



école polytechnique de thiès

**PROJET  
DE  
FIN D'ETUDES**

GM, 0436

**titre** CONCEPTION  
D'UNE POMPE SOLAIRE

**auteur** : P. A. N'DAW  
**génie** : MECANIQUE  
**date** : 1979

# CONCEPTION D'UNE POMPE SOLAIRE

DIRECTEUR

MICHEL PETITEAU

AUTEUR

PAPA ALIOUNE N'DAW

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont d'abord et tout naturellement vers  
Mon directeur de projet M. Thichel Petiteau pour les  
Conseils judicieux qu'il n'a cessé de me prodiguer  
ainsi qu'à tout ceux qui, de près ou de loin, ont  
apporté leur contribution à mes recherches notamment  
aux responsables de l'IPM (Institut de Physique Météo-  
rologique) pour la documentation qu'ils ont gracieuse-  
ment mise à ma disposition.

## TABIE des MATIERES

### PREMIERE PARTIE

	<u>Page</u>
Ia. But du projet	1-
Ib. Généralités sur l'énergie solaire	2-
Ic. Principe de fonctionnement d'une pompe solaire utilisant un cycle à basse température	7-

### DEUXIEME PARTIE

IIa. Choix du fluide	14-
IIb. Choix du moteur et de la pompe	17-
IIc. L'isolateur	19-
IId. Evaluation des rendements	20-
IIe. Calcul de l'échangeur	25-
IIf. Calcul du Condenseur	31-
IIG. Discussion	45

### TROISIEME PARTIE

IIIa. Possibilité d'installation dans un village autour de Thiès	46
IIIb. Evaluation des installations du même genre existant au Sénégal	48-
IIIc. Conclusion	50-

PREMIERE  
PARTIE

## I. - BUT du PROJET

Un des problèmes de notre époque réside dans le fait que les pays du Sahel, dont le sous-sol regorge d'eau puissent souffrir de la sécheresse par manque de moyens leur permettant de ramener cette eau à la surface. Il est donc devenu de la plus haute importance pour ces pays de pouvoir disposer de pompes leur permettant d'atteindre cette eau souterraine.

Cependant la crise mondiale de l'énergie ayant rendu très onéreuse l'utilisation de pompes actionnées soit par un moteur électrique soit par un moteur à essence, nous nous voyons obligés de nous tourner vers une source d'énergie encore inexploitée et qui offre la particularité d'être abondante, gratuite et non polluante, à savoir l'énergie solaire. Nous nous proposons dans cette étude de faire la conception d'un système de pompage dont le moteur est mû par l'énergie solaire et qui puisse servir à l'alimentation en eau d'un village ainsi qu'à l'irrigation des terres cultivables. Il nous faut donc un système qui soit aussi simple que possible afin que les villageois puissent assurer eux-mêmes sa prise en charge. Pour terminer nous allons faire une brève évaluation des installations du même genre existant déjà au Sénégal.

## 16. GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE

### a. Nature de l'énergie solaire

Le soleil est une étoile dont le diamètre est d'environ 50 fois celui de la terre et sur laquelle des millions de réactions nucléaires se produisent par seconde. L'énergie ainsi produite est dispersée par rayonnement et peut donc se faire parvenir jusqu'à la terre et aux autres étoiles du système solaire.

Le soleil se comporte donc comme un corps noir à la température de  $5600^{\circ} \text{K}$ .

Cependant lors de la traversée de l'atmosphère les rayons du soleil perdent par diffusion, réflexion et absorption une partie de leur énergie et c'est donc une fraction de celle-ci qui parvient sur terre.

On définit la Constante solaire comme étant la quantité d'énergie rayonnante, supposée intégralement transformée en chaleur, que le soleil envoie par minute à travers une surface de  $1 \text{ m}^2$ , normale aux rayons solaires, située en dehors de l'atmosphère terrestre à une distance du soleil égale à la distance moyenne de la terre au soleil.

C'est donc en d'autres termes l'énergie que le soleil recevrait s'il n'y avait pas d'atmosphère. On admet comme valeur de cette constante  $1395 \text{ Watts/m}^2$ .

## b. Captation et Conversion de l'énergie solaire

La Captation de l'énergie solaire peut se faire de 2 façons :

- Captation indirecte ou avec Concentration, au moyen de miroirs ou de lentilles, qui modifient la direction des rayons solaires et généralement les concentrent avant la conversion en énergie utilisable.
- Captation directe ou sans concentration, au moyen de panneaux plans réceptifs, convenablement équipés et dénommés insolateurs.

Ces insolateurs sont constitués par une surface peinte en noir, donc ayant un fort pouvoir absorbant, sur laquelle on place une plaque de verre permettant, grâce à l'effet de serre, de constituer un piège à énergie qui laisse contenir l'énergie provenant du soleil. Cette énergie ainsi obtenue permet de chauffer un fluide. Pour différentes raisons parmi lesquelles nous citerons la commodité et la simplicité, c'est ce mode de captation que nous emploierons.

L'énergie solaire peut être convertie en chaleur, en électricité, en énergie chimique ou en énergie mécanique soit par des procédés directs soit par des procédés indirects.



Les conversions directes comprennent les conversions photothermique, photoélectrique, photobiologique, photochimique. Les conversions indirectes utilisent la voie thermique et comprennent principalement, d'une part, les opérations purement thermiques qui ne font intervenir que des échanges de chaleur et, d'autre part, des opérations thermodynamiques pour lesquelles on fait intervenir une source chaude et une source froide, cette dernière jouant un rôle capital.

Nous allons décrire 2<sup>e</sup> de ces procédés qui nous intéressent particulièrement :

- La Conversion photoélectrique - Elle utilise l'effet photovoltaïque qui permet une conversion directe en énergie électrique de l'énergie des photons émis par le soleil -

Les cellules dites "photovoltaïques" sont essentiellement constituées de couples semi-conducteurs-métaux -

Sous l'action de la lumière, elles deviennent le siège d'une force électromotrice, qui croît avec l'intensité de la lumière -

Le faible rendement de ces cellules photovoltaïques, joint à leur prix prohibitif, empêche, pour le moment, l'utilisation de ce procédé pour le pompage de l'eau.

Cependant ce procédé constitue la voie d'avenir et des recherches sont menées afin de trouver le meilleur matériau à utiliser, qui permettrait d'accroître le rendement des photopiles tout en abaissant leur prix de revient

- Les transformations thermodynamiques - Nous voulons parler des transformations thermoélastiques, au moyen d'un fluide en cycle fermé. Elles peuvent se faire de 2 façons différentes

\* Transformation de l'énergie solaire en énergie mécanique au moyen d'un cycle solaire à haute température

Pour cela des miroirs paraboliques concentrent le rayonnement lumineux sur des corps noirs situés à leur foyer. Les calories ainsi produites alimentent un système thermodynamique classique pouvant atteindre un rendement thermodynamique élevé.

Cependant ces systèmes présentent des inconvénients qui les rendent inutilisables pratiquement hors de contextes exceptionnels

- La Concentration exige des rayons parallèles, donc une nébulosité nulle, très rare.
- Elle demande une orientation chronique et précise des miroirs, d'où des dispositifs complexes, peu fiables, très difficiles à entretenir

• Les surfaces réfléchissantes doivent être maintenues en bon état, et rigoureusement propres, ce qui nécessite une grande surveillance

Pour toutes ces raisons nous choisirons la voie suivante

\* Transformation de l'énergie solaire en énergie mécanique au moyen d'un cycle thermique à basse température  
là la captation se fera au moyen de collecteurs plans ou insolateurs -

La chaleur emise par le soleil est utilisée comme source chaude et l'eau pompée comme source froide.

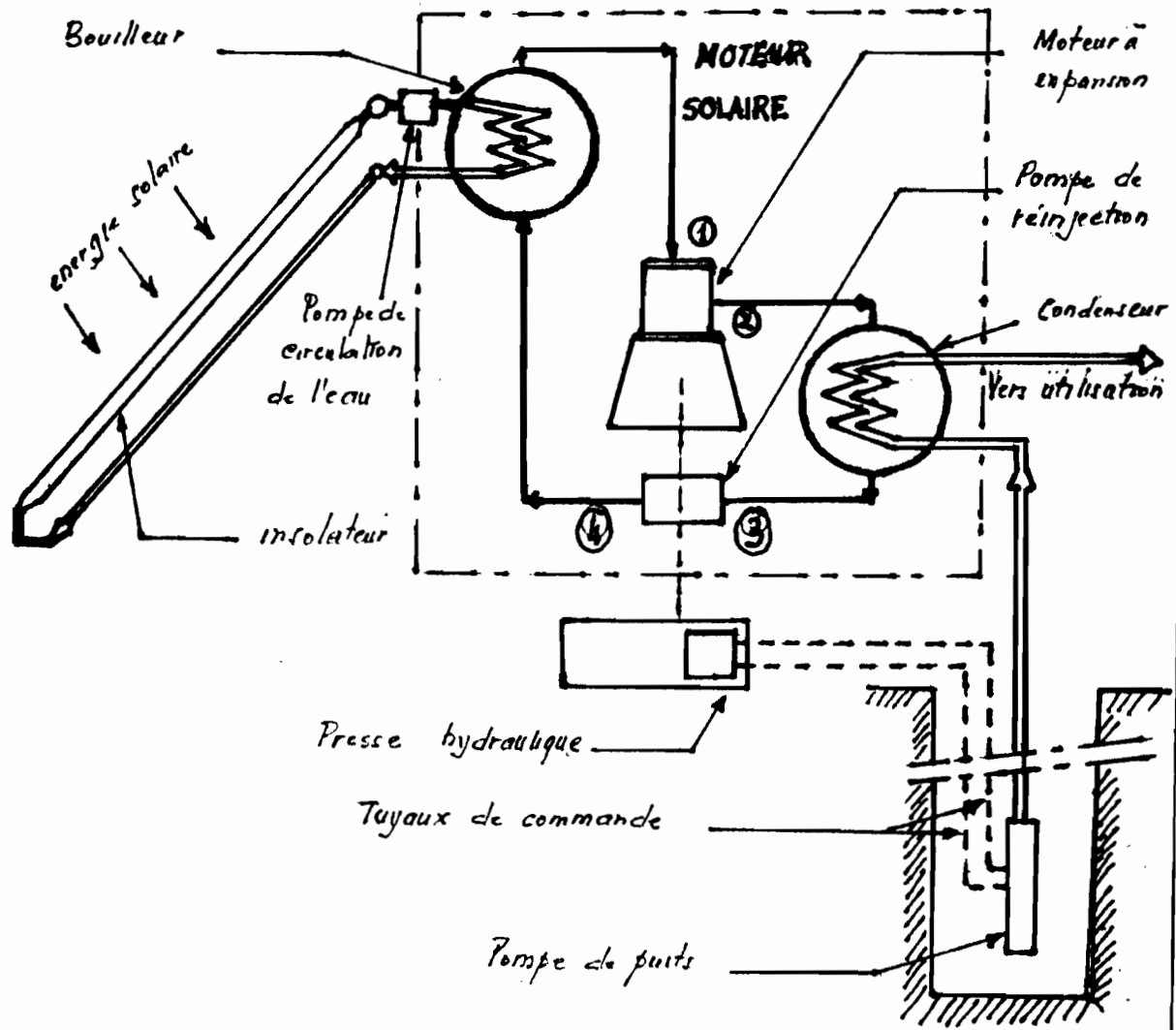
Entre ces 2 sources, d'après le principe de CARNOT, il est possible d'obtenir un travail en utilisant un moteur à piston -

C'est cette méthode qui a été utilisée pour faire fonctionner les pompes que nous avons pu voir et c'est celle que nous allons utiliser dans cette étude -

Nous en ferons plus loin une plus ample description

# 2.c. PRINCIPES de FONCTIONNEMENT d'une POMPE SOLAIRE UTILISANT UN CYCLE A BASSE TEMPERATURE

## 1. Schema de l'installation



Cette installation est donc constituée de 2 parties différentes

a/ Partie moteur

L'énergie solaire est captée par l'insolateur, appareil constitué par de grandes plaques planes exposées au soleil, soudees à des tubes dans lesquels circule de l'eau. Cette eau en passant dans un échangeur ou souilleur, vaporise le fluide moteur qui est du butane. Celui-ci se dirige vers un moteur à expansion où il fournit de l'énergie en passant de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ . Ensuite le fluide va dans le condenseur, où il se refroidit au contact de l'eau du puits. Enfin la pompe de reinjection, actionnée directement par le moteur, renvoie ce fluide vers l'échangeur.

b/ Partie pompe

La pompe que nous decrivons plus loin est une pompe à piston, elle est placée au fond du puits et elle refoule l'eau du forage vers le Condenseur. A la sortie de celui-ci, elle est renvoyée vers un reservoir où elle peut être utilisée par les usagers.

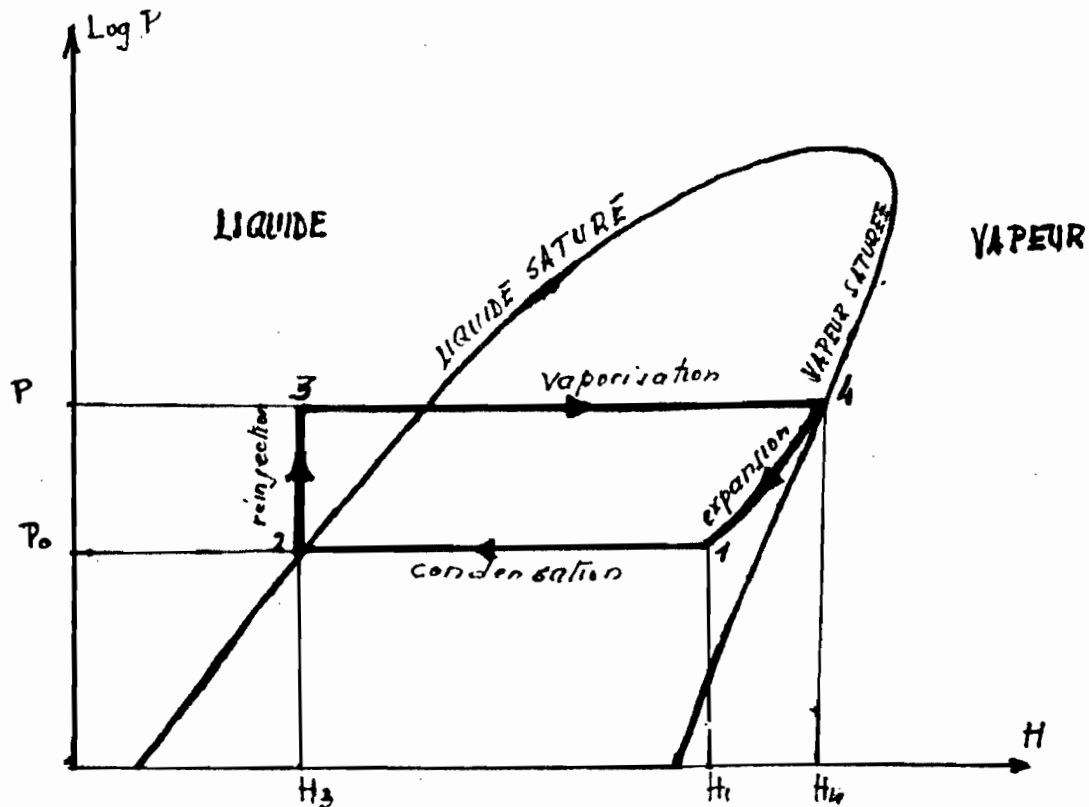
## 2/ Etude théorique du fonctionnement

Pour l'étude théorique du cycle, il est commode d'employer le diagramme de Mollier  $H = f(\log P)$  où  $H$  désigne l'enthalpie du fluide dans un état donné et  $P$  la pression.

### a. Diagramme de fonctionnement

On trouvera dans la suite de cette étude un diagramme réel de fonctionnement avec le balancé.

Nous avons supposé dans ce diagramme que l'expansion se faisait à entropie constante, c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur. Pendant l'échappement il y aura donc une condensation partielle.



## b. Différentes phases du fonctionnement

On peut distinguer 4 phases du cycle

### La vaporisation

Elle s'effectue dans l'échangeur à pression constante.

Il n'y a pratiquement pas de surchauffe - Le point représentatif de l'état du fluide à sa sortie de l'échangeur se trouve donc sur la courbe de pression de vapeur saturante et sur l'isotherme correspondant à la température de la source chaude. On obtient ainsi le point  $k$ . La vaporisation se fait durant le passage du point  $3$  au point  $k$ .

### L'expansion

Au cours de l'expansion, le fluide passe de la pression de vaporisation  $P$  à la pression de condensation  $P_0$ . Elle se fait durant le passage du point  $k$  au point  $1$ . Dans l'hypothèse favorable de l'entropie constante, ce passage peut être représenté par le segment  $k-1$ , parallèle aux lignes isentropiques.

### La Condensation

Elle se fait pendant que le fluide se trouve dans le condenseur.

Il s'agit d'un changement d'état, donc la pression reste constante. Le segment  $1-2$  se détermine par la température de l'eau de refroidissement, qui donne en même temps, la pression  $P_0$ .

### La reinjection

C'est la phase au cours de laquelle le fluide, sous forme de liquide, passe de la pression de condensation  $P_0$  à la pression de vaporisation  $P$  (segment 2-3)

La reinjection se fait au moyen d'une pompe auxiliaire. En première approximation, et étant donné les faibles puissances mises en jeu, on admet que la reinjection se fait à enthalpie constante.

On peut déduire de cette étude le rendement thermique. Il se définit comme le rapport de l'énergie fournie par le fluide à celle qu'il a reçue

Soit :  $\dot{D}$  le débit de fluide en kg/heure  
 $H$  son enthalpie en kcal/kg

L'énergie fournie par le fluide peut s'écrire, en supposant la détente isentropique

$$W_{\text{expansion}} = (H_4 - H_1) \dot{D}$$

L'énergie reçue dans l'échangeur peut s'écrire

$$W_{\text{échangeur}} = (H_4 - H_3) \dot{D}$$



## B- Rendement thermique

De ceci, on peut deduire le rendement thermique:

$$R_{th} \% = \frac{W_{expansion}}{W_{echangeur}} = \frac{H_4 - H_1}{H_4 - H_3} \times 100$$

La <sup>valeur</sup> température de ce rendement serait très proche de celle du rendement de Carnot si la température de la source chaude était très près de celle de l'échangeur, et la température de la source froide très près de celle du condenseur, et surtout si l'expansion et la réinjection étaient isentropiques

## J- Rendement global

$$R_g = R_i \times R_e \times R_j \times R_m \times R_p \quad \text{avec}$$

Rendement de l'isolateur  $R_i$

Sa valeur est d'environ 50%

On peut approximativement le calculer de la manière suivante

- Pertes par le verre 15%
- Pertes par la face avant 25%
- Pertes par la face arrière (isolée) 10%

Ces différentes estimations ont été tirées du bulletin de la  
SOFRETES (Société Française d'Etudes Thermiques et d'Energie Solaire)

## Rendement de Carnot $R_c$

Pour s'approcher plus près des conditions réelles du rendement Carnot, on considère comme sources chaude et froide, respectivement l'échangeur et le condenseur, et non l'eau les

isolateurs et l'eau pompée, pour tenir compte des gradients de température qui règnent dans ces deux appareils

Pertes dues à la réinjection  $R_j$

La pompe de réinjection est couplée avec le moteur. Une partie de la puissance est donc absorbée par la réinjection

Rendement du moteur  $R_m$

Le rendement du moteur est constitué

- de son rendement proprement dit - rendement mécanique
- d'un rendement thermique interne - L'expansion en effet n'est pas idéale, une partie seulement de l'énergie se transforme en travail, l'autre partie, transformée en énergie thermique, est perdue

Rendement de la pompe  $R_p$

En l'absence de données expérimentales nous serons obligés d'estimer la plupart de ces rendements afin de pouvoir calculer le rendement global  $R_g$

DEUXIEME  
PARTIE

IIa. CHOIX DU FLUIDE

Le fluide que nous allons employer, et qui va servir à actionner le moteur, doit répondre à certaines exigences

- Il faut qu'il soit adapté aux températures des sources chaudes et froides c'est à dire se vaporiser à la température qui règne dans l'échangeur et se liquéfier à celle du condenseur
- Les pressions de fonctionnement correspondantes ne doivent pas être trop élevées -
- Il ne devra pas être toxique
- Il devra être facilement transportable
- Son prix ne devra pas être trop élevé
- Enfin nous devons pouvoir nous procurer son diagramme thermodynamique -

Un fluide à notre avis répond à toutes ces prescriptions, il s'agit du butane qui en outre présente l'avantage d'être facilement accessible sur le marché -

C'est donc sur lui que va se porter notre choix -

À la page suivante se trouve le diagramme thermodynamique de ce fluide, avec lequel nous allons travailler -

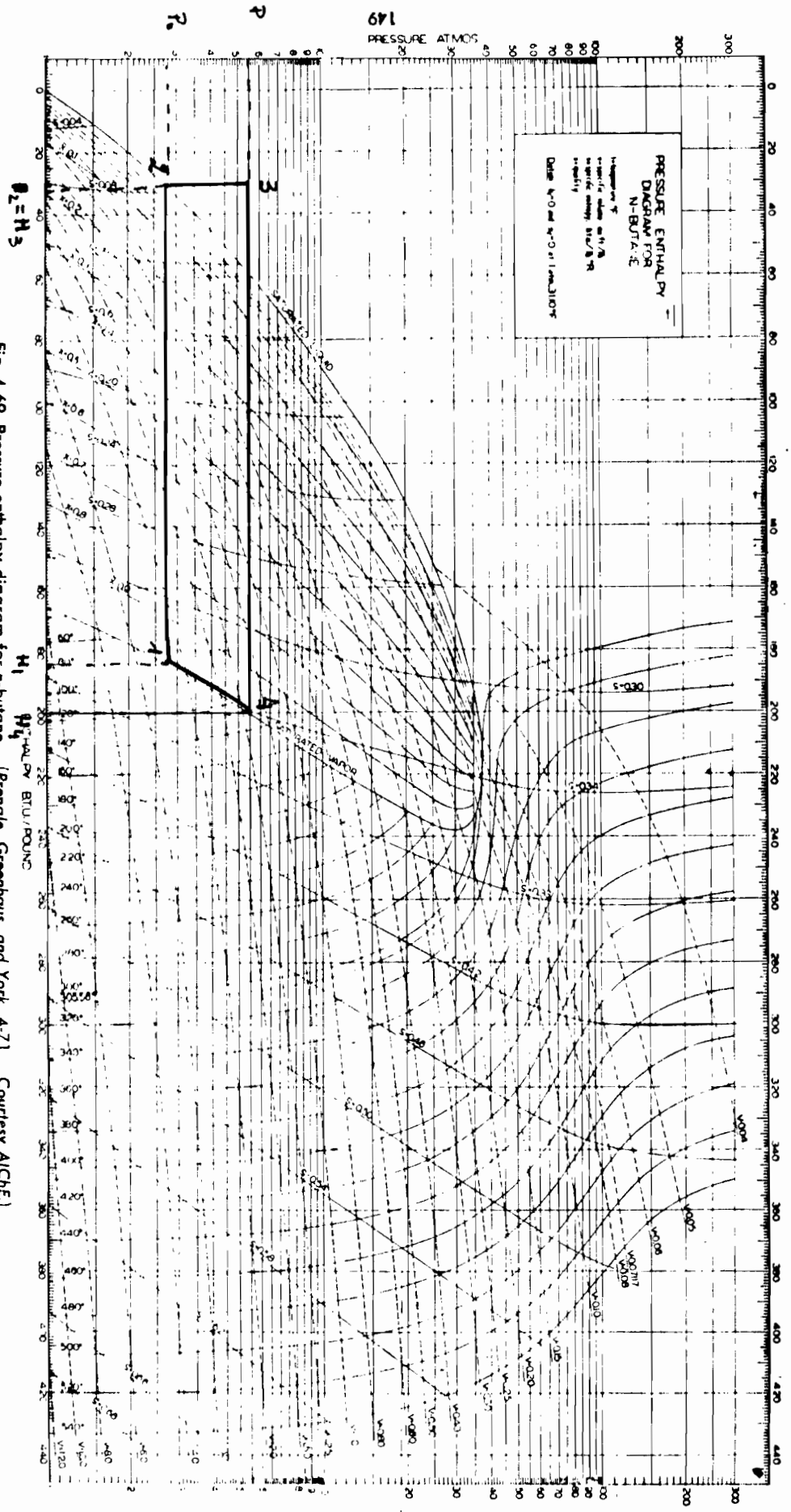


Fig. 4-69. Pressure-enthalpy diagram for n-butane. (Prengle, Greenhaus, and York, 4-71. Courtesy AIChE.)

149

PRESSURE ATMOS

PRESSURE-ENTHALPY  
DIAGRAM FOR  
N-BUTANE  
Temperature of  
saturation of  
n-butane in atmospheres  
and critical density in g/cm<sup>3</sup>  
Date: N-0 and N-0-01 (1941)

$\theta = H_3$

H<sub>1</sub> H<sub>2</sub> BTU/POUND

### Determination du cycle thermique

Si nous supposons la température du fluide à sa sortie de l'échangeur égale à  $55^{\circ}\text{C}$  et celle à sa sortie du Condenseur égale à  $30^{\circ}\text{C}$  nous pouvons tracer le cycle sur le diagramme thermodynamique -

#### Pression $P$

C'est la pression du fluide dans l'échangeur - Or dans celui-ci le fluide se vaporise, il est donc à la pression de vapeur saturante pour la température correspondante -

Celle-ci étant de  $55^{\circ}\text{C}$  soit  $131^{\circ}\text{F}$  nous lisons sur le diagramme  $P = 5.5 \text{ atm}$

#### Pression $P_1$

C'est la pression du fluide dans le condenseur - le fluide liquide sort du condenseur à  $30^{\circ}\text{C}$  soit  $86^{\circ}\text{F}$ .  $P_1$  est la pression correspondante au palier de liquéfaction pour cette température - On lit  $P_1 = 2.7 \text{ atm}$

Nous avons supposé que l'expansion se faisait sans échange de chaleur avec l'extérieur, elle se fait donc le long d'une ligne à entropie constante ( $S = \text{cst}$  sur le diagramme) - En réalité l'expansion se fera sur une ligne légèrement différente, ce qui n'entraîne aucune modification dans les résultats.

## IIb: CHOIX de la POMPE et du MOTEUR

Le choix de la pompe dépend de la profondeur du puits que l'on se propose d'exploiter. Cette profondeur détermine :

- L'importance de l'installation
- Le choix du fluide
- Le type de Condenseur (mode de refroidissement).

Dans notre cas notre installation est assez importante puisqu'elle doit servir aussi bien à l'alimentation en eau des populations et du bétail mais aussi à l'irrigation des terres.

Nous pouvons choisir comme type de pompe la même que celle employée par la SIFRETES (Société Française d'Études Thermiques et d'Énergie Solaire) et qui équipe les diverses installations de pompes solaires installées au Sénégal.

Il s'agit d'une hydropompe destinée à l'exhaure, à télécommande hydraulique et comprenant d'une part une presse hydraulique située près du moteur solaire, d'autre part une pompe à piston à commande hydraulique au fond du puits. Ce genre de pompe, à notre avis, correspondrait parfaitement au type d'installation que nous voulons mettre sur pied.

!

### Choix de la puissance du moteur

Il nous devient donc tenir compte des spécificités de notre installation qui ne va non seulement servir à ravitailler les populations et le bétail en eau, mais aussi à irriguer les terres.

Il faudra aussi tenir compte de la profondeur du puits mais aussi du débit d'eau demandé.

À notre avis une pompe de 18 CV, soit 7.5 kW, ferait parfaitement notre affaire.

Cette puissance est reliée à la profondeur du puits et au débit d'eau demandé par la relation

$$P_p = \frac{Q \cdot H}{\eta_p} \quad \text{kgm/s}$$

$H$  = Hauteur de refoulement en mètres

$Q$  : Débit d'eau en litres/seconde

$\eta_p$  : Rendement de la pompe au puits. Il varie suivant les cas entre 30 et 50%

La puissance théorique du moteur est déterminée par :

$$P_m = \frac{P_p}{\eta_m}$$

$\eta_m$  est le rendement du moteur, il varie entre 25 et 40%

Si pour notre cas nous le prenons égal à 30% on a

$$P_m = \frac{7.5}{0.3} = 25 \text{ kW}$$

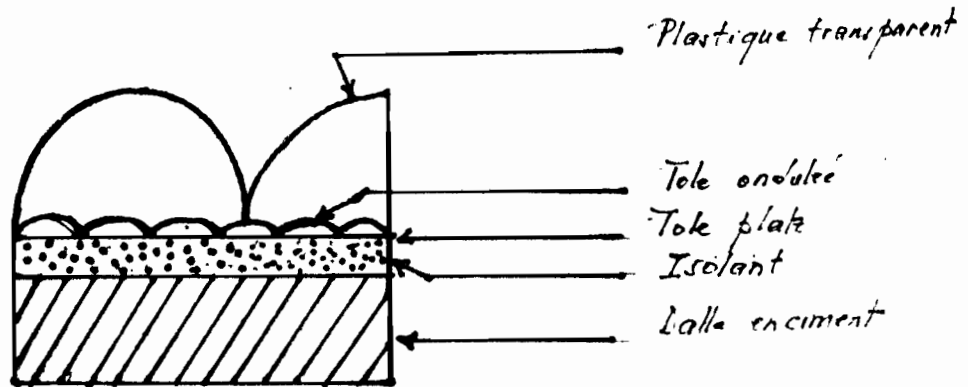


## II- L'INSOLATEUR

C'est un insolateur plan, rectangulaire, incliné sur l'horizontal d'un angle égal à la latitude du lieu.

Nous avons trouvé un exemple dans la thèse de M. J.-P. GIRARDIER sur les Pompes solaires parées dans les annales de la faculté des Sciences de l'Université de Dakar à la page III-

Il s'agit d'un insolateur que l'on peut construire soi-même



Coupe schématique

L'eau circule entre une tôle ondulée et une tôle plane soudées l'une à l'autre en quelques points (soudure électrique si possible)

La face de la tôle ondulée exposée au soleil est noiree.

On dispose l'ensemble de ces tôles sur une plaque en ciment.

On isole les tôles du ciment par un isolant trouvé sur place (paille, crin, etc)

On dispose au-dessus des tôles des demi-cylindres en matière plastique transparente, dans le double but d'éviter les effets

nécessaire de la ventilation et de produire un effet de serre qui améliore le rendement de l'isolateur.

L'eau circule par circulation forcée et monte dans l'isolateur

### Calcul de la quantité de gaz qui circule

Nous connaissons déjà la puissance théorique du moteur  $P_m$ . Or, si on suppose l'expansion adiabatique, on a

$$(4) \quad \boxed{P_m = G (h_u - h_l)} \quad \text{~~25x3600~~$$

$G$ : Quantité de gaz exprimée en kg/h

$h_u$  et  $h_l$  se lisent sur le diagramme de fonctionnement

Dans notre cas nous avons  $P_m = 25 \text{ kW}$

$$h_u = 200 \text{ BTU/lb} = 466 \text{ kJ/kg}$$

$$h_l = 124 \text{ BTU/lb} = 429 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Donc } G = \frac{P_m}{h_u - h_l} \times 3600 = \frac{25}{466 - 429} \times 3600 = 2432 \text{ kg/h}$$

### Calcul de la surface de l'isolateur

La chaleur nécessaire à la vaporisation du fluide est égale à :

$$\boxed{Q_v = G (h_u - h_l)} \quad \text{keal/h}$$

$h_u$  et  $h_l$  se lisent sur le diagramme de fonctionnement

Cette quantité de chaleur est transmise par l'intermédiaire de l'isolateur et de l'échangeur. En règle générale on choisira le rendement de cet ensemble entre 40 et 50%.

Ce rendement est défini par:

$$\eta_i = \frac{q_v}{q_s}$$

où  $q_s$  est la quantité de chaleur fournie par le soleil

Si nous supposons ce rendement égal à 0.45 on obtient

$$\eta_i = 0.45 = \frac{q_v}{q_s} \Rightarrow q_s = \frac{q_v}{0.45}$$

$$q_v = G (H_4 - H_3) \quad \text{avec } G = 2432 \text{ kg/l}$$

On lit sur le diagramme

$$H_4 = 466 \text{ kJ/kg}$$

$$H_3 = 70 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{D'où } q_v = 2432 (466 - 70) = 963072 \text{ kJ/l}$$

$$\text{De là on tire } q_s = \frac{963072}{0.45} = 2.14 \times 10^6 \text{ kJ/l}$$

Cette énergie peut aussi se calculer de la façon suivante

$$q_s = G_0 \cdot \tau_0^m \cdot A \cdot \cos i \quad (\text{Watts})$$

où  $G_0 =$  constante solaire = 1367 Watts/m<sup>2</sup>

$\tau_0 =$  Facteur de transmission = 0.7 (valeur moyenne)

$m = 1$  (réception se fait perpendiculairement aux rayons solaires)

La latitude de Thiès est de 28° N (environ)

$$\text{D'où } \cos i = \cos 28 = 0.873$$

De là nous pouvons tirer la surface d'échange  $A$  qui est la surface des isolateurs

$$A = \frac{q_r}{\eta \cdot Z_u^m \cdot \cos i}$$

$$= \frac{2.14 \times 10^6}{1.367 \times 0.7 \times 0.383 \times 3600} \approx 690 \text{ m}^2$$

Cette surface peut être réduite en accroissant le rendement de l'ensemble insulateur - échangeur

## II EVALUATION des RENDEMENTS

### 1. Rendement thermique

$$\eta_{th} = \frac{W_{expansion}}{W_{chauffeur}} = \frac{H_4 - H_1}{H_4 - H_3} = \frac{466 - 429}{466 - 70} = 9.3\%$$

En comparaison nous pouvons calculer le rendement de Carnot

$$\eta_{ca} = 1 - \frac{T_0}{T_1} \quad \text{avec } T_0 = \text{Température source froide}$$

$T_0 = 32^\circ\text{C}$  (Condensateur)

$T_1 = \text{Température source chaude}$

$T_1 = 60^\circ\text{C}$  (Insolateur)

$$\text{Jou } \eta_{ca} = 1 - \frac{305}{333} = 9.4\%$$

Les valeurs des 2 rendements sont donc très proches

### 2. Rendement global

$$\eta_g = \eta_{ix} \eta_{cx} \eta_{ix} \eta_{mv} \eta_p$$

On a vu que  $\eta_{ix} = 50\%$

$\eta_{cx} = 9.4\%$

Si nous estimons le rendement du moteur à 30%

et celui de la pompe à 10%, le facteur  $\eta_p$  dû à la

pompe de contrepression peut pour sa part être évalué

à 80% vu que d'après le bulletin de la SEPRETES il est

estimé à 80% pour les petites installations

De là on peut évaluer le rendement global

$$\begin{aligned} \eta_i &= 0.50 \times 0.086 \times 0.40 \times 0.70 \times 0.80 \\ &\approx 0.1\% \end{aligned}$$

Ce rendement est évidemment très faible.

Ainsi pour une puissance de  $q_s = 2.14 \times 10^6 \text{ kJ/h}$  soit  $594 \text{ kW}$  fournie par le soleil, la puissance transmise à l'eau n'est que de  $0.001 \times q_s = 0.001 \times 594 = 2.1 \text{ kW}$

Mais n'oublions pas que la pompe une fois installée ne coûte pratiquement plus rien à son utilisateur et n'oblige pas à s'approvisionner périodiquement en carburant.

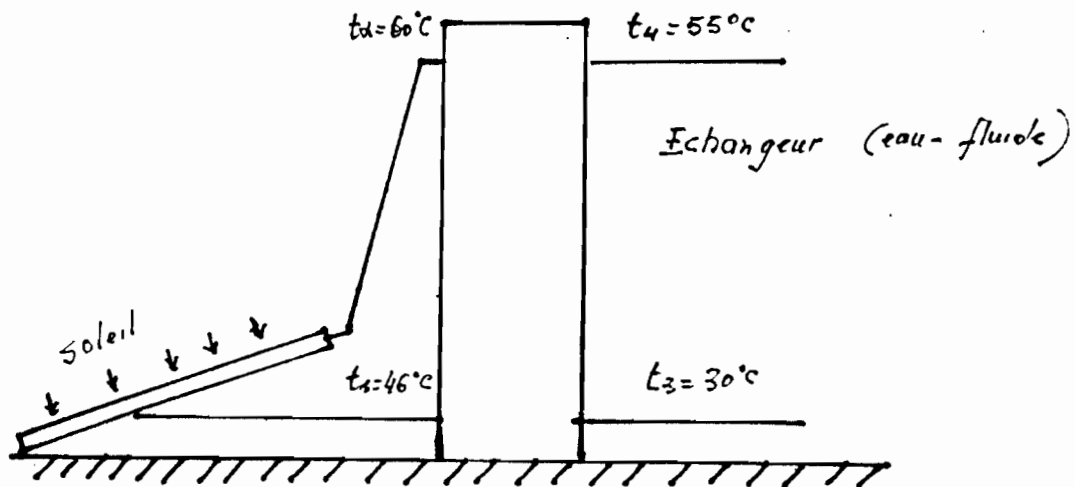
Le véritable problème est le prix de revient de l'appareil.

## II. CALCUL de L'ECHANGEUR

L'échangeur a pour but de transmettre au fluide la quantité de chaleur qu transmise par l'eau des insolateurs. Le dimensionnement de cet appareil doit se faire de telle sorte que cette transmission se fasse dans les meilleures conditions possibles.

Nous allons supposer comme température d'entrée de l'eau dans l'échangeur  $t_2 = 60^\circ$  et comme température de sortie  $t_1 = 46^\circ$ .

Les températures d'entrée et de sortie du fluide seront prises comme  $t_4 = 55^\circ\text{C}$  et  $t_3 = 30^\circ\text{C}$ .



### a. Dimensionnement de l'échangeur

Nous nous sommes servis des données fournies par la T.E.M.A. ou Tubular Exchangers Manufacturers Association que nous avons pu trouver dans le "Chemical Engineers' Handbook" de Perry et Chilton Éditions Mc Graw Hill aux pages

11-10, 11-11 et 11-12.

C'est ainsi que notre choix se portera sur un échangeur tubulaire vertical avec des tuyaux en cuivre avec

$$d_e = \frac{3}{4}'' = 19 \text{ mm} \text{ de diamètre extérieur}$$

$$e = 6 \text{ mm} \text{ d'épaisseur} \text{ - Soit}$$

$$d_i = 13 \text{ mm} \text{ de diamètre intérieur}$$

Les longueurs des tuyaux aussi étant normalisées nous obtenons des tuyaux de longueur  $L = 16 \text{ pi} = 4.9 \text{ m}$

Les 2 fluides vont circuler à contre-courant

La formule de Newton donnant la quantité de chaleur transférée à travers une surface est la suivante

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM}$$

où  $Q$  = Chaleur transférée à travers  $A$

$A$  = Surface d'échange

$\Delta T_{LM}$  = Différence logarithmique des températures

$U$  = Coefficient global de transfert de chaleur rapporté à  $A$

Il est donné par la formule

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}}$$

où  $\Delta T_e$  = Ecart de température à l'entrée de l'échangeur entre eau et fluide

$\Delta T_s$  = Ecart de température à la sortie



Dans notre cas nous avons

$$\Delta T_c = 46 - 30 = 16^\circ C$$

$$\Delta T_s = 60 - 55 = 5^\circ C$$

J'ou  $\Delta T_m = \frac{16 - 5}{\ln \frac{16}{5}} = 9.5^\circ C$

b. Détermination de U'

C'est le fluide qui circule à l'intérieur des tubes alors que l'eau circule à l'extérieur.

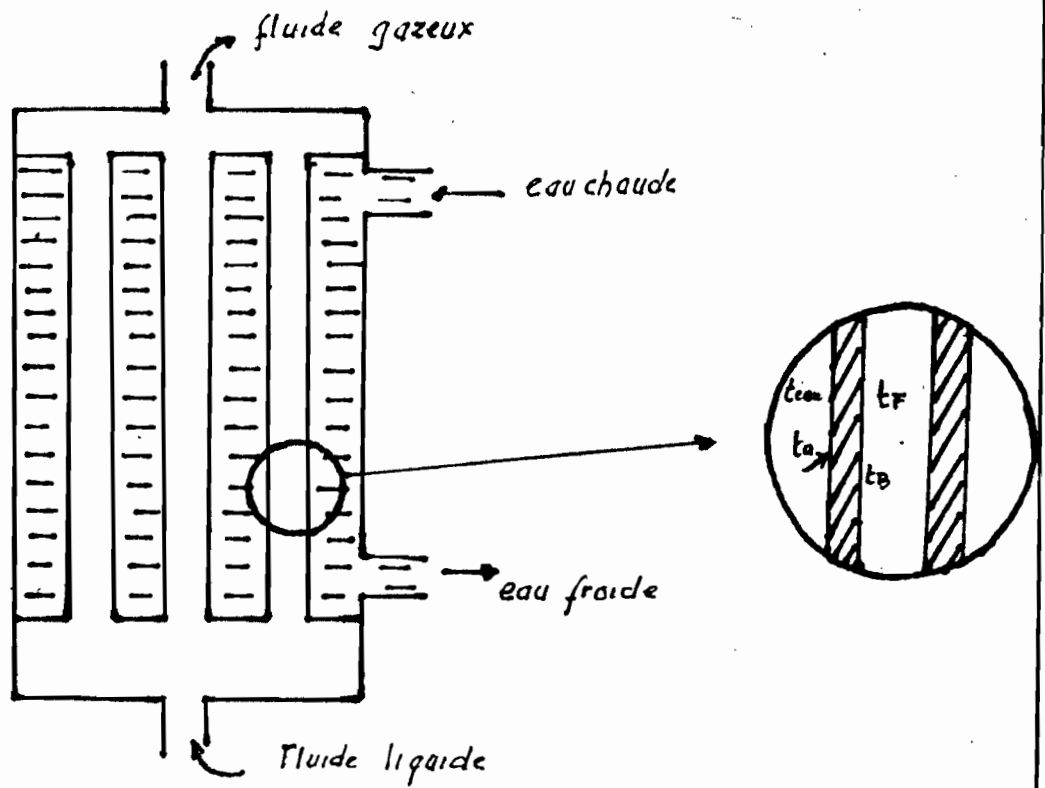
Nous aurons 3 types d'échange de chaleur à considérer

- Echange entre l'eau à la température  $t_{eau}$  et la surface extérieure du tube qui est à la température  $t_s$
- Echange (par conduction) entre la surface externe et la surface interne du tube
- Echange entre la surface interne et le fluide à vaporiser

Dans nos notes de cours de "transfert de chaleur," nous avons trouvé la formule suivante, qui colle parfaitement à la situation :

$$\frac{1}{U'_{elle}} = \frac{1}{h_o h_e} + \frac{\ln D_e/D_i}{2k} + \frac{1}{h_i h_i}$$

où  $h_o$  est rattaché à la surface extérieure du tube  
 $D_e$  et  $D_i$  sont les diamètres extérieur et intérieur du tube  
 $h_e$  et  $h_i$  les coefficients de transfert de chaleur de l'eau et du fluide  
 $k$  le coefficient de conductibilité du métal. Pour le Cuivre  $k = 320 \text{ kcal/m}^2 \text{ s}^\circ C$



2° - Echange entre l'eau et la surface externe du tube - Evaluation de h<sub>e</sub>

Le coefficient h<sub>e</sub> dépend de la façon dont l'eau circule dans l'isolateur. Il dépend donc du nombre de Reynolds qui se définit par:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

v = Vitesse de circulation de l'eau

d : Pour un écoulement dans un tuyau c'est le diamètre

ν est la viscosité dynamique

Si  $Re > 2100$  on est dans le domaine turbulent - C'est le cas dans une circulation forcée

$Re < 2100$  on est dans le domaine laminaire - C'est le cas lorsque l'eau circule par thermosiphon

Comme nous nous trouvons dans le 1<sup>er</sup> cas il nous faut trouver des équations adéquatés à la situation - Nous sommes dans un cas de convection forcée, en régime turbulent - L'eau circule autour des tuyaux mais nous allons définir un diamètre hydraulique et nous permettant de nous rapporter au cas d'un tuyau de diamètre  $d$  et de longueur  $l$  -

Pour ce cas l'équation suivante, tirée de "Techniques de l'Ingénieur" n° J3 intitulé "Transfert de chaleur et de matière" à la page J2312-8, décrit à notre avis parfaitement la situation:

$$Nu = 0.023 Re^{0.7} Pr^{0.4}$$

$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda}$  est le nombre de Nusselt

$\lambda$  = coefficient de conductibilité du fluide

$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}$  est le nombre de Prandtl

$c$  est la chaleur spécifique du fluide

$\mu$  est la viscosité du fluide

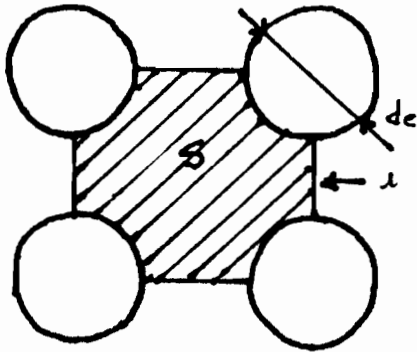
$Re$  nombre de Reynolds est tabulé.

### Determination de d

Le diamètre hydraulique est donné par la formule suivante :

$$d = \frac{4S}{u} \quad \text{où } S = \text{section du canal}$$

$$u = \text{Périmètre mouillé}$$



Nous devons évaluer la distance  $i$ . Des considérations de montage limitent cette valeur, qui est la distance entre 2 tuyaux, à  $0.8 de$  où  $de$  est le diamètre extérieur des tuyaux.

$$\text{On a donc } 0.8 de = 0.8 \times 19 = 15.2 \text{ mm} = i$$

De là on a  $S$  :

$$S = (15 + 19)^2 - \frac{\pi (19)^2}{4} = 872 \text{ mm}^2$$

$$= 872 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$u = (15 \times 4) + \pi de = 60 + \pi \times 19 = 120 \text{ mm} = 120 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Soit } d = \frac{4S}{u} = 4 \times \frac{872 \times 10^{-6}}{120 \times 10^{-3}} = 2.9 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$= 29 \text{ mm}$$

### Calcul de $h_e$

Nous savons que l'eau cède dans l'échangeur  
 $963\,000 \text{ kJ/h} = 230\,000 \text{ kcal/h}$  - Elle passe de  
 $t_a = 60^\circ\text{C}$  à  $t_b = 46^\circ\text{C}$  - Le débit d'eau dans les insulateurs  
 est donc donné par:

$$G_{\text{eau}} \frac{q_v}{t_a - t_b} = \frac{230\,000}{60 - 46} = 16428 \text{ l/h} = 4.56 \text{ l/s}$$

car on sait que  $q_v = G_{DA} - G_{CBT}$  avec Cal pour l'eau  
 Pour avoir la vitesse de circulation de l'eau il nous faut la  
 surface d'échange ou section de passage de l'eau  $S$ .

Nous allons d'abord calculer la surface d'échange globale  
 $A$  à partir de la formule

$$Q = U A \Delta T_k$$

Comme nous avons 2 inconnues nous allons adopter la  
 démarche suivante

- Nous allons poser arbitrairement une valeur de  $k$  et  
 tirer  $A$  de la formule
- Avec  $A$  nous pouvons calculer toutes les valeurs entrant  
 dans l'équation de  $U$
- Nous calculons maintenant la valeur de  $U$  et la comparons à  
 celle que nous avons posée au préalable - Si elles diffèrent  
 trop nous recommençons nos calculs.

Puis donc  $U = 500 \text{ kcal/m}^2 \text{ K}^\circ\text{C}$

$$\text{Donc } A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m} = \frac{230000}{500 \times 9.5} = 48 \text{ m}^2$$

Nous savons d'autre part que cette surface peut être donnée par la formule

$$A = n \cdot \pi \cdot d_e \cdot L \quad n = \text{Nombre de tuyaux}$$

$d_e =$  Diamètre extérieur des tuyaux

$L =$  Longueur des tuyaux

Nous avons posé  $d_e = 19 \text{ mm}$

$$L = 4.9 \text{ m}$$

$$\rightarrow n = \frac{48}{0.019 \times \pi \times 4.9} = 164$$

Si le diamètre intérieur de l'échangeur est de 29 cm la section de passage de l'eau est :

$$S = \frac{\pi}{4} (29)^2 - 164 \frac{\pi}{4} (1.9)^2 = 195 \text{ cm}^2$$

La vitesse du fluide est donc

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{4560}{195} = 23 \text{ cm/s} = 0.23 \text{ m/s}$$

Nous allons évaluer les caractéristiques de l'eau à la température moyenne à savoir  $\frac{60 + 46}{2} = 53^\circ\text{C}$

Nous tirons des tables  $\nu_{\text{eau à } 53^\circ\text{C}} = 0.53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Donc le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{0.23 \times 0.029}{0.53 \times 10^{-6}} = 12600$$

Nous sommes bien dans le domaine turbulent

À la même température de  $53^{\circ}\text{C}$  les tables nous donnent

$$Pr = 3.399$$

Donc 
$$Nu = \frac{h_c d_o}{\lambda} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

On en tire 
$$h_c = \frac{\lambda}{d_o} \cdot 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

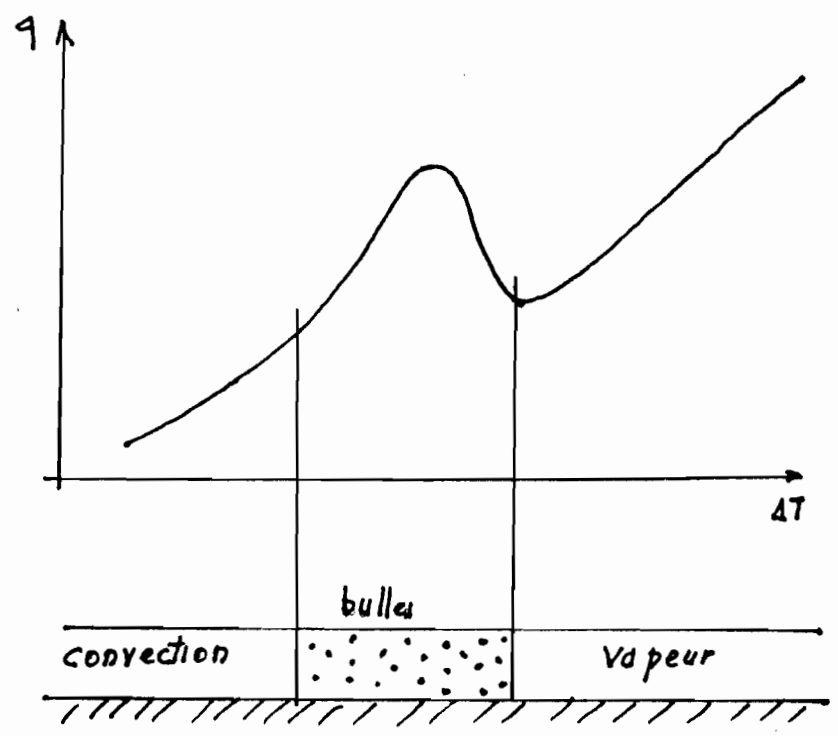
Pour le fluide nous avons trouvé  $\lambda_{\text{eau à } 53^{\circ}\text{C}} = 0.556 \text{ kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$

Donc 
$$h_c = \frac{0.556}{0.029} \times 0.023 \times (12600)^{0.8} \times (3.399)^{0.4}$$

$$h_c = 1366 \text{ kcal/h m}^2\text{C}$$

d- Calcul de  $h_i$

La détermination de ce flu coefficient est compliquée, car il y a un changement d'état du fait de la vaporisation. Cette vaporisation peut, selon la valeur de l'écart de température, se faire par convection, avec formation de bulles ou avec formation d'une couche limite de vapeur.



En le faible écart de température nous nous trouvons dans le 1<sup>er</sup> cas.

La difficulté principale demeure cependant de trouver une équation s'adaptant à la situation -

En fin de compte nous avons adopté celle utilisée par Mr. J.P. Girardier dans sa thèse sur les "Pompes solaires"



à la page 75. On a donc

$$h_i = 152 q^{0.26} p^{1/6} 1.25 C$$

Dans cette formule le facteur  $152 q^{0.26}$  est la valeur de  $h_i$  pour la vaporisation de l'eau

est la quantité de chaleur par unité de surface kcal/m<sup>2</sup>.l

Pour des tubes verticaux il faut multiplier cette formule

par 1.25

La valeur donnée par le facteur précédent est valable pour une pression de 760 Torr - Pour tenir compte de la pression on multiplie par le terme  $p^{1/6}$ .  $p$  s'exprime en atmosphère  
Enfin pour un fluide autre que l'eau on multiplie par la constante  $C$ .

Cette valeur varie entre:

0.94 pour les fluides peu volatils et 0.32 pour les fluides volatils

Ne pouvant trouver cette valeur nous allons la supposer

arbitrairement comme étant  $C = 0.5$

Une vérification expérimentale nous aurait permis de corriger notre erreur

Pour calculer la quantité de chaleur  $q$  par unité de surface il faut utiliser la valeur de la surface intérieure des tubes, car c'est elle qui est en contact avec le fluide

$$A' = \pi \times 13 \times 10^{-3} \times 164 \times 4.9 = 33 \text{ m}^2$$

$$q = \frac{220000}{32} = 6970 \text{ kcal/m}^2\text{L}$$

La pression  $P$  dans l'échangeur est de 3.5 atm

$$q^{0.25} = 9.88$$

$$P^{1/6} = 1.33$$

D'où  $h_i = 152 \times 9.88 \times 1.33 \times 1.25 \times 0.5$

$$h_i = 1260 \text{ kcal/L m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e. Calcul de U

Vous nous ramenez à la formule

$$U = \frac{1}{\frac{D_e}{k h_c} + \frac{1}{2k} \ln \frac{D_e}{D_i} + \frac{1}{h_i k_i}}$$

Connaissant tous les éléments de la partie droite de l'équation nous pouvons évaluer U.

$$U = \frac{1}{19 \times 10^{-3} \left( \frac{1}{0.079 \times 1366} + \frac{1}{2 \times 20} \ln \frac{19}{13} + \frac{1}{12000 \times 0.013} \right)} = 525 \text{ kcal/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U = 525 \text{ kcal/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cette valeur de U s'accordant parfaitement avec celle que nous avions posée au départ, nous pouvons estimer notre échangeur bien défini par les paramètres qui nous avaient permis de le concevoir.

## IIg. CALCUL du CONDENSEUR

Il doit être dimensionné pour permettre à l'eau de forage de prendre au fluide la quantité de chaleur  $q_c$  nécessaire à sa condensation

Cette quantité de chaleur, si l'on suppose que la condensation se fait à pression constante, donc suivant la ligne 1-2 sur le diagramme thermodynamique, est donnée par la formule:

$$q_c = G (H_1 - H_2) \quad \text{où } G \text{ est le débit de gaz}$$

$H_2$  et  $H_1$  se lisent sur le diagramme et sont les enthalpies des points 1 et 2

Nous avons déjà calculé  $G = 2432 \text{ kg/l}$

Sur le diagramme nous lisons  $H_1 = 429 \text{ kJ/kg}$

$$H_2 = 70 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Donc } q_c = 2432 (429 - 70) = 873088 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = 209000 \text{ kcal/kg}$$

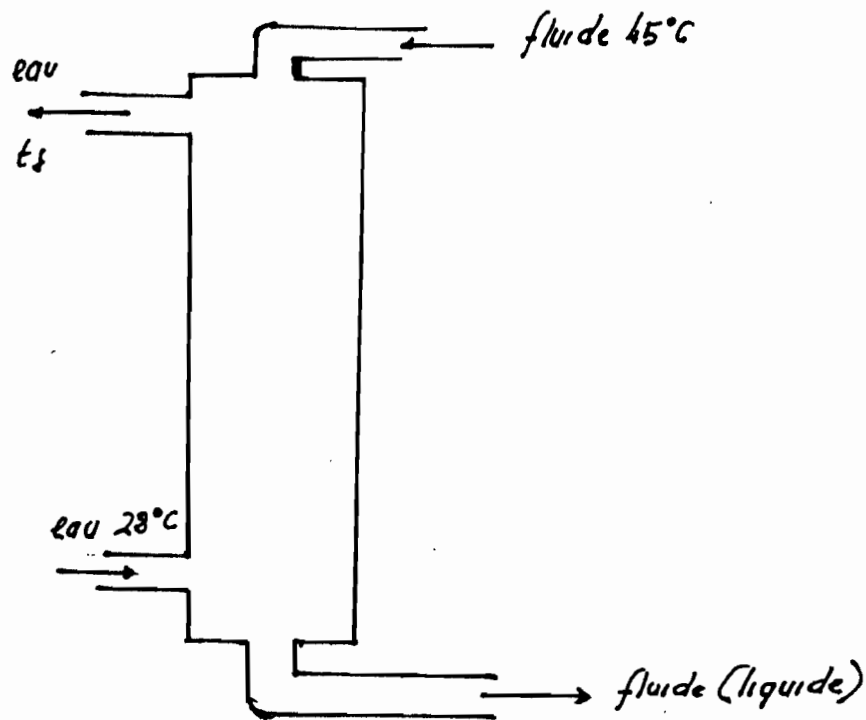
C'est pratiquement la même quantité de chaleur que pour le cas de l'échangeur.

Le coefficient global de transmission de chaleur est aussi également à peu près du même ordre dans le cas de la condensation et dans le cas de la vaporisation.

Ceci nous amène à penser qu'il n'y aurait aucun inconvénient à employer pour le condenseur le même appareil que pour l'échangeur, d'autant plus qu'économiquement parlant c'est la meilleure solution.

Nous allons donc employer le même appareil.

Nous allons supposer que l'eau de refroidissement est à  $28^{\circ}\text{C}$  et le fluide non condensé à  $45^{\circ}\text{C}$ . La température des tubes est d'environ  $30^{\circ}\text{C}$ .



a. Evaluation de h<sub>e</sub>

Nous allons faire la même démarche que pour l'échangeur  
Ici c'est l'eau du puits et non celle de l'isolateur qui circule.

Nous savons que

$$P_p = \frac{Q \cdot H}{\eta_p}$$

avec  $P_p = 4.5 \text{ kW} = 769 \text{ kgm/s}$

Pour une hauteur de refoulement de 40m et un rendement de 40% on obtient un débit Q de

$$Q = \frac{0.4 \times 769}{40} = 7.7 \text{ l/s}$$

Ceci va nous permettre de calculer la température de sortie de l'eau.

En effet  $q_c = 7.7 \times 3600 (t_s - t_r) = 20.9 \text{ en kcal/h}$

Donc  $t_s - t_r = 8^\circ\text{C} \rightarrow t_s = 35^\circ\text{C}$

Nous allons faire les calculs pour  $t = 31^\circ\text{C}$

On a  $S = 195 \text{ cm}^2$

Donc  $v = \frac{Q}{S} = \frac{7,700}{195} = 40 \text{ cm/s} = 0.4 \text{ m/s}$

$\nu_{\text{eau } 31^\circ\text{C}} = .787 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Donc  $Re = \frac{0.4 \times 0.029}{0.787 \times 10^{-6}} = 14700$

$$A = 31^\circ\text{C} \quad Pr = 5.32$$

$$\lambda = 0.529 \text{ kcal/m}^\circ\text{C}$$

$$h_c = 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.33}$$

$$= 0.023 \times \frac{0.529}{0.029} \times (14700)^{0.8} \times (5.32)^{0.33}$$

$$h_c = 1571 \text{ kcal/m}^2\text{K}^\circ\text{C}$$

### 5. Evaluation de $h_i$

Nous avons à présent un phénomène de Condensation d'un fluide dans un tube vertical.

Nous nous sommes référés à la thèse de Mr. J.P. Girardier sur les "pompes sechées" où en supposant que :

- La Condensation se fait par film
- Les parois sont parfaitement lisses
- La transmission de la chaleur<sup>ne</sup> se fait qu'à travers la couche limite
- La vapeur est saturante
- Il n'y a aucune tension latérale entre le fluide gazeux et le film du condensat
- L'écoulement du film est laminaire

On démontre que :

$$h_i = 7.3 \sqrt{\frac{\Delta H \cdot \rho^2 \lambda^3}{\mu \cdot \Delta T \cdot L}}$$

où  $\Delta H$  = Différence d'enthalpie entre le fluide liquide et le fluide gazeux à la température de vapeur saturante  $T_s$  kcal/kg

$\rho$  = Poids spécifique du Condensat (liquide) kg/m<sup>3</sup>

$\lambda$  = Coefficient de conductibilité du fluide liquide kcal/m.h.<sup>°C</sup>

$\mu$  = Viscosité dynamique du Condensat kg sec/m<sup>2</sup>

$\Delta T$  = Ecart de température entre  $T_s$  et la paroi du tube

$L$  = Longueur du tube m



Sur le diagramme nous avons  $H_1 = 429 \text{ kJ/kg}$

$$H_2 = 70 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Donc } \Delta H = 429 - 70 = 359 \text{ kJ/kg} = 86 \text{ kcal/kg}$$

Dans "Techniques de l'ingénieur" n° K2 intitulé "Constantes"

nous trouvons, à la page K.520.6 dans la table VI

la formule

$$10^3 \lambda_0 = 10^3 \lambda_0 + \beta t$$

Pour le n-butane  $10^3 \lambda_0 = 109$

$$\beta = -0.36$$

$$\text{On sait que } \Delta T_m = \frac{q}{k \cdot A} = \frac{209000}{500 \times 48} = 8.8^\circ\text{C}$$

Donc le fluide sort à  $45 - 8.8 = 36.2^\circ\text{C}$

Nous allons évaluer les caractéristiques du fluide à  $40^\circ\text{C}$

$$\text{Donc } 10^3 \lambda = 109 - 0.36 \times 40 = 95$$

$$\rightarrow \lambda = 95 \times 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$$

Dans "Table et diagramme Thermodynamique" de K. Pazajevic

édition Eyrolle nous avons trouvé :

$$p. 85 \quad \rho_{\text{butane}} \text{ à } 40^\circ\text{C} = 554 \text{ kg/m}^3$$

$$p. 203 \quad \rho_{\text{glace}} \text{ à } 40^\circ\text{C} = 0.989 \times 10^{-6} \text{ kg/s/m}^2$$

$$\Delta T = 45 - 30 = 15^\circ\text{C}$$

Nous pouvons maintenant évaluer  $h_i$

$$h_i = 7.3 \sqrt{\frac{86 \times (554)^2 \times (0.095)^3}{0.808 \times 10^{-6} \times 4.9 \times 15}}$$

$$h_i = 1020 \text{ kcal/m}^2 \text{K}^\circ\text{C}$$

c. Évaluation de U

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{te}} + \frac{1}{2 \times k} \frac{d_c}{r_i} + \frac{1}{h_i}}$$

$$= \frac{1}{0.019 \left( \frac{1}{0.019 \times 1571} + \frac{1}{2 \times 320} \ln \frac{19}{13} + \frac{1}{0.013 \times 1020} \right)}$$

$$U = 481 \text{ kcal/m}^2 \text{K}^\circ\text{C}$$

Cette valeur de U correspond parfaitement avec celle que nous avons posée et nous pouvons s'appuyer notre échangeur bien dimensionné.

IIg- DISCUSSION

La difficulté majeure dans ce genre de projet réside dans le fait que la presque totalité des équations dont on se sert sont empiriques, déterminées donc à partir d'expériences. Il en résulte donc que parfois les résultats qu'on obtient après leur réalisation diffèrent sensiblement de ceux prévus théoriquement.

Cette différence permet de corriger la théorie afin de parvenir à un juste équilibre, et par là de l'améliorer. C'est pour cela que nous conseillons de ne pas prendre les chiffres avancés ici comme des valeurs exactes et de s'y fier aveuglément, mais plutôt de les considérer comme une estimation à partir de laquelle on peut concevoir une installation expérimentale.

Les mesures faites sur cette installation permettront d'améliorer la conception afin d'arriver à un résultat entièrement satisfaisant.

TROISIEME  
PARTIE

IIIa- POSSIBILITES D'INSTALLATION DU SYSTEME DANS UN VILLAGE DES ENVIRONS de THIEU

Ce genre de système comme nous l'avons dit au début présente l'avantage d'être simple, facilement maniable car ne faisant pas appel à une technologie très compliquée et peut donc, une fois installé, être entièrement pris en charge par les villageois eux-mêmes.

Ceci présente évidemment un énorme avantage quand on sait que c'est sur ce point précis que butent les efforts faits en vue d'aider les paysans à résoudre leurs problèmes d'énergie.

Il ne suffit pas en effet de venir dans un village installer un système leur fournissant de l'énergie, encore faut-il que les villageois puissent eux-mêmes assurer sa prise en charge et puissent également assurer son entretien. L'appareillage doit donc être aussi simple que possible.

Le système que nous préconisons répond à notre avis à cette préoccupation principale -

Il suffit pour le faire démarrer de lire la température atteinte par l'eau des insulateurs et si celle-ci est suffisante de faire mettre le moteur en marche.

L'entretien est pratiquement inexistant et l'on n'a recours à

un personnel qualifié qui en eau de bonne qualité.

Ainsi la pompe solaire que nous avons visitée à Mecuone à environ 50 km de Thièn est entretenue par un seul villageois complètement analphabète.

La puissance du moteur de la pompe (10 CV) permet d'assurer, en plus du ravitaillement en eau de la population et du bétail, l'irrigation des terres.

La hauteur de relèvement que nous proposons (40 m) permet d'avoir des débits importants.

Ce genre d'installation fonctionne en général 5 à 6 h par jour.

48-

## III. EVALUATION DES INSTALLATIONS DU MEME GENRE EXISTANT AU SENEGAL

Les renseignements que nous avons pu obtenir à ce sujet sont les suivants :

- En 74 4 pompes solaires construites par la SEFRETES et financées par le FAS (Fonds d'Aide et de Coopération) pour un montant de 40 millions de Francs CFA ont été installées dans les villages de Mecuane, Fedina-bikhar, Niakhène et Diaglé.

Ces pompes sont du même type que la pompe SEGAL installée à l'IPM (Institut de Physique Météorologique) de Dakar. Ce sont des pompes de 1kw, ayant une hauteur manométrique d'une trentaine de mètres, fonctionnant 5 à 6 h par jour et <sup>qui</sup> servent à l'alimentation en eau des populations de ces villages et de leur bétail - Elles sont entièrement à la charge des villageois eux-mêmes, des techniciens plus qualifiés faisant des visites périodiques ou en cas de pannes graves.

Parmi les projets de même genre citons

- Pour 1976 une pompe solaire de 10kw et d'un coût de 887 CFA à installer initialement dans la région du Ferlo
- Toujours pour 76 une pompe solaire photovoltaïque pour

- Irrigation au goutte à goutte à DISRA de Bambeu à réinstaller  
au village de Bambeu Serère - Coût: 7.57 millions CFA
- Pour 77 une station de pompage solaire de Zokw  
pour l'irrigation à installer à Babel - Coût: 75 millions CFA

Des 4 premières pompes citées ont été effectivement installées. Quant  
aux autres projets nous n'avons pas pu savoir s'ils ont été  
réalisés aux dates indiquées.



III. CONCLUSION

Ce genre de système permet de résoudre les problèmes posés par la recherche et la crise mondiale de l'énergie en faisant appel à une source d'énergie non polluante, donc sans conséquences graves sur l'environnement, sans déranger le mode de vie des populations. Ceci n'est pas à négliger car nombre de systèmes techniquement au point se sont révélés des échecs car rompant l'équilibre imposé par la nature.

C'est donc un argument de plus en sa faveur.

Cependant nous ne saurions terminer sans mettre l'accent sur le fait que les diverses études que nous avons menées, les différentes conversations que nous avons pu avoir avec les spécialistes de l'énergie solaire nous ont permis d'arriver à la conclusion que l'avenir dans le domaine de l'énergie solaire appartient non au système de conversion thermodynamique mais bien à la conversion photovoltaïque.

Le problème à l'heure actuelle est que les photopiles coûtent trop cher et leur rendement est trop faible. Ses études sont menées actuellement afin d'abaisser le prix de revient de ces photopiles tout en accroissant

leur rendement.

Nous souhaitons vivement que ces recherches puissent aboutir le plus tôt possible afin que le problème de l'eau soit résolu le plus tôt possible, étape importante dans la lutte contre la faim et le sous-développement.

## BIBLIOGRAPHIE

- Les pompes solaires par J.P. GIRARDIER  
Annuaire de la Faculté des Sciences de l'Université de Jordan  
Année 1964 - Tome 12
- Planification habitat Information Revue  
n° 71 - Juin 1975
- Bulletin edité par la SFRETES (Société Française  
d'Etudes Thermiques et d'Énergie solaire)
- Transmission de Chaleur et Thermodynamique par F. KREITH  
McGraw Hill Editeurs - 1967
- Utilisation et Promesses de l'Énergie Solaire par J.P. VAILLIANT  
Edition Eyrolles - Paris
- Techniques de l'Ingénieur 21, Rue Cassette 7506 Paris  
\* MOTORS THERMIQUES B3  
\* TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MATIÈRE J3  
\* CONSTANTES K2
- Chemical Engineers' Handbook PERRY & CHILTON  
Fifth Edition - Mc Graw Hill

Table et Diagrammes Thermodynamiques

Par M. RAZNJEVIC

Editions EYROLLES