



Revue-IRS



Revue Internationale de la Recherche Scientifique
(Revue-IRS)

ISSN: 2958-8413

Vol. 3, No. 5, Septembre 2025



ETUDE DE FOUR SOLAIRE HYBRIDE POUR LA FABRICATION DES PAINS DANS UNE BOULANGERIE A BOMA

Par

KUMBU TENDA André-Pachely

*Faculté de Polytechnique, Domaine de Sciences d'ingénieur
Université d'état président Joseph Kasa Vubu - République démocratique du Congo (RDC).*

Résumé

Dans des boulangeries, plusieurs techniques sont mises en jeu pour la cuisson des pâtes afin d'obtenir des pains. A Boma, les techniques les plus usuelles sont celles faisant usage des fours à briques pelées (qui utilisent des bois de chauffage) pour générer l'énergie thermique avec une forte concentration de CO₂ dégagé. Cela a conduit depuis quelques décennies à la dégradation de tissus météorologiques et favorise la déforestation alors que la conservation de ressources naturelles est hyper importante pour l'équilibre écologique dans l'hypothèse où le reboisement demeure une énigme et reste encore à vérifier à Boma.

C'est dans cette optique que s'inscrit le cadre de notre article où nous avons porté une étude scientifique et technologique sur le four solaire hybride étant un de moyens efficaces pour la lutte. Les rayonnements solaires considérés comme l'énergie primaire font fonctionner le four pendant le jour grâce au capteur thermique qui élève au plus haut degré la température reçue et achemine le flux thermique vers les pâtes au moyen de l'air asséchant.

Pendant la nuit, l'énergie issue de système solaire photovoltaïque alimente la résistance chauffante dans réservoir d'eau. La vapeur produite à une température supérieure à 100°C sèche les pâtes de pains. Un capteur de niveau sera placé dans le réservoir pour connaître le niveau d'eau lors de l'utilisation.

Mots clés : Four solaire, Transfert de la chaleur, modélisation, capteur thermique, énergie solaire photovoltaïque, bilans thermiques.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.17073046>

Summary

Several techniques are actually used in bakeries for cooking paste in order to obtain loaves of bread. In Boma, the most usual techniques are those using peeled brick ovens(which use firewood) to generate thermal energy with a high concentration of cleared CO₂. Meteorologies and promotes deforestation while the conservation of natural resources is hyper important for ecological balance in the event that reforestation remains an enigma and remains to be checked in Boma.

It is in this perspective that the framework of our article is part of our article where we have carried a scientific and technological study on the hybrid solar oven being one of effective means for the fight. Solar radiation considered as primary energy make the oven work during the day thank to the thermal sensor which raises at the highest degree the temperature received and transports the thermal flow to the pasta by means of the drying air.

During the night, the energy from photovoltaic solar system feeds the heating resistance in the water tank. The steam produced at temperature above 100°C dry the bread pasta.

It will be placed in the water tank a level sensor to control the water level each time inside.

Key words: solar bakerhouse, heat transfer, modelization, collector thermal, photovoltaic solar energy, thermal balances.

1. Introduction

Les analyses évidentes et objectives montrent que la consommation des pains est une préférence des congolais en général et des bomatraciens en particulier en raison de leur rapidité dans la fourniture de l'énergie pour l'équilibre de l'organisme et surtout que ce sont des substances déjà fabriquées, ne nécessitant encore aucune cuisson.

Les pains au levain, étant les types des pains fabriqués dans la ville de Boma disposent en grande quantité de deux sortes de substances favorisant la digestion : les fibres alimentaires et les prébiotiques. Leur rôle est d'alimenter certaines bonnes bactéries. Ainsi, la prise régulière de pains au levain peut donc apporter une amélioration de santé intestinale et facilite la digestion. Ils sont fabriqués à base de farine de blé en juxtaposition avec d'autres aliments qui forment une pâte. Celle-ci doit être débarrassée d'eau par le procédé de séchage.

3. Méthodologie

Pour mieux cerner notre thème, nous avons estimé judicieux de faire recours à :

- La collecte de données d'un échantillon des boulangeries à Boma et observation ;
- La technique de recherche documentaire ;
- L'usage de logiciel Pv syst pour la simulation des kits solaires photovoltaïques et la détermination de quelques données météorologiques de Boma.

Tableau I : Echantillon de quelques boulangeries à Boma et leur mode de fonctionnement.

N°	NOMS DE BOULANGERIES	MODE DE FONCTIONNEMENT	ADRESSE
1	Papa Jean	Bois de chauffage	Voir l'arrêt paroisse Bon Pasteur
2	Anonyme	Bois de chauffage	Avenue Kasa-vubu(GBADO),commune de Nzadi
3	Etienne	Bois de chauffage	Voir le marché ZOLA NKANGU,commune de Kalamu
4	Depiiso	Bois de chauffage	Av. Vaku,commune de Kabondo
5	Ya Jean	Bois de chauffage	Voir l'arrêt Samy,commune de Kalamu
6	Anonyme	Bois de chauffage	Voir derrière salle de barreau (Saïco)
7	Papa kulutu	Bois de chauffage et Électricité	Référence grand bateau au marché BILOKOS centre ville
8	Papa Jean	Bois de chauffage	Voir l'arrêt Kitsiamuna
9	Anonyme	Bois de chauffage	Voir le marché MAKOLO NGULU,commune de Kalamu
10	Anonyme	Bois de chauffage	En face de l'arrêt MIKATE,commune de Nzadi
11	Mon pain	Bois de chauffage et Électricité	En face de banque RAWBANK au centre ville
12	Papa Mbungu	Bois de chauffage	Quartier Seka Mbote, commune de Kabondo

Source : enquête personnelle

Les données relevées ci-dessus révèlent bien que la majorité de boulangeries dans la ville de Boma préfèrent utiliser les fours à bois de chauffage avec comme principaux inconvénients, la déforestation et la pollution de l'environnement avec émission de CO₂ tant décriées eu égard à la politique mondiale de lutte contre le réchauffement climatique.

D'autre part, recourir au four électrique serait un procédé correctif quant à ce mais il se constate une faiblesse en cas de coupure de la tension électrique SNEL, due aux délestages ordinaires ou à un défaut permanent dans le réseau électrique ; Ce qui imposerait aux boulangers l'usage impératif de groupe électrogène avec la même conséquence que les bois de chauffage, voire sur le plan économique.

Dans ce contexte, l'outil le plus efficace pour l'évitement des conséquences sus évoquées est la mise en place d'un four solaire hybride comme prédit ci-haut.

4. Notions de séchages

Le séchage est l'un des domaines de recherche les plus solides de l'ingénierie alimentaire.il consiste à éliminer la quantité d'eau contenue dans un aliment afin d'éviter le développement de microorganismes pouvant causer sa pourriture. Pour le cas des pains, il faut un générateur de chaleur qui est le four.

5. Types de fours

Le type de four adapté à l'activité d'une boulangerie peut dépendre de la capacité de production, des spécifications du produit, de l'espace disponible, des sources d'énergie disponibles, des performances opérationnelles, des matériaux de construction et des besoins en entretien (Boudouh Fateh, 2023).

Le développement scientifique et technologique a permis de diversifier et de mettre en œuvre plusieurs types de fours utilisés dans les boulangeries:

5.1 Four à feu direct (FFD)

Il place du gaz en combustion (source d'énergie) à l'intérieur de la chambre de cuisson pour chauffer l'air et les produits. Le transfert de chaleur est assuré par rayonnement des flammes (brûleurs ruban placés au-dessus et en dessous du tapis du four), du haut, de la base et des parois de la chambre de cuisson.



Figure I. Four à feu direct

5.2 Four à feu indirect (FFI)

, Les fours FFI chauffent indirectement la chambre de cuisson en utilisant des échangeurs. Il convient aux produits de boulangerie sensibles (par exemple, les gâteaux, les pâtisseries) car les sous-produits de combustion restent à l'intérieur de la structure de l'échangeur de chaleur et ne sont pas en contact direct avec les pâtes.



Figure II. Four à feu indirect

5.3 Four électrique

Ils ont des caractéristiques de construction similaires à celles des FFD pour cuire les produits. Ce type de four utilise des résistances électriques à la place des brûleurs à gaz des FFD. Son inconvénient réside au niveau de la consommation excessive de l'énergie active (kWh).



Figure III. Four électrique

5.4 Four à briques pelées

Il est constitué d'une chambre en brique massive, reliée à un sol en carreaux réfractaires qui maintient les morceaux de pâtes. Le charbon et le bois de chauffage sont utilisés comme sources de combustion. C'est le cas de fours utilisés dans la plupart des boulangeries à Boma. Ces fours sont manuellement manipulés et nécessitent des compétences particulières de la part du boulanger.

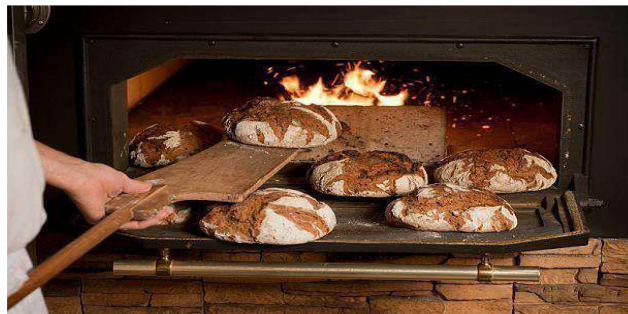


Figure IV. Four à briques pelées.

5.5 Four à chariot

Un four à chariot est un four vertical à chargement par lots dans lequel des chariots remplis de plaques de cuisson peuvent être roulés pour la cuisson.



Figure V. Four à chariot.

N.B : il existe d'autres fours comme fours à bobines, convoyeurs, tunnels et hybrides.

6. Résultats et discussions

6.1 Modélisation mathématique

a. Bilan de charges thermiques de système général

Hypothèses

Nous portons notre étude sur un four solaire pour la cuisson de pâtes de pains dans une boulangerie. il est nécessaire de considérer certaines hypothèses simplificatrices étant donné la complexité du problème :

- Les échanges radiatifs à l'intérieur du four sont négligeables
- Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligeables
- La température et la teneur en eau à l'intérieur de pâtes de pains sont supposées uniformes
- Les variations temporelles de la température de l'air sont négligeables devant celles de pâtes
- La variation de volume du produit au cours de séchage est négligée
- L'air est considéré comme étant un fluide incompressible
- Pour chaque claie, le problème est unidimensionnel dans la direction de l'écoulement de l'air asséchant.

Le bilan de charges thermiques général conduit à la formulation des équations ci-après:

➤ Au niveau de la couverture

$$m_V \times c_V \times \frac{dT_V}{dt} = h_{rc} \times S_p \times (T_c - T_v) + h_{ce} \times S_p \times (T_a - T_v) + h_{rfv} \times S_p \times (T_{PP} - T_v) + h_{evm} \times S_p \times (\theta_{(j)} - T_v) + h_{risv} \times S_p \times (T_{ii} - T_v) + P_v \quad (1)$$

➤ **Au niveau de l'air asséchant**

$$Q \times C_p \times (\theta_{(j)} - \theta_{(j-1)}) = h_{eisv} \times S_p \times (T_{ii} - \theta_{(j)}) + h_{evm} \times S_p \times (T_v - \theta_{(j)}) + h_{evf} \times S \times (T_{PP} - \theta_{(j)}) \quad (2)$$

➤ **Au niveau des pâtes de pains**

$$m_{PP} \times C_{PP} \times \frac{dT_{PP}}{dt} = h_{rfv} \times S_p \times (T_v - T_{PP}) + h_{evf} \times S \times (\theta_{(j)} - T_{PP}) + h_{risf} \times S_p \times (T_{ii} - T_{PP}) + P_{PP} - Q_{ev} \quad (3)$$

➤ **Au niveau de l'isolant**

- Face intérieure de l'isolant

$$0.5 \times m_{is} \times C_{is} \times dT_{ii} = h_{rPPis} \times S_p \times (T_{PP} - T_{ii}) + h_{evis} \times S_p \times (\theta_{(j)} - T_{ii}) + h_{ca} \times S_p \times (T_{ie} - T_{ii}) + h_{rvis} \times S_p \times (T_v - T_{ii}) \quad (4)$$

- Face extérieure de l'isolant

$$0.5 \times m_{is} \times C_{is} \times \frac{dT_{ie}}{dT} = h_{ca} \times S_p \times (T_{ii} - T_{ie}) + (h_{rs} - h_{ce}) \times S_p \times (T_a - T_{ie}). \quad (5)$$

Avec:

$$q_{ev} = L_v \times \frac{dx}{dt} \times m_f \quad (6)$$

$$S_p = \Delta x \times L_{arg} \quad (7)$$

S_p représente la surface totale des pâtes de pains.

b. Bilan de charges thermiques au niveau de capteur

b.1 Hypothèses

Pour notre cas, le fluide de travail est l'air. Pour ce faire, nous choisissons le capteur thermique plan à air. Ainsi, dans ce dernier, nous admettons par hypothèses que :

- Le transfert de chaleur se fait au régime transitoire de façon unidirectionnelle et perpendiculaire à ce même capteur ;
- Les matériaux ont les propriétés thermoplastiques constants ;
- Le ciel est un corps noir de température équivalente ;
- La couverture en verre transparent est opaque aux rayons infrarouges ;
- L'air entre la vitre et l'absorbeur est transparent.

Notons en plus que le transfert de chaleur dans le capteur se fait suivant le mode de convection, conduction et de rayonnement.

b.2 Modèles mathématiques

❖ Dans le milieu extérieur de vitre

$$M_v \times C_{PV} \frac{dT_{Ve}}{dt} = S \left[\alpha_X G - h_{r_{Ve-ciel}} (T_{Ve} - T_{ciel}) - h_{C_{Ve-am}} (T_{Ve} - T_{am}) - h_{r_{Ve-sol}} (T_{Ve} - T_{sol}) - \frac{K_V}{e_V} (T_{Ve} - T_{Vi}) \right] \quad (8)$$

❖ Dans le milieu intérieur de vitre

$$M_v \times C_{PV} \frac{dT_{Vi}}{dt} = \frac{K_V}{e_V} S (T_{Ve} - T_{Vi}) - h_{r_{Vi-abs}} S (T_{Vi} - T_{abs}) - h_{C_{Vi-f}} S (T_{Vi} - T_f) \quad (9)$$

❖ Dans l'absorbeur

$$M_{abs} \times C_{P_{abs}} \frac{dT_{abs}}{dt} = \tau_V \alpha_{abs} G S + h_{r_{Vi-abs}} S (T_{Vi} - T_{abs}) - h_{C_{Vf-abs}} S (T_f - T_{abs}) - \frac{K_{abs}}{e_{abs}} S (T_{abs} - T_{isol}) \quad (10)$$

❖ Dans l'isolant

$$M_{isol} \times C_{P_{isol}} \frac{dT_{isol}}{dt} = h_{r_{sol-isol}} S (T_{isol} - T_{sol}) - h_{C_{V_{isol-am}}} S (T_{isol} - T_{am}) + \frac{K_{abs}}{e_{abs}} S (T_{abs} - T_{isol}) \quad (11)$$

b.3 Détermination de coefficients d'échanges thermiques

b.3.1 Le coefficient d'échanges thermiques entre la vitre et l'air

$$h_{C_{V_{e-am}}} = 1,27 [(T_{Ve} - T_{am}) \cos \beta]^{1/3} + 2658 V_V \quad (12)$$

T_{Ve} : Température extérieure de la vitre (K) et T_{am} : Température ambiante (K).

N.B : pour notre cas, le capteur sera incliné à 30° par rapport au sol. Donc, $\beta = 30^\circ$.

b.3.2 Le coefficient d'échanges thermiques par convection entre l'isolant et l'air ambiant

$$h_{C_{V_{isol-am}}} = 5,67 + 3,86 V_V \quad (13)$$

V_V = vitesse de vent (m/s).

b.3.3 Le coefficient d'échanges thermiques par convection entre la vitre et l'absorbeur

$$N_u = \frac{h_{C_{V}} L}{\tau_f} \quad (14)$$

N_u : Nombre de Nusselt (sans unité)

$h_{C_{V}}$: coefficient d'échanges thermiques par convection entre la vitre et l'absorbeur ($w/m^2.K$) ;

L : espace compris entre deux plaques (m) ;

τ_f : conductivité thermique de fluide caloporteur (air) en $w/m.^{\circ}c$ (Harma Warda, 2020).

$$Nu = 0,35 Re^{0,8} Pr^{0,333} \quad (15)$$

Où Pr est le nombre de Prandtl. $Pr = \frac{C_p \mu_f}{\tau_f}$ (16)

Et $Re = \frac{\rho_f V_f D_p}{\mu_f}$ (17)

Re : nombre de Reynolds.

D_p : diamètre moyen de pâtes de pains.

V_f : vitesse de fluide (l'air) au niveau de pâtes de pains (m/s)

ρ_f : Masse volumique de fluide (kg/m³)

μ_f : viscosité dynamique de fluide (Pa. s) (Ives Jannot, 2003).

➤ **Nombre de Rayleigh (Ra)**

$$Ra_v = Gr_v \cdot Pr \quad (18)$$

$$Ra_{abs} = Gr_{abs} \cdot Pr \quad (19)$$

$$\bullet Nu_v = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708 \times (1,8 \times \sin \beta)^{1,6}}{Ra_v \times \cos \beta}\right) \left(1 - \frac{1708}{Ra_v \times \cos \beta}\right) + \left[\left(\frac{Ra_v \times \cos \beta}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right] \quad (20)$$

$$\bullet Nu_{abs} = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708 \times (1,8 \times \sin \beta)^{1,6}}{Ra_{abs} \times \cos \beta}\right) \left(1 - \frac{1708}{Ra_{abs} \times \cos \beta}\right) + \left[\left(\frac{Ra_{abs} \times \cos \beta}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right] \quad (21)$$

b.3.4 Nombre de Grashoff (G)

$$\bullet G_v = \frac{g \gamma \rho^2 \Delta T_{v-f} l^3}{\mu^2} \quad (22)$$

$$\bullet G_{abs} = \frac{g \gamma \rho^2 \Delta T_{v-abs} l^3}{\mu^2} \quad (23)$$

ΔT : Écart de température entre l'air et la plaque (vitre ou absorbeur) [K].

γ : coefficient d'expansion volumique du fluide.

g : accélération de la pesanteur (m/s²)

$$h_{cv_{v-f}} = \frac{\tau_f Nu_v}{L} \quad (24)$$

$h_{cv_{v-f}}$: coefficient d'échanges thermiques par convection entre la vitre et le fluide (w/m².K) ;

$$h_{cv_{f-abs}} = \frac{\tau_f Nu_{abs}}{L} \quad (25)$$

$h_{cv_{f-abs}}$: coefficient d'échange par convection entre le fluide caloporteur et l'absorbeur en w/m².K (Slimane Boughali, 2010).

b.3.5 Coefficient d'échanges par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste

$$h_{r_{ve-ciel}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) \varepsilon_v \sigma (T_{ve} + T_{ciel}) (T_{ve}^2 + T_{ciel}^2) \quad (26)$$

Où ε_v : émissivité de la vitre en % ;

T_{ciel} : température équivalente du ciel (K)

$$T_{ciel} = 0,0552 T_{am}^{3/2}. \quad (27)$$

b.3.6 Coefficient d'échanges par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur

$$h_{r_{vi-abs}} = \sigma \frac{(T_{vi} + T_{abs})(T_{vi}^2 + T_{abs}^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{abs}} - 1\right)} \quad (28)$$

ε_{abs} : Émissivité de l'absorbeur (%)

T_{vi} : Température de la face intérieure de la vitre [K].

T_{abs} : Température de l'absorbeur en [K].

b.3.7 Coefficient d'échanges thermiques par rayonnement entre la vitre et le sol

$$h_{r_{ve-sol}} = \frac{1}{2} \varepsilon_v \sigma (1 + \cos \beta) \sigma (T_{ve} + T_{sol}) (T_{ve}^2 + T_{sol}^2) \quad (29)$$

$$T_{sol} = T_{am} + 2 \quad (30)$$

T_{sol} : température du sol (K).

b.3.7 Coefficient d'échanges thermiques par rayonnement entre l'isolant et le sol

$$h_{r_{is-sol}} = \frac{1}{2} \sigma (1 + (\cos \pi - \beta) \varepsilon_{is} \sigma (T_{isol} + T_{sol}) (T_{isol}^2 + T_{sol}^2)) \quad (31)$$

Où ε_{is} : Emissivité de la plaque arrière isolante du capteur en %.

T_{isol} : Température de la plaque arrière isolante [K].

b.3.8 Coefficient d'échanges thermiques par conduction

$$h_{cd_i} = \frac{\tau_i}{e_i} \quad (32)$$

τ_i : Conductivité thermique du milieu (w/m.°c).

e_i : Épaisseur du milieu (m), (Hadjer Djerifili et Abd Elwahab Cheikhi, 2020).

b.4 Pertes thermiques

Nous avons vu dans le point précédent que le transfert de chaleur au niveau de capteur se fait selon les trois modes connus mais pendant cette opération, la température de l'absorbeur s'avère différente à celle de milieu ambiant ; cela engendre de pertes thermiques. De ce fait, nous allons nous préoccuper par la détermination de leur coefficient.

Hypothèses

Nous considérons que la puissance solaire absorbée par la vitre est négligeable et les pertes latérales sont faibles devant les pertes avant et arrière du capteur.

b.4.1 Coefficient de pertes thermiques avant le capteur

$$U_{av} = \left(\frac{1}{h_r \text{ ve-ciel} + h_r \text{ ve-sol} + h_{cV} \text{ ve-am}} + \frac{e_v}{K_V} \right)^{-1} \quad (33)$$

b.4.2 Coefficient de pertes thermiques en arrière du capteur

$$U_{ar} = \left(\frac{e_{isol}}{\tau_{isol}} + \frac{e_{bois}}{\tau_{bois}} \right)^{-1} \quad (34)$$

b.4.3 Coefficient de pertes thermiques latéral

$$U_{lat} = \frac{\tau_{bois} A_{lat}}{e_{bois} A_c} \quad (35)$$

Avec

A_c : aire du capteur en m^2

A_{lat} : aire latérale du capteur en m^2 .

Ainsi, le coefficient global de pertes thermiques sera :

$$U_L = U_{av} + U_{ar} + U_{lat} \quad (36)$$

b.5 Rendement

Le rendement est la conséquence des pertes thermiques dans le capteur. Celui-ci étant un échangeur de chaleur, joue un rôle protagoniste dans la génération de l'énergie à l'intérieur de four. Cela étant, l'expression analytique de rendement instantané est donné par :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} \quad (37)$$

Où G est l'éclairement en $w.m^2$; Soit le rapport entre la puissance thermique par m^2 du capteur et le flux solaire incident sur le plan du capteur.

$$Q_u = m C_p (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (38)$$

Q_u : puissance utile récupérée par l'air (W). Par ailleurs, $Q_u =$ puissance captée – pertes.

$$\text{Donc, } \eta = \frac{A_{abs} [(\alpha\tau)_{eff} G - U_L (T_{abs} - T_{am})]}{A_c G} \quad (39)$$

7. Fonctionnement

Le four solaire sera fonctionnel à la fois le jour et la nuit, aux heures bien définies par les boulangers.

c.1 Pendant le jour

Nous rappelons que le four reçoit de l'énergie solaire et la convertie en énergie calorifique à une température élevée grâce au capteur thermique, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur qui est l'air pour notre cas. Le tableau repris ci-dessous étale les différentes températures mensuelles dans la ville de Boma.

Tableau I : *Relevé climatologique dans la ville de Boma en 2023*

Mois	Janv.	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Total Annuel	Total Moyen
T_{xm}	33,3	34,0	34,4	33,1	29,1	29,9	29,3	29,3	29,4	33,0	33,2	33,4	381,4	31,7
T_{nm}	22,3	22,5	23,0	22,6	22,4	18,6	17,3	18,6	19,3	22,5	23,1	23,0	255,2	21,3
T°_m	27,2	27,4	27,9	27,8	27,1	23,6	22,8	23,4	23,4	23,8	27,2	27,6	309,2	25,7
RR	151	53,1	249	153	67	1,0	0,4	2,3	1,0	80,5	338,9	179,6	107,68	

Source : service météorologique, mairie de Boma (lu le 26 Octobre 2024).

Légendes

T : Température en degré Celsius

T°_m : Température moyenne

T_{xm} : Température maximale moyenne

RR : Hauteur d'eau tombée (en millimètre).

T_{nm} : Température minimale moyenne

Cela nous permet d'évaluer l'allure de graphique de l'évolution de températures dans la ville de Boma.

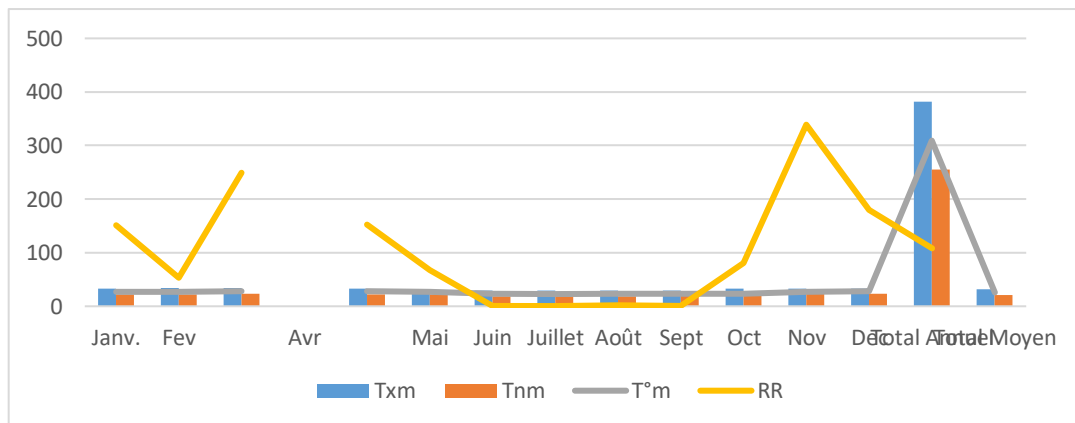


Figure VI : *graphique d'évolution annuelle de températures à Boma en 2023.*

c.2 Pendant la nuit

Le système sera équipé d'une source d'appoint pour assurer la relève dans la fourniture de l'énergie thermique pendant la période de non ensoleillement. À cet effet, il sera placé des modules PV munis de régulateur de tension et les accumulateurs d'autonomie dont l'objectif est de produire l'énergie électrique capable de provoquer la vaporisation de l'eau contenue dans le réservoir à partir de résistance chauffante.

Ainsi, la vapeur produite constitue l'énergie thermique dont on a besoin pour sécher les pâtes de pains. La température à l'intérieur de four dépend du volume de chambre de séchage tandis que la quantité de chaleur dégagée par la résistance dépend de sa puissance électrique et de la durée selon la relation $Q = R I^2 t$. (40) (Q en joules, I en Ampères et t en seconde).

6.2 Modélisation technologique de notre système

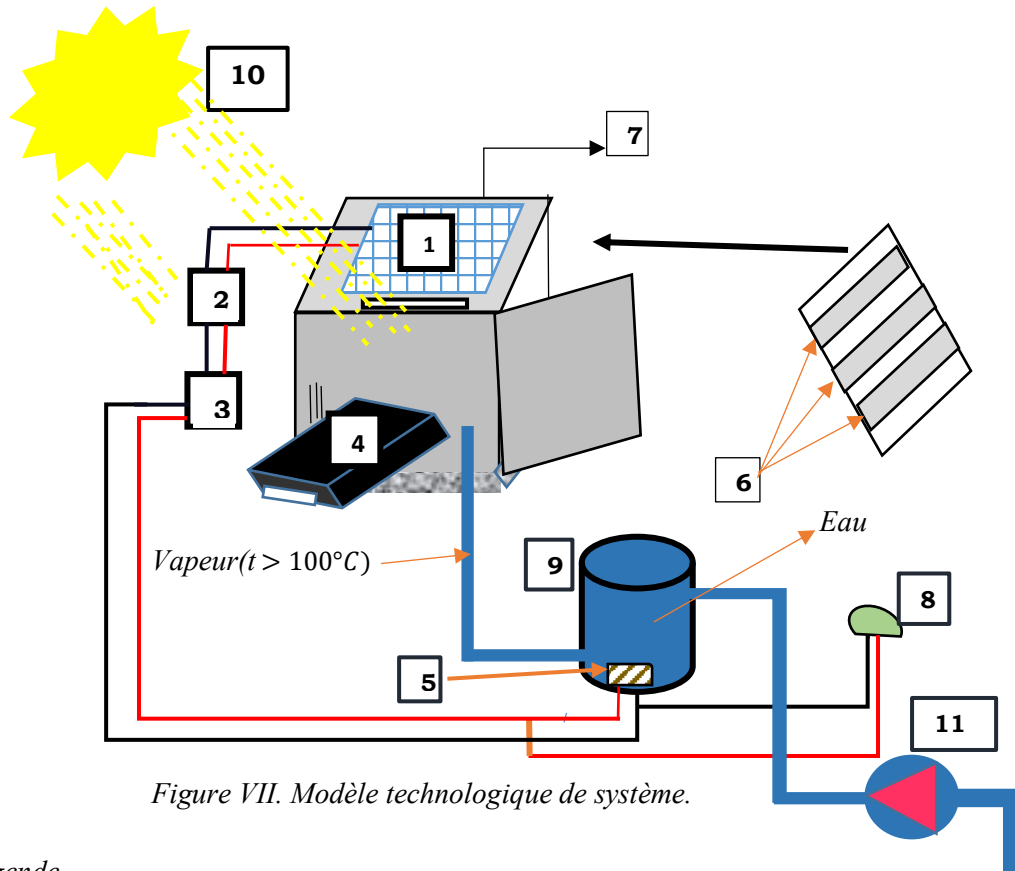


Figure VII. Modèle technologique de système.

Légende

- | | |
|---|--------------------------|
| 1 : modules photovoltaïques | 5 : résistance d'appoint |
| 2 : régulateur | 6 : plateaux de pains |
| 3 : accumulateur d'autonomie | 7 : événement. |
| 4 : échangeur de chaleur ou capteur thermique plan à air. | 9 : réservoir d'eau |
| 8 : Bouton de commande du système PV | 10 : Soleil |
| 11 : pompe hydraulique | |

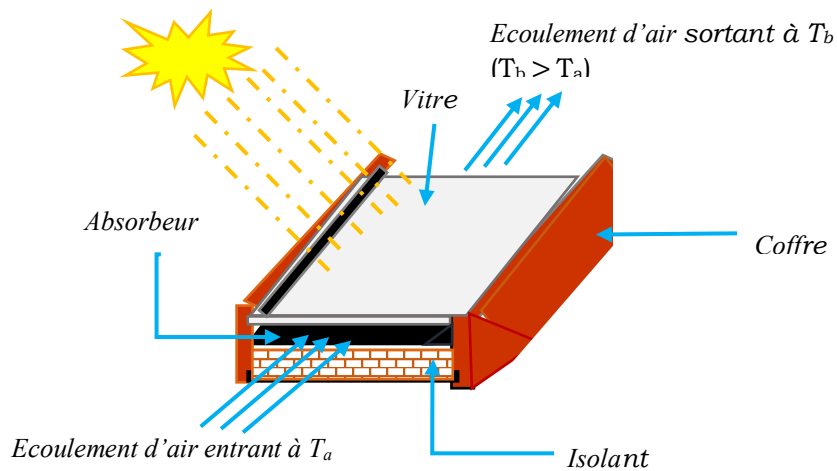


Figure VIII. Structure d'un capteur thermique plan à air (Hadjer Djerifili et Abd Elwahab Cheikhi, 2020)

6.2.1 Etude de composants de capteur thermique plan à air

1. La vitre

Etant une couverture, La vitre (le verre) permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'**effet de serre**.

<i>Verre</i>	<i>Réflexion</i>	<i>Absorption</i>	<i>Transmission</i>
<i>Verre Clair</i>	8%	9%	83%
<i>Verre basse teneur en Fe₂O₃</i>	8%	2%	90%

Tableau II.: Quelques caractéristiques optiques des verres (Aghilas Brahimi, Algérie)

2. L'absorbeur

C'est généralement un corps noir qui absorbe tous les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge en les convertissant en énergie calorifique. En ce sens, sa conductivité thermique doit être élevée.

<i>Matière</i>	<i>Conductivité(w/m°C)</i>	<i>Coefficient de dilatation</i>
<i>Aluminium</i>	240	2,38
<i>Cuivre</i>	380	1,65
<i>Zinc</i>	112	2,9
<i>Acier</i>	52	1,15
<i>Inox</i>	52	1,15
<i>Plastique</i>	0,2-0,4	7-20

Tableau III. Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur (Aghilas Brahimi, Algérie)

3. L'isolation

Elle sert à limiter les pertes thermiques par la conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan.

Les quelques isolants les plus utilisés sont données au tableau IV (Harma Warda, Algérie)

<i>Isolant</i>	<i>Conductivité thermique à 500w/m. °C max</i>	<i>Température Max</i>
<i>Laine de verre</i>	0,041	150
<i>Polyuréthane</i>	0,027	110
<i>Polystyrène</i>	0,039	85

Tableau IV. Quelques propriétés des isolants

4. Le coffre ou le boîtier

Il contient les différents actifs et assure une protection efficace contre les agents atmosphériques. Ils sont réalisés en acier galvanisé, aluminium et acier inoxydable.

5. Fluide caloporteur

Le fluide (air) est un moyen de transfert de la chaleur collecté par l'absorbeur (Harma Warda, Algérie).

6.2.2 Choix des équipements du réseau solaire photovoltaïque

Par rapport au choix de kits solaires, nous utilisons la méthode numérique par l'usage du logiciel de conception PV SYST qui est très efficace pour les calculs et simulations de systèmes photovoltaïques.

Il permet de faire non seulement le choix optimal de modules PV, de régulateur ou d'accumulateurs d'autonomie mais aussi de déterminer certaines données météorologiques de la ville de Boma comme la vitesse de vent, la température ambiante et autres.

Admettons que la résistance d'un four solaire hybride a une puissance de 9,7 kW et fonctionne la nuit de 22h à 4h, soit 6h de temps. La puissance des modules PV (P_P) seraient 10 kW. Les pertes d'énergies lors de la production, dues à l'inclinaison non corrigée des modules et pertes dans les câbles de connexion sont prises en compte ;

$$N_m = \frac{P_P}{P_{Um}} \quad (41) \quad N_m = \frac{10000 \text{ W}}{220 \text{ W}} \cong 46$$

Où N_m : nombre de modules

P_P : puissance produite et P_{Um} , puissance unitaire de module.

$$N_{mS} = \frac{T_{FR}}{V_{max}} \quad (42) \quad N_{mS} = \frac{48}{24} = 2$$

N_{mS} : nombre de modules en série,

T_{FR} : la tension du régulateur utilisé en V,

V_{max} : la tension maximale du module en V.

$$N_{BP} = \frac{N_m}{N_{mS}}, \quad (43) \quad \text{où } N_{BP} \text{ est le nombre de modules en parallèle.}$$

$$N_{BP} = \frac{46}{2} = 23.$$

L'autonomie du système est de 3 jours pour notre exemple et nous proposons les batteries au plomb 2 V, 1 500 Ah. Pour la suite, le PV système va déterminer et simuler les autres caractéristiques de kit solaire.

Figure IX. Exemple de choix de Modules PV et de régulateur

The screenshot displays the PV SYST software interface for configuring a PV system. Key sections include:

- Liste des sous-champs:** A table listing sub-fields like 'Luxor_LX_220P_156_48.PAN' and 'Universal_Controller_LA_MPPT.RLT' with their respective module and chain counts.
- Resumé système global:** A summary table showing system parameters:

Nombre de modules	46
Surface modules	60 m ²
Puissance PV nominale	10.1 kWc
Puissance PV maximale	9.7 kWdc
Nombre régulateurs	1
Nombre de batteries	168 (24 en série x 7 en parallèle)
Battery pack voltage	48 V
- Configuration Parameters:**
 - Needs: 60.0 kWh/jour, Def. la P.L.O.L acceptable: 5.0%, Autonomie requise: 3.0 jour(s), Tension batterie: 96 V, Capacité conseillée: 2207 Ah, Puissance PV conseillée: 17.8 kWc.
 - Stockage: Conception du sous-champ, Appoint, Schéma simplifié.
 - Aide au dimensionnement: Nom: Champ PV, Orient.: Fixée, Incl. 30.0°, Azim. 0.0°.
 - Sélection du module PV: Luxor, 220 Wp 21V, Si-poly, LX-220P/156-48+, Tri modules par: Puissance.
 - Choisissez le mode de régulation et le régulateur: Régulateur universel, _Générique, Convertisseur de puissance MPPT.
 - Dimensionnement du champ: Nombre de modules et chaînes: 46 modules, 60 m² surface.

Source : logiciel PV SYST

Figure X. Exemple de choix d'accumulateurs d'autonomie

The screenshot displays the PV SYST software interface for configuring battery packs. Key sections include:

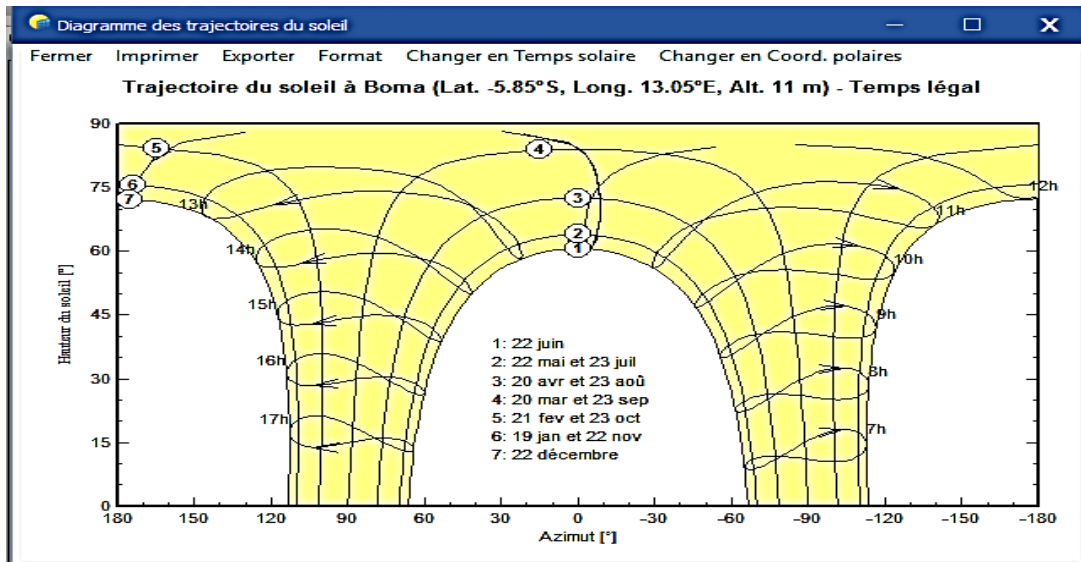
- Liste des sous-champs:** Similar to Figure IX, showing sub-field configurations.
- Resumé système global:** Similar to Figure IX, showing system parameters.
- Configuration Parameters:**
 - Needs: 60.0 kWh/jour, Def. la P.L.O.L acceptable: 5.0%, Autonomie requise: 3.0 jour(s), Tension batterie: 96 V, Capacité conseillée: 2207 Ah, Puissance PV conseillée: 17.8 kWc.
 - Procédure: A 4-step process for pre-dimensioning.
 - Définissez le pack de batteries:
 - Trier les batteries selon: tension (selected), capacité, fabricant.
 - Sonnenschein, 2 V, 1500 Ah, Pb Sealed Gel, Dryfit A600 / 12 OPzV1 Jusqu'à 2011.
 - Pb-acide.
 - 24 batteries en série, 7 batteries en parallèle.
 - Nombre de batteries: 168, Nombre d'éléments: 168.
 - Tension du pack batteries: 48 V, Capacité globale: 10500 Ah, Energie stockée (80 % DOD): 403 kWh, Poids total: 20160 kg, Nbre de cycles à 80 % DOD: 607, Energie totale stockée durant la vie de la batterie: 272 MWh.
 - Température batterie en opération: Mode température: Fixée (local tempéré), Température fixée: 20 °C.

Source : logiciel PV SYST.

❖ Trajectoire Du Soleil

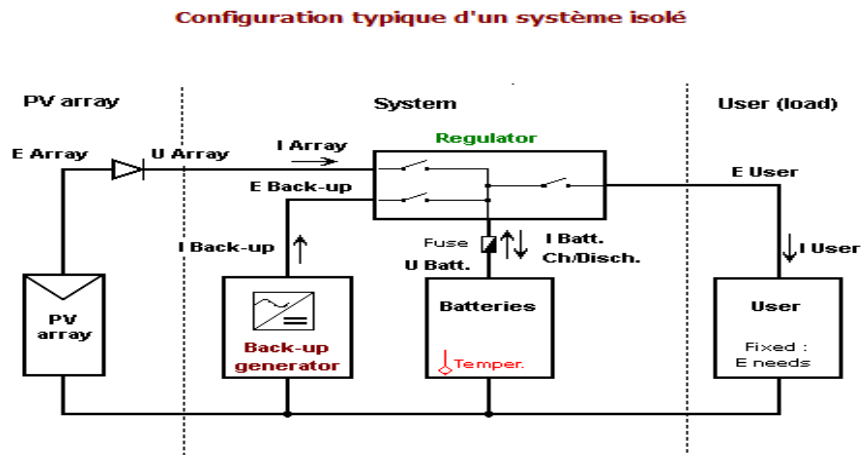
C'est la connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre définie par deux angles : sa hauteur HS et son Azimut AZ (angle avec la direction du Sud, compté négativement vers l'Est).

Figure XI. Diagramme d'Iso-Ombre de la ville de Boma



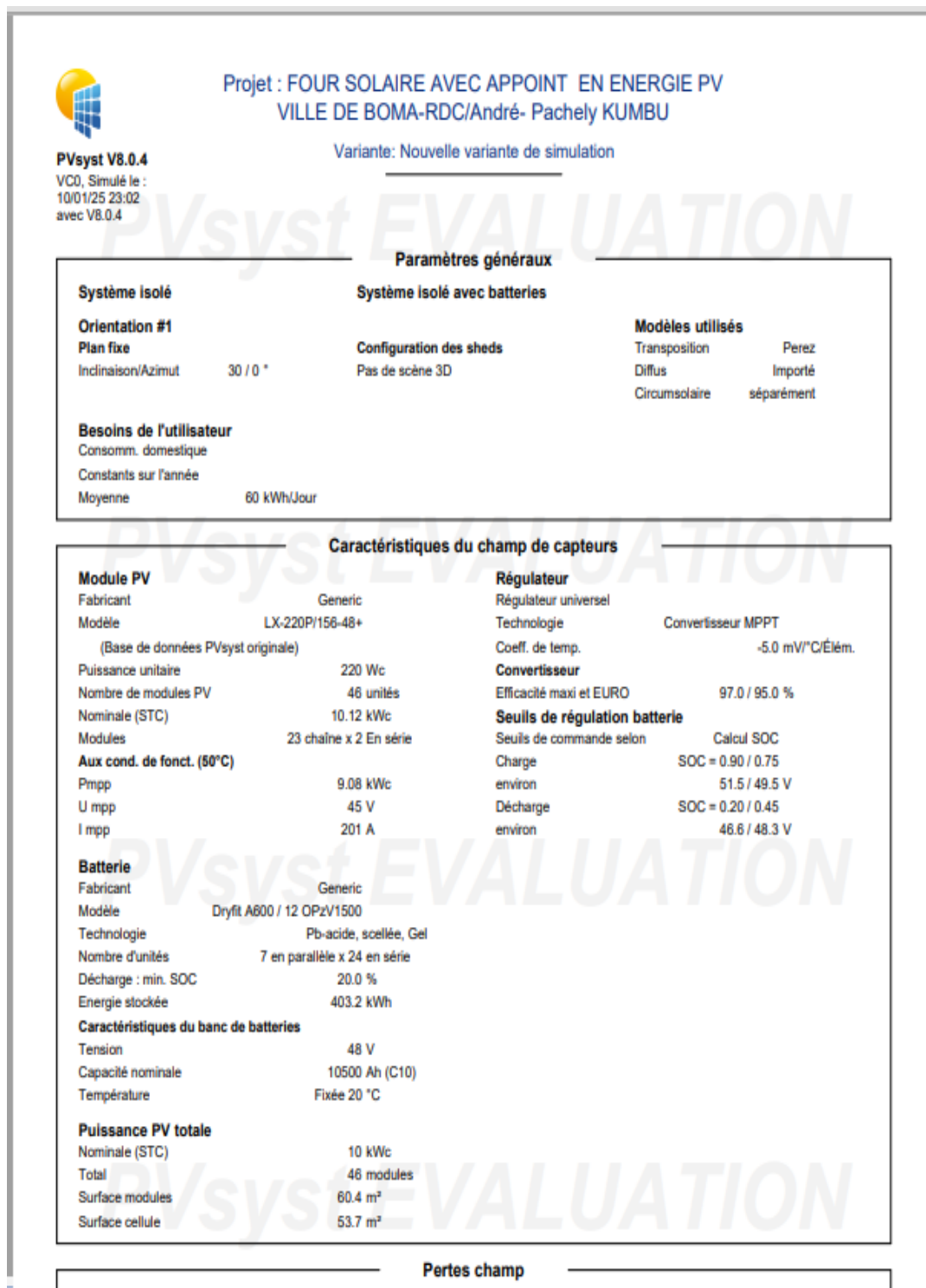
Source : logiciel PV SYST

Figure XII. Schéma simplifié d'un système PV isolé



Source : logiciel PV SYST.

Figure XIII. Rapport de simulation



Source : logiciel PV SYST.

Figure XIV. Quelques données météorologiques de la ville de Boma.

Coordonnées Géographiques Météo mensuelle Carte interactive					
Site Boma (République Démocratique Du Congo)					
Source des données PVGIS TMY 5.2					
	Irradiation globale horizontale kWh/m ² /jour	Irradiation diffuse horizontale kWh/m ² /jour	Température °C	Vitesse du vent m/s	Humidité relative %
Janvier	5.62	2.53	25.7	1.03	88.1
Février	5.27	2.68	25.7	1.09	87.4
Mars	5.64	2.40	25.8	1.04	87.1
Avril	4.79	2.63	26.2	1.07	87.6
Mai	3.83	2.46	25.1	1.10	87.9
Juin	4.79	2.39	23.6	1.21	81.6
Juillet	4.66	2.57	21.6	1.33	80.1
Août	5.05	2.70	21.5	1.47	77.9
Septembre	4.18	2.81	23.3	1.51	79.5
Octobre	4.20	2.69	24.8	1.49	79.2
Novembre	5.78	2.56	25.7	1.17	86.8
Décembre	5.24	2.60	25.3	1.05	89.3
Année	4.92	2.58	24.5	1.2	84.4

Source : logiciel PV SYST.

6. CONCLUSION

A travers cette étude, nous avons clairement démontré comment nous pourrions profiter de l'actuel réchauffement climatique et éviter sensiblement son accroissement dans le futur par la création d'autres sources d'énergie utiles à la vie de l'homme.

Ce qui nous a amené à porter une étude sur le comportement thermique et technologique de four solaire hybride, étant une des alternatives pour la fabrication des pains dans des boulangeries de la ville de Boma. Nous avons fait les bilans thermiques aussi bien dans le système général que dans le capteur thermique. Il est à préciser que la géométrie du système influe sur la température de cuisson.

7. NOMENCLATURE

C : Capacité calorifique massique de l'élément, (J/kg. K)

S : Surface d'échange pates de pains- air, (m²)

S_p : Surface d'échange relative à une section du four, (m²)

m : Masse équivalente d'une 'tranche' de l'élément, (kg)

T_a : Température ambiante, (K)

m_p : Masse des pâtes de pains sur une claie, (kg)

T_c : Température équivalente de la voûte céleste, (K)

T_f : Température superficielle des pâtes de pains, (K)

T_{ii} : Température superficielle de la face interne de l'isolant, (K)

Q_{ev} : Chaleur d'évaporation, (W/m²)

I : intensité de courant en A

- R** : résistance en Ω
- h_{ce}** : Coefficient d'échange thermique par convection forcée entre la face externe de la couverture et le milieu ambiant, ($W/m^2.K$)
- h_{rc}** : Coefficient d'échange thermique par rayonnement adapté entre la face externe de la couverture et la voûte céleste, ($W/m^2.K$)
- h_e** : Coefficient d'échange par convection entre l'élément et l'air asséchant, ($W/m^2.K$)
- T_{ie}** : Température superficielle de la face externe de l'isolant, (K)
- h_r** : Coefficient d'échange thermique par rayonnement adapté entre deux éléments, (W/m^2)
- T_v** : Température superficielle de la couverture, (K)
- T_s** : Température du sol, (K)
- h_{ca}** : Coefficient d'échange thermique par conduction adapté dans la vitre, ou $^{\circ}C$) ($W/m^2.K$)
- θ** : Température de l'air asséchant, (K)
- h_{rs}** : Coefficient d'échange par rayonnement entre la face arrière du four et le sol, ($W/m^2.K$)
- L_v** : Chaleur massique d'évaporation d'eau libre, (J/kg)
- P_v** : Puissance solaire effectivement absorbée par la couverture, (W/m^2)
- Q** : Débit massique de l'écoulement d'air, (kg/s)
- P_{PP}** : Puissance solaire effectivement absorbée par les fruits, (W/m^2)
- L** : Espace entre deux plaques (m)
- G** : éclairement solaire incident sur le capteur, (w/m^2)
- λ_f** : Conductivité thermique de fluide caloporteur, ($W/m.^{\circ}C$)
- v_v** : Vitesse du vent, (m/s)
- ΔT** : Écart de température entre la vitre et l'absorbeur, ($^{\circ}C$)
- α_v** : Coefficient d'absorption de vitre, (%)
- α_{abs}** : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante, (%)
- ϵ_v** : Émissivité de la vitre, (%)
- ϵ_{abs}** : Émissivité de l'absorbeur, (%)
- T_{ciel}** : Température équivalence du ciel, (K)
- T_{abs}** : Température de l'absorbeur, (K)
- T_{vi}** : Température de la face intérieure de la vitre, (K)
- T_{isol}** : Température de la plaque arrière isolante, (K)
- T_{sol}** : température du sol, (K).
- T_{ve}** : Température de la face extérieure de la vitre, (K)
- T_{am}** : Température ambiante, (K)
- A_{lat}** : Aire latérale du capteur, (m^2)
- A_c** : Aire du capteur, (m^2)
- Q_u** : Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur, (W)
- λ_i** : Conductivité thermique du composant, ($w/m.^{\circ}C$)
- e_i** : Épaisseur du composant, (m).
- $h_{r_{is-sol}}$** : Coefficient de transfert radiatif entre l'isolant et le sol, ($w/m^2.^{\circ}C$)
- $h_{r_{ve-sol}}$** : Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le sol, ($w/m^2.^{\circ}C$)
- $h_{cv_{v-ab}}$** : Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur, ($w/m^2.^{\circ}C$)

$h_{r_{vi-abs}}$: Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre interne et le sol, (w/m² °C)

$h_{r_{ve-ciel}}$: Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre externe et le sol, (w/m² °C)

$h_{cv_{ve-am}}$: Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'ambient, (w/m² °C)

$h_{cv_{f-abs}}$: Coefficient d'échange par convection entre le fluide et l'absorbeur (w/m² °C)

$h_{r_{sol-isol}}$: Coefficient d'échange par rayonnement entre isolant et le sol, (w/m² °C)

U_{al} : Coefficient de Perte thermique par la surface latérale de capture, (w/m °C)

U_{ar} : Coefficients de perte thermique vers l'arrière du capteur, (w/m °C)

U_{av} : Coefficients de perte thermique vers l'avant du capteur, (w/m °C)

U_L : Coefficient de pertes thermiques global, (w/m °C)

η : Rendement instantané, (%).

$\frac{dT_p}{dx}$: Gradient de température aux pâtes de pains

PV : photovoltaïque

SNEL : Société nationale d'électricité

8. BIBLIOGRAPHIE

- (1) Boudouh Fateh « Evaluation et exploitation de la chaleur dégagée d'un four de boulangerie pour améliorer le chauffage d'air au lieu de travail et dans une résidence », mémoire de master, université Kasdi Merbeh Ouargla, Algérie, 2023
- (2) Slimane Boughali « Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques », thèse de doctorat, université Hadj Lakhdar Bathna, Algérie, 2010
- (3) J.B. Saulnier, A. Alexandre, « La modélisation thermique par la méthode nodale, Ses principes, ses succès et ses limites », Revue Générale de Thermique 280 (1985) pp.363 – 372.
- (4) N. Chalal, Q. Bellhamri et L ; Bennamoun, « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect », revue des énergies renouvelables SMSTS 08, Alger, 2008
- (5) Yves Jannot, cours de transfert thermique, paris, 2003
- (6) M. Daguinet, 'Les Séchoirs Solaires : Théorie et Pratique', Edition de l'UNESCO, 1985.
- (7) Hadjer Djerifili et Abd Elwahab Cheikhi, « conception et étude d'un capteur solaire thermique portable destiné au séchage », mémoire de master, université Ahmed Draia- Adrar, Algérie, 2020
- (8) Aghilas Brahimi « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau », Mémoire Master, Université de Loraine, Algérie, 2016
- (9) Harma Warda « Etude d'un capteur thermique à air (théorique et expérimentale) », université Ahmed Draia Adrar, 2020
- (11) R. Bertrand, 'Le Rayonnement Solaire - Conversion Thermique et Applications', Technologie et Documentation, Edition Lavoisier, 1980
- (12) JF. Saccadura. Initiation aux transferts thermiques. Cast, Lyon, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 1978
- (13) www.pv syst.com.
- (14) www.les pains aux levains wiki.