

Caractérisation énergétique d'une cuisine solaire pour un restaurant.

Energy characterisation of a solar kitchen for a restaurant

Bastien Sanglard^{1*}, Xabier Apaolaza-Pagaoga², Thomas Fasquelle¹, Séverine Barbosa¹ et Benjamin Kadoch¹

¹Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI), CNRS, UMR 7343, Université Aix Marseille, 5 Rue Enrico Fermi, 13013 Marseille

²Groupe de recherche Energy, Département d'ingénierie Mécanique, Thermique et Fluidique, Université de Malaga, Calle Arquitecto Francisco Peñalosa, 6, 29071, Malaga, Espagne

* (auteur correspondant : bastien.sanglard@univ-amu.fr)

Résumé - Cette étude a pour objectif la caractérisation énergétique d'un dispositif de cuisine solaire qui est opérationnel dans le restaurant Le Présage. Ce système de cuisson comprend un collecteur Scheffler, un réflecteur secondaire et une plaque de cuisson. La caractérisation repose sur la méthode des tests standards décrite par la norme ASAE S580.1, fournissant ainsi la puissance standard et le rendement énergétique de l'installation complète (réflecteur primaire, secondaire et plaque de cuisson). Cette caractérisation permet de comparer le système de cuisson avec d'autres cuisines solaires ou conventionnelles.

Abstract - This work aims to energetically characterised a professional solar cooker for a restaurant, Le Présage, which is composed of a Scheffler collector, a secondary reflector and a cooking hob. The characterisation is based on the standard test method following the ASAE S580.1 norm with improvements realised in several work. The standard test allows the calculation of the standardised power of the complete cooker as well as its efficiency. This characterisation allowed comparison with others solar and conventional cookers.

Nomenclature

A	Aire d'ouverture journalière, m ²	T_w	Température de l'eau, °C
c_p	Capacité thermique massique, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	$\overline{T_w}$	Température moyenne de l'eau, °C
f	Distance focale, m	ΔT_w	Différence de température de l'eau, °C
I	Irradiance directe normale (DNI), W.m ²	v	Vitesse de vent, m.s ⁻¹
M	Masse d'eau, kg	η_s	Rendement global standardisé, %
P	Puissance de la cuisine, W	<i>Indices et exposants</i>	
P_s	Puissance standardisée, W	i	Intervalle de 5 min
T_a	Température ambiante, °C		
T_d	Différence de température normalisée, °C		

1. Introduction

La cuisson est un besoin humain fondamental et repose, pour une majorité de la population mondiale, sur l'utilisation directe ou indirecte de combustibles fossiles. Le recours aux énergies fossiles entraîne de fortes émissions de gaz à effet de serre, impacte l'environnement et la santé

humaine. Parmi les alternatives à l'utilisation des énergies fossiles, celle du solaire thermique à concentration, paraît particulièrement intéressante en raison de la disponibilité de la ressource primaire et d'une large gamme de températures des fourneaux obtenue via cette technique.

Dans ce contexte, le projet « Conception de restaurants optimisés pour la cuisine solaire (CROCS) » porté par l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI) et en collaboration avec la Société le Présage [1] s'attèle à caractériser et optimiser une cuisine solaire pour un restaurant à haute qualité environnementale. La cuisine étudiée repose sur l'utilisation d'un concentrateur Scheffler, d'un réflecteur secondaire et d'une plaque de cuisson [2].

La méthode des tests standard, conformément à la norme ASAE S580.1 [3] et sa correction [4], est largement utilisée pour caractériser les performances énergétiques des cuiseurs solaires. Elle permet la caractérisation des performances énergétiques des cuiseurs solaires via la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique stockée dans de l'eau contenue dans une casserole ouverte et dont la montée en température jusqu'à ébullition est enregistrée par thermocouple(s). Cela donne accès à la puissance standardisée et au rendement de l'installation, ces deux paramètres permettant de comparer les cuiseurs solaires entre eux et avec des installations classiques. Cette méthode a déjà été utilisée pour caractériser des cuiseurs solaires familiaux [5], [6]. Cependant, à notre connaissance, un système composé d'un Scheffler, d'un miroir secondaire et d'une casserole n'a pas été étudié complètement.

Le travail présenté ici détaillera la méthode des tests standards ainsi que le banc de test utilisé à l'IUSTI. Ensuite, les résultats de mesure seront exposés, les performances énergétiques seront discutées et des pistes d'améliorations seront présentées.

2. Matériels et méthodes

2.1. Le banc de test

Le banc de test utilisé est composé d'un concentrateur Scheffler, d'un réflecteur secondaire et d'une casserole (voir Figure 1). Le concentrateur Scheffler repose sur l'utilisation d'une portion latérale d'un paraboloïde, et non d'un sommet, afin d'obtenir un point focal déporté. De plus, la structure du collecteur est déformable pour adapter la courbure du paraboloïde à la position journalière du soleil [2]. Ces deux spécificités permettent d'avoir un point focal déporté et fixe durant toute l'année.

Le Scheffler utilisé ici est construit à partir d'un paraboloïde de distance focale $f=1,47$ m et a une surface d'ouverture théorique de 8 m^2 . Ce Scheffler est composé de nombreuses facettes planes rectangulaires de 8 cm par 10 cm et de 15 cm par $2,4\text{ cm}$ de côté. Elles offrent une réflectivité solaire de $80\% \pm 5\%$ [7]. L'ouverture maximale du Scheffler en fonctionnement est de $6,8\text{ m}^2$ au solstice d'hiver. Ce dernier est placé en position verticale sur une remorque ce qui permet sa mise en position dans la direction du sud solaire ; le suivi du soleil est réalisé manuellement avec un ajustement toutes les 5 min . **Le banc de test est également composé d'une plaque trouée en acier galvanisé permettant au flux solaire d'arriver directement sur le fond de la casserole (voir Figure 1). Pour rediriger le flux, un réflecteur secondaire rectangulaire plat d'une réflectivité solaire de 90% (Alanod - MIRO-SUN) est utilisé. Il est placé sous la plaque, légèrement avancé et incliné de 8° (voir Figure 1).** Bien que cette configuration ne corresponde pas à une installation classique, utilisant une plaque de cuisson, elle permet d'utiliser la méthode des tests standards telle quelle.

La casserole utilisée pour réaliser les tests est un faitout en acier inoxydable d'une capacité de 30,7 L pour un diamètre de 40 cm et une masse de 7,33 kg (Comptoir de Bretagne – ref 22356).

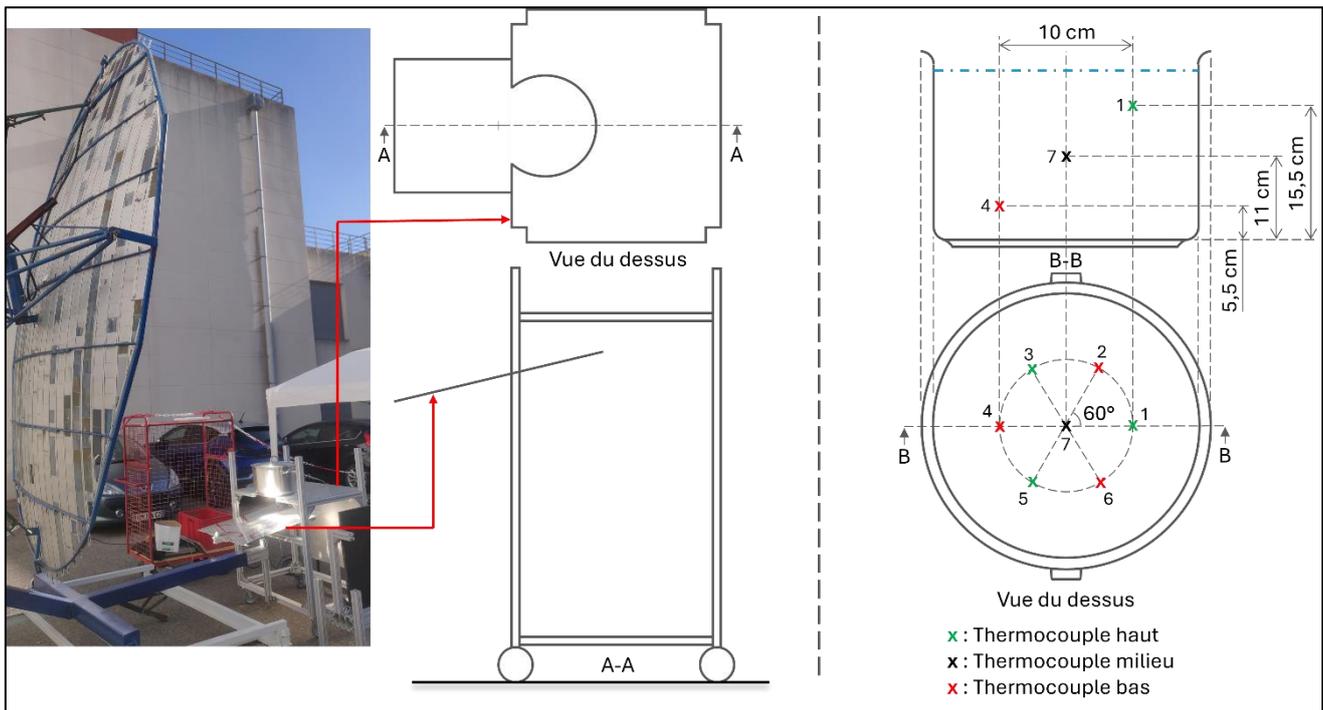


Figure 1 : (Gauche) Photo du banc de test et schéma du chariot avec la plaque trouée et le réflecteur secondaire. (Droite) Schéma de la position des thermocouples pour la mesure de la température de l'eau.

Pour mesurer la température de l'eau, la moyenne des mesures de 7 thermocouples (TC – type T) est utilisée. Les thermocouples sont répartis dans le volume d'eau comme schématisé sur la Figure 1. Les 6 premiers d'entre eux sont repartis sur un diamètre de 10 cm en alternant leurs positions verticales : soit à 5,5 cm du fond soit à 15,5 cm du fond. Le dernier thermocouple est placé au centre de la casserole à 11 cm du fond. La température ambiante est mesurée par un thermocouple (TC - Type K) placé à proximité du chariot et à l'abri du soleil, à côté duquel un anémomètre (Davis 7911) mesure la vitesse du vent. L'ensemble des données précédentes (températures et vent) est récupéré par un enregistreur de données (Graphtec - GL820 midi LOGGER). L'irradiance normale directe est mesurée et enregistrée toutes les minutes par un pyréliomètre (Kipp & Zonen RaZON + PH1). L'ensemble des spécifications des mesures sont présentées Tableau 1.

Paramètres	Indices	Unités	Précisions	Erreur
Masse d'eau	M	kg	0,1 kg	-
Température de l'eau	T_w	°C	0,1 °C	0,05%
Température ambiante	T_a	°C	0,1 °C	0,05%
Vitesse du vent	v	m/s	0,1 m/s	-
Flux solaire incident	I	W/m ²	0,1 W/m ²	2%

Tableau 1 : Liste des spécifications des mesures

2.2. Les tests standards

Les paramètres à mesurer et leurs spécificités sont regroupés dans le Tableau 2 selon la norme ASAE S580.1 [3], [4].

Certains de ces paramètres sont mesurés toutes les secondes (T_w , T_a et v) ou toutes les minutes (I). Ils sont ensuite moyennés sur des intervalles successifs i de 5 min pour pouvoir calculer la puissance de cuisson solaire P_i , la puissance standardisée $P_{s,i}$ et la différence de températures standardisée $T_{d,i}$ pour chaque intervalle selon les équations 1, 2 et 3 respectivement.

<i>Paramètres</i>	<i>Indices</i>	<i>Unités</i>	<i>Spécificités de la norme</i>
Masse d'eau	M	kg	4 kg d'eau/m ² d'ouverture maximale
Température de l'eau	T_w	°C	Mesure à, minimum, 1 cm du fond de la casserole
Température ambiante	T_a	°C	Doit être comprise en 20 °C et 35 °C
Vitesse du vent	v	m/s	Doit être proche de 1 m/s
Flux solaire incident	I	W/m ²	Doit être > 450 W/m ² , $\Delta I < 100$ W/m ² sur 5 min

Tableau 2 : Paramètres mesurés, indices, unités et spécificités de chaque paramètre d'après la norme ASAE S580.1[3] et ses améliorations [4].

$$P_i = \frac{\Delta T_w \cdot M \cdot c_p}{300} \quad (1)$$

$$P_{s,i} = P_i \cdot \frac{850}{I_i} \quad (2)$$

$$T_{d,i} = (\overline{T_{w,i}} - T_{a,i}) \cdot \frac{850}{I_i} \quad (3)$$

Avec c_p la capacité thermique massique de l'eau (prise à température ambiante) et I_i l'irradiance directe moyenne pour chaque intervalle de 5 min. **Il est intéressant de noter que la capacité de stockage thermique de la casserole n'est pas considérée dans ce calcul. Cela s'explique par sa faible influence, car elle ne représente que 1,2 % de celle de la quantité d'eau.**

Classiquement, la normalisation est basée sur une irradiance globale de 1000 W. Cependant, comme l'installation utilisée ici ne concentre que l'irradiance directe, une irradiance représentative de 850 W est utilisée.

Une fois ces paramètres calculés il est possible de tracer l'évolution de la puissance standardisée en fonction de la différence de température. La valeur retenue, notamment pour comparer des installations, est $P_{s,50}$, obtenue pour une différence de température de 50 °C. De plus, le rendement standardisé η_s de l'installation en fonction de la différence de température est calculé grâce à l'équation 4.

$$\eta_{s,i} = \frac{P_{s,i}}{A \cdot I_i} \quad (4)$$

Avec A l'aire d'ouverture du Scheffler du jour.

3. Résultats et discussion

Dans cette section, les résultats du test standard réalisé le 15 janvier 2025 à Château-Gombert, 13013 Marseille (lat - 43,345° N) sont présentés, analysés et discutés. Les mesures ont commencé à 13h00 et le test à 13h06, heures locales, alors que le midi solaire était à 12h47. La quantité d'eau placée dans la casserole était de 27,19 kg.

3.1. Les conditions expérimentales

Les évolutions temporelles des températures mesurées dans l'eau (température des thermocouples, numérotés de 1 à 7, et celle moyenne) et de la température ambiante sont reportées sur la Figure 2. Elle présente également les mesures réalisées durant ce test de l'irradiance solaire directe moyenne pour chaque intervalle de 5 minutes avec les incertitudes élargies à 95% de confiance.

Il est à noter que la température ambiante reste quasiment constante sur toute la durée du test avec une valeur moyenne de $13\text{ °C} \pm 1,4\text{ °C}$. Les mesures montrent que l'installation permet bien d'attendre 100 °C mais lentement (environ 2h30). De plus, les mesures des thermocouples montrent que, au sein de la casserole, la température de l'eau est homogène puisque les courbes des températures sont confondues. Il est néanmoins possible de remarquer que les thermocouples n°4 et n°6 affichent des températures légèrement supérieures aux autres après environ 1h d'expérience.

L'irradiance solaire moyenne varie d'environ 862 W.m^{-2} à 659 W.m^{-2} , avec une diminution de plus en plus rapide avec l'avancement du test. Cependant, ses variations par intervalle de 5 min sont faibles, en moyenne $9,8\text{ W.m}^{-2}$. Les valeurs de l'irradiance sont donc dans les recommandations.

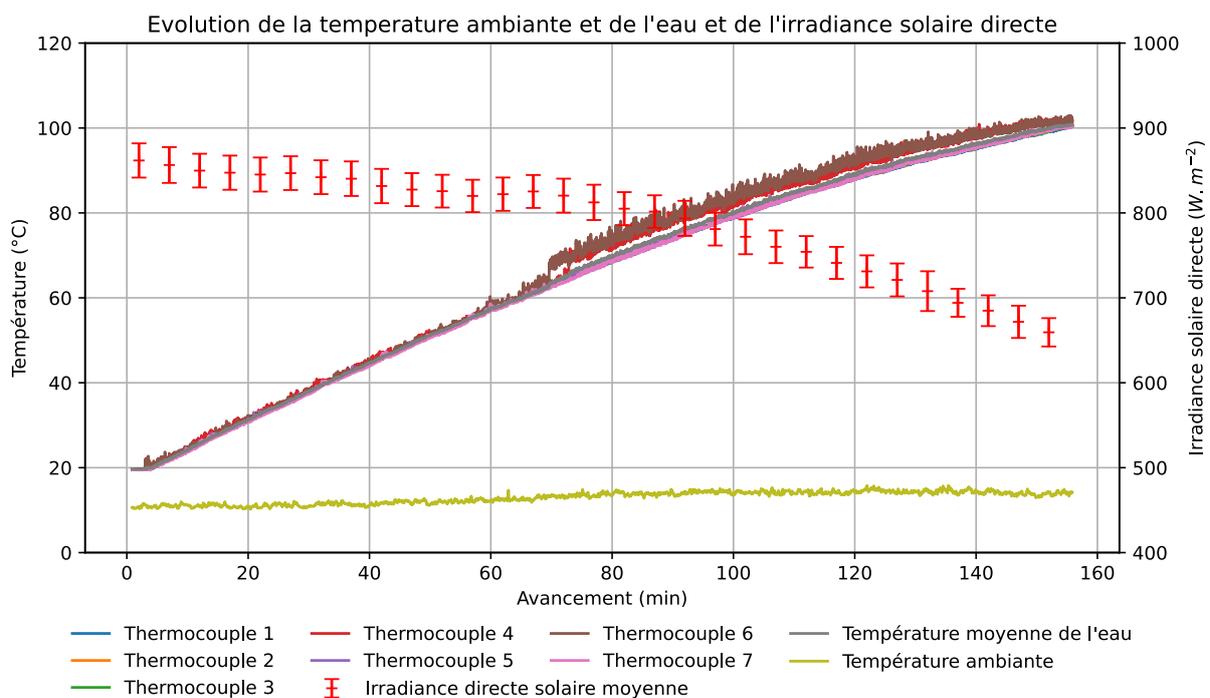


Figure 2 : Évolution de la température de l'eau et ambiante et de l'irradiance solaire directe pour chaque intervalle de 5 minutes et les écart-types correspondants.

Sur la durée du test, la vitesse moyenne du vent (non tracée) est de $0,06\text{ m/s}$; cela correspond aux recommandations de la norme [3], [4].

Ces premiers résultats permettent plusieurs observations. D'abord, il est important de noter que la température ambiante a une valeur assez éloignée de la valeur minimale recommandée par la norme (20 °C), ce qui favorise les échanges thermiques entre la casserole et l'environnement notamment les échanges convectifs aux parois de la casserole, qui sont également accentués en présence de vent. Cela fait donc chuter le rendement de l'installation.

Ensuite, la légère différence de température affichée par les thermocouples n°4 et n°6 indique que la tache de concentration du flux solaire sous la casserole n'est pas bien centrée et légèrement décalée sur la droite (lorsqu'on est dos au Scheffler) et vers l'avant de la casserole (soit en direction du Scheffler). Cela implique sûrement que le flux solaire n'est pas uniquement concentré sur le fond de la casserole et qu'il déborde donc sur la plaque en acier.

3.2. Les performances énergétiques

La Figure 3 présente les évolutions de la puissance standardisée (éq. 2), la puissance incidente moyenne et le rendement global de l'installation (éq. 4) en fonction de la différence de températures normalisée. Dans chaque cas, les incertitudes élargies à 95% de confiance sont donnés. De plus, une courbe de tendance linéaire des valeurs post-transitoires est tracée.

La Figure 3 indique que la puissance standardisée varie fortement sur la durée du test avec un maximum de $1397 \text{ W} \pm 40,5 \text{ W}$ et un minimum de $593 \text{ W} \pm 15,6 \text{ W}$. Cette forte variation coïncide avec la valeur de 0,82 prise par le coefficient de détermination (R^2) de la courbe de tendance ; la valeur minimale acceptée étant de 0,75 [5], [6]. Par ailleurs, l'évolution de la puissance standardisée montre que la durée du régime transitoire du système est courte puisque l'état stationnaire est atteint après 10 min d'expérience seulement.

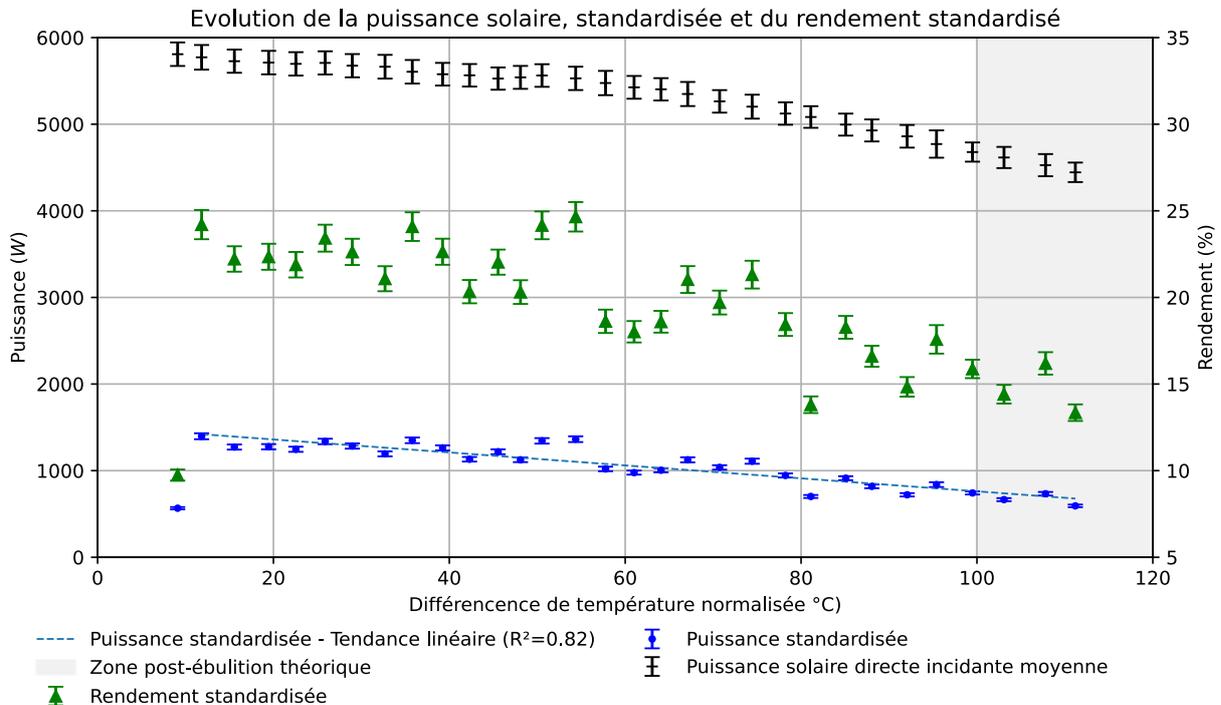


Figure 3 : Puissance standardisée avec courbe de tendance linéaire, puissance incidente moyenne et rendement global de l'installation. Toutes les valeurs sont calculées pour chaque intervalle de 5 min

Finalement, le rendement standardisé de l'installation est aussi, logiquement, très disparate et très faible avec des valeurs comprises entre $9,7\% \pm 0,3\%$ et $24,7\% \pm 0,9\%$.

Ces résultats mettent en avant des aspects intéressants du test. Tout d'abord, il est logique d'observer une baisse de la puissance solaire incidente puisque le test a commencé vers 13h et s'est achevé vers 15h30, soit une importante diminution de l'élévation du soleil durant le test : d'environ $23,8^\circ$ à $8,3^\circ$. Cela implique une forte baisse de l'intensité solaire. Il est également logique de voir une différence de température normalisée supérieure à 100°C , grisée sur la Figure 3, puisqu'il y a environ 200 W.m^{-2} de différence entre la valeur de normalisation et celle mesurée en fin de test (voir Figure 2). Ces valeurs n'ont pas de sens physique à proprement

parlé en raison du changement de phase de l'eau mais elles sont néanmoins considérées pour réaliser la régression linéaire.

Par ailleurs, les variations des valeurs de la puissance standardisée peuvent s'expliquer par le fait que le suivi du soleil a été réalisé à la main toutes les 5 min. En effet, la faible précision de ce suivi ne permet pas d'être toujours parfaitement face au soleil et induit donc des différences dans l'aire d'ouverture effective du concentrateur.

Finalement, les très faibles rendements et la longue durée du test sont dus à plusieurs aspects : i) un suivi du soleil insuffisant, ii) les défauts de planéité du réflecteur secondaire et iii) les conditions expérimentales. Ces trois points sont expliqués et discutés ci-après.

i) La parabole Scheffler ne concentrant que l'irradiance directe, tout retard dans le suivi induit une forte perte en puissance puisque de nombreux rayons solaires sont perdus. De plus, comme le point focal est déporté, le retard dans le suivi du soleil induit un mouvement de la tache concentrée ce qui induit aussi de fortes pertes.

ii) Il a été remarqué que le réflecteur secondaire était légèrement bombé avant le début du test. Les observations pendant le test ont permis de voir que la courbure du miroir s'est accentuée durant le test et a rediminué après. Cela est probablement dû à l'augmentation de la température du miroir et, donc du gradient de température dans le miroir. Ce défaut est très problématique puisqu'il induit une dé-focalisation du flux solaire ce qui fait drastiquement chuter les températures maximales atteignables et la puissance atteignable sur l'aire de la surface inférieure de la casserole.

iii) Les conditions expérimentales regroupent beaucoup de paramètres avec plus ou moins d'impacts. D'abord, la surface inférieure de la casserole, qui est en acier inoxydable donc argenté et brillant, réfléchit une partie du flux solaire incident. Ensuite la température ambiante, comme expliqué précédemment, était particulièrement faible lors du test ce qui favorisait les pertes. Finalement, le positionnement du chariot peut avoir aussi un impact, plus faible, s'il n'est pas fait correctement.

3.3. Comparaison à d'autres cuiseurs solaires

Nos résultats expérimentaux indiquent que dans ces conditions, la puissance standardisée à $T_d = 50\text{ °C}$ est $P_{s,50} = 1135,4\text{ W}$. Cela correspond à un rendement standardisé de 20,6 %. Dans leur étude [6], Apaolaza-Pagaoga *et al.* ont étudié 9 configurations différentes du concentrateur dit « Copenhagen » grâce aux tests standards. Au maximum, ils ont pu atteindre une $P_{s,50}$ de 57,3 W pour un rendement standardisé de 17,8% [6]. Ruivo *et al.* [5] ont étudié des concentrateurs dit « Funnel » dans plusieurs configurations (avec ou sans couvercle, peint ou non etc) et ont pu atteindre une puissance $P_{s,50}$ de 81,6 W au maximum en chauffant de l'eau pour un rendement standardisé de 18,7%.

Dans les deux exemples précédents, la valeur de $P_{s,50}$ est nettement plus faible que celle reportée dans cette étude : 19,8 et 13,9 fois, respectivement. Mais ces importants écarts s'expliquent par les différences d'aire d'ouverture. En effet, pour rappel notre installation expérimentale affiche une aire d'ouverture de 6,8 m² contre 0,339 m² dans le premier cas et 0,5 m² dans le second, soit une diminution d'un facteur 19,9 et 13,5 respectivement. $P_{s,50}$ n'est donc pas le paramètre le plus pertinent pour réaliser une comparaison. En revanche, il est beaucoup plus intéressant de remarquer que le rendement standardisé obtenu dans cette étude est du même ordre de grandeur que ceux présentés dans les références [5], [6]. Il est aussi important de noter que les cuiseurs [5], [6] sont optimisés contrairement au dispositif considéré dans ce travail.

4. Conclusions et perspectives

Ce travail présente l'étude énergétique d'un système de cuisson solaire composé d'un récepteur de type Scheffler, d'un réflecteur secondaire plat, d'une plaque trouée et d'une casserole. L'étude repose sur la méthode du test standard [3], [4] pour évaluer plusieurs indicateurs de performances.

Les résultats présentés ici sont très encourageants. En effet, malgré une température ambiante faible, une irradiance solaire faible et d'importants défauts de suivi et de forme du réflecteur secondaire, il a été possible d'atteindre 100 °C de température moyenne pour 27,2 kg d'eau. En présence d'une irradiance solaire directe de 5515 W, la puissance standardisée pour une différence de 50°C entre la température ambiante et celle de l'eau ($P_{s,50}$) est de 1135 W ; soit un rendement de standardisé 20,6%. Bien que relativement bas, ce rendement est du même ordre de grandeur que ceux de la littérature [5, 6].

Malgré ces résultats encourageants, de nombreux aspects restent à améliorer et offrent des perspectives très intéressantes. La première étape consistera à réaliser le suivi du soleil de manière automatique pour éviter tout retard. Ensuite, la seconde, sera d'assurer la planéité du réflecteur secondaire et la position du chariot plus précisément. Finalement, la troisième, sera de peindre la surface inférieure de la casserole en noir mat pour absorber un maximum d'énergie. Ces trois améliorations permettront, sans doute, d'augmenter les performances de l'installation.

Références

- [1] Présage, « Accueil ★ Le Présage », Le Présage. Consulté le: 5 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://lepresage.fr/wp/>
- [2] D. S. Reddy, Mohd. K. Khan, Md. Z. Alam, et H. Rashid, « Design charts for Scheffler reflector », *Sol. Energy*, vol. 163, p. 104-112, mars 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.01.081.
- [3] *ASAE S580 JAN03 - Testing and Reporting Solar Cooker Performance*, 2003.
- [4] C. R. Ruivo, G. Coccia, G. Di Nicola, A. Carrillo-Andrés, et X. Apaolaza-Pagoaga, « Standardised power of solar cookers with a linear performance curve following the Hottel-Whillier-Bliss formulation », *Renew. Energy*, vol. 200, p. 1202-1210, nov. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.10.041.
- [5] C. R. Ruivo, A. Carrillo-Andrés, et X. Apaolaza-Pagoaga, « Experimental determination of the standardised power of a solar funnel cooker for low sun elevations », *Renew. Energy*, vol. 170, p. 364-374, juin 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.01.146.
- [6] X. Apaolaza-Pagoaga, A. Carrillo-Andrés, J.-P. Jiménez-Navarro, et C. Rodrigues Ruivo, « Experimental evaluation of the performance of new Copenhagen solar cooker configurations as a function of solar altitude angle », *Renew. Energy*, vol. 229, p. 120782, août 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120782.
- [7] G. Guillet, J. Gaspar, S. Barbosa, T. Fasquelle, et B. Kadoch, « Experimental evaluation of the concentrated solar heat flux distribution provided by an 8 m² Scheffler reflector », *Renew. Energy*, vol. 223, p. 119958, mars 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.119958.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide du gouvernement français au titre de France 2030, dans le cadre de l'Initiative d'Excellence d'Aix-Marseille Université – A*MIDEX **AMX-20-TRA-034**. Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la société le Présage pour leur soutien à ce projet.