

Etude Expérimentale d'un Digesteur de Production de Biogaz Alimenté en Energie par un Chauffe-eau Solaire

A.Yettou*, R. Miri * et M. Belhamel**

* Département de Génie Mécanique, U S T H B, BP 32, 16111 Alger

** C D E R, BP 62, Route de l'Observatoire. Bouzaréah, 16340 Alger.

Résumé – *L'objet de notre travail est l'étude de l'alimentation en énergie thermique d'un digesteur de production de biogaz par un chauffe-eau solaire en assurant une température mésophile.*

L'étude expérimentale a permis de mettre au point un système de régulation de température exigée à l'entrée du digesteur comprise entre 25 et 40°. Le modèle est quasi-autonome.

Abstract – *The object of our work is to feed in thermal energy a digester of biogas production thanks to a solar-fired heater by ensuring a temperature 'mésophile' (25 with 40°C).*

The experimental study made it possible to develop a system temperature control required the entry of the digester ranging between 25 and 40°C. The model is quasi-autonomous.

Mots clés: Energies renouvelables – Chauffe eau solaire – Capteur – Rayonnement – Convection – Stockage d'énergie – Thermosiphon – Biogaz – Mésophile.

1. INTRODUCTION

Parmi les utilisations de l'énergie solaire, le chauffe-eau à usage domestique ou industriel est l'une des applications possibles. Il est utilisé pour chauffer un digesteur de production de biogaz [1, 2] en lui assurant un intervalle de température appropriée (25 à 40°C). Ce dernier présente des intérêts socio-économiques et écologiques indéniables, notamment :

- L'autonomie énergétique, le désenclavement et le développement économique des populations rurales et des zones arides et semi- arides;
- La production d'une énergie à moindre coût (le méthane) pour la cuisson, le chauffage, l'éclairage, la production d'électricité....;
- L'amélioration de la fertilisation des terres agricoles grâce aux boues générées par les installations de production de biogaz;
- La préservation du patrimoine forestier, (le bois de chauffe est souvent utilisé comme source d'énergie).

2. INSTALLATION EXPERIMENTALE

L'étude consiste à utiliser l'énergie thermique provenant d'un chauffe-eau solaire pour chauffer un digesteur de production de biogaz. Les tests expérimentaux ont été effectués au centre de développement des énergies renouvelables (C. D. E. R) à Bouzaréah, site qui présente les caractéristiques suivantes :

- Latitude : 36°,8 Nord
- Longitude : 3°,04 Est
- Altitude : 345m
- Albédo moyenne : 0,2

2.1 Description de l'installation

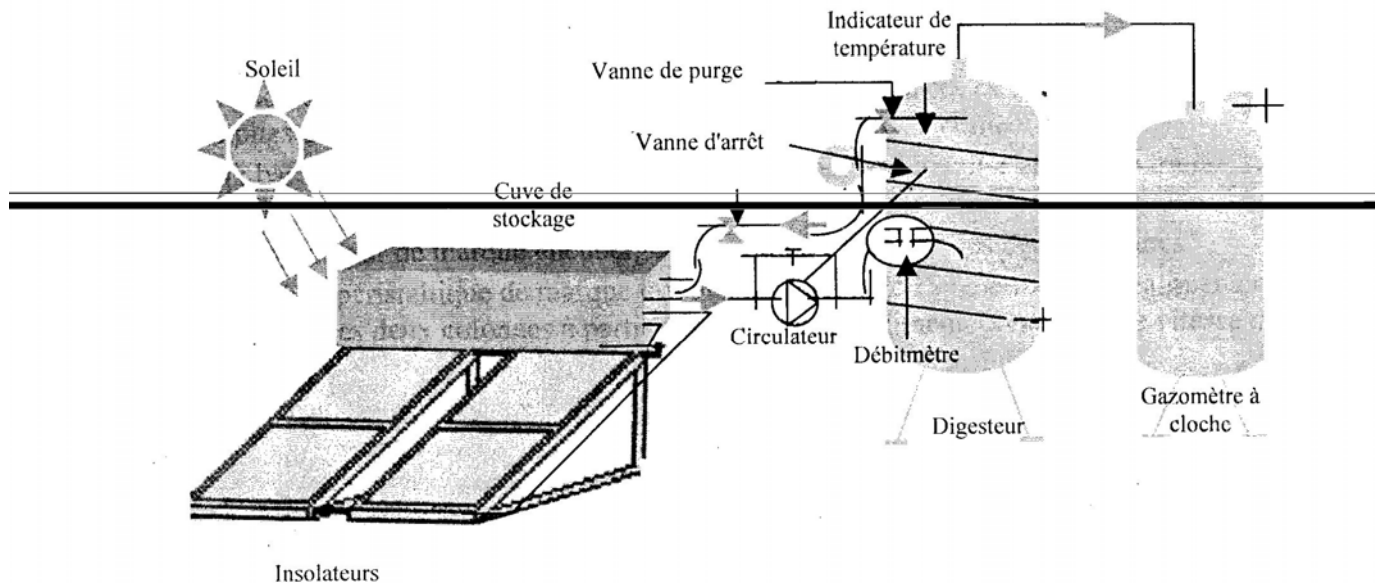


Fig. 1: Schéma de l'installation

L'installation utilisée (montrée sur la figure 1) comprend :

- **Un chauffe-eau solaire** fonctionnant en thermosiphon. Il est incliné d'un angle de 36° par rapport à l'horizontale et orienté plein sud. Il est constitué de deux insolateurs en série, de 02 m^2 de surface de captation chacun. Ils permettent de convertir l'énergie solaire en chaleur sensible et la transmettent au fluide circulant dans les tubes. Ils sont composés de :
 - Un bac qui sert de support et limite les pertes arrières par son isolation thermique.
 - Une plaque absorbante en aluminium recouverte d'un revêtement noir et mat qui limite les pertes par rayonnement.
 - Un radiateur comportant 9 tubes en cuivre de diamètre (12/14mm) connectés à deux collecteurs en cuivre rigide de (20/22).
 - Une couverture transparente composée de deux vitres .
 - Une cuve de stockage de type horizontal, qui récolte l'eau chauffée provenant des capteurs. Elle a 220 litres de capacité et elle est reliée aux deux insolateurs.
 L'ensemble est soutenu par une structure portante.
- **Un digesteur de production de biogaz** de type discontinu qui est constitué de :
 - Une cuve de fermentation de déjections animales ayant 1,65m de hauteur totale et 0,85 mm de diamètre et une capacité utile de 2800 litres. Le maintien de la température optimale de fermentation est assuré par la circulation d'une eau chaude le long de la paroi interne de la cuve à travers un serpentin mis au contact avec le substrat de fermentation.
 - Un couvercle constitué d'un dôme, muni d'un tuyau de sortie de gaz d'un diamètre 20/27mm et d'un manomètre.
- **Un thermostat** permettant la régulation de température au niveau d'un digesteur
- **Un gazomètre** à cloche qui sert de cuve de stockage du biogaz (méthane) produit de la fermentation anaérobie du substrat au niveau du digesteur.

3. BASE THEORIQUE

3.1 Calcul des composantes du rayonnement solaire :

3.1.1 Rayonnement solaire Direct :

Le flux direct, peut être calculé par la formule empirique [1, 2, 3, 4] suivante

$$HSI = I_0 . C . A . \text{Exp} (-B / \sin h) . \cos (i) \dots\dots [W] \quad (1)$$

Où $C = 1 + 0,0034 . \cos [30 . (m-1) + d]$

3.1.2 Rayonnement solaire Diffus

Le rayonnement solaire diffus H_{SD} est la partie du rayonnement diffusée par l'atmosphère. C'est la somme de deux composantes. La première est émise par la voûte céleste ϕ_1 et la deuxième est émise par le sol ϕ_2 . ϕ_1 et ϕ_2 sont donnés par les formules empiriques suivantes :

$$\phi_1 = \phi_0 (1 + \cos(\beta)) . Ag / 2 \text{ et } \phi_2 = [a (I_0 . \sin(h) + \phi_0) . (1 - \cos(\beta)) . Ag] / 2 \quad (2)$$

où $\phi_0 = I_0 . C . \sin(h) . (0,271 - 0,2939 . \text{Exp} (-B/\sin h))$

aussi

$$H_{SD} = \phi_1 + \phi_2 \quad (3)$$

3.1.3 Rayonnement Solaire Global:

Le rayonnement solaire global H_S reçu par le sol est la somme des deux rayonnements, direct et diffus.

$$H_S = H_{SI} + H_{SD} \quad (4)$$

3.2 Bilan thermique de la cuve de stockage :

Pour le calcul de la température de l'eau de la cuve de stockage (T_s), nous supposons que cette dernière est uniforme. (Voir figures 2 et 3)

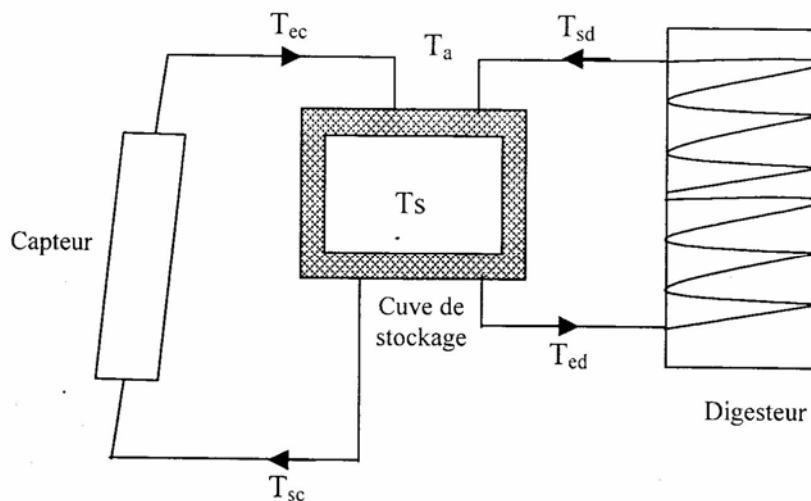


Fig. 2: Schéma des circuits caloporteurs

Le bilan énergétique de la cuve s'écrit :

$$M C_p dT_s / dt = Q_{us} - Q_{ps} - Q_{pp} \quad (5)$$

Où :

$$\begin{cases} Q_{us} = m_c C_p (T_{ec} - T_{sc}) \\ Q_{pc} = U_s A_s (T_s - T_a) \\ Q_{pp} = m_d C_p (T_{ed} - T_{sd}) \end{cases}$$

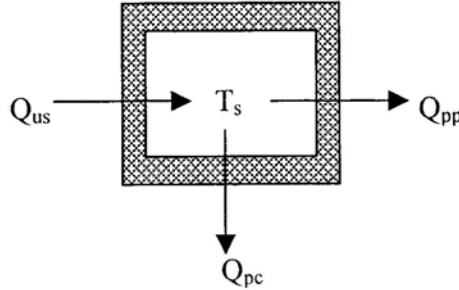


Fig. 3: Schéma du bilan énergétique de la cuve

L'équation (5) devient :

$$M C_p dT_s / dt = \mu_c C_p (T_{ec} - T_{sc}) - U_s A_s (T_s - T_a) - \mu_d C_p (T_{ed} - T_{sd}) \quad (6)$$

La solution de cette équation est donnée par la relation suivante:

$$dT_s = [1/M C_p] \cdot [\mu_c C_p (T_{ec} - T_{sc}) - U_s A_s (T_s - T_a) - \mu_d C_p (T_{ed} - T_{sd})] dt$$

$$\int_{T_{s,t0}}^{T_{s,t}} dT_s = \int_{t0}^t [1/M C_p] [\mu_c C_p (T_{ec} - T_{sc}) - U_s A_s (T_s - T_a) - \mu_d C_p (T_{ed} - T_{sd})] dt$$

$$T_{s,t} - T_{s,t0} = [1/M C_p] \cdot [\mu_c C_p (T_{ec} - T_{sc}) - U_s A_s (T_{s,t} - T_a) - \mu_d C_p (T_{ed} - T_{sd})] \cdot [t - t_0]$$

$$T_{s,t} = T_{s,t0} + [1/M C_p] \cdot [\mu_c C_p (T_{ec} - T_{sc}) - U_s A_s (T_{s,t} - T_a) - \mu_d C_p (T_{ed} - T_{sd})] \cdot [t - t_0]$$

Pour $(t = t_0)$ nous avons pris $T_{s,t0} = T_{sc}$ d'où :

$$T_{s,t} = T_{sc} + [1/M C_p] \cdot [\mu_c C_p (T_{ec} - T_{sc}) - U_s A_s (T_{s,t} - T_a) - \mu_d C_p (T_{ed} - T_{sd})] \cdot [t - t_0] \quad (7)$$

3.3 Bilan thermique sur le digesteur :

Le bilan thermique est établi sur un élément de volume du fluide, de section (A_f) et d'épaisseur (Δx) . Il exprime l'égalité entre la variation de l'énergie interne et les différents flux traversant la frontière de cet élément. (Voir figure 4)

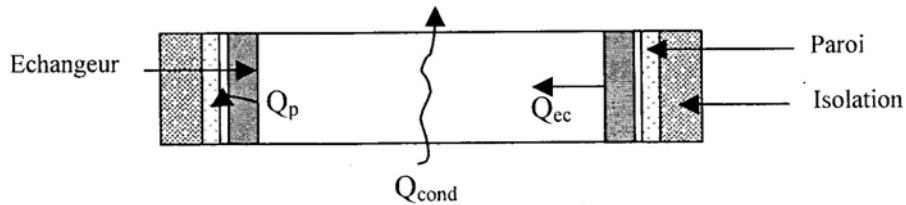


Fig. 4: Une tranche de fluide dans le digesteur

Le bilan thermique s'écrit : $\Delta u_f = Q_{ec} - Q_{cond} - Q_p$

tel que :

$$\begin{cases} \Delta u_f = M_f C_f \delta T_f / \delta t \\ Q_{cond} = \lambda_f A_f dx \delta^2 T_f / \delta x^2 \\ Q_{ec} = U_{ec} A_{ec} (T_{ech} - T_f) \\ Q_p = h A_p (T_f - T_p) \end{cases}$$

$$D'o\grave{u} : M_f C_f \delta T_f / \delta t = U_{cc} A_{cc} (T_{ech} - T_f) - \lambda_f A_f dx \delta^2 T_f / \delta x^2 - h A_p (T_f - T_p) .$$

4. EXPERIENCE ET RESULTAT-DISCUSSION

Pour pouvoir assurer la plage de température mésophile à l'intérieur du digesteur, nous avons testé, en premier lieu, l'efficacité de l'installation en mettant de l'eau avant l'utilisation du substrat et en plaçant des thermocouples à l'entrée à la sortie de la cuve de stockage et du digesteur, et en différents points à l'intérieur du digesteur afin de suivre l'évolution temporelle de la température des fluides, contenus dans le circuit de chauffe et dans le digesteur. Les mesures expérimentales des composantes du rayonnement solaire et des différentes températures du système sont consignées au niveau d'un enregistreur de type Multireg C1732 avec un pas de temps de 30 minutes. Les résultats expérimentaux obtenus par journée ensoleillée (22 /05/01) et donnés pour chaque heure, sont présentés, sous forme de graphes, sur les Figures 6, 7, 8 et 9.

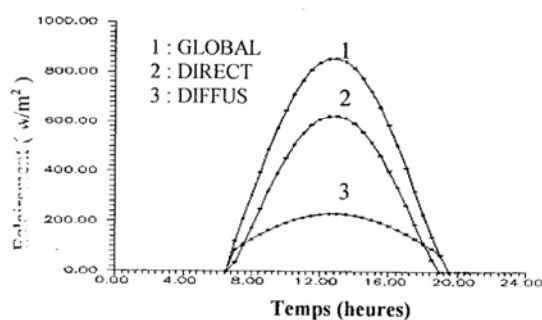


Fig. 5: Evolution théorique de l'éclairement global, direct et diffus

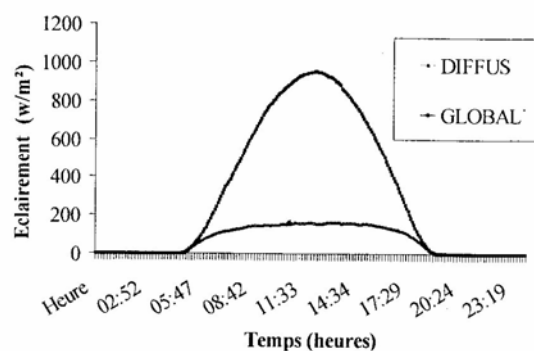


Fig.6: Evolution expérimentale de l'éclairement global et diffus

Le sous programme solaire que nous avons établi a permis, pour la journée type, d'avoir le graphe de l'évolution théorique de l'éclairement diffus, direct et global (Figure 5). Les valeurs de ces composantes, exprimées en W/m^2 et obtenues en temps solaire vrai (TSV), sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1: Evolution théorique de l'éclairement diffus, direct et global

TSV [H]	5h	6h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Ray.diffus [W/m^2]	2	75	131	146	148	159	160	162	160	157	140	119	66	2
Ray.direct [W/m^2]	0	48	365	535	676	755	792	763	672	539	382	190	39	1
Rayon..global [W/m^2]	2	123	496	681	824	914	952	925	832	696	522	309	105	3

Les résultats expérimentaux du rayonnement (figure 6) donnent des valeurs proches à celles calculées numériquement pour la même journée (écart maximum de 15%). L'évolution des températures des différents éléments des modèles (tableaux 2 et 3 des valeurs expérimentales) sont représentés par les figures 7,8, et 9.

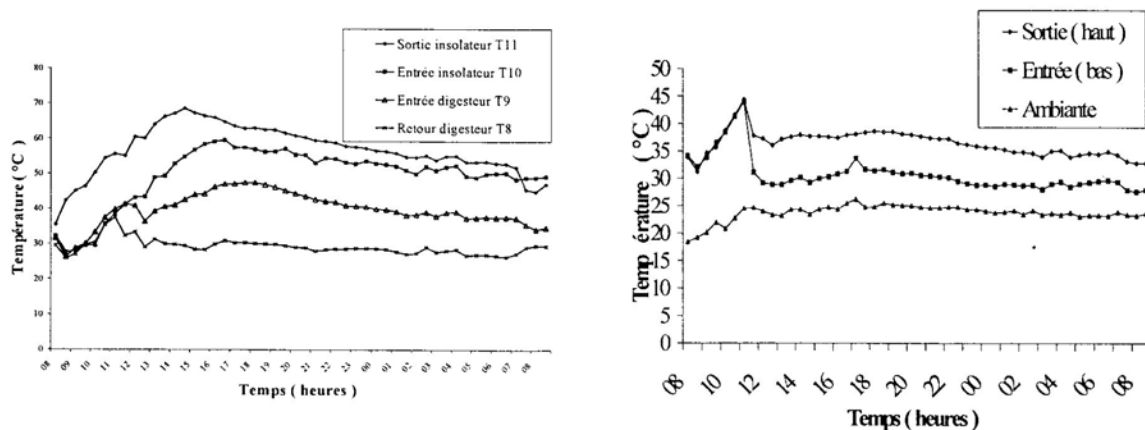
Les valeurs de la température au niveau de la cuve de stockage varient entre 45°C et 68°C tandis que celle du digesteur est régulée et fluctuent autour de 38°C (température mésophile).

Tableau 2: Températures du fluide caloporteur au niveau de l'insolateur et du digesteur

Tps	Tsort Dig	TentrDig	Tentr Ins	TsortIns	Tps	Tsort Dig	TentrDig	Tentr Ins	TsortIns
09:00	29,5	31,6	32,2	35,4	22:00	28	42,8	53,1	59,5
10:00	27	28,7	28	45,1	23:00	28,6	42	54,3	58,9
11:00	30,4	33,3	29,6	50,3	24:00	28,8	40,8	52,9	57,7
12:00	37,5	39,9	38,5	55,6	01:00	28,7	40	53	56,6
13:00	33,3	41	43,3	60,5	02:00	27,8	39,2	52,2	55,9
14:00	31,2	39,3	48,9	64	03:00	27,4	38,3	50	54,7
15:00	29,8	41,1	52,9	67,2	04:00	27,7	37,8	51	53,9
16:00	28,5	44,1	56,8	67,3	05:00	28,4	39,1	52,4	55,1
17:00	29,9	46,3	59,2	66	06:00	27	37,5	49	53,4
18:00	30,3	47,1	57,5	63,6	07:00	26,7	37,5	50,2	53
19:00	30,1	47,5	57	63	08:00	27,3	37,3	48,5	51,9
20:00	29,9	46,3	56,4	62,5	09:00	29,6	34,2	49	45
21:00	29,1	44,5	55,5	60,9	09:30	29,4	34,6	49,3	47,1

Tableau 3: Températures du fluide à l'intérieur du digesteur

Tps	T du bas	T centr 1	T centr 2	T.haut	Tps	T du bas	T centr 1	T centr 2	T.haut
09:00	20,9	25,2	24,9	25,7	22:00	38,9	44,3	44,3	44,2
10:00	28,0	31,1	30,9	31,2	23:00	38,2	43,4	43,5	43,3
11:00	31,8	34,9	35	35,3	24:00	36,6	41,7	41,8	41,8
12:00	37,9	41,2	41,2	41,3	01:00	36,0	41,1	41,2	41,2
13:00	37,8	42,1	42,3	42,2	02:00	35,9	40,9	40,9	40,9
14:00	37,6	42,3	42,3	41,7	03:00	35,4	40,2	40,3	40,3
15:00	38,3	43,4	43,3	42,7	04:00	34,4	39,2	39,2	39,2
16:00	38,0	43,4	43,4	42,7	05:00	36,0	40,6	40,8	40,8
17:00	37,9	43,6	43,6	43,1	06:00	35,6	40,1	40,1	40,2
18:00	38,6	44	44	43,6	07:00	36,3	40,6	40,6	40,6
19:00	39,4	44,9	44,9	44,7	08:00	36,0	39,9	40	40
20:00	39,4	44,9	44,9	44,8	09:00	34,1	37,7	37,8	37,5
21:00	39,4	44,8	44,8	44,8	09:30	34,1	38,1	38,1	37,8

**Fig.7 :** Evolution des températures du fluide caloporteur

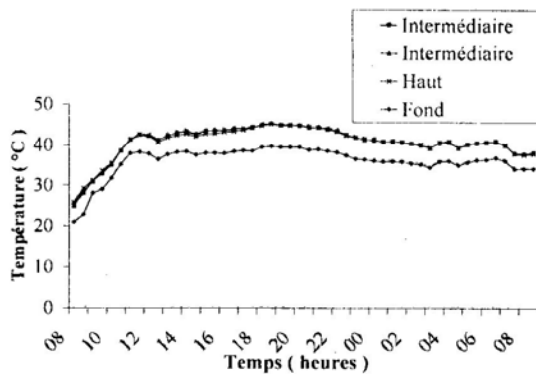


Fig. 8: Evolution des températures du fluide à l'intérieur du digesteur.

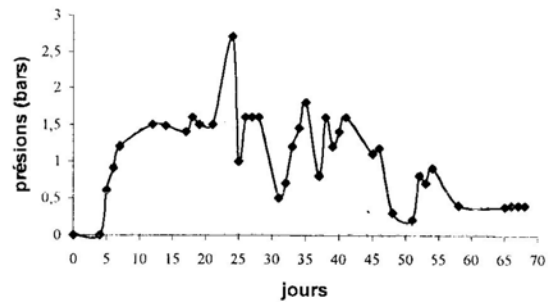


Fig. 9: Cinétique de production de biogaz

5. CONCLUSION

Cette étude a porté sur la régulation de température au niveau d'un digesteur alimenté par un chauffe-eau solaire. Les résultats expérimentaux ont montré que le dispositif mis en place pouvait assurer une température mésophile, moyennement uniforme à l'intérieur du digesteur, grâce à un thermostat différentiel qui agit directement sur la circulation du fluide permettant d'assurer une plage de températures de consigne.

Pour finaliser le travail que nous avons entrepris, nous recommandons ceci :

- Tester ce prototype à grandes échelle dans différents sites en choisissant plusieurs journées types de l'année.
- Pour rendre l'installation complètement autonome, il serait judicieux de faire fonctionner les équipements annexes (circulation, résistance chauffante) par des panneaux photovoltaïques solaires.

NOMENCLATURE

A et B sont les facteurs de trouble du ciel
 A_g : surface du capteur [m^2].
 A_s : Surface de la cuve de stockage [m^2].
 β : angle d'inclinaison du capteur (degré)
C : Coefficient de correction de la distance terre – soleil
h : hauteur du soleil (degré)
l : angle d'incidence (degré)
 I_0 : Constante solaire égale 1380 [w/m^2]
m : Numéro du mois dans l'année
M : Masse du fluide dans la cuve [kg].
 m_c : dans le capteur [Kg/s].
 m_d : Débit du fluide dans le digesteur [Kg/s]
 Q_{cond} : Transfert conductif de chaleur à travers le fluide [W].
 Q_{ec} : Puissance fournie par l'échangeur de chaleur à travers le fluide [W].

Q_p : Les échanges de chaleur par convection sur les parois latérale [W].
 Q_{us} : Puissance utile de stockage [W].
 Q_{pc} : Puissance perdue par convection [W].
 Q_{pp} : Puissance perdue par puisage [W].
 T_a : Température ambiante [°C].
 T_{ec} : Température d'entrée de l'eau dans la cuve [°C].
 T_{sc} : Température de sortie de l'eau de la cuve [°C].
 T_{ed} : Température d'entrée de l'eau dans le digesteur [°C].
 T_{sd} : Température de sortie de l'eau du digesteur [°C].
 T_{ech} : Température de l'échangeur en serpent
 U_{ech} : Coefficient d'échange global de l'échangeur

Δu_f : Variation de l'énergie interne stockée
[W].

U_c : Coefficient global des pertes par
convection de la cuve [$W/m^2 \cdot ^\circ C$].

REFERENCES

- [1] Michèle Héduit, “*La filière Biogaz dans les pays en développement*”, Collection Etude et Filière, 1993.
- [2] B. Lagrange, “*Biométhane, Principes - Techniques – Utilisations*”, éd. Edisud (1979).
- [3] P. De Brichambaut, “*Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*”, éd. Gauthier, (1963).
- [4] M. Fishenden and Saunders, “*Introduction to heat transfer*”, Oxford-New York (1950) pp180-182.
- [5] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, “*Le rayonnement solaire*”, Conversion thermique et applications.
- [6] R. Miri, “*Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie d'une serre*”_Thèse de magister, USTHB (1983).
- [7] Berhoudo, “*Essais comparatifs des capteurs solaires plans*”, Publication E.D.F, ref. P.H.C.W. 132 (1978)11-18.
- [8] T. Cabirol, A. Pelissou et D. Roux, “*Le chauffe-eau solaire*”, collection Technologies Douces, (1980).
- [9] S. Lakehal et K. Ouabdelkader, “*Etude et réalisation d'un capteur plan solaire à contact direct eau - plaque absorbante configuration (concave)*”. PFE 1997.
- [10] S. Khelfane et K. Oucheli, “*Etude des performances thermiques d'un chauffe-eau solaire de production nationale*” PFE 1990.
- [11] A. Yettou et L. Ait Abdeslam, “*Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire alimentant un digesteur de production de biogaz*”, PFE 2001.