

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

Filière : génie mécanique

Spécialité : énergétique

Par

- BOUFLIH WAIL
- BOUAKILI IDRIS
- BENCHERIF SELIMAN
- LALAOUI YAKOUB

Intitulé

Etude et réalisation d'une couveuse à passive

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
M. TAYEBI Tahar	Pr	Président	Univ-BBA
M. BELFEGAS Billal	MCB	Encadreur	Univ-BBA
M. GOUIDMI Hamza	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M. SAIDANI Lyamine	MAA	Examineur	Univ-BBA
M. BOUNEGAB ADEL	MCA	Examineur	Univ-BBA
M. KAHIL Zoubir	ING	Invité	Secteur IND

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre Gratitude à nos chers promoteurs **Dr. BELFEGAS Billal et Dr. GOUIDMI Hamza** pour leurs conseils leurs orientations ainsi que leur disponibilité tout au long de ce travail. N'oublier pas **Mr KAHIL Zoubir** ingénieur en électromécanique pour leur aide pendant la réalisation de notre projet.

Nous tenons aussi à remercier les membres d'Incubateur de Startups de l'Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj pour leur contribution et implication à nos côtés ainsi que tous les enseignants du département de génie mécanique pour les connaissances qu'on a pu acquérir auprès d'eux.

Nous remercions également **l'ensemble du personnel administratif et les encadrants pédagogiques** de notre institution, qui ont su nous soutenir et nous fournir les ressources nécessaires.

Un grand merci à **nos familles et amis**, pour leur soutien moral constant, leur compréhension et leur encouragement, qui nous ont permis de surmonter les défis rencontrés.

Enfin, nous souhaitons remercier toutes les personnes et partenaires ayant contribué, de près ou de loin, au développement de ce projet, et qui ont cru en notre capacité à mener à bien cette initiative.

Ce projet est avant tout une aventure humaine, rendue possible grâce à l'engagement et à la collaboration de chacun.

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à **nos enseignants et mentors**, dont le savoir, la patience et les conseils précieux ont été une source constante d'inspiration tout au long de ce projet.

À nos **familles et amis**, pour leur soutien indéfectible et leur encouragement tout au long de cette aventure.

Ce projet est le fruit de notre collaboration et de notre passion pour l'innovation. Nous espérons qu'il saura inspirer ceux qui croient en la puissance des idées et du travail d'équipe.

Nomenclatures

SYMBOLES ROMAINS :

T_{pc}	Température de l'absorbeur du capteur solaire	°C
T_{pw}	Température de l'absorbeur du mur de Trombe	°C
T_{CH}	Température dans la chambre	°C
T_{vc}	Températures des vitres du capteur solaire	°C
T_{vw}	Températures des vitres du mur de Trombe	°C
T_{fi}	Température à l'entrée du mur de Trombe	°C
T_{fo}	Température à sortie du mur de Trombe	°C
T_e	Température à l'entrée du capteur solaire	°C
T_s	Température à sortie du capteur solaire	°C
T_{sr}	Température de l'eau	°C
TC	Température de ciel	°C
T_f	Température du fluide caloporteur	°C
T_{fe}	Température d'entrée du fluide	°C
ΔT	Différence de température	°C
B	Coefficient de dilatation thermique	(1/K)
b	Largeur de la soudure	m
D	Diamètre du conduit	m
e_s	Epaisseur de la soudure, exprimée	m
L	Longueur du conduit	m
X	Longueur de la cavité formée par les deux plans	m
Z	Epaisseur de la cavité	m
A	Surface du capteur	m ²
V	Vitesse moyenne du fluide	(m/s)
V_w	Vitesse du vent	(m/s)
G	Accélération de la pesanteur	(m/s)
P	Puissance de panneaux photovoltaïques	W
P_g	Irradiation solaire	(W/m ²)
P_{po}	Récupération effective de l'énergie incidente	(W/m ²)
q_{cond}	Flux thermique par conduction	(W/m ²)
q_{conv}	Flux thermique convectif	(W/m ²)
q_{rad}	Flux thermique radiatif	(W/m ²)
h_c	Coefficient de transfert thermique par conduction	(W/m ² ·K)
h_v	Coefficient de transfert thermique par convection	(W/m ² ·K)
h_{wind}	Coefficient de transfert thermique	(W/m ² ·K)
U_t	Coefficient global de transfert thermique	(W/m ² ·K)

$\dot{m}$	Débit massique	(kg/s)
C_p	Chaleur massique du fluide	(J/kg. K)
R	Résistance électrique utilisée pour maintenir T	Ω
V	Tension aux bornes des panneaux	V
E_{th}	Énergie thermique stockée dans le mur	J
E_{elec}	Énergie électrique consommée	J
F	Facteur de forme de la cavité	-
Gr	Nombre de Graetz	-
Nu	Nombre de Nusselt	-
Nu_β	Nombre de Nusselt pour une inclinaison β de capteur	-
Nu_0	Nombre de Nusselt pour une inclinaison nulle	-
Nu_{90}	Nombre de Nusselt pour une inclinaison β égale à 90°	-
Pr	Nombre de Prandtl	-
Ra	Nombre de Rayleigh	-
Re	Nombre de Reynolds	-
St	Nombre de Stanton	-
U_{go}	Coefficient global des pertes	-

SYMBOLES GRECS :

ϑ	Viscosité cinématique du fluide	(m ² /s)
μ	Viscosité dynamique	(kg/m. s)
ρ	Densité du fluide (air ou eau)	(kg/m ³)
λ	Conductivité thermique du matériau	(W/m. K)
λ_s	Conductivité thermique de la soudure	(W/m. K)
η_{th}	Rendement thermique	%
η_{ro}	L'efficacité globale de l'échange thermique du capteur	%
η_c	Paramètre constructifs, du capteur	%
α	Absorptivité du matériau	-
τ	Transmissivité du vitrage	-
ε	Emissivité du matériau	-
ε_v	Emissivité de la vitre	-

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1.1 : Couveuse Manuelle.....	4
Figure 1.2 : Couveuse Automatique.....	5
Figure 1.3 : Couveuse solaire.....	6
Figure 1.4 : Le système propose.....	7

Chapitre 02

Figure 2.1 : Description du système de couveuse.....	11
Figure 2.2 : Bilan énergétique pour un capteur à double vitrage.....	15
Figure 2.3 : Bilan énergétique au niveau de vitrage.....	17
Figure 2.4 : Bilan énergétique au niveau de l'air qui traverse la cheminée.....	18
Figure 2.5 : Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur.....	19

Chapitre 03

Figure 3.1 : Vue global du système.....	26
Figure 3.2 : Enveloppeintérieur du couveuse passive.....	26
Figure 3.3 : Capteur solaire Plan et elements constrictifs.....	27
Figure 3.4 : Mur de Trombe et leur dimension.....	28
Figure 3.5 : Panneau photovoltaïque.....	29
Figure 3.6 : Carte Arduino utilisée dans le système.....	29
Figure 3.7 : Pompe à eau.....	30
Figure 3.8 : Batterie rechargeable et leur module de charge (TP4056).....	30
Figure 3.9 : Résistance de chauffage électrique.....	31
Figure 3.10 : Capteurs de température et d'humidité (DHT11).....	31

Figure 3.11 : Afficheur LCD.....	32
---	-----------

Chapitre 04

Figure 4.1 : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour intensité de flux 65 w/m^2.....	36
Figure 4.2 : Evolution des différentes températures de capteur solaire pour une couveuse en fonctionnement global pour intensité de flux 650 w/m^2.....	36
Figure 4.3 : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour intensité de flux 800 w/m^2.....	37
Figure 4.4 : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour intensité de flux 800 w/m^2.....	38
Figure 4.5 : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse sans capteur solaire pour une intensité de flux 650 w/m^2.....	39
Figure 4.6 : L'évolution des différentes températures de capteur solaire pour une couveuse sans mure de trombe pour une intensité de flux 650 w/m^2.....	39
Figure 4.7 : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour le 05/11/2024.....	40
Figure 4.8 : Evolution des différentes températures de capteur solaire pour une couveuse en fonctionnement global pour le 05/11/2024.....	41
Figure 4.9 : L'éclairement solaire et la température de chambre en fonction du temps pour le 05/11/2024.....	41
Figure 4.10 : Variation de l'humidité et la température de chambre en fonction du temps pour le 05/11/2024.....	42
Figure 4.11 : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour le 06/11/2024.....	43

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Différents cas de fonctionnement de système propose.....	47
---	-----------

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre 01 :

1.1 Introduction	4
1.2 Les Types de Couveuses à œufs	4
1.2.1 Couveuses Manuelles.....	4
1.2.2 Couveuses Automatiques	5
1.2.3 Couveuses Solaires	5
1.3 Technologies Communes aux Couveuses	6
1.4 Couveuse Solaire Passive et Automatisée	6
1.4.1 Conception et Caractéristiques	6
1.4.2 Avantages.....	7
1.4.3 Limites	7
1.5 Conclusion	8

Chapitre02:

2.1 Introduction.....	11
2.2 Différents modes des transferts de chaleur au niveau du capteur solaire plan	11
2.2.1 Echange par conduction	11
2.2.2 Echange par rayonnement	12

2.2.3	Echange par convection	13
2.3	Bilan énergétique d'un capteur solaire plan	15
2.3.1	Puissance utile récupérée par le fluide.....	15
2.3.2	Calcul du rendement d'un capteur.....	17
2.4	Mure de trombe en régime permanent.....	17
2.4.1	Bilan énergétique sur le vitrage.....	17
2.4.2	Bilan énergétique pour l'air.....	18
2.4.3	Bilan énergétique sur l'absorbeur.....	19
2.4.4	Distributions de températures.....	20
2.4.5	Efficacité instantanée	20
2.5	Calculs thermiques pour maintenir la température à 37°C.....	20
2.5.1	Bilan énergétique de la chambre	20
2.5.2	Dimensionnement des panneaux photovoltaïques et de la résistance électrique	21

Chapitre 03 :

3.1	Introduction.....	24
3.2	Fonctionnement global du système	25
3.3	Etapes de Réalisation.....	26
3.3.1	Carcasse de la couveuse.....	26
3.3.2	Capteur solaire plan	27
3.3.3	Mur de Trombe.....	28
3.3.4	Panneau photovoltaïque.....	28
3.3.5	Carte Arduino Nano	29
3.3.6	Pompe à eau.....	29
3.3.7	Batterie rechargeable et leur module de charge (LM2596s).....	30
3.3.8	Résistance électrique chauffante	30
3.3.9	Capteurs de température et d'humidité (DHT11).....	31
3.3.10	Afficheur LCD	31
3.4	Étude et Conception du Système.....	32

3.4.1 Fabrication de la Carcasse.....	32
3.4.2 Installation du Capteur Solaire Plan et du Mur de Trombe.....	32
3.4.3 Montage des Composants Électroniques	32
3.4.4 Programmation de l'Arduino	33
3.4.5 Tests et Ajustements.....	33

Chapitre 04 :

4.1 Introduction.....	35
4.2 Résultats pour différentes intensités de flux.....	35
4.3 Résultats pour intensité de flux constant.....	39
4.3.1 Système sans capteur solaire plan (cas03)	39
4.3.2 Système sans Mure de trombe (cas04).....	40
4.4 Résultats pour Intensité de flux réel.....	40
4.4.1 Système sans résistance électrique (Cas05)	40
4.4.2 Système global avec résistance électrique(Cas06)	43
4.5 Conclusion	45

Conclusion générale	46
----------------------------------	-----------

Partie économique du projet

Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par l'augmentation des besoins énergétiques et les défis environnementaux, la recherche et le développement de systèmes utilisant des énergies renouvelables revêtent une importance fondamentale. La transition vers des solutions énergétiques durables permet non seulement de réduire la dépendance aux énergies fossiles, mais également de limiter les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. Dans de nombreuses régions du monde, particulièrement dans les zones rurales ou éloignées, l'accès à des sources d'énergie fiables et continues est souvent limité, ce qui pose un défi majeur pour des activités nécessitant une gestion thermique, comme l'incubation d'œufs.

L'incubation des œufs nécessite une température constante et contrôlée, généralement autour de 37°C, pour assurer un bon développement embryonnaire. Les couveuses traditionnelles, qui fonctionnent principalement à l'électricité, peuvent être inaccessibles ou peu fiables dans les régions souffrant d'un approvisionnement énergétique limité. Cela a conduit à une exploration accrue des systèmes passifs et des technologies utilisant l'énergie renouvelable pour maintenir ces conditions.

Parmi les solutions émergentes, l'utilisation combinée de systèmes passifs (comme les murs de Trombe et les capteurs solaires thermiques) et de technologies actives alimentées par des panneaux photovoltaïques se révèle prometteuse. Ces systèmes permettent de capter et d'utiliser l'énergie solaire, une ressource abondante et gratuite, pour maintenir une température idéale dans une couveuse, tout en assurant un fonctionnement stable et autonome même en absence de soleil.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur la conception d'une couveuse à œufs passive combinant un capteur solaire thermique pour chauffer l'eau, un mur de Trombe pour favoriser la circulation de l'air chaud, et une résistance électrique alimentée par des panneaux photovoltaïques pour stabiliser la température la nuit ou en cas de conditions climatiques défavorables. Ce système vise à offrir une solution durable, économique, et écologique pour

l'incubation d'œufs dans des environnements où les infrastructures énergétiques sont limitées ou non fiables.

Faisant suite à la présente introduction, le contenu de ce mémoire est organisé autour de quatre chapitres principaux.

- ✚ Un aperçu général est présenté dans le premier chapitre.
 - ✚ Le deuxième chapitre décrit le modèle mathématique pour le capteur solaire plan, mur de trombe et la couveuse.
 - ✚ Le troisième chapitre présente les différentes techniques expérimentales utilisées pour la réalisation de système.
 - ✚ Le quatrième chapitre présente les discussions et les interprétations des résultats.
- On termine cette étude par une conclusion générale.

Chapitre 1

Aperçu Général

Sommaire

1.1 Introduction.....	4
1.2 Les Types de Couveuses à œufs.....	4
1.2.1 Couveuses Manuelles.....	4
1.2.2 Couveuses Automatiques	5
1.2.3 Couveuses Solaires	5
1.3 Technologies Communes aux Couveuses.....	6
1.4 Couveuse Solaire Passive et Automatisée	7
1.4.1 Conception et Caractéristiques	7
1.4.2 Avantages	8
1.4.3 Limites	8
1.5 Conclusion	8

1.1 Introduction

Les couveuses à œufs sont des dispositifs indispensables dans les domaines de l'agriculture moderne. Elles permettent de produire artificiellement les conditions d'incubation naturelles, telles que la température, l'humidité et la ventilation, nécessaires au développement des œufs. Leur utilisation optimise la productivité et assure une meilleure gestion des cycles de reproduction, en particulier dans les fermes avicoles de grande échelle.

Dans un contexte où la demande en produits avicoles augmente, les couveuses apportent une solution pour améliorer la gestion des ressources et limiter les pertes. En plus de leur utilité économique, elles contribuent également à l'innovation technologique en intégrant des systèmes de contrôle avancés pour répondre aux différents besoins.

1.2 Les Types de Couveuses à œufs

1.2.1 Couveuses Manuelles

Les couveuses manuelles sont des dispositifs de base qui nécessitent une surveillance et une gestion constantes par l'utilisateur.

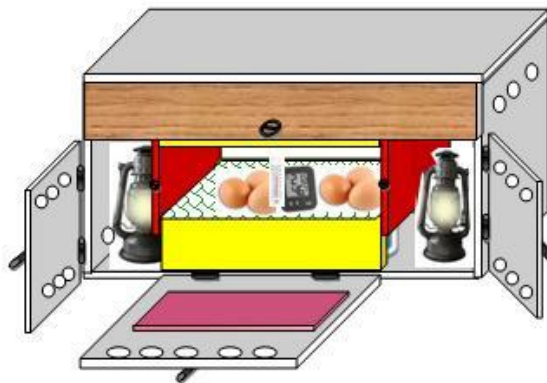


Figure (1.1) : Couveruse manuelle [1].

A. Caractéristiques :

- ✚ Régulation manuelle de la température à l'aide de thermostats simples.
- ✚ Rotation des œufs effectuée plusieurs fois par jour par l'utilisateur.

B. Avantages et Inconvénients :

- ✚ Coût d'acquisition réduit.
- ✚ Accessibles dans des environnements ruraux ou à faibles ressources.

Comme des inconvénients, on a :

- ✚ Un risque élevé d'erreurs humaines.
- ✚ Consommation de temps et dépendance à la disponibilité de l'utilisateur.

1.2.2 Couveuses Automatiques

Les couveuses automatiques, plus modernes, intègrent des systèmes électroniques permettant de surveiller et de réguler automatiquement les paramètres nécessaires.



Figure (1.2) : Couveuse automatique [2]

A. Caractéristiques :

- Capteurs de température et d'humidité intégrés.
- Systèmes motorisés pour la rotation automatique des œufs.

B. Avantages et Inconvénients :

- ✚ Réduction significative de la charge de travail.
- ✚ Précision et efficacité élevées.

Comme des inconvénients, on a :

- ✚ Coût initial plus élevé.
- ✚ Nécessitent une alimentation électrique stable.

1.2.3 Couveuses Solaires

Les couveuses solaires exploitent l'énergie thermique ou photovoltaïque pour chauffer l'espace d'incubation.



Figure (1.3) : Couveuse solaire [3]

A. Caractéristiques :

Intégration de capteurs solaires pour le chauffage passif ou actif.

Souvent équipées de solutions hybrides (résistance électrique en complément).

B. Avantages et inconvénients :

- + Réduction des coûts énergétiques.

- + Respect de l'environnement.

Comme des inconvénients, on a :

- + Dépendance aux conditions climatiques.

- + Efficacité limitée par l'exposition au soleil.

1.3 Technologies Communes aux Couveuses

Les couveuses, qu'elles soient simples ou avancées, partagent des éléments technologiques clés :

A. Sources de Chaleur :

Lampes infrarouges, résistances électriques, ou capteurs solaires photovoltaïques. La source de chaleur maintient une température constante entre 37 et 38°C, essentielle au bon développement embryonnaire.

B. Contrôle de l'Humidité :

Généralement entre 50 et 60% pour l'incubation, avec une augmentation pendant les derniers jours (65-75%). Cela peut être régulé par des bacs d'eau, des humidificateurs ou des capteurs d'humidité automatisés.

C. Systèmes de Ventilation :

Des ventilateurs assurent une répartition homogène de la chaleur et de l'humidité dans la chambre d'incubation.

D. Automatisation et Contrôle :

Utilisation de capteurs pour surveiller les paramètres internes et de microcontrôleurs pour activer ou désactiver les différents éléments (chauffage, humidification, ventilation).

1.4 Couveuse Solaire Passive et Automatisée**1.4.1 Conception et Caractéristiques**

Notre système se distingue par une approche combinant le chauffage passif via un mur de Trombe et un capteur solaire plan, et un système actif reposant sur une résistance électrique alimentée par l'énergie photovoltaïque. Il inclut également une gestion automatisée par une carte Arduino.

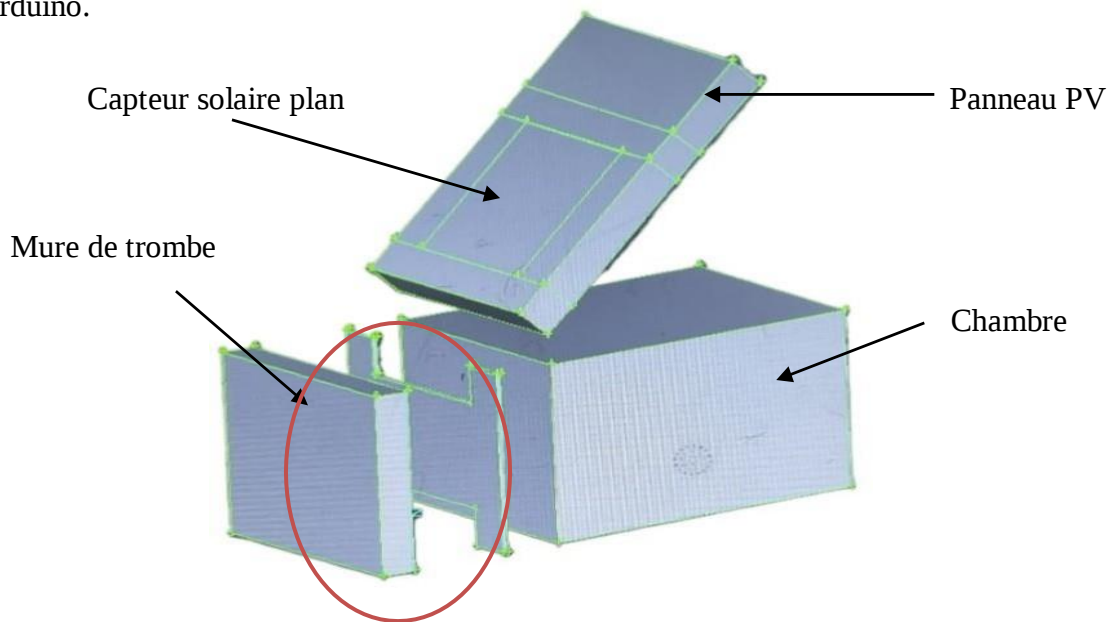


Figure (1.4) : Le système proposé.

La carcasse doit être fabriquée en matériaux isolants thermiques (bois, polystyrène ou métal isolé) pour limiter les pertes de chaleur. On doit installer une fenêtre ou une paroi en verre pour permettre l'entrée de la lumière solaire, utilisée dans le mur de Trombe. Ce dernier est un système de chauffage passif utilisant la chaleur solaire absorbée par une surface noire, stockée, puis diffusée lentement dans la chambre d'incubation.

Ainsi qu'un capteur solaire plan utilisé pour chauffer l'eau circulant dans un circuit fermé, une pompe active la circulation de l'eau chaude vers un échangeur thermique placé dans la chambre d'incubation.

On a aussi utilisé une résistance chauffante, alimentée par un panneau solaire, pour compléter le chauffage en cas d'insuffisance solaire dans la nuit. Deux capteurs DHT11 utilisés pour surveillent la température et l'humidité dans la couveuse et sur le capteur solaire.

Finalement, on a installé une carte Arduino pour gère l'activation de la pompe et de la résistance en fonction des conditions relevées.

1.4.2 Avantages

-  Réduction de la consommation énergétique grâce à l'intégration des énergies renouvelables.
-  Régulation automatique des paramètres d'incubation.
-  Conception économique et adaptée aux zones rurales.

1.4.3 Limites

-  Dépendance au soleil pour le chauffage passif.
-  Nécessité de maintenance pour garantir le bon fonctionnement des capteurs et du circuit hydraulique.

1.5 Conclusion

Ce projet de couveuse solaire passive et automatisée illustre l'intégration des technologies modernes et des techniques traditionnelles pour créer un système éco énergétique, adapté aux défis actuels de l'aviculture. Grâce à son approche innovante, il répond aux besoins des petites exploitations tout en favorisant l'utilisation durable des ressources naturelles.

Références bibliographiques :

[1]https://www.google.com/search?q=incubateur%20artisanal&udm=2&hl=fr&sa=X&ved=0CCgQtI8BKAJqFwoTCIuhq_Km4oDFQAAAAAdAAAAABAV&biw=1366&bih=657&dpr=1#imgsrc=jHH7G8BHGm2sQM&imgdii=IPEL6gJRrOkwoM.

[2]<https://www.ducatillon.com/produit-couveuse-automatique-60-oeufs-de-poule-cimuka-ct60sh--430-29099.html>.

[3]<https://www.ducatillon.com/produit-couveuse-solaire-430-42927.html>.

Chapitre 2

Modélisation et calculs Mathématique

Sommaire

2.1 Introduction.....	11
2.2 Différents modes des transferts de chaleur au niveau du capteur solaire plan :.....	11
2.2.1 Echange par conduction.....	11
2.2.2 Echange par rayonnement	12
2.2.3 Echange par convection	13
2.3 Bilan énergétique d'un capteur solaire plan :.....	15
2.3.1 Puissance utile récupérée par le fluide	15
2.3.2 Calcul du rendement d'un capteur :	17
2.4 Mure de trombe en régime permanent.....	17
2.4.1 Bilan énergétique sur le vitrage	17
2.4.2 Bilan énergétique pour l'air	18
2.4.3 Bilan énergétique sur l'absorbeur	19
2.4.4 Distributions de températures :	20
2.4.5 Efficacité instantanée :	20
2.5 Calculs thermiques pour maintenir la température à 37 °C.....	20
2.5.1 Bilan énergétique de la chambre.....	20
2.5.2 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques et de la résistance électrique	21

2.1 Introduction

Le chapitre suivant regroupe les principales équations permettant l'étude théorique des différents paramètres qui entrent en jeu lors de l'exploitation de l'énergie solaire.

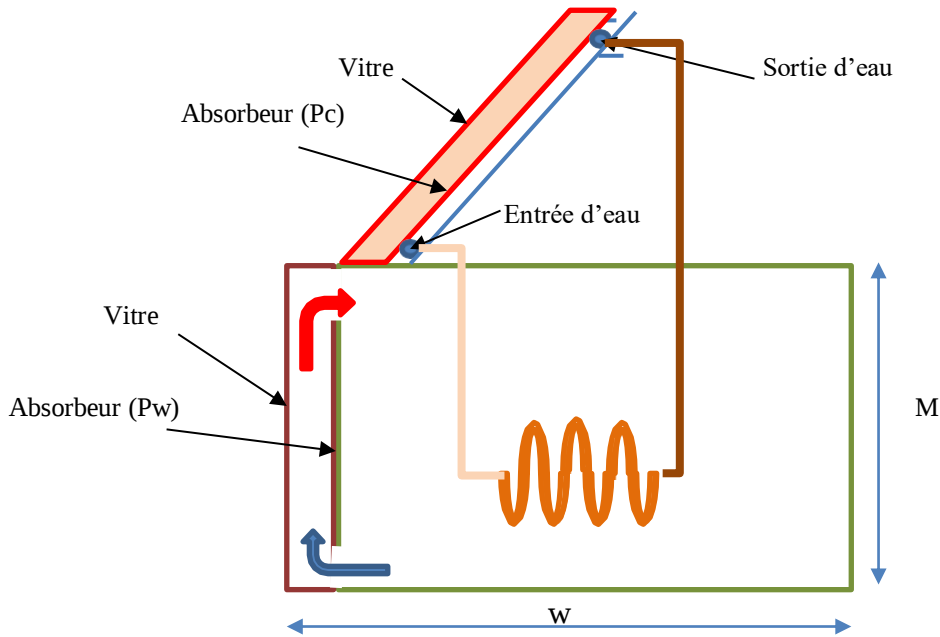


Figure (2.1). Description du système de couveuse.

2.2 Différents modes des transferts de chaleur au niveau du capteur solaire plan :

2.2.1 Echange par conduction

La conduction est le mode de transfert thermique qui intervient au sein des milieux solides et cela est dû, à la non homogénéité de la température, ce qui entraîne la présence d'un gradient de température [1].

Les échanges par conduction existent:

- Les deux faces de la vitre h_{CV} .
- La face supérieure et la face inférieure de l'isolant h_{Ci} .
- La plaque et le tube h_{Cpt} .
- Le tube et l'isolant h_{Cit} .

La densité du flux thermique à travers une surface élémentaire " ds ", est liée au gradient de température (loi de Fourier)[2].

$$\Phi = -\lambda \text{grad}(T) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.1)$$

λ : conductivité thermique du milieu, exprimé par $(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

La puissance qui traverse une surface S est alors donnée par :

$$\Phi = \frac{\lambda S (T_1 - T_2)}{L} = h_c \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.2)$$

$$h_c = \frac{\lambda}{L} \quad (2.3)$$

Si l'épaisseur " L " de la paroi est négligeable par rapport aux autres dimensions on ne tiendra pas compte des effets de bord, et l'échange thermique se fait dans une direction à la surface des parois.

Et dans le cas de plusieurs parois superposées, on peut écrire [3] :

$$h_c = \frac{1}{\sum_i \frac{L_i}{\lambda_i}} \quad (2.4)$$

Où :

h_c : Coefficient de transfert thermique par conduction.

2.2.2 Echange par rayonnement

Ce mode de transfert ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel, on s'intéresse principalement aux échanges radiatifs qui existent [1 ,4] :

-  Entre la vitre de protection et le ciel hr_{v1c} .
-  Entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire hr_{v1v2} .
-  Entre la vitre intermédiaire et la plaque absorbeur hr_{v2p} .
-  Entre l'isolant et le sol h_{ris} .

$$h_{rv1c} = \sigma \cdot \varepsilon_v (T_c + T_v) \cdot (T_c^2 + T_v^2) \quad (2.5)$$

Où :

- σ : constante de Stéphane - Boltzmann.
- ε_v : émissivité de la vitre.
- T_c : la température de ciel (relation de Swindank) [3].

$$T_c = 0.0552(T_{amb})^{1.5} \quad (2.6)$$

T_{amb} : la température ambiante en (K).

Alors :

$$h_{rv1c} = \sigma \cdot \varepsilon_{v1} (T_c + T_{v1}) \cdot (T_c^2 + T_{v1}^2) \quad (2.7)$$

$$h_{ris} = \sigma \cdot \varepsilon_i (T_{ie} + T_{sol}) \cdot (T_{ie}^2 + T_{sol}^2) \quad (T_{sol} \approx T_{amb}) \quad (2.8)$$

Considérons un transfert radiatif entre deux plaques parallèles de température T_1 et T_2 on applique la formule [2]:

$$h_{r12} = \frac{\sigma(T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} + \frac{S_1}{S_2}} \quad (2.9)$$

Où : F_{12} : facteur de forme géométrique entre les surfaces 1 et 2.

Alors

$$h_{rv1v2} = \frac{\sigma(T_{v1} + T_{v2}) \cdot (T_{v1}^2 + T_{v2}^2)}{\frac{2}{\varepsilon_{v2}} - 1} \quad (2.10)$$

$$h_{rvp2} = \frac{\sigma(T_{pc} + T_{v2}) \cdot (T_{pc}^2 + T_{v2}^2)}{\frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_{v2}}{\varepsilon_{v2}}} \quad (2.11)$$

ε_p : Émissivité de la plaque

2.2.3 Echange par convection

Les échanges par convection qui interviennent sont [2,4] :

- Entre la vitre de protection et l'ambiance h_{Vv1a} .
- Entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire h_{Vv1v2} .
- Entre la vitre intermédiaire et la plaque h_{Vpv2} .
- Entre le tube et le fluide h_{Vtf} .
- Entre le fluide et l'isolant h_{Vfi} .
- Entre l'isolant et l'ambiance h_{Via} .

Le calcul du coefficient de transfert par convection, par l'intermédiaire du groupement de Nusselt se fait ainsi :

$$Nu = h_v \left(\frac{L}{\lambda} \right) \quad (2.12)$$

L : la longueur caractéristique.

λ : la conductivité thermique.

Pour déterminer le coefficient d'échanges entre la vitre et l'ambiance, nous pouvons utiliser la corrélation de Hottel et Woertz [5]:

$$h_{Wind} = 2.8 + 3.V_w \quad (W/m^2.K) \quad (2.13)$$

h_{Wind} : coefficient de transfert thermique.

V_w : la vitesse du vent en (m/s).

L'échange de chaleur entre la vitre et l'absorbeur s'effectue naturellement, par la détermination, en première étape, du nombre de Nusselt pour une inclinaison " β " du capteur par rapport à l'horizontale

$$Nu = \frac{90-\beta}{90} * Nu_0 + \frac{\beta}{90} * Nu_{90} \quad (2.14)$$

Nu_β : Nombre de Nusselt pour une inclinaison β du capteur.

Nu_0 : Nombre de Nusselt pour une inclinaison nulle.

Nu_{90} : Nombre de Nusselt pour une inclinaison β égale à 90°

D'après la corrélation de Grondin et Roux nous avons [4]:

$$Nu = A * R_a^\gamma * F^{-C} \quad (2.15)$$

F : facteur de forme de la cavité, ($F = X / Z$).

X : longueur de la cavité formée par les deux plans, comptée dans le sens de la pente.

Z : épaisseur de la cavité.

Ra : Nombre de Rayleigh [6,7].

$$R_a = G_r . P_r \quad (2.16)$$

$$G_a = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} \quad (2.17)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \quad (2.18)$$

Où :

L : longueur caractéristique en mètre (distance entre les deux plans).

λ : la conductivité thermique en (W/m.K).

μ : coefficient de viscosité dynamique en (w/m.s).

C_p : capacité calorifique massique à la pression constante en (J/kg K).

ν : coefficient de viscosité cinématique en (m^2/s).

g : accélération de la pesanteur en (m/s^2).

B : coefficient de dilatation thermique.

$$B = -\frac{1}{\rho} * \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{P=cte} \quad (2.19)$$

Les propriétés de l'air doivent être évaluées à la température moyenne entre (T_{v1} , T_{v2}) si on utilise deux vitres dans le cas général, (T_{v2} , T_{pc}).

Pour le coefficient d'échange par convection, entre deux surfaces parallèles (plaque et vitre), plusieurs formes sont proposées, parmi ces relations on cite [4]:

$$h_v = 1.44 \cdot \frac{(T_{pc} - T_v)^{0.31}}{e_{vp}^{0.07}} \left(1 - 0.0018 \cdot \left(\frac{T_{pc} - T_v}{2} - 10 \right) \right) \quad (2.20)$$

e_{vp} : espace entre la vitre et la plaque.

L'échange de chaleur entre le tube et l'eau se fait par convection forcée, Pour les conduites circulaires, on peut utiliser des corrélations, en tenant compte des nombres adimensionnels suivants [2,6] :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.21)$$

$$Gz = Re * Pr * \frac{D}{L} \quad (2.22)$$

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} \quad (2.23)$$

Re : Nombre de Reynolds.

Gz : Nombre de Graetz.

St : Nombre de Stanton.

ρ : masse volumique (kg/m^3)

V : vitesse moyenne du fluide (m/s).

D : le diamètre du conduit (m).

μ : la viscosité dynamique ($kg/m.s$).

ν : la viscosité cinématique (m^2/s).

L : la longueur du conduit (m).

2.3 Bilan énergétique d'un capteur solaire plan :

On donne les bilans énergétiques pour le cas général d'un capteur solaire plan à double vitrage représenté dans la **figure (2.1)**, par unité de surface du capteur comme suit :

$$Pp_0 = Qu_0 + Qp_0 \quad (2.24)$$

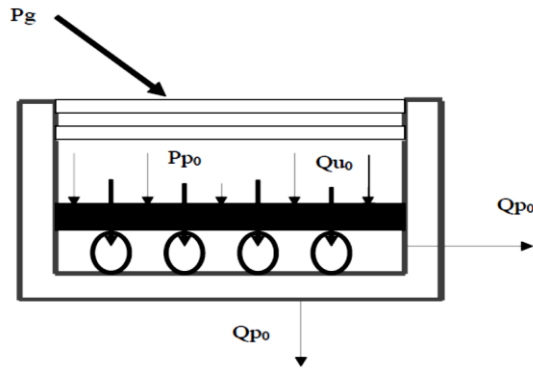


Figure (2.2). Bilan énergétique pour un capteur à double vitrage

Avec :

Pp_0 : la récupération effective de l'énergie incidente par l'absorbeur.

Qu_0 : l'échange de chaleur entre l'absorbeur et le fluide à réchauffer.

Qp_0 : l'échange de chaleur entre l'absorbeur et le milieu extérieur.

La fraction Pp_0 du flux incident P_g est donnée par :

$$P_{P0} = (\tau^2 \alpha_{abs}) \cdot P_g \quad (2.25)$$

$(\tau\alpha)$: Le coefficient de transmission – absorption.

P_g : Le flux global au niveau du sol, sur un plan incliné.

2.3.1 Puissance utile récupérée par le fluide

La puissance utile Q_{U0} est égale à la puissance absorbée P_{P0} diminuée des pertes Q_{P0} .

On peut considérer d'une façon générale que ces pertes sont proportionnelles à l'écart de température $(T_{Pc} - T_a)$ [5, 1].

Nous pouvons donc écrire (puissance utile en fonction de T_p) :

$$Q_{U0} = P_{p0} - Q_{P0} = S \left((\tau^2 \alpha_{abs}) P_g - U_{g0} (T_{Pc} - T_a) \right) \quad (2.26)$$

Avec :

U_{g0} : Coefficient global des pertes.

T_{Pc} : La température de l'absorbeur, elle est difficile à estimer en réalité car il y a des gradients de température sur l'absorbeur.

➤ La puissance utile en fonction de T_f et l'efficacité du transfert :

$$Q_{U0} = P_{p0} - Q_{p0} = S \cdot \eta_c \left((\tau^2 \alpha_{abs}) \cdot P_g - U_{g0} (T_{pc} - T_a) \right) \quad (w) \quad (2.27)$$

Où :

η_c : Paramètre constructifs, du capteur (efficacité du transfert).

T_f : la température du fluide caloporteur ($^{\circ}\text{C}$).

Si le transfert était idéal entre l'absorbeur et le fluide à réchauffer ; on aurait $T_{fe} = T_p$ et on écrit alors :

La puissance utile en fonction de l'efficacité globale [8] :

$$Q_{U0} = P_{p0} - Q_{p0} = S \cdot \eta_{r0} \left((\tau^2 \alpha_{abs}) \cdot P_g - U_{g0} (T_{pc} - T_a) \right) \quad (w) \quad (2.28)$$

Avec :

η_{r0} : l'efficacité globale de l'échange thermique du capteur est définie comme suit :

$$\eta_{r0} = \frac{\text{Puissance utile réelle}}{\text{Puissance utile idéale}} = \frac{\dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fe})}{(\tau^2 \alpha) \cdot P_g - U_{g0} (T_{fe} - T_a)} \quad (2.29)$$

T_{fe} : température d'entrée du fluide ($^{\circ}\text{C}$).

D'où :

$$\eta_{r0} = \frac{q C_p}{U_{g0} \cdot S} \left[1 - \exp \left(\frac{-\eta_c \cdot U_{g0} \cdot S}{q \cdot C_p} \right) \right] \quad (2.30)$$

$\dot{m}$: débit massique total du fluide (kg/s).

C_p : chaleur massique du fluide en ($\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$).

L'efficacité " η_c " du transfert, peut s'écrire comme suit :

$$\eta_c = \frac{\frac{1}{U_{g0}}}{w \cdot \left[\frac{1}{U_{g0} \cdot (d_e + (w - d_e) \cdot f)} + \frac{e_s \cdot d_e}{b \cdot \lambda_s} + \frac{1}{d_i \pi \cdot h_{vtf}} \right]} \quad (2.31)$$

e_s : étant l'épaisseur de la soudure, exprimée en (m).

b : largeur de la soudure, en (m).

λ_s : Conductivité thermique de la soudure, ($\text{W/m} \cdot \text{K}$).

Nous définissons le rendement de l'ailette " f " par la relation suivante :

$$f = \frac{\tanh \left(m \cdot \left(\frac{w - d_e}{2} \right) \right)}{m \cdot \left(\frac{w - d_e}{2} \right)} \quad (2.32)$$

$$m = \left(\frac{U_{g0}}{\lambda_p \cdot e_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

λ_p : étant la conductivité thermique du plan ($\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$).

e_p : l'épaisseur de l'absorbeur (m).

w : la distance entre les tubes (m).

d_e : le diamètre extérieur du tube (m).

2.3.2 Calcul du rendement d'un capteur :

Le rendement global du capteur est défini comme étant le quotient de la puissance utile sur la puissance incidente [5] :

$$\eta = \frac{Q_{U0}}{P_g \cdot S} \quad (2.34)$$

Nous déduisons les expressions du **rendement global** du capteur à double vitrage comme suit [9] :

$$\eta = \eta_{r0} \cdot \left[(\tau^2 \alpha_{abs}) - U_{g0} \cdot \frac{(T_{fe} - T_a)}{P_g} \right] \quad (2.35)$$

Comme nous pouvons aussi définir un autre **rendement** dit **optique** dont il représente le rapport entre la puissance reçue par la plaque et la puissance incidente [1].

$$\eta_0 = \frac{P_{P0}}{P_g} \quad (2.36)$$

Si bien que :

$$\eta = \eta_{r0} \left[\eta_0 - U_{g0} \cdot \frac{(T_{fe} - T_a)}{P_g} \right] \quad (2.37)$$

2.4 Mure de trombe en régime permanent

Le modèle mathématique établi pour le mur de trombe est basé sur des bilans thermiques au niveau du vitrage, sur la paroi absorbeur interne et le long de l'écoulement d'air.

2.4.1 Bilan énergétique sur le vitrage

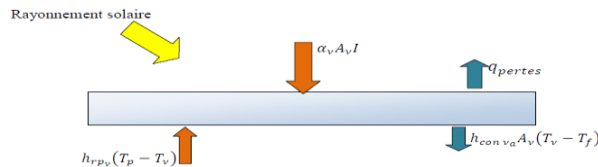


Figure (2.3). Bilan énergétique au niveau de vitrage.

Le bilan thermique au niveau du vitrage de mure de trombe permet d'écrire :

$$S_1 A_v + U_t A_v (T_{amb} - T_v) = h_g A_v (T_v - T_{fw}) + h_{rpw,v} A_{pw} (T_v - T_{pw}) \quad (2.38)$$

Où : U_t est le coefficient d'échange global entre le vitrage et l'ambiance, donné par :

$$U_t = h_{wind} + h_{rvc} \quad (2.39)$$

- Le coefficient de transfert convectif, h_{wind} , s'exprime dans l'équation (2.13).
- Le coefficient de transfert radiatif, h_{rvc} , entre la surface du vitrage et le ciel s'exprime dans l'équation (2.5).

Le rayonnement solaire absorbé par le vitrage est donné par :

$$S_1 = \alpha_v P_g$$

Le coefficient de transfert thermique radiatif, $h_{rpw,v}$, entre l'absorbeur et le vitrage s'exprime par l'équation (2.11).

Le coefficient de transfert thermique convectif, h_g , entre le vitrage et l'air du canal est donné par [10]:

$$h_g = \frac{Nu K_f}{L_g} \quad (2.40)$$

Avec : $Nu = 0.60 (Gr_x \cdot \cos \theta \cdot Pr)^{0.2}$ et $Gr = g \cdot \beta_f \cdot \Delta T \cdot L_v^3 / \nu_f^2$

La conductivité thermique de l'air est donnée par :

$$K_f = 0.00263 + 0.000074 \cdot (T_{fw} - 300) \quad (2.41)$$

2.4.2 Bilan énergétique pour l'air



Figure (2.4). Bilan énergétique au niveau de l'air qui traverse la cheminée

Le bilan énergétique sur le canal d'air donne :

$$q'' = h_w A_w (T_{pw} - T_{fw}) + h_g A_v (T_v - T_{fw}) \quad (2.42)$$

Pour la longueur, L , du mur- absorbeur, le gain utile de la chaleur peut être calculé par:

$$q'' = \dot{m} C_{p,a} (T_{fw,O} - T_{fw,i}) \quad (2.43)$$

Où : $\dot{m}$ et $C_{p,a}$, désignent respectivement le débit massique et la chaleur spécifique de l'air.

La température moyenne de l'air s'écoulant dans le canal est :

$$T_{fw} = \gamma \cdot T_{fw,O} + (1 - \gamma) T_{fw,i} \quad (2.44)$$

Le coefficient, γ , est déterminé expérimentalement [10,11] ; il est égal à **0.74**. De plus, la température $T_{fw,i}$ a été prise égale à la température du chambre T_{rom} . D'où :

$$q'' = \frac{\dot{m} \cdot C_{p,a} (T_{fw} - T_{rom})}{\gamma} \quad (2.45)$$

En remplaçant la relation (2.45) dans (2.42), on trouve :

$$h_g A_v T_v - \left(h_g A_v + h_w A_{pw} + \frac{\dot{m} C_{p,a}}{\gamma} \right) T_{fw} + h_w A_{pw} T_{pw} = - \left(\frac{\dot{m} \cdot C_{p,a}}{\gamma} \right) T_{rom} \quad (2.46)$$

Le débit massique d'air dans le canal du mur de trombe [12] est donné par la relation :

$$\dot{m} = C_d \frac{\rho_{f,0} A_0}{\sqrt{(1 + \frac{A_0^2}{A_i^2})}} \sqrt{\frac{2gL (T_{fw} - T_{rom})}{T_{rom}}} \quad (2.47)$$

La valeur du coefficient C_d est prise égale à 0.57 [12,10].

Le coefficient de transfert convectif entre le mur absorbeur et le canal d'air est :

$$h_w = \frac{Nu.K_f}{L_w} \quad (2.48)$$

La viscosité dynamique du fluide est exprimée par :

$$\mu_f = [1.846 + 0.00472 (T_f - 300)].10^{-5} \quad (2.49)$$

La masse volumique du fluide est :

$$\rho_f = 1.1614 - 0.00353 (T_f - 300) \quad (2.50)$$

La chaleur spécifique du fluide est donnée par :

$$C_{p,a} = [1.007 + 0.00004 (T_f - 300)] * 10^3 \quad (2.51)$$

2.4.3 Bilan énergétique sur l'absorbeur

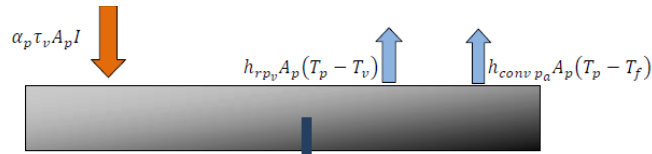


Figure (2.5). Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur.

Le bilan énergétique sur l'absorbeur permet d'écrire :

$$-h_{rwg}.A_w.T_v - h_w.A_w.T_{fw} + (h_w.A_w + h_{rpw,g} A_w + U_b.A_w).T_{pw} = S_2.A_w + U_b.A_w.T_{rom} \quad (2.52)$$

Le coefficient d'échange global du panneau isolant, situé sur la partie arrière du mur absorbeur s'exprime par :

$$U_b = \frac{K_{ins}}{\Delta w_{ins}} \quad (2.53)$$

Le flux radiatif absorbé par le mur absorbeur est :

$$S_2 = (\tau \alpha_{abs}) P_g \quad (2.54)$$

2.4.4 Distributions de températures :

Les distributions de températures T_v , T_{pw} et T_{fw} , respectivement sur le vitrage, l'absorbeur et le long du canal d'air sont déterminées moyennant la résolution du système

d'équations relatif aux bilans thermiques autour de ces différents organes qui composent le mur de trombe.

$$S_1 A_g + U_t A_g T_a = (h_g A_g + h_{rwg} A_w + U_t A_g) T_v - h_g A_g T_{fw} - h_{rwg} A_w T_{pw}$$

$$h_g A_g T_v - \left(h_g A_g + h_w A_w + \frac{\dot{m} C_{p,a}}{\gamma} \right) T_{fw} + h_w A_w T_{pw} = - \left(\frac{\dot{m} C_{p,a}}{\gamma} \right) T_{rom} \quad (2.55)$$

$$h_{rwg} A_w T_v - h_w A_w T_{fw} + (h_w A_w + h_{rwg} A_w + U_b A_w) T_{pw} = S_2 A_w + U_b A_w T_{rom}$$

2.4.5 Efficacité instantanée :

L'efficacité instantanée du gain énergétique est donnée par:

$$\eta_i = \frac{\dot{m} C_{p,a} (T_{f,0} - T_{f,i})}{W.M.Pg} \times 100\% \quad (2.56)$$

2.5 Calculs thermiques pour maintenir la température à 37°C

2.5.1 Bilan énergétique de la chambre

Le but est de maintenir la température à 37°C dans la chambre de couvaison. Pour cela, vous devez compenser les pertes thermiques par les parois (par conduction) et potentiellement par les ouvertures (par convection).

L'équation de base du transfert par conduction est donnée par l'équation (2.2) :

$$Q = \frac{\lambda.S.(T_{rom} - T_{ext})}{e} \quad (2.57)$$

Où :

- ✚ T_{rom} : est la température intérieure de la chambre (37°C),
- ✚ T_{ext} : est la température extérieure moyenne (variable, par exemple 20°C ou moins la nuit),
- ✚ e : est l'épaisseur des parois (en m).

Vous devez calculer la valeur de Q pour déterminer combien de chaleur il faut ajouter pour maintenir la température constante.

Prenons un exemple :

- Température intérieure : $T_{rom}=37^\circ\text{C}$,
- Température extérieure : $T_{ext}=20^\circ\text{C}$,
- Surface une paroi de la couveuse $A=1\text{m}^2$,
- Conductivité thermique du matériau $\lambda=0.04\text{W/m}\cdot\text{k}$ (pour la laine de verre),
- Épaisseur de l'isolation $e=0.05\text{m}$.

Appliquons ces valeurs à l'équation :

$$Q = \frac{0.04.1.(37 - 20)}{0.05} = 13.6 \text{ W}$$

Donc, pour cette configuration, environ **13.6 Watts** de puissance thermique sont nécessaires pour compenser les pertes thermiques à travers chaque paroi. On peut ajuster ces valeurs en fonction de la taille exacte de la couveuse, de la température extérieure typique.

2.5.2 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques et de la résistance électrique

A. Dimensionnement de la résistance électrique

On va dimensionner la résistance pour qu'elle fournisse suffisamment de puissance pour maintenir la température à 37°C quand le capteur solaire ne fonctionne pas (la nuit ou par temps nuageux).

La résistance doit fournir au moins la puissance calculée dans la section précédente (**13.6 W** dans notre exemple). Il est toutefois prudent de surdimensionner légèrement la résistance pour compenser d'éventuelles pertes supplémentaires ou variations imprévues.

La formule pour calculer la puissance de la résistance est :

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2.58)$$

Où :

-  P : est la puissance (en watts),
-  V : est la tension de notre système (12V),
-  R : est la résistance (en ohms).

On va prendre une puissance de 15W (pour plus de sécurité) et que nous travaillons avec un système de 12V, la résistance nécessaire serait :

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{12^2}{15} = \frac{144}{15} \approx 9.6 \Omega$$

Donc, on a besoin d'une résistance de 9.6 Ω , capable de dissiper environ 15 watts de puissance.

B. Dimensionnement des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques doivent produire suffisamment d'énergie pour alimenter la résistance et éventuellement charger une batterie pour assurer l'alimentation pendant la nuit.

✚ **Consommation énergétique** : Si la résistance fonctionne en continu pendant 8 heures la nuit, on a besoin de :

$$E = P . t = 15W . 8h = 120 Wh \quad (2.59)$$

✚ **Dimensionnement des panneaux solaires** : Si vous avez environ 5 heures d'ensoleillement effectif par jour, vous aurez besoin de panneaux capables de générer cette énergie en une journée.

La puissance du panneau doit être :

$$P_{panneau} = \frac{E}{h_{ensoleillement}} = \frac{120 Wh}{5h} = 24 W \quad (2.60)$$

Donc, un panneau solaire de **25W** devrait être suffisant pour fournir l'énergie nécessaire à la résistance. Cependant, on va probablement installer un panneau peu plus pour alimenter d'autres composants (comme la pompe) ou si l'ensoleillement est irrégulier.

C. Gestion de l'énergie avec une batterie (Capacité de la batterie)

On va choisir une batterie qui peut stocker l'énergie nécessaire pour la nuit. Pour stocker 120 Wh d'énergie, on va utiliser une batterie de 12V avec une capacité de :

$$C_{Batterie} = \frac{120 Wh}{12V} = 10 Ah \quad (2.61)$$

Une batterie de 12V et 10Ah devrait donc suffire pour alimenter la résistance électrique pendant 8 heures la nuit.

Références bibliographiques :

- [1] A.Kajavali,B.Sivarman,Investigation of heat transfer enhancement in a parabolic through collector with a modified absorber.International Energy journal. 14(2014)177-188.
- [2]N.Ihaddane,R.Ihaddane ,A .Mahdi,Effect of distance between double glazing on the performance of a solar thermal collector . In International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ14), Cordoba,Spain(2014) .
- [3]L.Diabatè,Détermination du rayonnement solaire à l'aide d'images satellitaires ,docteur en énergétique , paris,école nationale supérieure des mines de paris ,2014 .
- [4]L.Visa,A.Duta.Design and experimental optimization of a novel plate solar thermal collector with trapezoidal shape for facade integration .Applied Thermal Engineering90(2015)432-443.
- [5]J.A.Duffie,w.A.Beckman,Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition. John Wiley & Sons , New York (1980) 238-321.
- [6] J.N Chassériau , Conversion thermique de rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [7] Michel Dajuenet : les sècheurs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ; 1985.
- [8] A. Rabel, Active solar collectors and their applications. Oxford university press ; (1985) 817.
- [9] T. Beikircher , M. Mockl , advanced solar flat plate collectors with full area absorber, front side film and rear side vacuum super insulation . Solar Energy Materials and Solar Cells 141(2015)398-406.
- [10]MATHUR, Jyotirmay, BANSAL, N. K., MATHUR, Sanjay, et al. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. Solar Energy, 2006, vol. 80, no 8, p. 927-935.
- [11]ONG, K. S. et CHOW, C. C. Performance of a solar chimney. Solar energy, 2003, vol. 74, no 1, p. 1-17.
- [12]BANSAL, N. K., MATHUR, Rajesh, BHANDARI, M. S. Solar chimney for enhanced stack ventilation. Building and environment, 1993, vol. 28, no 3, p. 373-377

Chapitre3

Techniques Expérimentales

Table des matières

3.1	Introduction	25
3.3	Etapes de Réalisation	26
3.3.1	Carcasse de la couveuse	26
3.3.2	Capteur solaire plan.....	27
3.3.3	Mur de Trombe	27
3.3.4	Panneau photovoltaïque	28
3.3.5	Carte Arduino Nano	29
3.3.6	Pompe à eau.....	29
3.3.7	Batterie rechargeable et leur module de charge (TP4056)	30
3.3.8	Résistance électrique chauffante.....	30
3.3.9	Capteurs de température et d'humidité (DHT11)	31
3.3.10	Afficheur LCD.....	31
3.4	Étude et Conception du Système	32
3.4.1	Fabrication de la Carcasse	32
3.4.2	Installation du Capteur Solaire Plan et du Mur de Trombe	32
3.4.3	Montage des Composants Électroniques	33
3.4.4	Programmation de l'Arduino	33
3.4.5	Tests et Ajustements	33

3.1 Introduction

L'assemblage d'une couveuse à œufs passive, intégrant des technologies de chauffage solaire, nécessite l'application des techniques pour assurer un fonctionnement optimal et une régulation efficace de la température. Ce système repose sur l'utilisation d'énergies renouvelables et de techniques de chauffage passif, couplées à un contrôle automatisé pour maintenir un environnement favorable à l'incubation des œufs.

Les principales techniques de réalisation incluent la conception d'une carcasse isolante, l'intégration d'un mur de Trombe pour capter et stocker la chaleur solaire, et la mise en place d'un capteur solaire plan qui chauffe l'eau circulant vers la chambre d'incubation. La circulation de l'eau est assurée par une pompe, permettant le transfert de chaleur lorsque la température du capteur solaire est suffisante. Pour les périodes où l'apport solaire est insuffisant, une résistance électrique alimentée par un panneau photovoltaïque prend le relais pour maintenir une température stable.

Ces techniques permettent de maximiser l'efficacité énergétique du système en utilisant au mieux l'énergie solaire tout en assurant un contrôle précis des conditions d'incubation, ce qui fait de cette couveuse un modèle d'innovation en matière de durabilité et d'automatisation.

3.2 Fonctionnement global du système

En journée, le capteur solaire chauffe l'eau, et la pompe assure la circulation de cette eau chaude pour maintenir la température de la couveuse à 37°C. La température de l'eau est contrôlée par un capteur, et si elle est insuffisante, la résistance électrique s'active pour chauffer la couveuse. Grâce aux deux capteurs DHT11, la température et l'humidité sont mesurées en continu, et le contrôle est automatisé via Arduino pour garantir des conditions optimales pour l'incubation.

Ce système de couveuse intelligent et durable utilise au mieux les énergies renouvelables, minimisant ainsi l'usage de l'électricité pour une incubation fiable et économique.



Figure 3.1 : Vue global du système.

3.3 Etapes de Réalisation

3.3.1 Carcasse de la couveuse

La carcasse de la couveuse constitue le cadre et l'enveloppe externe de l'appareil. Elle est fabriquée en acier et l'isolation est assurée par la laine de verre pour minimiser les pertes de chaleur et maintenir une température stable à l'intérieur. La carcasse joue un rôle crucial pour :

- **Isoler thermiquement** : Empêcher les pertes de chaleur vers l'extérieur, ce qui est particulièrement important pour conserver une température stable durant la nuit ou par temps nuageux.
- **Protéger** : Fournir un environnement sécurisé et fermé pour les œufs, les protégeant des variations extérieures de température et d'humidité



Figure 3.2 : Enveloppe intérieure du couveuse passive.

3.3.2 Capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est un dispositif qui utilise l'énergie solaire pour chauffer l'eau circulant à l'intérieur. Ce système capte la chaleur solaire durant la journée et la transfère à l'air de la couveuse via un échangeur thermique. Ce chauffage passif permet de réduire la consommation d'énergie en profitant d'une source renouvelable. Dans ce système, un capteur de température (**DHT11**) est monté sur le capteur solaire pour vérifier si la chaleur solaire est suffisante.



Figure 3.3 : Capteur solaire Plan et éléments constrictive.

3.3.3 Mur de Trombe

Le mur de Trombe est un élément passif de chauffage solaire, souvent intégré dans des systèmes nécessitant un apport thermique naturel. Dans ce projet, il joue un rôle clé en journée pour capturer et stocker la chaleur solaire et la redistribuer lentement dans la couveuse. Voici ses caractéristiques et son fonctionnement :

- **Constitution** : Le mur de Trombe est une paroi massive, généralement faite de béton, de pierre ou d'un autre matériau avec une grande capacité thermique. Il est installé derrière un vitrage, souvent orienté pour maximiser l'exposition au soleil.
- **Absorption et stockage de la chaleur** : Le mur de Trombe absorbe la chaleur solaire directe à travers le vitrage. Cette chaleur est stockée dans le matériau du mur lui-même.
- **Redistribution de la chaleur** : Une fois chauffé, le mur libère progressivement la chaleur dans la couveuse par convection et radiation. Cela assure un apport de chaleur constant, même après le coucher du soleil, en prolongeant l'effet thermique naturel.
- **Circulation de l'air** : Le mur de Trombe crée une circulation naturelle de l'air. En chauffant, l'air se dilate et monte, ce qui génère un mouvement dans la chambre de la couveuse, assurant une distribution uniforme de la chaleur

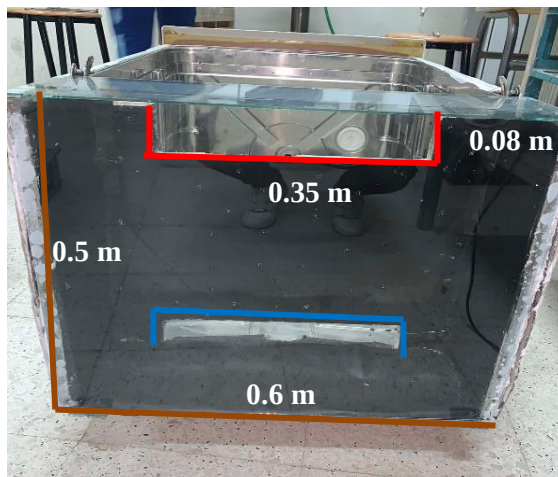


Figure 3.4 : Mur de Trombe et leur dimension.

Grâce à ce système, le mur de Trombe permet d'augmenter la température de la couveuse pendant la journée et de limiter l'utilisation de la résistance électrique, en exploitant un apport de chaleur passif et naturel.

3.3.4 Panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque fournit l'énergie nécessaire pour alimenter la résistance électrique. Cela permet d'assurer le chauffage de la couveuse même en l'absence de soleil direct pour le capteur solaire, en exploitant une énergie renouvelable. Le panneau photovoltaïque optimise l'autonomie du système et réduit les coûts énergétiques en exploitant l'énergie solaire pour l'alimentation nocturne.



Figure 3.5 : Panneau photovoltaïque.

3.3.5 Carte Arduino Nano

La carte Arduino Nano est le « cerveau » du système. Elle recueille les données des capteurs, contrôle l'activation de la pompe et de la résistance en fonction des besoins de chauffage, et envoie les informations à l'afficheur LCD. Elle assure le bon fonctionnement de chaque composant selon une logique programmée, garantissant ainsi une régulation automatique et efficace de la température et de l'humidité dans la couveuse.

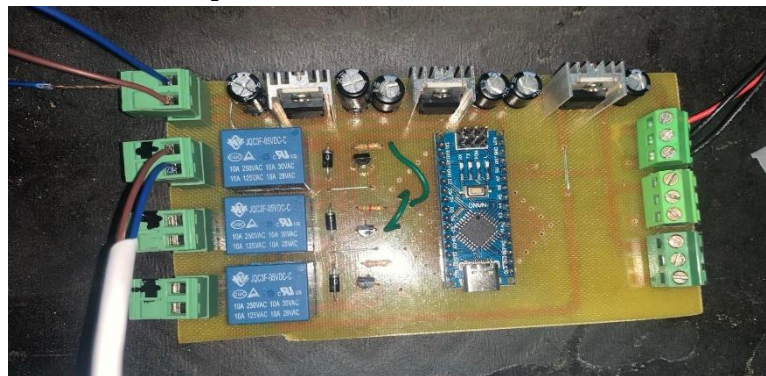


Figure 3.6: Carte Arduino utilisée dans le système.

3.3.6 Pompe à eau

La pompe est utilisée pour assurer la circulation de l'eau entre le capteur solaire plan et la couveuse. Lorsque la température mesurée par le capteur solaire dépasse un certain seuil (par exemple, 45°C), la pompe se met en marche pour acheminer la chaleur jusqu'à la couveuse. Si la température du capteur solaire est insuffisante, la pompe est désactivée pour éviter un gaspillage d'énergie.



Figure 3.7:Pompe à eau.

3.3.7 Batterie rechargeable et leur module de charge (TP4056)

La batterie est pour stocker l'énergie fournie par les panneaux solaires et alimenter l'Arduino et les actionneurs. Cette batterie stockera l'énergie générée par le panneau photovoltaïque.



Figure 3.8:Batterie rechargeable et leur module de charge.

3.3.8 Résistance électrique chauffante

La résistance électrique est utilisée pour maintenir la température à 37°C dans la couveuse, particulièrement pendant la nuit ou lorsque le capteur solaire ne peut pas fournir assez de chaleur. Alimentée par un panneau photovoltaïque, la résistance prend automatiquement le relais en fonction des besoins de chauffage détectés par le capteur de température principal. Cette configuration permet de garantir une température constante et stable pour les œufs, essentielle pour le bon développement embryonnaire.



Figure 3.9 : Résistance de chauffage électrique

3.3.9 Capteurs de température et d'humidité (DHT11)

Deux capteurs DHT11 sont utilisés dans ce système :

- **Capteur dans la couveuse :** mesure la température et l'humidité à l'intérieur de la couveuse, fournissant des informations critiques pour le contrôle de la température cible (37°C).
- **Capteur sur le capteur solaire :** mesure la température de l'eau dans le tube du capteur solaire plan. Ce capteur permet de déterminer si la pompe doit être activée pour transférer la chaleur dans la couveuse ou si la résistance doit être utilisée pour compenser un manque de chaleur solaire.



Figure 3.10 : Capteurs de température et d'humidité (DHT11).

3.3.10 Afficheur LCD

Un afficheur LCD 16x2 est utilisé pour montrer en temps réel les informations mesurées dans le système :

- **Température et humidité** dans la couveuse.
- **Température du capteur solaire** pour évaluer l'efficacité du chauffage solaire. L'affichage en temps réel permet de suivre facilement les conditions internes de la couveuse et le statut de la production de chaleur solaire.



Figure 3.11 : Afficheur LCD.

3.4 Étude et Conception du Système

- **Analyse des besoins thermiques** : la température ciblée (37°C) et les conditions de température et d'humidité idéales pour la couveuse.
- **Choix des composants** : On a sélectionné le capteur solaire, le type de mur de Trombe, la pompe, la résistance électrique, les capteurs de température (DHT11), l'afficheur LCD, la carte Arduino Nano, et le panneau photovoltaïque.
- **Schéma du système** : On a Dessiné un schéma électrique et hydraulique pour visualiser les connexions entre les capteurs, la pompe, la résistance et l'Arduino.

3.4.1 Fabrication de la Carcasse

- **Sélection des matériaux** : On a utilisé des matériaux isolants pour la carcasse afin de limiter les pertes de chaleur (Acier, matériaux isolants, etc.).
- **Assemblage** : On a construit la structure en intégrant des ouvertures pour le mur de Trombe et le capteur solaire.

3.4.2 Installation du Capteur Solaire Plan et du Mur de Trombe

- **Fixation du capteur solaire** : On a installé le capteur solaire sur la partie supérieure de la couveuse, en assurant une orientation optimale vers le soleil.
- **Installation du mur de Trombe** : On a installé un mur de Trombe derrière un vitrage, en face de la couveuse, pour capter et redistribuer la chaleur passivement.

- **Montage du système de circulation d'eau** : On a installé les tubes de circulation d'eau entre le capteur solaire et la couveuse, et on a fixé la pompe pour assurer le flux d'eau.

3.4.3 Montage des Composants Électroniques

- **Placement des capteurs de température** : On a fixé un capteur DHT11 dans la couveuse et un autre sur le tube du capteur solaire pour mesurer la température de l'eau.
- **Installation de la résistance électrique** : On a fixé la résistance dans la couveuse, connectée au circuit contrôlé par l'Arduino.
- **Installation de l'afficheur LCD** : On a placé l'afficheur de manière visible pour surveiller la température et l'humidité.
- **Connexion des composants à l'Arduino Nano** : On a relié les capteurs, la pompe, la résistance et l'afficheur à l'Arduino selon le schéma électrique.

3.4.4 Programmation de l'Arduino

- **Écriture du code Arduino** : On a programmé l'Arduino pour :
 - ✚ Lire les températures des capteurs DHT11.
 - ✚ Contrôler la pompe en fonction de la température du capteur solaire.
 - ✚ Activer ou désactiver la résistance pour maintenir la température cible.
 - ✚ Afficher les informations sur l'écran LCD.
- **Tests et ajustements** : On a testé le programme pour vérifier son fonctionnement, aussi pour faire des ajustements en cas de dysfonctionnement.

3.4.5 Tests et Ajustements

- **Vérification des températures** : La température est observée dans la couveuse à différentes heures pour s'assurer que le capteur solaire et le mur de Trombe fournissent suffisamment de chaleur.
- **Test de la pompe et de la résistance** : Pour vérifier que la pompe et la résistance fonctionnent aux bons moments selon les données des capteurs.
- **Optimisation du système** : Pour ajuster la position des capteurs, modifier les réglages du programme (seuils de température, fréquence de lecture, etc.) pour optimiser les performances.

Chapitre 4

Résultats et discussion

Sommaire

4.1	Introduction.....	35
4.2	Résultats pour différentes intensités de flux	35
4.3	Résultats pour Intensité de flux constant	38
4.3.1	Système sans capteur solaire plan (cas 03) :.....	38
4.3.2	Système sans Mure de trombe (cas 04)	39
4.4	Résultats pour Intensité de flux réel	40
4.4.1	Système sans résistance électrique (Cas 05).....	40
4.4.2	Système global avec résistance électrique (Cas 06).....	43
4.5	Conclusion	44

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous analysons les performances du système global, sous des conditions d'intensité de flux solaire constantes et variables. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de système proposé pour assurer une régulation thermique en complément des solutions solaires passives, garantissant ainsi un environnement optimal pour la couveuse, même en cas de faible ensoleillement.

Différents cas de fonctionnement de système proposé.						
	Cas01	Cas02	Cas03	Cas04	Cas05	Cas06
Intensité de flux (w/m ²)	650	800	650	650	Variable	Variable
Système global (Capteur+M.T)	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Système sans Mure de trombe	Non	Non	Non	Oui	Non	Non
Système sans Capteur solaire	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
Résistance électrique	Non	Non	Non	Non	Non	Oui

Tableau 4.1 : Différents cas de fonctionnement de système proposé.

4.2 Résultats pour différentes intensités de flux :

➤ Cas01

La température de l'absorbeur du capteur solaire (T_{pc}) atteint rapidement environ **70°C**, indiquant une excellente efficacité dans l'absorption et la conversion de l'énergie solaire. En parallèle, la température de l'absorbeur du mur de Trombe (T_{pw}) monte plus lentement pour atteindre environ **60°C**, témoignant de son rôle passif dans le stockage thermique. Les températures des vitres du capteur solaire (T_{vc}) et du mur de Trombe (T_{vw}) restent inférieures à celles de leurs absorbeurs respectifs, montrant une certaine déperdition thermique, mais aussi un effet de serre bien exploité.

Pour l'air, la température à l'entrée du mur de Trombe (T_{fi}) commence à environ **20°C**, tandis qu'à la sortie (T_{fo}), elle atteint **40°C**, indiquant un échange thermique efficace. Pour l'eau, la température à l'entrée du capteur solaire (T_e) débute autour de **20-25°C** et s'élève à **55°C** à la sortie (T_s), démontrant un bon transfert thermique. Après passage dans le radiateur,

la température de l'eau (T_{sr}) diminue légèrement, autour de 50°C , en transférant de la chaleur à la chambre.

Enfin, la température de la chambre (T_{ch}) se stabilise autour de 40°C , créant un environnement idéal pour une couveuse, ce qui montre la capacité du système à maintenir un climat stable et contrôlé.

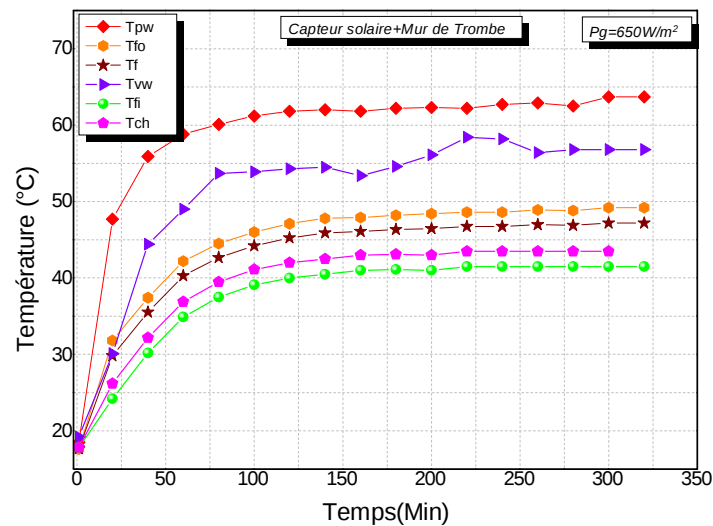


Figure (4.1) : Evolution des différentes températures de mur de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour intensité de flux 650 w/m^2

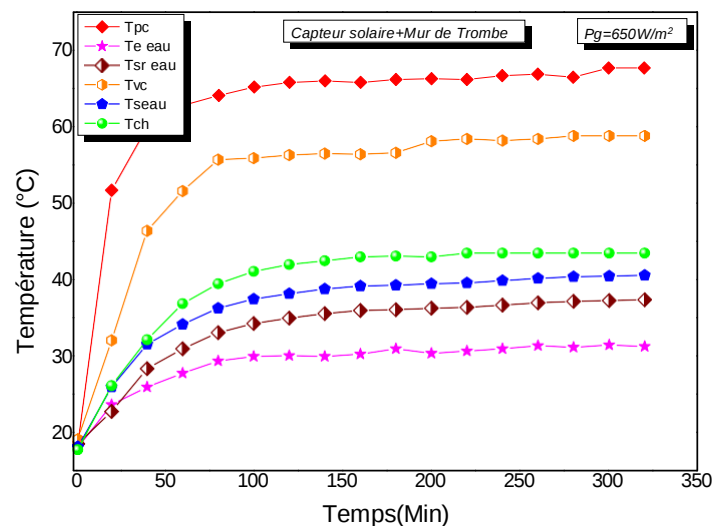


Figure (4.2) : Evolution des différentes températures de capteur solaire pour une couveuse en fonctionnement global pour intensité de flux 650 w/m^2

Le capteur solaire joue un rôle clé pour chauffer rapidement l'eau, qui est ensuite utilisée pour le radiateur. La performance pourrait encore être améliorée en optimisant l'isolation thermique et en ajustant les débits d'eau. Le mur de Trombe agit comme un système secondaire de stockage thermique. Son efficacité dépend de sa capacité thermique et de l'isolation de la vitre. Les températures mesurées montrent que le système est capable de maintenir un environnement stable dans la chambre, essentiel pour une couveuse.

➤ Cas02

Pour une intensité de flux élevée (800W/m^2), les performances thermiques augmentent :

- ✚ Les températures maximales atteignent des niveaux supérieurs, accélérant le temps nécessaire pour chauffer la chambre.
- ✚ Le système, combinant capteur solaire et mur de Trombe, montre une synergie où chaque élément améliore la capacité globale de stockage et de restitution de la chaleur.
- ✚ La régulation thermique est efficace grâce à l'utilisation de l'eau chauffée et à la conception des absorbeurs et radiateurs.

Ce système est particulièrement performant dans des conditions de forte intensité solaire, offrant une solution adaptée pour des régions à fort ensoleillement.

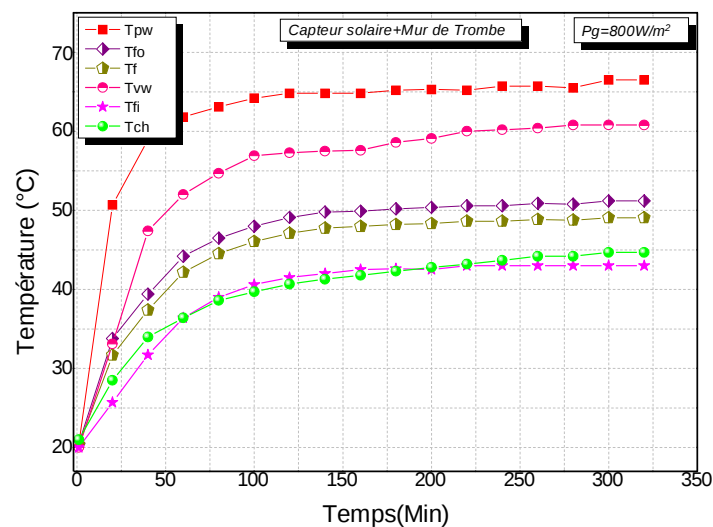


Figure (4.3) : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour intensité de flux 800 w/m^2

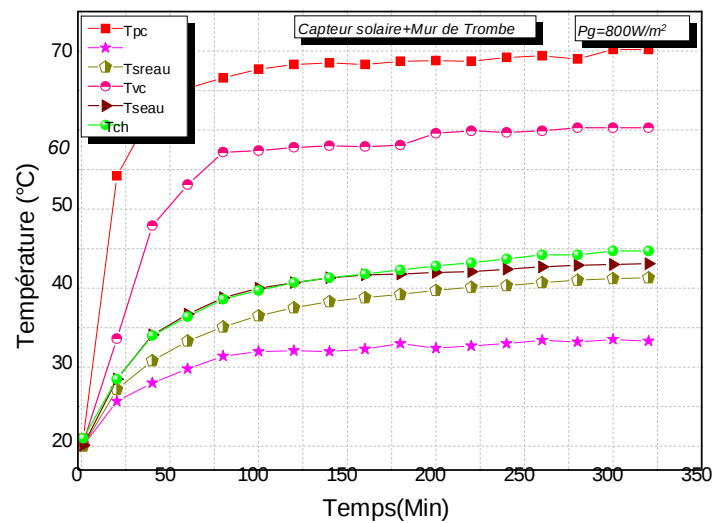


Figure (4.4) : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour intensité de flux 800 w/m^2

4.3 Résultats pour intensité de flux constant :

4.3.1 Système sans capteur solaire plan (cas03) :

La température de l'absorbeur du mur de Trombe (T_{pw}) monte rapidement pour atteindre environ 60°C . Cela montre que le mur de Trombe est le principal élément de chauffage dans ce système, accumulant et restituant la chaleur solaire de manière progressive et efficace.

La température de la vitre du mur de Trombe (T_{vw}) est légèrement inférieure à celle de l'absorbeur (T_{pw}), atteignant environ 45°C . Cela indique une dissipation thermique modérée et une participation de la vitre à l'effet de serre. La température de l'air (T_f) suit une montée progressive, atteignant des valeurs intermédiaires, signe que le mur de Trombe reste efficace. La température de la chambre (T_{ch}) atteint un plateau à environ 35°C . Bien que cette température soit suffisante pour certains usages, elle reste inférieure à celle obtenue dans un système avec capteur solaire plan. Cela montre que l'absence du capteur solaire réduit la capacité à maintenir des conditions optimales pour des applications nécessitant des températures plus élevées.

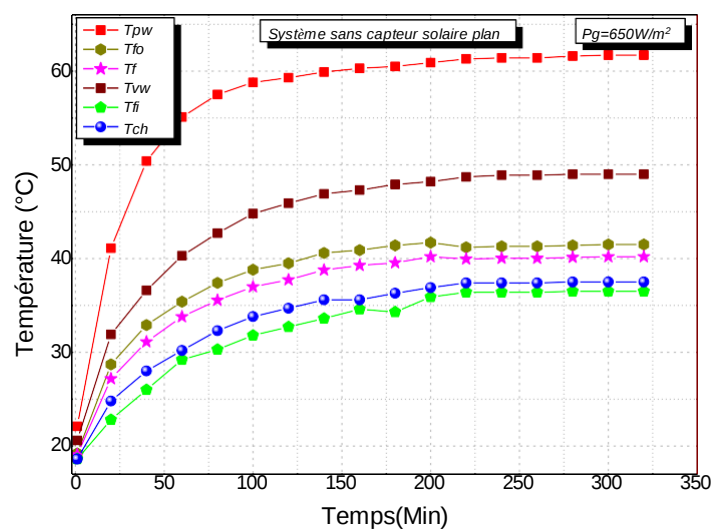


Figure (4.5) : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse sans capteur solaire pour une intensité de flux 650 w/m^2

4.3.2 Système sans Mure de trombe (cas04):

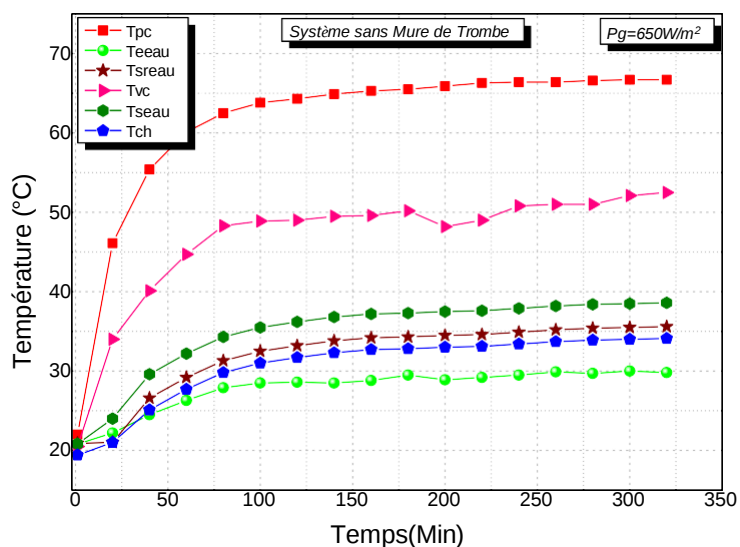


Figure (4.6) : L'évolution des différentes températures de capteur solaire pour une couveuse sans mure de trombe pour une intensité de flux 650 w/m^2

La figure (4.6) montre l'évolution des différentes températures de capteur solaire pour une couveuse en fonctionnement partiel sans mure de trombe, l'absence du mur de Trombe réduit la capacité globale de stockage et de restitution de la chaleur. Cela limite les performances thermiques à des variations plus dépendantes des conditions instantanées de captation solaire.

Malgré tout, le capteur solaire reste performant, assurant un chauffage rapide et efficace de l'eau, la quelle joue un rôle central dans le maintien de la température intérieure.

Comparé au système avec mur de Trombe, la température de la chambre (T_{ch}) est légèrement plus basse, soulignant l'importance du mur pour stabiliser et prolonger le stockage thermique. Ce système reste fonctionnel, mais moins optimal en termes de conservation thermique sur le long terme.

4.4 Résultats pour intensité de flux réel :

4.4.1 Système sans résistance électrique (Cas 05)

Les fluctuations de température dues au flux réel montrent que le système pour rait bénéficier d'une source de chaleur auxiliaire pour stabiliser la température de la chambre, particulièrement durant la nuit ou en cas de mauvais temps. Ce scénario met en évidence l'importance d'un stockage thermique ou d'un système hybride pour assurer un fonctionnement stable sur 24 heures. L'absence de résistance électrique rend le système entièrement dépendant des conditions d'ensoleillement, ce qui peut limiter ses performances durant les périodes de faible irradiation.

Le système sans résistance électrique est viable dans des régions bénéficiant d'un ensoleillement constant et fort, mais il présente des limitations en termes de stabilité thermique pour des conditions climatiques plus variables.

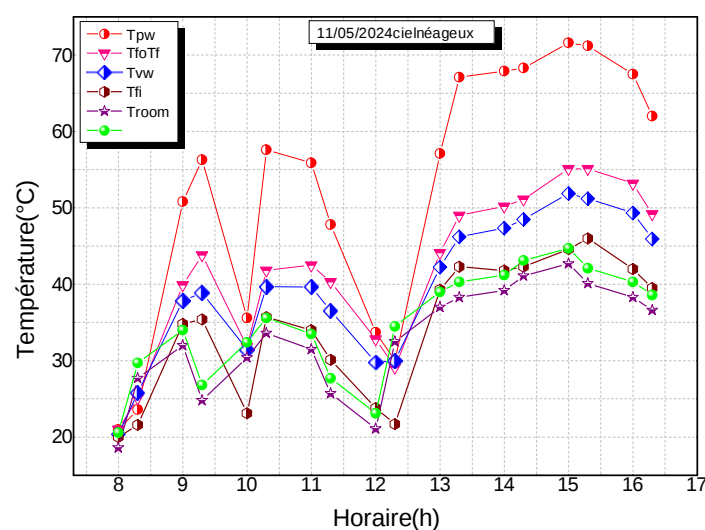


Figure (4.7) : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour le **05/11/2024**.

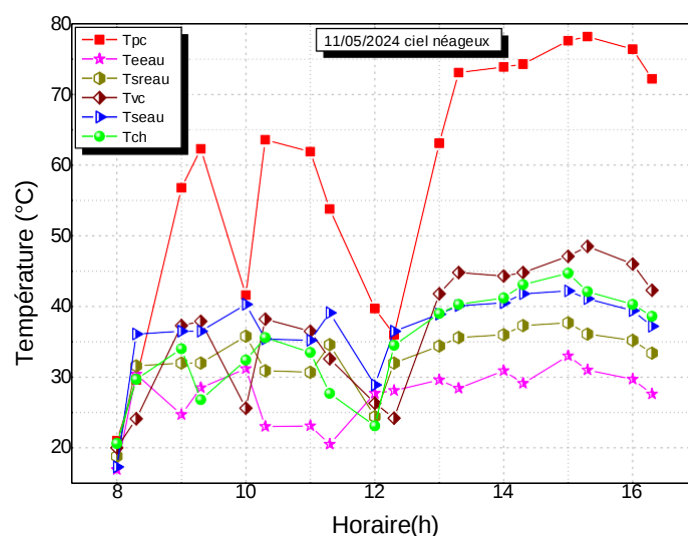


Figure (4.8) : Evolution des différentes températures de capteur solaire pour une couveuse en fonctionnement global pour le **05/11/2024**.

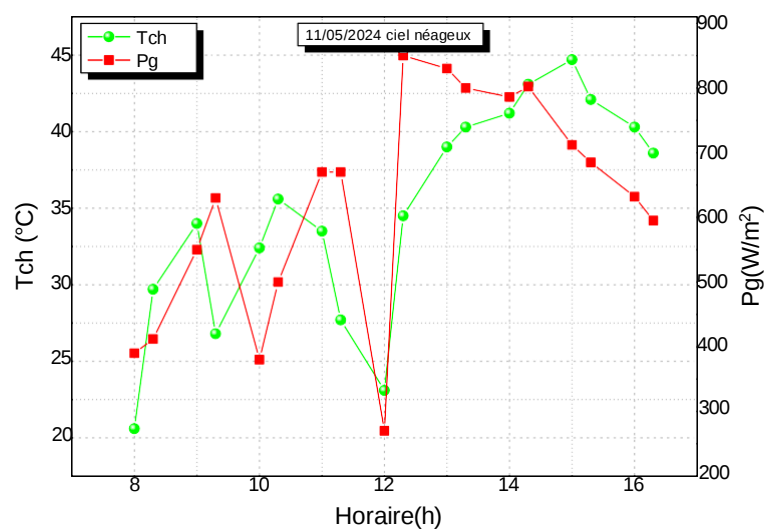


Figure (4.9) : L'éclairement solaire et la température de chambre en fonction du temps pour le **05/11/2024**

Avec un flux solaire variable, la température de la chambre est directement impactée par les variations de l'ensoleillement, durant les périodes de forte irradiation solaire, la température de la chambre monte progressivement pour atteindre environ 35 à 45°C, répondant aux besoins thermiques optimaux pour une couveuse. Ce pendant, dans des conditions de faible ensoleillement, la température stagne ou diminue, ce qui peut compromettre la stabilité thermique nécessaire pour les œufs.

Le capteur solaire permet de maintenir une température relativement élevée durant la journée, grâce à l'absorption rapide et efficace de l'énergie solaire. Le mur de trombe agit comme un élément de régulation thermique passif, en libérant lentement la chaleur stockée pendant les périodes de faible flux solaire. Ce pendant, sa contribution est limitée par les pertes thermiques à travers les vitres.

Dans le scénario, sans résistance électrique, le système est entièrement dépendant du flux solaire réel. La température de la chambre peut donc descendre en dessous de 37°C, ce qui est critique pour le développement des œufs.

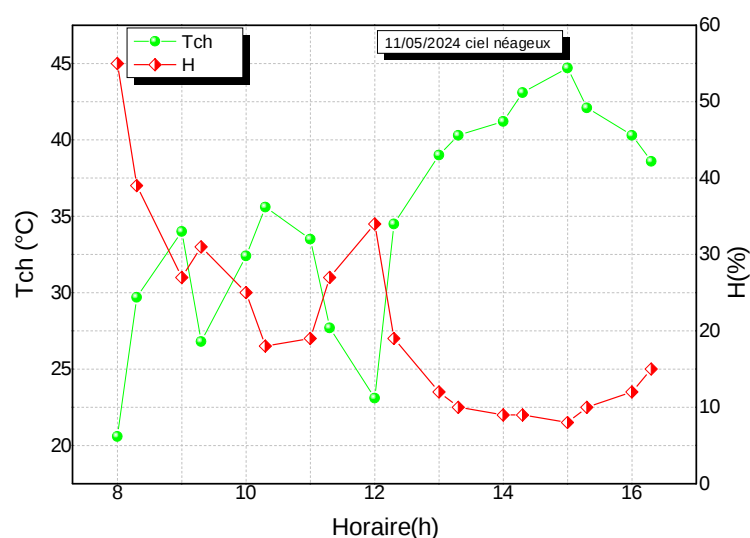


Figure (4.10) : Variation de l'humidité et la température de chambre en fonction du temps pour le **05/11/2024**

Une augmentation de la température dans la chambre entraîne généralement une diminution de l'humidité relative, car l'air chaud peut contenir davantage de vapeur d'eau. Cela pourrait assécher l'air si aucune régulation de l'humidité n'est mise en place. À l'inverse, lors des périodes de faible température (faible flux solaire), l'humidité relative augmente, ce qui pourrait favoriser une condensation excessive à l'intérieur de la chambre.

Le maintien d'une humidité relative constante (entre 50-60%) est crucial pour garantir le bon développement des œufs. Une humidité trop faible assèche les œufs, tandis qu'une humidité trop élevée peut entraîner un excès de condensation, réduisant les échanges gazeux à travers la coquille. Donc l'intégration d'un système de régulation de l'humidité, comme un

Humidificateur ou un réservoir d'eau chauffé par une résistance électrique avec un contrôle basé sur des capteurs (exemple DHT11) est obligatoire.

4.4.2 Système global avec résistance électrique (Cas06)

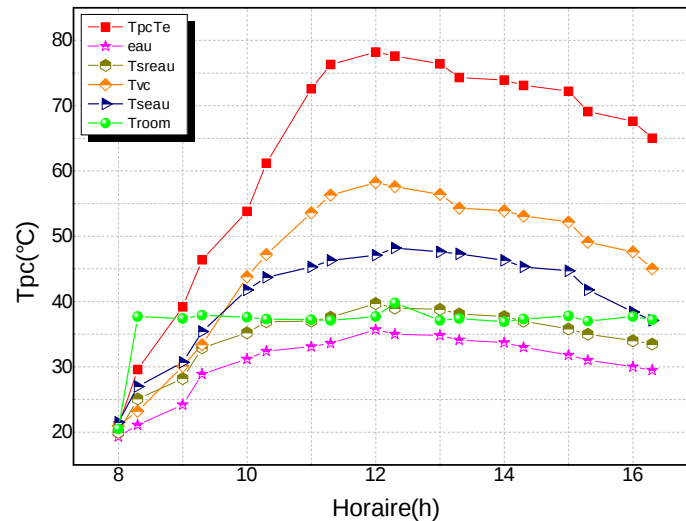


Figure (4.11) : Evolution des différentes températures de mure de trombe pour une couveuse en fonctionnement global pour le **06/11/2024**

L'ajout d'une résistance électrique dans le système permet de compenser les fluctuations dues à l'intensité de flux solaire variable, pendant les périodes de forte irradiation solaire, le capteur solaire et le mur de trombe suffisent pour maintenir la température de la chambre proche de **37°C**, sans nécessiter l'intervention de la résistance. En revanche, lorsque le flux solaire diminue (nuages ou nuit), la résistance électrique s'active automatiquement pour maintenir la température de la chambre à **37°C**, assurant un environnement optimal pour le développement des œufs.

Le capteur solaire fournit la chaleur principale pendant la journée, augmentant efficacement la température de l'eau et de l'air. Le mur de trombe continue de libérer progressivement la chaleur accumulée, réduisant la charge thermique nécessaire pour la résistance électrique. La résistance agit comme un élément de secours, garantissant une température constante, indépendamment des variations climatiques.

Une température parfaitement stable est atteinte, répondant aux exigences strictes des couveuses, ce qui améliore les taux d'éclosion des œufs. Le système global est particulièrement efficace pour minimiser les variations thermiques, assurant un environnement constant même lors des fluctuations du flux solaire.

4.5 Conclusion

Les graphes montrent que le système combiné (capteur solaire et mur de Trombe) fonctionne efficacement pour chauffer l'eau et maintenir la température de la chambre. Les différences de température entre les composants permettent d'identifier des opportunités d'amélioration, notamment en termes d'isolation thermique et de gestion des flux d'air et d'eau.

Le système sans capteur solaire plan utilise uniquement le mur de trombe pour le chauffage, ce qui limite la performance thermique globale. L'ajout d'un capteur solaire plan serait avantageux pour augmenter l'efficacité énergétique et atteindre des températures plus élevées, nécessaires pour des applications comme les couveuses.

Comparé au système avec mur de Trombe, la température de la chambre (T_{ch}) est légèrement plus basse, soulignant l'importance du mur pour stabiliser et prolonger le stockage thermique. Ce système reste fonctionnel, mais moins optimal en termes de conservation thermique sur le long terme.

Le système sans résistance électrique est viable dans des régions bénéficiant d'un ensoleillement constant et fort, mais il présente des limitations en termes de stabilité thermique pour des conditions climatiques plus variables.

Avec un flux solaire variable, la température et l'humidité de la chambre présentent des fluctuations qui peuvent compromettre l'efficacité de la couveuse. Bien que le capteur solaire et le mur de Trombe contribuent à maintenir un environnement relativement stable, ces dispositifs ne suffisent pas pour garantir une stabilité complète. L'ajout d'une résistance électrique pour stabiliser la température et d'un système de contrôle actif de l'humidité serait une solution optimale pour répondre aux besoins de la couveuse.

L'intégration d'une résistance électrique dans le système global offre une stabilité

thermique cruciale pour les périodes de faible ensoleillement. Ce système garantit une température constante de **37°C**, essentielle pour une incubation optimale des œufs. En régulant indirectement l'humidité par la stabilité thermique, il contribue également à maintenir un environnement équilibré. Ce système global est donc bien adapté pour maximiser les performances d'une couveuse, en assurant un contrôle précis des paramètres environnementaux.

C onclusion Générale

Cette étude a permis de concevoir, réaliser et analyser un système hybride pour une couveuse d'œufs, intégrant un capteur solaire plan, un mur de Trombe, une résistance électrique, et une gestion automatisée via une carte Arduino. Les résultats montrent que le système global est capable de maintenir des conditions thermiques stables, nécessaires pour le développement des embryons, grâce à une combinaison efficace des sources passives et actives de chauffage.

L'utilisation du capteur solaire plan et du mur de Trombe a démontré une capacité élevée d'absorption et de stockage de la chaleur, assurant une régulation thermique durant la journée. La résistance électrique, alimentée par l'énergie photovoltaïque, intervient efficacement en cas de baisse de l'intensité du flux solaire ou pendant la nuit. L'intégration de capteurs de température et d'humidité permet un contrôle précis des paramètres, garantissant ainsi des conditions optimales pour la couveuse.

Comme perspectives :

-  Optimiser les matériaux utilisés pour le capteur solaire et le mur de Trombe afin de réduire les pertes thermiques et d'augmenter l'efficacité globale.
-  Intégrer un système pour la surveillance et le contrôle à distance des paramètres de la couveuse via des applications mobiles.
-  Étendre cette technologie à d'autres domaines, comme les serres agricoles ou les systèmes de chauffage domestique.
-  Réduire les coûts de production grâce à des matériaux plus accessibles et développer des modèles adaptés pour les petites exploitations agricoles.

Carte d'information



1- Équipe d'encadrement :

Équipe d'encadrement :

Encadrant : Dr. BELFEGAS Billal	Spécialité : Génie mécanique (Energétique)
Encadrant : Dr. GOUIDMI Hamza	Spécialité : Génie mécanique (Energétique)
Encadrant : Mr. KAHIL Zoubir	Spécialité : Electromécanique (Ingénieur)

2- Équipe de projet :

Équipe de projet	Faculté	Spécialité	
Étudiant 01: BOUFLIH WAIL	Science et de la technologie	Génie mécanique (Energétique)	
Étudiant 02 : BOUAKILI IDRIS	Science et de la technologie	Génie mécanique (Energétique)	
Étudiant 03 : BENCHERIF SELIMAN	Science et de la technologie	Génie mécanique (Energétique)	
Étudiant 04 : LALAOUI YAKOUB	Science et de la technologie	Génie mécanique (Energétique)	



Le premier axe

Présentation

Du Projet



Premier axe

Présentation du projet



Ce projet de couveuse solaire intelligente constitue une solution viable et innovante pour répondre aux défis rencontrés par les agriculteurs dans les zones rurales. En combinant des technologies modernes avec une approche respectueuse de l'environnement, le système proposé vise à améliorer la productivité agricole, réduire les coûts énergétiques et promouvoir un développement durable à long terme.

1. L'idée de projet (solution proposée)

L'idée derrière ce projet repose sur la conception et la commercialisation d'une couveuse solaire intelligente, spécialement adaptée aux besoins des agriculteurs et éleveurs dans les zones rurales ou faiblement électrifiées. Ce dispositif innovant associe l'utilisation des énergies renouvelables, comme les capteurs solaires et les murs de Trombe, avec un système automatisé de régulation de température et d'humidité.

La couveuse est conçue pour fonctionner de manière autonome tout en assurant une efficacité énergétique maximale et une performance fiable.

L'objectif principal est d'offrir une alternative économique et écologique aux couveuses traditionnelles, souvent coûteuses et dépendantes des réseaux électriques instables ou inexistantes dans certaines régions. Ce projet vise également à renforcer l'autosuffisance des petits producteurs et à soutenir les efforts de développement durable dans le secteur agricole. En fonction de ces informations, nous allons réaliser une couveuse cela se fait en deux étapes :

a) Phase de conception :

La phase de conception débute par l'étude approfondie des besoins du marché, ciblant les éleveurs qui souhaitent optimiser l'incubation de leurs œufs tout en réduisant les coûts énergétiques. Un prototype de la couveuse sera développé en combinant les principes de la thermique (mur de Trombe et capteurs solaires), de l'électrique (capteurs solaires photovoltaïque, stockage...) et de l'électronique (système Arduino et capteurs ...).

Ce prototype sera testé dans des conditions réelles pour valider son efficacité. Les ajustements nécessaires seront apportés pour garantir que le système maintient une température optimale de 37°C, avec une humidité relative adaptée pour une éclosion réussie. Une validation technique et

économique permettra d'évaluer les coûts de production ainsi que les performances énergétiques avant de passer à la production en série.

b) Phase de mise en œuvre :

Une fois le prototype validé, la production commencera dans un atelier local équipé pour fabriquer et assembler les composants. La distribution initiale ciblera les agriculteurs locaux, les coopératives agricoles et les petites fermes. Des démonstrations sur le terrain permettront d'éduquer les utilisateurs potentiels sur l'utilisation du produit, tandis qu'un réseau de distribution sera mis en place pour assurer une livraison rapide.

En parallèle, un service après-vente sera développé pour garantir la maintenance des produits, y compris des solutions techniques en cas de défaillance du système.

2. Les valeurs proposées :

Le système proposé se distingue par les valeurs qu'il apporte à ses clients et à la société :

-  **Durabilité et éco-responsabilité :** L'utilisation des énergies renouvelables réduit la dépendance aux combustibles fossiles et minimise l'impact environnemental.
-  **Accessibilité économique :** La conception vise à rendre la couveuse abordable, même pour les petits agriculteurs aux ressources limitées.
-  **Fiabilité et innovation :** Le système automatisé garantit une incubation optimale, même dans des conditions climatiques difficiles.
-  **Impact social :** En favorisant une meilleure productivité agricole, le projet contribue à l'amélioration des conditions de vie dans les zones rurales.

3. Equipe de travail :

L'équipe est composée de deux directeurs principaux et de quatre étudiants qui répartissent leurs tâches académiques :

- Le directeur du projet, monsieur BELFEGAS Billal, est responsable de l'élaboration des plans stratégiques de la société, Il a expliqué l'importance des services offerts par l'entreprise aux clients devant l'équipe de travail, l'incitation à la meilleure offre et la création d'un environnement de travail approprié, il est responsable de l'organisation des réunions avec les investisseurs du financement nécessaire et de la communication avec les fondateurs de la société en cas de problème.

➤ Responsable du développement de l'entreprise, monsieur GOUIDMI Hamza, il est

responsable de la mise en place d'une stratégie pour le développement de la société émergente, il connaît les clients, leurs besoins et leurs désirs et comment développe le produit émergeant pour répondre à ces besoins, ce qui aide à construire de bons plans de marketing et à atteindre la croissance.

➤ Le directeur technique **Bencherif seliman**, est responsable de tous les processus techniques de la société émergente, y compris l'élaboration de logiciels et la mise à jour du site.

➤ Le directeur du marketing, **Bouflih Wail** est responsable de la mise en place des plans de marketing pour les produit émergent de l'entreprise, de la gestion de la base de clients et de la résolution des problèmes rencontrés lors de leur gestion de la base de clients et de la résolution des problèmes rencontrés lorsqu'ils ont travaillé avec la société, d'étudier et d'analyser le marché cible, et de déterminer comment les ventes se développent.

➤ Le représentant des ventes, **bouakili idriss**, est responsable de la mise en œuvre des stratégies choisies par le directeur marketing, exécute les campagnes de marketing et détermine leurs résultats selon les critères établis par la société, et définit les moyens de les exploiter, En plus de collaborer avec le directeur marketing pour élaborer des plans de marketing et proposer des solutions et des options alternatives.

➤ Gestionnaire de plateformes sociales, **Lalaoui yakoub**, responsable des pages de l'entreprise sur les réseaux sociaux et de la mise à jour de son contenu.

4. Objectifs du projet :

Les objectifs de ce projet sont divisés en trois phases : court, moyen et long terme.

➤ **À court terme (1-2 ans)**

L'objectif immédiat est de finaliser le développement du produit et de le lancer sur le marché local. L'accent sera mis sur la sensibilisation des utilisateurs potentiels à travers des démonstrations pratiques et des essais gratuits pour les premiers clients. L'équipe vise une production de 500 unités par an et une augmentation progressive des parts de marché.

➤ **À moyen terme (3-5 ans)**

Dans cette phase, le produit envisage de s'étendre à d'autres régions, y compris les pays voisins présentant des besoins similaires. Des partenariats seront établis avec des organisations agricoles pour élargir la portée du produit.

Une version améliorée de la couveuse sera développée pour inclure de nouvelles fonctionnalités, telles que le contrôle à distance via une application mobile.

➤ **À long terme (5+ ans)**

À long terme, la vision est de devenir un leader régional dans la production de solutions agricoles durables. La société prévoit d'étendre son catalogue de produits à d'autres équipements agricoles écoénergétiques et d'établir des collaborations avec des institutions académiques pour intégrer les dernières innovations technologiques.

Deuxième axe

Analyse stratégique du marché



Avec une segmentation claire, une concurrence modérée et une stratégie de marketing bien définie, ce projet de couveuse solaire intelligente a un fort potentiel pour s'imposer comme une solution innovante et durable sur le marché agricole. La clé du succès réside dans l'éducation des utilisateurs, la qualité du produit et un positionnement stratégique centré sur les besoins spécifiques des agriculteurs ruraux.

1. Le segment de projet :

Le projet de couveuse solaire intelligente cible principalement le secteur agricole, en se concentrant sur les segments suivants :

-  **Agriculteurs et éleveurs ruraux :** Ce groupe représente le principal marché, en particulier ceux qui n'ont pas un accès fiable à l'électricité.
-  **Coopératives agricoles :** Ces organisations peuvent acheter plusieurs unités pour les redistribuer aux membres ou les utiliser à grande échelle.
-  **Organisations gouvernementales et ONG :** Ces institutions cherchent souvent à promouvoir des solutions durables pour renforcer la sécurité alimentaire dans les zones rurales.
-  **Marché des petits producteurs urbains :** Des éleveurs en zones périurbaines, ayant des espaces limités mais souhaitant produire localement, représentent également un segment potentiel.

Ces segments se caractérisent par un besoin d'équipements abordables, faciles à utiliser et écoénergétiques. La valeur ajoutée du projet réside dans sa capacité à répondre à ces attentes tout en apportant une solution technologique avancée.

2. Mesure de l'intensité de la concurrence :

L'analyse de l'intensité concurrentielle dans ce domaine illustre trois niveaux principaux de compétition :

A. Concurrence directe :

- **Couveuses électriques traditionnelles :** Ces équipements sont courants, mais ils nécessitent une alimentation électrique constante et sont souvent coûteux pour les zones rurales.

- **Couveuses manuelles ou artisanales :** Bien que peu coûteuses, elles manquent d'automatisation et de régulation précise.

B. Concurrence indirecte :

Fournisseurs d'équipements agricoles généraux qui proposent des solutions standard pour les fermiers, bien qu'ils ne soient pas spécialisés dans les couveuses solaires.

C. Nouveaux entrants sur le marché :

Avec l'émergence des énergies renouvelables, de nouveaux acteurs pourraient développer des solutions similaires.

Cependant, la barrière d'entrée technologique (conception hybride solaire et automatisée) reste un avantage concurrentiel clé.

L'intensité de la concurrence reste modérée, avec un fort potentiel de différenciation grâce à l'aspect innovant et écologique de la solution.

3. La stratégie de marketing :

Pour maximiser l'impact du projet sur le marché, une stratégie de marketing adaptée sera déployée.

A. Étude de marché locale

Avant le lancement, une analyse approfondie des besoins locaux permettra d'ajuster le produit aux attentes spécifiques des segments ciblés.

B. Positionnement

Le projet sera positionné comme une solution innovante, durable et économique pour améliorer les conditions d'incubation dans les fermes rurales. Les éléments différenciateurs clés incluent :

- L'utilisation d'énergies renouvelables (solaire et thermique).
- L'automatisation pour un contrôle précis de la température et de l'humidité.
- La simplicité d'utilisation et de maintenance.

C. Politique de prix

Une stratégie de prix compétitive sera adoptée pour rendre la couveuse accessible aux petits agriculteurs tout en maintenant une marge suffisante pour la pérennité de l'entreprise. Des modèles de subventions via des ONG ou des crédits agricoles pourraient également être proposés.

D. Promotion et sensibilisation

- **Événements locaux** : Participer à des foires agricoles pour démontrer l'efficacité du produit.
- **Collaboration avec des institutions locales** : Partenariats avec des coopératives et des organisations agricoles pour distribuer et promouvoir le produit.
- **Marketing digital** : Création d'un site web et de pages sur les réseaux sociaux pour informer sur les bénéfices du produit. Contenu éducatif montrant l'impact des technologies durables dans l'agriculture.

E. Réseau de distribution

Un réseau de distribution direct sera mis en place pour desservir les zones rurales. Cela inclura :

- ✚ Des points de vente dans des régions agricoles stratégiques.
- ✚ Un service de livraison pour les zones éloignées.

F. Service après-vente

Pour fidéliser les clients, un système d'assistance technique sera mis en place, offrant des garanties sur le produit et un accès facile aux pièces de rechange.

Troisième axe

Plan de production et d'organisation



La production de la couveuse solaire intelligente repose sur un processus structuré pour garantir la qualité, l'efficacité et la durabilité.

1. Le Processus de production :

A. Conception et prototypage :

- + Réalisation d'un plan technique détaillé du produit.
- + Fabrication d'un prototype pour validation des performances thermiques, électrique, électroniques et mécaniques.

B. Assemblage des composants :

- + **Structure de la couveuse** : Construction du mur de Trombe et du capteur solaire à partir de matériaux durables et thermiquement efficaces.
- + **Système électronique** : Installation des capteurs (DHT11), du microcontrôleur (Arduino Nano) et du câblage électrique.
- + **Intégration de la pompe et de la résistance électrique** : Assurer leur connexion au système de contrôle pour un fonctionnement automatisé.

C. Tests de validation :

- + Vérification des performances thermiques (exemple : maintien T à 37°C).
- + Tests du système de contrôle et de l'automatisation.
- + Validation du fonctionnement continu sur plusieurs cycles d'incubation.

D. Finition et emballage :

- + Application d'un revêtement pour protéger les surfaces.
- + Emballage sécurisé pour le transport.

2. L'approvisionnement :

Pour assurer une production fluide et de qualité, l'approvisionnement en matériaux et composants est essentiel.

A. Principaux éléments nécessaires :

➤ Composants mécaniques :

- + Plaques de verre ou plastique pour le capteur solaire.
- + Matériaux isolants pour la structure.

Métaux légers pour le cadre.

➤ **Composants électroniques :**

-  Capteurs de température et d'humidité.
-  Microcontrôleurs Arduino Nano.
-  Résistances électriques et pompes à eau basse consommation.

➤ **Fournisseurs locaux et internationaux :**

-  Privilégier des fournisseurs locaux pour réduire les coûts logistiques.
-  Importer des composants spécifiques si la qualité ou la disponibilité locale est limitée.

➤ **Gestion des stocks :**

-  Maintenir un stock tampon pour éviter les interruptions de production.
-  Planification des commandes en fonction des prévisions de vente.

3. La main d'œuvre :

Une équipe qualifiée et organisée est essentielle pour le bon fonctionnement de l'entreprise.

3.1 Composition de l'équipe :

➤ **Production :**

-  **Techniciens en assemblage :** Chargés de l'intégration des composants mécaniques et électroniques.
-  **Opérateurs de test :** Vérifient la qualité et la fiabilité des produits avant leur expédition.

➤ **R&D :**

-  **Ingénieurs en énergies renouvelables :** Optimisent les performances thermiques et énergétiques du produit.
-  **Développeurs électroniques :** Améliorent le système automatisé.

➤ **Logistique et maintenance :**

-  **Responsables d'approvisionnement :** Gèrent les relations avec les fournisseurs.
-  **Techniciens SAV :** Assurent le support après-vente et la maintenance.

➤ **Administration et marketing :**

-  **Responsables commerciaux :** Promeuvent le produit et développent des partenariats stratégiques.
-  **Gestionnaires financiers :** Supervisent les coûts et les investissements.

4. Les Principaux partenaires :

Les partenaires jouent un rôle clé dans la réussite du projet, notamment pour l'approvisionnement, la distribution et la promotion.

4.1 Catégories de partenaires :

➤ Fournisseurs :

- ✚ Partenaires locaux pour les matériaux de construction.
- ✚ Fabricants d'équipements électroniques pour les capteurs et microcontrôleurs.

➤ Distributeurs :

- ✚ Coopératives agricoles pour la distribution aux éleveurs.
- ✚ Magasins d'équipements agricoles.

➤ Partenaires techniques :

- ✚ Sociétés spécialisées dans les énergies renouvelables pour des conseils sur l'efficacité énergétique.
- ✚ Développeurs logiciels pour intégrer des technologies connectées à l'avenir (applications de suivi à distance).

Quatrième axe :
 Plan financier



Couts et charge

1) Les matières premières de produit (Cuveuse 1m*1m)

Matière	Quantité	Prix unitaire (DA)	Total (DA)
Tôle	1 unité	5,000	5,000
Pompe	1 unité	2,000	2,000
Câblage	-	650	650
Assemblage	-	3,000	3000
Capteurs de température	2 unités	350	700
Capteur photovoltaïque unité	1	12,000	12,000
Batteries+ système de charge	1 unité	6,000	6,000
Arduino Nano + LCD	1 unité	3,500	3,500
Capteur solaire (plan)	1 unité	3,000	3,000
Tubes en cuivre	10 m	400	4,000
Emballage	-	200	200
Total	/	/	40,000

2) Salaires des employés

Fonction	Nombre	Salaire unitaire (DA)	Salaire total (DA)
Directeur	1	50,000	50,000
Opérateurs	2	35,000	70,000
Contrôle qualité	1	35,000	35,000
Commercial	1	40,000	40,000
Agent de montage	3	30,000	90,000
Total	7	/	285,000

3) Équipements

Équipement	Prix (DA)
Machines	5,000,000
Moules	900,000
Outils informatiques	100,000
Meubles	100,000
Total	6,100,000

4) Charges diverses

Charge	Par mois (DA)	Par an (DA)
Loyer	120,000	1,440,000
Factures	30,000	360,000
Marketing	30,000	360,000
Total	60,000	2,160,000

5) Chiffre d'affaires prévu

Pour la première année, la production est limitée à **150 produits par mois**, vendus à **100,000 DA/unité** :

Indicateur	Par mois	Par an
Quantité de produits vendus	150	1,800
Prix unitaire (DA)	100,000	100,000
Chiffre d'affaires global	15,000,000	180,000,000

6) Tableau des charges totales

Charge	Par mois (DA)	Par an (DA)
Loyer	120,000	1,440,000
Salaires employés	285,000	3,420,000
Factures	30,000	360,000
Marketing	30,000	360,000
Coût des produits	6,000,000 (40,000*150)	48,000,000
Équipements	6,100,000	6,100,000
Total	12,445,000	150,780,000

7) Bénéfices révisés

Catégorie	Valeur (DA)
Total charges	150,780,000
Chiffre d'affaires	180,000,000
Marge brute	29,220,000

-  **Viabilité assurée** : Avec une marge presque de **16 %** par rapport au chiffre d'affaires annuel, le projet est économiquement viable, surtout pour un produit innovant et écoresponsable.
-  **Positionnement prix** : Le prix unitaire ajusté de **100,000** DA est justifié par la qualité, la durabilité et l'intégration de technologies avancées.

Résumé :

Ce travail présente la réalisation et l'évaluation d'un système hybride pour une couveuse à œufs, combinant un capteur solaire plan, un mur de Trombe, une résistance électrique et un système de contrôle automatisé. L'objectif principal était d'assurer une température stable et optimale (37°C) pour le bon développement des embryons. Les résultats montrent que le système est efficace pour exploiter l'énergie solaire durant la journée, avec un soutien électrique pendant la nuit ou en cas de faible intensité solaire. Ce projet offre une solution économique et écologique, adaptée aux besoins des petites exploitations agricoles.

Mots-clés : couveuse à œufs, capteur solaire plan, mur de Trombe, résistance électrique, énergie solaire, automatisation.

Abstract

This study focuses on the realization and evaluation of a hybrid system for an egg incubator, combining a flat solar collector, a Trombe wall, an electric heater, and an automated control system. The primary goal was to maintain a stable and optimal temperature (37°C) for proper embryo development. Results show that the system effectively utilizes solar energy during the day, with electric support at night or during low solar intensity. This project provides an economical and eco-friendly solution tailored to the needs of small-scale agricultural operations.

Keywords: egg incubator, flat solar collector, Trombe wall, electric heater, solar energy, automation.

ملخص

يقدم هذا العمل تحقيق وتقييم نظام هجين لحاضنة بيض، يدمج بين مجمع شمسي مسطح، وجدار ترومب، ومقاومة كهربائية، ونظام تحكم آلي. الهدف الأساسي هو ضمان درجة حرارة مستقرة ومثالية (37 درجة مئوية) لتطور الأجنة بشكل سليم. أظهرت النتائج أن النظام فعال في استغلال الطاقة الشمسية خلال النهار، مع دعم كهربائي خلال الليل أو في حالات انخفاض شدة الإشعاع الشمسي. يقدم هذا المشروع حلاً اقتصادياً وبيئياً مناسباً لاحتياجات المزارع الصغيرة.

الكلمات المفتاحية : حاضنة بيض، مجمع شمسي مسطح، جدار ترومب، مقاومة كهربائية، طاقة شمسية، آلية

Résumé :

Ce travail présente la réalisation et l'évaluation d'un système hybride pour une couveuse à œufs, combinant un capteur solaire plan, un mur de Trombe, une résistance électrique et un système de contrôle automatisé. L'objectif principal était d'assurer une température stable et optimale (37°C) pour le bon développement des embryons. Les résultats montrent que le système est efficace pour exploiter l'énergie solaire durant la journée, avec un soutien électrique pendant la nuit ou en cas de faible intensité solaire. Ce projet offre une solution économique et écologique, adaptée aux besoins des petites exploitations agricoles.

Mots-clés : couveuse à œufs, capteur solaire plan, mur de Trombe, résistance électrique, énergie solaire, automatisation.

Abstract

This study focuses on the realization and evaluation of a hybrid system for an egg incubator, combining a flat solar collector, a Trombe wall, an electrical resistance, and an automated control system. The primary goal was to maintain a stable and optimal temperature (37°C) for proper embryo development. Results show that the system effectively utilizes solar energy during the day, with electric support at night or during low solar intensity. This project provides an economical and eco-friendly solution tailored to the needs of small-scale agricultural operations.

Keywords: egg incubator, flat solar collector, Trombe wall, electric heater, solar energy, automation.

ملخص

يقدم هذا العمل تحقيق وتقييم نظام هجين لحاضنة بيض، يدمج بين مجمع شمسي مسطح، وجدار ترومب، ومقاومة كهربائية، ونظام تحكم آلي. الهدف الأساسي هو ضمان درجة حرارة مستقرة ومثالية (37 درجة مئوية) لتطور الأجنة بشكل سليم. أظهرت النتائج أن النظام فعال في استغلال الطاقة الشمسية خلال النهار، مع دعم كهربائي خلال الليل أو في حالات انخفاض شدة الإشعاع الشمسي. يقدم هذا المشروع حلاً اقتصادياً وبيئياً مناسباً لاحتياجات المزارع الصغيرة.

الكلمات المفتاحية: حاضنة بيض، مجمع شمسي مسطح، جدار ترومب، مقاومة كهربائية، طاقة شمسية، آلية