

# OBSERVATION DE LA CAUSTIQUE ET ANALYSE THERMIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE CYLINDRO-PARABOLIQUE LORS DE LA CONCEPTION D'UN SECHOIR SOLAIRE

B. Magloire PAKOUZOU<sup>1,2</sup>, Jean M'BOLIGUIPA<sup>1</sup>, Vinci de Dieu B. BOKOYO<sup>1</sup>,  
Boureima DIANDA<sup>2</sup>, Thierry GBEMBONGO<sup>1,3</sup>, Auguste MACKPAYEN<sup>1</sup>, Joseph BATHIEBO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Energétique Carnot, Faculté des Sciences, Université de Bangui, R.C.A.

<sup>2</sup>Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables, Université Ougai PR. JOSEPH KI-ZERBO, Burkina F.

<sup>3</sup>Laboratoire de Mathématiques et Physique des Systèmes-Groupe de Mécanique et Energétique, Perpignan.

[mb.pakouzou@gmail.com](mailto:mb.pakouzou@gmail.com) et [dj.bathiebo@gmail.com](mailto:dj.bathiebo@gmail.com)

1

**Résumé:** Des séchoirs solaires indirects, à capteur plan, constituent des dispositifs appropriés pour le séchage des produits agricoles, surtout dans les pays en voie de développement. Aussi, la circulation de l'air séchant dans ces capteurs est fréquemment assurée par un ventilateur ou une pompe motorisée. Mais des nombreuses recherches effectuées visent à l'amélioration des performances thermiques desdits capteurs. Ces performances exigent donc un coût de production et d'investissement élevé.

La substitution du capteur plan par un collecteur Cylindro-Parabolique pourrait être une nouvelle réponse à cette question importante.

Une étude des caustiques (où l'absorbeur est logé) par réflexion des miroirs d'un capteur à concentration et son bilan thermique sont les recettes choisies pour dimensionner le nouveau collecteur cylindro-parabolique et simuler les températures de ses composants.

L'ultime but du présent travail est d'intégrer ce nouveau capteur (cylindro-parabolique) à une cage, formant dès lors un séchoir solaire agricole innovant.

**Mots-clés:** Caustique-Cylindro-Parabolique-Concentration -Dimensions- Simulation-Séchoir solaire.

## NOMENCLATURE

F: foyer (Point)	I: rayonnement solaire direct ( $W/m^2$ )
f: distance focale (m)	$q_a$ : flux absorbé ( $W/m^2$ )
P: puissance nécessaire du collecteur (W)	p: paramètre de la parabole
HJ: enthalpie de l'air séchant (kJ/kg.ASA)	$S_c$ : Surface de captation ( $m^2$ )
$K_{eff}$ : conductivité effective de l'air	$A_i$ : aire d'une tranche ( $m^2$ )
$h_i$ : coefficients de transfert ( $W/m^2.K$ )	dz: longueur d'une tranche (m)
$D_i, d$ : diamètres (m)	$C_g$ : concentration géométrique
$q_v$ : débit volumique ( $m^3.s^{-1}$ )	$C_1, C_2, C_3$ : chaleurs spécifiques ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$q_m$ : débit massique ( $kg.s^{-1}$ )	$T_1, T_2, T_3$ : Températures (K)

## 1. INTRODUCTION

Le séchage solaire, technique de conservation adaptée dans les pays ensoleillés [6], a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques. Mais ces études adjoignent aux capteurs plans, l'élément fondamental du système, les brasseurs [7], ou superposent des vitres [16], soit introduire des ailettes [1], ou encore proposent différentes configurations de l'absorbeur [3, 12], dans l'objectif de renforcer leurs performances thermiques. Ainsi, ces améliorations imposent un coût d'investissement élevé [17]; ce qui pourrait constituer un obstacle, quant à l'appropriation des séchoirs.

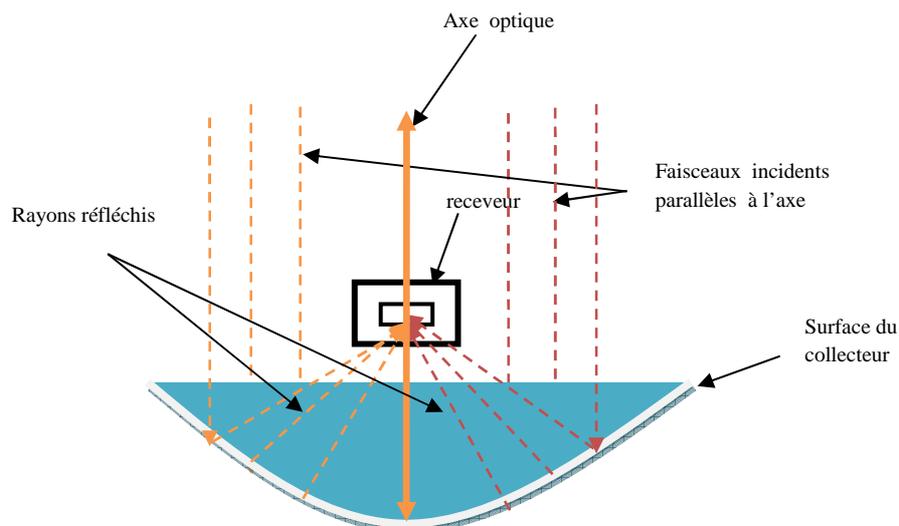
Le choix d'un capteur à concentration serait un compromis technico-économique, contournant l'écueil lié à l'amélioration d'un capteur plan, aussi une alternative pour régler la faible densité énergétique du rayonnement solaire incident [18]. Le bon niveau de température, qui y est maintenu, accroît l'efficacité de l'air asséchant et conséquemment, la vitesse du séchage paraît convenable.

Le modèle choisi pour dimensionner notre capteur est d'étudier sa causticité, faire l'analyse thermique des différents transferts de chaleur en son sein, l'appliquer à une cage, formant dès lors un séchoir solaire agricole.

## 2. CAUSTICITE DU CAPTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE

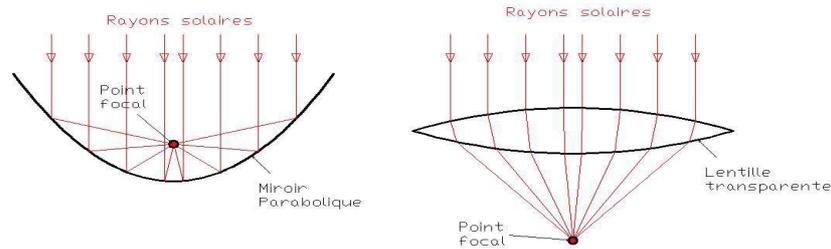
### 2.1 Définition

Un concentrateur cylindro-parabolique est d'autant plus efficace qu'il est stigmatique pour des rayons solaires parallèles, comme témoigne la figure suivante:



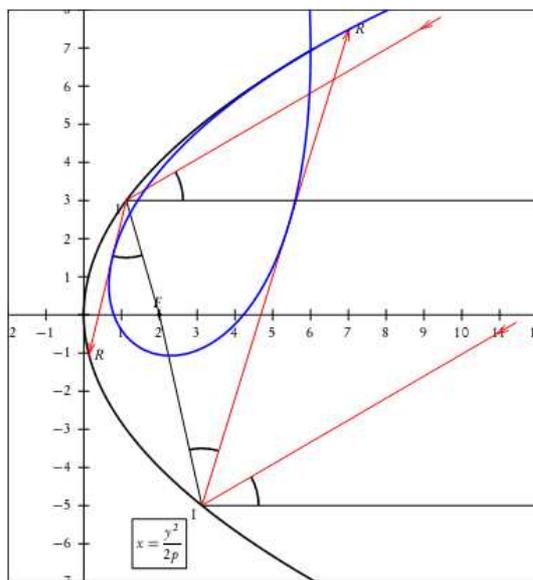
**Fig.1:** Stigmatisme d'un collecteur pour les faisceaux parallèles à son axe [18].

On appelle *caustique*, la courbe (zone) où se rassemblent des rayons réfléchis (*cata caustique*) ou réfractés (*dia caustique*) et où ces rayons ont une force brûlante [15].



**Fig.2:** Zones de concentration par réflexion (à gauche) et réfraction (à droite).

## 2.2 Forme de la caustique [15, 19].



**Fig.3:** Caustique d'un C.C.P. par des rayons inclinés.

La construction de la caustique s'appuie sur la propriété suivante: si  $\mu$  est l'inclinaison d'un rayon incident par rapport à l'axe de la parabole, alors «son rayon réfléchi (IR) fait avec le rayon vecteur (IF) l'angle constant  $\mu$ », tel qu'illustrer sur la figure ci-contre.

Notons  $(x_I, y_I)$ , les coordonnées du point d'incidence I sur la parabole.

$$\text{Si } \theta = -\arctan \left( \frac{y_I}{\frac{p}{2} - \frac{y_I^2}{p}} \right) + \pi \quad (1)$$

L'équation du rayon réfléchi (IR) est:

$$y = x \tan \kappa + b \quad (2)$$

Où,

$$\kappa = \theta - \mu \quad (3)$$

$$b = y_I - x_I \tan \kappa \quad (4)$$

Donc, l'équation de la droite (IR) est équivalente à:

$$y - y_I = (x - x_I) \tan \kappa \quad (5)$$

Un programme de simulation nous permettra d'observer les limites de la zone où les rayons réfléchis sont plus ardents et d'y héberger l'absorbeur du nouveau collecteur (§ 5.1, page 7).

### 3 DIMENSIONNEMENT DU CONCENTRATEUR

#### 3.1 Puissance nécessaire du collecteur

L'objectif fixé est de sécher 2 kg de gombo en 5 heures, soit y extraire 1.7kg d'eau en 5 heures. Ainsi, la puissance nécessaire à fournir au concentrateur est déterminée par:

$$P = q_m \times HJ \quad (6)$$

$$\text{Soit } \underline{P \approx 360W}$$

Avec:

**HJ**  $\approx 108\text{kJ.kg}^{-1}$  d'ASA, enthalpie (contenu énergétique) de l'air séchant à 70°C.

**q<sub>m</sub>**  $\approx 12\text{kg.h}^{-1}$ : débit massique d'air sec et chaud.

#### 3.2 Surface de captation du collecteur

La surface du collecteur, S<sub>c</sub>, pouvant apporter cette puissance est évaluée par:

$$P = S_c \times q_a \quad (7)$$

Elle vaut: 1,5m<sup>2</sup>.

### 4 BILAN THERMIQUE DANS LE BLOC ABSORBEUR DU CONCENTRATEUR, [5, 13]

Le receveur tubulaire, en métal peint en noir, placé au foyer du concentrateur, absorbe le flux solaire réfléchi, puis le convertit en chaleur, transmise ensuite à l'air séchant, qui se promène à l'intérieur même de l'absorbeur (fig.7, page 10).

L'analyse thermique au sein du bloc capteur est une étape fondamentale pour sa mise en forme et l'amélioration de ses rendements. Les différents échanges de chaleur dans l'absorbeur sont repartis de la manière suivante:

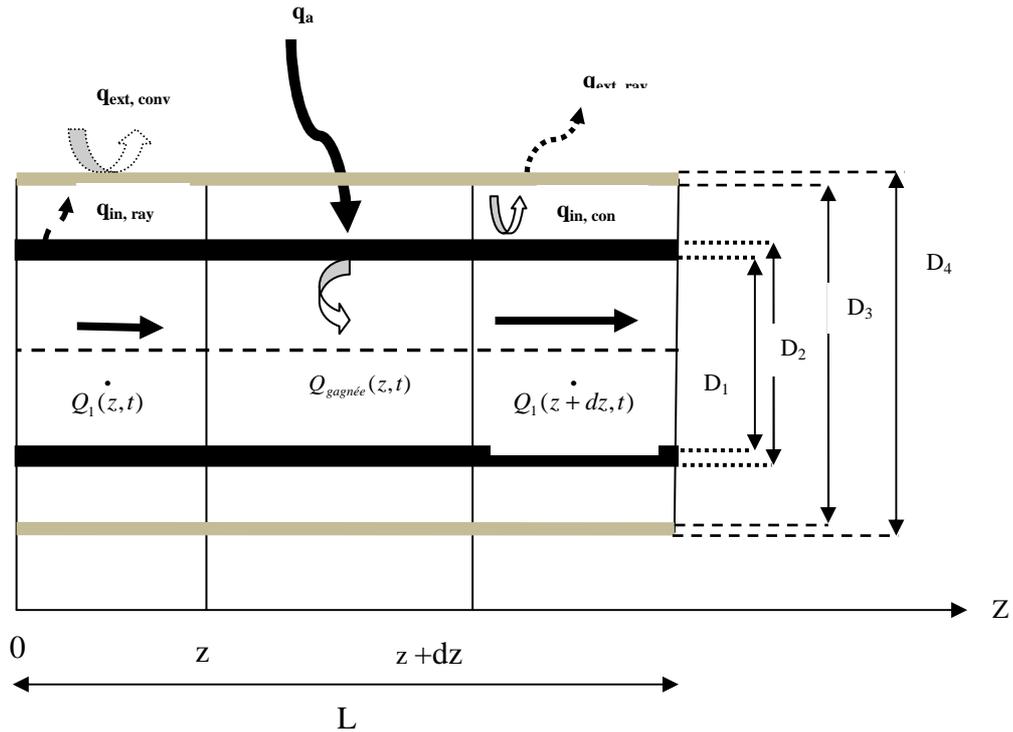


Fig.5: Bilan thermique dans une tranche dz du receveur

#### 4.1 Transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'air sécheur

La variation de chaleur du fluide caloporteur, pendant un temps  $t$  dans un élément de longueur  $dz$ , à la position  $z$  du tube absorbeur, est donnée par l'égalité suivante:

$$\rho_1 C_1 A_1 \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial t} = -\rho_1 C_1 q_v \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} + q_w(z, t) \quad (8)$$

C'est une e.d.p. dont la solution,  $T_1(z, t)$ , est la température de l'air séchant, circulant à l'intérieur du canister.

$$q_w(z, t) = h_1 \pi D_1 (T_2 - T_1): \text{Chaleur prêtée au fluide séchant par convection} \quad (9)$$

#### 4.2 Analyse thermique du receveur

Par analogie à l'équation (8), le bilan thermique du receveur est ainsi établi:

$$\rho_2 C_2 A_2 \frac{\partial T_2(z, t)}{\partial t} = q_a(t) - q_{in}(t) - q_w(t) \quad (10)$$

Dont la solution est la température du receveur,  $T_2(z, t)$ .

Où,

$$q_a(t) = I \times (\rho \tau_3 \alpha_2) \times C_g \times A_2 / dz: \text{flux absorbé par la tranche dz du receveur, (W/m)} \quad (11)$$

### 4.3 Echange de chaleur entre la vitre et l'extérieur

En désignant  $T_3(z, t)$  la température de la couverture transparente du receveur; l'échange thermique entre celle-ci et l'ambiance est établi par l'égalité suivante:

$$\rho_3 C_3 A_3 \frac{\partial T_3(z, t)}{\partial t} = q_{in}(z, t) - q_{ext}(z, t) \quad (12)$$

Avec:

$$q_{in}(z, t) = \frac{2\pi K_{eff}}{\ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)} (T_2 - T_3) + \frac{\sigma\pi D_2 (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} : \text{Energie reçue par conduction et par}$$

rayonnement à travers la masse d'air confinée entre l'absorbeur et la vitre, (13)

$$k_{eff} = \max\left(1, 0.386 \times (\text{Pr} \times \text{Ra}_c / (0.861 + \text{Pr}))^{0.25}\right), \text{ Conductivité thermique effective} \quad (14)$$

$$\text{Ra}_c = \frac{[\ln(D_3/D_2)]}{L^3 (D_2^{-3/5} + D_3^{-3/5})^5} \text{Ra}_2, \text{ Rayleigh simplifié} \quad (15)$$

$$L = 0.5(D_3 - D_2), \text{ écart entre l'intérieur et l'extérieur des cylindres} \quad (16)$$

$$q_{ext}(z, t) = h_4 \pi D_4 (T_3 - T_{amb}) + \varepsilon_3 \pi \sigma D_4 (T_3^4 - T_{amb}^4), \text{ chaleur cédée par le verre} \quad (17)$$

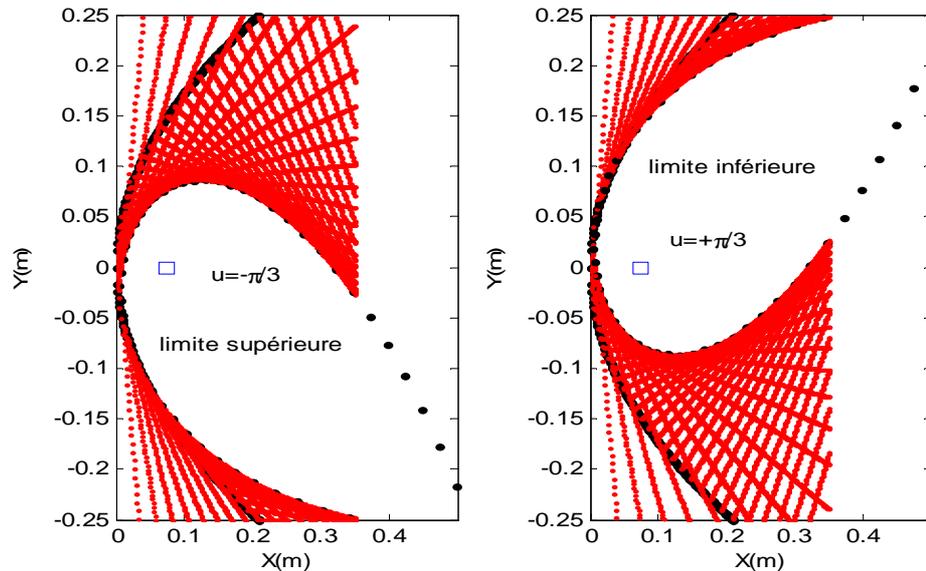
Ces trois équations constituent un système:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 C_1 A_1 \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial t} = -\rho_1 C_1 q_v \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} + h_1 \pi D_1 (T_2 - T_1) \\ \rho_2 C_2 A_2 \frac{\partial T_2(z, t)}{\partial t} = q_a(t) - h_2 (T_2 - T_3) - h_3 (T_2^4 - T_3^4) - h_1 \pi D_1 (T_2 - T_1) \\ \rho_3 C_3 A_3 \frac{\partial T_3(z, t)}{\partial t} = h_2 (T_2 - T_3) + h_3 (T_2^4 - T_3^4) - h_4 \pi D_4 (T_3 - T_{amb}) - h_5 (T_3^4 - T_{amb}^4) \end{array} \right.$$

## 5 RESULTATS ET DISCUSSION

### 5.1 Observation des limites de la Caustique

Un programme de simulation (matlab 7.8) permet de visualiser les extrémités de la caustique, au voisinage du foyer (carré bleu) du nouveau collecteur, dont la forme est donnée sur la figure 5 (page 7), des caustiques semblables à celle déterminée par Luque M. [15].



**Fig.5:** Extrêmes de la caustique du capteur pour une journée d'ensoleillement, de 8<sup>h</sup> à 16<sup>h</sup>

Des images qui rassurent. Pour toute une journée d'ensoleillement, avec un concentrateur de surface utile de  $0.5m^2$  exposée, le foyer dudit concentrateur se trouve bien situé à son intérieur et totalement enfermé. Ainsi, l'efficacité du nouveau collecteur paraît évidente, quant aux températures de ses composants!

### 5.2 Dimensions caractéristiques du capteur

Avec la surface de captation déterminée ci-avant (page 4),  $1.5m^2$ , une série de grandeurs caractéristiques correspondantes du concentrateur, telles que discutées ci-dessous sont possibles:

**Tableau:** Dimensions du nouveau collecteur:

$Sc = 1.5m^2$ , Longueur = 2m, largeur = 0.75m et rayon = 37.5cm

Profondeur, h [cm]	Focale, f [cm]	Conc. géométrique, $C_g$	Caustique, $D_C$ [mm]
15	23,4	4.2	180,5
<b>20</b>	<b>17,5</b>	<b>4.57</b>	<b>164,0</b>
25	14,0	3.84	195,0

Dans ce tableau, les focales paraissent très acceptables, mais les concentrations géométriques extrêmes sont, hélas, minables; or le coefficient de concentration est le *facteur fondamental* qui caractérise la performance de notre système. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante, et plus le thermosiphon favorisant l'écoulement du fluide (air) s'accroît. Aussi, le foyer du concentrateur se loge toujours au-dedans de la caustique, validant ainsi l'hypothèse simulée de la figure 5 (page 7).

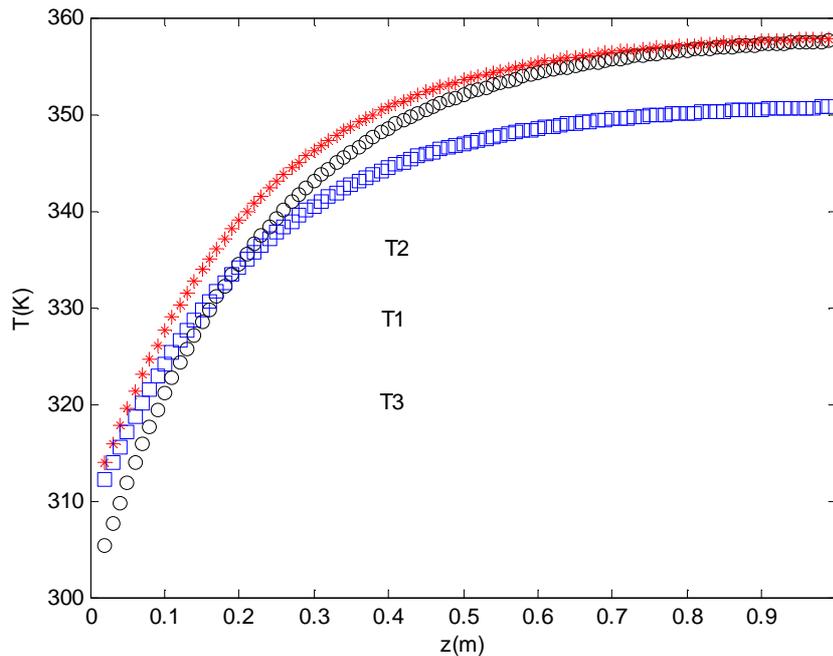
### 5.3 Discrétisation et Résolution des équations d'échange thermique

La méthode d'approximation par différence finie progressive est choisie pour la discrétisation du système des équations de transferts de chaleur au sein du collecteur, qui se transforme sous forme matricielle suivante.

$$\begin{pmatrix} F_3 & -h_{12} & 0 \\ -h_{12} & G_2 & -h_6 \\ 0 & -h_6 & H_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(j, n+1) \\ T_2(j, n+1) \\ T_3(j, n+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_6 \\ G_4 \\ H_5 \end{pmatrix}$$

La méthode de résolution est celle d'itération de Gauss Seidel. Elle consiste à fixer arbitrairement au départ la température des éléments constituant le capteur (température ambiante du lieu, par exemple) et, calculer ainsi les différents coefficients de transferts thermiques,  $h_i$ , desdits éléments. Ensuite, à partir des valeurs de  $h_i$  trouvés, on recalcule de nouveau les températures; ainsi de suite jusqu'à rapprocher les températures entre deux instants consécutifs.

Ainsi, le programme de simulation établi, avec le logiciel matlab (2009), pour un ensoleillement moyen de  $600W/m^2$ , permet d'avoir l'évolution spéculative des températures  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  du fluide, de l'absorbeur et de la vitre, respectivement, illustrée par la figure 6 (page 9):



**Fig.6:** Evolution des températures de la vitre (T3, bleu), du fluide (T1, noir) et de l'absorbeur (T2)

Dès que le concentrateur est exposé et reçoit du flux solaire, les différents éléments (fluide, receveur, verre) constituant l'absorbeur, mettent moins de temps pour se chauffer, et atteignent des températures finales de **90°C** environ, à la sortie du tube, avec un concentrateur de **0.5m<sup>2</sup>** d'aire simplement. Des résultats optimistes, laborieusement atteints par des capteurs plans. Comparativement aux résultats de:

- AHMED-ZAID A. et al. [1], utilisant de capteurs plans, avec une surface de  $1,28m^2$ , munis d'obstacles des différentes géométries, dont la température de l'air sécheur voisine  $85^{\circ}C$  et  $54^{\circ}C$  avec un capteur plan sans chicane d'autre part, sous un flux solaire global constant de  $1063,5W/m^2$ .
- SEMMAR D. et al. [20], se servant d'un capteur plan à air, constituée d'une vitre, sous un ensoleillement dont le maximum dépasse  $800W/m^2$ , dont la plus grande température à sa sortie est de l'ordre de  $80^{\circ}C$ .
- MALENGUINZA S. [16], simulant les températures de l'absorbeur et du fluide air, dans un *capteur plan double vitrage*, pour une journée d'ensoleillement. Les valeurs maximales desdites températures s'avoisinent  $100^{\circ}C$ .

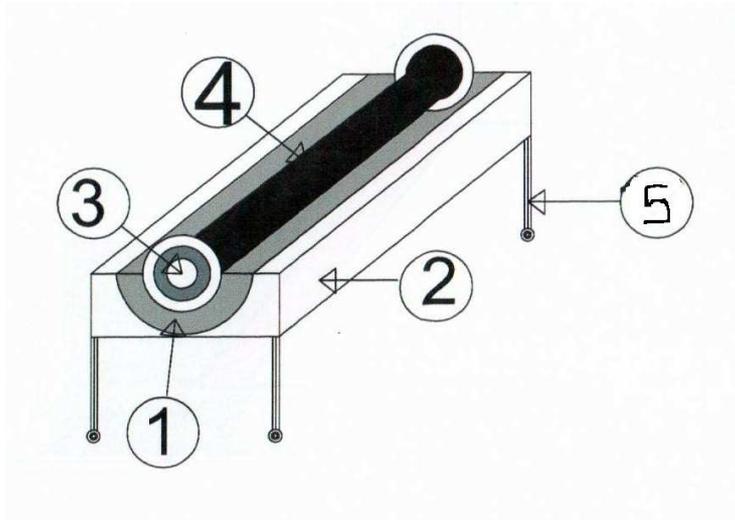
- CHEKIROU W et al. [5], ayant simulé la température du fluide caloporteur à la sortie du receveur d'un *concentrateur cylindro-parabolique*, de longueur 12m, estimée à 145°C.
- GOYAL R.K et al. [11] ont expérimenté un séchoir solaire, dont le capteur est un *réflecteur à concentration*. Il révèle de cette expérience que la température maximale de l'absorbeur, pour une journée d'insolation, est supérieure à celle du fluide de service. Cette valeur est évaluée à 100°C.

Au vu de ces comparaisons, nous pourrions donc valider nos résultats.

Nous remarquons également une élévation similaire des températures des éléments de l'absorbeur. La température de la vitre (en bleue) est plus petite que celle de l'air fluide (T<sub>1</sub>), elle aussi inférieure à la température de l'absorbeur (rouge).

Par ailleurs, les températures du receveur et de l'air séchant sont restées longtemps confondues après qu'elles aient atteint leurs valeurs maximales. Ces deux températures demeurent supérieures à la température de la vitre.

### 6 IMAGE SYNOPTIQUE DU NOUVEAU CAPTEUR



**Fig.7:** Capteur cylindro-parabolique  
**Légende:** 1-Surface réfléchissante, 2-Cadre, 3-trou d'entrée d'air, 4-receveur, 5-Support

## 7 CONCLUSION

L'objectif final du présent travail est d'apporter une petite contribution au séchage solaire. Il s'intéresse essentiellement au dimensionnement d'un capteur solaire cylindro-parabolique, élément fondamental du système, à partir de sa causticité, zone de convergence des rayons solaires réfléchis, où est hébergé son receveur. La simulation des performances dudit capteur présente des résultats prometteurs.

Il sort de nos résultats qu'il est nécessaire de bien situer la zone où les rayons réfléchis se logent (caustique), augmentant ainsi le succès du nouveau collecteur, à moindre prix.

Les températures simulées, du receveur et de l'air caloporteur, paraissent bon escient, et permettent de sécher *2kg de gombo en 5heures*, sans en dénaturer les éléments nutritifs [17, 18]. Le niveau remarquable des températures, dans l'absorbeur, augmente l'efficacité de l'air asséchant [12], tout en corrigeant la faible densité énergétique du rayonnement solaire [10].

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AHMED-ZAID A. et al.: *Amélioration des performances des capteurs solaires plans à air*, Rev. Energ. Ren., Vol.4, 69-78 (2001).
- [2] BENKHELIFA A.: *Optimisation d'un Capteur Solaire Plan*, Rev. Energ. Ren: Physique Energétique, 13-18 (1998).
- [3] BERNARD J.: *Energie solaire, calculs et optimisations* (2004).
- [4] BOUGUETALA N.: *Contribution à l'étude et à la simulation d'un concentrateur cylindro-Parabolique*, Magister, Université de Constantine 1, Algérie, 105 p (2013).
- [5] CHEKIROU W. et al.: *Analyse Thermique pour l'absorbeur d'un concentrateur cylindro-parabolique*, Rev. Energ. Ren., ICRES-07, 21-28 (2007).
- [6] DADDA B. et al.: *Réalisation d'un séchoir solaire indirect*, Rev. Energies Renouvelables, SMSTS'08 Alger, 127-134 (2008).
- [7] DISSA A. O. et al.: *Modelling and experimental validation of the layer indirect solar drying of mango slices*, Renewable Energy 34, 1000-1008 (2009).
- [8] DUFFIE J. A. et al.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley-Interscience, New York (1980).
- [9] ESKIN N.: *Transient performance analysis of cylindrical parabolic concentrating Collectors and comparaison with experimental résultats*, Energy Conversion and Management, Vol. 40, 175-191 (1999).
- [10] GAMA A. et al.: *Etude et Réalisation d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique avec Poursuite solaire aveugle*, Rev. Energ. Ren., Vol. 11 N°3, 437-451 (2008).
- [11] GOYAL R. K. et al.: *Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: A new concept*, Solar Energy, Vol. 60, N°1, 41-48 (1997).
- [12] HENAOUI M. et al.: *Etude de l'écoulement de l'air dans un capteur solaire plan muni d'obstacles rectangulaires perforés*, IJSTE, Vol. 3, 55-59 (2015)
- [13] ILHEM Z.: *Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire Parabolique*, Magister, Université Mentouri – Constantine, Algérie, 105 p (2005).
- [14] JANNOT Y. et al.: *Transferts Thermiques cours et 55 exercices corrigés*, Edilivre, Ecole des Mines, 2<sup>ème</sup> année, Nancy (2012).
- [15] LUQUE M.: *Caustique de miroirs paraboliques et sphériques avec PStricks* (2010).
- [16] MALENGUINZA S.: *Optimisation du capteur double vitrage par la méthode des plans d'expériences*, thèse de doctorat, université d'Abomey Calavi, Bénin (2012).
- [17] NADIR N.: *Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire*, Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 115 p (2007).

[18] **PAKOUZOU B. M. et al:** *Conception d'un capteur cylindro-parabolique appliqué à un séchoir solaire agricole*, 16<sup>èmes</sup> Journées Internationales des Thermiques, Marrakech au Maroc (2013).

[19] **RAUD R.:** *Association Soleil & Vapeur. Capteur solaire et production de vapeur*, (2012).

[20] **SEMMAR D. et al:** *Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air*, Rev. Energ. Ren.: Physique Energétique, 33-38 (1998).

[21] **TOUATI B.:** *Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte*, Thèse de doctorat, Universités de Lyon et de Tlemcen (2008).

**Merci, Christian et Apsolon, pour le dessin technique!**