10 Septembre 2016 : Orientation plein NORD
 - o Dimanche 11 Septembre 2016 : Orientation 10 ° NORD-OUEST

Voici les résultats obtenus :

Tableau 26: Résultat du second test

Jour	Horaire	Température ambiante extérieur °C	Température régnant intérieur capteur en °C	Température intérieur réservoir en °C
Samedi 10/09/16	10 :00	25,3	44	20,9
	11 :00	26,4	49	27,2
	12 :00	26,3	53,5	33,3
	13 :00	28,6	64,3	39,2
	14 :00	29,7	65	43,4
	15 :00	30	58,2	45,2
	16 :00	27,1	33,2	44,7
	17 :00	20,8	25	43,5
	18 :00	19,4	23,1	41,2
	19 :00	17,9	18,7	40,6
	20 :00	16,4	17,9	39,5
	21 :00	16,5	15	38,6
	06 :00	12,5	13	33,3
Dimanche 11/09/16	10 :00	23,8	36	20,4
	11 :00	25,3	43,3	29,8
	12 :00	22,6	48	34,2
	13 :00	24,2	45,3	35,2
	14 :00	27,5	57,2	40,4
	15 :00	28,5	68,9	44,5
	16 :00	26	39	45,5
	17 :00	19,9	29,5	45
	18 :00	16,3	18,8	42,2
	19 :00	15,8	17,5	41
	20 :00	15,3	16,5	39,2
	21 :00	15,2	16	38,5
	06 :00	11	12,5	33

Comme dans la première série de test, on a regroupé dans un même graphique, les courbes de variation de température de l'eau de réservoir pour les deux jours d'essai.

On a donc le graphique suivant :

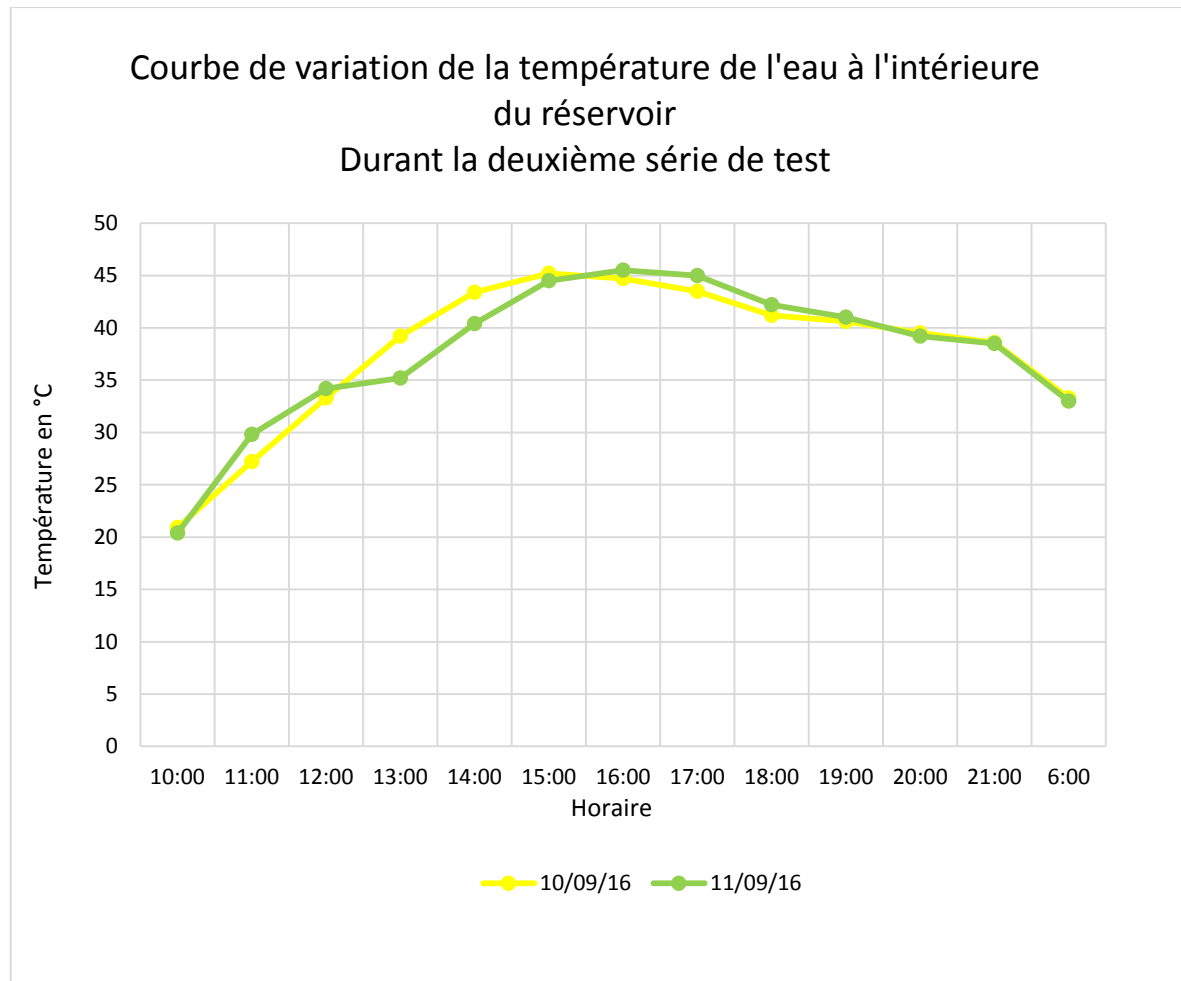


Figure 40: Evolution de la température de l'eau du réservoir durant la deuxième série de test

- **Interprétation des résultats**

- Les courbes de températures sont croissantes au fil du temps, arrivent à un maximum et ensuite diminuent.
- Elles atteignent respectivement la température maximale de 45, 2 °C et 45,5°C à des horaires différents. C'est l'orientation du capteur qui est à l'origine de cette petite différence.
- Un capteur orienté plein Nord, capte le maximum de l'énergie solaire entre l'intervalle de temps [12 h à 15h].
- En revanche, pour un capteur orienté 10° Nord-Ouest, cet intervalle de temps est entre : [13h – 16 h].
- Sur la courbe en vert clair (11/09/16), entre [12 h - 13h], le ciel a été temporairement assez couvert (nébulosité environ égale à 6/8). Ce qui explique la faible augmentation de la température de l'eau chaude durant ce moment.

- Après 18 h, la température de l'eau chaude diminue doucement à raison d' 1°C par heure. A 21h, elles sont respectivement de 38,6 et 38,5 °C. Cette température est parfaitement adéquate pour une utilisation sanitaire pendant la soirée.
- Le lendemain matin, à 6h, les températures sont encore à 33°C. C'est l'isolation du réservoir qui est responsable du maintien de cette température.

V.2.3.3 Regroupement de tous les résultats obtenus

Enfin, insérons dans un seul et même graphique, toutes les courbes de température de résultats obtenus pendant les tests effectués sur le chauffe-eau solaire.

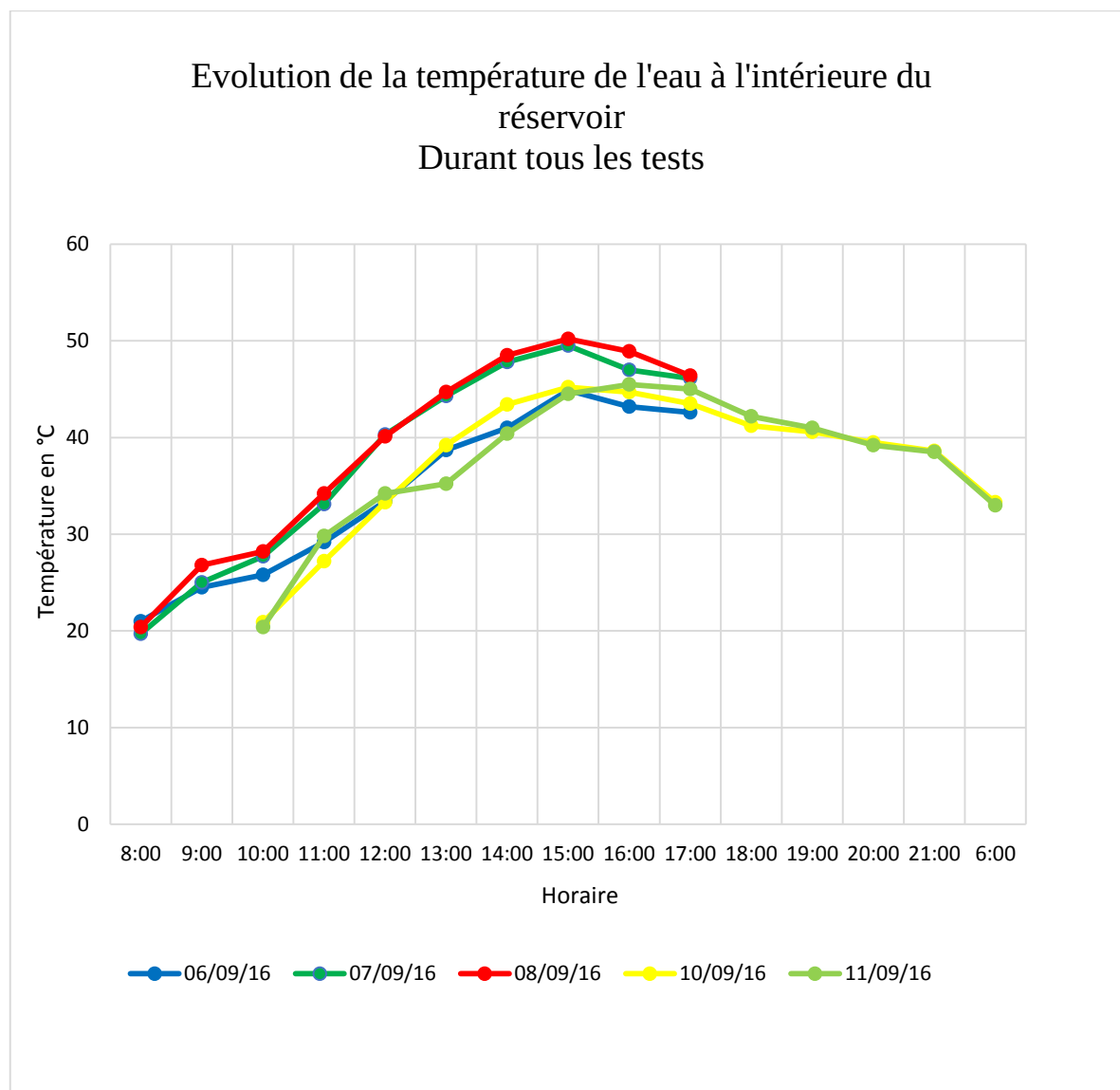


Figure 41: Evolution générale des températures de l'eau chaude du réservoir

V.2.4 Interprétation général des résultats obtenus

Après les tests, on peut conclure que notre chauffe-eau solaire à capteur plan vitré en thermosiphon fonctionne très bien.

Les principales observations et informations à retenir sont :

- La température maximale atteinte pendant les périodes de test est : 50,2 °C. Cette température a été obtenue le 08/09/16.
- On peut voir sur le graphique que les températures obtenues pendant la deuxième série de test sont inférieures en comparaison avec ceux de la première série.
- La durée d'exposition du capteur au soleil est donc un facteur très important pour obtenir des températures élevées de l'eau du réservoir. Plus la durée d'exposition est grande, plus les résultats sont bons.
- La couverture du ciel par les nuages a aussi un impact majeur sur les performances du chauffe-eau solaire.
- Le chauffe-eau solaire se met en marche plus rapidement et plus efficacement lorsque la température initiale de l'eau du réservoir et du circuit primaire au début de l'exposition n'est pas trop basse. Ici environ 20°C.
- La température de l'eau chaude durant le soir est environ 40°C. Cette température est idéale pour une utilisation sanitaire car la température idéale de bain du corps humain est de 37°C.
- Une température de 33°C le matin est encore satisfaisante. Un renforcement de l'isolation de la cuve permettrait de mieux conserver la température de l'eau chaude pendant la nuit.
- La période de test du chauffe-eau solaire s'est déroulée au mois de Septembre. On peut voir sur la **figure 35** que la courbe du mois de Septembre est encore assez basse. L'ensoleillement reçu n'est donc pas encore à son maximum.

La température maximale de 50,2°C atteinte pendant cette période ne représente donc pas la température maximale que peut atteindre le chauffe-eau solaire en période très favorable c'est-à-dire pendant l'été.

Cependant, pour une utilisation hivernale, cette température est largement suffisante pour satisfaire les besoins en eau chaude.

V.3 ETUDE ECONOMIQUE

Le prix de revient de notre chauffe-eau solaire est déterminé en fonction des matériaux utilisés et du cout de la main d'œuvre pour sa réalisation.

Les prix sont donnés Tous Taxes Comprises (TTC) et en ARIARY.

V.3.1 Le prix de revient du chauffe-eau solaire

On a dressé le devis quantitatif et estimatif de la réalisation de chaque partie du chauffe-eau solaire.

V.3.1.1 Le réservoir

Tableau 27: Evaluation du prix du réservoir

Désignation	Concerne	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
1- <u>Réservoir</u>					
-Récupération d'un chauffe-eau électrique	Démontage et remise en état	FT	FT	FT	5.000
-Tuyau de cuivre 22-1	Echangeur de chaleur	ml	3,52	15.000	52.800
-Bouchon	Bouchon	U	02	1.000	2.000
TOTAL RESERVOIR					59.800

V.3.1.2 Conduite de connexion du circuit primaire

Tableau 28: Evaluation du prix des conduites de connexion du circuit primaire

Désignation	Concerne	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
-Tuyau de cuivre 22-1	Conduite monté d'eau chaude	ml	1,25	15.000	18.750
-Tuyau de PPR retour diamètre 25 de 2 m	Conduite retour vers capteur	ml	01	5.000	5.000
TOTAL TUYAU DE CONDUITE					23.750

V.3.1.3 Le capteur :

Tableau 29: Evaluation du prix du capteur

Désignation	Concerne	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
1- <u>Tuyauterie</u>					
-Tube de cuivre 12-1	Absorbeur à échelle	ml	06	10.000	60.000
-Tube de cuivre 22-1	Absorbeur à échelle	ml	1,6	15.000	24.000
TOTAL TUYAUTERIE					84.000
2- <u>Plaque absorbante</u>					
-Plaque en acier Galva Dim : 2m x 1m	Absorbeur	U	01	15.000	15.000
-Peinture noire mate en bombe 240 ml	Surface absorbante	U	01	4.000	4.000
TOTAL PLAQUE ABSORBANTE					19.000
3- <u>Couverture transparente</u>					
-Verre demi double de dimension : 0.80 x 0.795	Vitrage du capteur	m ²	0,636	20.500	13.000
-Support du vitrage		U	02	800	1.600
TOTAL COUVERTURE TRANSPARENTE					14.600
4- <u>Isolation</u>					
-Carton ondulé à double cannelure	Isolation	—	—	—	—
-Rouleau de papier aluminium	Réflecteur intérieur capteur	U	01	7.000	7.000
TOTAL ISOLATION					7.000
5- <u>Coffre et support</u>					
-Traverse de bois	Coffre du capteur	U	01	30.000	30.000
-Fer cornière L de 25 Barre de 6 mètre	Support du coffre	ml	01	13.000	13.000
-Fer rond Ø 8 Barre de 12 m	Tendeur du support	U	01	18.000	18.000
-Baguette de soudure	Support	U	05	120	600
-Clou	Support	kg	1/4	4.000	1.000
-Vis à bois		U	10	70	700
TOTAL COFFRE ET SUPPORT					63.300
TOTAL GENERAL CAPTEUR					187.900

V.3.1.4 Accessoire de plomberie

Tableau 30: Evaluation du prix des accessoires de plomberie

Désignation	Concerne	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
-Raccord T de Ø 25 en cuivre	Conduite circuit primaire	U	02	2.500	5.000
-Coude fileté de Ø 25	Circuit primaire Circuit primaire	U	01	2.000	2.000
-Manche de Ø 25		U	01	1.500	1.500
-Bouchon de Ø 25	Vidange du circuit primaire	U	01	1.000	1.000
-Robinet d'arrêt de Ø 25 en cuivre	Remplissage circuit primaire	U	01	13.000	13.000
-Raccord mixte Mâle/ Mâle	Raccord circuit	U	01	3.000	3.000
TOTAL ACCESSOIRE PLOMBERIE					25.500

V.3.1.5 Main d'œuvre

Tableau 31: Evaluation du prix de la main d'œuvre

Désignation	Concerne	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
-Absorbeur en échelle	Confection	FT	FT	FT	20.000
-Echangeur en serpentin	Confection et pose dans le ballon	FT	FT	FT	25.000
-Brasage des conduites en cuivre	Liaison du circuit primaire	FT	FT	FT	20.000
-Transport		FT	FT	FT	5.000
TOTAL MAIN D'ŒUVRE					70.000

V.3.1.6 Le prix total du chauffe- eau solaire

Tableau 32: Prix de revient du chauffe-eau solaire

Partie du Chauffe-eau solaire	Montant en Ariary
- RESERVOIR	59.800
- TUYAU DE CONDUITE	23.750
- CAPTEUR	187.900
- ACCESSOIRE PLOMBERIE	25.500
- MAIN D'ŒUVRE	70.000
TOTAL GENERAL	366.950

Le prix de revient du chauffe-eau solaire à capteur plan vitré à thermosiphon est :

Prix de revient = 366.950 Ariary

Un chauffe-eau solaire dans le commerce qui a la même capacité (50 litres) que la nôtre est vendue à **500.000** Ar.

Notre produit est donc plus abordable.

V.3.2 Délai de récupération de l'investissement (DRI)

Comme notre chauffe-eau ne consomme aucune énergie électrique, la facture en chauffage d'eau sanitaire se trouvera très fortement revue à la baisse. Dans le cas où l'on va se passer complètement du chauffage en l'électricité, on peut espérer une récupération totale de notre investissement.

C'est la durée de ce retour de l'investissement que l'on appelle **délai de récupération de l'investissement**.

V.3.2.1 Les hypothèses de calcul

- Température moyenne de l'eau froide du stockage : 20°C
- Température moyenne de l'eau chaude du stockage : 50 °C

On suppose que l'eau chaude sera utilisée quotidiennement à 90% du volume de stockage, c'est-à-dire 45 litres.

V.3.2.2 Calcul de la durée d'amortissement

Pour nos calculs, on veut porter à une température de 50° C, 45 litres d'eau à 20 °C.

Nous allons mettre dans un tableau les calculs que nous avons besoins pour calculer la durée d'amortissement de notre chauffe-eau solaire.

Tableau 33: Calcul de l'amortissement de l'investissement

Quantité de chaleur [Joule]	Puissance utile [kWh]	Cout du kWh à Madagascar [Ariary]	TVA	Economie journalière [Ariary]
$Q_u = M \times C_p \times \Delta T$	$P_u = \frac{Q_u}{3600}$	205	20%	$E = P_u * 205 * (1+0,2)$
56430000	1,5675	–	–	385,605

Le DRI est donné par la relation :

$$DRI = \frac{\text{Investissement}}{\text{Economie}}$$

Délai de récupération de l'investissement	951,62 jours	2 ans 7 mois 11 jours
--	---------------------	------------------------------

D'après les hypothèses de calcul que l'on a utilisé, notre chauffe-eau devra fonctionner pendant 2ans 7 mois et 11 jours pour que le coût de l'investissement soit amorti.

Ce ne sont bien sûr que des hypothèses. Il y aura des moments où les besoins seront plus importants donc une augmentation de la consommation, et d'autres jours où on pourra se passer d'utiliser le chauffe-eau.

Conclusion



Issue initialement d'une nécessité d'économie d'énergie et également de satisfaire un besoin de confort thermique, notre travail a mis l'accent sur l'utilisation de l'énergie solaire par l'intermédiaire du chauffe-eau solaire.

Dans une première partie, nous avons montré tous les aspects théoriques nécessaires à la conception de notre chauffe-eau solaire. La réalisation de ce dernier après le dimensionnement et la sélection rigoureuse des matériaux utilisés, a suivi cette étude bibliographique. Enfin, les séries de tests du prototype ont été effectués ainsi qu'une étude économique.

Grâce à l'étude menée sur le gisement solaire du site considéré, le capteur du chauffe-eau solaire a été conçu de façon à récupérer au maximum l'énergie solaire disponible, en jouant sur l'inclinaison et l'orientation du capteur. Le produit est complètement autonome, sans aucun recours à l'énergie électrique. Durant ses essais, la température maximale atteinte par l'eau du réservoir est de 50,2°C malgré le fait que les tests aient été menés pendant la période hivernale.

L'objectif visé, qui était de concevoir un chauffe-eau solaire à un moindre coût de façon à garantir de manière continue l'eau chaude sanitaire, a été atteint. Les études expérimentales et économiques effectuées sur notre produit ont témoigné de sa conformité avec nos exigences, tant du point de vue coût que du point de vue fonctionnalité.

L'ensemble des résultats obtenus à l'issue de ce travail permettrait une alternative vers la commercialisation du dispositif. Pour cela une amélioration au niveau de l'aspect visuel et ergonomique s'avère utile. Finalement une poursuite des expérimentations pour toutes les périodes de l'année est envisagée.

En bref, l'énergie solaire est donc un choix d'envergure face à la problématique de l'énergie. Madagascar possède un très bon gisement, il suffit de bien l'exploiter.

Références Bibliographiques

- [1] BOUHEDIBA MALIKA, Simulation thermique d'une maison solaire pour la production d'eau chaude sanitaire, Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme Master en Génie Mécanique, 2012, Page 21, 37-43
- [2] Marie France BALESTAT et Jean Pierre MARATREY, Les système de coordonnées, Club d'Astronomie Quasar 95, Page 2
- [3] THOMAS LETZ, Formation solaire thermique, Institut National de l'Energie Solaire, 2008, Page 3
- [4] SAADI SOUAD, Etude des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur plan , Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Magistère en Physique spécialité energies renouvelables, 2010, Page 16
- [5] JACQUES TELLER, Confort thermique, 2012, Page 4
- [6] BENKHELIFA Abdelaziz, Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur, 2012, Page 5
- [7] AKERMI MUSTAPHA, Contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de TIARET et ADRAR, Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Physique Ecole Doctoral Energies Renouvelables, Page 49
- [8] FERDJANI AHMED TAHA, Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Génie Mécanique, 2013, Page 30
- [9] RAKOTONIAINA Solofo Hery, Notion sur le rayonnement solaire, Cours Module 3 Mention Génie Electrique, 2015
- [10] De l'électricité verte pour un million de ruraux à Madagascar ; Document du Ministère de l'Énergie et des Mines et la Fondation Énergies pour le Monde ; Page 22
- [11] Yves JANNOT et Christian MOYNE, Transferts thermiques, 2012
- [12] Technique de l'Ingénieur ; Mécanique des fluides ; Écoulements non permanents monodimensionnels en mécanique interne / A 1870

- [13] Yves JANNOT, Thermique solaire, Mars 2011, Page 64
- [14] BERCHIDE ABDESLAM, Etude et expérimentation d'un chauffe-eau solaire de type stockeur-capteur, Mémoire de Master option Energétique et Matériaux, 2011, Page 20-21
- [15] Jean PHILIPPE, Les aides financières tentent de faciliter l'implantation en France des chauffe-eau solaires, technologie inégalement répandue en Europe, 2003, Page 7
- [16] S. BEKKOUCHE, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, Thèse doctorat, 2008, Page 42
- [17] S. SAMI, D. LAFRI, A. HAMID, M. BELHAMEL, Etude du comportement thermique d'une installaiton de chauffage d'eau collective, Page 255-256

Webographies

- [18] : <http://cral.univ-lyon.fr> : La mesure du temps ; Consulté le 04 Août 2016
- [19] : <http://perso.limsi.fr> : Calculs astronomiques simplifiés ; Université Paris-Sud Orsay – Master PAM 2ème année – Energies renouvelables – Energie solaire thermique, Vincent BOURDIN 2014 ; Consulté le 04 Août 2016
- [20] : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/> : Chapitre II: Gisement solaire ; Consulté le 10 Août 2016
- [21] : www.scei-concurs.fr : Prévission énergétique des centrales photovoltaïques; Consulté le 10 Août 2016
- [22] : www.meteo.be : Nébulosité ; Consulté le 10 Août 2016
- [23] : www.ac-reims.fr : Le chauffe-eau solaire fonctionnant en thermosiphon ; Extraits du n° 424 de la revue chaud-froid-plomberie ; Consulté le 27 Juillet 2016
- [24] : www.solaire-diffusion.eu : Chauffe-eau solaire en thermosiphon, Consulté le 27 Juillet 2016
- [25] : www.cder.dz: Le vitrage solaire ; SEMAI Hakim ; Attaché de Recherche ; Division Solaire Thermique et Géothermie – CDER ; Consulté le 15 Juillet 2016
- [26] : www.apper-solaire.org : Boucle de Tickelman ; Consulté le 15 Juillet 2016
- [27] : www.geo-energie.com : Le liquide caloporteur ; Ingénierie et Design ; Consulté le 15 Juillet 2016

ANNEXES



ANNEXE 1 : La conductivité thermique de quelques matériaux parmi les plus courants utilisés dans les systèmes de chauffe-eau solaire.

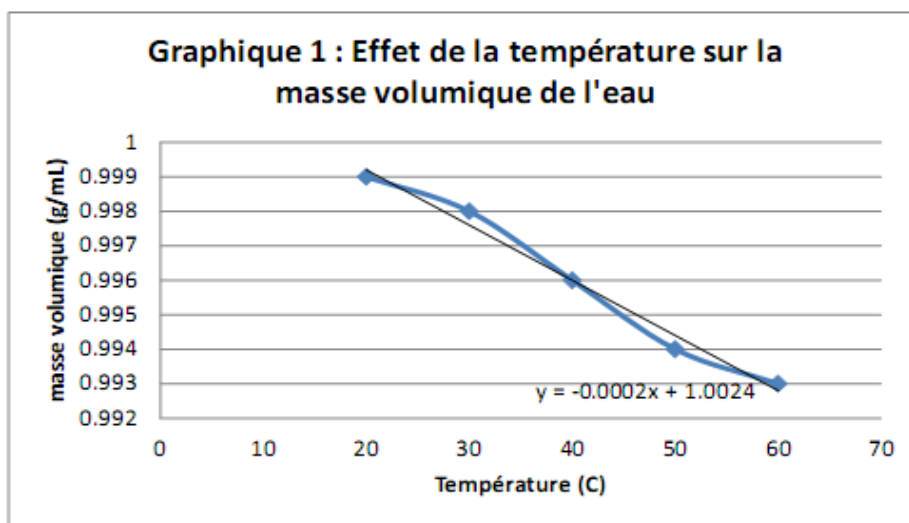
Matériaux	λ exprimé en $[\text{W.m}^{-1}.^{\circ}\text{C}^{-1}]$
Argent	419
Cuivre	386
Aluminium	204
Acier doux	45
Acier inox	15
Glace	1,88
Béton	1,4
Brique terre cuite	1,1
Verre	1,0
Eau	0,60
Carton	0,07
Plâtre 0,48	0,48
Amiante 0,16	0,16
Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23
Liège	0,044-0,049
Laine de roche	0,038-0,041
Laine de verre	0,035-0,051
Polystyrène expansé	0,036-0,047
Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Polystyrène extrudé	0,028
Air	0,026

ANNEXE 2 : Propriétés de l'eau

Identification	Eau : H ₂ O
Apparence	Liquide incolore, inodore et insipide
pKa = pKe	14,0
Température de fusion	0° C à 1,01325 bar
Température d'ébullition	100°C à 1,01325 bar
Masse volumique	1000 kg/m ³ à 4 °C
Pression de vapeur saturante	12,4 mbar à 10 °C
Conductivité thermique	0,604 W/m.K à 20°C
Chaleur spécifique massique Cp	4185,5 J/kg.K à 15°C et 101,325 kPa
Viscosité dynamique	1 ,002.10 ⁻³ Pa.s à 20°C
	0,547.10 ⁻³ Pa.s à 50°C
	0,2818.10 ⁻³ Pa.s à 100°C

Variation de la masse volumique de l'eau en fonction de la température

Température °C (±0,5)	Masse volumique g/mL (±0,6)
20,0	0,999
30,0	0,998
40,0	0,996
50,0	0,994
60,0	0,993



La pente de la droite dans le graphique montre que la masse volumique varie en moyenne de (-0,0002) g/mL par °C.

AUTEUR : RABENANDRASANA Ravaka Nandrianina

TITRE : « CHAUFFE-EAU SOLAIRE À THERMOSIPHON
À CAPTEUR PLAN VITRÉ : Conception, détermination des
conditions optimales d'utilisation et d'expérimentation ».

NOMBRE DE PAGES : 98

NOMBRE DE TABLEAUX : 33

NOMBRE DE FIGURES : 41



RESUMÉ

La recherche du confort thermique a entraîné le développement des systèmes énergétiques utilisant différentes ressources. Madagascar possède un gisement solaire important. La maîtrise de cette source d'énergie paraît donc être la meilleure solution pour résoudre le problème énergétique du pays. Les chauffe-eaux qu'ils soient électriques ou solaires ne sont pas encore accessibles à la majorité de la population malgache. Le présent mémoire s'est donc focalisé sur la conception et la réalisation d'un chauffe-eau solaire à coût réduit. L'étude du dimensionnement, l'utilisation adéquate des matériaux ainsi que la détermination de l'orientation et de l'inclinaison optimale du capteur, sont les bases de la conception. Les résultats des tests menés sur la période du 06 au 11 Septembre 2016 sont satisfaisants. La température de l'eau à la sortie du chauffe-eau est environ de 50°C. Le chauffe-eau a donc un bon rapport efficacité-prix. L'expérimentation s'est déroulée pendant l'hiver. Une poursuite des tests pendant la période estivale est envisagée pour déterminer les performances de l'installation sur une année entière.

Mots clés : Energie, Gisement solaire, chauffe-eau solaire, matériaux, thermosiphon

ABSTRACT

The research of thermal comfort has led to the development of energy systems using various resources. Madagascar has a significant solar potential. So, mastering this source of energy seems to be the best way to solve the energy problems in our country. However, solar water heater and electric water heater are not yet accessible to the majority of the Malagasy population. This memory has therefore focused on the design and implementation of an affordable less expensive solar water heater. The study of the solar potential, solar water heater systems, including the design and construction of equipment in order to optimize device performance, and of course proceeding several couple of tests, were the steps taken during this work. The values of the temperatures taken during the period of the 6th to the 11th of September is satisfying. The final aim is to have a good price-quality rate about the solar water heaters. The experimentation period was during the winter; so, continuing the tests during the summer will be necessary to have the performance of installation for a whole year use.

Keywords: Energy, Solar potential, solar water heater, materials, thermosiphon

Rapporteur: RAHELIARILALAO Bienvenue, Professeur Titulaire

Adresse Email de l'auteur: rabenandrasana0429ravaka@yahoo.com