

ETUDE EXPERIMENTALE DE CAPTEURS SOLAIRES EN BETON

A. BELLAGI*, A. GANNE*, J. PIRO*, P. PIERSON* J. HAMIDA** et M. AZAIEZ**

* Ecole Nationale d'Ingénieurs GABES (Tunisie)

** Société Tunisienne d'Agglomérés et de Construction Navale - GABES

INTRODUCTION :

Dans le sud tunisien le recours aux ressources hélio-thermiques (qui sont considérables) devient, à l'heure actuelle, de plus en plus inévitable : eau chaude sanitaire, dessalement des eaux locales, climatisation, industrie... (1) Mais se pose le problème des procédés de captation trop souvent importés, sophistiqués et onéreux.

Le béton (2) utilisé pour la construction de capteurs solaires plans à eau devrait assurer une économie de 40 à 60% du coût global du capteur et permettre la fabrication sur place du système de captation (3). D'où un abaissement des coûts de transport et une création d'embauche.

Notre étude a pour but la mise au point d'un tel capteur sur un banc d'essai qui est un chauffe-eau solaire. Après une description de ce banc d'essai et des procédés de mesure, nous donnons ici les résultats des essais propres au capteur testé puis ceux concernant le chauffe-eau solaire muni du capteur testé puis ceux concernant le chauffe-eau solaire muni du capteur en béton.

DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

Le banc d'essai (fig. 1) comprend les éléments suivants :

- le capteur étudié d'une surface utile S de $0,635 \text{ m}^2$, incliné de 45° par rapport à l'horizontale, orienté plein sud.
- une cuve de stockage d'un volume de 50 litres, isolée par 3 cm de liège et 2 cm de polystyrène expansé
- Les tuyauteries intermédiaires en polyester transparent, de diamètre intérieur 1,9 cm.

Le fluide caloporteur qui circule entre capteur et cuve est l'eau sanitaire, le système ne comportant pas d'échangeur. Ce fluide circule naturellement ; ce procédé permet en effet l'économie de l'ensemble [pompe + régulation], inutile dans les conditions climatiques du sud tunisien

PROCEDES DE MESURE

Les essais se sont déroulés à l'E.N.I.G. (Gabès) de mars à mai 1981. Les mesures ont porté sur :
1° Les températures en divers points du système (fig. 1) :

- entrée et sortie du capteur (θ_e et θ_s)
- partie supérieure et milieu de la cuve (θ_{ch} et θ_{cm})
- température extérieure (θ_{ext})

elles ont été réalisées à l'aide de thermomètres à mercure (précision : $1/10^\circ$ de degré).

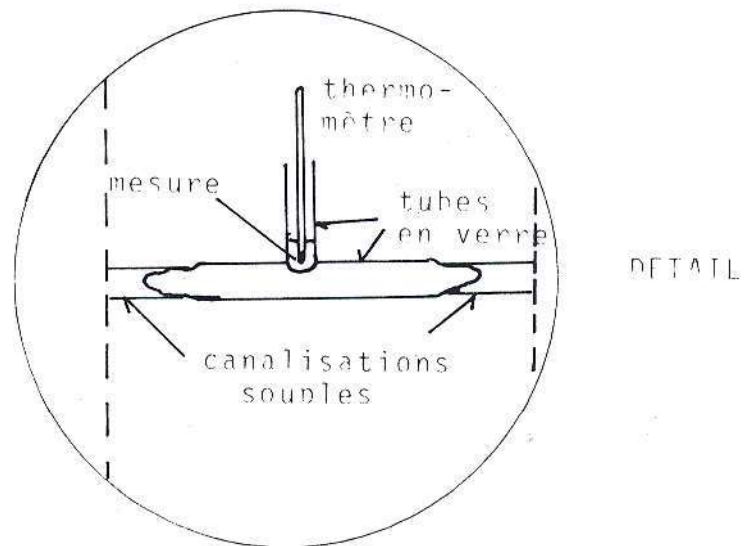
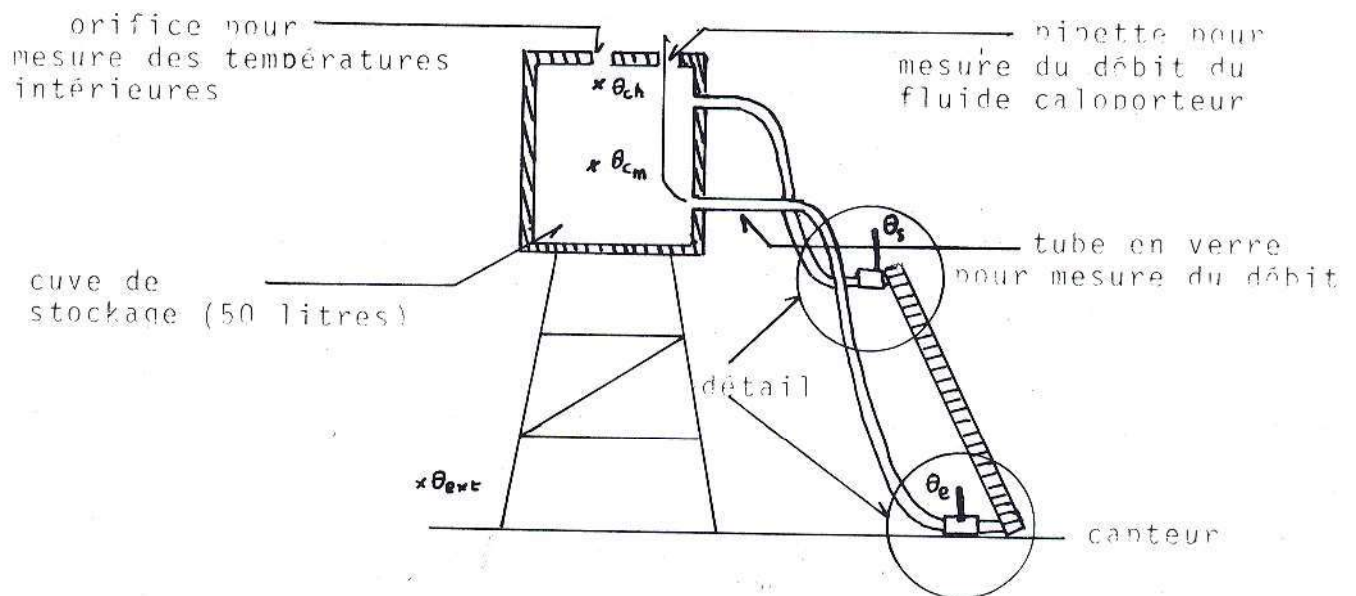


FIG. : 1 : Schéma du banc d'essai

2/ Le débit de l'eau dans le capteur. Pour procéder à cette mesure, nous avons injecté du permanganate au niveau de la sortie de la cuve à l'aide d'une pipette (Fig. 1).

Connaissant le diamètre du tube de verre, situé à ce niveau, la mesure du temps minimum d'écoulement de l'eau ainsi colorée entre deux repères nous conduit à la détermination de la vitesse maximale V_{max} de l'eau dans le tube (Fig. 2), si l'on suppose que le régime permanent est atteint.

Il est alors possible de calculer la vitesse moyenne V_m de l'eau dans la tuyauterie. On sait en effet que pour un régime laminaire (nous avons vérifié ici que nous avons effectivement un nombre de Reynolds toujours inférieurs à 2300), la vitesse moyenne d'écoulement s'exprime par :

$$V_m = \frac{V_{max}}{2}$$

D'où l'expression du débit massique $\dot{m}$ du fluide caloporteur dans le capteur :

$$\dot{m} = V_m \cdot S_v \cdot \rho = \frac{V_{max}}{2} \cdot S_v \cdot \rho = \frac{\Delta L}{\Delta t} \cdot \frac{S_v}{2} \cdot \rho$$

où Δt représente le temps mis par le fluide pour circuler entre les deux repères distants de ΔL (fig. 2) et ρ la masse volumique du fluide caloporteur.

Le débit $\dot{m}$ est ainsi obtenu avec une précision de l'ordre de 10%.

3/ La vitesse maximale du vent V_v à l'aide d'un anémomètre Wallace (précision : 0,5 m/s).

4/ Le rayonnement solaire global sur le plan du capteur enregistré en continu à l'aide d'un pyranomètre Kipp and Zonen, (précision : 5%).

Ces mesures, mis à part le rayonnement solaire, ont été relevées toutes les heures de 7h à 18h (heures locales).

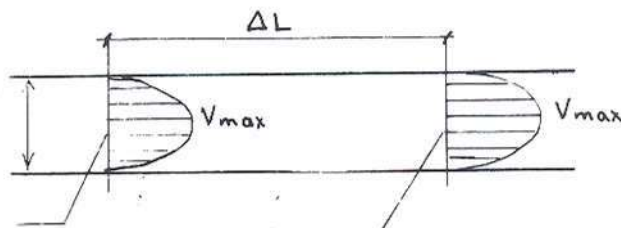


FIG. : 2

ETUDE DU CAPTEUR

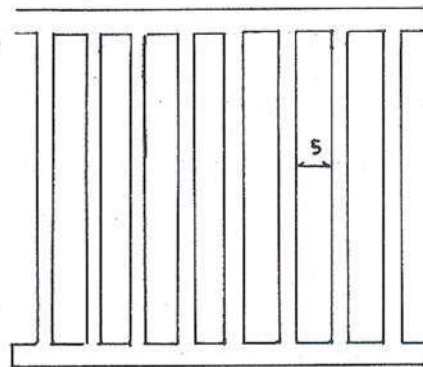
1/ Description

Le capteur testé ici est le premier d'une série de plusieurs en cours de fabrication. Ses caractéristiques ne sont donc pas définitives et d'autres capteurs plus simples "tout béton" seront prochainement testés sur le même banc.

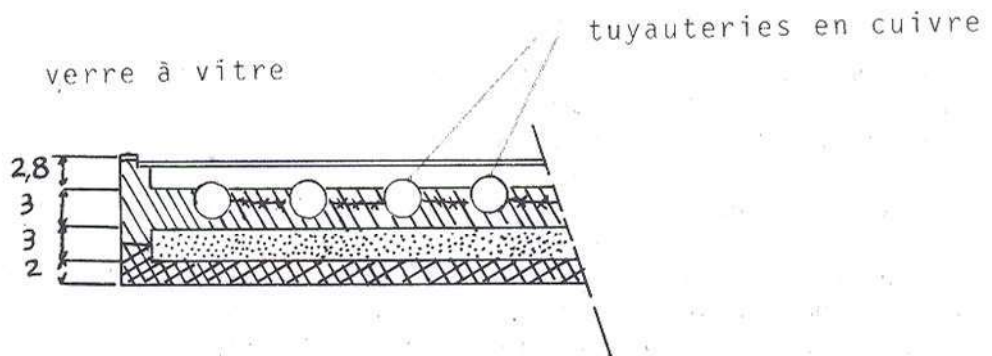
- la couverture de ce capteur est réalisée en verre à vitre ordinaire, situé à une distance de 2,8 cm de l'absorbeur (fig. 3).
- l'absorbeur comprend :
 - des conduits cylindriques en cuivre espacés de 5 cm où circule le fluide caloporteur et dont la partie qui affleure la surface du béton a été peinte en noir mat.
 - une épaisseur de 3 cm de cuivro-ciment teint dans la masse en noir mat également. Un maillage de fils de cuivre réalisé entre les conduits améliore les échanges par conduction ainsi que la rigidité de l'ensemble.

- l'isolation est assurée, à l'arrière, par 3 cm de liège et 2 cm de béton refractaire comportant des copeaux de bois.

Sortie
eau réchauffée



entrée eau
froide sanitaire



*** maillage de fils de cuivre

▨ cuivro-ciment

▤ liège

▩ béton avec copeaux de bois

FIG. : 3

2/ Résultats des essais :

Les essais se sont déroulés sur deux périodes : l'une de 6 jours du 29/3/81 au 3/4/81 et l'autre de 3 jours du 18/5/81 au 20/5/81. Heure par heure nous avons calculé les quantités suivantes :

- la puissance solaire incidente P_s sur $1m^2$ de capteur, obtenue directement par lecture de la courbe d'ensoleillement.
- la puissance récupérée P_r par le capteur qui s'exprime : $P_r = \dot{m} \cdot c \cdot (\theta_s - \theta_e)$.
- le rendement η du capteur défini par : $\eta = \frac{P_r}{S \cdot P_s}$.
- la quantité $X = \frac{\theta_m - \theta_{ext}}{P_s}$

où θ_m représente la température moyenne de l'eau dans l'absor-

beur : $\theta_m = \frac{\theta_e + \theta_s}{2}$

Les courbes de variation journalière de ces grandeurs, sont données en annexe. Afin de mieux comparer la puissance récupérée par le capteur à la puissance incidente, nous avons tracé les variations de la quantité $[S \cdot P_s]$ correspondant à la puissance solaire globale reçue effectivement par le capteur étudié.

Pour des vitesses de vent V_v constantes, il est alors possible de tracer les courbes $\eta = F(X)$, caractéristiques du fonctionnement du capteur (fig. 4). On en déduit les coefficients de perte optique, a, et thermique, b, de ce capteur pour quatre valeurs de la vitesse V_v du vent.

TABLEAU I

V_v (m/s)	3	5	7	9
a (%)	62	65	63	64
b [W/(K.m ²)]	13,4	18,4	19,4	25,1

REMARQUE 1 :

Le coefficient de perte optique, a, devrait être indépendant de la vitesse du vent. On observe une dispersion de l'ordre de 5%, tout à fait compatible avec les imprécisions de mesure.

REMARQUE 2 :

Les conditions météorologiques locales n'ont pas permis d'obtenir une courbe de rendement significative pour des vitesses de vent inférieures à 3 m/s. Mais il faut noter que les conditions de vent pour lesquelles ce capteur a été testé sont prédominantes dans la région de Gabès.

Une amélioration des caractéristiques de ce capteur pourrait être envisagée simplement :

- en utilisant un verre offrant un meilleur facteur de transmission au niveau de la couverture.
- en isolant le pourtour du capteur.

Par ailleurs, l'élimination des tubulures de cuivre (remplacées par des réservations cylindriques internes au béton) réduirait considérablement le prix de revient du capteur sans nuire aux performances, une mise en route plus longue le matin due à l'inertie thermique du béton étant compensée par un refroidissement plus lent du fluide au coucher du soleil.

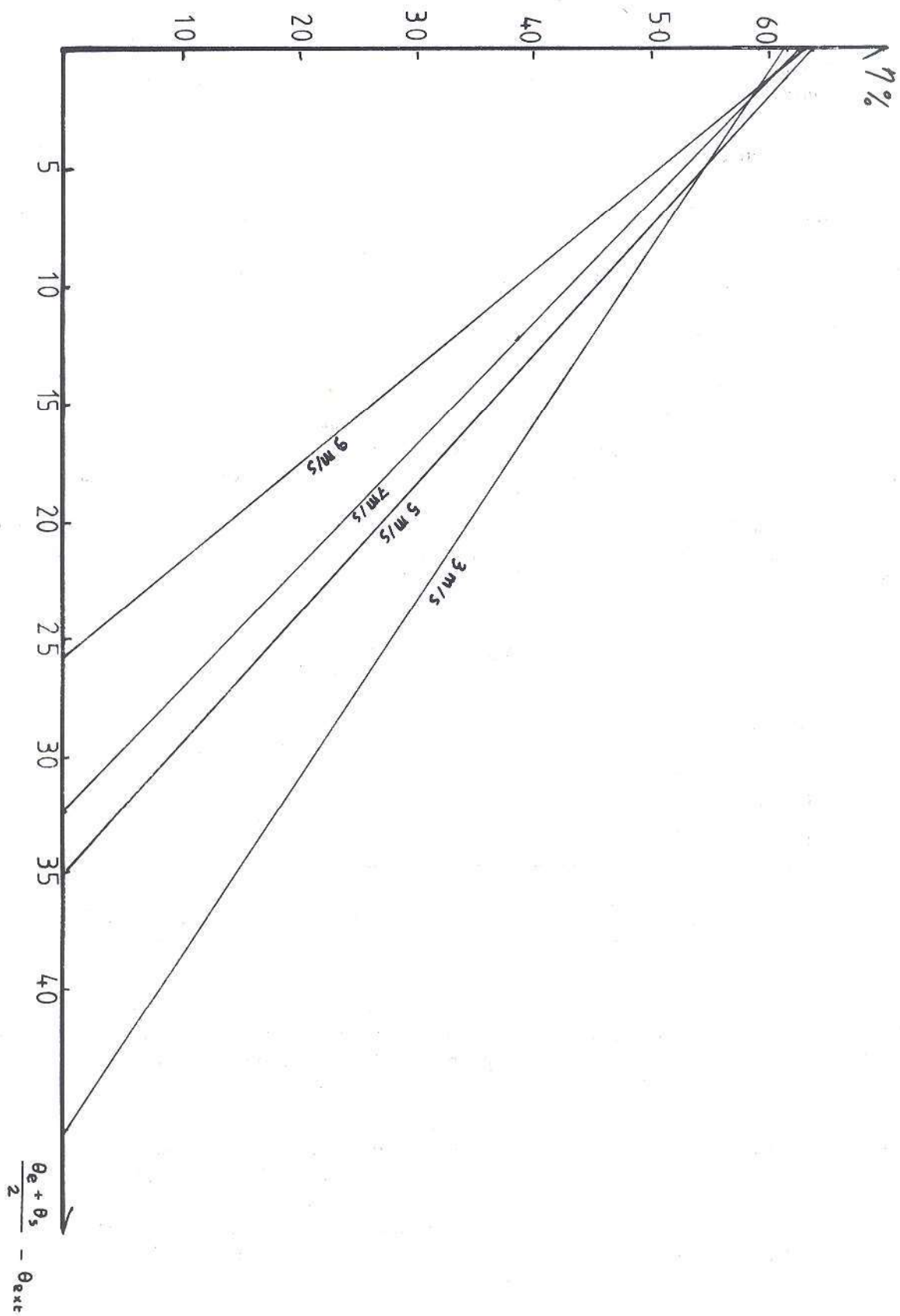


Fig. 4 : Rendement, η , du capteur en fonction de γ pour 4 vitesses de vent

ETUDE DU CHAUFFE-EAU SOLAIRE AVEC CAPTEUR - BETON

Le chauffe-eau solaire représenté sur la figure 1 et muni du capteur décrit au paragraphe précédent a été testé en prélevant régulièrement certaines quantités d'eau dans la cuve, immédiatement remplacées par les mêmes quantités d'eau froide sanitaire. Le diagramme de soutirage qui suit tient compte des habitudes locales de consommation en eau chaude sanitaire. Il a dû, bien sûr, être énormément simplifié en raison de l'absence de contrôle automatique du soutirage.

TABLEAU II

Heure locale	8 ^h	10 ^h	14 ^h	18 ^h
Quantité soutirée (Kg)	11	6	11	22

A chaque prélèvement, les mesures suivantes ont été réalisées :

- température moyenne de l'eau soutirée : θ_p
- température de l'eau froide sanitaire injectée dans la cuve : θ_a
- masse d'eau soutirée : M_p

Ces mesures ont permis le calcul :

de l'énergie récupérée pour chaque prélèvement :

$$E_r = M_p \cdot c \cdot (\theta_p - \theta_a)$$

- de l'énergie qu'il faudrait dépenser pour chauffer la même quantité d'eau sanitaire jusqu'à une température de 50°C sans installation solaire :

$$E_t = M_p \cdot c \cdot (S_o - \theta_a)$$

Cette étude a été menée en parallèle avec l'étude du capteur en béton en distinguant deux cas de fonctionnement :

- cuve non isolée (période de mesure du 29/3/81 au 3/4/81).
- cuve isolée à l'aide de 3 cm de liège et 2 cm de polystyrène (période de mesure du 18/5/81 au 20/5/81).

Nous donnons ici directement les valeurs cumulées ΣE_r et ΣE_t des énergies E_r et E_t sur chaque période de mesure. Dans le tableau III figurent également :

- l'énergie solaire globale $\Sigma [S \cdot E_s]$ reçue par le capteur durant les mêmes périodes.
- le rendement η_i du chauffe-eau solaire :
- le pourcentage énergétique économisé :

$$\eta_i = \frac{\Sigma E_r}{\Sigma [S \cdot E_s]}$$

$$\eta_e = \frac{\Sigma E_r}{\Sigma E_t}$$

Tableau : III	$\Sigma [S \cdot E_s]$ (kWh)	ΣE_r (kWh)	ΣE_t (kWh)	η_i (%)	η_e (%)
cuve non isolée	22,96	3,40	10,65	14,8	31,9
cuve isolée	10,48	2,83	4,26	27,0	66,4

On observe que le fait d'isoler la cuve permet presque de doubler le rendement du chauffe-eau solaire. Les rendements obtenus peuvent paraître faibles mais ils sont très liés au diagramme de soutirage. Nous avons en effet pris en compte un diagramme se rapprochant le plus possible des habitudes locales. Une modification de celui-ci et donc de ces habitudes (notamment soutirer le soir à la place du matin) peut améliorer de façon sensible l'énergie récupérée par l'installation. Une étude sur ce thème pourrait être un complément intéressant à cette publication ; une première estimation nous conduit à penser qu'un gain d'au moins 10% sur l'énergie récupérée peut ainsi être envisagé.

Il est donc possible d'espérer de meilleures performances de cette installation par :

- Un diagramme de soutirage mieux adapté au "rythme solaire".
- Une amélioration des caractéristiques du capteur (Voir paragraphe précédent).
- Une isolation correcte des tuyauteries entre capteur et stockage.

CONCLUSION

Cette étude devrait permettre la mise au point d'un banc d'essai de capteurs en béton : soit un ensemble simple, fiable, peu onéreux et assurant un minimum de précision sur les résultats obtenus. Cet objectif ayant été réalisé, un premier capteur-béton a été testé. Ses caractéristiques de fonctionnement ainsi que les résultats obtenus par le chauffe-eau solaire muni de ce capteur ont permis de mettre en évidence les améliorations à apporter à l'installation, notamment au niveau du capteur béton dont nous espérons réduire le prix de revient (par simplification de l'absorbeur) et améliorer parallèlement les caractéristiques de fonctionnement.

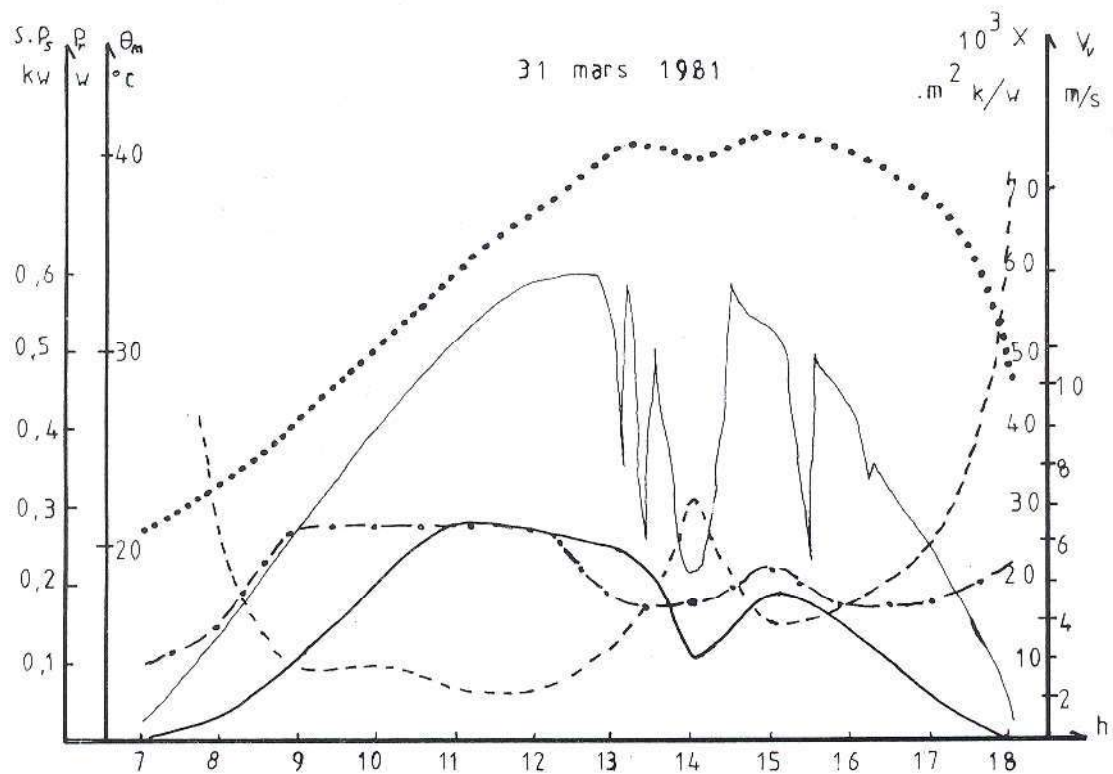
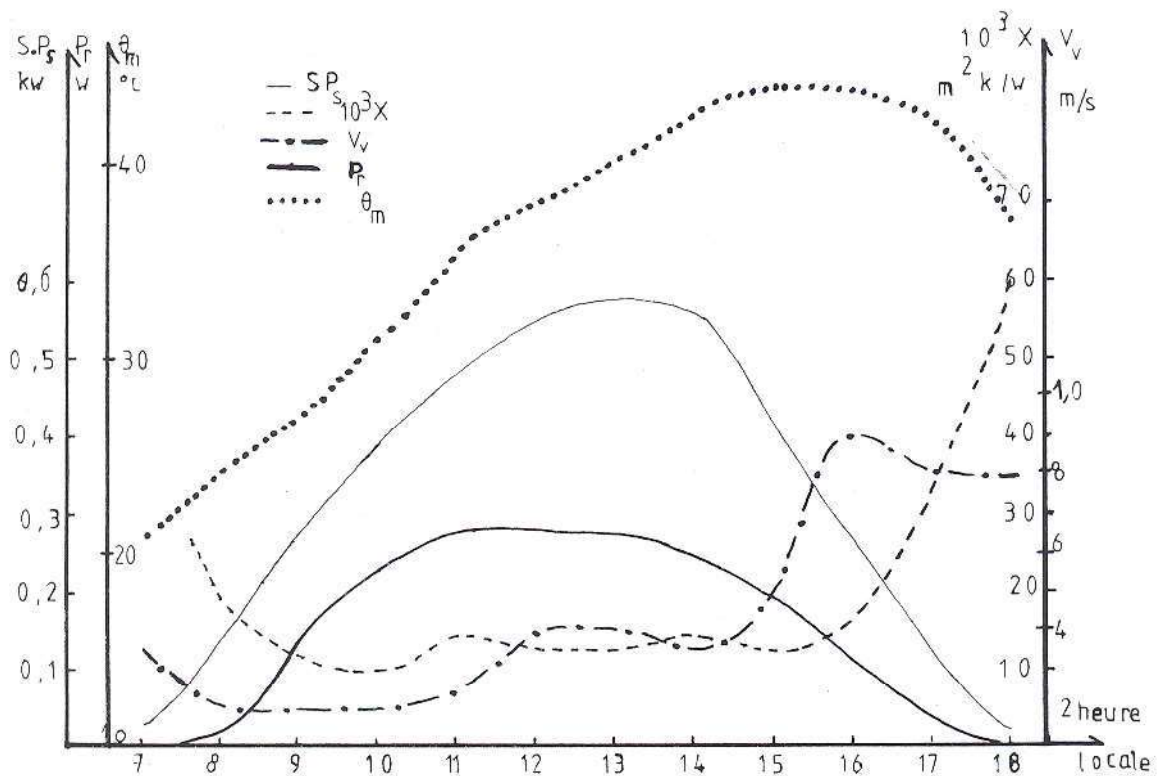
NOMENCLATURE

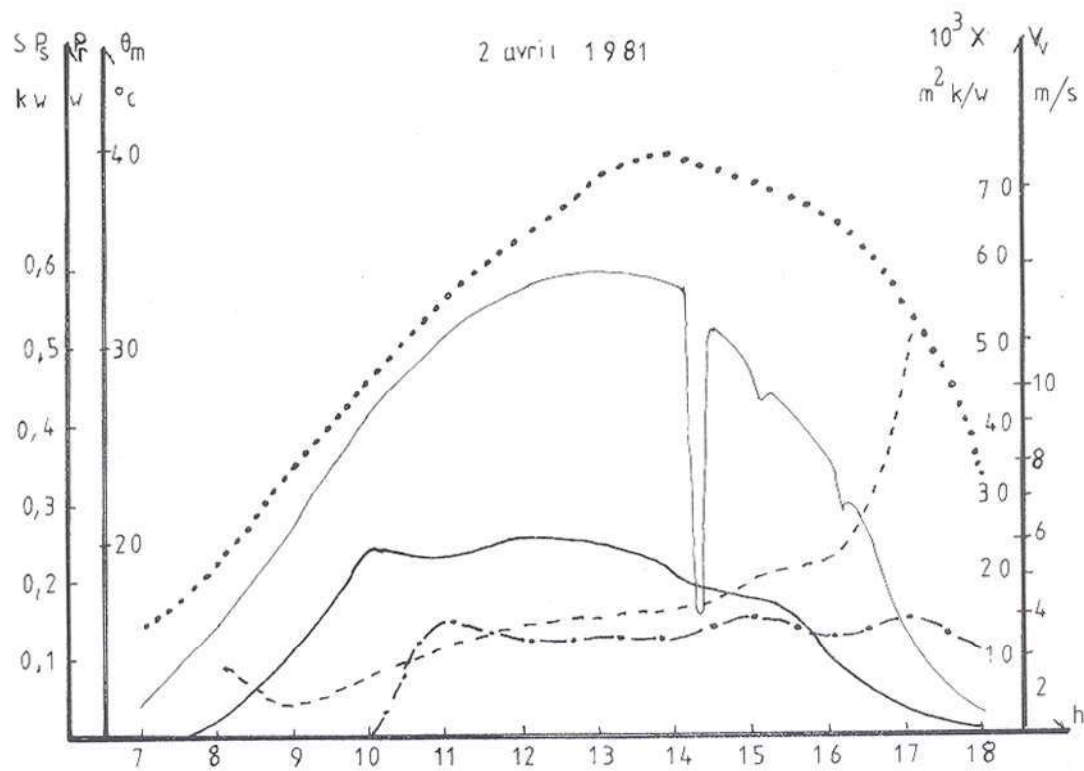
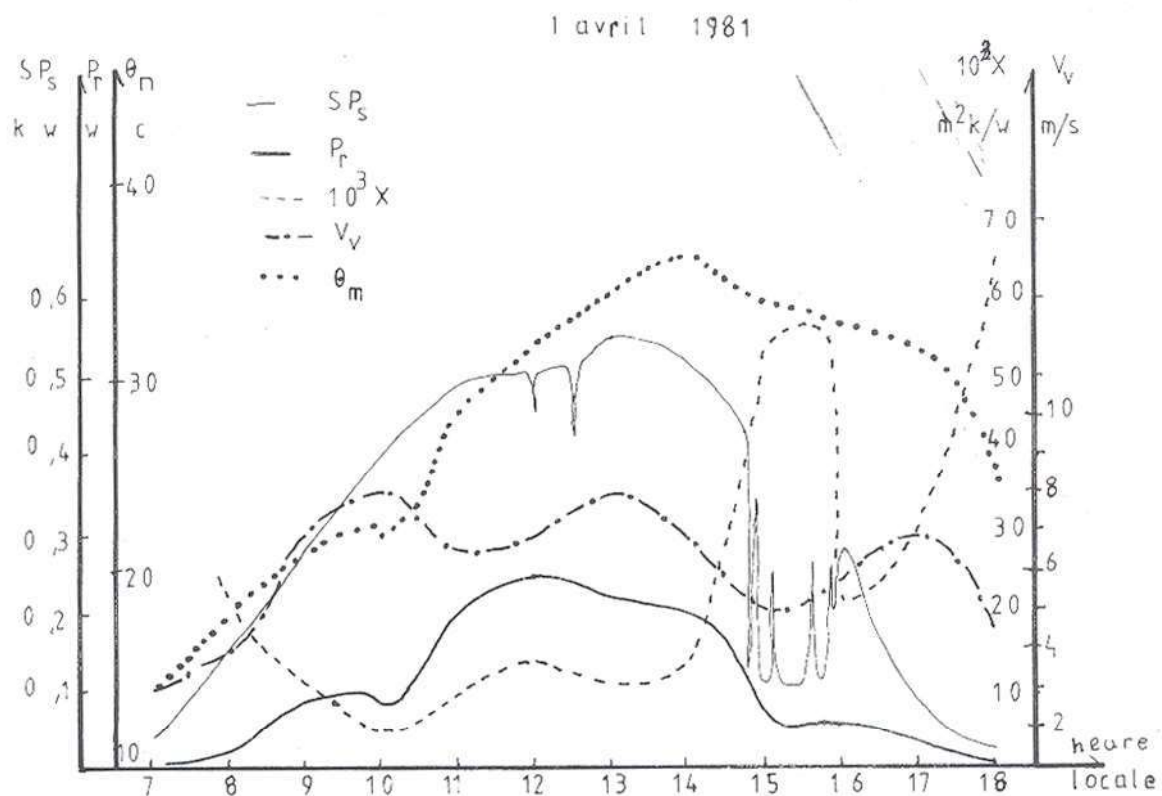
- a : coefficient de perte optique du capteur
- b : coefficient de perte thermique du capteur $[W / (K \cdot m^2)]$
- c : chaleur massique du fluide caloporteur $[kWh / (K \cdot kg)]$
- m : débit massique du fluide caloporteur $[kg/h]$
- E_s : énergie solaire globale incidente journalière
par m^2 de capteur $[\frac{kWh}{m^2}]$

- E_r : énergie récupérée par chaque soutirage [kWh]
 E_t : énergie nécessaire pour chauffer la même quantité d'eau sanitaire à 50°C [kWh]
 M_p : masse d'eau soutirée [kg]
 P_r : puissance récupérée par le capteur [kW]
 P_s : puissance solaire globale incidente par m^2 de capteur [kW/m^2]
 S : surface utile du capteur [m^2]
 S_v : section du tube en verre pour la détermination du débit du fluide caloporteur [m^2]
 V_m : vitesse moyenne de l'eau dans ce tube [m/s]
 V_{max} : vitesse maximale de l'eau dans ce tube [m/s]
 V_v : vitesse du vent [m/s]
 ΔL : distance entre les deux repères du tube en verre (cf Fig 2) [m]
 η : rendement du capteur [%]
 η_e : pourcentage énergétique économisé par le chauffe-eau solaire [%]
 η_i : rendement du chauffe-eau solaire [%]
 θ_e : température de l'eau à l'entrée du capteur [°C]
 θ_s : température de l'eau à la sortie du capteur [°C]
 θ_m : température moyenne de l'eau dans l'absorbeur [°C]
 θ_{ch} : température de l'eau dans la cuve (partie supérieure) [°C]
 θ_{cm} : température de l'eau dans la cuve (partie médiane) [°C]
 θ_a : température de l'eau froide sanitaire injectée dans la cuve [°C]
 θ_p : température moyenne de l'eau soutirée [°C]
 θ_{ext} : température ambiante extérieure [°C]
 ρ : masse volumique du fluide caloporteur [kg/m^3]

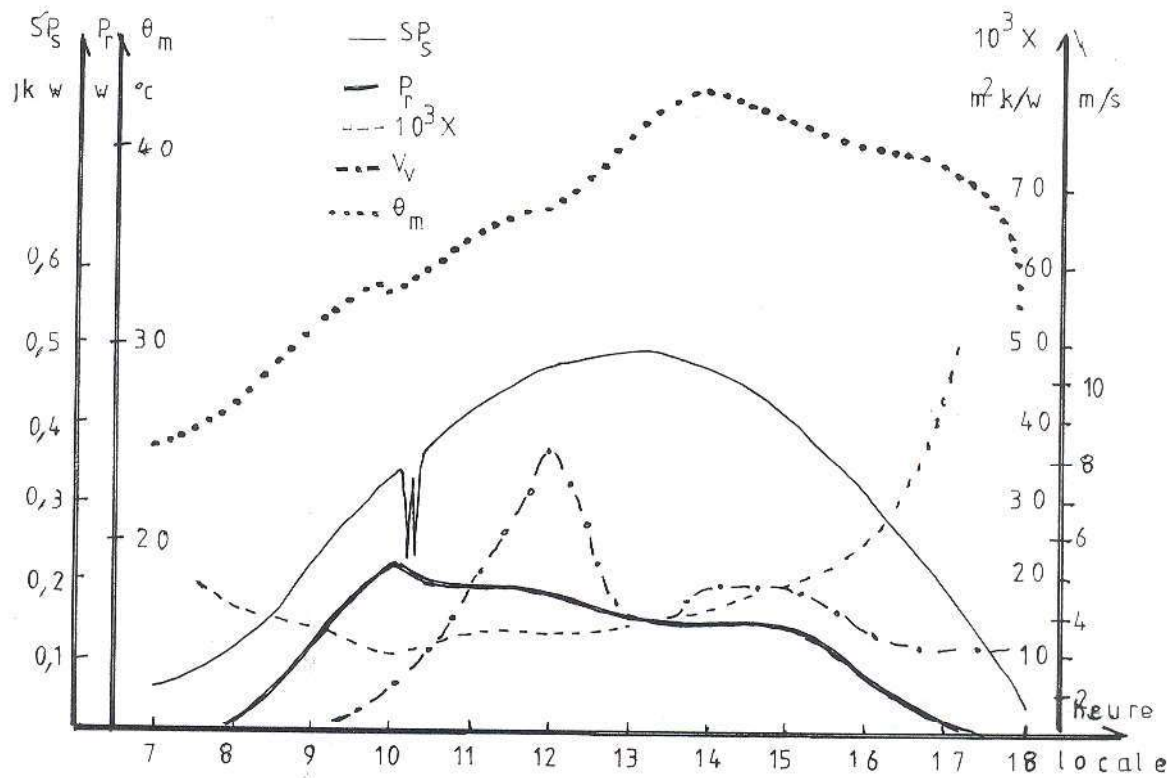
ANNEXE : RESULTATS DES MESURES

30 mars 1981

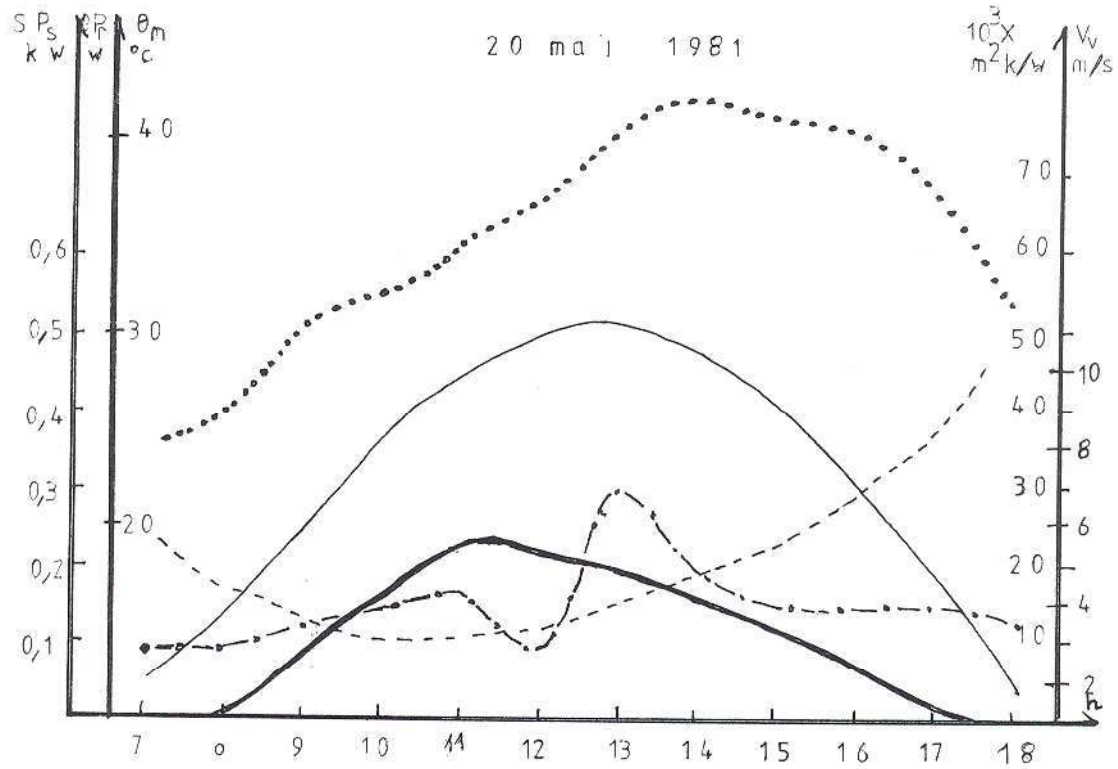


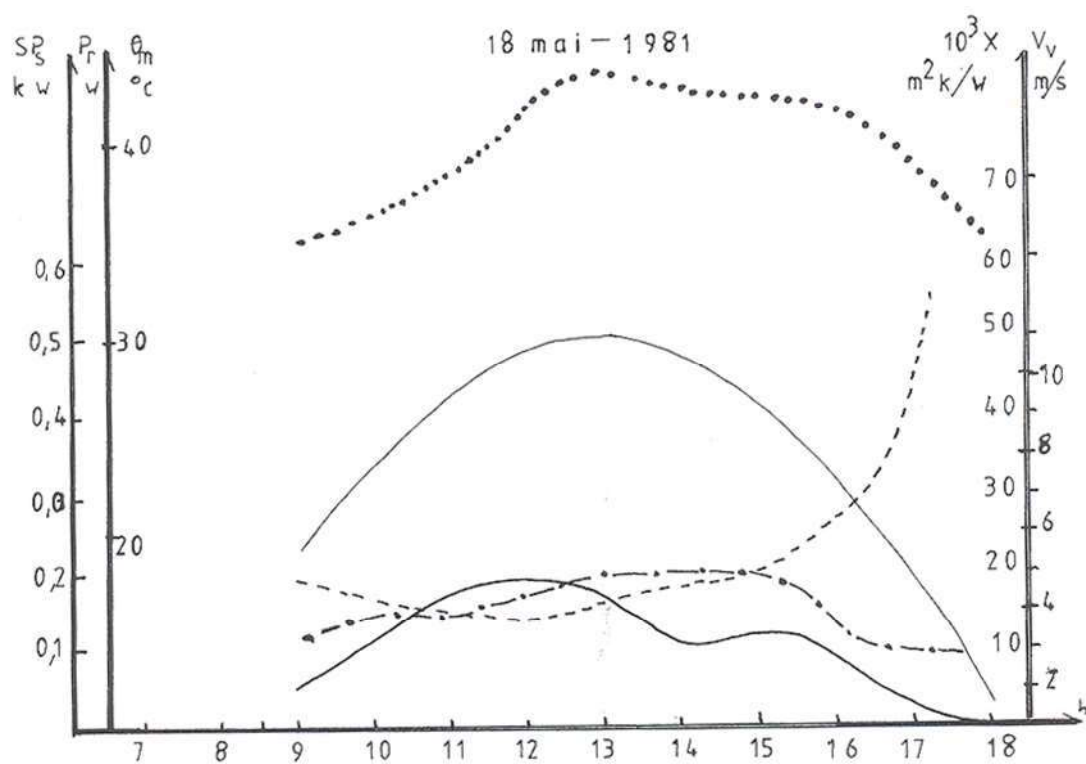
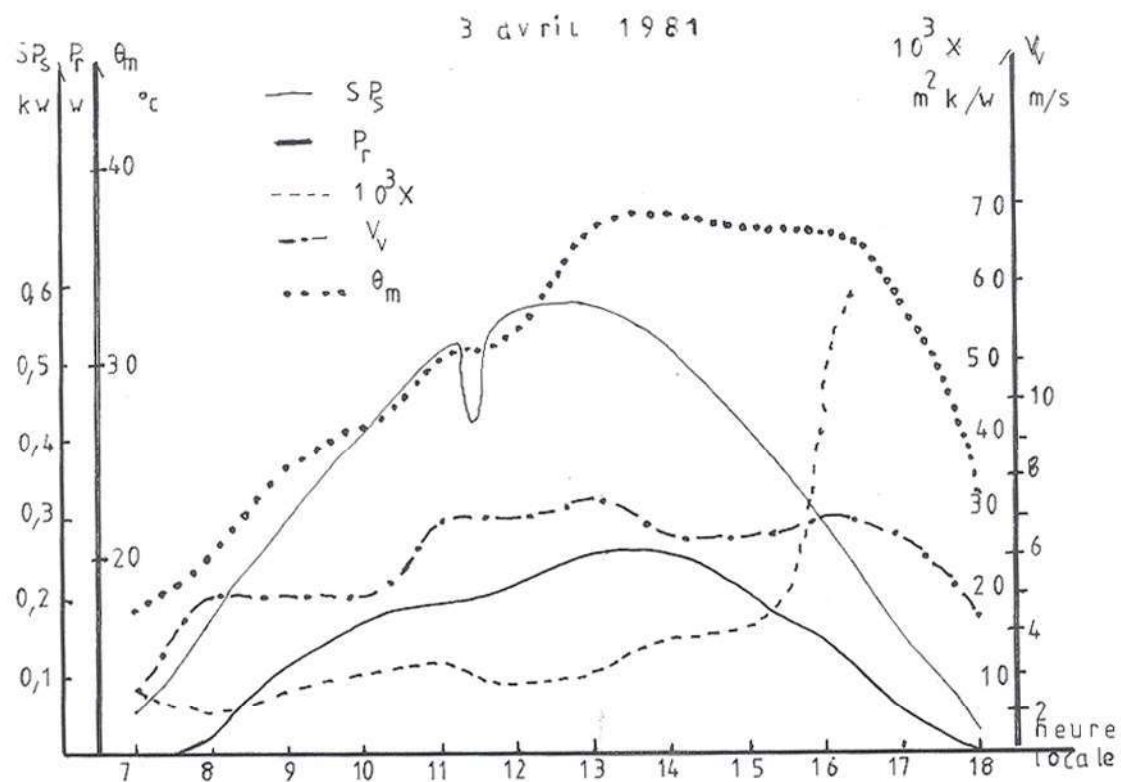


19 mai 1981



20 mai 1981





BIBLIOGRAPHIE

- (1) P. Pierson, A. Bellagi, J. Piro, A. Ganne
Etude de système simples de production d'eau chaude adaptés aux pays en voie de développement.
XX^e. Conf. Int. Comple. Rabat novembre 1981.
- (2) G. Olive
Un nouveau capteur solaire en béton
Promoclim. E. 8 (1) 1977
- (3) J.C. Mora, J. Piro, D. Hamida
Capteurs solaires construits selon les techniques du ferrociment.
Journées d'Energie Solaire ENIG - Gabès - Mai 1980
- (4) D.J. Close
The performance of solar water heater with natural circulation
Sol. Energy (6) 1962, P. 33

Ouvrages généraux
- (5) J.A. Duffie et W.A. Beckman
Solar Energy Thermal Processes
Wiley Interscience N.Y. 1974
- (6) P. Pierson
Contribution à l'étude théorique et expérimentale de la production individuelle d'eau chaude sanitaire par énergie solaire et circulation naturelle
Thèse U P S. Toulouse 1980