

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

PRESENTE PAR :

HODONOU Albert

ANNEE 1993-1994

CONCEPTION, CONSTRUCTION ET
EVALUATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE
A CONCENTRATION
CYLINDRO-PARABOLIQUE
POUR EAU CHAUDE SANITAIRE

Mention : **BIEN**

Encadrement

Y. COULIBALY

E. I. E. R.
Enregistré à l'Arrivée le 23 JUN 1994, N° 223/94

DEDICACE

Je dédie ce mémoire de fin d'étude à :

- Mon père et ma mère qui m'ont donné jour et qui, par la grâce de DIEU ont pu assurer mes études et veiller à ma réussite.
- Ma bien aimée née ZONGO Angelina qui m'a moralement et spirituellement soutenu durant tout ce travail.
- Ma fille Esther Alihonou qui a bien voulu accepter cette séparation en vue d'un résultat positif
- A tous mes parents et amis qui, de près ou de loin ont toujours espérés en ma réussite.

REMERCIEMENTS

J'exprime toute gratitude et mes remerciements :

- A Monsieur Jacques André EBERHARD Directeur de l'Atelier ATESTA qui m'a accueilli au sein de son organisme et m'a placé dans l'excellentes conditions de travail.

Mes remerciements vont aussi à l'égard de Monsieur Yézouma COULIBALY qui a veiller sur le bon déroulement de ce projet.

Je n'oublie pas monsieur Pierre et l'ensemble du personnel ATESTA qui, d'une façon ou d'une autre ont contribués au succès de ce mémoire.

RESUME

Le travail présenté par ce présent rapport est le fruit d'une étude d'un chauffe-eau solaire cylindro-parabolique. Il fait en premier lieu l'étude de faisabilité du projet de laquelle résulte la décision de réaliser un chauffe-eau solaire cylindro-parabolique de type standard. Le dimensionnement et la réalisation de ce chauffe-eau ayant fait l'objet d'une seconde partie a fait paraître un chauffe-eau de capacité 115 litres et d'encombrement 180 x 110 x 100 cm.

Une évaluation des performances de ce chauffe-eau a montré que celui-ci peut chauffer de l'eau jusqu'à 80 °C et que son rendement global interne peut atteindre 70%.

Une étude économique à ensuite permi d'estimer le coût de vente d'une capacité de 120 litres du présent modèle à 200.000 F CFA

SOMMAIRE

Pages

1. INTRODUCTION.....	1
2. DEFINITION ET FORMULATION DU PROBLEME.....	3
3. ETUDE DE FAISABILITE.....	4
3.1. Définition des objectifs.....	4
3.2. Définition des contraintes.....	4
3.3. Recherche de solution.....	5
3.3.1. Variantes de la conception.....	5
3.3.2. Etude de factibilité.....	7
3.3.3. Etude de factibilité pondérée.....	9
3.4. Table de décision.....	9
4. DIMENSIONNEMENT.....	10
4.1. Dimensionnement du réservoir cylindrique.....	10
4.2. Dimensionnement du concentrateur d'énergie.....	10
4.2.1. Calcul de la surface de captation.....	10
4.2.2. Calcul de la surface d'absorption.....	12
4.2.3. Détermination du ratio de concentration.....	13
4.2.4. Détermination des expressions caractéristiques des profils paraboliques.....	13
4.3. Tableau récapitulatif des caractéristiques des C.E.S.....	20
4.4. Procédé de fabrication	20
4.5. Vérification de la stabilité des appareils.....	21
4.5.1. Stabilité du type C.P.C.....	22
4.5.2. Stabilité du type standard.....	23
4.6. Calcul de la résistance mécanique des matériaux.....	23

5. EVALUATIONS.....	25
5.1. Evaluation techniques.....	25
5.1.1. Evaluation technique des C.E.S cylindrique-paraboliques.....	28
5.1.1.1. Evaluation de l'esthétique.....	28
5.1.1.2. Evaluation du fonctionnemnt.....	29
5.1.2. Evaluation du fonctionnement des C.E.S. de type capteur plan (CITE 100).....	39
5.1.3. Evaluation du fonctionnemnt du C.E.S. de type capteur réservoir.....	43
5.1.4. Critère de comparaison : le rendement.....	45
5.2. Evaluations économiques.....	48
5.2.1. Calculs économiques du type C.P.C.....	49
5.2.2. Calculs économiques du type standard.....	51
5.3. Comparaison des C.E.S testés.....	52
6. RECOMMANDATION ET CONCLUSION.....	53
6.1. Recommandations.....	53
6.1.1. Au constructeur.....	53
6.1.2. A l'utilisateur.....	54
6.2. Conclusion.....	55

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la formation d'Ingénieurs de l'Équipement Rural, l'École Inter-États d'Ingénieurs de l'Équipement Rural (E.I.E.R.) a institué un mémoire de fin d'étude à la fin des cinq années de formation scientifique.

Ce mémoire de fin d'étude a pour objet de permettre au futur Ingénieur de réunir, dans un espace de temps réduit (3 mois), tous les outils scientifiques pour réaliser tout seul un travail au choix.

Le notre s'intitule conception, construction et évaluation d'un capteur réservoir solaire cylindrique à concentration parabolique pour eau chaude sanitaire. Ce thème proposé par l'Atelier Énergie Solaire et Technologie Appropriée (ATESTA) a fait l'objet de notre choix malgré les contraintes de temps auxquelles nous faisons face à cause des bases scientifiques sur lesquelles il repose. En effet, le bon déroulement de ce projet nécessite un champ de connaissance assez vaste qui part des mathématiques à la menuiserie en passant par la mécanique et les transferts thermiques

Dépuis sa création en 1985, ATESTA travaille au Burkina Faso dans le but de promouvoir l'énergie solaire et les technologies appropriées. Il participe activement à l'effort du gouvernement et du pays pour lutter contre les différentes causes de la désertification. La fabrication de produits utilisant l'énergie solaire (chauffe-eau, séchoirs, lampes...) offre une alternative intéressante face aux problèmes énergétiques du pays (déboisement, prix élevé du courant électrique, etc...).

ATESTA dispose aujourd'hui d'une gamme assez variée de chauffe-eau solaires. Les deux familles (monobloc et à éléments séparés) y sont fabriquées.

Les chauffe-eau solaires à éléments séparés présentent de gros avantages face aux déperditions nocturnes mais reviennent très chers à cause de la complexité de leur fabrication.

Les monoblocs (type capteur plan CITE et type capteur plan réservoir) quant à eux sont relativement peu chers mais favorisent beaucoup de pertes thermiques pendant la nuit.

Face à la dévaluation du francs CFA où l'utilisateur se voit "obligé" de se tourner vers les monoblocs, il est nécessaire pour le constructeur de chercher à améliorer les performances techniques de ces derniers.

C'est ainsi que l'Atelier ATESTA s'est proposé de concevoir, dimensionner et réaliser des capteurs réservoirs à concentration. Ce qui diminue la surface radiative nocturne par rapport à la surface absorbitive diurne.

2. DEFINITION ET FORMULATION DU PROBLEME

Après avoir attentivement lu le sujet qui nous a été proposé à savoir : Conception, Construction et Evaluation d'un capteur réservoir solaire cylindrique à concentration parabolique pour eau chaude sanitaire, nous avons compris qu'il était question pour nous de concevoir un chauffe-eau solaire dont le réservoir est cylindrique et le concentrateur d'énergie parabolique.

Après un entretien avec le Directeur de l'Atelier énergie solaire et de la technologie appropriée, nous nous sommes rendu compte qu'il s'agissait plutôt de concevoir, dimensionner^{ment} et tester^{er} un capteur réservoir solaire cylindrique à concentration cylindro-parabolique. Ce que nous appelons simplement un chauffe-eau solaire cylindro-parabolique.

La principale difficulté de cette étude est de trouver une méthode efficace de construction d'une cylindro-parabole dans des conditions économiques acceptables.

3. ETUDE DE FAISABILITE

3.1. Définition des objectifs

Comme précédemment vu dans le chapitre 2, nous sommes amenés à concevoir, dimensionner et construire un chauffe-eau solaire cylindro-parabolique. Avant de commencer tout dimensionnement il est nécessaire de savoir la quantité d'eau chaude à fournir. Pour cela, nous nous imposerons une famille de trois personnes. A savoir un homme, une femme et leur enfant. Pour satisfaire les besoins d'un tel couple, il faut en moyenne 100 litres d'eau chaude sanitaire.

L'objectif principal que nous recherchons est d'amener une quantité de 100 litres d'eau au moins à une température de 60 °C en moyenne en fin de journée par un dispositif cylindro-parabolique dans des conditions économiques acceptables.

3.2. Définition des contraintes

Les principales contraintes sont dûes à l'environnement (quantité d'énergie disponible dans le mois le plus défavorable de l'année) et aux conditions sociales des populations. La contrainte liée à l'esthétique de l'appareil s'avère non moins négligeable. En effet, en même temps que les populations manifeste le désir d'obtenir des appareils à moindre coût, elles formulent généralement les vœux ci-dessous :

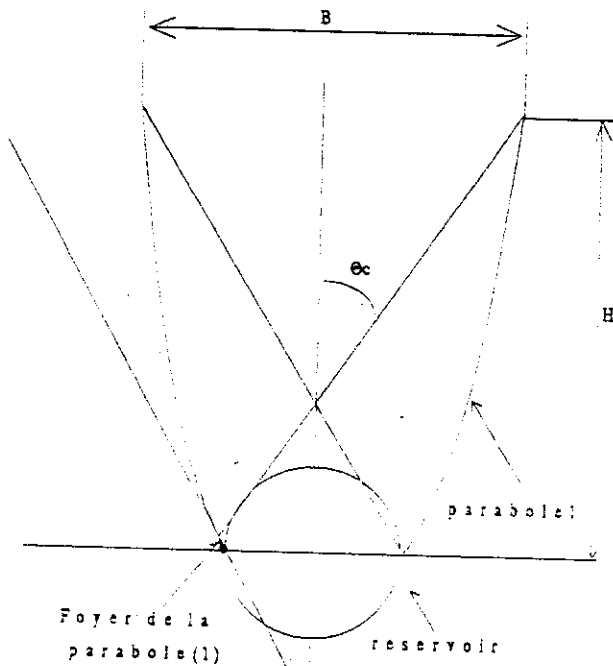
- bon fonctionnement
- aspect esthétique non négligeable
- coût de revient dans l'intervalle 150.000 à 200.000 francs
- durée de vie de l'appareil : 10 ans au moins
- capacité : 100 litres au moins.

3.3. Recherche de solution

3.3.1. variantes de la conception

Dans la recherche de solution, nous avons envisagé 4 solutions ci-dessous décrites:

1^{ère} Solution :



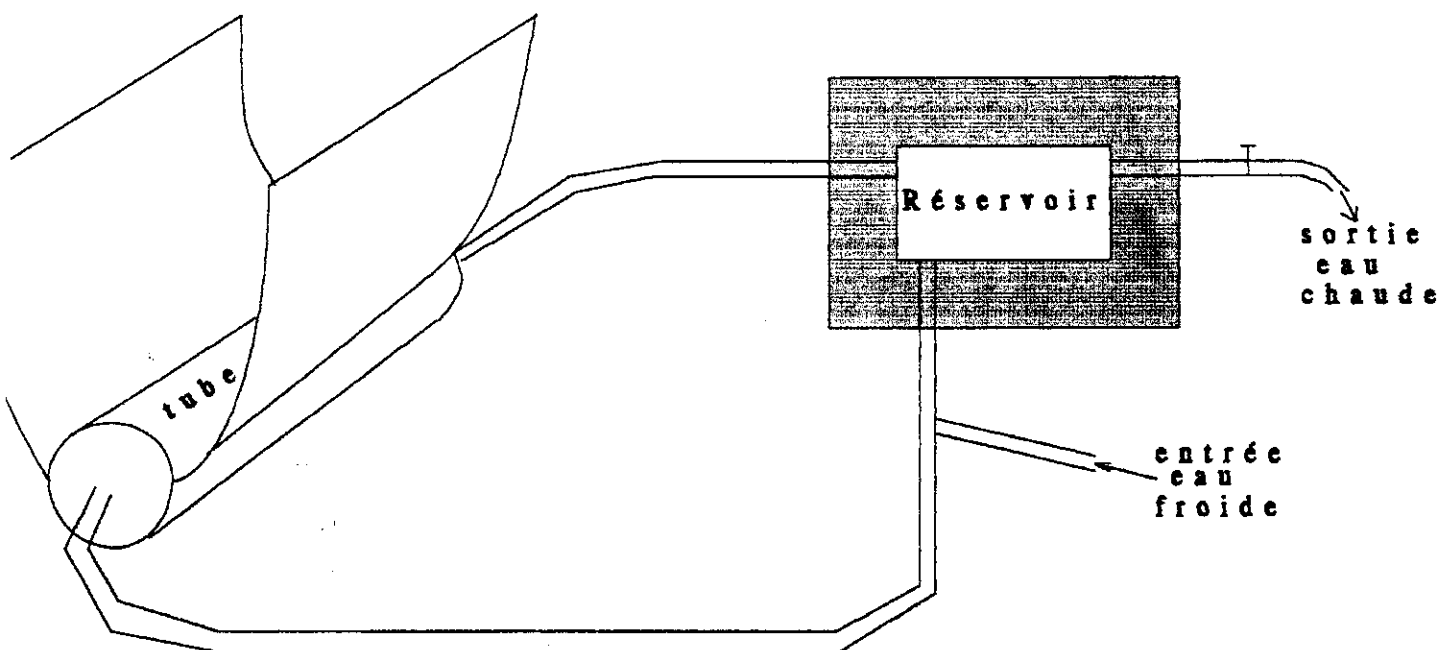
Capteur réservoir de type C.P.C. (compound parabolic concentrators)

Il s'agit d'un concentrateur dont la géométrie est constituée de deux branches paraboliques adjacentes. Les deux paraboles sont identiques.

Chaque parabole a son axe focal supporté par la génératrice opposée de l'absorbeur. Le réservoir de stockage est disposé comme l'indique la figure ci-contre.

2^{ème} Solution :

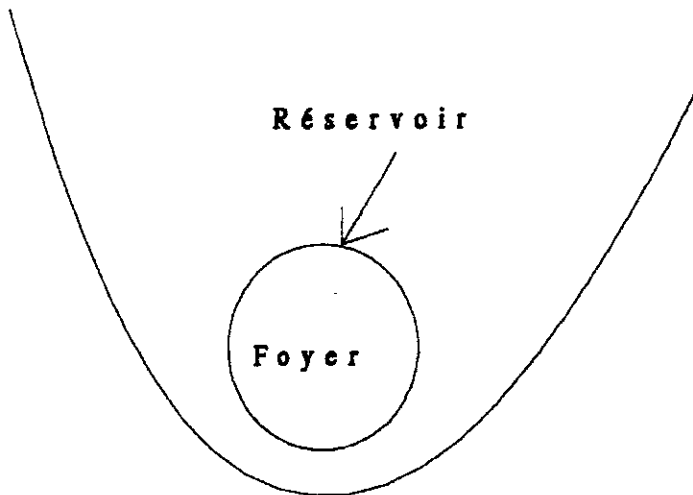
Chauffe-eau solaire de type C.P.C. avec réservoir isolé et circulation à thermosiphon.



Il s'agit du même système que celui de la première solution à la seule différence que le réservoir est totalement isolé et la circulation se fait par thermosiphon du tube situé dans la zone de haute température vers le réservoir. Il fait partie de la famille des monoblocs car le fluide caloporteur est le même que celui du réservoir (l'eau)

3^{ème} Solution

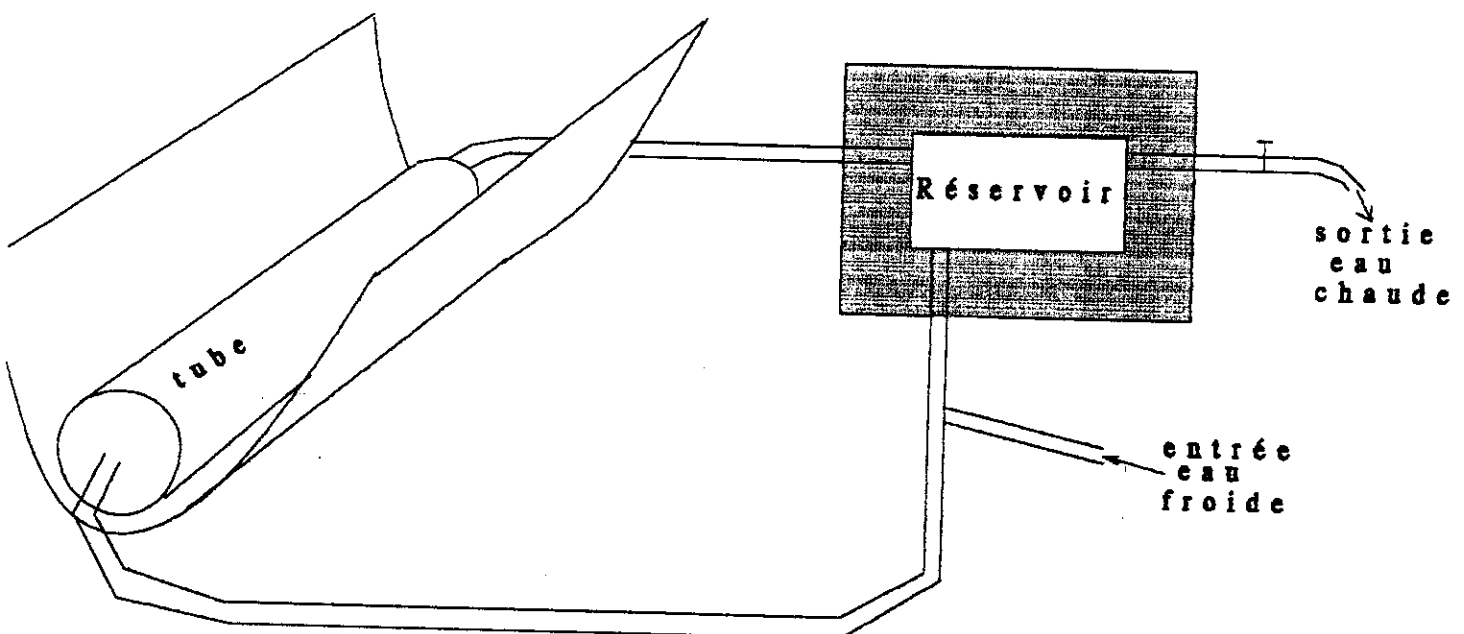
Capteur réservoir cylindro-parabolique de type standard



Il est constitué d'une seule parabole avec le réservoir disposé de telle sorte que son axe focal se confonde avec l'axe du réservoir cylindrique

4^{ème} Solution :

Chauffe-eau solaire cylindro-parabolique de type standard avec circulation par thermosiphon.



Il s'agit du même système que celui de la troisième variante à la seule différence que la circulation se fait par thermosiphon d'un tube concentrique à l'axe focal vers le réservoir totalement isolé.

Remarque

Dans Chacune de ces solutions, il peut encore exister une ou plusieurs sous-variantes : On peut par exemple associer à chaque solution une résistance additionnelle d'appoint. Cependant, pour rester dans le cadre de notre étude, nous n'avons pas examiné toutes ces sous-variantes de façon détaillée.

Le choix d'une variante parmi ces quatres nécessite une étude sérieuse qui prend en compte tous les critères (coût, esthétique, pertes termiques nocturnes, gain de température diurne, temps de réalisation, encombrement..)

3.3.2. Etude de factibilité

Cette étude sera résumée dans le tableau ci-dessous et la décision d'acceptation ou de rejet d'une solution sera fonction du "poids" de chaque critère. En effet, les critères les plus importants sont le rapport performance / coût de réalisation et les pertes nocturnes.

	AVANTAGES	INCONVENIENTS
1 ^{re} solution	<ul style="list-style-type: none"> - Bon chauffage diurne - Fabrication facile - Coût acceptable 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes nocturnes élevées
2 ^{me} solution	<ul style="list-style-type: none"> - Assez bon chauffage diurne - Pertes nocturnes réduites 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabrication difficile - Coût élevé
3 ^{me} solution	<ul style="list-style-type: none"> - Bon chauffage diurne - Fabrication facile - Coût acceptable 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes nocturnes élevées
4 ^{me} solution	<ul style="list-style-type: none"> - Assez bon chauffage diurne - Pertes nocturnes réduites 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabrication difficile - Coût élevé

Il apparaît donc après cette étude sommaire que la variante (1) et (3) sont retenues. Cependant, un critère très important (pertes thermiques nocturnes) est défavorisé. Nous allons donc adopter des sous-variantes de ces solutions qui, sans trop modifier les autres critères améliore le critère des pertes thermiques nocturnes.

Il faudra pour cela ajouter une vitre à ces capteurs réservoirs pour avoir l'effet de serre d'une part et isoler la moitié inférieure du réservoir d'autre part.

Ces sous-variantes seront les solutions (5) et (6) et auront respectivement pour nom : chauffe-eau solaire cylindro-parabolique de type C.P.C. puis chauffe-eau solaire cylindro-parabolique de type standard.

Reprenons l'étude de faisabilité en affectant un poids à chaque critère. Nous imposerons pour cela un coefficient de sécurité de 1,5 qui sera utilisé dans toute l'étude. Ce coefficient servira également à déterminer les pondérations absolues.

Tableau de recherche de pondération

Critères	gain diurne	perte nocturne	Encombrement	fabrication	Temps de réalisation	Coût de réalisation	Poids de l'appareil	esthétique	Total
Pondération relative (%)	20	20	4	10	10	20	6	10	100
Pondération absolue	0,30	0,30	0,06	0,15	0,15	0,30	0,09	0,15	1,5

3.3.3. Etude de factibilité pondérée

Ce tableau est déduit du tableau précédent et de l'étude de faisabilité

CRITERES DE CHOIX	SOLUTIONS					
	1 ^{er} sol	2 ^e sol	3 ^e sol	4 ^e sol	5 ^e sol	6 ^e sol
gain diurne	0,28	0,20	0,30	0,20	0,27	0,28
perte nocturne	0,10	0,25	0,05	0,25	0,22	0,20
Encombrement	0,05	0,01	0,06	0,02	0,05	0,06
fabrication	0,13	0,03	0,15	0,05	0,13	0,14
temps de réalisation	0,13	0,05	0,15	0,03	0,10	0,12
coût de réalisation	0,30	0,12	0,28	0,15	0,26	0,28
Poids de l'appareil	0,06	0,02	0,09	0,03	0,07	0,08
esthétique	0,15	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15
TOTAL	1,20	0,78	1,23	0,83	1,25	1,31
RANG	4 ^{ème}	6 ^{ème}	3 ^{ème}	5 ^{ème}	2 ^{ème}	1 ^{er}
Décision finale	Rejetée	Rejetée	Rejetée	Rejetée	Rejetée	Retenue

3.4. Table de décision

Il résulte du tableau ci-dessus que seule la solution (6) (chauffe-eau solaire cylindro-parabolique de type standard) sera retenue pour le dimensionnement et la fabrication.

Cependant, sur la demande personnelle du Directeur de l'Atelier ATESTA, nous allons réaliser aussi la 5^{ème} solution (chauffe-eau solaire cylindro-parabolique de type C.P.C.).

Ces deux solutions seront donc étudiées jusqu'à la détermination du coût de revient. Certainement que le critère économique et le rendement pourront convaincre le Directeur du dit Atelier de notre choix.

4. DIMENSIONNEMENT

4.1. Dimensionnement du réservoir cylindrique

ATESTA dispose de feuille de tôle en acier galva et acier inox de 1m x 2m devant servir à la réalisation des réservoirs. Le souhait du Directeur de l'Atelier est de dimensionner un réservoir à partir d'une seule feuille de tôle. Si des capacités plus importantes s'avèrent nécessaires, on procédera à la mise en serie de deux ou plusieurs réservoirs.

Si l'on admet que la feuille de tôle va être enroulée dans le sens de la plus petite dimension avec un recouvrement maximum de deux centimètres (zone de jonction), on aura un fût de circonférence 98 Cm et de hauteur 1,60 m. Les 40 Cm prélevés sur la longueur serviront à la réalisation des différentes bases.

Il en résulte les caractéristiques ci-dessus.

- * **Diamètre = 30 centimètres**
- * **hauteur = 1,60 mètres**
- * **capacité = 115 litres.**

4.2. Dimensionnement du concentrateur d'énergie

4.2.1. Calcul de la surface de captation

Il s'avère nécessaire de faire d'abord un bilan énergétique. La puissance absorbée (P_a) sera égale à la puissance utile transmise à l'eau (P_u) plus les pertes thermiques et optiques (P'). On se proposera pour cela une température de sortie désirée. Nous

choisirons dans notre cas 60 °C pour le mois le moins ensoleillé de l'année. L'analyse des données météorologiques à montré que le mois de Décembre est le mois le moins ensoleillé avec une énergie de rayonnement moyenne E de 5,2 kWh/m² j (sur une surface horizontal).

Si on note par C la chaleur massique de l'eau, S la surface de captation de l'énergie et m la masse de l'eau, pour faire passer de l'eau d'une température θ_e à une température θ_s on a :

$$E.S = m.C.(\theta_s - \theta_e) + P'$$

Si de plus, on admet que les pertes (P') constituent une fraction (1- η) du rayonnement global incident, on aura :

$$\eta.E.S = m.C.(\theta_s - \theta_e)$$

Si l'on se propose de prendre un rendement de l'ordre de 55% pour un prédimensionnement, on aura :

$$0,55 .E.S = m.C.(\theta_s - \theta_e)$$

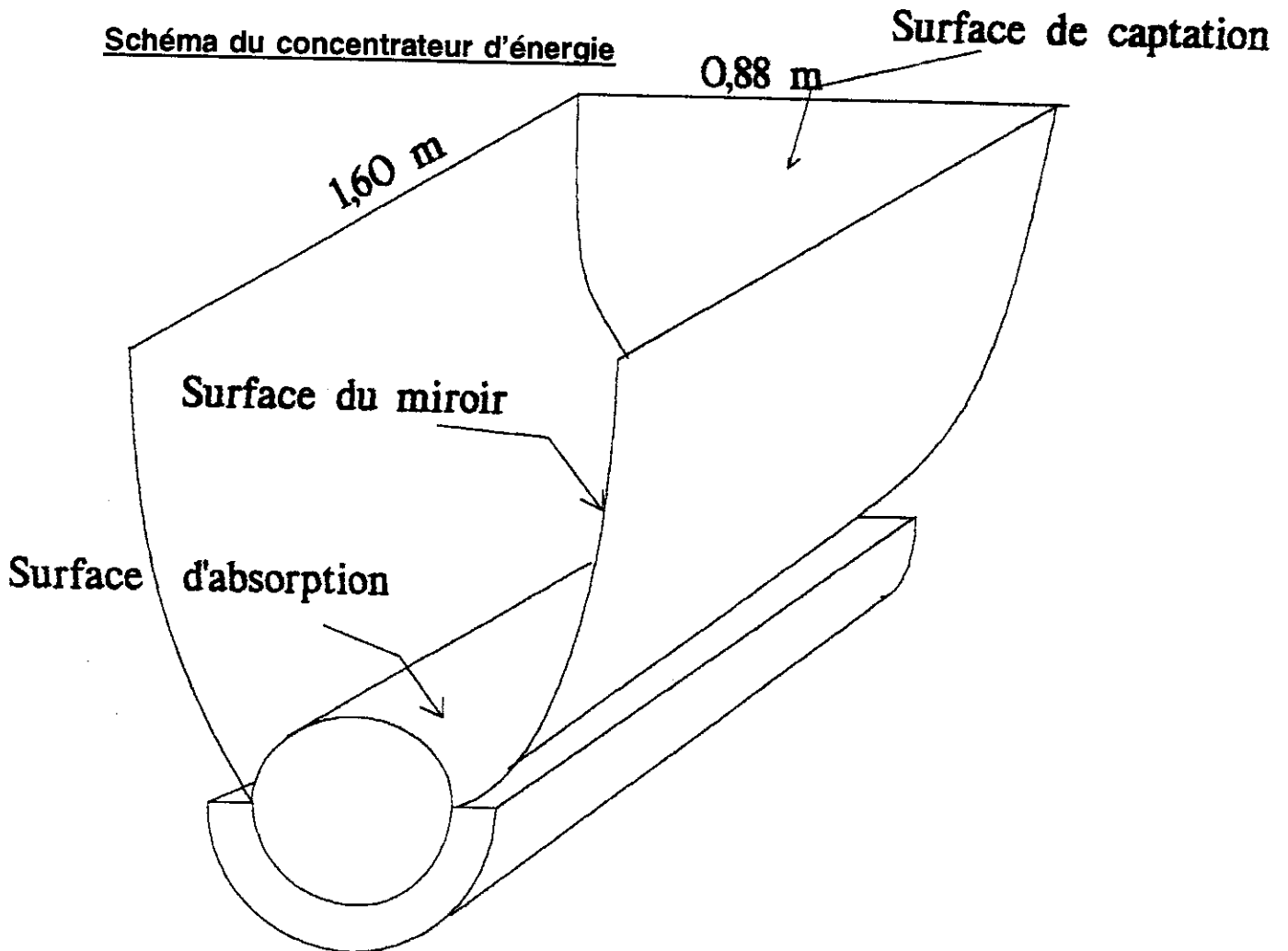
$$\text{et par suite } S = m.C.(\theta_s - \theta_e)/0,55.E$$

$$\text{Soit } S = 1,1625 \times 115 \times 1 \times (60 - 30)/(0,55 \times 5200)$$

Il en résulte une surface de captation S de 1,4 m²

Connaissant la longueur de notre réservoir (1,60 m) qui sera en même temps le capteur, on en déduit la largeur de la surface de captation

Largeur de la surface de captation = 0,88 m



4.2.2. Calcul de la surface d'absorption

Les études précédentes (étude de faisabilité) montrent que seule une partie du réservoir cylindrique constitue le capteur. L'autre partie étant isolée.

On en déduit la surface d'absorption

$$S_a = \Pi \times 0,3 \times 1,60/2$$

soit **$S_a = 0,734 \text{ m}^2$**

Cette surface est la surface réelle. Les calculs se feront avec une surface apparente plan ramené à l'horizontale. On assimilera alors la surface d'absorption à une surface rectangulaire de section $1,6 \times 0,3 \text{ m}$. **Soit une surface apparente de $0,48 \text{ m}^2$.**

C'est cette valeur de la surface d'absorption qui sera utilisée pour la suite.

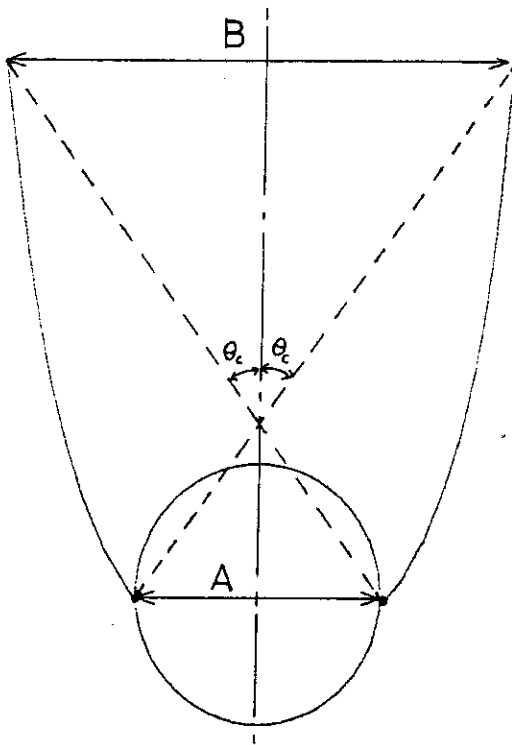
4.2.3. Détermination du ratio de concentration

C'est le rapport entre la surface de captation et la surface d'absorption apparente.

Notre ratio de concentration C s'élève à 3,0 (ratio théorique)

4.2.4. Définition des expressions caractéristiques des profils paraboliques

a). Etude du type C.P.C.



$$b = 0,88 \text{ m}$$

$$a = 0,30 \text{ m}$$

il est constitué de 2 paraboles adjacentes.

Cette configuration augmente le ratio de concentration tout en réduisant l'angle d'ouverture. Cependant, le coefficient de concentration croît avec l'élanement H. ce qui augmente considérablement la taille des branches paraboliques.

on montre pour ce type que l'ouverture

$$B = A/\sin\theta_c \text{ Il en résulte que } \theta_c = \text{Arcsin} (A/B)$$

$$\text{Soit } \theta_c = 20^\circ$$

Le ratio de concentration du type CPC est donnée par la formule $C_i = \frac{1}{\sin \theta_c}$

Il en résulte un ratio C_i de 2,9.

la figure 8.4.4. présenté ci-après donne le ratio de concentration en fonction de l'élanement H et l'ouverture B des paraboles.

Concentration ratio:

$$C_i = \frac{1}{\sin \theta_c}$$

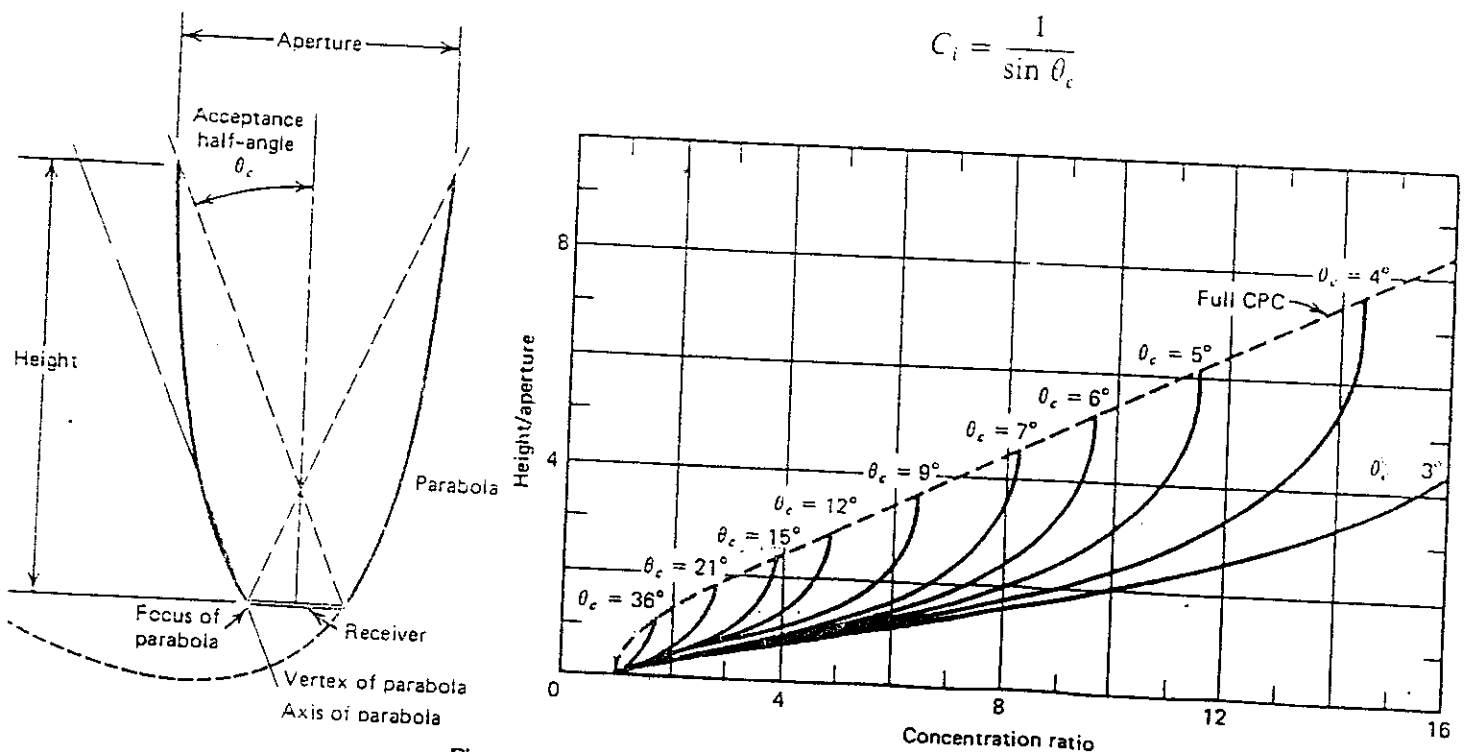
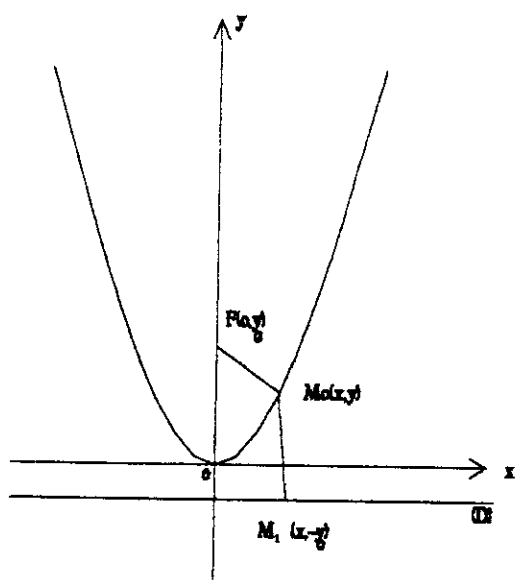


Figure 8.4.4 Ratio of height to aperture for full and truncated CPCs as a function of C and θ_c . Adapted from Rabl (1976b).

Pour un angle d'ouverture θ_c de 19° et un ratio de concentration C_1 de 2,9 il faut avoir un rapport H/B de 1,9 pour un bon fonctionnement.

Il en résulte un élanement H de 1,70 m pour les branches paraboliques.

Connaissant les principales caractéristiques des paraboles du type C.P.C., il nous reste à déterminer l'allure de chaque parabole à partir de l'expression mathématique de celui-ci :



Or une parabole se définit comme étant le lieu géométrique des points d'un plan situés à égale distance d'une droite fixe (D) et d'un point fixe F rapelé foyer

On a donc distance (F, M_0) qui est égale à la distance (M_0, M_1) .

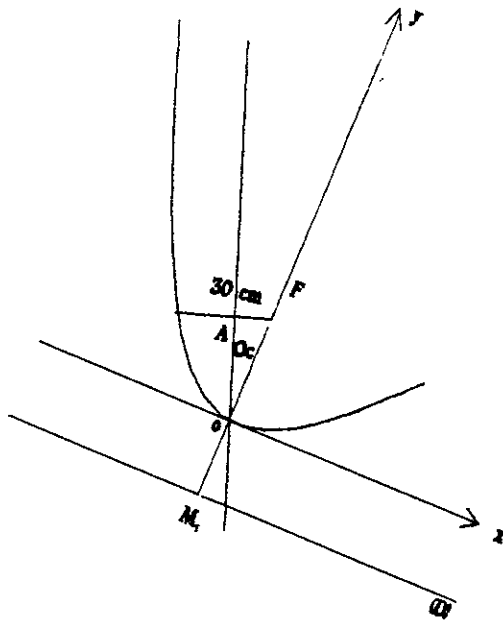
Si l'on se propose de choisir les axes (O,x) et (O,y) passant par le sommet de la parabole comme repère on aura :

$$FM_0 = M_0M_1 \iff x^2 + (y - y_0)^2 = (y + y_0)^2$$

Il en résulte l'expression générale d'une parabole en fonction de l'ordonnée du foyer.

$$\text{soit } y = \frac{1}{4y_0} x^2$$

Recherche de l'ordonnée y_0 (type CPC)



$$\begin{aligned} \theta_c &= 20^\circ \\ AF &= 15 \text{ cm} \\ FS &= SM_1 \\ Y_0 &= FS = SM_1 \end{aligned}$$

Il résulte de la construction graphique que $\sin \theta_c = AF/FS$

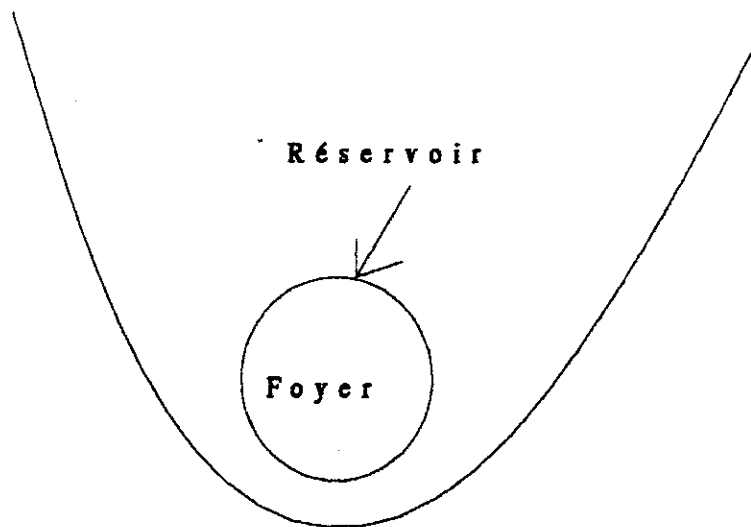
On déduit que $y_o = FS = AF/\sin \theta_c$

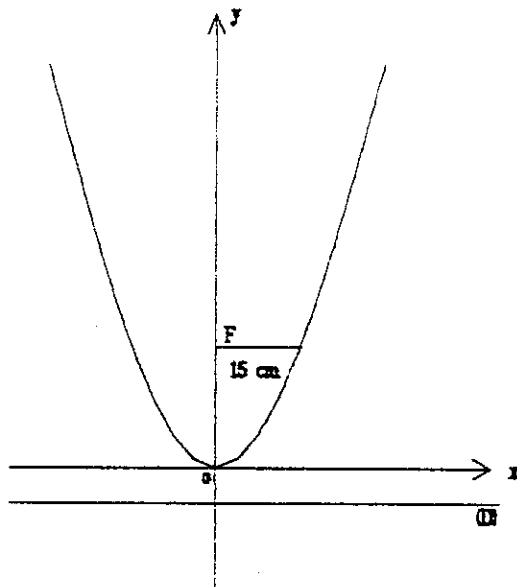
Soit $Y_o = 44 \text{ cm}$

Il en résulte l'expression générale de la parabole dans le repère (S, x, y)

$$Y = \frac{1}{176} x^2$$

b). Etude du type standard





$$OF = y_0$$

Dans le but de pouvoir isoler la moitié inférieure du réservoir, il est nécessaire de rapprocher le foyer optique de la parabole vers le sommet

Si nous voulons faire coïncider l'axe du réservoir avec l'axe optique, il nous faudra résoudre l'équation $f(15 \text{ cm}) = y_0$ car la parabole va se fixer à 15 cm du foyer)

$$\text{soit } \frac{1}{4y_0} (15)^2 = y_0$$

la résolution donne $y_0 = 7,5 \text{ cm}$

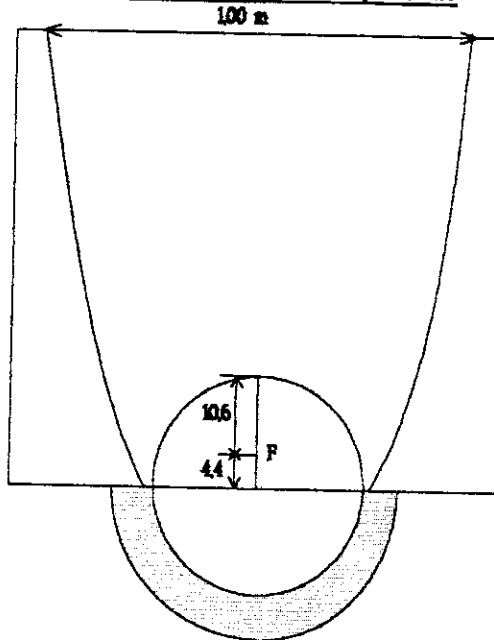
Une vérification de la hauteur totale de la branche parabolique nous donne 83 cm si nous considérons une ouverture de 1 mètre.

L'objet de ce second type étant de réduire l'élançement des branches paraboliques tout en gardant les mêmes performances, il y a lieu de jouer sur le paramètre y_0 .

Si nous imposons $y_0 = 10 \text{ cm}$, nous aurons l'axe du réservoir qui sera situé à 4,4 cm en dessous de l'axe optique. Cette conception n'est pas gênante puisque les rayons vont converger vers ce lieu et seront interceptés par le capteur pour leur conversion

thermique puis seront retransmis à l'eau et à la nature.

Schéma du dispositif



Le foyer est situé à 10,6 Cm de la génératrice supérieure. Les erreurs de fabrication pourraient loger l'axe focale dans un cylindre de diamètre allant de 2 à 5 Cm.

Il en résulte l'expression mathématique de la parabole du type standard.

$$y = \frac{1}{40} x^2$$

La hauteur totale des branches paraboliques sera alors de 62,5 cm de laquelle il faut soustraire la partie non prise en compte.

4.3. Tableau récapitulatif des caractéristiques

DESIGNATION	CYLINDRO- PARABOLIQUE DE TYPE C.P.C.	CYLINDRO- PARABOLIQUE DE TYPE STANDARD
<u>RESERVOIR</u>		
Diamètre (m).....	0,30	0,30
Hauteur (m).....	1,60	1,60
capacité (litre).....	115	115
<u>CONCENTRATEUR</u>		
Surface de captation (m ²)	1,40	1,60
Surface d'absorption (m ²)	0,48	0,48
Ouverture	1,80	1,80
Elancement H (m)	0,88	1,00
Ratio de concentration	1,70	57,0
	2,9	
Expression mathématique	$y = \frac{1}{176} x^2$	$y = \frac{1}{40} x^2$

4.4. Procédé de fabrication

Après ces études préliminaires, nous avons étudié les formes à donner aux différentes pièces qui constituent le C.E.S. pour favoriser une bonne stabilité de l'appareil et un bon agencement des pièces en contact (voir dossier de conception situé en annexe).

Toute la structure porteuse étant en bois, il s'avère nécessaire, pour minimiser les risques d'erreurs, de tracer avec précision à l'aide des expressions mathématiques et à l'échelle 1 les profils paraboliques. Ces profils seront ensuite découpés puis être utilisés pour générer la forme parabolique donnée au bois. Il ne reste plus que des travaux de menuiserie pour fabriquer la structure porteuse.

Le réservoir quant à lui est en acier inoxydable et nécessite des travaux de soudure.

Le support d'isolant est en aluminium et nécessite des travaux de découpage et rivetage.

Toutes les autres pièces sont des éléments d'assemblage et de fixation.

Les caniveaux-eau solaires ainsi conçus ont pour dimensions (longueur x largeur x hauteur)

- 180 x 102 x 200 cm pour le type C.P.C.
- 180 x 110 x 100 cm pour le type standard

4.5. vérification de la stabilité des appareils

Nous supposons que la face la plus grande est soumise à un vent fort qui l'entraîne à basculer. Nous admettrons que notre appareil est stable si, dans les conditions les plus défavorables, la somme des moments stabilisateurs sur celles des moments de reversement est supérieur ou égale à 1,5 (coefficient de sécurité)

4.5.1. Stabilité du type CPC

Si on note par $M_{r/A}$ la somme des moments de reversement par rapport au point A et $M_{s/A}$ la somme des moments stabilisateurs par rapport au point A, on aura :

- $M_{r/A}$ qui sera générée par la poussée du vent et aura pour expression

$M_{r/A} = 1/2.(\rho.v^2.S.l_y)$ où ρ est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$), v la vitesse maximale du vent au sol ($v = 40 \text{ m/s}$), S la surface exposée au vent ($S = 3,6\text{m}^2$) et l_y le bras de levier ($l_y = 1,00\text{m}$)

On en déduit $M_{r/A} = 3800 \text{ N}$

$M_{s/A}$ qui sera généré par le poids de tout l'appareil (avec réservoir vide car condition défavorable) aura pour expression $M_{s/A} = P. l_x$ avec ($P = m.g$) où P est le poids et l_x le bras de levier.

La détermination de P donne $m = 80 \text{ kg}$ et $l_x = 0,51 \text{ m}$. Il en résulte un moment stabilisateur par rapport au point A de 408 N .

On en déduit que $M_{s/A}/M_{r/A} = 0,1 \ll 1$

Le résultat étant inférieur à 1,5 et de surcroît 1, nous pouvons affirmer que l'appareil est instable dans ces conditions.

Si l'appareil doit être déposée simplement dans une cour sans être boulonné a un obstacle plan horizontal, il y a lieu de renforcer le support par deux bois de longueur $6,0 \text{ m}$ pour avoir un bras de levier de $3,0 \text{ m}$. Ce qui est largement suffisant pour assurer la stabilité de l'appareil (rempli d'eau).

La stabilité de l'appareil vide nécessite beaucoup d'investissement et nous conseillons de séparer les deux parties puis les faire couler après chaque vidange (cas où l'appareil est simplement déposé).

4.5.2. Vérification de la stabilité du type standard

En utilisant les mêmes notations que précédemment, on a :

$$P = 5600 \text{ N} ; l_x = 0,55 \text{ m} ; l_y = 0,50 \text{ m} \text{ et } S = 1,8 \text{ m}^2.$$

Il en résulte $M_{r/A} = 950 \text{ N}$ et $M_{s/A} = 350 \text{ N}$. L'appareil est également instable à vide lorsqu'il est posé simplement sur le sol.

Lorsqu'il est plein d'eau $M_{r/A}$ devient 1100 N et le rapport $\frac{M_{s/A}}{M_{r/A}} = 1,2$. On en déduit que l'appareil est très stable car le rapport est supérieur à 1. Cependant cette stabilité peut être jugée insuffisante à cause du coefficient de sécurité choisi (1,5).

Dans tous les cas, cet appareil, une fois d'eau est stable qu'il soit boulonné ou non.

a

4.6. Calcul de la résistance mécanique des matériaux à utiliser

Après avoir achevé le dossier de conception nous avons déterminé les différentes contraintes auxquelles les pièces sont soumises et les avons calculés. Ayant cette valeur, nous avons imposé les conditions minimales admissibles de chaque pièce avec un coefficient de sécurité de 1,5.

Si F est l'effort (en daN) sur une section S (en cm^2). La contrainte dans cette section sera $\sigma = F/S$ (en daN/cm^2). Il en résulte une contrainte minimale admissible

$$\sigma_{\text{adm}} \geq 1,5 \frac{F}{S} \text{ (en daN/ cm}^2\text{)}$$

S

Pour qu'une pièce soit acceptée et utilisée comme élément du C.E.S. cylindro-parabolique, il faut que sa section la plus sollicitée réponde aux normes imposées.

Récapitulons les résultats des calculs dans le tableau ci-dessous.

Tableau récapitulatif des sollicitations

Ref. Pièce	DESIGNATION	NATURE DE LA SOLLICITATION	SECTION (Cm ²)	CHARGE (DAN)	σ_{adm} (daN/Cm ²)	σ_{adm} (daN/Cm ²)
1	Support d'ensemble	compression	32	75	2,3	3,5
		cisaillement	60	100	1,7	
2	Support parabolique	Cisaillement	20	100	5	7,5
3	Élément d'assemblage	compression	20	2500	125	300
		cisaillement	12,5	2500	200	
4	Élément d'équilibrage	Compression	40	20	0,5	0,8
5	support du réservoir	compression	640	150	0,2	0,4
8	Élément de fixation	Traction	0,63	50	79,4	120
		Compression	0,63	50	79,4	
		Cisaillement	0,63	50	79,4	
9	Support de la vitre	compression	1,50	100	67	100
		Torsion	—	—	—	

NB. Le réservoir cylindrique est soumis à de fortes pressions internes mais ne nécessite aucun calcul de résistance des matériaux car il est testé à 10 bars après fabrication.

5. EVALUATION EXPERIMENTALE DES PERFORMANCES DES C.E.S. TESTES

5.1. Test technique

Après la conception et la réalisation des deux types de chauffe-eau solaires cylindro-parabolique, nous sommes passé à une phase d'évaluation où chacune d'entre elles a été testée sur une période de 10 jours. L'expérience consiste à mesurer la température minimale (θ_{\min}) et la température maximale (θ_{\max}) dans le réservoir cylindrique par intervalles de temps réguliers allant de 1 à 2 heures. Les températures ambiantes et le rayonnement ont été également relevés aux mêmes instants t .

Dans le but de pouvoir mener une étude comparative, nous avons expérimenté d'autres types de C.E.S. de la famille des monoblocs. Ce sont les chauffe-eau solaires de type capteur plan à simple vitrage avec circulation à thermosiphon (CITE 100) et celui du type capteur stockeur plan à simple vitrage (capteur réservoir).

Pour chacun de ces 4 chauffe-eau testés, nous avons représenté 5 courbes caractéristiques (graphique 1 à 8) ci-dessous définies :

- Courbe du rayonnement en fonction du temps
- Courbe de la température ambiante en fonction du temps (θ_a)
- Courbe des températures minimum (θ_{\min}) en fonction du temps
- Courbe des températures maximum (θ_{\max}) en fonction du temps
- Courbe des températures moyennes de la masse d'eau du réservoir (θ_{moy}) en fonction du temps.

Méthode de calcul de la température moyenne (θ_{moy})

Ayant un gradient important entre la température maximale (θ_{max}) et la température minimale (θ_{min}) dans le réservoir, nous avons établi une formule empirique de la forme

$$\theta_{moy} = \alpha.\theta_{min} + \beta.\theta_{max}$$

Pour obtenir les coefficients α et β , nous avons mesuré les températures θ_{min} et θ_{max} à deux moments différents de la journée (10 heures et 14 heures). Après ces mesures, nous avons puisé dans un fut de 200 litres un volume équivalant à la capacité de stockage de chaque type de chauffe-eau et avons mesuré la température supposée être la température moyenne.

On obtient les équations ci-dessous.

$$(1). (\theta_{moy})_{10h} = \alpha.(\theta_{min})_{10h} + \beta.(\theta_{max})_{10h}$$

$$(2). (\theta_{moy})_{14h} = \alpha.(\theta_{min})_{14h} + \beta.(\theta_{max})_{14h}$$

La résolution de ce système d'équations nous permet d'obtenir les coefficients α et β correspondant à chaque type de C.E.S..

On obtient $\alpha = \beta = 1/2$ pour le type capteur plan CITE 100 et $\alpha = 1/4$ puis $\beta = 3/4$ pour les 3 autres types.

Il en résulte les deux formules ci-dessous pour la détermination des températures moyennes.

$$(1) \quad \theta_{\text{moy}} = 1/4 (\theta_{\text{min}} + 3\theta_{\text{max}})$$

$$(2) \quad \theta_{\text{moy}} = 1/2 (\theta_{\text{min}} + \theta_{\text{max}})$$

La formule (1) sera utilisée pour les chauffe-eau solaires cylindro-parabolique et celui du type capteur réservoir.

La formule (2) s'appliquera uniquement au type capteur plan CITE 100

REMARQUE

Dans les tableaux ci-après, nous avons ajouté en plus des paramètres ci-dessus définis 3 autres paramètres. Ce sont :

- Le gradient thermique ($\Delta\theta$) défini comme étant la différence entre θ_{max} et θ_{min}
- L'échauffement défini comme étant la différence entre θ_{max} pris à deux dates consécutives.
- L'échauffement cumulé défini comme le cumul des échauffements antérieurs à une date t donnée.

5.1.1. Evaluation technique des chauffe-eau solaires cylindro-parabolique

5.1.1.1. Evaluation de l'esthétique

La notion d'esthétique étant relative, nous avons laissé ces appareils à l'appréciation d'un échantillon de 30 personnes dont 10 de sexe féminin.

Les résultats obtenus ont été reportés dans le tableau ci-dessous.

NOMBRE DE PERSONNES		APPRECIATIONS
FEMMES	08 01 01	- Très esthétique - Esthétique - Assez esthétique
TOTAL	10	
HOMMES	12 05 02 01	- Très esthétique - Esthétique - Assez esthétique - pas esthétique
TOTAL	20	

Une analyse nous permet de dresser le tableau ci-dessous;

APPRECIATION	NOMBRE DE PERSONNES	POURCENTAGE DE VOIX
Très esthétique	20	67%
esthétique	06	20%
assez esthétique	30	10%
pas esthétique	01	3%

Il résulte de cette analyse que nos appareils sont très esthétiques.

5.1.1.2. Evaluation du fonctionnement

a). Type C.P.C.

Les résultats des calculs figurent dans les tableaux ci-après. Il en résulte les graphiques 01, 02 et 03 ces graphiques montrent l'échauffement rapide pendant le jour ainsi que les pertes thermiques nocturnes énormes.

Tableau 1. Caractéristiques du C.E.S. cylindro-parabolique de type C.P.C. sans vitage ni soutirage

Heure de mesure	I (W/m ²)	θ_s (°C)	θ_{min} (°C)	θ_{max} (°C)	θ_{moy} (°C)	$\Delta\theta$ (°C)	Echauffement (°C)	Echauffement cumulé (°C)
06h	005.3	24.8	32.8	32.8	32.8	00.0	-	-
08h	335.3	34.1	32.8	36.3	35.4	03.5	03.5	03.5
10h	680.9	37.2	33.2	51.5	46.9	18.3	15.2	18.7
11h	775.2	37.8	33.7	60.4	53.7	26.7	08.9	27.6
12h	808.8	37.8	35.1	68.0	59.8	32.9	07.6	35.2
13h	778.0	39.5	36.9	75.0	65.5	38.1	07.0	42.2
14h	651.6	39.8	39.9	78.3	68.7	38.4	03.3	45.5
15h	528.9	41.0	41.9	77.2	68.4	35.3	-01.1	44.4
16h	344.0	39.2	44.5	73.1	66.0	28.6	-04.1	40.3
18h	022.0	35.7	48.6	59.7	56.9	11.1	-13.4	26.9
20h	-	31.8	50.3	52.3	51.8	02.0	-07.4	19.5
22h	-	29.9	48.0	48.3	48.2	00.3	-04.0	15.5
00h	-	28.2	45.0	45.3	45.2	00.3	-03.0	12.5
02h	-	26.3	42.1	42.4	42.4	00.4	-02.8	09.7
04h	-	25.4	40.0	40.2	40.2	00.3	-02.2	07.5
06h	003.7	24.6	38.4	38.3	38.3	00.3	-01.9	05.6

$$\theta_{moy} = 1/4.(3.\theta_{max} + \theta_{min})$$

$$\Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{min}$$

$$\text{Echauffement} = (\theta_{max})_{t1} - (\theta_{max})_{to}$$

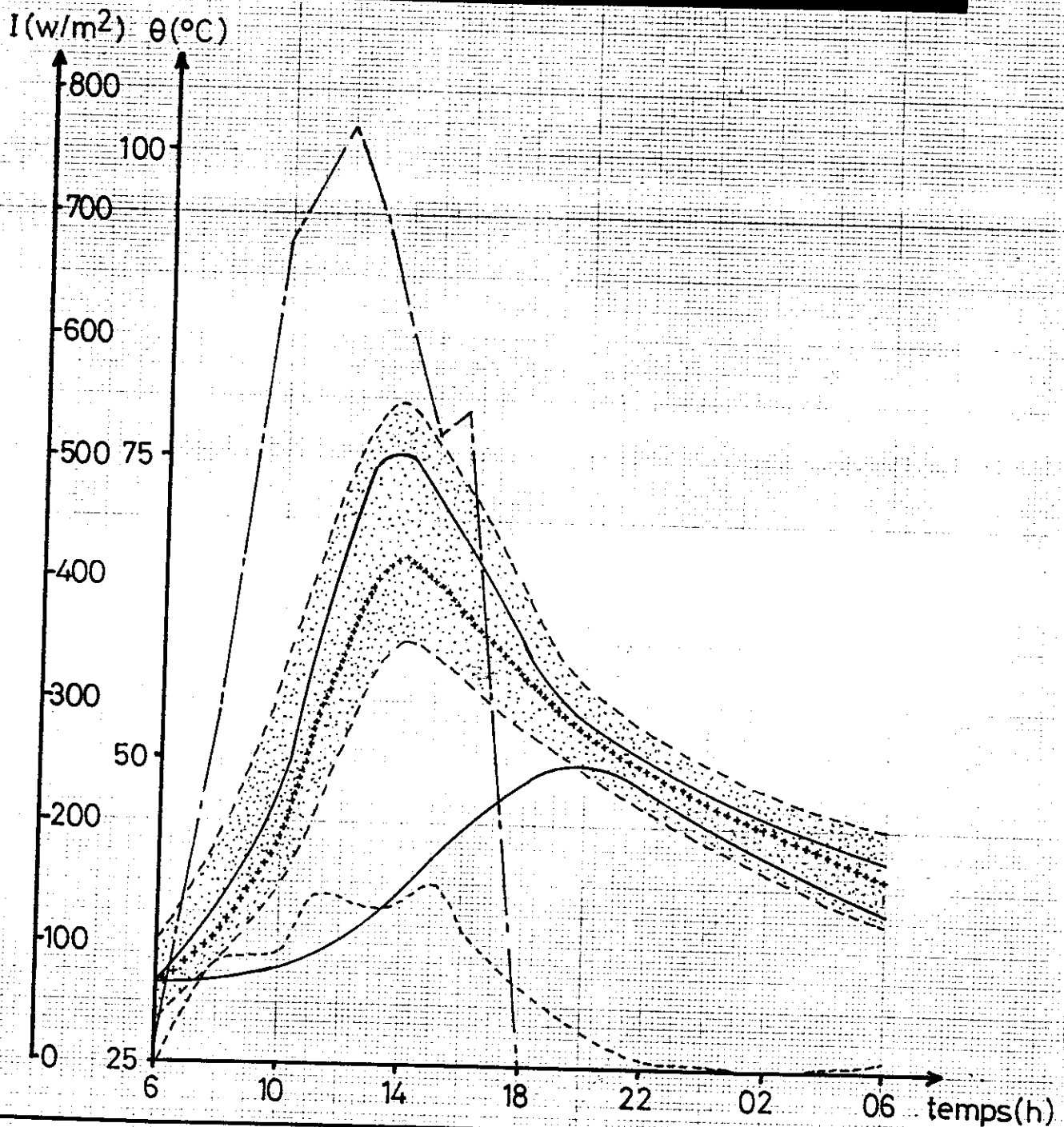
$$\text{Rayonnement global} = 5,4 \text{ kW/m}^2$$

Tableau 2 : caractéristiques du C.E.S. cylindro-parabolique de type C.P.C. avec vitrage mais sans soutirage

Heure de mesure	I (W/m ²)	θ_a (°C)	θ_{min} (°C)	θ_{max} (°C)	θ_{moy} (°C)	$\Delta\theta$ (°C)	Echauffement (°C)	Echauffement cumulé (°C)
06h	10.5	24.2	32.0	32.5	32.4	00.5	-	-
08h	289.0	33.4	32.3	37.5	36.2	05.2	05.0	05.0
10h	674.7	33.9	33.1	47.8	44.1	14.7	10.3	15.3
11h	720.7	38.8	33.7	58.7	52.5	25.0	10.9	26.2
12h	770.8	38.7	35.1	66.8	58.9	31.7	08.1	34.3
13h	705.3	37.8	36.9	74.2	64.9	37.3	07.4	41.7
14h	611.7	38.4	39.9	75.6	66.7	35.7	01.4	43.1
15h	520.3	40.1	41.9	72.3	64.7	30.4	-03.3	39.8
16h	240.8	36.2	44.5	68.5	62.5	24.0	-03.8	36.0
18h	003.9	31.6	48.6	60.0	57.2	11.4	-08.5	27.5
20h	-	28.0	50.3	53.7	52.9	03.4	-06.3	21.2
22h	-	25.4	48.0	50.5	49.9	02.5	-03.2	18.0
00h	-	25.2	45.0	48.2	47.4	03.2	-02.3	15.7
02h	-	23.7	42.1	46.1	45.1	04.0	-02.1	13.6
04h	-	23.7	40.0	44.2	43.2	04.2	-01.9	11.7
06h	007.1	25.7	38.1	42.5	41.4	04.4	-01.7	10.0

$\theta_{moy} = 1/4.(3.\theta_{max} + \theta_{min})$
 $\Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{min}$
 Echauffement = $(\theta_{max})_{t1} - (\theta_{max})_{to}$
 Rayonnement global = 5,1 kWh/m²

**COURBES CARACTERISTIQUES
DU C.E.S. DE TYPE C.P.C
MODELE HODONOU (AVEC VI-
TRAGE MAIS SANS SOUTIRAGE)**



LEGENDE		ECHELLE	
—	θ_{min} et θ_{max}	1Cm	↔ 2h
- - -	Rayonnement	1Cm	↔ 5°C
· · · · ·	θ_a	1Cm	↔ 50 W/m ²
· · · · ·	Domaine de fonctionnement à 90 %		
+ + + + +	θ_{moy}		
		GRAPHIQUE 02	

Tableau 3. Caractéristiques du C.E.S. cylindro-parabolique de type C.P.C. avec soutirage du 1/3 du volume le soir

Heure de mesure	I (W/m ²)	θ_s (°C)	θ_{min} (°C)	θ_{max} (°C)	θ_{moy} (°C)	$\Delta\theta$ (°C)	Echauffement t (°C)	Echauffement cumulé (°C)
06h	003.6	30.5	35.0	35.0	35.0	00.0	-	-
08h	120.0	33.5	35.3	38.1	37.4	02.8	03.1	03.1
10h	609.3	34.9	35.9	47.9	44.9	12.0	09.8	12.9
11h	684.5	38.9	36.2	59.0	53.3	22.8	11.1	24.0
12h	764.9	38.8	36.9	67.6	59.6	30.3	08.2	32.2
13h	725.8	37.8	39.1	72.5	64.2	33.4	05.3	37.5
14h	685.2	38.4	41.2	75.3	66.8	34.1	02.8	40.3
15h	181.2	39.8	42.9	76.3	68.0	33.4	01.0	41.3
16h	015.8	36.2	45.9	76.3	65.3	25.8	-04.6	36.7
18h	-	31.5	48.9	71.7	59.0	13.5	-09.3	27.4
			48.2	62.4	56.7	11.3	-02.9	24.5
20h	-	28.0	47.7	59.5	49.7	02.7	-09.1	15.4
22h	-	25.3	47.4	50.4	47.6	00.3	-02.7	12.7
00h	-	25.2	45.6	47.7	45.8	00.2	-01.7	10.8
02h	-	24.0	43.6	45.8	43.8	00.2	-02.0	08.8
04h	-	23.8	42.1	43.8	42.1	00.0	-01.7	07.1
06h	002.7	25.0	40.0	40.1	40.0	00.1	-02.0	05.5

$\theta_{moy} = 1/4.(3.\theta_{max} + \theta_{min})$
 $\Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{min}$

Echauffement = $(\theta_{max})_{t1} - (\theta_{max})_{t0}$
Rayonnement global = 5,0 kWh/m²