



ecole polytechnique de  
thiès

— —  
PROJET DE FIN  
D'ETUDES

' juin 834 '

titre: CONCEPTION ET  
REALISATION D'UN  
STERILISATEUR  
SOLAIRE

directeur:  
WOLSKI

auteur:  
élimane Mbengue  
Elève - Ingénieur

A mon père,

A ma mère,

A mon amie M<sup>lle</sup> Fatou DIÈNE,

un petit monde synonyme d'un grand  
océan d'affection où l'on se noie volontiers.

# TABLE DES MATIÈRES

## INTRODUCTION

Remerciements

Préambule

~~Sommaire~~

Introduction préliminaire

Historique

Actualité

Sommaire

Liste des symboles

## PARTIE THEORIQUE : GEOMETRIE ET

### ENERGIE

	1
1. Notes sur le transfert de chaleur	2
1.1. Conduction	2
1.2. Convection	3
1.3. Rayonnement	4
1.4. Rayonnement solaire	6
1.4.1. Rayonnement extraterrestre	6
1.4.2. Rayonnement terrestre	6
2. Description du stérilisateur	8
2.1. le capteur	8
2.2. l'autoclave	10
3. Détermination de la taille de l'image focale	13
4. Rapport de concentration	14

5 - Optimum de concentration	14
6 - Hauteur limite des plaques de réflexions	18
7 - Analyse énergétique du capteur - autoclave	21
7.1 - Bilan d'énergie sur le verre	22
7.1.1 - Dessus du verre	23
7.1.2 - Dessous du verre	25
7.2 - Bilan d'énergie sur l'autoclave	25
7.3 - Energie utile	27
7.4 - Processus de la stérilisation	29
7.5 - Bilan d'énergie sur l'air confiné	30
7.6 - Temps de réponse du système	31
7.7 - Détermination des températures d'équilibre	32
7.7.1 - Autoclave	33
7.7.2 - Verre	33
7.7.3 - Air	34
7.8 - Calcul de $H_n$	36
7.9 - Résolution numérique	38
8 - Conception de l'autoclave	42
- Détermination de la quantité d'eau	47
<b><u>PARTIE EXPERIMENTALE</u></b>	
1 - Matériel de construction	50
2 - Construction du réflecteur	51
3 - Construction de l'autoclave	56
4 - Expérimentation du stérilisateur	57

5 - Estimation du coût de revient 64

CONCLUSION 67

REFERENCES 71

. Appendices ; 1 - 2 - 3 - 4 - 5. 72

Temps de réponse, coefficients

. Bibliographie 79

# INTRODUCTION

## REMERCIEMENTS

Je tiens expressément à remercier mon directeur de projet André WOLSKI pour sa disponibilité, ses conseils et ses documents.

Mes remerciements vont également à M<sup>r</sup> BOUCHARD pour son aide précieuse dans la réalisation technique ainsi qu'à M<sup>r</sup> Roger MARTIN pour les matériaux.

Je n'oublie pas mon ami Baba DIANKHA, élève ingénieur en 4<sup>es</sup> Mécanique pour sa collaboration fructueuse dans la rédaction et la correction du rapport.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur contribution et leur soutien moral, particulièrement M<sup>r</sup>. Mamadou N'DIAYE, technicien supérieur à la Direction de la Météo. Nationale, et un grand ami.

## PREAMBULE

### i. Energies renouvelables sur la sellette

On aura beaucoup épluché sur les énergies renouvelables comme alternatives au processus de développement dans les pays du tiers-monde, mais l'essor économique et social qu'elles engendreront dépendra, de l'avis de beaucoup, surtout de la pertinence et de la versatilité des procédés de viabilisation.

#### i.i Notre objectif

Notre objectif est d'apporter notre contribution à la neutralisation des difficultés rencontrées par les services de santé dans les zones rurales quant à la stérilisation des instruments de petite chirurgie en concevant un système de stérilisation par l'énergie solaire ; système qui se veut mobile, portable et peu coûteux.

L'option s'est faite sur la stérilisation par vapeur saturante humide afin d'améliorer la méthode traditionnelle et classique qui consiste à faire bouillir les instruments ; mais aussi par opposition aux fours sanitaires électriques pas toujours disponibles en zone rurale. Il est prouvé qu'aucun virus ne subsiste à 121°C sous vapeur humide [5]



## SOMMAIRE

Le stérilisateur que nous nous proposons d'étudier est un double concentrateur cylindrique surmonté de réflecteurs plans, tous en tôle d'acier recouverte de papier réfléchissant "mylar".

Tout le rayonnement est focalisé sur un autoclave cylindrique formé de deux cylindres coaxiaux en tôle d'acier galvanisé.

L'ensemble est supporté par un coffre en bois (support optionnel); un vitrage recouvre l'ouverture pour profiter de l'effet de serre.

Le capteur, orienté perpendiculairement aux rayons solaires laisse passer l'énergie à travers l'ouverture et assure ainsi une concentration théorique de 9.

Un panier métallique coulissant à l'intérieur du cylindre interne contient les instruments à stériliser.

L'eau nécessaire à la production de vapeur est contenue dans l'anneau formé par les deux cylindres.

Les mesures se font par l'adjonction de trois thermocouples pour relever les températures de l'autoclave, de l'air confiné et du verre.

Les résultats obtenus seront compilés dans la partie expérimentale du projet.

## INTRODUCTION

L'augmentation sans cesse croissante du coût de l'énergie fossile, notamment le pétrole, a redoré le blason des énergies renouvelables longtemps mises à l'ombre, et a suscité un nouvel intérêt dans les années 70.

Aussi, les énergies fossiles les plus conveniées seront à court de réserves dans quelques décades et, du fait du taux actuel assez énorme de consommation, d'autres découvertes d'or noir ne feront que reculer le délai de quelques décades.

Le monde en est conscient qui organise des campagnes d'économie d'énergie et de recherches de nouvelles filières.

L'atome, le soleil, le vent constituent les espoirs de cette fin de siècle et de celui à venir.

De nos jours, l'énergie nucléaire est en plein essor et son exploitation à l'échelle industrielle s'opère dans plusieurs pays où des centaines de centrales distribuent l'énergie électrique. Cependant, elle connaît beaucoup de controverses et d'appréhensions du fait de son caractère hautement nocif - radioactivité - mais aussi et surtout de sa puissance destructrice symbolisée par une panoplie d'armes nucléaires redoutables.

Ce spectre du danger disparaît avec l'exploitation de l'énergie solaire.

## i. Historique

Historiquement l'énergie solaire a été toujours exploitée — parfois de manière naïve — et a servi à la production du feu dans l'antiquité.

\* Archimède (287 - 212 Av. J.C.) incendia les vaisseaux romains qui assiégeaient Syracuse avec des "miroirs ardents".

\* Lavoisier (1743 - 1794) pour réfuter la théorie du "phlogistique" pour laquelle tout corps perdait un "élément insaisissable" en brûlant usa de "verre ardent" ou lentille convergente.

\* La chaudière solaire apparaît en 1880 avec Mouchot.

\* En 1901, des usines utilisant l'énergie solaire naissent en Californie, aux U.S.A.

\* Plus tard en 1913, l'Égypte utilisa des pompes solaires pour l'irrigation.

## i.i Actualité

Aujourd'hui, il est évident que la survie des pays en voie de développement dépendra dans une large mesure du passage immédiat et progressif de l'énergie fossile aux nouvelles formes d'énergie.

Pour des pays comme le SENEGAL, où les zones rurales obtiennent 80% de leur énergie à partir de sources non conventionnelles [1.] et représentent 80% de la population, la transition ne nécessite pas, théoriquement, des changements structurels fondamentaux pour mieux utiliser les énergies renouvelables.

— C'est dans cette optique que se fonde l'étude de notre stérilisateur solaire, modeste contribution, du reste, qui vise à participer à la constitution de la pulsion critique\* vers le développement; une nécessité.

— Cependant, les coûts relativement bas des énergies renouvelables n'enlèvent en rien au fait qu'il faut des investissements énormes pour leurs exploitations.

conception

de

de

de

page 2

(\*) Par analogie à la réaction de fission nucléaire en chaîne qui n'est amorcée que si la masse de combustible — Uranium ou Plutonium — atteint une valeur minimale appelée masse critique.

## Liste des symboles

- $A_a$  = surface de l'autoclave (m<sup>2</sup>)
- $A'_a$  : " " " tourné au soleil (m<sup>2</sup>)
- $A_p$  : " des réflecteurs plans (m<sup>2</sup>)
- $A_h$  : " " hémicylindrique (m<sup>2</sup>)
- $A'_p$  : " " plans utiles (m<sup>2</sup>)
- $A_v$  : " de la vitre (m<sup>2</sup>)
- $c_p, c_e, c_w$  : chaleur spécifique de la chambre de stérilisation, de l'eau, des instruments (kcal/kg°C)
- $d$  : diamètre de l'image focale (m)
- $d_a$  : " " l'autoclave (m)
- $d_m$  : " moyen de " (m)
- $f$  : distance focale
- $H, H'$  : voir fig. 3
- $H_g, H_n$  : rayonnement global, normal
- $h_{v,n}$  : convection naturelle au dessus du verre
- $h_{v,f}$  : coefficient de convection forcée au dessus du verre
- $h_{v,air}$  : coefficient de convection naturelle au dessous du verre
- $h_{ea}, h_{ead}$  : coefficient de convection entre

les parois de l'autoclave et l'eau, entre les disques latéraux et l'eau.

- $i$  : taux d'intérêt
- $i_1$  : voir fig. 3
- $j$  : taux d'inflation
- $J_a, J_v$  : Radioité de l'autoclave, du verre
- $k, k_e$  : conductivité thermique de l'air, de l'eau
- $L$  : longueur du capteur
- $l'$  : voir fig. 3
- $l_c$  : intervalle entre les 2 cylindres coaxiaux.
- $m_c, m_e, m_w$  : masse de la chambre de stérilisation, de l'eau, des instruments
- $p$  : voir fig. 3.
- $Q_{\text{indice}}$  : voir définitions dans le corps même du rapport.
- $R$  : rayon de l'hémicylindre
- $r$  : voir fig. 1
- $p$  : voir fig. 2
- $S, S_0, S_i$  : voir fig. 2
- $T_a$  : température de l'autoclave
- $T_e$  : " " " l'eau
- $T_{\text{amb}}$  : " " " ambiante

- $T_{air}$  : Température de l'air confiné
- $T_v$  : " du verre
- $T_{s1}, T_{s2}$  : " de stérilisation à l'état 1 ou 2.
- $T_s$  : " de stérilisation
- $T_{ciel}$  : " des hautes couches de l'atmosphère
- $V, V'$  : vitesses de l'air
- $V_e$  : volume d'eau
- $\alpha_A$  : voir fig. 1
- $Gr$  : nombre de Grashof
- $Pr$  : " " Prandtl
- $I$  : intensité de l'ensoleillement

### Symboles grecs

- $\alpha_a, \alpha_v$  : absorbance de l'autoclave, du verre
- $\alpha_1, \alpha_2$  : voir fig. 2
- $\beta$  : voir fig. 2
- $\epsilon_a, \epsilon_v$  : émissivité de l'autoclave, du verre
- $\rho_h, \rho_p$  : coefficient de réflexion de l'hémicylindre, des plaques
- $\theta$  : angle du réflecteur / à l'horizontale

- $\theta_c$  : angle solide dans lequel on voit le soleil à partir de la terre.
- $\theta_i$  : voir fig. 2
- $\tau$  : temps de réponse du système
- $\tau_v$  : transmittance du verre (plexiglas)
- $\phi$  : voir fig. 1.



PARTIE THEORIQUE

GEOMETRIE ET  
ENERGIE

# 1. NOTES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR

Il n'y a pas tellement longtemps, l'étude systématique de la transmission de chaleur, en tant que telle, n'existait pas. Or, dans la vie, il est réellement difficile de trouver une activité humaine où n'intervient pas un échange de chaleur.

Cette thermocinétique étudie les échanges de chaleur selon 3 modes : la conduction, la convection et le rayonnement. Dans la pratique, ces modes sont souvent combinés.

## 1.1. La conduction

C'est le mode de transmission de la chaleur provoqué par un gradient de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux ou encore entre deux milieux en contact physique : le déplacement des molécules n'est pas appréciable.

On admet cependant que la conduction dans les solides amorphes, les liquides et les gaz résulte du transfert direct des mouvements moléculaires à leurs points de contact : c'est la tendance à l'équipartition de l'énergie.

La loi fondamentale de la conduction en régime

permanent fut publié par J. B. FOURIER (1768-1830) en 1822 et s'énonce comme suit :

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

$q$  : flux de chaleur en W

$k$  : conductivité thermique du matériau (W/m.K)

$A$  : surface perpendiculaire du flux thermique (m<sup>2</sup>)

$\frac{dT}{dx}$  : gradient de température.

Il est à noter que  $k$  varie avec la température et que cette théorie néglige les variations de volume. En régime transitoire, on tiendra compte des accumulations d'énergie.

## 1.2. La convection

Ce mode de transmission implique le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. On le trouve dans l'échange qui a lieu entre une paroi et un fluide. En vérité, il s'agit d'une combinaison de la conduction et du transfert de masse. La chaleur se transmet par conduction et l'énergie accumulée est transportée par le fluide. Aussi, on trouve la convection forcée où le mouvement du fluide est provoqué (pompe, ventilateur) et la convection naturelle où les différences de température occasionnent.

ment des différences de densités créant un mouvement. L'ébullition et la condensation allient convection et changement de phase.

Les études sur l'écoulement et les couches limites — dynamique, thermique — ont conduit à une relation, de simplicité trompeuse, qui permet d'exprimer le phénomène global de convection :

$$q = hA (T_s - T_f)$$

$q$  : flux de chaleur (W)

$h$  : conductance ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ )

$A$  : surface de contact ( $m^2$ )

$T_s$  : température de la paroi ( $^\circ K$ )

$T_f$  : " au loin de la paroi (infini).

Cette équation de NEWTON décrit un phénomène globalement complexe et variable, comme l'est  $h$  sur toute la paroi.

### 1.3. Le rayonnement

C'est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre, plus froid, les deux corps ne se touchant pas mais étant séparés par un milieu transparent — air ou vide —

C'est un rayonnement électromagnétique limité aux longueurs "d'ondes thermiques" et dont l'absorption par certains corps transforme "l'énergie radiante" en chaleur.

Le rayonnement thermique et la lumière peuvent être considérés comme des cas particuliers du rayonnement électromagnétique — aux longueurs d'onde près —

L'exemple de rayonnement thermique le plus simple est celui dont nous gratifie le soleil pendant des siècles

La loi de Stefan-Boltzmann (1879) stipule que :

$$q = \sigma AT^4$$

comme le flux d'énergie radiante émis par une surface idéale appelée "corps noir"

$\sigma$  : est une constante universelle

$$\sigma = 5.66961 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad [2]$$

Pour les corps réels, on introduit des coefficients de corrections tels l'émissivité  $\epsilon$  et le facteur de forme  $F_{1-2}$  lorsque les deux corps s'influencent mutuellement

$$q = \epsilon \sigma F_{1-2} A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

$\epsilon_1$  : émissivité d'un des deux corps

$T$  : température des corps ( $^{\circ}\text{K}$ )

$q$  ( $\text{W}$ ) flux d'énergie échangée par rayonnement

## 1.4. Rayonnement solaire

### 1.4.1 Rayonnement extraterrestre:

Le soleil, "boule de feu" ou "don de Dieu" est une importante masse gazeuse de densité estimée à environ 80 ou 100 fois celle de l'eau, a un diamètre évalué à 1.39 millions de km.

Sa température effective superficielle est de  $5762^{\circ}\text{K}$  environ; alors que son noyau atteint des millions de Kelvin — 8 à 40 millions —

La constante solaire est l'irradiation solaire mesurée en dehors de l'atmosphère, loin des grandes perturbations, des absorptions et diffusions de tous ordres. Des mesures soignées prises à partir de satellites, d'avions volants à haute altitude et de ballons sondes ont donné le nombre suivant comme valeur de  $I_{sc}$ :

$$I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2 \quad [3]$$

### 1.4.2 Rayonnement terrestre

Le soleil émet 90% de son rayonnement entre,

en longueur d'onde,  $0.1 \mu$  et  $3 \mu$  qui atteignent la terre au prix de quelques pertes.

Les courtes longueurs d'onde et les rayons X sont presque totalement absorbés dans l'ionosphère par l'azote et l'oxygène.

L'ozone absorbe une partie de l'ultraviolet.

Par contre, les longueurs d'onde supérieures à  $2.5 \mu\text{m}$  sont fortement atténuées par le gaz carbonique et la vapeur d'eau.

Ainsi, on note que l'énergie solaire a comme handicap majeur sa relative faible concentration due à l'atmosphère et ses particules, mais aussi à la présence de certains astres qui gênent sa propagation.

D'ailleurs, certains chercheurs avancent qu'en déplaçant JUPITER, l'humanité aura de l'énergie suffisante car l'intensité aurait augmenté.

## 2. DESCRIPTION DU STERILISATEUR

Le stérilisateur se compose de 2 parties essentielles: le capteur et l'autoclave.

### 2.1 LE CAPTEUR

Il est lui-même constitué de deux parties,

- a/ Un hémicylindre en tôle d'acier d'épaisseur recouvert de papier "mylar" et ayant un diamètre de 1150 mm avec une hauteur de 290 mm correspondant à la distance focale et un ouverture de 1000 mm.

Il s'étale sur 1300 mm et est maintenu par 4 supports en bois.

- b/ Deux réflecteurs plans, en tôle d'acier d'épaisseur 2 mm recouvert de papier réfléchissant "mylar" et inclinés de  $60^\circ$  par rapport à l'horizontale, surmontent l'hémicylindre sur une hauteur de ~~294~~ 6 mm

- c/ Un coffre en bois d'épaisseur 15 mm est le support principal de l'hémicylindre



#### - d/. Montage

• La structure en bois - le coffre - sert de support sur lequel sont fixées les traverses hémicylindriques qui donnent sa forme à la tôle d'acier soigneusement ajustée et scellée dessus.

• Elle prévoit également une surface sur laquelle sont vissés les réflecteurs plans légèrement repliés pour constituer une bonne assise.

La laine de verre isole l'hémicylindre de l'extérieur pour éviter toute conduction.

• Une plaque de verre de 1000 mm x 1300 mm ferme l'ouverture de l'hémicylindre, à 100 mm du point focal, en s'adaptant sur des glissières aménagées sur les parties latérales du coffre. Ce piège à énergie forme un effet de serre. L'étanchéité est assurée par une pâte "mastic" remplissant les vides entre glissières et verre.

## 2.2. L'AUTOCLAVE

Il est constitué de deux cylindres coaxiaux en acier galvanisé de 2mm d'épaisseur et de diamètres respectifs 100mm et 76mm, à l'intérieur desquelles un panier métallique fait office de chambre de stérilisation.

Ce panier contenant les instruments à stériliser est la partie mobile de l'autoclave - en plus du couvercle.

L'eau qui sera évaporée est emprisonnée dans l'anneau formé par les deux cylindres.

Le fond est un disque en acier galvanisé, soudé sur une ouverture, et percé de trois trous:

- 1, pour le remplissage de l'eau et la prise

des mesures

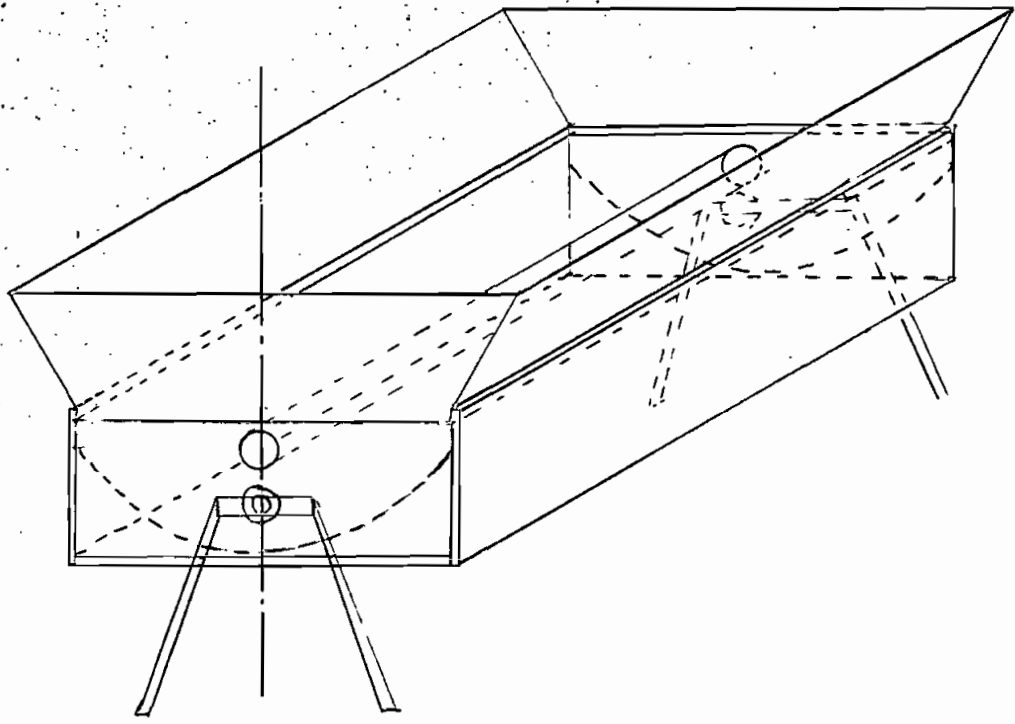
- 1. - pour la purge de l'eau résiduelle en fin d'opération

- 1. - pour fixer un limiteur de pression réglé à 3 bars.

Des bouchons coniques de laboratoire, en caoutchouc blanc, bouchent les trous lors des opérations.

Le couvercle est un disque d'acier galvanisé muni d'un joint d'étanchéité en caoutchouc et muni de crochets pour sa fermeture.

Le cylindre extérieur est peint en noir mat.



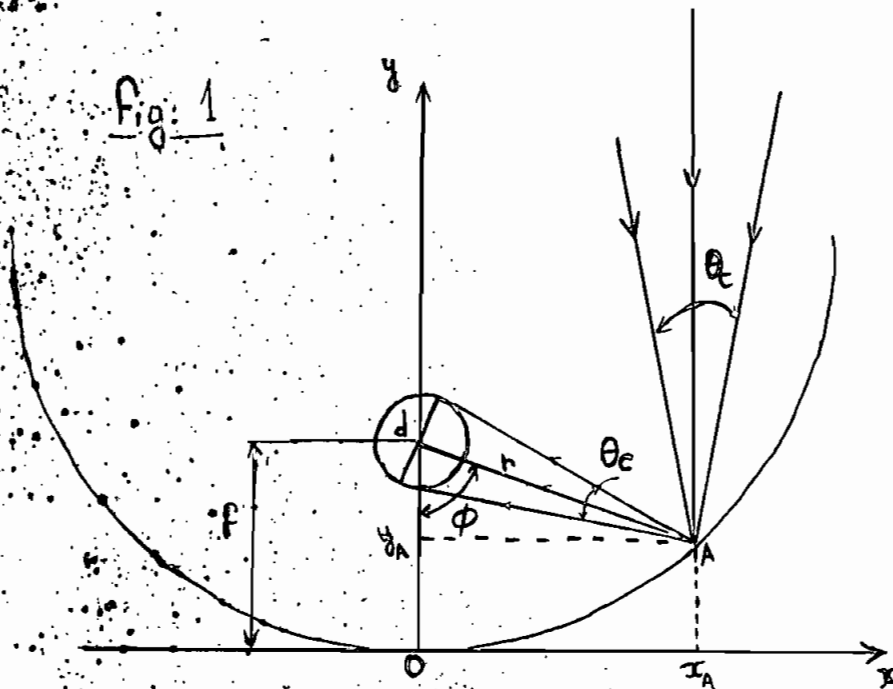
Echelle: 1/20

Projet de fin d'études, Mai 84
STERILISATEUR SOLAIRE
E. M'BENGUE

### 3. DETERMINATION DE LA TAILLE DE L'IMAGE FOCALE

La fonction du système optique sera de former une image du soleil à un endroit bien déterminé. D'habitude, cette image est floue et sa taille sera fonction du dispositif de focalisation, mais aussi de l'angle solide à partir duquel on voit le soleil depuis la terre.

Pour un concentrateur hémicylindrique, on a :



$$\frac{d}{2} = r \operatorname{tg} \frac{\theta_c}{2}$$

$$\text{si } \frac{\theta_c}{2} = \theta'_c \rightarrow d = 2r \operatorname{tg} \theta'_c$$

#### 4. RAPPORT DE CONCENTRATION

Selon la figure n°1. on peut définir le rapport de concentration sous forme paramétrique.

Ce rapport de concentration sera défini comme étant la "surface de captage" rapport à la surface du récepteur.

En réalité, 
$$R.C. = \frac{\text{Aperture}}{\text{surface receptrice}}$$

si nous partons du point A :

$$\text{Aperture} = 2x_A L$$

$$\text{Surface Récepteur} = \pi d L$$

$$R.C. = \frac{2x_A L}{\pi d L} = \frac{2x_A}{\pi d}$$

En remplaçant  $x_A$  et  $d$  par leurs valeurs, on a :

$$R.C. = \frac{r \sin \phi}{\pi r \operatorname{tg} \theta'_c} = \frac{\sin \phi}{\pi \operatorname{tg} \theta'_c}$$

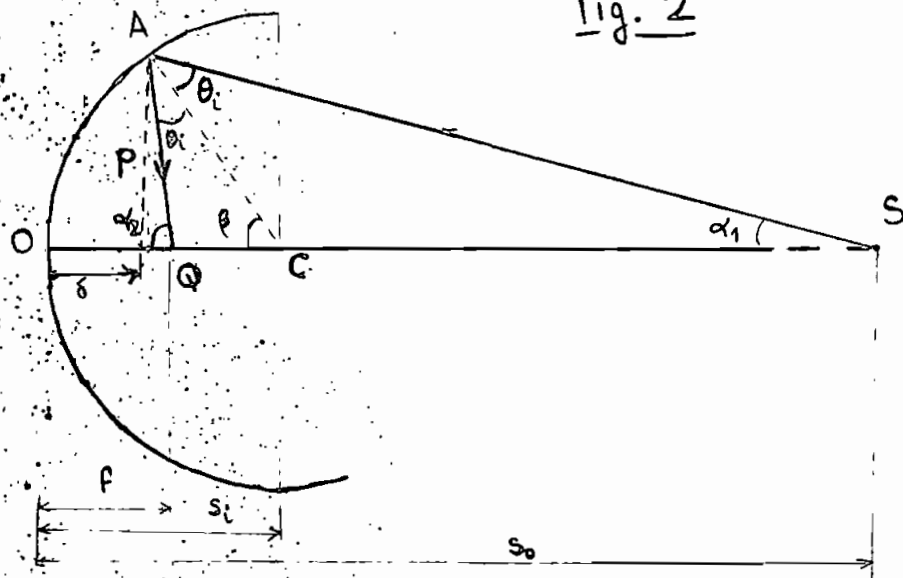
#### 5. OPTIMUM DE CONCENTRATION

La concentration est maximum lorsque la dérivée de R.C. par rapport à  $\phi$  est nulle, ou directement lorsque  $\sin \phi = 1$ , c'est à dire :

$$\phi_{\text{opt.}} = 90^\circ$$

Maintenant, nous nous proposons de déterminer la position du "point" de focalisation du réflecteur hémicylindrique, c'est à dire la distance  $f$ .

Fig. 2



Nous supposons que S est une source d'onde placée à l'infini; le rayon SA est réfléchi et tombe sur Q par une réflexion cartésienne; les relations des angles donnent :

$$\beta = \theta_i + \alpha_1 \quad \alpha_2 = \beta + \theta_i$$

d'où 
$$\alpha_1 + \alpha_2 = 2\beta$$

Comme les angles  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\beta$  sont petits si l'on considère la source très éloignée, on a

selon les approximations gaussiennes concernant la réflexion convergente, [4]

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \approx \alpha_1 = \frac{P}{s_0 - \delta} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 \approx \alpha_2 = \frac{P}{f - \delta} \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \beta \approx \beta = \frac{P}{s_i - \delta} \quad (3), \text{ à noter : } s_i = R$$

Comme pour les lentilles,  $\delta$  est une petite quantité dans l'approximation gaussienne. On peut la négliger. Les aberrations géométriques qu'elle entraînera ont des effets mineurs sur la localisation du foyer. Ainsi donc, on obtient, en remplaçant dans (1), (2), (3) et en simplifiant :

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$$

Pour  $s_0$  tendant vers l'infini - le soleil - , on a :

$$\boxed{\frac{1}{f} = \frac{2}{R}}$$



Considérons l'équation du cercle de rayon  $R$  dans notre repère :

$$x^2 + (y - R)^2 = R^2$$

d'où  $(y - R)^2 = R^2 - x^2$

En ne considérant que la partie inférieure du cercle, c'est à dire  $y \leq R$ , on peut écrire :

$$y = R - (R^2 - x^2)^{1/2}$$

Au point  $A$ , on a :

$$r \cos \phi = f - R + (R^2 - r^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$$

En arrangeant et en élevant au carré, on obtient

$$r^2 + 2(R-f)r \cos \phi + [(R-f)^2 - R^2] = 0$$

La résolution de l'équation du second degré en  $r$  donne une valeur de  $r$  égale à la racine positive :

$$r = -(R-f) \cos \phi + (R^2 - (R-f)^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$$

Cette détermination de  $\phi_{opt}$  nous fixe par la même occasion l'aperture optimum à considérer en nous référant à l'expression paramétrique de  $r$  qui devient:

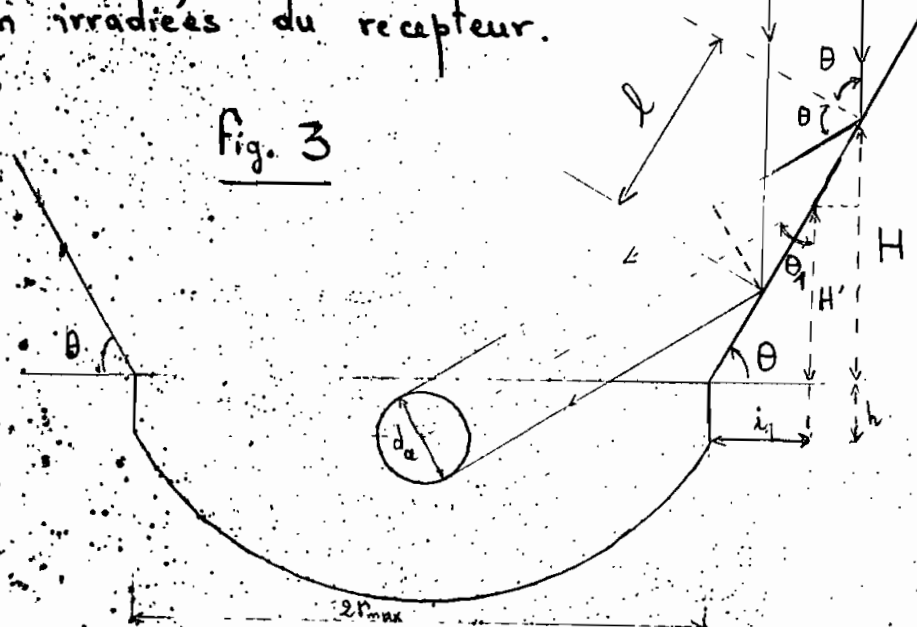
$$r_{max} = \sqrt{2RF - f^2} \quad \text{or } f = \frac{R}{2}$$

$$r_{max} = R \frac{\sqrt{3}}{2}$$

## 6. HAUTEUR LIMITE DES PLAQUES DE REFLECTION

Pour atténuer le déséquilibre de la répartition de l'énergie sur le récepteur cylindrique placé au foyer du réflecteur hémicylindrique, nous le surmontons de plaques réfléchissantes qui envoient de rayonnement sur les parties non irradiées du récepteur.

Fig. 3



En nous référant au schéma précédent et en considérant les paramètres explicités là-dessus, nous déterminons la hauteur limite  $H$  :

$$\frac{r_{\max} + i_1}{H' + h} = \operatorname{tg} \theta_1 \quad \text{avec} \quad \theta_1 = \pi - 2\theta$$

$$\frac{i_1}{H'} = \frac{1}{\operatorname{tg} \theta}$$

En combinant ces deux équations et en remplaçant  $\operatorname{tg} \theta_1$  par  $-\operatorname{tg} 2\theta$ , on trouve

$$H' = \frac{-[r_{\max} + h \operatorname{tg} 2\theta]}{\operatorname{tg} 2\theta + \frac{1}{\operatorname{tg} \theta}}$$

La hauteur  $H$  est telle que :

$$H = H' + \frac{l}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$\text{or} \quad l = \frac{d_a}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} = \frac{d_a}{\cos \theta}$$

$$H = \frac{-[r_{\max} + h \operatorname{tg} 2\theta]}{\operatorname{tg} 2\theta + \frac{1}{\operatorname{tg} \theta}} + \frac{d_a \operatorname{tg} \theta}{2}$$

Cependant, nous voyons que seule la longueur symbolisée par  $l$  participe effectivement à l'irradiation du récepteur; le reste participe

à l'ossature du système, mais aussi constitue une protection par rapport à la convection en évitant un balayage systématique au dessus de la ligne symbolisant le vitrage ou dessus du récepteur.

Par ailleurs l'apport énergétique des plaques est :

$$A.E.P. = \frac{l \cos \theta}{2r_{\max} - d_c} = \frac{l \cos \theta}{\sqrt{3}R - d_c}$$

Calcul numérique de d, H et A.E.P.

$$d = 2r_{\max} \operatorname{tg} \theta'_c = 2 \times 58.75 \times \sqrt{3} \times \operatorname{tg}(32') \\ d = 9.5 \text{ mm}$$

$$H = \frac{58.75 \times 10 \operatorname{tg} 120^\circ}{\operatorname{tg} 120^\circ + \frac{1}{\operatorname{tg} 60^\circ}} + \frac{10}{2} \operatorname{tg} 60^\circ$$

$$H = 294 \text{ mm}$$

$$A.E.P. = \frac{20 \cos 60^\circ}{2 \times 58.75 - 10} = 9.30\%$$

image focale théorique (diamètre)	9.5 mm
hauteur limite des plaques	294 mm
Apport énergétique des plaques	9.30%

## 7. ANALYSE ENERGETIQUE DU CAPTEUR-AUTOCLAVE

Lorsque le capteur est orienté vers le soleil, l'énergie est absorbée par l'autoclave après double concentration par les réflecteurs plans et l'hémicylindre.

Cette énergie se divise en deux parties :

- une énergie utile  $Q_u$  servant à la stérilisation proprement dite
- une énergie perdue,  $Q_p$ , par convection naturelle et forcée, par rayonnement ou par conduction.

Pour limiter ces pertes et bénéficier de l'effet de serre, nous mettrons un vitrage au dessus du concentrateur hémicylindrique.

Du fait de ces considérations, l'analyse énergétique se basera sur le principe des bilans d'énergie au niveau du vitrage, de l'autoclave,

et de l'air confiné à l'intérieur.

### 7.1. BILAN D'ENERGIE SUR LE VERRE

$$Q_{v,abs} = Q_{v,n} + Q_{v,p} + Q_{v,ra} + Q_{v,rh} + Q_{v,rp}$$

avec :

- $Q_{v,abs}$  : énergie totale absorbée par le verre
- $Q_{v,n}$  : énergie solaire directe (normale) arrivant sur le verre
- $Q_{v,p}$  : énergie réfléchie par les plaques vers le verre
- $Q_{v,ra}$  : énergie rayonnée par l'autoclave vers le verre
- $Q_{v,rh}$  : " " " l'hémicylindre " "
- $Q_{v,rp}$  : " " " les plaques " "

En remplaçant les termes par leurs valeurs littérales

on trouve :

$$Q_{v,abs} = H_n A_v \alpha_v + H_n A_p \rho_p \alpha_v + \left[ \epsilon_a T_a^4 F_{v-a} + \epsilon_h T_h^4 F_{v-h} + \epsilon_p T_p^4 F_{v-p} \right] \sigma A_v \alpha_v$$

Par contre, l'énergie totale perdue est la somme des énergies de rayonnement et de convection.

$$Q_{p,v} = Q_{r,v} + Q_{v,c(n,f)}$$

$Q_{p,v}$  = énergie totale perdue par le verre

$Q_{v,c(n,f)}$  : " " " " convection naturelle et forcée.

$Q_{r,v}$  : " " " " rayonnement

$$Q_{r,v} = \frac{\epsilon_v A_v}{1 - \epsilon_v} (\sigma T_v^4 - J_v)$$

$$\text{avec : } J_v = \epsilon_v \sigma T_v^4 + (1 - \epsilon_v) (\epsilon_a T_a^4 F_{v-a} + \epsilon_h T_h^4 F_{v-h} + \epsilon_a T_{\text{ciel}}^4 F_{v-\text{ciel}} + \epsilon_p T_p^4 F_{v-p}) \sigma$$

Pour la convection, nous considérerons celle au dessus et au dessous du verre

## 7.1.1. Dessus du verre

### 7.1.1.1. Convection naturelle

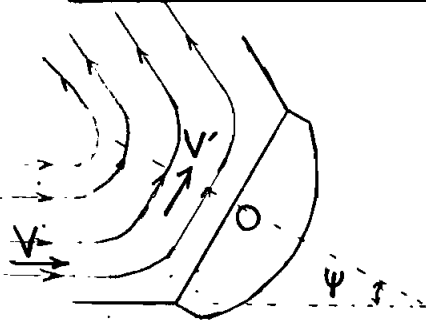
$$Q_{v,cn} = h_{vn} A_v (T_v - T_{\text{amb}})$$

Le coefficient de convection naturelle sur une surface plane est, en fonction de l'inclinaison, [2]

$$h_{vn} = \frac{k}{L} 0.508 \left( \frac{Pr^2}{0.952 + Pr} \right)^{1/4} (Gr_L \cdot \cos \psi)^{1/4}$$

$\psi$ , angle entre la surface du verre et l'horizontale

### 7.1.1.2. Convection forcée:



$$V' = V \sin \psi$$

Dans cette position que nous jugeons être la plus défavorable en convection forcée et en considérant la vitesse du vent maximum, on peut, en négligeant les forces dues à la pesanteur, considérer l'écoulement de l'air autour des plaques et sur le vitrage comme laminaire.

$$Q_{v,f} = h_{v,f} A_v (T_v - T_{amb})$$



$$h_{v,cf} = \frac{k}{L} 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad [2]$$

### 7.1.2 Dessous du verre

La convection est due à l'air confiné dans l'hémicylindre.

$$Q_{v,c} = h_{v,air} A_v (T_v - T_{air})$$

$$h_{v,air} = 1.28 (\Delta T)^{1/4} \quad [4_{bi}]$$

### 7.2. BILAN D'ENERGIE SUR L'AUTO-

#### CLAVE

$$Q_{a,abs} = H_n A_h \rho_h \tau_v \alpha_a + H_n A'_p \rho_p \tau_v \alpha_a + H_n A'_a \tau_v \alpha_a$$

Cette énergie correspond à l'absorption du rayonnement solaire réfléchi par l'hémicylindre, les plaques ainsi que celle reçue directement.

L'énergie perdue sera analysée comme précédemment, en supposant que la température de l'auto-

clave est uniforme lorsqu'on s'approche du régime stationnaire bien qu'il y ait une dispersion due au régime stationnaire et la répartition du rayonnement arrivant sur l'autoclave.

Notre soucis est de simplifier les calculs sans trop affecter les résultats, d'autant plus que les formules empiriques utilisées travaillent avec une certaine marge.

$$Q_{p,a} = Q_{r,a} + Q_{c,air}$$

$$Q_{p,a} = \frac{\epsilon_a A_a}{1 - \epsilon_a} (\sigma T_a^4 - J_a) + h_{a,air} (T_a - T_{air})$$

$$\text{avec } J_a = \left[ \epsilon_a T_a^4 + (1 - \epsilon_a) (\epsilon_v T_v^4 F_{a-v} + \epsilon_h T_h^4 F_{a-h}) \right] \sigma$$

$$\text{et } h_{a,air} = 0.53 \frac{k}{2r_a} (Gr.Pr)^{1/4} \quad [5]$$

$h_{a,air}$  est le coefficient de convection naturelle autour d'un cylindre horizontal.

### 7.3. ENERGIE UTILE

Nous définissons l'énergie utile comme la partie d'énergie qui participe effectivement à la stérilisation : elle est transmise à l'eau, à la vapeur d'eau et aux instruments à stériliser.

$$Q_u = Q_{abs,a} - Q_{p,a}$$

$Q_u$  : énergie utile

En d'autres termes :

$$Q_u = h_{e,a} A_a (T_a - T_e) + 2 h_{e,ad} (T_{ad} - T_e)$$

Dans cette écriture, les instruments ne peuvent être considérés parce que recevant l'énergie de la vapeur d'eau, sinon on compterait deux (2) fois le même apport d'énergie.

L'énergie utilisée dans un intervalle de temps  $\Delta t$  sera :

$$Q_u \cdot \Delta t = (m_e c_{pe} + m_w c_w + m_c c_{pc}) (T_{s2} - T_{s1})$$

Comme on considère l'autoclave dans son ensemble comme un système thermodynamique, nous n'avons pas besoin de définir et de calculer, de manière distincte, les énergies de vaporisation de l'eau et de condensations de la vapeur sur les instruments; nous les regarderons comme des phénomènes internes.

Aussi, dans l'expression de  $Q_u \cdot \Delta t$ , nous n'avons pas tenu compte de l'énergie — d'ailleurs négligeable par rapport à celle qui amène l'eau à la température de stérilisation — nécessaire à la production de la vapeur occupant le volume libre de l'autoclave. Elle s'énonce comme suit:

$$E_w = m_w H_w$$

$H_w$ : chaleur latente de vaporisation de l'eau

$m_w$ : masse de vapeur d'eau.

## 7.4. PROCESSUS DE LA STÉRILISATION

Lorsque le capteur est orienté vers le soleil, l'énergie utile augmente la température de l'eau qui finit par se vaporiser quand la tension de vapeur est neutralisée. Cette vapeur pénètre dans la chambre de (combustion) stérilisation où elle recouvre les instruments, se condense en partie et les réchauffe.

Cet échauffement se poursuit jusqu'à ce que  $T_c$  soit égal à  $T_a$  avec une diminution progressive de la valeur  $T_a - T_c$ , jusqu'à ce que  $Q_{abs} = Q_{a,p}$ ; autrement dit  $Q_u = 0$ .

Cette notion de  $Q_u = 0$  lorsque l'énergie reçue est égale à celle perdue ne doit pas dérouter, car une fois la température d'opération atteinte,

aucune production de vapeur ne s'opère, ni aucun changement de conditions d'état si les flux reçus et perdus restent constants et identiques.

Mais des <sup>aux</sup> modifications atmosphériques continues (mouvement du soleil, ... →) le phénomène se comporte comme une succession d'équilibres instables accompagnée de variations de températures d'opérations et de pression pouvant entraîner la production ou la perte de vapeur. Ainsi, la continuité de fonctionnement est tout le temps assurée.

### 7.5. BILAN D'ENERGIE SUR L'AIR CONFINÉ

Les échanges thermiques avec l'air confiné se font essentiellement au niveau du verre et de l'autoclave. Une convection existe aussi au niveau de l'hémicylindre ; cependant nous négligerons la

conduction du capteur vers l'extérieur en l'isolant.

## 7.6 CALCUL DU TEMPS DE REPONSE (INERTIE DU SYSTEME)

Lorsque le système passe de la température ambiante à celle de stérilisation ( $T_s$ ), un certain temps  $\tau$  se sera écoulé.

$$Q_u \cdot \tau = (m_e c_{pe} + m_w c_{pw} + m_c c_{pc}) (T_s - T_{amb})$$

$$\left[ h_{e,a} A_a (T_a - T_e) + 2 h_{e,ad} A_{ad} (T_{ad} - T_e) \right] \tau =$$

$$(m_e c_{pe} + m_w c_{pw} + m_c c_{pc}) (T_s - T_{amb})$$

$$\tau = \frac{(m_e c_{pe} + m_w c_{pw} + m_c c_{pc}) (T_s - T_{amb})}{h_{e,a} A_a (T_a - T_e) + 2 h_{e,ad} A_{ad} (T_{ad} - T_e)}$$

avec :

$$h_{e,a} = \frac{0.11 k_e}{r_a \ln \frac{r_a}{r_a - l_c}} (Gr. Pr)^{0.29} \quad [5]$$

$h_{e,a}$  est le coefficient de convection entre l'au.

toclave et l'eau.

$l_c$ : espace entre les deux cylindres

$r_a$ : rayon de l'autoclave

$$h_{e,ad} = \frac{0.555 k_e (Gr_D \cdot Pr)^{1/4}}{D'} \quad [5]$$

$D'$ : côté du carré ayant la même surface que (ad)

## 7.7 DETERMINATION DES TEMPERATURES D'ÉQUILIBRE

La détermination des températures d'équilibre nécessite une option quant au type de régime à adopter. Nous baserons les calculs sur un modèle stationnaire qui nous donne la température maximale que peut atteindre le système.

Les équations sont ramenées au principe d'échange net pour éviter le calcul fastidieux des radiosités et des facteurs de forme.



Nous rappelons que l'échange net d'énergie entre deux surfaces unitaires grises s'écrit :

$$q_{1-2} = F_{12} (J_1 - J_2)$$

$$\text{avec } J_1 - J_2 = \epsilon_1 \epsilon_2 (\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4)$$

En l'appliquant à notre système, on obtient :

7.7.1 Autoclave :

$$Q_{a,abs} = Q_{a,p}$$

$$(A_h \rho_h + A_p \rho_p + A'_a) H_n \tau_v \alpha_a = A_a \epsilon_a \epsilon_v F_{a-v} \sigma (T_a^4 - T_v^4) + h_{a,air} A_a (T_a - T_{air})$$

(7.7.1)

7.7.2 Verre :

$$Q_{v,abs} = Q_{v,p}$$

$$(A_v + A_p \rho_p) H_n \alpha_v = -A_a \epsilon_a \epsilon_v F_{a-v} \sigma (T_a^4 - T_v^4)$$

$$+ \epsilon_v A_v F_{v-ciel} \sigma (T_v^4 - T_{ciel}^4) - h_{v,air}^* A_v (T_{air} - T_v)$$

$$+ h_{vn} A_v (T_v - T_{amb})$$

(7.7.2)

7.7.3 Air :

$$Q_{\text{air, abs}} = Q_{\text{air, p}}$$

$$h_{a, \text{air}} A_a (T_a - T_{\text{air}}) = h_{v, \text{air}} A_v (T_{\text{air}} - T_v)$$

(7.7.3)

De cette dernière équation, on tire :

$$T_{\text{air}} = \frac{h_{a, \text{air}} A_a T_a + h_{v, \text{air}} A_v T_v}{A_a h_{a, \text{air}} + A_v h_{v, \text{air}}} \quad (7.7.3\text{bis})$$

En notant l'expression de l'échange net rayonné entre le verre et l'autoclave dans les équations (7.7.1) et (7.7.2) on peut écrire l'égalité

$$Q_{a, \text{abs}} = h_{a, \text{air}} A_a (T_a - T_{\text{air}}) = \varepsilon_v F_{v\text{-ciel}} A_v \sigma (T_v^4 - T_{\text{ciel}}^4)$$

$$- h_{v, \text{air}} A_v (T_{\text{air}} - T_v) = Q_{v, \text{abs}} + A_v h_{v, \text{air}} (T_v - T_{\text{amb}})$$

D'après (7.7.3) on obtient

$$Q_{a, \text{abs}} + Q_{v, \text{abs}} = \varepsilon_v A_v \sigma F_{v\text{-ciel}} (T_v^4 - T_{\text{ciel}}^4) + h_{v, \text{air}} A_v (T_v - T_{\text{amb}})$$

En remplaçant par leurs termes les expressions écrites plus haut, on retrouve une équation en  $T_v^4$  nous permettant de déterminer la température du verre, et par là celles de l'autoclave  $T_a$  et de l'air confiné  $T_{air}$ . (7.7.4)

$$(A_h \rho_h + A'_p \rho_p + A'_a) H_n \tau_v \alpha_a + (A_v + A_p \rho_p) H_n \alpha_v - \epsilon_v A_v \sigma F_{v-ciel} (T_v^4 - T_{ciel}^4) - h_{v,air} A_v (T_v - T_{amb}) = 0$$

Une fois  $T_v$  connue, on peut retrouver  $T_a$  en combinant (7.7.1), (7.7.2) et (7.7.3)

$$Q_{a,abs} = h_{d'air} A_a \left( T_a - \frac{h_{d'air} A_a T_a + h_{d'air} A_v T_v}{A_a h_{d'air} + A_v h'_{d'air}} \right) + A_a \epsilon_a \epsilon_v F_{a-v} \sigma (T_a^4 - T_v^4)$$

(7.7.5)

$$(A_h \rho_h + A'_p \rho_p + A'_a) H_n \tau_v \alpha_a + (A_v + A_p \rho_p) H_n \alpha_v = \frac{h_{d'air} \cdot h'_{d'air} A_a A_v}{A_a h_{d'air} + A_v h'_{d'air}} (T_a - T_v) + A_a \epsilon_a \epsilon_v F_{a-v} \sigma (T_a^4 - T_v^4)$$

## 7.8 CALCUL de $H_n$

En nous référant aux mesures du CERER\* nous constatons que la moyenne annuelle de la proportion de rayonnement diffus sur le global est de 35.7%.

Aussi, vu la faible différence de latitude et aussi d'altitude ( $\approx 80$  m) entre DAKAR et THIÈS on peut aisément extrapoler et supposer ce pourcentage valable pour notre étude.

Ce résultat, associé aux mesures faites en 1978\*\* — les seules disponibles à Thiès — sur le rayonnement global, nous aidera quant à l'estimation de l'irradiation directe.

$$H_g = 1050 \text{ W/m}^2$$

Mais, du fait des vents de sable,

(\*) Centre d'Etude et de Recherches sur les Energies Renouvelables (DAKAR.)

(\*\*) Sorti de la 1<sup>ère</sup> promotion de l'E.P.T.

sensibles jusqu'à DAKAR, la tendance actuelle est surtout à l'augmentation du diffus qui pourrait atteindre 38% du global. [6]

Ces mesures et estimations sont confirmées par les registres météorologiques qui font état de l'accroissement des troubles atmosphériques et surtout des poussières en suspension.

Aussi, nous écrivons :

$$H_n = 0.62 H_g$$

$$H_n = 651 \text{ W/m}^2$$

Pour toutes les autres valeurs numériques, voir appendice

N.B. Le calcul est basé sur la mesure de l'ensoleillement à Thiès, par temps clair, au mois de Mars 1978.

## 7.9 RESOLUTION NUMERIQUE

En nous plaçant dans les conditions les plus défavorables,

- situation de convection forcée avec du vent à sa vitesse maximum (5 m/s)
- une inclinaison du capteur telle que  $F_{v-uel} = \cos^2 \frac{\Psi}{2}$  [7] soit à son max.

on a, en remplaçant dans la formule tous les paramètres et constantes (cf. eq. 5.3)

$$\begin{aligned} & [(1.17 + 0.26) \times 0.76 + 0.13] \times 651 \times 0.87 \times 0.96 \\ & + (1.3 + 0.4278 \times 0.76) \times 651 \times 0.06 \\ & - 0.87 \times 1.3 \times 5.66961 \times 10^{-8} \cdot \cos^2 \frac{60^\circ}{2} (T_v^4 - 223^4) \\ & - 7.42 \times 1.3 (T_v - 300) = 0 \end{aligned}$$

En réarrangeant, on obtient

$$0 = T_v^4 + 1.93886 \times 10^8 T_v - 805.1832206 \times 10^8$$

La résolution, par la méthode d'approximations successives de NEWTON-RAPHSON avec une calculatrice programmable H.P. 11C,

donne :  $T_v = 343.50 \text{ K}$

soit  $T_v = 70.50 \text{ }^\circ\text{C}$

En introduisant cette valeur de  $T_v$  dans la formule (7.7.5), on obtient, après arrange-

ments et simplification, pour

$$h_{\text{air}} = 6.46$$

et  $h'_{\text{a,air}} = 3.315$

$$T_a^4 + 1.7402537 \times 10^8 T_a - 14090.65 \times 10^8 = 0$$

ce qui donne :  $T_a = 499.33 \text{ K}$

soit  $T_a = 226.33 \text{ }^\circ\text{C}$

Poursuivant le cheminement, on substitue, dans la formule (7.7.3bis) les valeurs de  $T_a$  et  $T_v$ ,

$$T_{\text{air}} = \frac{6.46 \times 0.13 \times 499.33 + 3.315 \times 1.3 \times 343.5}{6.46 \times 0.13 + 3.315 \times 1.3}$$

$T_{\text{air}} = 370.02 \text{ K}$      soit      $T_{\text{air}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### • Calcul du temps de réponse $\tau$

La température ambiante sera supposée à  $30^{\circ}\text{C}$  et d'après le paragraphe 7.6. , on aura:

$$\tau = \frac{(1.5 \times 1 + 5 \times 0.104 + 2.3 \times \frac{0.896}{4.18}) \times 90}{94.56 \times \pi \times 0.1 \times 1.3 \times 12}$$

$$\tau = 0.488 \text{ hrc}$$

$$\tau = 30 \text{ mn}$$

Les valeurs des paramètres sont dans appendice 3, 4 et 5.

L'influence de la conductivité thermique de l'autoclave sur  $\tau$  est considérée dans l'appendice  
L'apport énergétique entre les disques latéraux et l'eau est négligé.

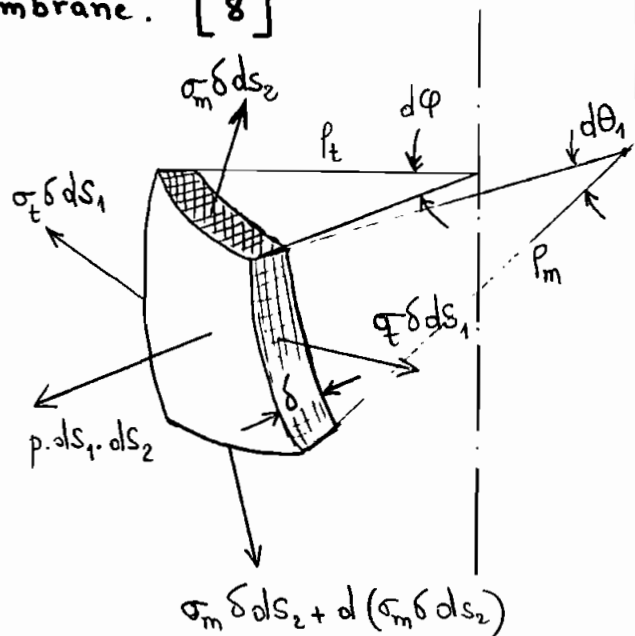
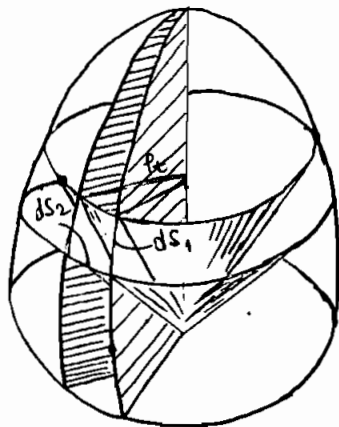


Récapitulation

Temperature d'équilibre	K	°C
Autoclave $T_a$	499	226
Air confiné $T_{air}$	370	97
Vitre $T_v$	343	70
Temps de réponse $\tau$	30 min.	

## 8. CONCEPTION DE L'AUTOCLAVE

Le cœur du stérilisateur étant l'autoclave, lieu de production et de conservation de la vapeur d'eau. Notre but étant d'atteindre  $121^{\circ}\text{C}$  pour une stérilisation convenable, il est donc nécessaire d'avoir un système qui puisse supporter les contraintes de pression occasionnées. L'autoclave peut dans ce cas être considéré comme un réservoir de révolution soumis à une pression intérieure symétrique par rapport à l'axe et ayant des parois minces. On peut dès lors lui appliquer la théorie de la membrane. [8]



En considérant l'enveloppe d'épaisseur  $\delta$ , on peut découper un élément  $ds_1, ds_2$  au moyen de deux plans méridiens et de deux sections

coniques normales. Les conditions d'équilibre de cet élément de paroi se définissent en projetant toutes les forces sur la normale ; il vient :

$$p \, ds_1 \, ds_2 - \sigma_m \delta \, ds_2 \, d\theta_1 - \sigma_t \delta \, ds_1 \, d\varphi = 0$$

$$\text{comme } \frac{d\theta_1}{ds_1} = \frac{1}{\rho_m} \quad , \quad d\varphi = \frac{ds_2}{\rho_t}$$

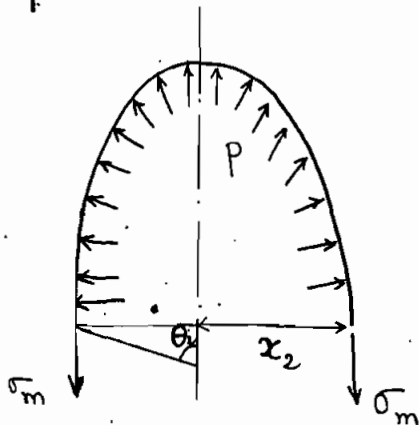
$$\text{en définitive } \frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{\delta}$$

Cette relation est appelée équation de LAPLACE

avec :

- $\rho_m, \rho_t$  rayons de courbures des sections circonférentielles et méridienne respectivement
- $p$  : intensité de la pression interne
- $\varphi, \theta_1$  , angles définis par le schéma ci-dessous

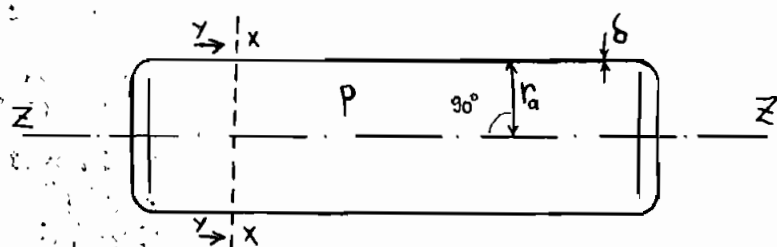
En partant de la condition d'équilibre de la partie de l'enveloppe dégagée par des sections perpendiculaires aux méridiens , on obtient :



$$P = \sigma_m 2\pi \delta (\sin \theta) x_2$$

Nous savons aussi que, pour une surface quelconque soumise à une pression uniforme, quelle que soit la forme de la surface, la projection de la résultante des forces de pression est égale au produit de la pression  $p$  par l'aire de la projection de la surface sur un plan perpendiculaire à l'axe donné.

Aussi, pour notre autoclave formé d'un cylindre fermé par deux disques,



$P$ , projection des forces sur l'axe  $zz$ , pourra s'écrire, si l'on fait une coupe  $yy$  à l'axe  $xx$ ,

$$P = \sigma_m 2\pi\delta r_a = \pi r_a^2 p$$

ainsi

$$\sigma_m = \frac{p r_a}{2\delta}$$

Pour le cylindre,  $p_m = \infty$  et  $p_t = r_c$

d'où

$$\sigma_t = \frac{p r_a}{\delta}$$

Ainsi, en connaissant la pression  $p$  qui règne dans l'autoclave, son rayon  $r_a$ , nous pouvons choisir un matériau qui convient à une épaisseur donnée.

En choisissant de l'aluminium à 99%, nous pouvons avoir une bonne résistance à la corrosion. En effet, l'aluminium est un élément de passivité élevée face aux oxydants; il se forme une couche protectrice d'alumine et sa courbe d'oxydation est logarithmique.

Sa température de fusion est de  $660.2^\circ\text{C}$  et sa température maximum de service conseillé est de  $150^\circ\text{C}$ . [9]

Ceci est bien supérieure à notre température de fonctionnement qui se situe à  $121^\circ\text{C}$ .

La limite d'élasticité inférieure est, à la traction,  $90\text{ MPa}$ .

Maintenant, en nous référant au diagramme entropique de l'eau, nous allons pouvoir déterminer la pression  $p$  et calculer l'épaisseur de l'autoclave - de la tôle d'aluminium. On relève que  $p = 2.05\text{ bars}$  pour de la vapeur saturée à  $121^\circ\text{C}$ .

Du fait des difficultés inhérentes au travail de l'aluminium, en particulier la soudure, nous choisirons de l'acier galvanisé en tôle qui présente, à peu près, les mêmes caractéristiques que l'aluminium du point de vue de la corrosion. Par ailleurs, elle est trois fois plus résistante et a une température de service de  $450^{\circ}\text{C}$ .

Épaisseur de la tôle d'acier  $\delta$

Le calcul sera basé sur la résistance à la traction  $\sigma_t$  qui est le double de  $\sigma_m$

$$\sigma_t = \frac{pr_a}{\delta} \rightarrow \delta = \frac{pr_a}{\sigma_t}$$

à la limite :

$$\delta = \frac{pr_a}{F_y}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p = 3 \text{ bars} \\ r_a = 0.1 \text{ m} \\ F_y = 430 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

$$\delta = \frac{3 \times 10^5 \times 0.1}{430 \times 10^6}$$

$$\delta = 0.1 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{standard}} = 2 \text{ mm}$$

$$\text{Facteur de sécurité} = \frac{2}{0.1} = 20.$$

## 9. DETERMINATION DE LA QUANTITÉ D'EAU

L'évaluation de la quantité d'eau à mettre dans le système est nécessaire tant il est impératif d'intégrer trois (3) facteurs qui sont :

- l'influence sur le temps de réponse du système
- la nécessité d'avoir de l'eau durant toute l'opération de stérilisation pour s'assurer qu'on a de la vapeur saturée tout le temps.
- l'inclinaison permissible du capteur afin d'éviter que l'eau ne se déverse dans la chambre de stérilisation.

L'expression littérale de  $\tau$  pourrait, par une série d'essais et erreurs, fournir une liaison optimum entre quantité d'eau et temps de réponse ; cependant, l'option s'est basée sur les deux (2) derniers critères tout en essayant d'avoir  $20\text{mn} \leq \tau \leq 30\text{mn}$ .

Pour éviter les dommages dus à une trop grande inclinaison, nous fixerons la hauteur de l'eau dans la couronne à une valeur inférieure à la moitié du diamètre moyen  $d_m$ ,

$$d_m = \frac{d_{a, \text{int}} + d_{c, \text{ext.}}}{2}$$

ainsi, même lorsque le capteur est horizontal - le vitrage perpendiculaire au sol - il n'y a pas d'écoulement d'eau à travers les trous du cylindre intérieur.

Nous proposons un arc de  $29^\circ$  pour contenir l'eau,

d'où :

$$V_e = \frac{d_m}{2} \frac{\pi}{6} (d_a - d_c) \times L$$

$$V_e = \frac{1.0 + 0.76}{2} \cdot \frac{\pi}{6} \times 0.26 \times 13$$

$$V_e \approx 1.5 \text{ dm}^3 = 1.5 \text{ l}$$

$$m_e = 1.5 \text{ kg}$$



PARTIE EXPERIMENTALE

## 1. MATERIEL DE CONSTRUCTION

Il entre dans la réalisation du stérilisateur les matériaux suivants :

- 1 tôle d'acier galvanisé roulé pour former l'autoclave avec ses deux cylindres et son panier.

1.3 m x 0.60 m x 0.002 m

- 1 tôle d'acier ordinaire

1000 mm x 1215 mm x 0.002 m

- Bois : Contreplaqué de 15 mm

- 1000 mm x 1300 mm

- 2 fois 1040 mm x 650 mm

- 2 fois 1300 mm x 410 mm

- 1 tôle d'acier ordinaire

- 2 fois 1300 mm x 300 mm

- 1 plaque de verre plexiglas

1000 mm x 1000 mm

- Isolant thermique en laine de verre

- Des vis à bois, des pointes, des crochets.

## 2. CONSTRUCTION DU REFLECTEUR

Calcul de la longueur de tôle à découper pour former l'arc de cercle

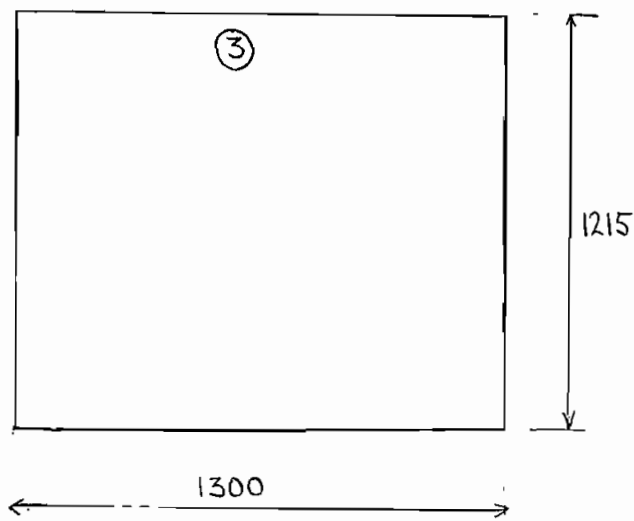
$$\begin{aligned} \text{Arc} &= R \times \text{angle} \\ &= R \times \frac{2\pi}{3} = 2F \times \frac{2\pi}{3} \end{aligned}$$

— l'angle équivaut à  $\frac{2\pi}{3}$  parce que la corde divise le rayon  $R$  en deux parties égales —

### Formage :

La tôle est mise en forme d'arc pour les rouleaux de l'E.P.T.

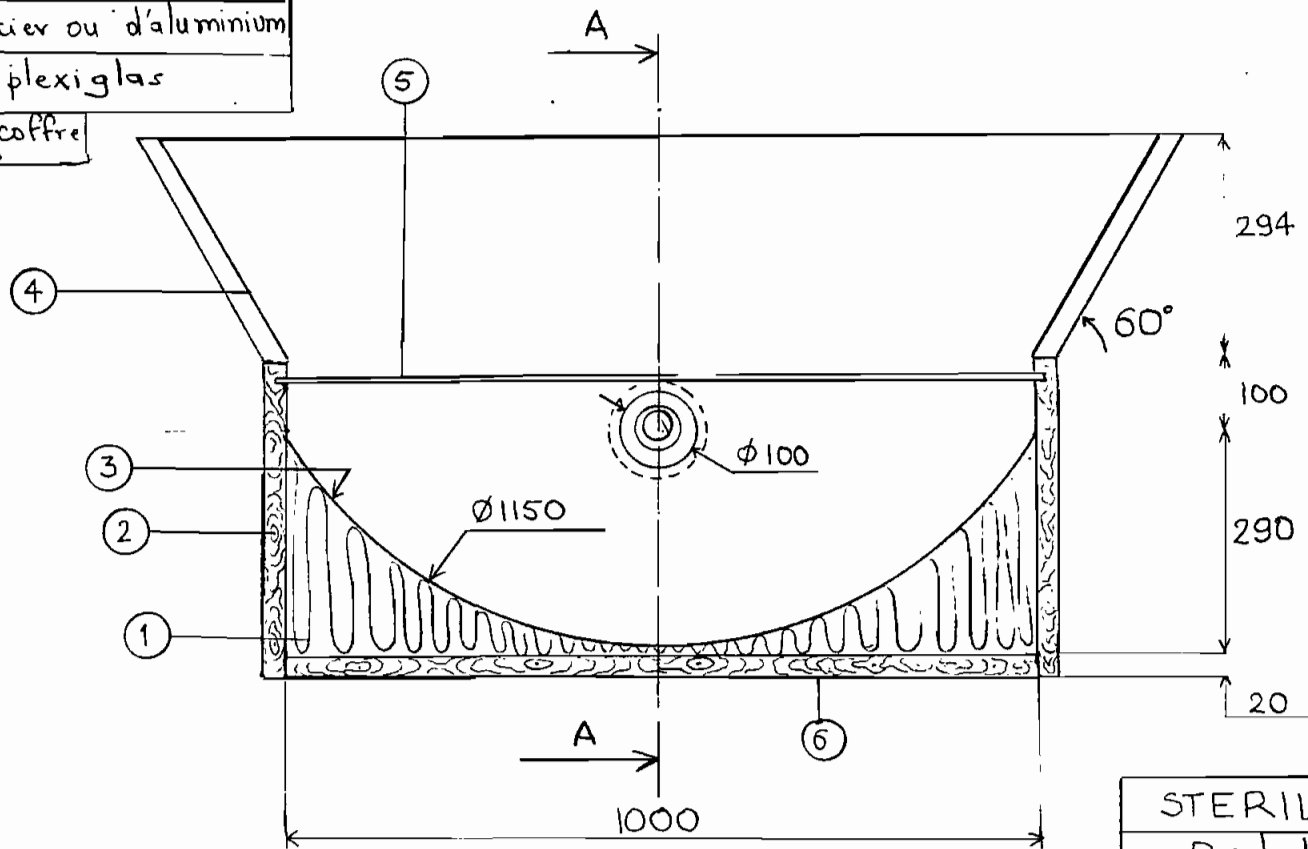
Réfecteur



Réfecteur plan: 2 tôles d'acier sur toute la longueur.

①	Laine de verre
②	bois
③	tôle d'acier
④	tôle d'acier ou d'aluminium
⑤	Vitre en plexiglas
⑥	Fond du coffre en bois

COUPE B-B

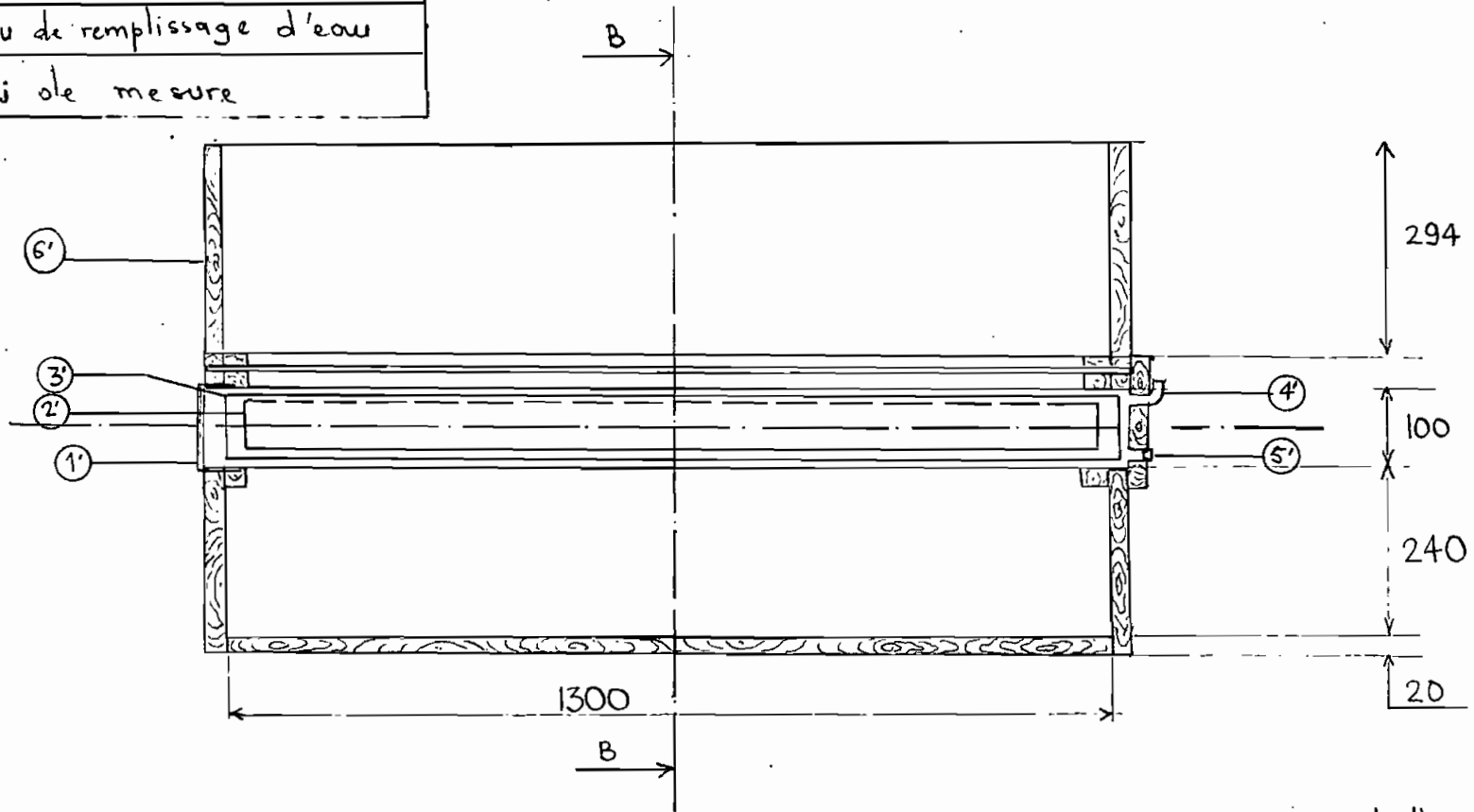


Echelle: 1/10

STERILISATEUR  
 Projet de fin d'Etudes 84  
 E. M'BENGUE

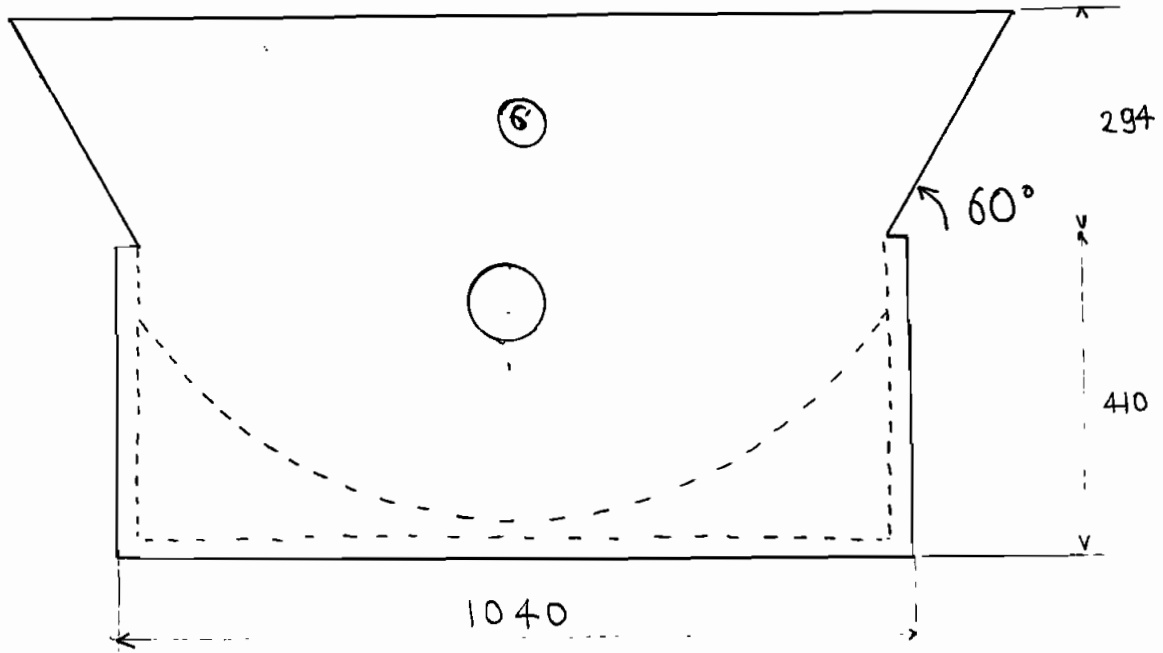
①	Couvercle
②	Chambre de stérilisation
③	Cylindre intérieur
④	Trou de remplissage d'eau
⑤	Trou de mesure

COUPE A-A

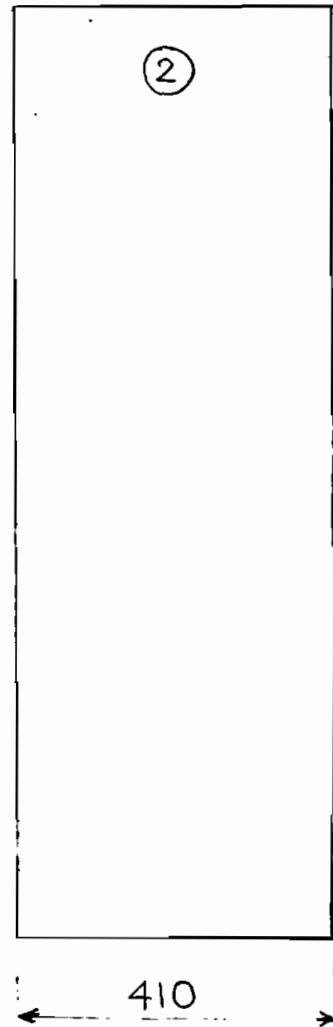
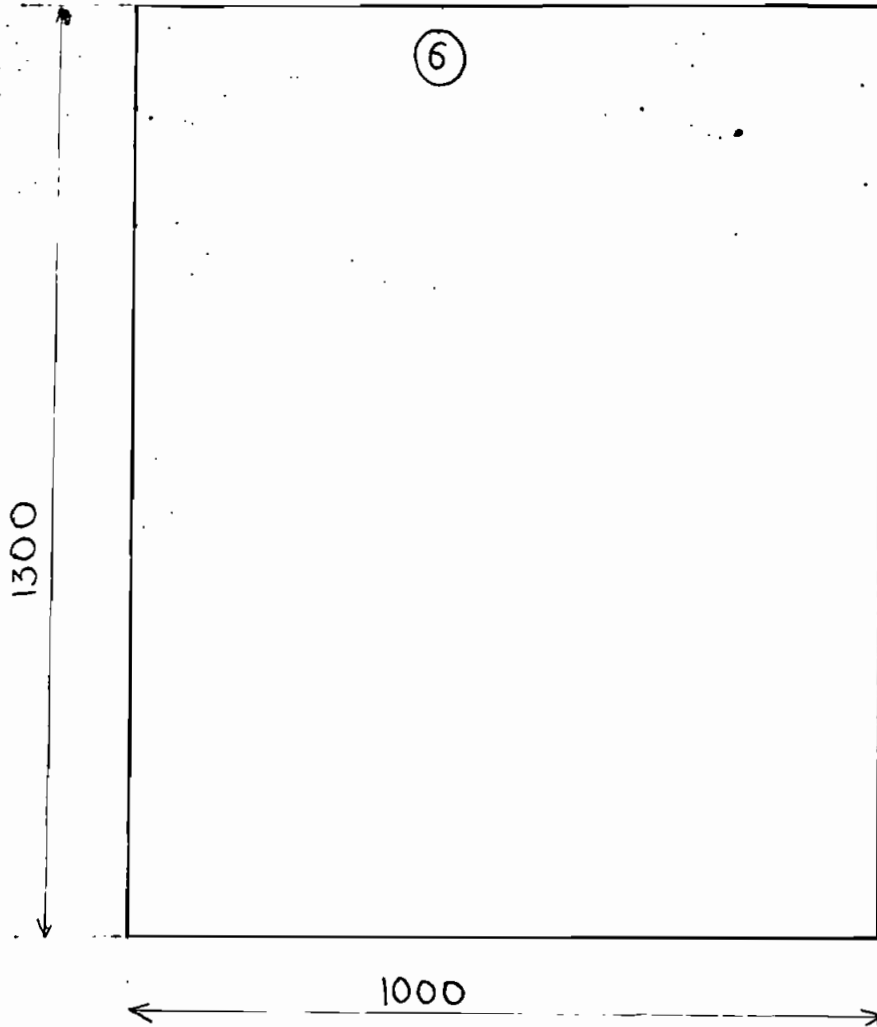


Echelle: 1/10

⑥	Fermeture latérale en bois
---	----------------------------



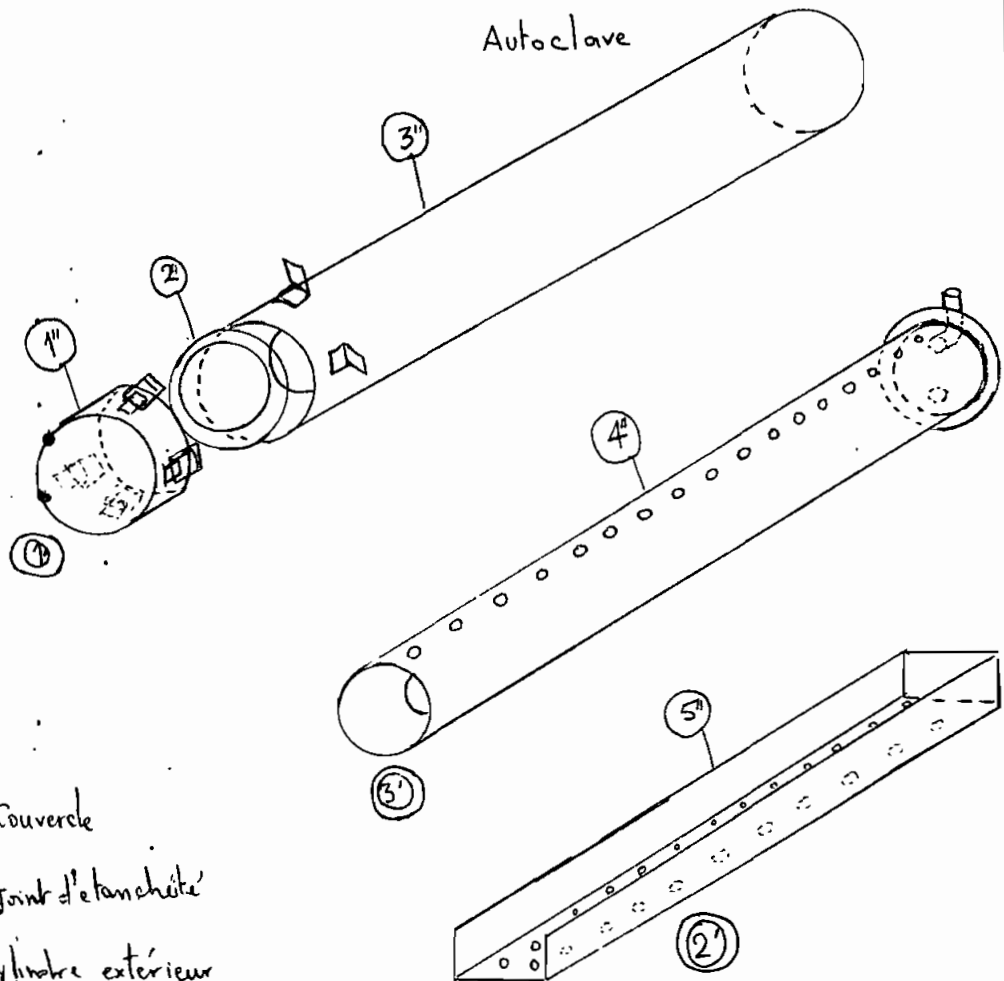
Echelle: 1/10



Echelle: 1/10

### 3. Autoclave : construction

- Rouler la tôle d'acier galvanisé
- Souder un disque d'acier sur le fond du cylindre
- Plier une tôle et la trouser pour faire office de panier.
- Fixer des ailettes par soudure pour retenir les crochets.



- ① Couvercle
- ② joint d'étanchéité
- ③ Cylindre extérieur
- ④ Cylindre intérieur
- ⑤ Panier à instrument

Acier galvanisé.



#### 4. EXPERIMENTATION DU STÉRILISATEUR

Notre objectif fut d'expérimenter le stérilisateur en introduisant des cultures bactériologiques dans l'autoclave afin d'en mesurer l'efficacité.

L'indisponibilité de ces types de cultures à l'école a contraint l'expérience à se limiter à la mesure des températures et pression au niveau de l'autoclave.

Par ailleurs, des retards considérables sur la construction du prototype — qui diffère en certains points du modèle conçu — ont fait que les expériences ont débuté en dehors des limites programmées. Cependant, trois expériences assez concluantes ont été faites et leurs résultats sont compilés et mis sous forme de courbes dans les pages suivantes.

## Expérience du 22 Mai

Quantité d'eau : 1 litre.

Conditions atmosphériques : Ciel clair, vent assez fort.

Tableau des mesures

Heure	Ensoleillement I (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>e</sub> (°C)	T <sub>air</sub> (°C)	T <sub>v</sub> (°C)	T <sub>amb</sub> (°C)
9 <sup>h</sup>	315	29	29	29	29	29
10 <sup>h</sup>	682.5	67	60	50	29	29
11 <sup>h</sup>	850.5	104	98	55	30	31
12 <sup>h</sup>	966	122*	115*	58	36	32
13 <sup>h</sup>	1050	131*	125*	59	42	35
14 <sup>h</sup>	987	125*	120*	58	40	34
15 <sup>h</sup>	861.5	100	98	55	37	32
16 <sup>h</sup>	661.5	86	82	53	32	31

(\*) Nb. La pression n'a pu être, techniquement, mesurée et contrôlée ; ces valeurs sont des approximations basées sur la mesure de la pression faite le 26 Mai

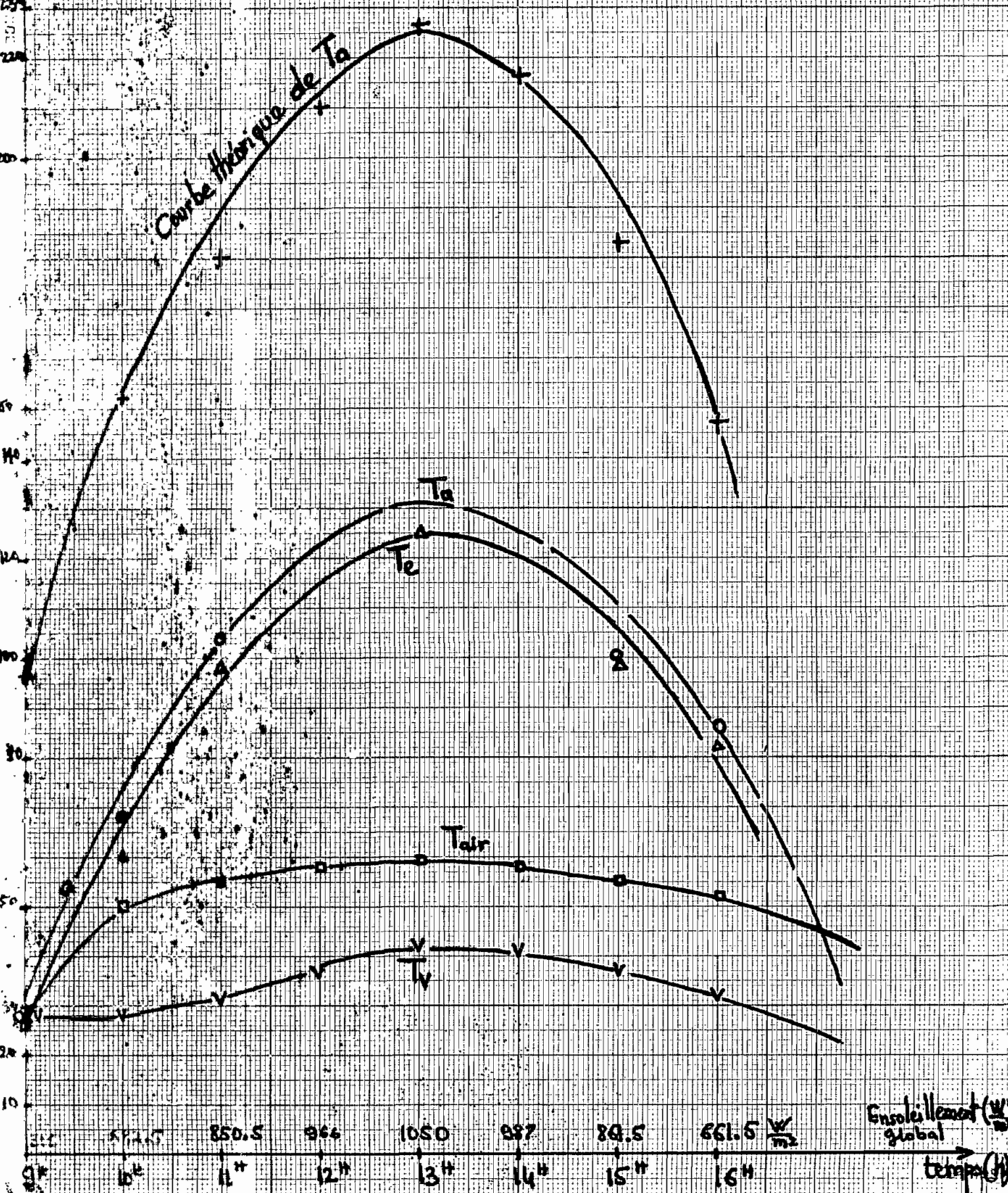
LES PAPIERS GANSON

$\Delta$   
O  
□  
V

mesuré + calculé

$T_a$  = Température de l'autoclave  
 $T_e$  = " " l'eau  
 $T_v$  = " " verre  
 $T_{air}$  = " " air confiné  
 $T_{amb}$  = " " ambiante

température (°C)



## Expérience du 23 Mai

- Quantité d'eau : 1.5 litres
- Conditions atmosphériques : Important vent de sable qui a conduit à l'arrêt de l'expérience à 12 H (rayonnement diffus très élevé).

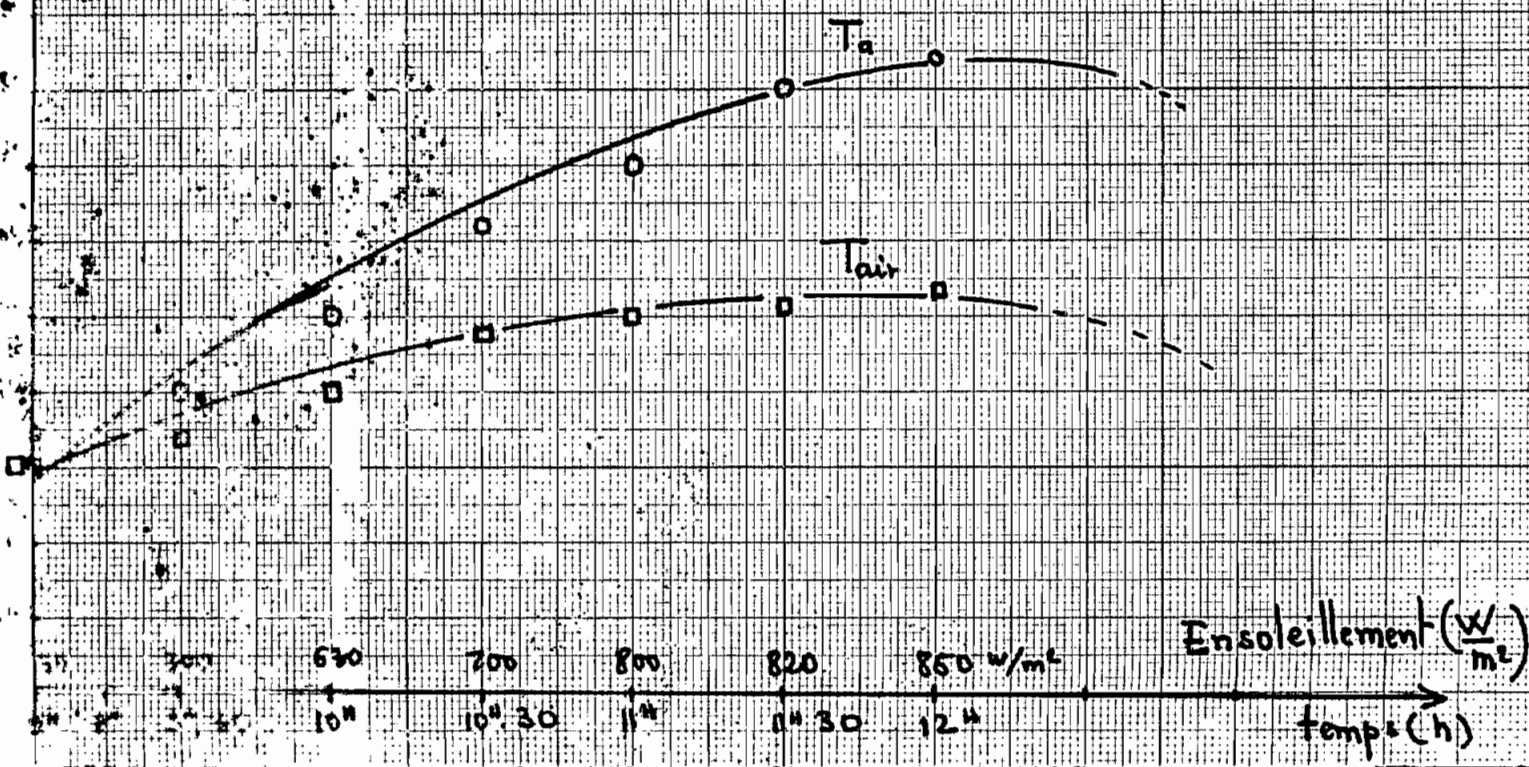
### Tableau des mesures

Heure	$T_a$ °C	$T_{air}$ °C	$I$ ( $\frac{W}{m^2}$ )
9 <sup>h</sup>	30	30	30
9 <sup>h</sup> .30	40	34	300
10 <sup>h</sup>	50	40	630
10 <sup>h</sup> .30	62	48	700
11 <sup>h</sup>	70	50	800
11 <sup>h</sup> .30	80	52	820
12 <sup>h</sup>	84	54	850

$T_a$  : température de l'autoclave  
 $T_{air}$  : " de l'air confiné

○ } mesure  
□ } "

Température (°C)





## Expérience du 26 Mai

- Quantité d'eau : 1 litre
- Conditions atmosphériques: Vent faible, soleil dru malgré quelques poussières en suspension

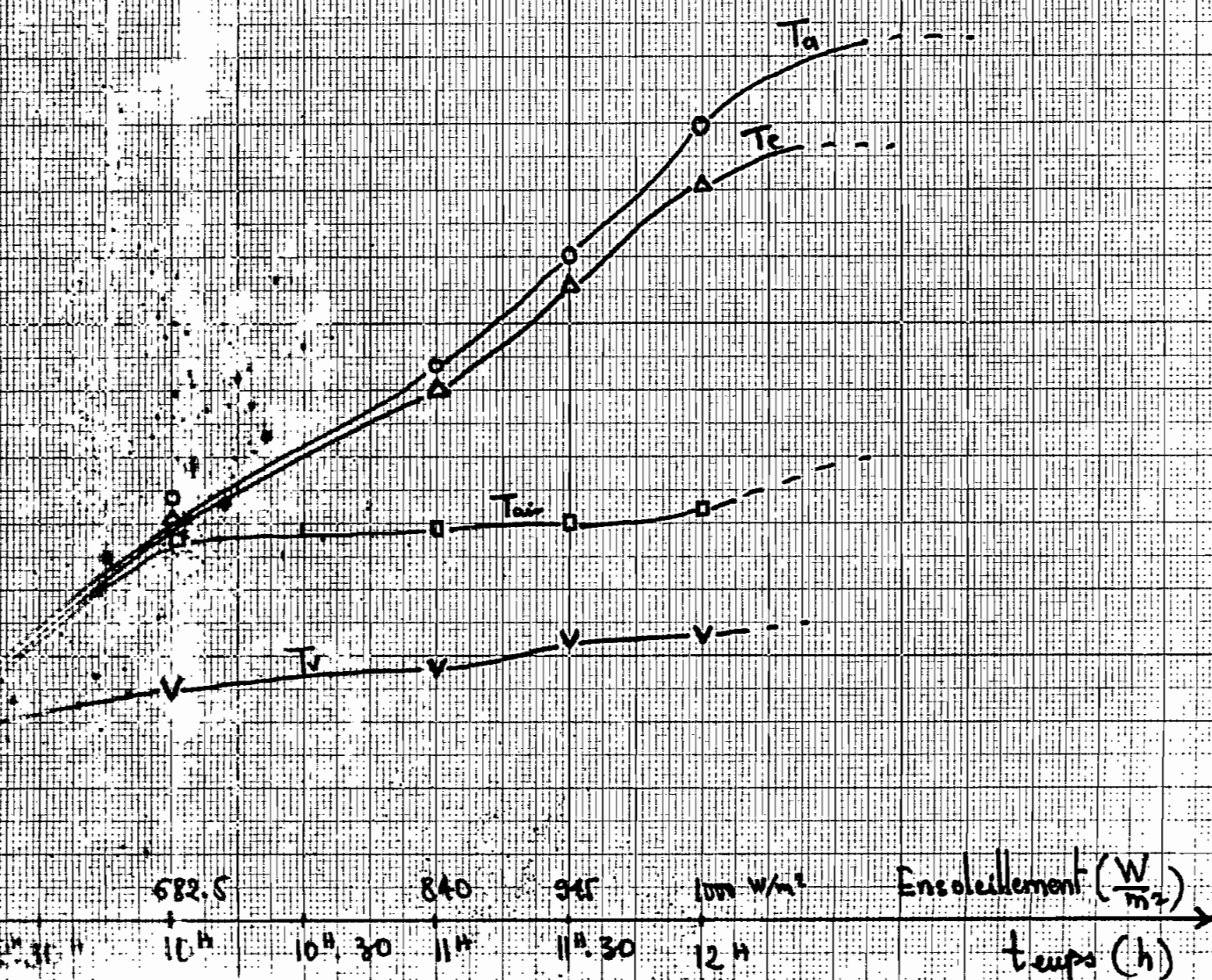
### Tableau des mesures

	$I \left( \frac{W}{m^2} \right)$	$T_a (^{\circ}C)$	$T_{air} (^{\circ}C)$	$T_v (^{\circ}C)$	$T_e (^{\circ}C)$	$T_{amb} (^{\circ}C)$
9H	500	28	28	28	28	28
10H	682.5	64	58	35	61	29
11H	840	84	59	38	80	32
11 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	945	100	60	42	96	33
12H	1000	110	62	43	102	34
12 <sup>H</sup> <sub>30</sub> (*)	1050	-	-	-	-	-
13 <sup>H</sup> (*)	-	-	-	-	-	-
14 <sup>H</sup> (*)	-	-	-	-	-	-

(\*) A 12<sup>H</sup> 30 mn, on enlève le thermomètre, installe le baromètre et mesure la pression max à 13<sup>H</sup>:  $p_{max} = 2.4$  bars.

$T_a$  = Température de l'autoclave 63  
 $T_e$  : " " l'eau  
 $T_{air}$  : " " air confiné  
 $T_v$  : " " du verre.

température (°C)



## 5. ESTIMATION DU COÛT DE REVIENT

### 5.1. Matériaux utilisés et coûts

Matériaux	Dimensions	Surface (m <sup>2</sup> )	Prix (CFA)
Bois contreplaqué - 1m x 1.3m	- 2x(1.04m x 0.65m)	3.718 m <sup>2</sup>	3191.129/m <sup>2</sup>
	- 2x(1.3m x 0.41m)		
Verre Plexiglas	1m x 1m.3	1.3 m <sup>2</sup>	23018.75/m <sup>2</sup>
Tôle d'acier : - galvanisé - ordinaire	- 1.3m x 0.6m	1.995 m <sup>2</sup>	7000/m <sup>2</sup>
	- 1.215 x 0.83m 2 x 1.3m x 1m		
Papier Aluminium	1.215 x 1.3 m	1.579 m <sup>2</sup>	187.879/m <sup>2</sup>

Le calcul du prix de revient se base sur la surface effectivement utilisée ; ainsi

Coût de revient total = 57520 F CFA



Ce coût ne comprend pas le limiteur de pression sur lequel nous ne disposons d'aucune information ainsi que le thermomètre témoin.

Le petit matériel aussi n'est pas quantifié quant bien même qu'il puisse l'être, à savoir les clous, vis, écrous, laine de verre, etc...

Nous majorons volontairement le coût des matériaux de 20% et ajoutons le coût de la main d'œuvre en considérant le volume du travail comme étant 45h pour un ouvrier sénégalais qui gagne 300 F CFA / heure.

$$\text{Coût global} = 57520 \times 1.2 + 300 \times 45$$

$$\text{coût global} = 82524 \text{ F CFA}$$

## 5.2 Amortissement de l'investissement

La comparaison se fait par rapport à un four sanitaire électrique.

Il est clair que la valeur dans  $n$  années d'une somme d'argent  $P_0$  placée à un taux d'intérêt  $i$  est de  $P_n = P_0 (1+i)^n$

De même la somme d'argent empruntée

à un taux d'intérêt  $i$ , pour investir, deviendra, dans  $n$  années,  $P_n = P_0 (1+i)^n$ .

Elle doit être payée par annuités  $R$  telle que

$$R = \frac{P_n \cdot i}{(1+i)^n - 1} = \frac{P_0 i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

$$\text{Nous avons aussi } P'_0 = R'_0 \frac{(1+i_{\text{eff}})^n - 1}{i_{\text{eff}} (1+i_{\text{eff}})^n} \quad [11]$$

$$\text{avec } i_{\text{eff}} = \frac{1+i}{1+j} - 1$$

où  $P'_0$  est la somme qu'un propriétaire peut au plus investir sur le système solaire pour en tirer profit si  $i$  est le taux d'intérêt et  $j$  le taux d'inflation,  $R'_0$  le versement annuel,  $n$  le nombre d'années ou durée de vie du système.

En supposant un taux d'intérêt  $i = 12\%$  au SENEGAL, et  $j = 6.4\%$  — spécifiquement pour 'électricité' — avec un prix de 80 F CFA/kwh, le système serait rentable à moins de 10 ans

— Comparaison faite de  $R$  et  $R'$  —

Cependant, en considérant la facture électrique comme des annuités dans un fonds de dépôt bancaire, cette période est réduite à son  $\frac{1}{3}$ , à savoir 3 ans et demi environ.

## CONCLUSION

Nous n'avons pas la prétention d'obtenir des résultats rigoureusement identiques à ceux prédits par l'analyse théorique quant bien même que celle-ci soit soigneusement menée. Nul n'ignore que la majorité des formules utilisées en transfert de chaleur sont empiriques.

L'important dans cette confrontation, était la conformité des allures des courbes théoriques et expérimentales ; l'écart étant dû à certains aspects qui s'avèrent être, dans notre cas, la différence entre le prototype et le modèle conçu. Différence au niveau de l'autoclave en acier galvanisé d'épaisseur 5 mm - conduite d'aqueduc au lieu d'une tôle de 2 mm, de la taille du capteur rapetissé de 30 cm dans la longueur, d'un couvercle de fortune formé d'un bouchon en caoutchouc blanc collé sur une plaquette d'acier boulonnée ; mais aussi des considérations analytiques telles les régimes transitoires, les pertes par aberrations géométriques ou chromatiques et par défauts d'orientation, etc... qui ne furent pas tenues à rigueur.

Compte tenu de l'aspect gratuit et disponible de l'énergie solaire, mais aussi de la montée galopante des prix de l'énergie et de la rareté de l'électricité en zone rurale, l'investissement sur un type de stérilisateur comme celui-ci ne peut être que rentable avec un temps de récupération de l'argent relativement court. Sa vulgarisation ne doit pas être négligée vue ses potentialités.

Globalement, cette étude nous aura renseigné sur les liaisons entre surface de captage, degré de concentration et proportion du diffus. Il nous apparaît clairement au sortir de notre étude, que pour augmenter la maniabilité du système ainsi que son temps de réponse, il faudrait une étude orientée vers la haute concentration — concentrateur sphérique, conique, hyperbolique, ... — du fait de l'importance du diffus au SENE GAL — importance accentuée par les vents de sable — sinon les surfaces demeureront toujours grandes.

Ainsi, cette étude, bien que donnant de larges satisfactions quant à la compati-

bilité des allures des courbes théoriques et pratiques, ne prétend pas être parfaite et requiert des retouches pour que l'énergie solaire serve l'humanité, dans ses applications en général, et en particulier pour que notre stérilisateur franchisse un pas en avant vers la santé pour tous.

# REFERENCES

Appendice 1.Valeurs numériques des constantes

$$d_a = 10 \text{ cm}$$

$$P = 29 \text{ cm}$$

$$h = 10 \text{ cm}$$

$$P_{\max} = 58.75 \text{ cm}$$

$$T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$$

$$T_{\text{aél}} = 223 \text{ K} \quad [2]$$

$$\alpha_a = 0.95$$

$$\alpha_v = 0.06$$

$$\rho_h = 0.76 \quad [3]$$

$$\rho_p = 0.76 \quad [3]$$

$$\tau_v = 0.87 \quad [2]$$

$$\epsilon_a = 0.90 \quad [2]$$

$$\epsilon_v = 0.90 \quad [2]$$

$$\sigma = 5.66961 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$



## Appendice 2.

### Valeurs numériques des paramètres.

$$A_a = 0.4084 \text{ m}^2$$

$$A_p = 0.8556 \text{ m}^2 \quad A'_p = 0.26 \text{ m}^2$$

$$A_v = 1.3 \text{ m}^2 \quad A'_v = 1.17 \text{ m}^2$$

$$F_{a-v} = 1$$

$$F_{v-ciel} = 0.75 \quad [7]$$

$$h_{v,air} = 2.707 \text{ w/m}^2$$

$$h_{a,air}^* = 5.258 \text{ w/m}^2$$

$$h_{v,cf} = 7.42 \text{ w/m}^2$$

$$H = 88.6 \text{ mm}$$

$$L = 1.3 \text{ m}^2$$

$$\theta = 60^\circ$$

### Appendice 3.

## Influence de la conductivité de l'auto-clave sur le temps de réponse.

Du paragraphe 7.3. on tire :

$$Q_u = h_{ea} A_a (T_a - T_c)$$

et nous savons aussi que  $Q_u$  est équivalente au flux d'énergie transmise par conduction à travers les parois de l'autoclave, c'est à dire :

$$Q_{tr} = A_a \frac{T_a - T_c}{\frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_c}\right)}{2k\pi L} + \frac{k}{h_{ea}r_c}}$$

Cette énergie transmise contribue à l'élevation de l'enthalpie de l'eau, d'où :

$$\frac{T_a - T_c}{\frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_c}\right)}{2k\pi L} + \frac{k}{h_{ea}r_c}} = \sum m_i c_{pi} \frac{dT}{dt} \quad (i = e, w, c)$$

$t$

$$\text{d'où} \quad \frac{T_c - T_a}{T_{e0} - T_a} = e^{-\frac{\sum m_i c_{pi} t}{\frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_c}\right)}{2k\pi L} + \frac{k}{h_{ea}r_c}}}$$

L'exponentielle diminue avec  $k$ ,  $\sum m_i c_{pi}$  d'où une augmentation de  $t$ .

### Appendice 4.

Calcul du volume occupé par la vapeur  
d'eau, énergie de vaporisation

$$V = \pi \frac{d_m}{2} L + \pi d_c L$$

$$V = \pi \times 1.3 \left[ 0.01 \times \frac{9 \times 10^{-2}}{2} \times 1 + \frac{(8 \times 10^{-2})^2}{4} \right]$$

$$= 0.0083723 \text{ m}^3$$

$$= 8.37 \text{ l}$$

Vapeur saturée à  $121^\circ\text{C}$  :  $v = 0.8852 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$  [10]

Masse de la vapeur :  $m_v = 9.46 \text{ g}$

Energie de vaporisation :

$$E_v = m_v H_v$$

$$= 9.46 \times \frac{2200.1}{4180} \times 10^{-3} = 4.98 \text{ kcal}$$

Cette énergie est négligeable face à l'énergie  
nécessaire pour échauffer  $1.5 \text{ kg}$  d'eau de  
 $30$  à  $121^\circ\text{C}$ , à savoir  $135 \text{ kcal}$ .

## Appendice 5.

### Calcul de certains coefficients et paramètres

- Coefficient  $h_{v,cf}$  (§ 7.1.1.2) :

$$h_{v,cf} = \frac{k}{L} \cdot 0.664 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2}$$

$$k = 0.02624 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$$

$$\nu = 16.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0.708$$

} Air (300 K) [10]

$$h_{v,cf} = \frac{0.02624}{1.3} \times 0.664 \cdot (0.708)^{1/3} \left( \frac{5 \times 1.3}{16.8 \times 10^{-6}} \right)^{1/2}$$

$$h_{v,cf} = 7.42 \text{ W/m}^2$$

- Coefficient  $h_{a,air}$  (§ 7.2.) :

$$h_{a,air} = 0.53 \frac{k}{2r_a} (Gr \cdot Pr)^{1/4}$$

$$Gr = \frac{d^3 \rho_f^2 g \beta_f \Delta T}{4\mu_f}$$

$$\Delta T = 30^\circ\text{C} \text{ (supposé)}$$

$$Gr = \frac{(0.1)^3 \times (0.8826)^2 \times 9.81 \times 30}{(2.286) \times 400 \times 10^{-10}} = 1096745.005$$

$$k = 0.03365 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$$

$$Pr = 0.689$$

Toutes les valeurs sont tirées de [10]

$$h_{a,air} = 5.258 \text{ W/m}^2$$

- Coefficient  $h_{v,air}$  (§ 7.1.2):

$$h_{v,air} = 1.28 (\Delta T)^{1/4}$$

$$\Delta T = 30^\circ\text{C} \quad (\text{supposé})$$

$$h_{v,air} = 2.707 \text{ W/m}^2$$

- Coefficient  $h_{ea}$  (§ 7.6):

$$h_{ea} = \frac{0.11 k_e}{r_a \ln \frac{r_a}{r_a - l_c}} (\text{Gr. Pr})^{0.29}$$

Les coefficients sont déterminés pour l'eau à  $120^\circ\text{C}$

$$\text{eau } (120^\circ\text{C}) \quad \begin{cases} \rho = 942.08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \mu = 2.32 \text{ kg/m}\cdot\text{s} \\ k_e = 0.685 \text{ W/m}\cdot\text{oc} \\ \text{Pr} = 1.44 \end{cases}$$

$$h_{ea} = \frac{0.11 \times 0.685}{0.05 \ln \frac{0.05}{0.05 - 0.02}} (108238.98 \times 1.44)^{0.29}$$

$$h_{ea} = 94.56 \text{ kcal/hre}$$

- Calcul de certains paramètres

$$\cdot A_a = \pi d_a \times L = \pi \times 0.1 \times 1.3 = 0.4084 \text{ m}^2$$

$$\cdot A_p = \frac{H}{\sin \theta} \times L \times 2 = 0.8556 \text{ m}^2$$

$$\cdot A_v = 2r_{\max} \times L = 1.3 \text{ m}^2$$

$$\cdot A'_p = (l \cos \theta) \times L \times 2 = 0.26 \text{ m}^2$$

$$\cdot A'_v = A_v - d_a L = 1.17 \text{ m}^2$$

## BIBLIOGRAPHIE

- Mamadou SOW Etude théorique et expérimentale d'un cuisEUR solaire.  
E.P.T. - Projet de fin d'études - Juin 1980
- [1] - Production et consommation d'énergie : retour au bon sens. AUGUSTIN OYOWE -  
Le "Courrier ACP-CEE", Janv, Fév. 1982. p. 51
- [2] - F. KREITH Transmission de chaleur et thermodynamique. Mann et C<sup>ie</sup> Editeurs, 1967
- [3] - J. A. DUFFIE, W. A. BECKMAN  
Solar Energy, Thermal Processes  
John-Wiley & Sons Edition 1974
- [4] - J. WARRER BLAKER Géométrie Optics  
Edition Marcel DECKER INC. New-York
- [4bis] - Technique de l'ingénieur p. 894 - 4
- [5] - Design of a solar autoclave.  
MEHDI N. BADAHORI - Solar Energy, the Journal  
of solar Science et technologie - Février 1976  
p. p. 489 - 496.
- [6] - Bocar SY et André GAUTHIER (CERER)  
Potentiel solaire au SENEGAL, 1983
- [7] - Dr JAN F. KREIDER et Dr F. KREITH  
Solar Energy Handbook  
Mac Graw - Hill, 1981

- [8] - V. FEODOSIEV Résistance des matériaux  
2<sup>e</sup> Edition MIR, Moscou 1971
- [9] - PALISSY Des matériaux  
Edition de l'école Polytechnique de Montréal, 1980
- [10] - M<sup>o</sup> PETITEAU Notes de cours  
E.P.T. 1982
- [11] - Mame Balla Guèye : Expérimentation  
de nouveaux types de combinaisons de capteur  
sofre et de chauffe-eau électrique  
E.P.T. - Projet de fin d'études - Juin 1983