

Comment mesurer les caractéristiques d'un flux de rayonnement solaire concentré délivré par un réflecteur de Scheffler ?

Gabriel GUILLET^{1*}, Jonathan GASPAR¹, Séverine BARBOSA¹, Thomas Fasquelle¹, Benjamin KADOCH¹

¹Aix Marseille Univ, CNRS, IUSTI, Marseille, France

*(auteur correspondant : gabriel.guillet@univ-amu.fr)

Résumé - Le réflecteur de Scheffler est un concentrateur solaire ayant la particularité d'être flexible, ce qui lui permet de concentrer le flux solaire au même point tout au long de l'année. Cette communication présente une méthode rarement utilisée dans le domaine de l'énergie solaire pour mesurer l'intensité et la distribution d'un flux de chaleur concentré via un réflecteur de Scheffler de 8 m². Grâce à une caméra infrarouge et à des techniques inverses, une carte détaillée des densités de flux de chaleur a été obtenue. Ces résultats ont montré un excellent accord avec une mesure réalisée par Oehler et Scheffler dans des conditions similaires, confirmant ainsi la pertinence de la méthode.

Nomenclature

A	surface du réflecteur, m ²	λ	conductivité thermique, W · m ⁻¹ · K ⁻¹
f	longueur focale du réflecteur, m	σ	constante de Stefan-Boltzmann, W · m ⁻² · K ⁻⁴
h	coefficient d'échange convectif, W · K ⁻¹ · m ⁻²	φ	flux incident, W · m ⁻²
I	irradiance solaire normale directe, W · m ⁻²	<i>Indices et exposants</i>	
n	normale sortante	ap	ouverture (aperture)
Q	flux de chaleur, W	cov	couverture (coverage)
r	réflectivité, 1	env	environnement
T	température, K	f	fonte
<i>Symboles grecs</i>		in	mesuré en entrée
α	absorptivité, 1	n	n ^{ième} jour de l'année
Γ	frontière du matériau	out	mesuré en sortie
δ	déclinaison solaire, °	p	peinture
ϵ	émissivité, 1	ref	réflecteur
η	taux, proportion, efficacité, 1	tar	cible (target)

1. Introduction

Dans le cadre du projet "Conception de restaurants optimisés pour la cuisson solaire", un banc expérimental similaire au fourneau solaire du restaurant Le Présage a été construit [1]. Ce banc expérimental est constitué d'un réflecteur de Scheffler, d'un miroir secondaire plan et d'une plaque de cuisson faisant office d'absorbeur.

Le réflecteur de Scheffler est un type particulier de concentrateur solaire. Il a la forme d'une portion latérale de paraboloïde, dont l'axe de révolution, qui passe par le point focal du concentrateur, est dirigé vers le Soleil. Ainsi, une simple rotation autour d'un second axe, passant également par le point focal mais parallèlement à l'axe de rotation de la Terre, permet au réflecteur de concentrer le rayonnement solaire au même point tout au long de la journée. Le réflecteur peut bénéficier d'un système de suivi du soleil pour automatiser cette rotation. De plus, l'inclinaison et la courbure du réflecteur peuvent être modifiées manuellement afin de compenser la

variation d'élévation du soleil [2, 3]. Ainsi, le point focal est aussi fixe tout au long de l'année, ce qui constitue un avantage indéniable par rapport aux autres types de concentrateurs pour une application telle que la cuisine solaire.

Bien que le réflecteur de Scheffler ait été diffusé dans le monde entier depuis son invention [4], peu d'études expérimentales se sont attardées sur l'évaluation de l'intensité et de la distribution du flux solaire concentré dans sa zone focale [5], ralentissant ainsi le développement de réflecteurs secondaires et d'absorbeurs optimisés. Ce manque est probablement dû à la complexité de la mesure, car elle requiert un système de mesure à large champ de détection, avec une grande résolution spatiale et résistant aux flux thermiques élevés. La méthode la plus couramment utilisée dans le domaine de l'énergie solaire pour ce type d'étude nécessite un écran Lambertien refroidi, une caméra CCD (Charged-Coupled Device) et un capteur de flux refroidi lui aussi [6].

Dans cette étude, une méthode différente est présentée. Celle-ci repose sur un système de mesure, constitué d'une caméra infrarouge et d'une interface, couplé à un modèle de transfert thermique et à des techniques inverses. La méthode d'estimation de flux a été décrite dans des travaux antérieurs [7] liés au domaine de l'énergie nucléaire et peut être portée dans le domaine de l'énergie solaire. L'objectif est ainsi de quantifier expérimentalement les performances d'un réflecteur de Scheffler, et en particulier d'obtenir les caractéristiques du flux concentré qu'il délivre. Pour cela, le matériel utilisé et les principes de la méthode de mesure sont d'abord présentés. La méthode d'estimation de flux et le modèle thermique sont ensuite décrits. Les résultats sont enfin discutés et confrontés aux données de la littérature.

2. Méthodologie

2.1. Principes généraux

Afin d'estimer l'intensité et la distribution du flux thermique délivré par un réflecteur de Scheffler dans sa zone focale, une interface est nécessaire pour absorber le rayonnement concentré et le convertir en un flux thermique facilement observable avec une caméra infrarouge. La plaque de cuisson en fonte du cuiseur solaire originel a été conservée pour remplir cette fonction, l'idée finale étant d'évaluer les performances globales du cuiseur solaire avec la même méthode. Dans ce qui suit, les expressions "plaque en fonte", "interface de mesure" et "écran récepteur" sont utilisées pour désigner le même objet.

Le banc d'essai résultant est montré dans la figure 1. Le réflecteur de Scheffler collecte d'abord le rayonnement solaire direct et le concentre sur la plaque en fonte placée verticalement dans son plan focal. Ce rayonnement est ensuite absorbé, puis diffusé dans la plaque par conduction. Une partie de la chaleur est stockée dans le matériau et augmente sa température, tandis que l'autre partie est transmise à l'environnement par convection et rayonnement. La caméra infrarouge mesure le rayonnement émis par le dos de la plaque, tandis que l'émissivité de la surface émettrice est utilisée pour en déduire le champ de température. Puis par inversion, le flux thermique initialement absorbé par la plaque est estimé.

2.2. Composants et caractéristiques du banc expérimental

Le réflecteur de Scheffler étudié est caractérisé par une distance focale f de 1,47 m et une surface théorique A de 8 m^2 . Il est couvert de centaines de facettes planes de $8 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ et $2,5 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, constituées d'une fine feuille réfléchissante protégée par une couche de verre. Comme les miroirs ne couvrent pas la totalité de la surface du réflecteur en raison de leur



Figure 1 : Photographie du banc expérimental. Le réflecteur de Scheffler collecte le rayonnement solaire direct et le concentre sur la plaque en fonte qui observée à l'aide d'une caméra infrarouge.

espacement, de la forme elliptique du réflecteur et du petit module photovoltaïque utilisé pour alimenter le système de suivi du soleil, la surface réfléchissante est estimée à $7,5 \text{ m}^2 \pm 0,3 \text{ m}^2$, soit un taux de couverture en miroirs η_{cov} de la parabole de 94 %. Le réflecteur est également équipé d'un dispositif électronique de suivi du soleil, constitué de deux photodiodes séparées par une paroi et connectées à une carte électronique (Arduino Uno) qui contrôle un petit moteur. Le dispositif assure le suivi du soleil en faisant tourner le réflecteur jusqu'à ce que les deux photodiodes reçoivent une quantité similaire de lumière.

Afin d'évaluer le flux radiatif que peut collecter le réflecteur de Scheffler à l'entrée du système Q_{in} , l'irradiance solaire normale directe (DNI), noté I , est mesurée à l'aide d'un pyrhéliomètre Kipp & Zonen RaZON+ PH1 avec une incertitude estimée à 1 %.

A la sortie du système, le flux radiatif délivré par le réflecteur Q_{out} est estimé à partir des mesures de flux d'une caméra infrarouge de référence Telops FAST M3K. Cette caméra fonctionne dans le domaine de l'infrarouge de $3,0 \mu\text{m}$ à $5,5 \mu\text{m}$. Elle est équipée d'une roue à filtres contenant un emplacement vide et trois filtres à densité neutre. Par ailleurs, elle peut réaliser simultanément des acquisitions avec plusieurs temps d'intégration. Ainsi, elle est calibrée pour une large gamme de températures allant de 0°C à 1500°C . La caméra fournit une image de 320×256 pixels. Dans la configuration du banc de mesure, la caméra est utilisée avec une lentille de distance focale 13 mm et fournit une taille de pixel projeté sur l'écran récepteur d'environ 3,5 mm, l'écran mesurant lui-même 1 m de long, 0,6 m de haut et 13 mm d'épaisseur.

Lorsqu'on utilise une caméra infrarouge sans mesure complémentaire directe de la température (qui peut être complexe et intrusive), il est nécessaire de connaître l'émissivité de la surface observée dans la bande spectrale de la caméra. De plus, les mesures sont facilitées si cette émissivité est stable dans le temps et homogène sur la surface. Pour cette raison, la surface de la plaque a été peinte avec la peinture spéciale haute température Pyromark 2500 de LA-CO Industries [8]. Dans le cadre de tests préliminaires, la plaque a été soumise à trois cycles de chauffage-refroidissement avant cette étude et la peinture s'est légèrement écaillée près du centre de la plaque pendant le 2nd cycle. Cependant, son état de surface semble s'être stabilisé au cours des cycles suivants.

Comme l'étude est réalisée en milieu extérieur, la température ambiante (température de l'air) et la vitesse du vent sont enregistrées en complément des mesures précédentes.

2.3. Protocole expérimental

Le système est d'abord positionné à un emplacement sans ombrage. Ensuite, le réflecteur de Scheffler est brièvement orienté vers le soleil pour effectuer le réglage saisonnier. Une fois cela fait, le système d'acquisition de données est mis en marche, le réflecteur de Scheffler est à nouveau orienté vers le soleil et le système de suivi du soleil est activé. Lorsque l'état d'équilibre est atteint, une mesure est effectuée avec la caméra infrarouge. Un court film est enregistré avec plusieurs temps d'intégration pour chaque filtre (environ 100 images à 20 Hz). Les conditions sont supposées rester stables pendant la période d'enregistrement, soit un peu moins de 10 min. Une image moyenne combinant toutes celles enregistrées est sauvegardée. Cela permet de réduire le bruit de mesure et de saisir toute la gamme des températures observées. Enfin, le réflecteur est détourné du soleil et les appareils de mesures sont arrêtés. Le flux absorbé peut alors être estimé à partir de l'image obtenue par thermographie, en prenant les hypothèses que i) les conditions environnementales sont stables, ii) les propriétés thermiques (conductivité, émissivité/absorptivité, coefficient d'échange convectif) sont homogènes et isotropes et iii) l'émissivité est indépendante de la température.

2.4. Calcul du flux thermique collecté

La puissance Q_{in} collectée par le réflecteur de Scheffler lors de l'expérience dépend de l'irradiance solaire normale directe (DNI) et de la surface d'interception du réflecteur. Cette dernière, notée $A_{ap,n}$, est plus petite que la surface théorique du réflecteur A et varie avec la déclinaison du soleil δ_n du $n^{\text{ième}}$ jour de l'année [3]. Elle peut être calculée à l'aide de (1). Et une fois que la surface d'interception est définie, la puissance collectée par le réflecteur Q_{in} est décrite par (2).

$$A_{ap,n} = \eta_{cov} \cdot A \cdot \cos\left(43.23 + \frac{\delta_n}{2}\right). \quad (1)$$

$$Q_{in} = A_{ap,n} \cdot I. \quad (2)$$

2.5. Estimation par méthode inverse du flux thermique délivré

Afin d'estimer le flux délivré par le réflecteur de Scheffler, la plaque en fonte est représentée par un modèle thermique tridimensionnel dont la conductivité λ dépend de la température. Ce modèle non linéaire est étudié en régime permanent avec des échanges par rayonnement et convection à ses frontières. Connaissant le flux incident $\varphi_{inc}(x, y)$ et les propriétés thermophysiques de la plaque (tableau 1), il est possible de déterminer la température $T(x, y, z)$ en tout point $M(x, y, z)$ de la plaque Ω : il s'agit du problème direct décrit par les équations ci-dessous. On note Γ_1 la limite de la plaque exposée au flux solaire concentré incident et Γ_2 celle qui ne l'est pas. De plus, on définit \mathbf{n} la normale à la surface au point $M(x, y, z)$. Enfin, pour une meilleure compréhension, on note : $T(x, y, z) = T$, $\lambda(T) = \lambda$, $\varphi_{inc}(x, y) = \varphi_{inc}$.

Alors, pour tout $M \in \Omega$, on a :

$$\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) = 0. \quad (3)$$

Pour tout $M \in \Gamma_1$, la condition à cette limite s'écrit :

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = -\alpha \cdot \varphi_{inc} + \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{env}^4) + h \cdot (T - T_{env}). \quad (4)$$

Pour tout $M \in \Gamma_2$, la condition à cette limite s'écrit :

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{env}^4) + h \cdot (T - T_{env}). \quad (5)$$

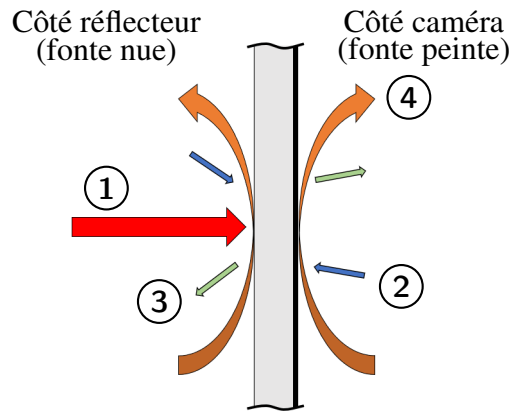


Figure 2 : Schéma représentant les transferts de chaleur aux limites de la plaque en fonte. La limite Γ_1 est exposée au flux solaire concentré (1). Les deux limites Γ_1 et Γ_2 sont les lieux de transferts d'énergie avec l'environnement par rayonnement (2 et 3) et convection (4).

Le problème direct est résolu avec le logiciel CAST3M en utilisant la méthode des éléments finis. Le maillage est constitué de 24 000 éléments quadratiques cubiques avec 8 nœuds : 100 dans la longueur de la plaque (axe x), 60 dans sa hauteur (axe y) et 4 dans son épaisseur (axe z).

Le problème inverse consiste à déterminer l'intensité et la distribution du flux thermique concentré reçu 'côté réflecteur' de la plaque qui provoque la température mesurée 'côté caméra' de la plaque. Le problème inverse est résolu à l'aide d'une minimisation reposant sur la méthode des gradients conjugués couplée à l'état adjoint [7].

Intéressons nous maintenant aux transferts thermiques aux frontières de la plaque en fonte. Pour déterminer le transfert de chaleur par rayonnement, on suppose que la plaque est un corps gris positionné dans un environnement assimilé à un corps noir. La proportion du flux concentré incident qui est absorbée par la plaque est quantifiée par l'absorptivité solaire de la fonte. Des mesures ont montré que l'absorptivité monochromatique de la fonte ne dépend pas de la température de la fonte dans la gamme de températures étudiée (50 °C à 500 °C). De plus, par soucis de simplification, une unique valeur d'absorptivité (absorptivité spectrale) peut être calculée : elle est égale à la moyenne de l'absorptivité monochromatique entre 0,25 μm et 2,5 μm pondérée par le spectre d'émission du Soleil sur le même intervalle. L'échange de chaleur entre la plaque et son environnement est quant-à-lui quantifié par deux émissivités, celle de la fonte et celle de la peinture. Ici encore, l'émissivité monochromatique de la fonte et celle de la peinture ne varient pas avec la température des matériaux respectifs dans la gamme de températures étudiée. De plus, la fonte et la peinture se comportent approximativement comme des corps gris entre 2,5 μm et 25 μm ; c'est pourquoi une émissivité spectrale moyenne a pu être retenue sur cet intervalle pour chacun des deux matériaux. Ces valeurs figurent dans le tableau 1.

Conductivité thermique de la fonte	$\lambda(T) = 49,85 - 0,0106 \cdot T$ [9] (T en °C)
Absorptivité spectrale de la fonte	$\alpha = 0,88$
Émissivité spectrale de la fonte	$\varepsilon_f = 0,77$
Émissivité spectrale de la peinture	$\varepsilon_p = 0,77$
Coefficient d'échange convectif	$h = 7 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

Tableau 1 : Caractéristiques prises en compte dans le modèle thermique de la plaque en fonte.

La détermination du flux solaire concentré incident sur la plaque en fonte requière également l'estimation du flux convectif aux parois. L'étude des transferts de chaleur par convection en

milieu ouvert sur une paroi verticale de température inhomogène peut être particulièrement complexe. Ainsi, le problème a été simplifié et une unique valeur de coefficient d'échange convectif a été estimée à $7 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ en l'ajustant dans le modèle thermique jusqu'à ce que le flux estimé par les techniques inverses en périphérie de la plaque soit égal à l'irradiance globale du plan vertical. Tous les paramètres du modèle sont maintenant définis.

Avant de poursuivre, il est important de noter qu'une fissure est apparue lors de l'une des expériences précédentes. Cette fissure est probablement la conséquence du gradient de température élevé dans la plaque. Son effet sur la conduction thermique n'est pas pris en compte dans le modèle thermique et sera discuté dans la section 3.

2.6. Calcul de performance du réflecteur

Une fois que le flux collecté par le réflecteur de Scheffler est calculé et que le flux délivré par ce même réflecteur est estimé, il est possible d'obtenir l'efficacité énergétique η_{ref} du réflecteur. Cette dernière s'écrit

$$\eta_{ref} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}}. \quad (6)$$

La perte de puissance observable entre l'entrée et la sortie du système peut être symbolisée par la réflectivité des miroirs r (une partie du rayonnement est absorbée) et par la proportion du rayonnement collecté atteignant effectivement la cible η_{tar} . On a alors :

$$\eta_{ref} = r \cdot \eta_{tar}. \quad (7)$$

3. Résultats et discussion

3.1. Premiers résultats et observations

Les résultats présentés ci-dessous sont issus d'une mesure réalisée à Marseille (lon. $5,4374^\circ$, lat. $43,3449^\circ$, alt. 120 m) le 14/06/2022. L'expérience a débuté à 10h30 (heure solaire) et la mesure a été réalisée à 11h14 (heure solaire) alors que le régime permanent était atteint. Tous les horaires indiqués par la suite sont donnés par rapport à l'heure solaire. A cette date, la surface d'interception était de $4,6 \text{ m}^2$ et a été calculée à partir de (1). L'irradiance solaire normale directe moyenne pendant la mesure était égale à $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, la température extérieure moyenne de $29,5^\circ\text{C}$ et la vitesse moyenne de vent de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.2. Champ de températures expérimental

Les graphiques qui suivent sont tracés du point de vue de la caméra infrarouge, l'axe x étant horizontal, l'axe y étant vertical et l'axe z venant de la plaque en fonte vers la caméra. La figure 3 montre la température sur la face 'côté caméra' de la plaque. Comme l'émissivité a été prise en compte, les températures sont exprimées comme des "températures vraies", par opposition aux "températures corps noir". D'un point de vue qualitatif, on observe un point chaud au milieu de la plaque et un gradient de température de ce point chaud vers les bords de la plaque. De plus, la distribution du flux semble être axisymétrique. Un petit défaut est visible en bas de la plaque : il s'agit d'une discontinuité de température due à l'étroite fissure. Nous verrons dans la suite que son influence sur l'estimation du flux est faible. Le fait qu'il n'y ait pas de discontinuité de température à l'endroit où la peinture s'est écaillée confirme l'hypothèse d'une émissivité homogène malgré le changement d'aspect visuel. D'un point de vue quantitatif, la température varie de 52°C sur les bords, à 468°C , température maximale atteinte aux coordonnées $0,52 \text{ m}$ sur l'axe des x et $0,27 \text{ m}$ sur l'axe des y.

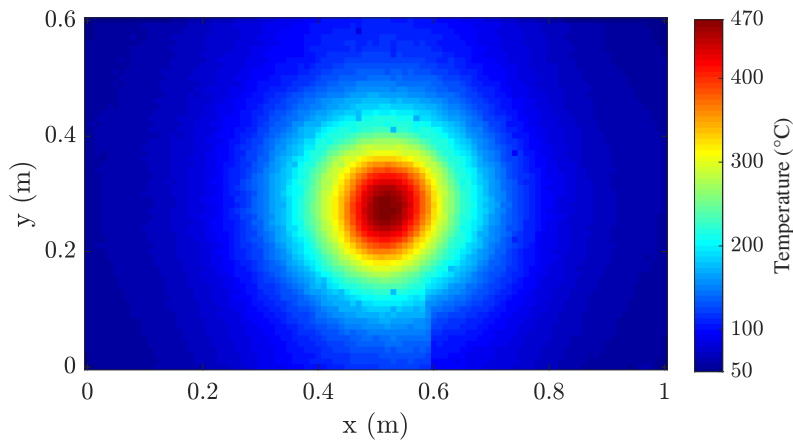


Figure 3 : *Champ de température expérimental obtenu au dos de la plaque en fonte (côté du réflecteur).*

3.3. Intensité et distribution du flux de chaleur sur la plaque

Comme expliqué dans la section 2, le flux thermique reçu par la plaque en fonte est estimé par inversion à partir des mesures de température et en prenant une absorptivité solaire de 88 % pour la fonte. La figure 4 représente la densité du flux thermique reçu par la plaque.

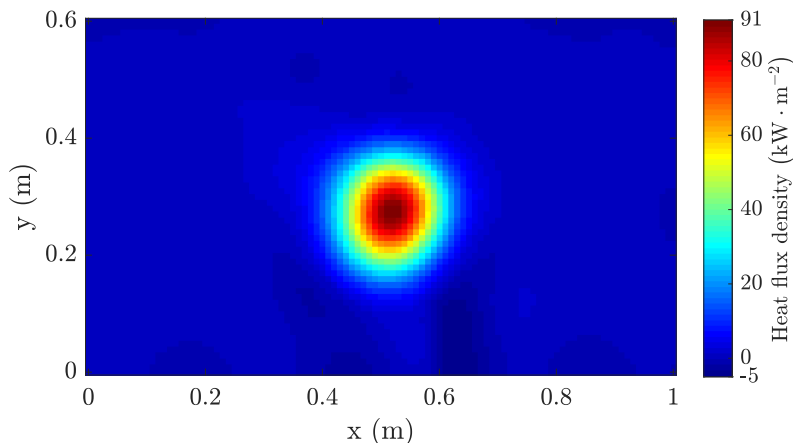


Figure 4 : *Distribution du flux solaire concentré reçu par la plaque en fonte.*

La forme de la distribution du flux thermique est similaire mais plus étroite que celle de la température. L'estimation de la densité du flux thermique a généré une petite "vague" près de l'emplacement de la fissure. Ce phénomène non physique est dû à notre modèle et aux techniques inverses, qui ne prennent pas en compte la fissure. Mais ce n'est qu'un problème local et les résultats globaux ne sont visuellement pas très affectés. La densité du flux thermique atteint un maximum de $90,8 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ et le flux thermique total reçu par la plaque est de $2,4 \text{ kW}$. Dans ce flux thermique total, le flux thermique provenant de l'environnement est négligeable par rapport à la puissance délivrée par le réflecteur (moins de 1 %).

Sachant que l'irradiance solaire normale directe était de $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et que l'ouverture du réflecteur Scheffler était de $4,6 \text{ m}^2$, la puissance reçue par le réflecteur de Scheffler était donc de $4,1 \text{ kW}$. Ainsi, l'efficacité du réflecteur de Scheffler pour concentrer et transmettre le rayonnement solaire à la plaque est de 61 %. Ces résultats sont en bon accord avec ceux de Oelher et Scheffler [10]. Ces derniers ont effectué des mesures en avril, en utilisant un réflecteur similaire. Pour une ouverture similaire ($4,7 \text{ m}^2$) et un éclairage énergétique de $730 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (plus faible de 18 %), ils ont obtenu un flux thermique de $2,1 \text{ kW}$ (plus faible de 12 %), soit une efficacité énergétique quasiment égale à celle que nous avons obtenue.

4. Conclusion et perspectives

Cette communication présente une méthode rarement utilisée dans le domaine de l'énergie solaire pour mesurer l'intensité et la distribution du flux de chaleur concentré délivré par un réflecteur de Scheffler de 8 m^2 . Grâce à une caméra infrarouge et à des techniques inverses, une carte détaillée de la densité de flux de chaleur a été obtenue. Cette densité atteint un maximum de $90,8 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ et le flux thermique total reçu par la plaque est de $2,4 \text{ kW}$, ce qui implique une efficacité énergétique de 61% pour le réflecteur étudié. Ces résultats ont montré un excellent accord avec une mesure réalisée par Oehler et Scheffler dans des conditions similaires, confirmant ainsi la pertinence de la méthode. En plus d'une valeur de flux totale, ces résultats apportent aussi des informations sur la distribution du flux dans la zone focale qui pourront être prises en compte pour la conception d'un réflecteur secondaire ou d'un absorbeur. En l'état actuel, la méthode décrite ici requiert du matériel de mesure spécifique et implique un coût de calcul numérique relativement élevé pour le traitement des données. Néanmoins, elle semble disposer d'un potentiel d'amélioration important en terme de simplification et d'accessibilité.

Références

- [1] G. Guillet, S. Barbosa, T. Fasquelle and B. Kadoch, Towards Professional Kitchen with Scheffler Reflectors, *Proc. CONSOLFOOD 2020 International Conference on Advances in Solar Thermal Food Processing* (Faro, Portugal, 24-26 jan. 2022)
- [2] A. Munir, O. Hensel and W. Scheffler, Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications, *Solar Energy*, 84-8 (2010) 1490-1502.
- [3] D. S. Reddy, Mohd. K. Khan, Md. Z. Alam and H. Rashid, Design charts for Scheffler reflector, *Solar Energy*, 163 (2018) 104-112.
- [4] www.solare-bruecke.org (site consulté le 26/02/2023)
- [5] E. A. Dib, Análise da formação de imagem focal do concentrador solar paraboloïdal tipo scheffler, Ph.D. thesis, University of São Paulo, São Paulo, Brazil, (2021)
- [6] M. Röger, P. Herrmann, S. Ulmer, M. Ebert, C. Prah, et F. Göhring, Techniques to Measure Solar Flux Density Distribution on Large-Scale Receivers, *Journal of Solar Energy Engineering*, 136-3 (2014) 031013.
- [7] J. Gaspar et al., First heat flux estimation in the lower divertor of WEST with embedded thermal measurements, *Fusion Engineering and Design*, 146 (2019) 757-760.
- [8] C. K. Ho, A. R. Mahoney, A. Ambrosini, M. Bencomo, A. Hall and T. N. Lambert, Characterization of Pyromark 2500 Paint for High-Temperature Solar Receivers, *Journal of Solar Energy Engineering*, 136-1 (2013)
- [9] D. Holmgren, Review of thermal conductivity of cast iron, *Journal of Cast Metals Research*, 18 (2005) 331-345.
- [10] U. Oehler and W. Scheffler, The use of indigenous materials for solar conversion, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 33-3 (1994) 379-387.

Remerciements

Les auteurs remercient la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et la société Le Présage pour leur intérêt et leur financement de ce projet de recherche dans le cadre du dispositif "Emplois Jeunes Doctorants". Ils remercient également l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie d'Aix-Marseille Université pour son financement dédié aux travaux expérimentaux. Enfin, ils remercient Nathalie Ehret, Yann Anquetin, Christophe Escape et Sadi Noël pour leur support technique.