

Conception, mise en œuvre et calibration d'un simulateur solaire à haute densité de flux de 45 kW_{el} pour la caractérisation sans contact à très haute température

A 45 kW_{el} multi-source high flux solar simulator as a versatile tool for non-contact high temperature characterization: Design, implementation and calibration

Jesse Allens TOUOYEM TALLA¹, Baptiste HENRIOT², Thierry DUVAUT¹, Olivier TANTOT², Nicolas DELHOTE², Jonathan LORENTZ¹, Michaël CHARLES³, Jaona Harifidy RANDRIANALISOA^{1*}

¹TheMM, UR7548, Université de Reims Champagne-Ardenne
UFR SEN, Campus Moulin de la Housse, 51687 Reims (France)

²Xlim, UMR 7252, Université de Limoges
F87000 Limoges (France)

³CEA, DAM, Le Ripault,
F-37260 Monts (France)

*(auteur correspondant : jaona.randrianalisoa@univ-reims.fr)

Résumé - Cette communication présente la conception, la mise en œuvre et la caractérisation du premier simulateur solaire à haute densité de flux en France d'une puissance électrique de 45 kW. C'est un système à sept lampes à arc au xénon de 6.5 kW_{el}, chacune couplée à un réflecteur ellipsoïdal de 1585 mm de distance focale. Ce simulateur a une configuration verticale, où les faisceaux lumineux émis par les lampes sont focalisés grâce aux réflecteurs au même point, le point focal du simulateur. La méthode de caractérisation du flux lumineux au niveau du point focal est présentée. Le dispositif délivre une puissance rayonnante maximale de 7.8 kW sur un disque de 5 cm de diamètre avec une densité de flux atteignant 12.7 MW.m⁻². Les premiers essais de chauffage réalisés avec une puissance de 60 % de la puissance nominale d'une lampe sur un échantillon d'alumine de 6 cm de diamètre et une puissance de 90 % sur un échantillon de carbure de silicium de 5 cm de diamètre, tous les deux positionnés au plan focal, atteignent un pic de température respectivement de 1176 °C ± 23 °C et 1345 °C ± 23 °C.

Abstract - This work presents the design, implementation and characterization of the first multi-source high-flux solar simulator (45 kW_{el} HFSS) in France. The system consists of seven 6.5 kW xenon short arc lamps, each coupled with an ellipsoidal reflector of 1585 mm focus distance. The HFSS has a vertical orientation where light beams emitted from lamps and reflected by reflectors are directed from the top to the bottom, on the same focus point. The flux characterization method is presented in this work. Integrating the light flux distribution from all seven lamps over a 5 cm diameter circular area results in a radiative power of 7.8 kW with a peak flux density of 12.7 MW.m⁻². Heating tests conducted on a 6 cm diameter alumina sample and on a silicon carbide sample of diameter 5 cm, placed at the focal plane, using, respectively 60 % and 90 % of the solar simulator's nominal power of a single lamp, resulted in a peak temperature of 1176 °C ± 23 °C for alumina and 1345 °C ± 23 °C for silicon carbide.

Nomenclature

d	Distance, mm	γ	Angle, °
l	Distance, mm	Δ	différence, °C
T	Température, °C	<i>Indices et exposants</i>	
q	Densité de flux, MW.m ⁻²	ng-flux	nuance de gris-flux
Q	Puissance radiative, kW	ép	épaisseur
G	Valeur de nuance de gris	r	radial
<i>Symboles grecs</i>		mean	moyen
β	Demi-angle de cône, °	min	minimale
ϕ	Angle, °	max	maximale

1. Introduction

Les simulateurs solaires à haute densité de flux sont conçus pour recréer le rayonnement solaire concentré généralement obtenu dans les systèmes solaires à concentration. Contrairement aux fours ou tours solaires, les simulateurs solaires à haut flux sont généralement installés en laboratoire et sont activables à la demande. En effet, ils offrent du rayonnement solaire à haute densité de flux continu, contrôlable et stable et permettent les tests de procédés solaires, les caractérisations et le recyclage de matériaux à très haute température.

Levêque *et al.* [1] a présenté la caractérisation expérimentale et modélisation par Monte Carlo d'un simulateur solaire à configuration horizontale d'une puissance électrique de 45 kW. C'est un système composé de 18 lampes à arc au xénon d'une puissance électrique de 2.5 kW chacune couplée à un réflecteur ellipsoïdal de 1933 mm de distance focale. La méthode de calibration utilisée est une méthode indirecte de caractérisation du flux lumineux du simulateur. Un flux maximal de $1 - 1.5 \pm 0.2$ MW.m⁻² par module de rayonnement et 21.7 ± 2 MW.m⁻² pour tous les 18 modules de rayonnement a été mesuré.

Muhammad *et al.*[2] a présenté une revue bibliographique complète des méthodes utilisées pour mesurer le flux solaire concentré. Cette étude a identifié les principaux défis associés à la mesure précise de flux solaire concentré. Il a également comparé les différents capteurs étant donné leur rôle crucial dans les méthodes de mesure directe et indirecte de flux. Il a observé que la méthode indirecte est généralement utilisée pour mesurer le rayonnement solaire concentré. Elle permet non seulement de mesurer le flux solaire avec une bonne précision mais également d'identifier les points chauds par rapport aux mesures directes.

Ce travail présente la conception, la mise en œuvre et la caractérisation d'un simulateur solaire à configuration verticale d'une puissance électrique de 45 kW. La conception du simulateur a été réalisée en prenant en compte la nécessité de contrôler la température sur une surface circulaire de 5 cm de diamètre, d'assurer des faibles différences de température radiales et dans l'épaisseur des échantillons testés. Nous présentons d'une part, la méthode de caractérisation de flux utilisée et, d'autre part, l'analyse du comportement thermique de deux matériaux céramiques, testés avec le simulateur solaire.

2. Méthodes

2.1. Matériaux

Les matériaux à étudier sont des matériaux céramiques, du carbure de silicium (SiC) et de l'alumine (Al₂O₃). Le SiC un échantillon dense cylindrique de diamètre 5 cm et d'épaisseur 5 mm (Figure 1) et l'alumine est un échantillon poreux cylindrique de diamètre 6 cm et

d'épaisseur 4 mm (Figure 2). Le SiC a été fourni par la société Final Advanced Materials et a été obtenu par frittage. L'alumine a été fournie par la société Céramiques Techniques Industrielles et a été obtenue par frittage.



Figure 1 : Photographie de l'échantillon de carbure de silicium



Figure 2 : Photographie de l'échantillon d'alumine poreuse

2.2. Conception du simulateur solaire

L'objectif de la conception de ce simulateur solaire est de pouvoir chauffer un matériau réfractaire jusqu'au moins 1500 °C tout en fournissant un chauffage homogène et/ou avec une distribution de température contrôlée. Pour cela, nous avons opté pour un simulateur solaire à haute densité de flux composé de sept lampes à arc au xénon munies de réflecteurs ellipsoïdaux. La conception de ce simulateur solaire prend en compte entre autres les propriétés optiques et géométriques des lampes et des réflecteurs ellipsoïdaux et la disponibilité commerciale des réflecteurs. La conception du simulateur solaire a été réalisée en définissant les propriétés géométriques et optiques des différents composants, en procédant à une simulation de tracé de rayons par méthode de Monte-Carlo et en cherchant des configurations spatiales et directionnelles des modules radiatifs (ensemble lampe-réflecteur) pour l'optimisation du flux lumineux sur une surface circulaire de 5 cm de diamètre, placée sur le plan focal. Le choix de la distance focale du réflecteur s'est fait en fonction de la maximisation du rendement de conversion électrique-rayonnement incident et la correspondance avec celle des réflecteurs existants. La distance focale du réflecteur ellipsoïdal choisie est égale à 1585 mm.

Le réflecteur choisi est le réflecteur OPTIFORMS E1585. La source de rayonnement choisie est une lampe à arc au xénon XBO 6500 W/DHP OFR OSRAM d'une puissance électrique de 6.5 kW. Ce type de lampe est généralement utilisé dans les simulateurs solaires à haute densité de flux qui offre un spectre d'émission parmi le plus proche du spectre solaire. La disposition des réflecteurs dans l'espace a été définie en suivant les relations de conception proposées par Krueger *et al.* [3], les paramètres géométriques liés à l'emplacement et à l'orientation des sept modules radiatifs sont présentés dans le Tableau 1. La Figure 3 montre une coupe transversale du simulateur solaire et la Figure 4 présente la disposition des sept modules radiatifs. La méthode de tracé de rayons par Monte-Carlo, décrite dans [3], est implémentée et employée pour modéliser de manière précise la distribution du flux radiatif incident sur le plan focal du simulateur en partant des sources, les lampes. Martínez-Manuel *et al.* [4] a démontré qu'une bonne précision de la simulation de Monte Carlo est obtenue pour un nombre de rayons par lampe à partir de 10^6 . Ce nombre de rayons a été utilisé pour simuler le fonctionnement du présent simulateur solaire.

Paramètres géométriques	Valeur
Angle entre le bord intérieur du module extérieur et l'axe optique du simulateur (ϕ_{rim})	39.7

Angle formé par l'axe optique du module extérieur et l'axe optique du simulateur (γ)	29.2
Demi-angle de cône entre le bord intérieur du réflecteur et l'axe du module radiatif (β)	10.48
Angle formé par les axes optiques de deux modules radiatifs adjacents situés sur la rangée extérieure (θ)	60
Nombre total de modules radiatifs (rangée intérieure/extérieure)	1/6
Distance entre le plan focal et le réflecteur le plus proche l_1	1074
Distance minimale entre le réflecteur situé sur la rangée intérieure et n'importe quel module radiatif de la rangée extérieure l_2	200
Distance minimale entre deux modules radiatifs adjacents de la rangée extérieure l_3	177
Distance entre le point focal commun F2 du simulateur solaire et le bord intérieur d'un réflecteur situé sur la rangée concentrique extérieure d_e	1396
Distance entre le point focal F2 et le centre de l'ouverture du réflecteur d_c	1372

Tableau 1 : Paramètres géométriques du simulateur solaire

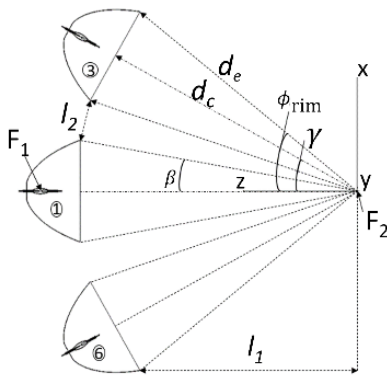


Figure 3: Coupe transversale du simulateur solaire

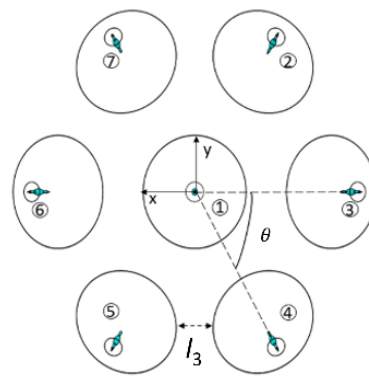


Figure 4: Vue de face de la disposition des sept lampes

2.3. Description du simulateur solaire

Le simulateur solaire est composé de sept modules radiatifs d'une puissance électrique de 6.5 kW chacune couplée à un réflecteur ellipsoïdal. Ce simulateur a une configuration verticale avec des faisceaux issus des lampes se dirigeant du haut vers le bas. Une série de mécanismes d'ajustement flexibles et précis, tels que des ajusteurs de position spatiale et angulaire, ont été utilisés pour obtenir une distribution modulable du flux radiatif sur l'échantillon testé. Chaque module radiatif est équipé d'un ventilateur pour refroidir la lampe pendant son fonctionnement, évitant ainsi toute surchauffe. Il est monté sur un support différent de celui du module radiatif pour éviter la propagation des vibrations pendant le fonctionnement. Chaque module radiatif a un bloc d'alimentation dédié à son fonctionnement. L'ajustement de la puissance de la lampe peut être fait à partir de l'espace de contrôle.

Une table motorisée, permettant des déplacements vertical de ± 10 cm et horizontal de ± 20 cm dans chaque direction orthogonale (0.1 mm de précision), sert de support d'échantillon ou de dispositif à tester. Ces caractéristiques de la table sont importantes durant les essais et la

calibration de flux car elles permettent un ajustement précis de l'emplacement de la cible (échantillon ou fluxmètre). La Figure 5 illustre un des modules radiatifs tandis que la Figure 6 montre une photographie du système composé de sept lampes. Des lasers de visée sont utilisés pour trianguler la position exacte du point focal du simulateur solaire. Enfin, le simulateur est placé à l'intérieur d'une enceinte métallique de dimensions 4 m × 4 m × 3.5 m. Une porte automatisée, constituée d'un volet roulant, installée sur l'un des quatre côtés de l'enceinte, assure son accès.

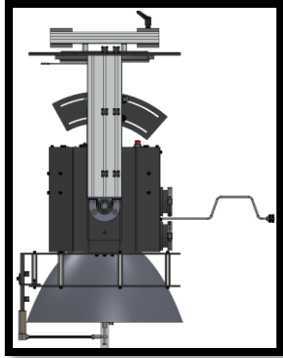


Figure 5 : *Module radiatif et son support*



Figure 6 : *Photographie des sept lampes*

2.4. Caractérisation du simulateur solaire

Pour mesurer la distribution du flux radiatif émis par les lampes et incident sur le plan focal du simulateur, deux méthodes de caractérisation du flux, l'une directe et l'autre indirecte, sont développées. La méthode directe emploie un fluxmètre Gardon. La méthode indirecte utilise un système d'imagerie comprenant une caméra CCD (Charged-Coupled Device) qui acquiert des images en nuance de gris, une cible lambertienne à réflexion diffuse et un fluxmètre Gardon.

2.4.1. Dispositif expérimental

Les images en nuance de gris de la cible lambertienne sont acquises par une caméra CCD Basler ace 2 R 1920-51gm, 2.3 MP, avec une résolution de 1920 × 1200 et une taille de pixel de 3.45 μm × 3.45 μm. Une lentille Basler C23-1620-5M avec une distance focale fixe de 16 mm et une résolution de 5 MP et d'un filtre à densité neutre (Midwest ND400, densité optique 4) sont montés sur la caméra CCD. La cible lambertienne est une plaque en aluminium, de dimensions 25 cm × 25 cm, revêtue d'une couche en céramique d'alumine déposée par projection plasma. En son centre est positionné le fluxmètre. Ce fluxmètre Gardon est fabriqué et fourni par Vatell (Christiansburg, VA), modèle TG1000-0, il est capable de mesurer des densités de flux allant jusqu'à 50 MW.m⁻² avec une incertitude de mesure de 3 %. Le fluxmètre a été étalonné par le fabricant, présentant une relation linéaire avec un facteur de calibration du capteur pour le flux radiatif de 457.6 kW.m⁻².V⁻¹ pour la plage de sortie susmentionnée. La Figure 7 montre le dispositif de mesure de flux monté sur la table motorisée.

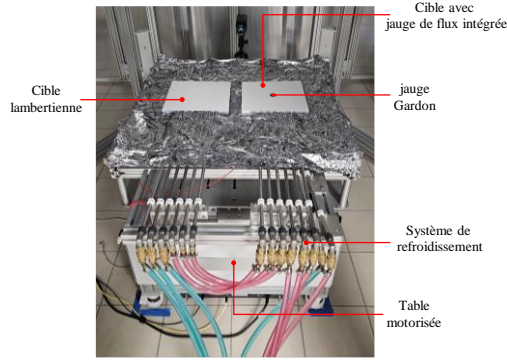


Figure 7 : Dispositif de mesure du flux monté sur la table motorisée

2.4.2. Méthodes de calibration

La méthode de caractérisation de flux utilise la cible lambertienne revêtue d'un revêtement fortement diffusant, la caméra CCD et le fluxmètre destiné à la mesure locale du rayonnement incident. La cible lambertienne est placée au ou proche du point focal du simulateur solaire et la caméra est utilisée pour acquérir des images en nuance de gris de l'intensité lumineuse réfléchie par la cible. Après acquisition des images, elles sont traitées pour obtenir une distribution spatiale des valeurs en nuance de gris de la réflexion de la cible. Les valeurs en nuances de gris peuvent ainsi être corrélées aux mesures locales du fluxmètre. Les données de pixels obtenues à partir de chaque image acquise sont transformées en une matrice numérique bidimensionnelle, dont la valeur est proportionnelle à la distribution du flux incident. Une minimisation des écarts entre les mesures en nuances de gris et les mesures de densité de flux permet d'obtenir une loi de calibration. La loi de calibration de chaque lampe s'écrit comme :

$$q = C_{ng-flux} \times G \quad (1)$$

où q est la densité de flux en $W.m^{-2}$, $C_{ng-flux}$ est le coefficient de calibration pour transformer une image en nuance de gris en une cartographie de flux associée en $W.m^{-2}.V^{-1}$ et G la valeur mesurée en nuance de gris.

Après la calibration du simulateur solaire, les échantillons d' Al_2O_3 et de SiC , placés au plan focal, sont soumis respectivement au flux lumineux issu de la lampe centrale du simulateur solaire fonctionnant à 60 % et 90 % de sa puissance nominale.

3. Résultats et discussions

La méthode de calibration a été effectuée pour chaque lampe à différentes puissances (40 %, 70 %, 100 %) et à différents plans (plan focal, 3 cm et 6 cm après le plan focal). La Figure 8 montre la loi de calibration obtenue pour la lampe centrale fonctionnant à 100 % de sa puissance nominale et la cible lambertienne placée sur le plan focal du simulateur. Cette loi de calibration transforme l'image en nuance de gris acquise par la caméra CCD en une cartographie de flux. La Figure 9 montre la cartographie de flux obtenue lorsque toutes les lampes du simulateur solaire fonctionnent à 100 % de leur puissance nominale sur une surface carrée de 5 cm × 5 cm. La Figure 10 montre la densité de flux moyen et la puissance radiative cumulée des sept lampes sur une surface circulaire de 25 cm de diamètre. On observe que la densité de flux est maximale au centre et décroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre. La valeur maximale de la densité de flux est égale à $12.7 \pm 0.7 MW.m^{-2}$ et la puissance radiative sur un disque de 5 cm de diamètre est égale à 7.8 kW.

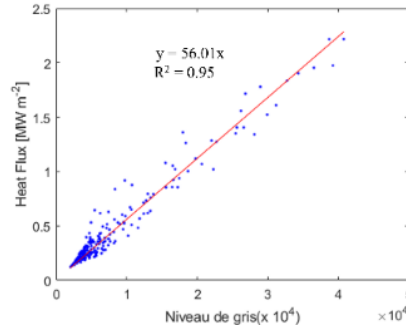


Figure 8 : Loi de calibration convertissant chaque valeur en nuance de gris en valeur de flux

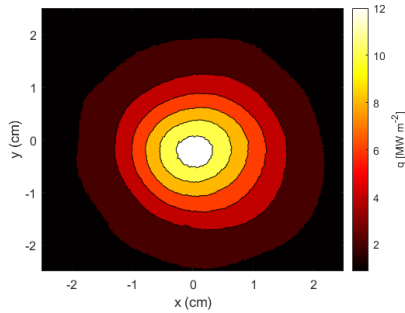


Figure 9 : Cartographie du flux

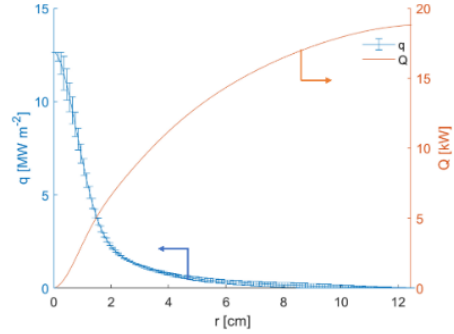


Figure 10 : Densité de flux q et puissance radiative cumulée des sept lampes à 100 %

La Figure 11 et la Figure 12 montrent la cartographie thermique de la face avant et arrière de l'échantillon. Le pic de température de l'échantillon, égal à 1176 ± 23 °C, est observé au centre de la face avant de l'échantillon et la température diminue quand on s'éloigne du centre vers le bord de l'échantillon. La différence de température dans l'épaisseur est égale à 230 ± 5 °C, soit 20 % du pic de température.

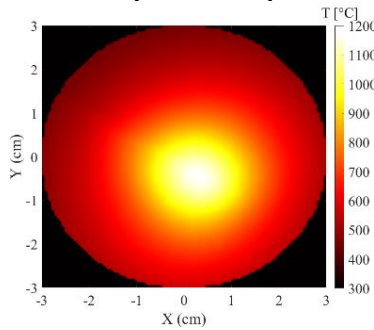


Figure 11 Cartographie thermique de la face avant de l'échantillon de Al_2O_3

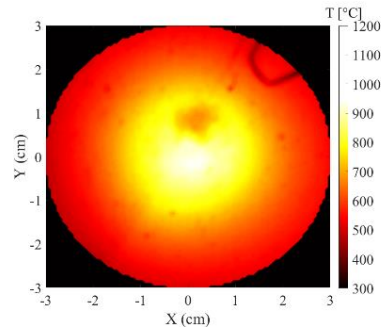


Figure 12 Cartographie thermique de la face arrière de l'échantillon de Al_2O_3

La Figure 13 et la Figure 14 montrent la cartographie thermique de la face avant et arrière de l'échantillon de SiC. Le pic de température de l'échantillon, égal à 1345 ± 27 °C, est observé au centre de la face avant de l'échantillon et la température diminue quand on s'éloigne du centre vers le bord de l'échantillon. La différence de température dans l'épaisseur est égale à 72 ± 1 °C, soit 5 % du pic de température. Le Tableau 2 résume les différentes mesures de température des échantillons d'alumine et de SiC.

	Surfaces	T_{\max}	T_{\min}	T_{mean}	ΔT_r	$\Delta T_{\text{ép}}$
Al_2O_3	Face avant	1176 ± 23	439 ± 8	659 ± 13	737 ± 15	230 ± 5
	Face arrière	946 ± 19	396 ± 8	644 ± 13	550 ± 11	

SiC	Face avant	1345 ± 27	896 ± 18	1147 ± 23	449 ± 9	72 ± 1
	Face arrière	1273 ± 25	856 ± 17	1154 ± 23	417 ± 8	

Tableau 2 : *Tableau récapitulatif des mesures de température suite à l'échauffement de l'échantillon de l'alumine et de SiC*

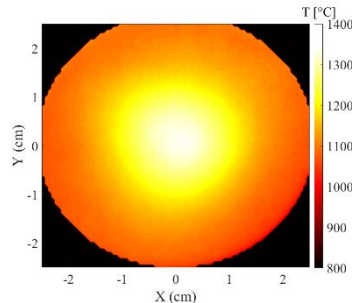


Figure 13 : *Cartographie thermique de la face avant de l'échantillon de SiC.*

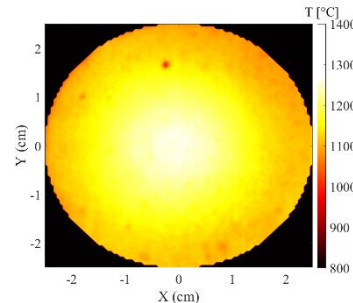


Figure 14 : *Cartographie thermique de la face arrière de l'échantillon de SiC*

4. Conclusion

Ce travail a présenté la conception, la caractérisation et le premier test du premier simulateur solaire à haute densité de flux, localisé en France. Les différents composants du simulateur solaire ont été décrits. La méthode de caractérisation de flux a été présentée. Des essais de chauffage en utilisant 60 % et 90 % de la puissance nominale de la lampe centrale sur des échantillons de SiC et Al_2O_3 ont été réalisés. Les lois de calibration de toutes les lampes ont été établies permettant caractérisées entièrement la puissance de chauffe du simulateur. Le pic de densité de flux, lorsque toutes les lampes fonctionnent à 100 % de leur puissance nominale, atteint $12.7 \pm 0.7 \text{ MW.m}^{-2}$ et la puissance radiative cumulée est de 7.8 kW sur une surface circulaire de 5 cm de diamètre. Un échantillon d'alumine, positionné au plan focal, chauffé par la lampe centrale du simulateur à 60 % de sa puissance atteint un pic de température égal à $1176 \pm 23 \text{ °C}$ avec une différence de température dans l'épaisseur égale à 20 %. Un échantillon de SiC, au plan focal et chauffé par la lampe centrale à 90 % atteint une température maximale de $1345 \pm 27 \text{ °C}$ avec une différence de température égal à 5 % du pic de température atteint.

Références

- [1] G. Levêque, R. Bader, W. Lipiński, S. Haussener, Experimental and numerical characterization of a new 45 kW_{el} multisource high-flux solar simulator, Opt. Express, OE 24 (2016) A1360–A1373. <https://doi.org/10.1364/OE.24.0A1360>.
- [2] M. Abdullah, B. Hernández Corona, M. Martins, N. Lopez Ferber, P. Armstrong, M. Chiesa, N. Calvet, Advancements, challenges, and opportunities in the measurement of high heat flux for concentrated solar thermal systems, Solar Energy 287 (2025) 113252. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113252>.
- [3] K.R. Krueger, Design and characterization of a concentrating solar simulator., in: 2012. <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-characterization-of-a-concentrating-Krueger/8cf19a9afff68bdb8dfe58bb5ca7acd9809aeb8b> (accessed April 3, 2025).
- [4] L. Martínez-Manuel, M.I. Peña-Cruz, C.A. Pineda-Arellano, J. Gonzalo Carrillo-Baeza, D.A. May-Arrioja, Optical improvement for modulating a high flux solar simulator designed for solar thermal and thermochemical research, Appl Opt 58 (2019) 2605–2615. <https://doi.org/10.1364/AO.58.002605>.