



EXCIJ DU PRÉT Publications du
CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS
(CNEXO)

Série: Rapports scientifiques et techniques

N° 33 - 1977

ETANGS SOLAIRES A STRATIFICATION DE DENSITE

par

Jean-Louis HYACINTHE



C N E X O

Rapport Scientifique et Technique n° 33

**ETANGS SOLAIRES A STRATIFICATION DE DENSITE
PREMIER RAPPORT SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

par

Jean-Louis HYACINTHE

Conseiller Scientifique au CNEXO



Contribution n° 517 du Département Scientifique
Centre Océanologique de Bretagne
B.P. 337 - 29273 BREST Cédex

RESUME

Dans la technique considérée de lagunes solaires une étendue d'eau de faible profondeur utile est limitée par une couche sombre d'absorption du rayonnement solaire. Le phénomène interne de convection thermique dû à l'échauffement est supprimé par la présence d'un gradient vertical convenable de densité, créé par dissolution de sel et entretenu pour compenser la diffusion. L'expérimentation antérieure, essentiellement Israélienne, a montré, qu'après un temps de mise en régime important, on peut obtenir une température de fond de l'ordre de 90°C.

Il y a, à la fois, captage du rayonnement solaire sur une surface (qui peut être importante) et accumulation de l'énergie solaire. La chaleur récupérée peut être directement utilisée ou transformée en énergie électrique (puissance de l'ordre de 5 W.m.⁻²). Le problème expérimental essentiel est celui de la stabilité de la lagune solaire contre laquelle jouent les effets de la diffusion, du vent et des vagues.

Le CNEXO veut étudier la possibilité d'utiliser des étendues marines naturelles et isolées, dans une gamme de puissance utile de l'ordre de 100 kW. Il a lancé, en 1976, une expérimentation d'étude de la faisabilité et de la rentabilité de cette technique de lagune solaire, en s'appuyant sur la mise en oeuvre d'un bassin solaire artificiel de 1 000 m² implanté à Palavas les Flots près de Montpellier.

ABSTRACT

In this schema of solar ponds, a limited shallow marine area overlays a dark layer where the solar radiation is absorbed. The internal thermal convection phenomenon due to heating is cancelled by the action of an adequate vertical density gradient created by salt dissolving. This gradient has to be kept up against the saline diffusion. Previous experimentation, in Israël for the main, had shown that, after a long enough period of transition to normal running, high temperatures on the bottom of the order of 90°C, can be obtained.

This operating process provides a method, not only for collecting solar energy on a large scale, but also for storing it. The heat obtained can be directly used or turned into mechanical energy with gross power order of 5 W.m.⁻². The main difficulty arises with maintaining the solar pond stability against diffusion, wind and waves.

CNEXO, the French National Center for the Exploitation of the Ocean, is interested in trying to transform isolated marine natural areas into solar ponds with power order of 100 kW. An experimentation has been launched to specify technical feasibility and economical rentability of solar ponds, by the use of an artificial solar basin (1 000 m² area) set up near Montpellier, at Palavas les Flots.

INTRODUCTION

Au-delà du bassin d'évaporation salifère, l'idée de considérer une étendue marine comme un capteur solaire économique et de grande échelle est française [1] , [2] . Collecteur plan, le rendement énergétique n'en peut être que faible, ainsi que l'augmentation de température (énergie à bas potentiel).

On ne considèrera pas ici la technique américaine d'étangs solaires à film d'eau, dans laquelle le problème du stockage de la chaleur se pose de façon complètement indépendante de celui du captage.

On trouve au départ de la technique israélienne, qui nous intéresse ici, l'observation dans un certain lac salé hongrois d'un accroissement de température avec la profondeur, contraire à ce qui se rencontre en général en mer. Avec une concentration de fond proche de la saturation, due aux dépôts de sel, et avec un renouvellement de l'eau de surface par un courant d'eau douce, des températures de 70°C à des profondeurs de 1,3 m étaient trouvées en fin d'été. Abandonnée, comme non rentable, par Israël en 1966, cette technique est réétudiée depuis la crise du pétrole.

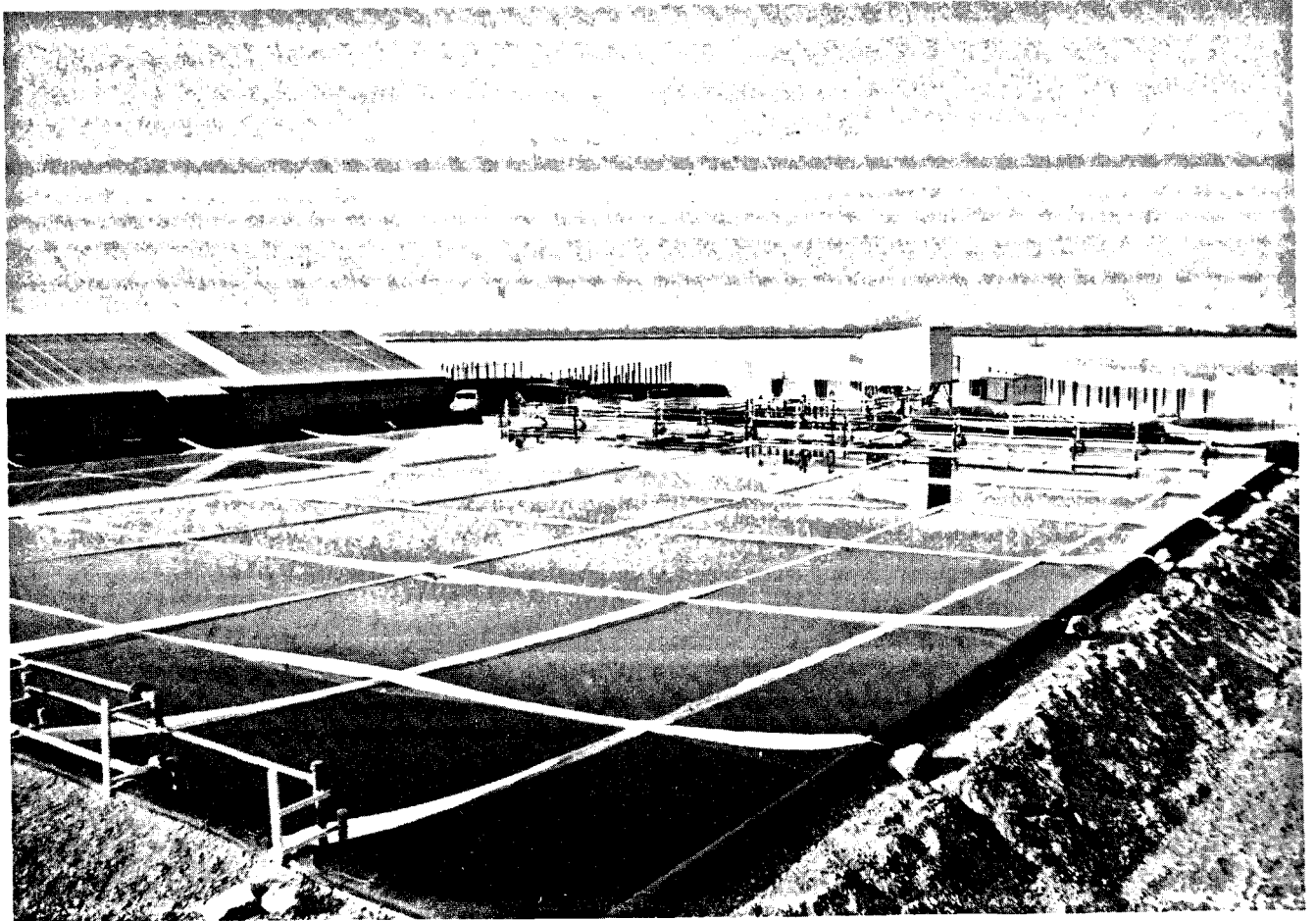


Photo 1 : Vue d'ensemble de l'installation expérimentale

Première Partie

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La profondeur utile (1 m environ) de l'étendue d'eau est limitée à sa base par une couche sombre d'absorption maximale du rayonnement solaire, constituant le niveau de génération de chaleur. Généralement, on n'observe qu'un faible écart vertical de température par suite des pertes thermiques aux surfaces de contact, surtout avec l'atmosphère : les phénomènes dissipatifs que sont l'évaporation, le rayonnement, la conduction et la convection y interviennent sur des particules fluides continuellement ramenées en surface avec leur chaleur par un phénomène interne de convection dû à la diminution de densité par échauffement. Dans l'étang solaire, ce phénomène est supprimé par création préalable dans la masse d'un fort gradient vertical de densité croissant vers le bas par stratification du fluide. Ce gradient de densité, que tend à détruire la diffusion, doit être maintenu permanent.

Après extinction dans les premiers centimètres de surface de la partie du spectre solaire supérieure à $0,7 \mu$, l'absorption optique est faible. Le gradient de température obtenu après un temps de mise en régime important, légèrement affaibli par l'absorption, est analogue à celui de la densité et peut aller de 20°C à la surface à 90°C au fond. Il y a donc, à la fois, captage d'énergie solaire, sur une surface qui peut être importante, et stockage de chaleur dans un premier volant thermique constitué par la couche de fond. En effet, les couches fluides supérieures immobiles formant un bon écran isolant, le transfert conductif vertical est très faible. Le milieu sous-jacent, s'il est immobile, constitue pour l'accumulation de chaleur un second volant thermique très largement supérieur au premier et dont la charge par conduction à partir du fond de l'étang, explique le fait que le temps de mise en régime puisse atteindre plusieurs mois.

La chaleur utile récupérée peut être directement utilisée ou transformée en une autre forme d'énergie.

Le problème physique essentiel est celui de la stabilité et de l'entretien des gradients verticaux dans l'étang solaire, contre lesquels jouent les effets de la diffusion, du vent (et des vagues), et de la pollution. Un élément favorable à l'approche théorique est l'état de repos du fluide avec possibilité d'appliquer des schémas linéaires de gradient de transfert moléculaire et d'étendre presque directement des résultats expérimentaux de laboratoire.

Deuxième Partie

ELEMENTS PHYSIQUES

Considérons la géométrie simplifiée d'un bassin carré de côté L et de profondeur H. L'énergie solaire incidente fait intervenir sa surface L^2 , alors que la surface est 4 LH pour les fuites thermiques latérales : le rapport $\frac{4H}{L}$ apparaît comme un paramètre adimensionnel de forme, caractéristique de l'importance des pertes thermiques par rapport à un bassin indéfini que nous envisageons dans tout ce chapitre.

1. CONVECTION ET STABILITE

Soient C_0 et C_1 les concentrations, exprimées en masse de soluté par unité de volume, et T_0 et T_1 les températures, respectivement à la surface, origine d'un axe Oz vertical descendant, et au fond de l'étang. On peut décrire en approximation linéaire, pour une cote z :

$$T = T_0 + \Delta T \frac{z}{H}, \quad C = C_0 + \Delta C \frac{z}{H} \quad \text{avec} \quad \Delta T = T_1 - T_0, \quad \Delta C = C_1 - C_0 \quad (1)$$

Si $e = -\frac{1}{\delta T} \frac{\delta \rho}{\rho} \sim 5.10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ est la dilatabilité thermique, la masse spécifique à la cote z, ρ_0 étant celle à la surface, sera :

$$\rho = \rho_0 \left[1 + e (T_0 - T) \right] - (C_0 - C) = \rho_0 \left(1 - e \Delta T \frac{z}{H} \right) + \Delta C \frac{z}{H} \quad (2)$$

Pour chercher des ordres de grandeur, on prendra $H = 1 \text{ m}$, $\Delta C = 0,3 \text{ g cm}^{-3}$ (écart que l'on peut obtenir par dissolution de Cl_2Mg), $\Delta T = 80^\circ\text{C}$, $\rho_0 = 1 \text{ g cm}^{-3}$.

Le paramètre classique $\frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz}$ indique, lorsqu'il est positif, que l'effet de la stratification l'emporte sur celui de la force d'Archimède. En effet, une particule de surface, par exemple, mise par un déplacement dz au contact d'autres particules en équilibre hydrostatique ($dp = \rho g dz$), subit, en négligeant frottement et force de Coriolis, l'accélération de rappel :

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = g - \frac{1}{\rho_0} \frac{dp}{dz} = g \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} = g \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz} \right) dz \quad (3)$$

En équilibre mécanique de la stratification, qui crée un effet de plan incliné avec pesanteur réduite, la fréquence d'oscillation de la particule est :

$$N = \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz} \right)^{1/2}$$

Les équations (1) et (2) permettent d'écrire :

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz} = \frac{1}{H} \left(\frac{\Delta C}{\rho_0} - e \Delta T \right) \quad (4)$$

(On a pu négliger le terme de compressibilité $\chi \rho g$ avec $\chi \sim 5.10^{-8}$ CGS). Le rapport de densité,

$$R_\rho = \frac{\Delta C}{\rho_0 e \Delta T}$$

caractérise les effets relatifs du gradient, stabilisateur, de densité et du gradient, dé-stabilisateur, de température. En valeurs numériques, on obtient :

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz} \sim 0.26 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1} \quad \text{donnant} \quad N \sim 1.6 \text{ s}^{-1} \quad \text{et} \quad R_\rho \sim 7.5$$

Le fait que les distributions de propriétés physiques ne dépendent que de z autorise l'équilibre mécanique dans le champ de la pesanteur du système fluide constitué par l'étang.

Cependant, cet équilibre mécanique n'entraîne pas l'équilibre thermique et la non-crétion de convection libre apparaît comme une condition nécessaire de stabilité. Depuis les travaux de Rayleigh [3], la théorie linéaire de la stabilité marginale a été bien développée [4] : en l'absence de gradient de densité, le phénomène est lié au nombre de Rayleigh

$$R_T = g \frac{e \Delta T \delta^3}{K \nu}$$

qui caractérise les effets relatifs, opposés pour l'apparition de convection, de la portance d'une part et d'autre part de la viscosité cinématique ν avec la diffusivité thermique moléculaire K . Dans notre cas

$$\nu \sim 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad \text{et} \quad K \sim 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

la quantité de mouvement a un transfert conductif plus rapide que la température, ces phénomènes étant dans un rapport caractérisé par le nombre de Prandtl $\frac{\nu}{K}$. Dans R_T , δ est l'épaisseur de la couche limite thermique près du fond : elle se développe dans le temps suivant une loi

$$\delta \sim (\pi K t)^{1/2}$$

jusqu'à ce que R_T atteigne une valeur critique de l'ordre de 10^3 pour alors se détacher par flotabilité, le processus conductif étant momentanément interrompu.

Dans notre cas, $R_T \sim 10^3$ correspond à $\delta \sim 8.10^{-2}$ cm atteint au bout d'un temps $t \sim 1.2$ s. On conçoit qu'une uniformité localisée, aux échelles δ et t , des concentrations près du fond puisse donner lieu à cette convection qui entraînera un transport thermique dans lequel le gradient conductif $K \frac{dT}{dz}$ devient négligeable devant le flux convectif turbulent \overline{wT} . Krishnamurti [5] a montré qu'il y avait ensuite transition rapide à une convection régulière et permanente à 2 dimensions, pour $R_T \sim 10^4$, puis à 3 dimensions, puis turbulente. Le nombre de Nusselt :

$$R_{\Phi} = \frac{\Phi_T}{K \frac{\Delta T}{H}}$$

où Φ_T est le flux thermique par unité de surface, devient alors supérieur à 1, valeur correspondant au flux conductif pur.

La convection qui nous concerne est à double diffusivité car la diffusivité saline moléculaire $K_s \sim 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ est très inférieure à K : une couche détachée du fond ne réagira qu'en température et s'arrêtera à la hauteur l où, dans le gradient initial, elle trouvera sa densité, soit [6] :

$$\frac{l}{H} \sim \frac{1}{R_1} \quad (5)$$

En valeur numérique, on trouve $l \sim 13 \text{ cm}$: il pourra se créer ainsi, de proche en proche, une couche de fond de mélange convectif, de hauteur l , dans laquelle les propriétés physiques sont uniformisées par brassage, et diminuant l'effet de perturbations locales sur le fond même.

On peut concevoir que des couches homogènes de mélange convectif puissent aussi se développer horizontalement, à partir d'instabilités nées sur les bords verticaux de l'étang, en diminuant l'efficacité et pouvant même détruire la stratification.

2. BILAN DE PUISSANCE ET RENDEMENT

Pour une région chaude (latitude entre 45° et 20°), il n'arrive, de la constante solaire ($1,35 \text{ kW m}^{-2}$) sur une surface horizontale après réflexion diffuse et absorption dans l'atmosphère, qu'une puissance moyenne de $0,17$ à $0,27 \text{ kW m}^{-2}$, en intégrant les variations diurnes et saisonnières (la puissance "de pointe" est de 1 kW m^{-2}). En énergie reçue, on a donc une valeur moyenne, journalière de 4 à $6,5 \text{ kWh m}^{-2}$ (avec une variation de $\pm 2 \text{ kWh m}^{-2}$ sur l'année), et annuelle de $1\ 500$ à $2\ 400 \text{ kWh m}^{-2}$. Pour nos calculs nous prendrons une puissance moyenne $0,25 \text{ kW m}^{-2}$ (par jour, 6 kWh m^{-2} et, par an, 2.200 kWh m^{-2}).

L'évaporation varie considérablement avec la vitesse du vent : une moyenne $E = 1 \text{ m an}^{-1}$ correspond à une perte $\rho L E$ (avec $L = 585 \text{ cal g}^{-1}$) de $0,07 \text{ kW m}^{-2}$. Le rapport de Bowen, des pertes normales par conduction à la surface aux pertes par évaporation, étant de $0,1$ à $0,2$, le total de ces pertes peut donc être estimé à environ 30% . En première approximation, on peut prendre une perte par rayonnement du même ordre que la perte par évaporation, et 5% pour la somme des pertes par albedo en courte longueur d'onde et par réflectivité de la radiation atmosphérique de grande longueur d'onde. Enfin, il y a un transfert conductif par le fond propre à l'étang solaire : un coefficient de conduction thermique

$$\lambda = \rho C_p K \sim 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ cal.cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 0,62 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

donne une "perte" pour $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ et $H = 1\text{m}$, de $0,05 \text{ kW m}^{-2}$, soit 20% stockés au niveau du second volant thermique constitué par le milieu sous-jacent.

La somme des pertes, difficiles à diminuer (il faudrait par exemple réduire la température de surface ou mettre une couverture transparente sur l'étang), laisse espérer un rendement moyen,

pour l'étang solaire seul, de l'ordre de 15 %. Cette valeur peut être légèrement modifiée du fait de la variation annuelle des pertes. La vitesse de montée en température de la couche de fond dépend du rapport des pertes conductives à l'énergie solaire reçue, fonction de la saison. Avec ce rendement thermique, l'étang a une puissance moyenne utilisable de l'ordre de 40 W.m^{-2} donnant annuellement $350 \text{ kWh.m}^{-2} = 3,10^5 \text{ kcal.m}^{-2} = 3.10^{-2} \text{ TEP.m}^{-2}$. Le passage à une puissance électrique, avec un rendement théorique de Carnot de $\frac{80}{373} = 21 \%$ et un rendement réel de l'ordre de 14 %, donnerait une puissance électrique brute continue de $5,7 \text{ W.m}^{-2}$, donnant annuellement 50 kWh.m^{-2} (soit une économie en fuel de $12,5 \text{ kg.m}^{-2}$ avec 250 g/kWh). Le rendement en énergie mécanique de l'étang solaire est donc de l'ordre de 2 %.

Ces résultats peuvent être diminués par une absorption parasite : si, dans les conditions naturelles, l'influence de la température et de la salinité sur l'extinction lumineuse est faible, des saletés ou des matières en suspension dans le gradient de densité peuvent intervenir.

Enfin, il y a une profondeur optima à rechercher car, avec la profondeur, la puissance disponible et les pertes conductives diminuent.

3. TEMPS DE MISE EN REGIME ET STOCKAGE

Supposons que le milieu sous-jacent à l'étang est immobile, homogène, et constitué par exemple par de l'eau. La direction $O'z$, verticale descendante à partir du fond de l'étang, peut alors être assimilée à une ligne de transmission homogène (analogue à une ligne électrique RC) le long de laquelle se propagent des impulsions de chaleur. En théorie linéaire, la réponse à une onde excitative de forme quelconque se détermine par convolution de la "fonction mémoire", réponse du système à une impulsion unité de Dirac $\delta(t)$. Les ondes thermiques longitudinales de conduction présentent une forte distorsion et une atténuation importante ; les temps de propagation sont non négligeables.

Considérons une variation sinusoïdale de température, d'amplitude δT et de période Δt , au niveau origine :

$$T(0) = \frac{\delta T}{2} \cos \omega t \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{2\pi}{\Delta t}$$

La variation de température à la profondeur z sera :

$$T(z) = \frac{\delta T}{2} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \alpha z) \quad \alpha = \left(\frac{\pi}{K\Delta t}\right)^{1/2} \quad (6)$$

La longueur d'onde est $\frac{2\pi}{\alpha}$ et la vitesse de propagation est $\frac{\omega}{\alpha}$; fonction de la fréquence, elle cause la distorsion des ondes non sinusoïdales. On peut définir une impédance complexe caractéristique Z , rapport de δT à l'amplitude $\delta \Phi$ de l'écoulement sinusoïdal de chaleur par unité de surface :

$$Z = \frac{\delta T}{\delta \Phi} = \frac{1 - j}{(2\omega\lambda\rho C_p)^{1/2}} \quad (7)$$

le numérateur traduisant un déphasage constant $\frac{\pi}{4}$ entre T et le flux Φ .

Appliquons ce schéma simplifié à la fluctuation annuelle ($\Delta t = 1$ an donne $\omega = 2.10^{-7}$ rad.s⁻¹). $|Z|$ prend une valeur de $1,38^\circ\text{C.m}^2.\text{W}^{-1}$. L'énergie journalière reçue variant de 4 à 8 kWh.m⁻², l'étang solaire reçoit sur le fond, avec un rendement de 15 %, une puissance moyenne variant de 25 à 50 W.m⁻² : totalement affectée à la conduction vers le milieu sous-jacent, elle donne $\delta\Phi = 25 \text{ W.m}^{-2}$ d'où, compte-tenu de la valeur de l'impédance, la variation annuelle de température au fond de l'étang $\delta T = 35^\circ\text{C}$. Le déphasage entre T et Φ est de 1,5 mois. En prenant 100°C comme limite supérieure de la température de la saumure de fond, celle-ci oscillera de 65°C à 100°C lorsque la conduction aura mis en température le volant thermique constitué par l'eau sous-jacente.

Prenons pour épaisseur de ce volant une longueur d'onde : 7,7 m (pour la valeur calculée $\alpha = 8.2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$) atteinte en 1 an avec la vitesse de propagation de 2 cm/jour. L'atténuation sur cette profondeur étant $e^{-2\pi} = 1,87.10^{-3}$, si l'on part d'une température initiale de 20°C avant création de l'étang solaire, on aura $0,12^\circ\text{C}$ et 7.10^{-2}°C comme augmentation moyenne de température et amplitude de la fluctuation annuelle au bas du volant thermique. L'augmentation moyenne calculée sur la hauteur est de 10°C , d'où un contenu thermique de $77.000 \text{ kcal.m}^{-2} = 90 \text{ kWh.m}^{-2}$. Avec l'énergie annuelle reçue de 350 kWh.m^{-2} trouvée plus haut, le temps de mise en régime est au moins de 3 mois. Il ne faut pas confondre ce temps avec celui de la montée en température de la couche de fond, essentiellement fonction de la saison de mise en route de l'étang.

Par comparaison, une couche de fond de 15 cm à 80°C n'a emmagasiné que 11 kWh.m^{-2} : il y a un facteur 8 entre les deux volants thermiques.

Alors que, pour l'eau, la valeur de K varie peu avec la concentration, les valeurs pour un sol sous-jacent peuvent varier de 1 à $5.10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ et doivent être mesurées sur le site.

La fluctuation journalière de l'onde thermique ($\Delta t = 24$ h) pourrait être étudiée comme ci-dessus, et on pourrait définir, de manière analogue, une onde de diffusion plane ascendante à partir du fond de l'étang.

4. CHARGE EN SEL, GRADIENT ET SON ENTRETIEN

Pour un gradient linéaire sur $H = 1$ m entre les valeurs $1,02 \text{ gcm}^{-3}$ en surface (eau de mer) et $1,24 \text{ gcm}^{-3}$ au fond (saumure), donc avec $\Delta c = 0,22 \text{ gcm}^{-3}$, la masse volumique moyenne est de $1,13 \text{ gcm}^{-3}$: à 20°C cette valeur est obtenue pour un pourcentage pondéral en sel de 18 %. Il faut donc mobiliser, directement ou par mélange de saumure et d'eau de mer, l'équivalent, par m², de 200 kg de sel, soit environ 180 kg net de sel supplémentaire pour de l'eau de mer.

Le gradient linéaire s'obtient par diffusion moléculaire à partir d'un profil en escalier de n couches, avec saut de $\frac{\Delta C}{n-1}$ en densité tous les $\frac{H}{n}$ en hauteur. La solution de l'équation de diffusion, avec une diffusivité constante K_s , pour un tel saut à une limite plane origine à $t = 0$, s'écrit [7] :

$$\Delta C(z) = \frac{\Delta C}{n-1} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2(K_s t)^{1/2}} \right] \quad \text{avec} \quad \operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy \quad (8)$$

L'accroissement relatif de concentration à mi-couche sera de 0,5 pour

$$\frac{H}{2n(K_s t)^{1/2}} = 0,477.$$

Pour $H = 1 \text{ m}$ et $K_g = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, le lissage du profil sera donc effectif après 15 jours si on prend $n = 24$.

Pour conserver le gradient, il faut compenser en permanence le flux vertical ascendant de sel qu'il crée : en diffusion moléculaire, ce flux s'écrit $-K_g \frac{\Delta C}{H}$ et prend pour nous une valeur journalière d'environ 30 gm^{-2} . Les conditions aux limites en concentration peuvent être maintenues par l'utilisation, continue ou non, de sources correctrices, d'eau douce ou de mer en surface, de saumure plus riche au fond. En surface, la correction doit s'étendre à l'augmentation de concentration par évaporation.

5. DYNAMIQUE DE LA MISE EN STRATIFICATION ET SOUTIRAGE SELECTIF

Le problème du débit maximum de soutirage en milieu stratifié par mouvement lent sans perturbation des couches voisines (courants de densité) a été étudié, en particulier pour les pompages des projets de centrales d'énergie thermique des mers [8] .

Dans la mise en stratification, les couches d'épaisseur $\frac{H}{n}$ avec saut de densité $\frac{\Delta C}{n-1}$ sont introduites successivement, par exemple par une rampe de distribution continue au fond, avec le débit par unité de longueur $q = \frac{uH}{n}$, et avec une quantité de mouvement assez faible pour ne pas créer de mélange à l'interface où le rapport des forces d'inertie au frottement est précisé par le nombre de Reynolds $\frac{uH}{\nu n}$. En pesanteur réduite, avec

$$N = \left[g \frac{\Delta C \cdot n}{\rho_0 H(n-1)} \right]^{1/2}$$

on peut introduire le nombre de Froude densimétrique R_g et, au régime laminaire, ramener la condition de stabilité de l'interface à une condition d'écoulement subcritique :

$$R_g = \frac{un}{NH} < 1 \quad \text{pour} \quad \frac{uH}{\nu n} < 10^3 \quad (9)$$

Dans notre cas, avec $\frac{H}{n} \sim 5 \text{ cm}$, il y a écoulement laminaire pour $u \leq 2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, et la stratification en densité ($N \sim 1,65 \text{ s}^{-1}$) assure la stabilité avec $R_g = 0,25$.

Après stratification en densité, on peut, pour un soutirage sélectif utiliser les résultats de Yih [9] précisés expérimentalement par Debler [10] . Avec un débit unitaire d'aspiration q au fond, l'écoulement sera limité à une épaisseur h au-dessus du fond telle que :

$$R_g = \frac{q}{h^2 N} = \frac{q}{h \sqrt{2g'h}} \sim 0,25 \quad \text{avec} \quad g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (10)$$

On peut appliquer ce résultat au soutirage lent d'un côté de l'étang, pour passage dans un échangeur thermique externe avant retour au côté opposé, d'une couche de fond convective homogène. Avec $h = 10 \text{ cm}$, on trouve $q \leq 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, c'est-à-dire $u \leq 4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ correspondant à une transition à la turbulence par son nombre de Reynolds $\frac{uh}{\nu} \sim 4000$. On pourra en pratique opérer avec des valeurs de q et h inférieures, déterminées par la dimension de l'étang et la "pointe" désirée en prélèvement thermique. Par exemple, un étang solaire carré avec $L = 30 \text{ m}$ a une puissance thermique moyenne de $1,2 \text{ kW}$ par mètre de côté ; si on veut prélever "en pointe" 10 fois cette puissance avec ΔT utile de 50°C , il faudra $q = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et on aura $h \sim 1 \text{ cm}$.

Enfin, le soutirage sélectif peut servir à prélever une couche intermédiaire afin de la nettoyer des particules en suspension qui pourraient s'y trouver piégées en densité.

6. EFFET DE MELANGE DU VENT

Il apparaît à l'expérience, avec le maintien en état propre, comme l'un des problèmes techniques majeurs de l'étang solaire.

C'est le seul domaine où intervient la turbulence. L'effet d'agitation à petite échelle du vent, source d'énergie extérieure, est de créer à la surface de l'étang solaire une couche homogène par mélange turbulent, dont l'épaisseur se trouve réduite par l'effet contraire du gradient stable de densité. Ce mélange turbulent d'origine mécanique a donc le même effet physique en surface que la convection pour la couche de fond.

Les études d'Ellison et Turner [11] et de Kato et Phillips [12] rendent compte d'un effet de contrainte tangentielle τ à la surface. On définit la vitesse de frottement v_* par $\tau = \rho v_*^2$, et le nombre de Richardson, avec D épaisseur de la couche de mélange, par :

$$R_{v_*} = \frac{g'D}{v_*^2} = \frac{N^2 D^2}{2v_*^2} \quad \text{avec} \quad \Delta\rho = \frac{D}{2} \frac{d\rho}{dz}$$

Si u_e est la vitesse d'entraînement du fluide, les résultats s'interprètent par une variation d'énergie potentielle de la couche de mélange $u_e D g \Delta\rho$ proportionnelle à la puissance de la contrainte de surface $\tau v_* = \rho v_*^3$, soit, avec un coefficient de proportionnalité expérimental

$$\frac{u_e}{v_*} = 2.5 R_{v_*}^{-1} \quad \text{pour} \quad \frac{u_e}{v_*} < 0.3 \quad (11)$$

Pour l'étang solaire, la contrainte tangentielle s'écrit :

$$\tau = \frac{1}{2} C_f \rho_a V^2 \quad \text{avec : } V \text{ vitesse du vent, } \rho_a \sim 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ g.cm}^{-3} \text{ masse volumique de l'air,}$$

et C_f coefficient de valeur approchée $2,4 \cdot 10^{-3}$. On en déduit $v_* \sim 1,2 \cdot 10^{-3} V$. La mesure en mer donnant $u_e \sim 3 \cdot 10^{-2} V$, on voit que :

$$\frac{u_e}{v_*} \sim 25 : \text{ sur la puissance } \tau u_e \sim V^3, \text{ la fraction } \tau v_* \text{ est utilisée suivant (11) dans une}$$

couche limite laminaire à l'interface avec le fluide en repos, le reste étant consacré à l'entretien du mouvement dans la couche homogène de turbulence horizontale libre. Dans cette couche, il y a dissipation de l'énergie par frottement interne et on peut y prévoir un profil de vitesse $\frac{u}{v_*}$ suivant une loi logarithmique du type de celle de Karman ; un mélange convectif peut s'y surimposer par le refroidissement de surface dû à l'évaporation.

Keulegan [13] a étudié l'écoulement turbulent de vitesse moyenne U d'une couche fluide d'épaisseur D et de masse volumique ρ , sur des couches plus denses de $\Delta\rho$ et de viscosité ν . Il n'apparaît qu'un seul paramètre adimensionnel, et l'instabilité, définie comme passage à un taux de mélange rapidement croissant, se produit pour une valeur critique de ce paramètre :

$$\frac{U^3}{\nu g'} = \frac{U^3}{\nu N^2 \frac{D}{2}} = 180 \quad (12)$$

Si on applique ce résultat à l'étang solaire avec $U = u_e$, pour qu'une couche turbulente d'épaisseur 15 cm reste stable à la surface, il faut $u_e \leq 3 \text{ cm.s}^{-1}$, c'est-à-dire qu'il faut ramener la vitesse du vent à l'ordre du m.s^{-1} .

Dans la pratique, on pourra rechercher un effet dissipatif par la disposition d'éléments grillagés fixes verticaux, dépassant le niveau supérieur de l'étang sans en réduire la surface utile de captage, et plongeant sur l'épaisseur de la couche homogène de surface. Avec un coefficient de vide de 50 %, ils réduisent de moitié la vitesse du vent sur une distance de 10 à 20 fois leur hauteur émergée, tandis que la partie immergée réduit par rugosité le courant d'entraînement et la turbulence. Seule l'expérimentation peut permettre d'éclaircir ce problème, ainsi que celui de l'effet d'ondes de surface non amorties et celui de l'influence des bords d'un étang solaire de dimension finie.

Troisième Partie

RESULTATS ANTERIEURS

ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE ET DE L'EXPERIMENTATION

Les expériences de Masson [2] de réchauffement solaire de minces couches d'eau, sur fond noir avec protection par un film d'huile, n'aboutirent pas.

La technique israélienne, proposée dans son principe en 1948 par Bloch, donna lieu au National Physical Laboratory d'Israël à des études et des expériences de 1958 à 1966 sous la direction de Tabor [14], [15]. Weinberger [16], en particulier, aborda les problèmes physiques des étangs solaires, dont celui de la stabilité, et Elata [17] les problèmes hydrauliques. L'utilisation spéciale en production d'eau douce fut considérée. Expérimentalement sur un étang de 600 m², des températures de 96°C furent obtenues avec des solutions contenant principalement du chlorure de magnésium de meilleure solubilité que le chlorure de sodium (de plus, entre 20°C et 100°C, la densité de solutions saturées en Cl₂Mg croît de 1,34 à 1,43, alors qu'avec ClNa on décroît de 1,20 à 1,17; enfin, les différences de viscosité entre les deux types de solutions sont à l'avantage du premier). Il est possible d'utiliser des saumures d'installations salifères, avec des températures d'ébullition de 115 à 120°C. Au Negev Institute for Arid Zone Research, il y eut destruction d'un étang solaire par dégazage intense du sol chauffé à 65°C et non séparé de l'étang solaire. Dans un tel cas il peut y avoir également, par infiltration, pollution par l'étang solaire d'éventuels aquifères souterrains. On constata, également, que la zone de mélange superficiel pouvait passer, sur un coup de vent, de 20 à 50 cm d'épaisseur. Les expériences israéliennes ont constitué un corps de données théoriques et expérimentales réellement à la base de la technique étudiée: si la plausibilité scientifique a été prouvée, des problèmes technologiques n'ont pas été réglés.

Jain, du Central Salt and Marine Chemical Research Institute à Bhavnagar en Inde, a fait des expériences, en 1970, sur un étang solaire de 55 m x 22 m x 1 m, avec surface de séparation plastique, atteignant 85°C avec extraction de la chaleur et entretien de concentrations à la surface et au fond. Des saumures riches en sel de magnésium de 30°B ($\rho = 1,262$) étaient diluées avec de l'eau de mer entre 28°B ($\rho = 1,241$) et 3°B ($\rho = 1,021$). La mesure du rendement en chaleur accumulée dans la couche de fond de 25 cm par rapport à la chaleur reçue en G. Joules, sur des périodes de 2 à 4 semaines, a donné des valeurs de 11 à 21 %.

Actuellement, des expériences de laboratoire sur les étangs solaires à gradient de salinité sont faites au Département of Civil Engineering and Applied Mechanics de Mc Gill University à Montréal, Canada (bassin: 3,66 m x 3,66 m x 0,13 m) et au Département of Physics, Ohio State University, Columbus OH, en collaboration avec l'Argonne National Laboratory, Argonne, IL, aux U.S.A. (bassin de diamètre 5,5 m). Aux Etats-Unis, cette technique est en concurrence avec celle préconisée par Clark [18] du Lawrence Livermore Laboratory en Californie, mettant en oeuvre des couches

d'eau non stratifiées de très faible épaisseur (5 cm) avec une couverture plastique transparente. Dans cette dernière technique, des projets de 10 MWe à l'échelle de $2,5 \text{ km}^2$ sont étudiés, avec stockage nocturne de l'eau chaude dans un réservoir souterrain isolé et utilisation de Freon 11 comme fluide thermodynamique entre 75°C et 15°C pour une turbine ; la puissance varierait de 3 à 18 MW suivant la saison.

En Israël, Tabor, avec la Scientific Research Foundation de Jérusalem, a proposé, pour 10 MF sur 3 ans, une étude de faisabilité de centrale à étang solaire à l'échelle de 6 MW et du km^2 . Il faut citer, également, Assaf du Weizmann Institute of Science à Rehovot qui expérimente sur un étang solaire de 30 m x 60 m et a établi un projet de transformation en lac solaire de la Mer Morte [19]. En diminuant le mélange de surface par des absorbeurs de vent, et en évitant l'approfondissement à plus de 1,5 m de la couche de mélange par un effet d'upwelling d'eau douce alimenté par des eaux méditerranéennes rinçant des bassins d'évaporation salifères, on obtiendrait un lac solaire à deux couches aux salinités 26 % et 15 %. La température pourrait atteindre 75°C donnant une puissance de 4 GWe pour les 720 km^2 du bassin Nord ainsi transformé et utilisant les 230 km^2 du bassin Sud que l'on achèverait de convertir en bassins d'évaporation.

Enfin, les études mathématiques et physiques de base ont également progressé : on se reportera à Crank [7] pour les problèmes mathématiques de diffusion, et à Yih [9] et Turner [20] pour les études sur les fluides non homogènes et les phénomènes de transfert qui peuvent s'y produire.

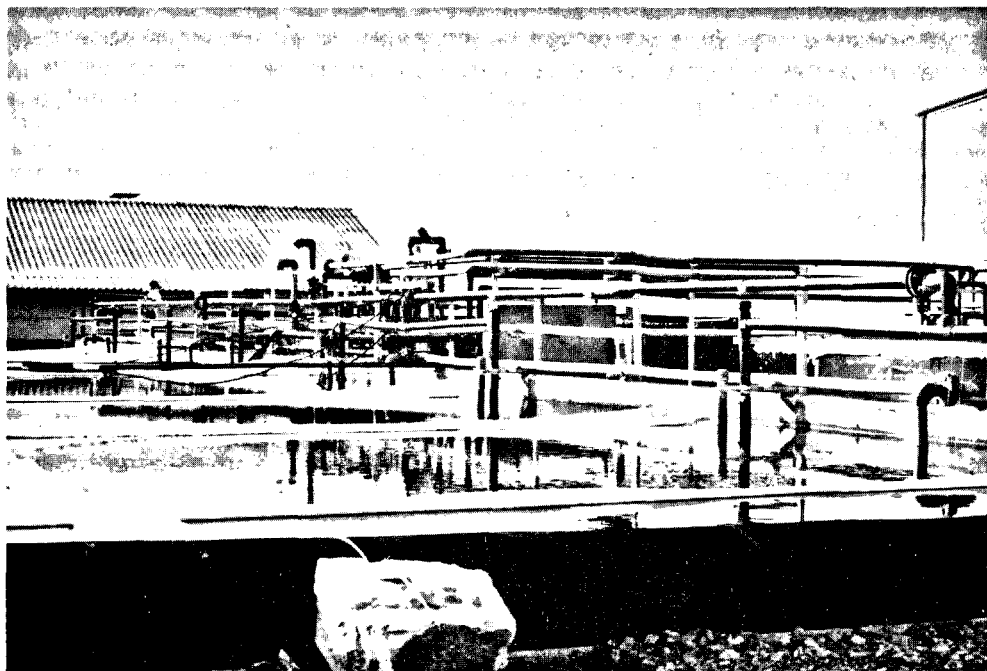


Photo 2 : Rampe de prélèvement

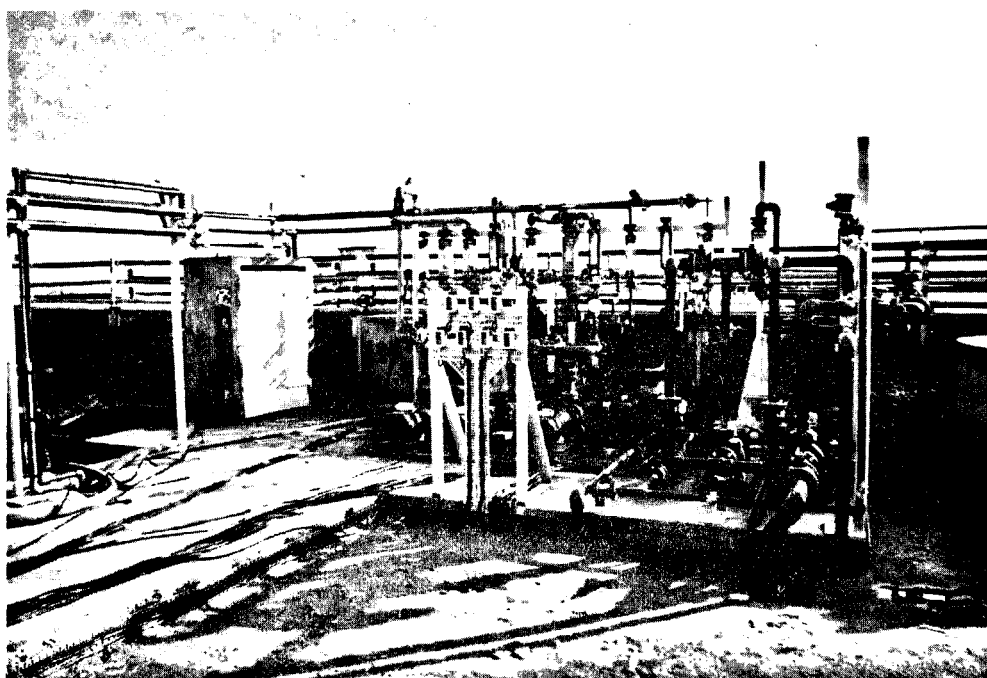


Photo 3 : Poste de conduite de l'installation

Quatrième Partie

EXPERIMENTATION C. N. E. X. O.

En deça des puissances ci-dessus, industriellement significatives, le CNEXO, Centre National pour l'Exploitation des Océans, est plus directement intéressé par l'échelle de la centaine de KW. D'où le lancement en 1976, au voisinage de Montpellier, d'une expérimentation d'étude dont on va préciser les caractéristiques qui s'appuient sur les éléments physiques précédemment passés en revue.

Le bassin de $1\ 000\ m^2$ est carré, de profondeur utile 1 m, limité par un mur de maçonnerie appuyé sur un remblai et rendu étanche par une nappe de caoutchouc synthétique souple type Butyl de 1 mm d'épaisseur, résistant à $120^\circ C$ et aux agents chimiques, de conductivité thermique $0,15$ à $0,3\ W.m^{-1}oC^{-1}$. Des bassins annexes sont prévus pour le stockage d'eau douce (fluide caloporteur intermédiaire choisi pour faire fonctionner avec des échangeurs de $40\ KW_{th}$ un moteur solaire de démonstration type Sofretes I KW au Freon 114) et celui de saumures saturées. Les pompes centrifuges et les canalisations (en polypropylène pour les saumures chaudes et en PVC pour les fluides froids) permettent une alimentation en eau de mer de $25\ m^3/h$, une circulation des nappes de fond et de surface avec un débit maximum de $10\ m^3/h$, des apports correctifs de saumure ou d'eau douce jusqu'à $1\ m^3/h$. Les aspirations et le retour des nappes se font par des rampes continues sur toute la largeur du bassin. Un échangeur thermique principal type Paraflow à plaques de titane de $500\ KW_{th}$ permet le réchauffement d'un maximum de $25\ m^3/h$ d'eau de mer par circulation de saumure chaude de fond. Si une stérilisation du chlore a été installée pour la nappe de surface, il apparaît déjà à l'expérience que l'absence de matériel organique empêche le développement d'algues unicellulaires phytoplanctoniques. Un ensemble complet de mesures des éléments du bilan thermique (débits et volumes, masses volumiques, températures), a été prévu dans l'étang avec mesure du flux thermique sous le bassin. Une instrumentation adaptée (actinomètre bimétallique du Bureau Météorologique Britannique et radiomètres Kahlsico) doit permettre la mesure et l'enregistrement du rayonnement incident et transmis dans le bassin, ainsi que (matériel Aanderaa) celui des mesures météorologiques (vent, pression, humidité) et de profils de température dans le bassin. Une balance à jauge de contrainte est prévue pour la mesure en continu du gradient de densité.

Après l'établissement, à partir de saumures introduites par le fond, du gradient de densité, prévu pour le début 1977, et maîtrise de son entretien, une campagne de mesure annuelle permettra l'étude de la montée en température, avec mise en régime permanent, et la mesure du bilan de puissance et des pertes. Il devrait alors être possible de mettre au point un modèle mathématique, dans lequel entreraient les conditions hydrologiques, météorologiques et climatologiques, rendant compte des phénomènes de transfert dans l'étang et son milieu sous-jacent. Il est prévu également d'étudier la stabilité de l'étang solaire et la modification de son gradient pour différents modes d'extraction de chaleur de la couche de fond, régulier, en créneau à des puissances supérieures à la puissance incidente, rapide et total. Une attention particulière sera portée à l'étude de la réduction de l'effet de mélange du vent et à celle des qualités d'accumulation des volants thermiques. En parallèle, et sur le plan économique, seront étudiés les facteurs d'échelle et les conditions pratiques de passage à une étendue d'eau naturelle.

CONCLUSIONS ACTUELLES

ET

PERSPECTIVES

La gamme de puissance du MW apparaît actuellement comme une limite supérieure des possibilités technologiques en énergie solaire, l'étang solaire étant un dispositif privilégié de captage et de stockage, susceptible d'extension à grande échelle. L'utilisation de chaleur emmagasinée semble devoir être principale par rapport à la production d'énergie électrique : la première peut pousser à augmenter la profondeur utile (pour diminuer les pertes conductives), alors que la seconde amène à la diminuer pour obtenir plus d'énergie solaire au fond et donc des températures plus élevées (ne dépassant cependant pas la centaine de °C). Le stockage, à l'échelle de l'alternance jour-nuit et des variations hebdomadaires ou mensuelles d'ensoleillement, est correctement assuré : 100 KWh.m^{-2} correspondent à une autonomie de l'ordre de 3 mois, nécessitant une modulation annuelle. Le rapport de densité jouant le rôle d'un coefficient de sécurité pour la stabilité, il serait délicat de mettre en oeuvre des gradients de densité plus faibles. Le prélèvement de chaleur peut se faire au niveau du milieu sous-jacent, soit lentement par passage d'un fluide caloporteur dans un serpentín d'échange si c'est un sol, soit plus rapidement par soutirage de couches si c'est un fluide.

Le calcul économique en utilisation de chaleur se fait par référence au fuel. L'étang solaire fournissant annuellement $3.10^{-2} \text{ TEP.m}^{-2}$, l'économie, pour un prix de vente 1976 au particulier de 750 F/TEP, est par an de 25 F.m^{-2} : sur 10 ans et à 10 % (amortissement 0,163) cela donne la disponibilité d'un capital de 150 F pour la réalisation de 1 m^2 d'étang. Pour un besoin calorique annuel de 2,5 TEP pour 100 m^2 construits, la surface correspondante d'étang solaire serait de 85 m^2 pour un prix maximum, avec l'échangeur de chaleur, de l'ordre de 13.000 F. Par contre, sur un plan d'économie nationale, le prix du TEP, pour une usine thermique par exemple, n'étant que de l'ordre de 300 F, le coût maximum au m^2 serait ramené à 60 F.

Le calcul économique en utilisation de puissance électrique peut se faire par référence à une centrale thermique au fuel délivrant du KWh à 0,10 F se décomposant approximativement en : combustible pour 0,075 F, investissement pour 0,015 F et exploitation pour 0,010 F. Avec 5 000 heures de fonctionnement (facteur de charge annuel 0,57), l'étang solaire donnerait une puissance brute installée de $10 \text{ W}_e.\text{m}^{-2}$. Pour avoir 100 KW, il faudrait 10^4 m^2 d'étang ne coûtant pas, pour rester compétitifs, plus de 0,6 MF auxquels s'ajouterait un maximum de 46.000 F pour la machine thermique.

Pour les deux utilisations, si la compétitivité apparaît comme problématique dans un pays industrialisé, elle pourrait rapidement être valable dans une zone isolée à développer où le transport peut multiplier par 5 ou 6 le prix du TEP livré sur place et où l'on pourrait accepter des prix de machine thermique de l'ordre de 2 500 F/KW. La possibilité d'une adaptation à l'échelle des besoins et de production multiple (eau chaude, eau douce, électricité) apparaît comme un avan-

tage d'installations autonomes d'étangs solaires.

Dans l'hypothèse d'une poursuite, l'expérience CNEXO pourrait s'étendre à un module auto-suffisant de lagune solaire à implanter par exemple sur un lagon polynésien. Il pourrait, par exemple, se composer d'un distillateur solaire de $1\ 000\ m^2$ pouvant, à partir d'eau de mer, fournir en moyenne par jour $6\ m^3$ d'eau douce plus une saumure enrichie équivalente à 180 kg de sel, et de plusieurs unités de $1\ 000\ m^2$ implantées directement sur le lagon. Au rythme de production de sel, il faudrait compter environ 3 ans pour la mise en route d'une unité, et, en régime établi, le distillateur solaire permettrait l'entretien en sel de six unités donnant une puissance brute installée de $240\ KW_{th}$ ou $35\ KW_e$. Une utilisation possible pourrait se trouver dans l'aquaculture tropicale.

L'étude récente de ces possibilités de passage à l'espace marin proche (lagune polynésienne pour nous, et, à plus grande échelle, Mer Morte pour les Israéliens) constitue un fait nouveau marquant dans le regain d'intérêt pour la technique des étangs solaires. Cette technique est susceptible d'exportation vers des pays en cours de développement et justifiant d'une économie énergétique basée sur la répartition des sources d'énergie plutôt que sur la distribution de l'énergie. Sur le plan de la Physique, c'est un retour à l'idée de G. Claude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. CLAUDE - L'énergie thermique des mers. Conférence à la Sorbonne, le 11 février 1928.
- [2] H. MASSON - Les insolateurs à bas potentiel : étude thermique et expérimentale. Chaleur et Industrie, avril 1956.
- [3] Lord RAYLEIGH - On convection currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side. Phil. Mag. (6), 32, 1916, p. 529-46.
- [4] S. CHANDRASEKHAR - Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford Clarendon Press. 1961.
- [5] R. KRISHNAMURTI - On the transition to turbulent convection. J. Fluid Mech. 42, 1970, p. 295-320.
- [6] C.F. CHEN et al. - Stability of thermal convection in a salinity gradient due to lateral heating. Int. J. Heat and Mass Transfer, 14, 1971, p. 57-65.
- [7] J. CRANK - The mathematics of diffusion. 1957. Oxford University Press, Oxford, England.
- [8] A. CRAYA - Theoretical research on the flow of non-homogeneous fluids. La Houille Blanche, 4, 1949, p. 44-55.
- [9] C.S. YIH - Dynamics of non-homogeneous fluids. 1965. New-York and London Mac Millan.
- [10] W.K. DEBLER - Stratified flow into a line sink. J. Eng. Mech. Div. Proc. ASCE 85, 1959, p. 51-65.
- [11] T.A. ELLISON, J.S. TURNER - Turbulent entrainment in stratified fluids. J. Fluid Mech., 6, 1959, p. 423-448.
- [12] H. KATO, O.M. PHILLIPS - On the penetration of a turbulent layer into a stratified fluid. J. Fluid Mech., 37, 1969, p. 643-55.
- [13] G.H. KEULEGAN - Interfacial instability and mixing in stratified flows. J. Res. Nat. Bur. Stand., 43, 1949, p. 487-500.
- [14] H. TABOR - Solar ponds, large area solar collectors for power production. Solar Energy, Vol. VII, 4, 1963.
- [15] H. TABOR, R. MATZ - Solar pond project. Solar Energy, Vol. IX, 4, 1965.
- [16] H. WEINBERGER - The physics of the solar pond. Solar Energy, Vol. VIII, 2, 1964.
- [17] C. ELATA, O. LEVIN - Hydraulics of the solar pond. 11th Congres of the Int. Ass. for Hydr. Research, 1965.
- [18] A.F. CLARK et al. - The shallow solar pond energy conversion system, an analysis of a conceptual 10 MWe plant. Lawrence Livermore Laboratory UCRRL 51 533, 1975.

- [19] A. BARCILON - From solar ponds to solar lakes. E.S.N. 30-3, 1976, p. 107-109.
- [20] J.S. TURNER - Buoyancy effects in fluids, 1973. Cambridge University Press.

Edité par
INSTAPRINT - Tours

Avril 1977



ISSN 0339-2899

Toute demande de cette publication devra être adressée à la

SECTION DOCUMENTATION (BNDO)
CENTRE OcéANOLOGIQUE DE BRETAGNE
B.P. 337 - 29273 BREST Cédex