

# Amélioration d'un système à réflecteur de Scheffler pour satisfaire les besoins de la cuisine solaire

Thomas Fasquelle, Gabriel Guillet, Benjamin Kadoch, Séverine Barbosa  
Présentation des travaux de thèse de doctorat de Gabriel Guillet, soutenue le 12 Mars 2024

Laboratoire IUSTI (Institut Universitaire des Systèmes Thermiques et Industriels),  
AMU (Aix-Marseille Université),  
Polytech'Marseille  
26/06/2024



# CANOPEE Le Présage et son projet

- Objectif : ouvrir un restaurant semi-gastronomique utilisant l'énergie solaire pour la plupart de ses besoins



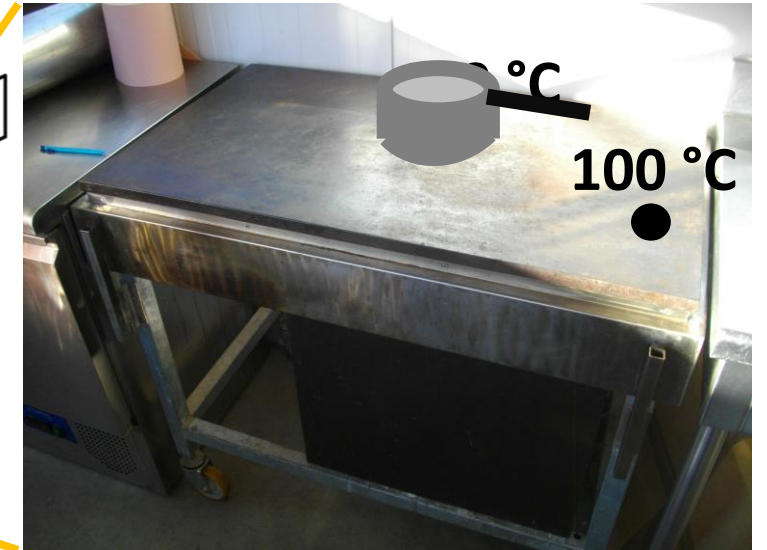
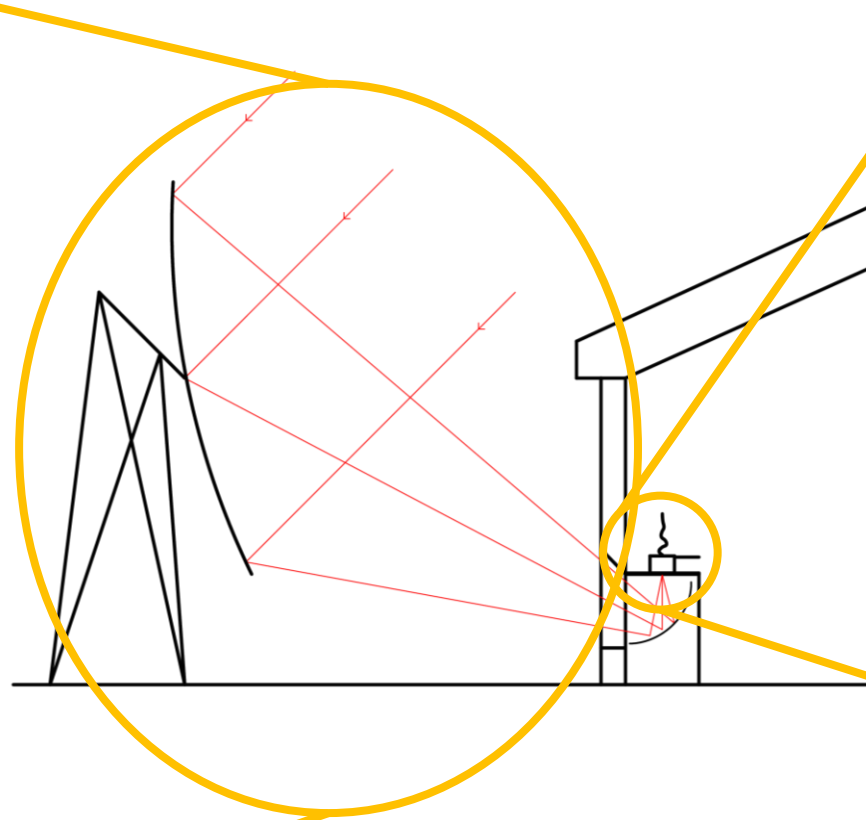
© 2017 CANOPEE Le Présage.

# CANOPÉE Le Présage et son projet

- Etat actuel :

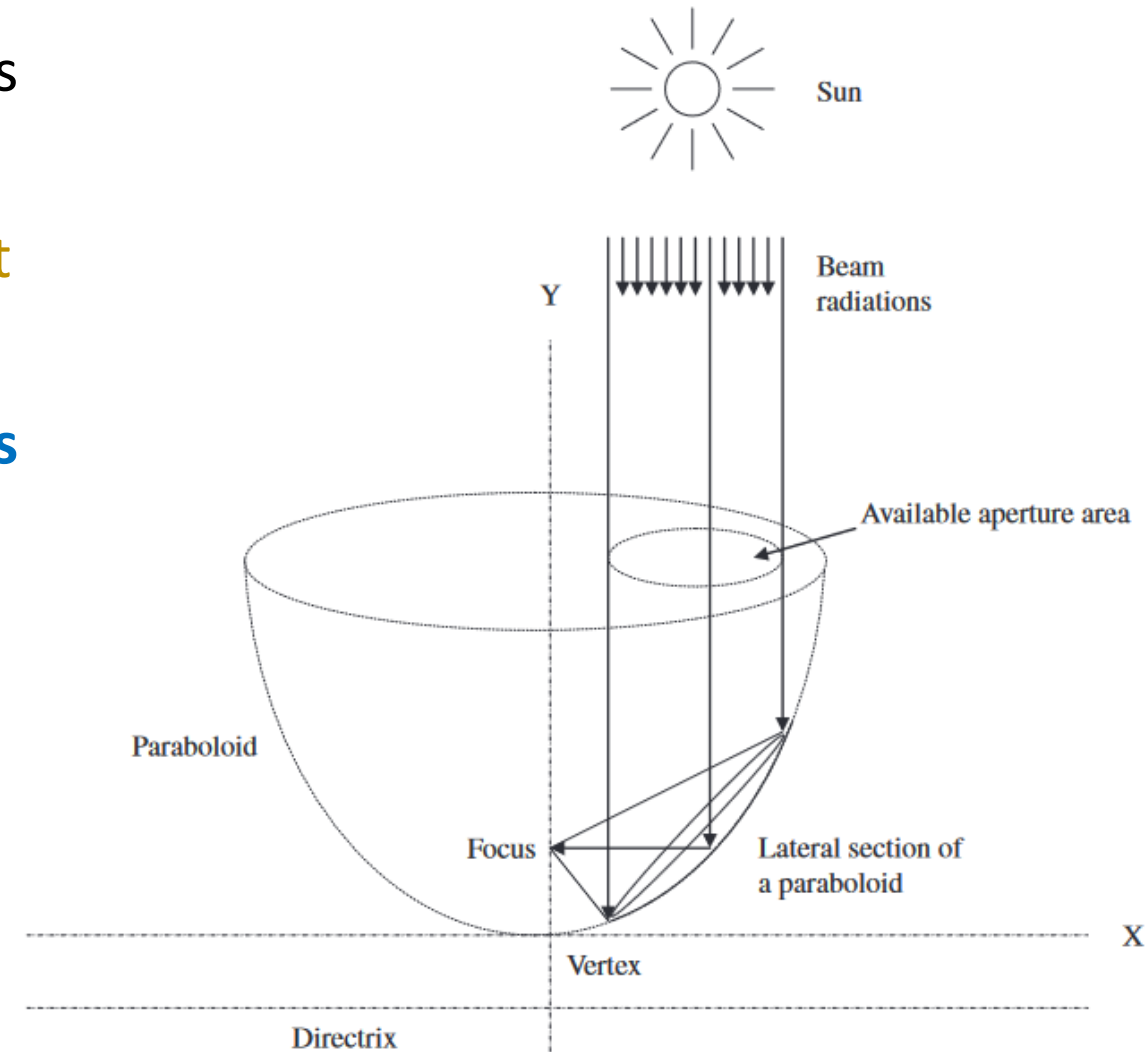


# Le principe de la plaque “coup de feu” sous solaire concentré



# Principe de fonctionnement d'un réflecteur de Scheffler

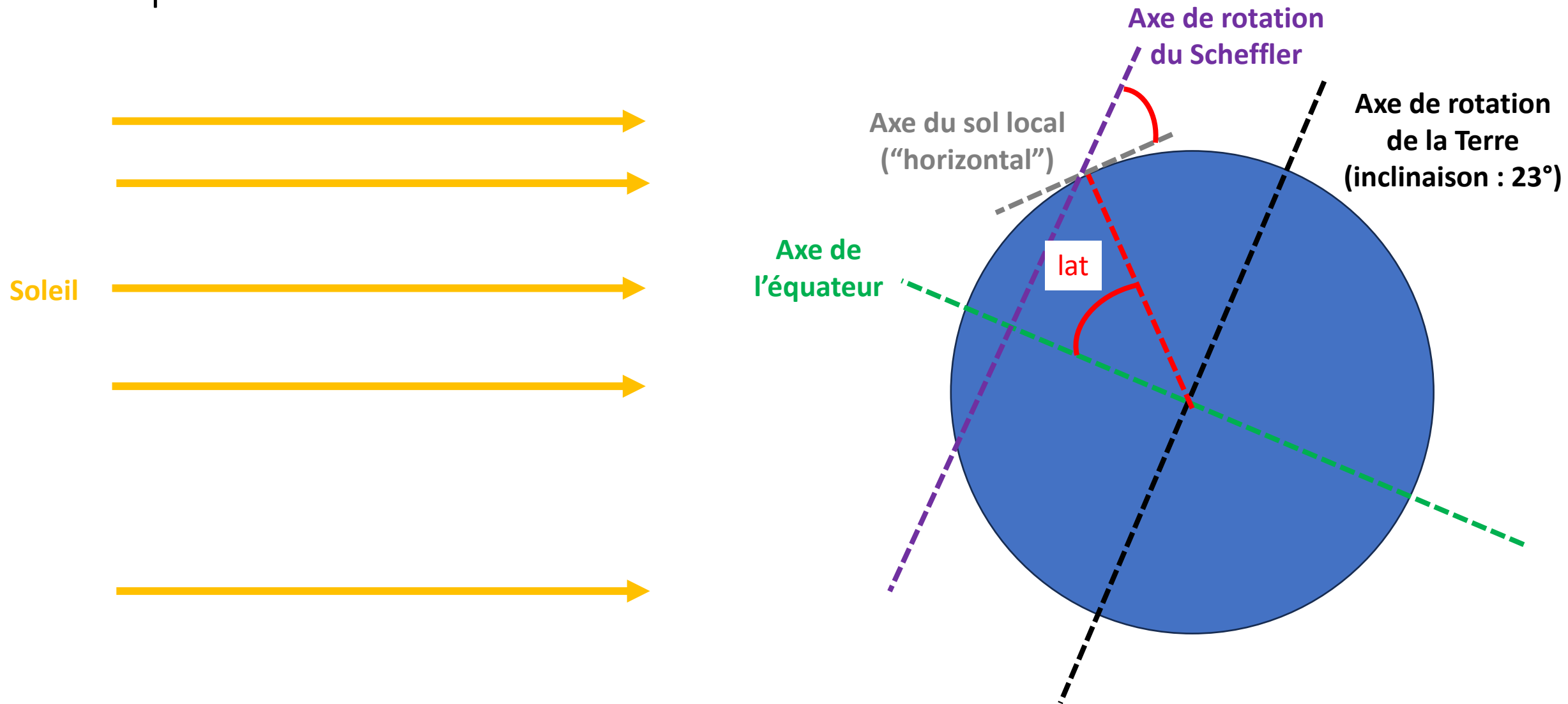
- Inventé et fabriqué par Wolfgang Scheffler dans les années 80 (Ölher and Scheffler, 1994).
- Décrit en détail uniquement en 2010 (Munir et al.)
- **Très peu étudié, notamment ses performances et la distribution du flux.**
- Structure flexible pour s'adapter à une partie des contours de différentes paraboles  
=> point focal fixe



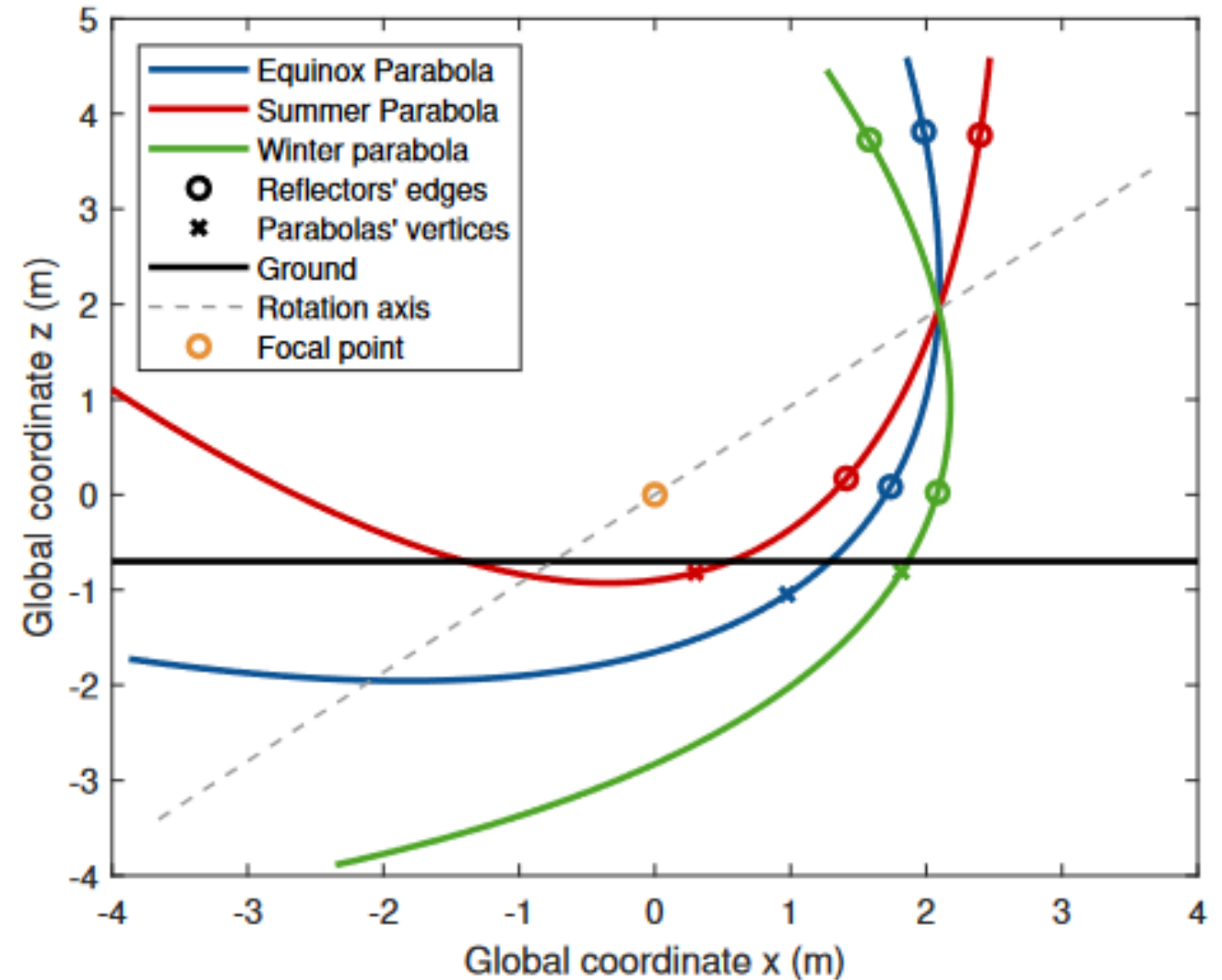
# Principe de fonctionnement d'un réflecteur de Scheffler

	Eté	Hiver	Eté + Hiver	Point focal fixe et attache fixe ?
Parabole 1er essai				
Parabole 2e essai				
Réflecteur de Scheffler (changement de courbure)				

# Principe de fonctionnement d'un réflecteur de Scheffler



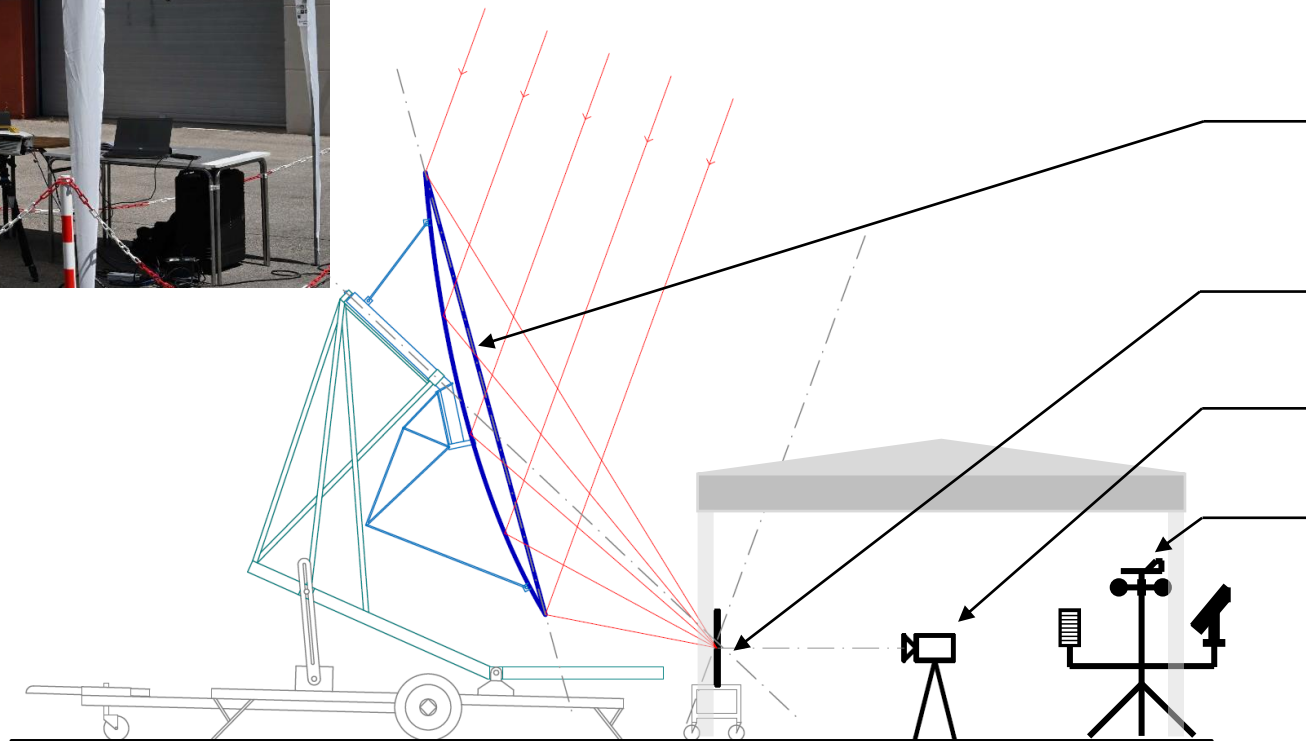
# Principe de fonctionnement d'un réflecteur de Scheffler



# Protocole expérimental et banc de mesure



Réflecteur de Scheffler à **facettes**, ellipse de **8 m<sup>2</sup>**,  
ouverture entre **4.6 m<sup>2</sup>** (solstice d'été) et **6.8 m<sup>2</sup>**  
(solstice d'hiver)



Réflecteur de Scheffler  
( $A_{th} = 8 \text{ m}^2$ )

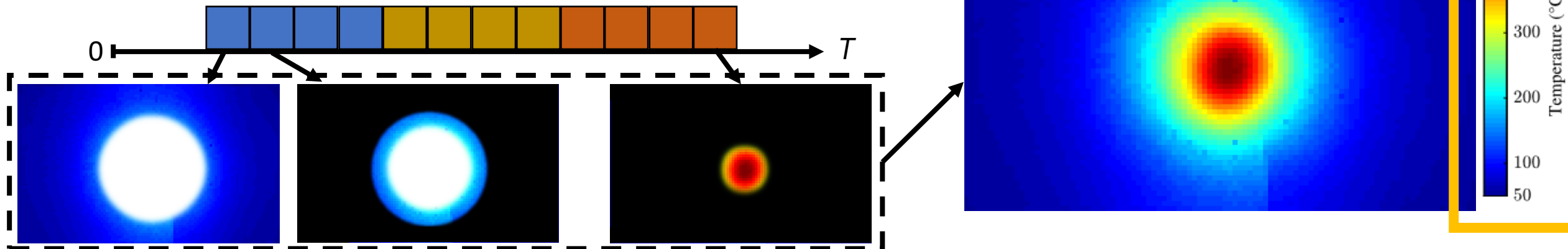
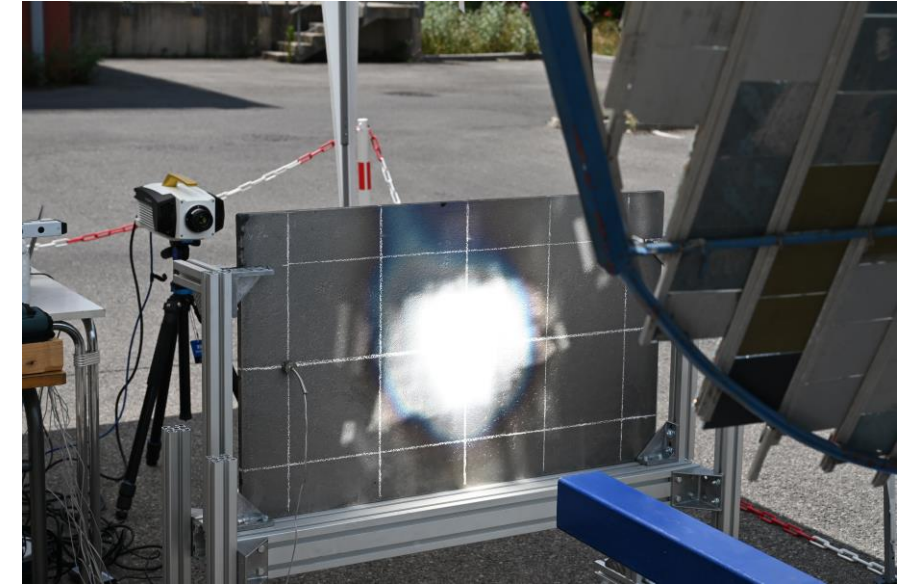
Récepteur point

Caméra IR(  $T(x, y, z_{\Gamma_2})$  )

Station Météo:  
Thermomètre ( $T_a$ ),  
Anémomètre ( $V_v$ ),  
Pyrhéliomètre ( $I_{DN}$ ).

## Mesure de flux : protocole expérimental

- Mise en place de la parabole et du récepteur
- Démarrage du suivi du soleil
- Attente du régime permanent
- Mesures
  - 3 filtres (“gamme de longueur d’onde”)
  - 4 temps d’intégration (“temps d’exposition”)
  - 400 images (20 Hz) par acquisition



# Estimation du flux (Guillet et al., 2024)

## • Modèle thermique non linéaire 3D sans *a priori* de $\varphi_{inc}$

- Condition appliquée à la limite  $\Gamma_1$  exposé au flux solaire concentré

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

- Transferts thermiques dans la plaque  $\Omega$  :

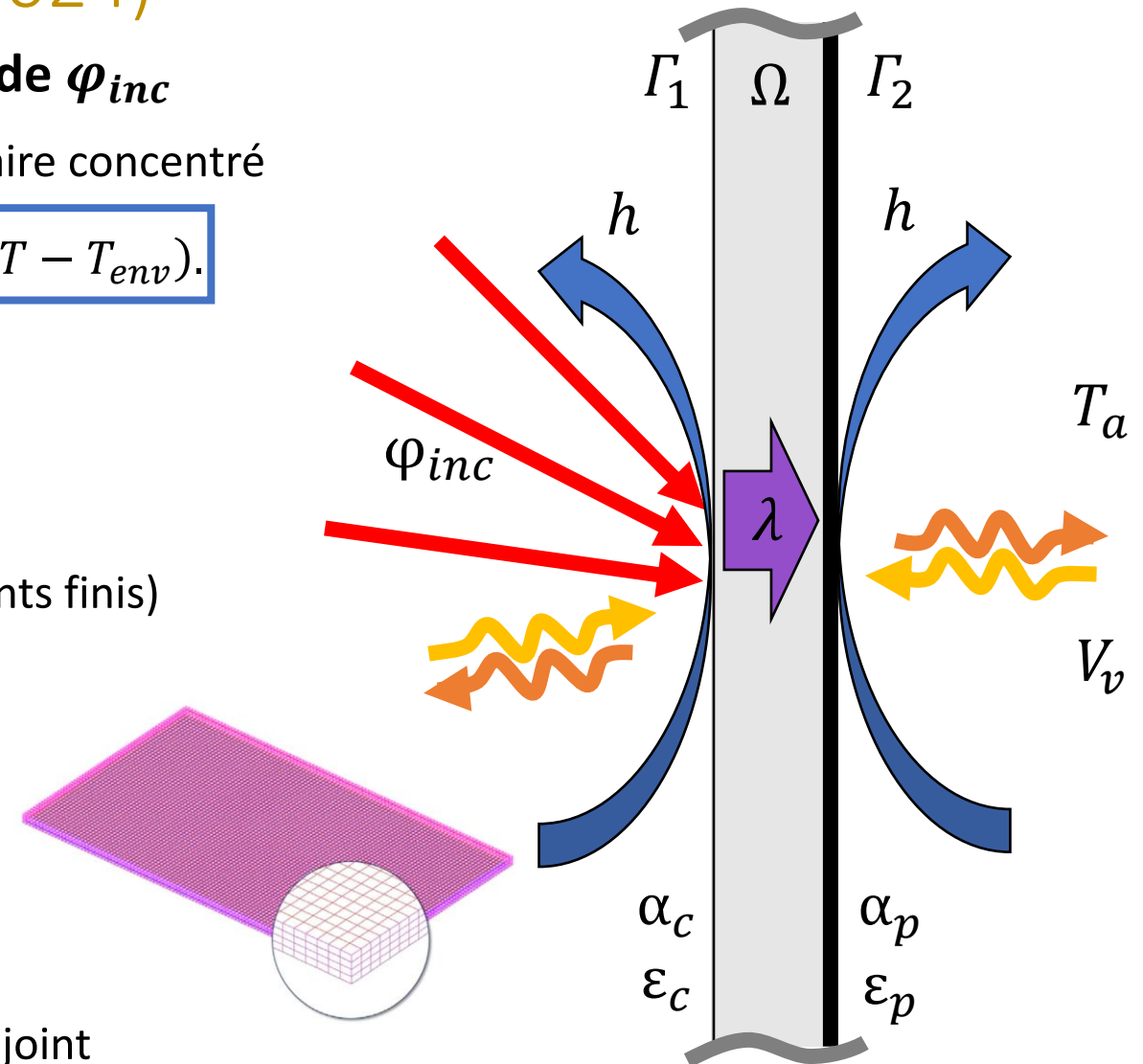
$$\nabla \cdot (\lambda(T) \cdot \nabla T) = 0.$$

- Résolu avec le logiciel **CAST3M** (méthode des éléments finis)
- Maillage : 24 000 éléments cubiques à 8 noeuds

## • Problème direct : $\varphi_{inc}(x, y, z_{\Gamma_1}) \rightarrow T(x, y, z_{\Gamma_2})$

## • Problème inverse : $\varphi_{inc}(x, y, z_{\Gamma_1}) \leftarrow T(x, y, z_{\Gamma_2})$

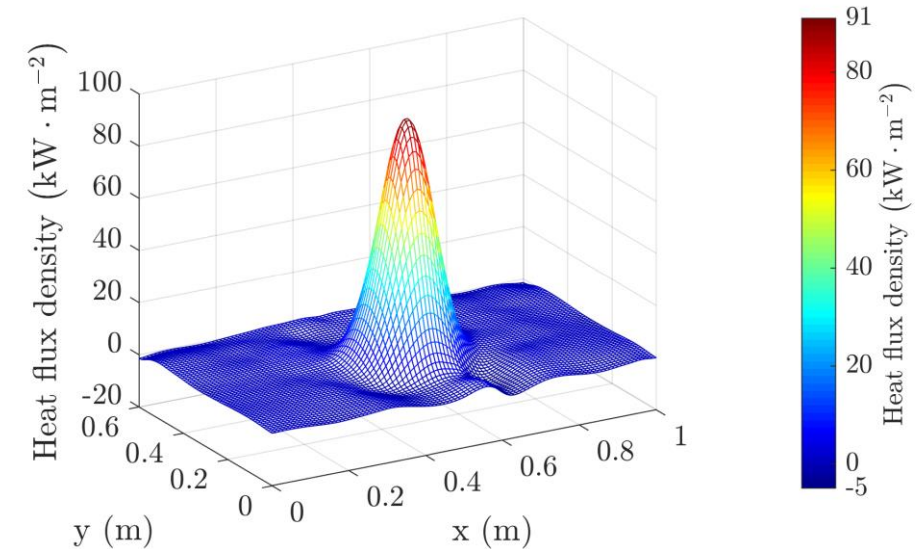
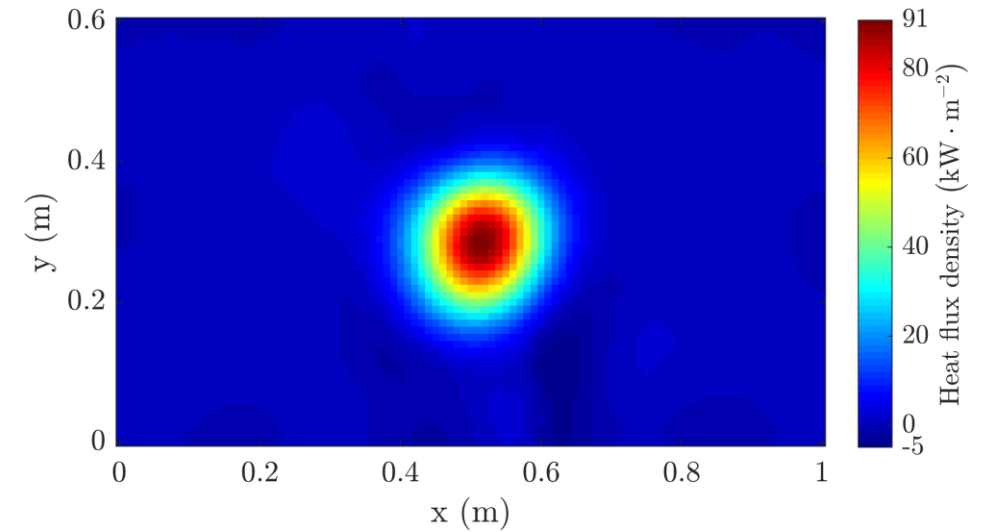
- Méthode des gradients conjugués couplés à l'état adjoint



Figures from © 2024 Guillet et al. Published by Elsevier Ltd. CC BY-NC 4.0

# Résultats de l'estimation

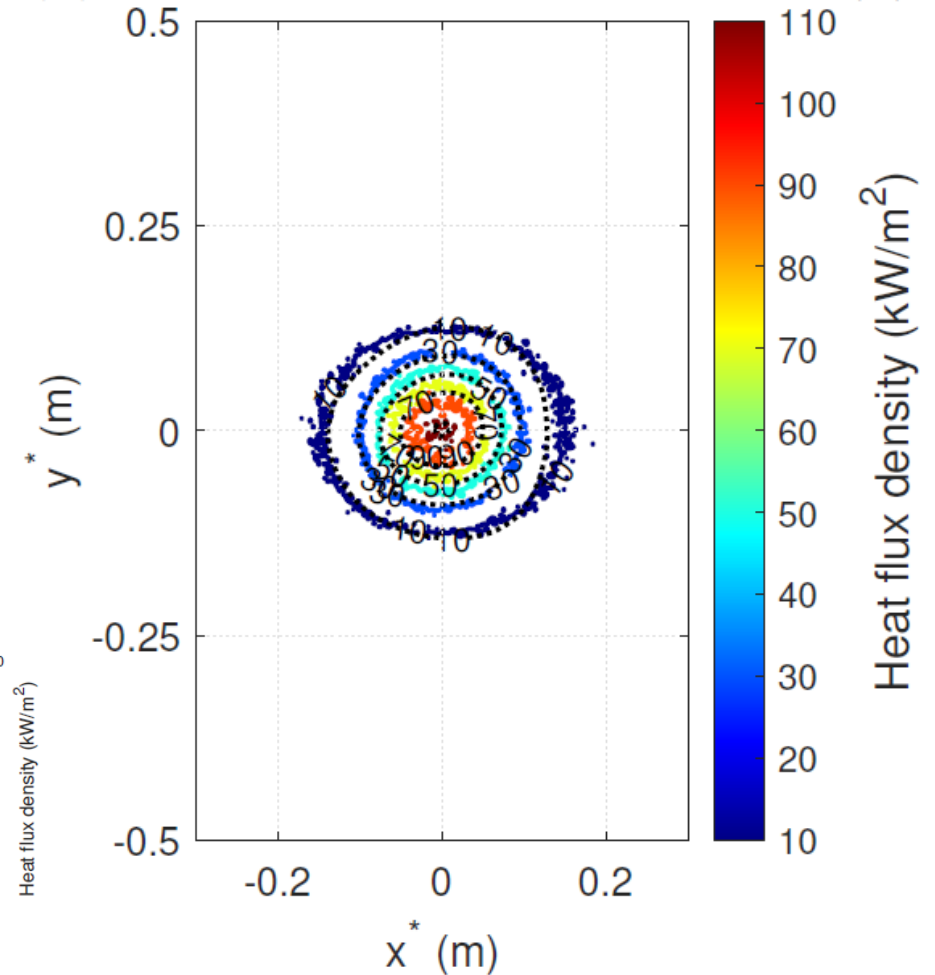
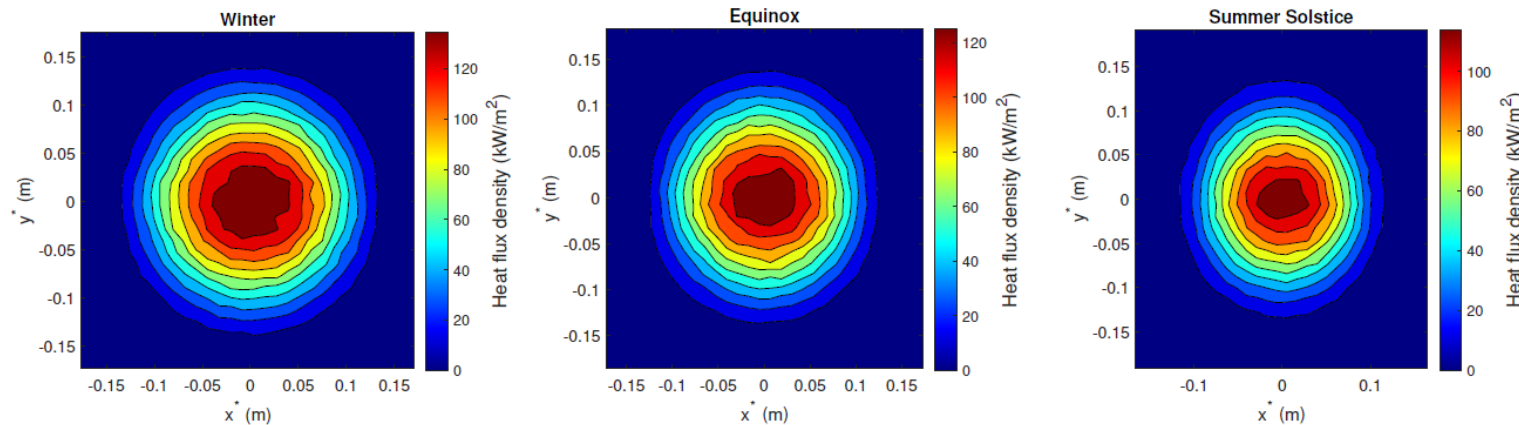
- Expérimentations
    - **23 mesures**
    - **7 jours différents** de Mars à Juillet
  - Résultat principal : 11:57 le 14/06/2022
    - Ouverture : 4.3 m<sup>2</sup>
    - DNI : 904 W/m<sup>2</sup>
    - Température ambiante : 30.2 °C
    - Vitesse du vent : 0.9 m/s
    - Température max atteinte : **486 °C ± 5 °C**
    - Densité de flux max atteinte : **91 kW/m<sup>2</sup> ± 9 kW/m<sup>2</sup>**
    - Flux total : **2.5 kW ± 0.2 kW**
    - Tache Gaussienne elliptique avec  $\sigma_1 = 66 \text{ mm}$  et  $\sigma_2 = 60 \text{ mm}$
- => **45 kW/m<sup>2</sup> en moyenne sur un cercle de 26 cm de diamètre**



From ©2024 Guillet et al. Published by Elsevier Ltd. CC BY-NC 4.0

# Un modèle numérique Soltrace pour les réflecteurs de Scheffler

- **SolTrace**: logiciel gratuit et open source (NREL)
- 2 modèles : parabole “lisse/continue” ou à facettes
- Reposant sur les formulations de Reddy, 2018
- Calibration à partir des résultats expérimentaux
- **Pas d'évolution visible de la taille ou de la forme de la tache en fonction des saisons ou de l'heure**

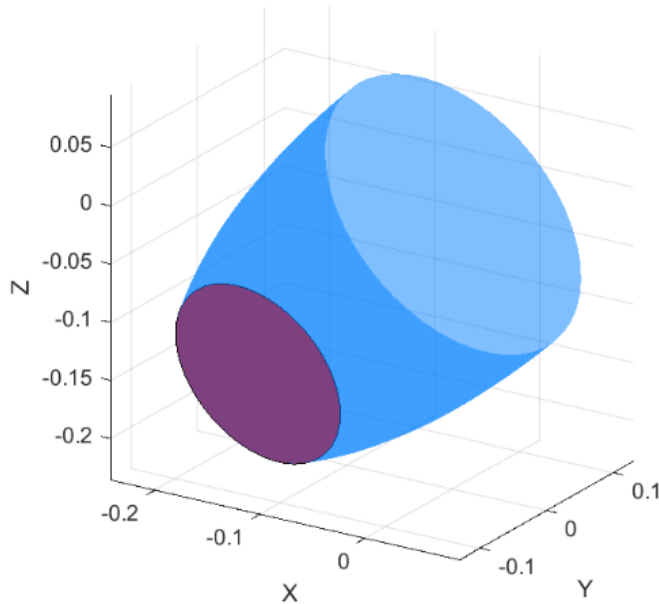


T. Fasquelle, Benjamin Kadoch, Gabriel Guillet, Séverine Barbosa, “Realistic Ray-Tracing Model of a Scheffler Reflector Based on Experimental Data, accepted in Renewable Energy

**Script disponible sur OVF avec DOI !**

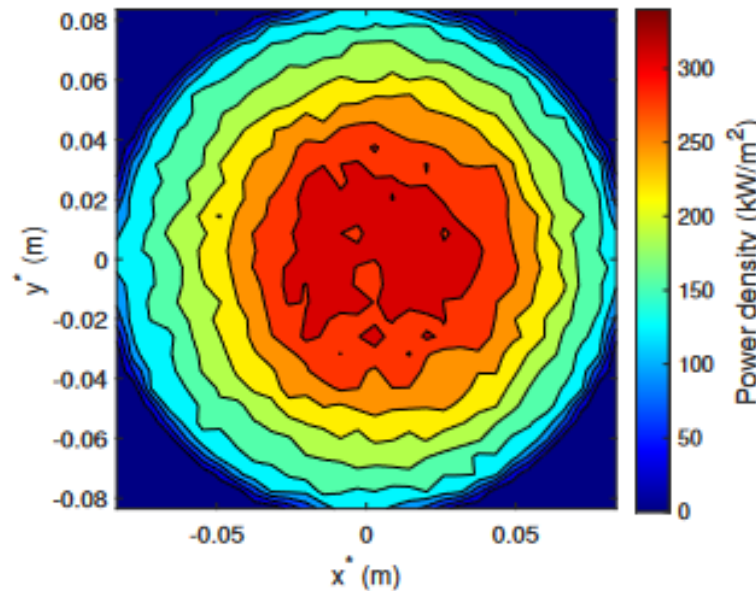
# Un modèle numérique Soltrace pour les réflecteurs de Scheffler

- Dimensionnement de réflecteur secondaire (CPC = Compound Parabolic Collector) pour améliorer les performances du réflecteur de Scheffler



Avec des miroirs en alu  
( $\sigma = 90\%$ )

21 Décembre

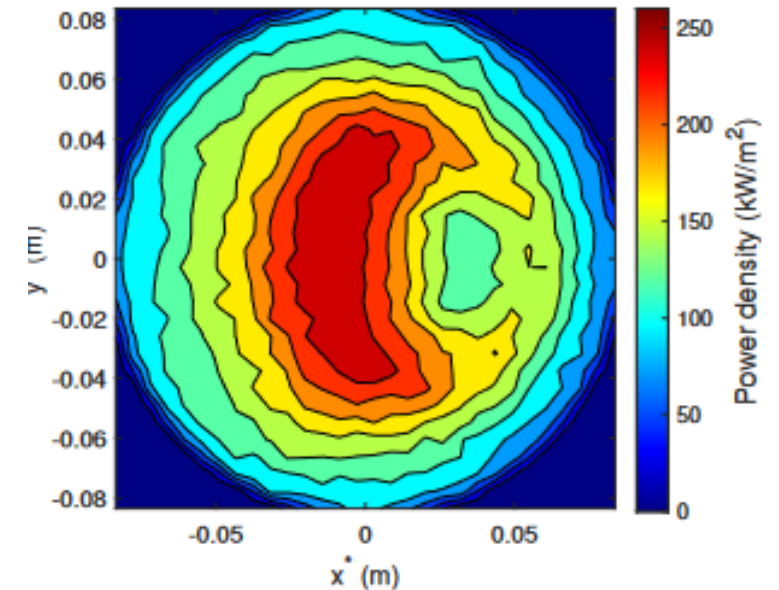


4.86 kW

337 kW/m² max

222 kW/m² en moyenne

21 Juin



3.41 kW

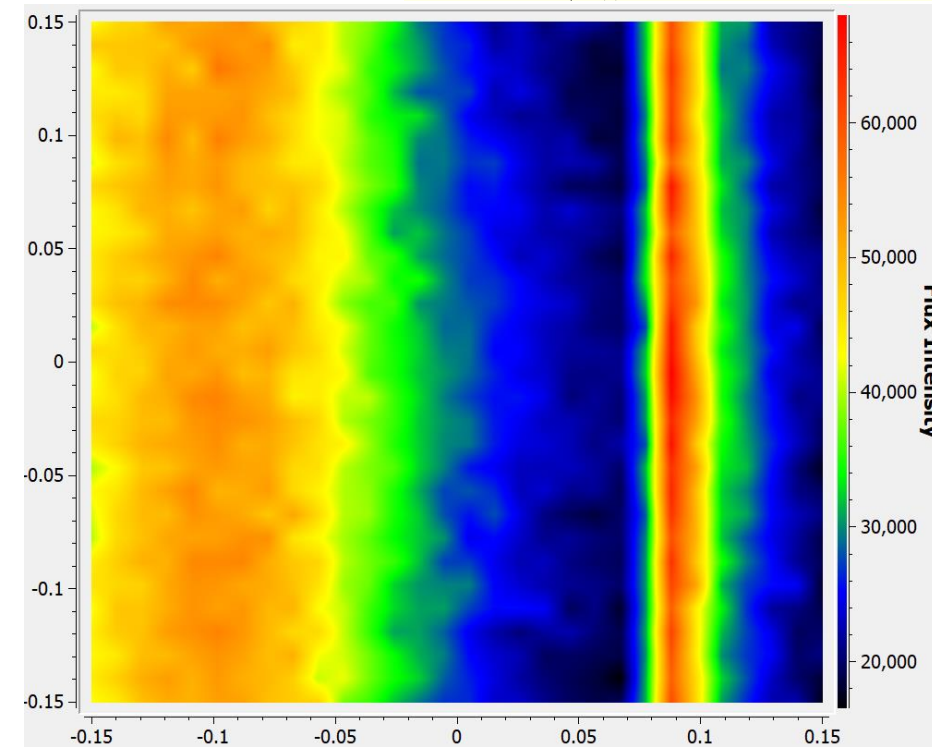
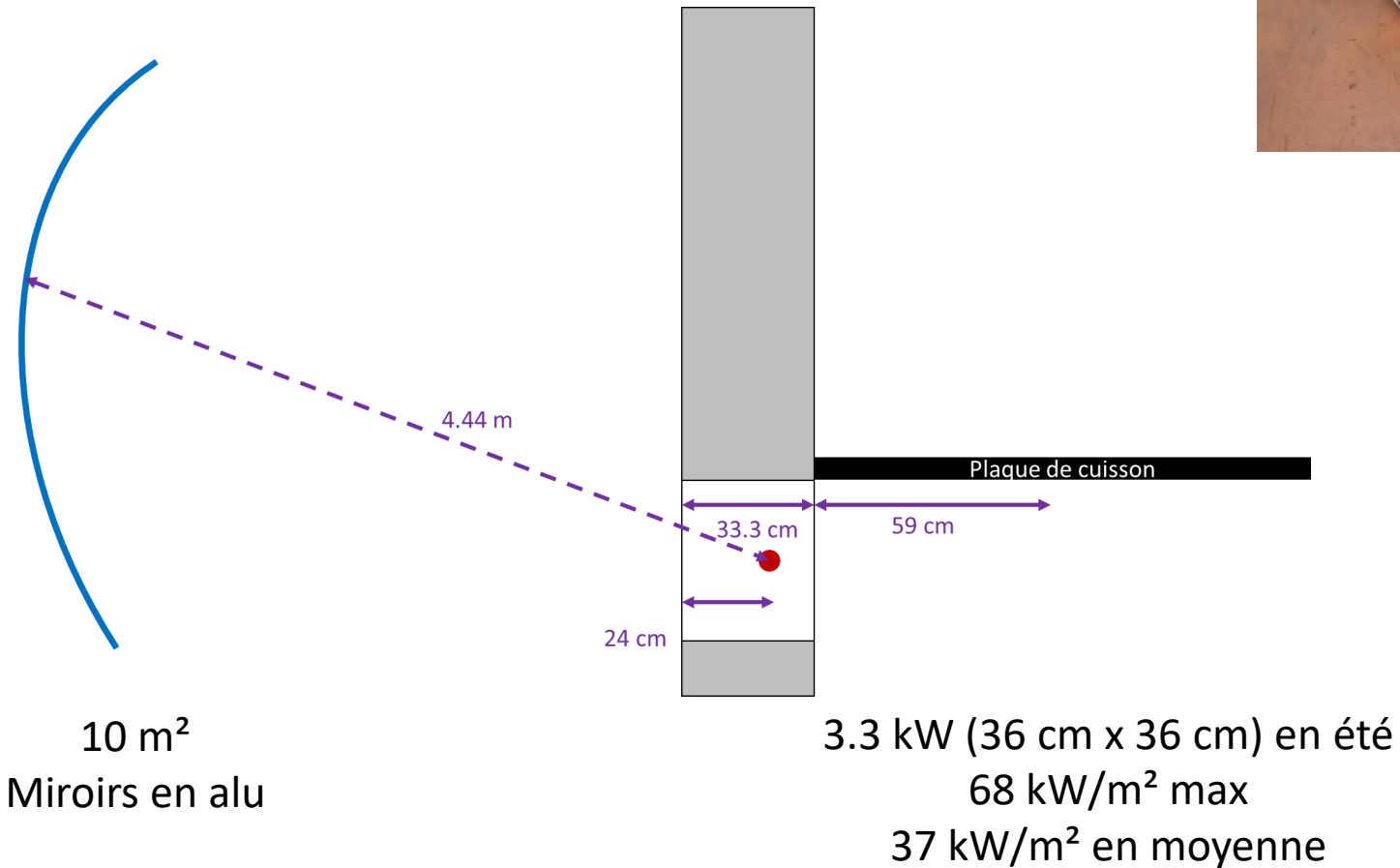
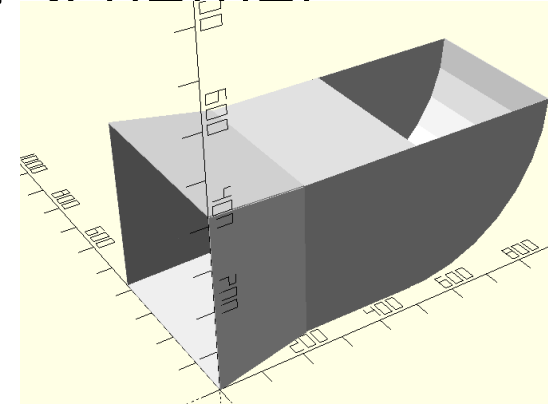
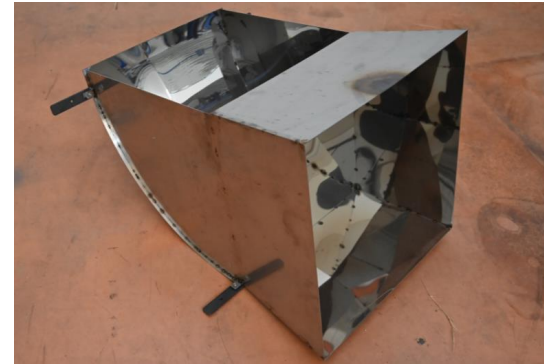
252 kW/m² max

156 kW/m² en moyenne

T. Fasquelle, Benjamin Kadoch, Gabriel Guillet, Séverine Barbosa, "Realistic Ray-Tracing Model of a Scheffler Reflector Based on Experimental Data, accepted in Renewable Energy

# Un modèle numérique Soltrace pour les réflecteurs de Scheffler

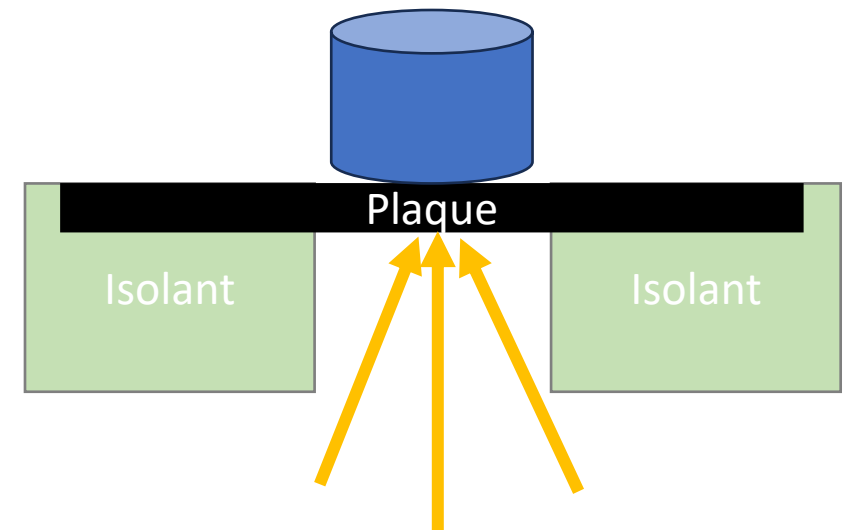
- Dimensionnement de réflecteurs secondaires adaptés aux besoins du restaurant



# Estimation des performances du système global



400 W dans la casserole !  
Car pertes de toutes part  
=> Comment forcer la chaleur à aller dans la  
casserole plutôt qu'ailleurs, sans changer les  
habitudes des personnes qui cuisinent ?



# Merci pour votre attention

thomas.fasquelle@univ-amu.fr

guillet.gabriel@laposte.net

IUSTI  
LABORATOIRE  
AIX MARSEILLE UNIVERSITÉ  
CNRS

Aix-Marseille  
université  
Sociolement engagée

cnrs

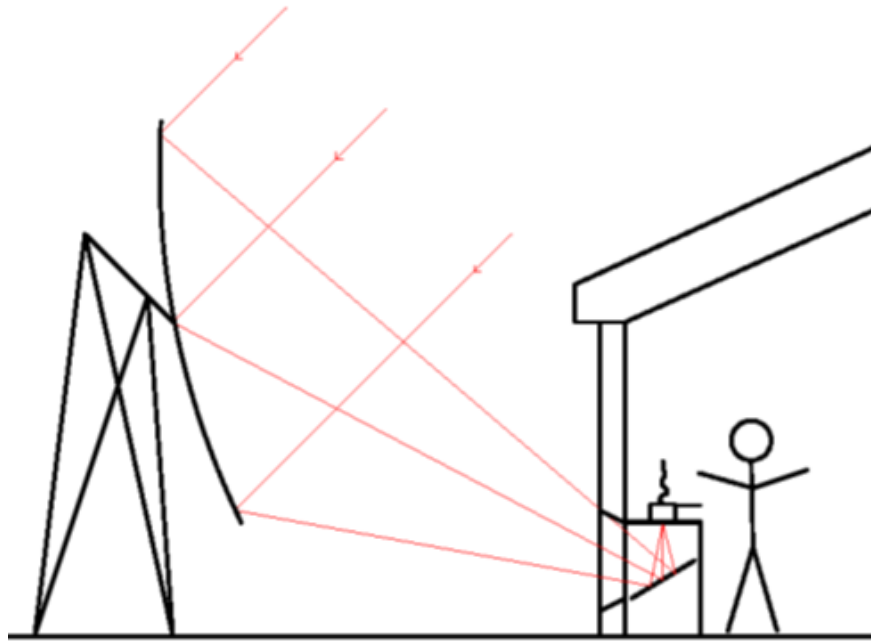
POLYTECH  
MARSEILLE  
Aix-Marseille Université

RÉGION  
SUD  
PROVENCE  
ALPES  
CÔTE D'AZUR

LE PRÉSAGE

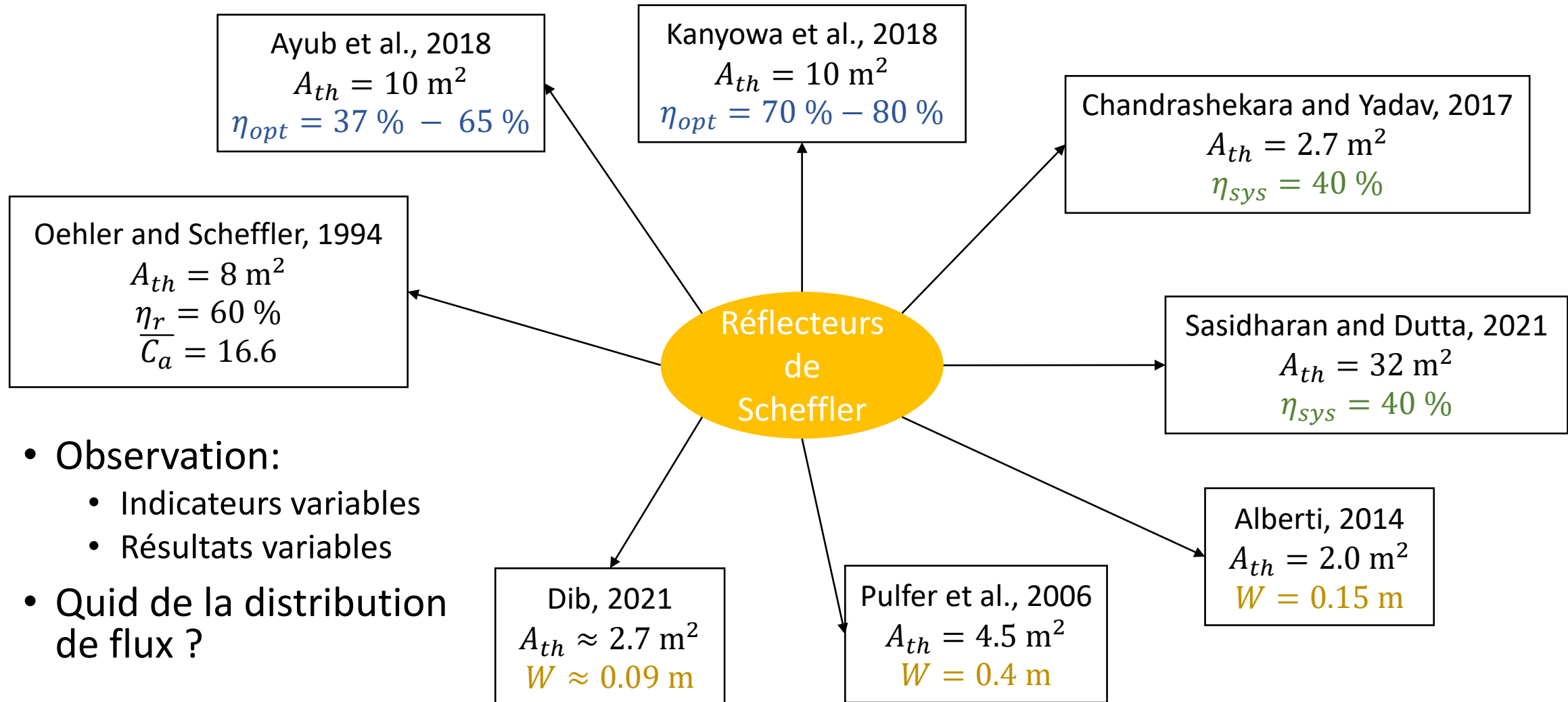
Institut  
Mécanique et  
Ingénierie  
Aix-Marseille Université

LABELLISÉ PAR  
Capenergies  
— 2020 —



# Annexes

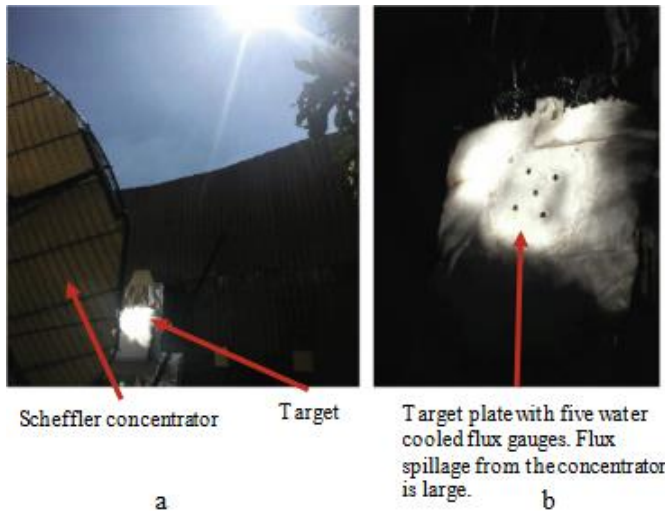
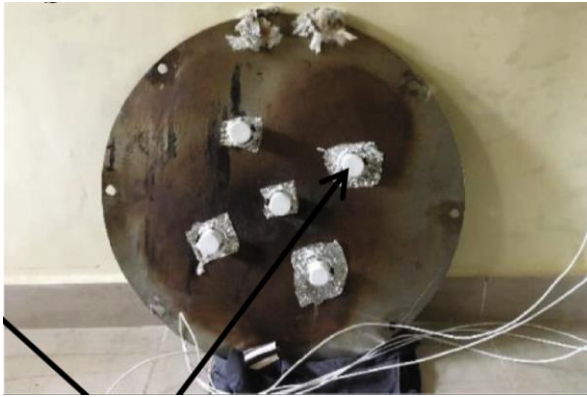
# Etat de l'art sur les performances des réflecteurs de Scheffler



- Observation:
  - Indicateurs variables
  - Résultats variables
- Quid de la distribution de flux ?

# Etat de l'art sur la connaissance de la distribution de flux renvoyés par les réflecteurs de Scheffler

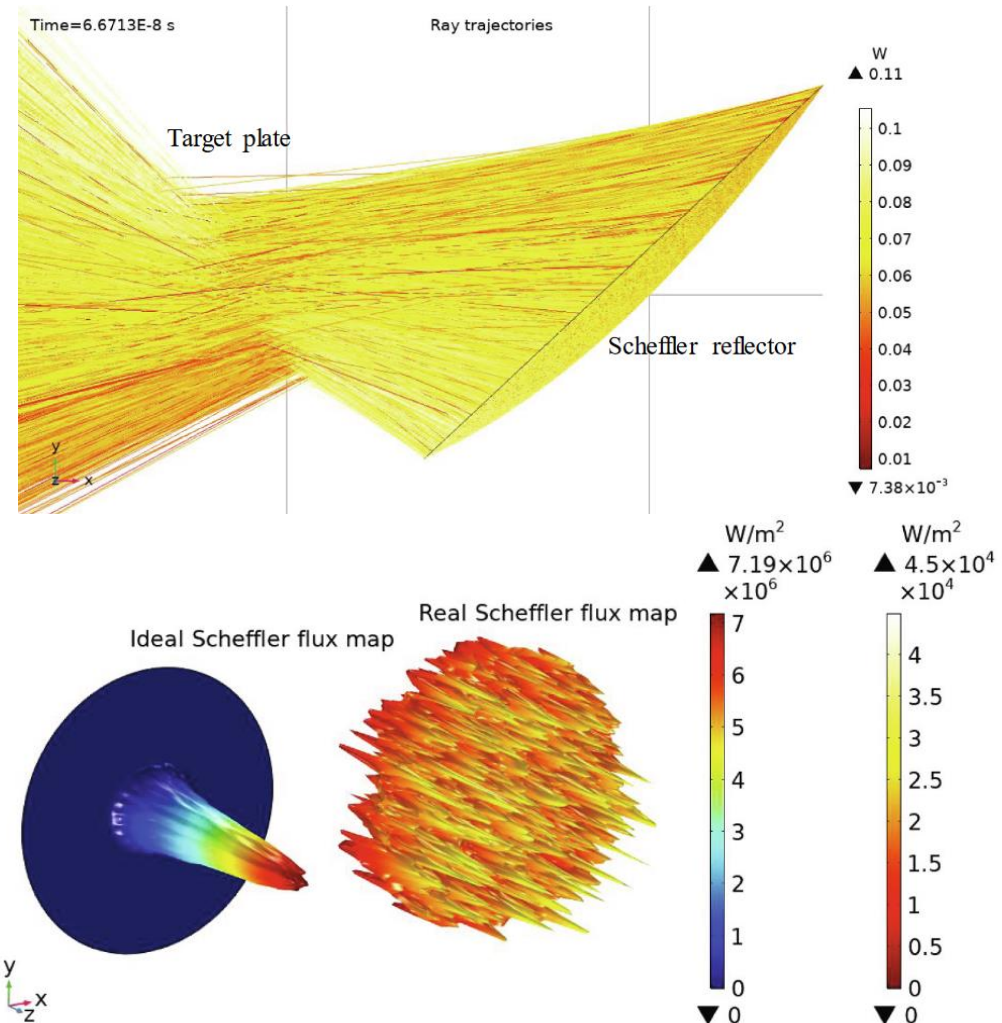
Sasidharan and Dutta, 2021



Scheffler concentrator

Target

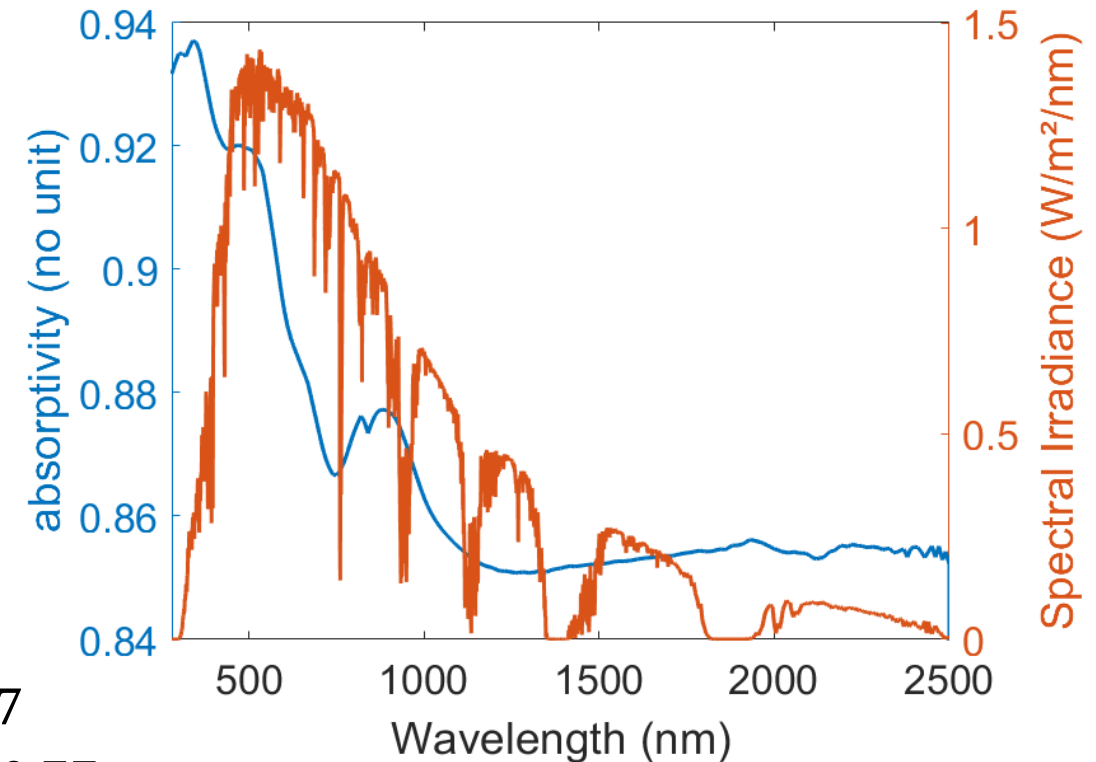
Target plate with five water cooled flux gauges. Flux spillage from the concentrator is large.



Figures from Sasidharan and Dutta © 2021 International Solar Energy Society. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

# Propriétés des matériaux (Guillet et al., 2024)

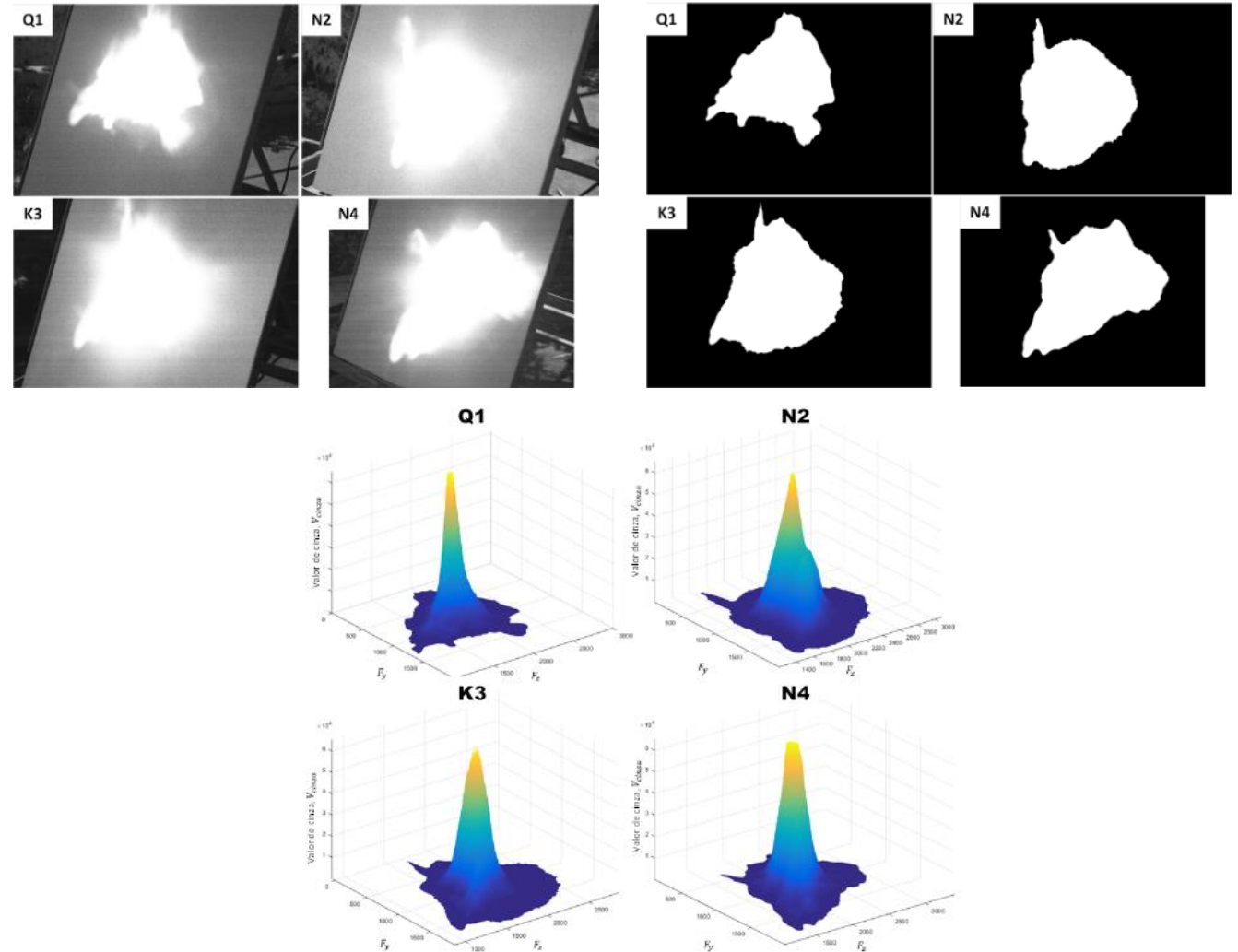
- Matériaux : fonte, peinture, miroirs
- Spectrophotomètres :
  - Perkin Elmer Lambda 950 (0.150  $\mu\text{m}$  – 3.3  $\mu\text{m}$ )
  - Nicolet FTIR (1.25  $\mu\text{m}$  – 25  $\mu\text{m}$ )
- Méthode :
  - Mesures monochromatiques
  - Pondération par les spectres des corps noirs
- Résultats :
  - Absorptivité solaire de la fonte :  $\alpha_c = 0.88$
  - Emissivité spectrale moyenne de la fonte :  $\varepsilon_c = 0.77$
  - Emissivité spectrale moyenne de la peinture :  $\varepsilon_p = 0.77$
  - Réflectivité solaire moyenne du réflecteur de Scheffler :  $\rho_g = 0.80$



From © 2024 Guillet et al. Published by Elsevier Ltd. CC BY-NC 4.0

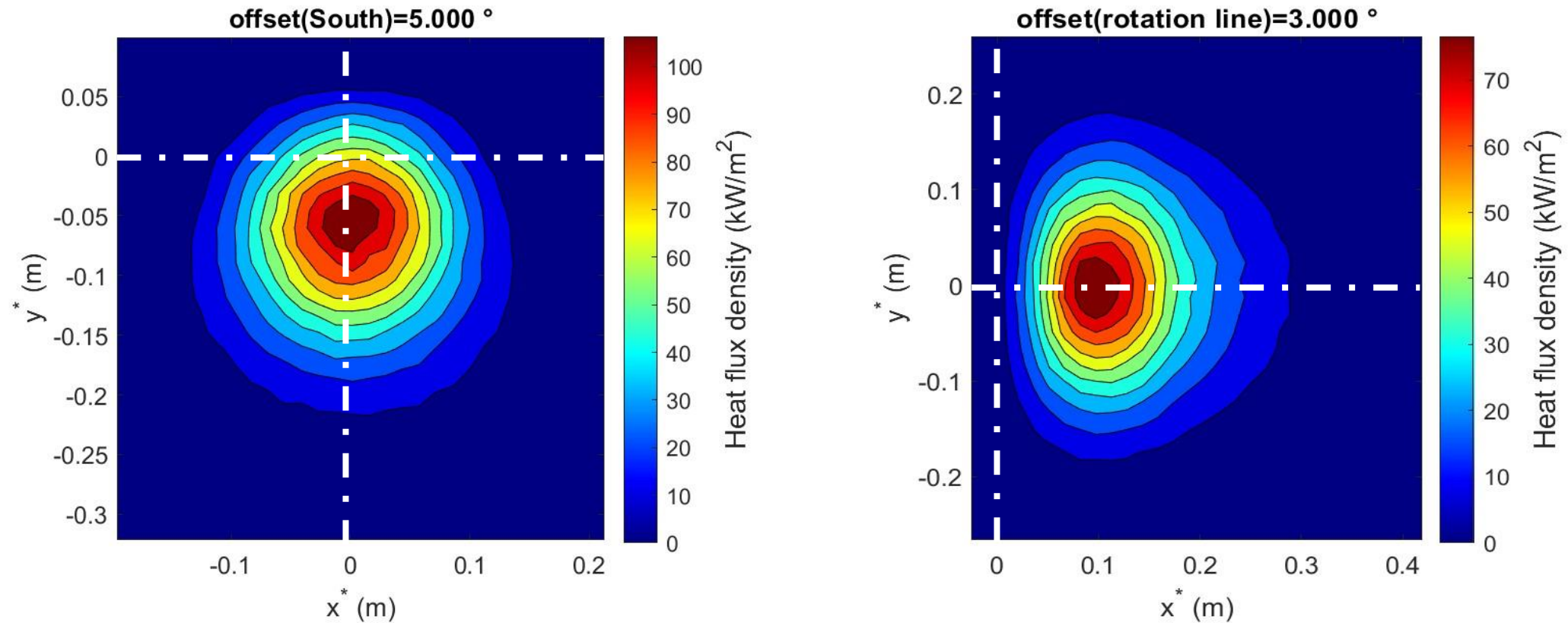
# Etat de l'art sur la connaissance de la distribution de flux renvoyés par les réflecteurs de Scheffler

Dib, 2021



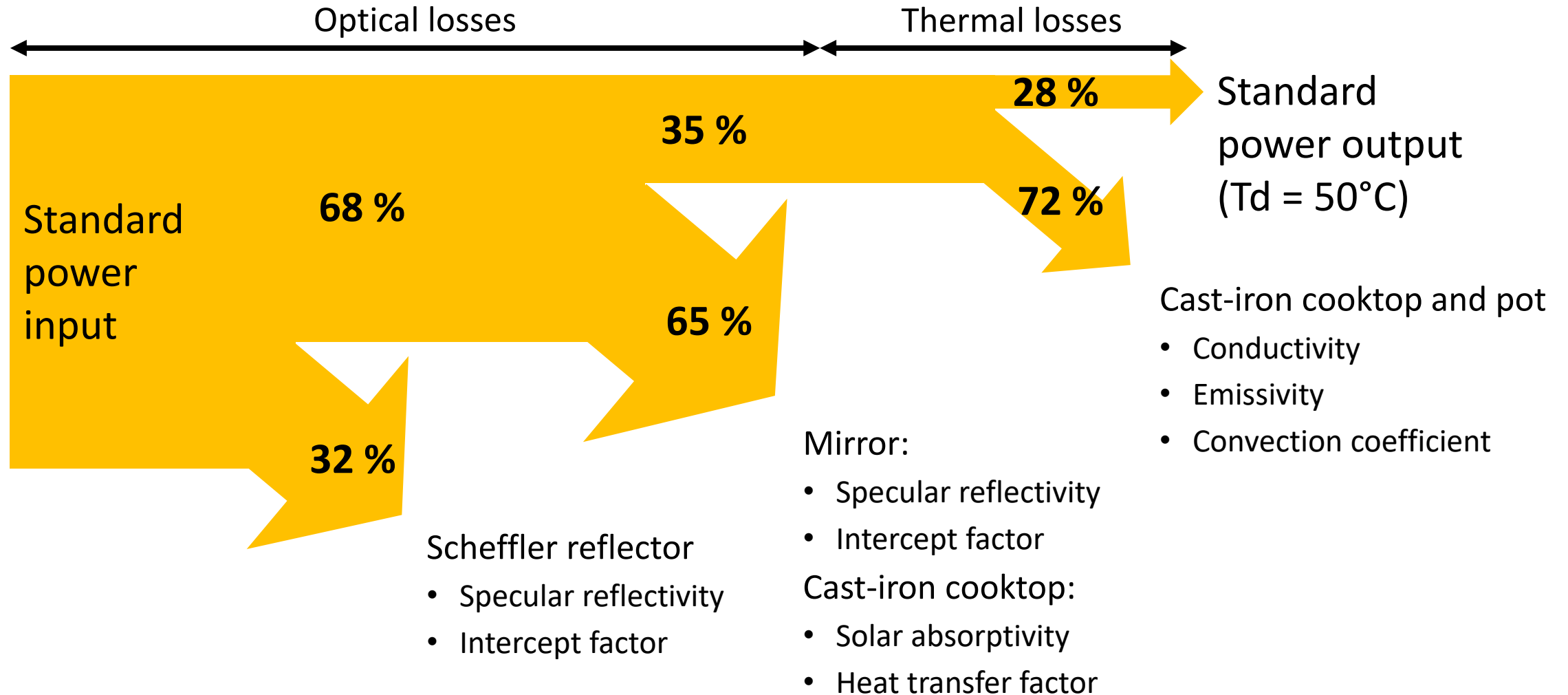
# Un modèle numérique Soltrace pour les réflecteurs de Scheffler

- Analyse de sensibilité du modèle aux erreurs de positionnement et d'ajustement



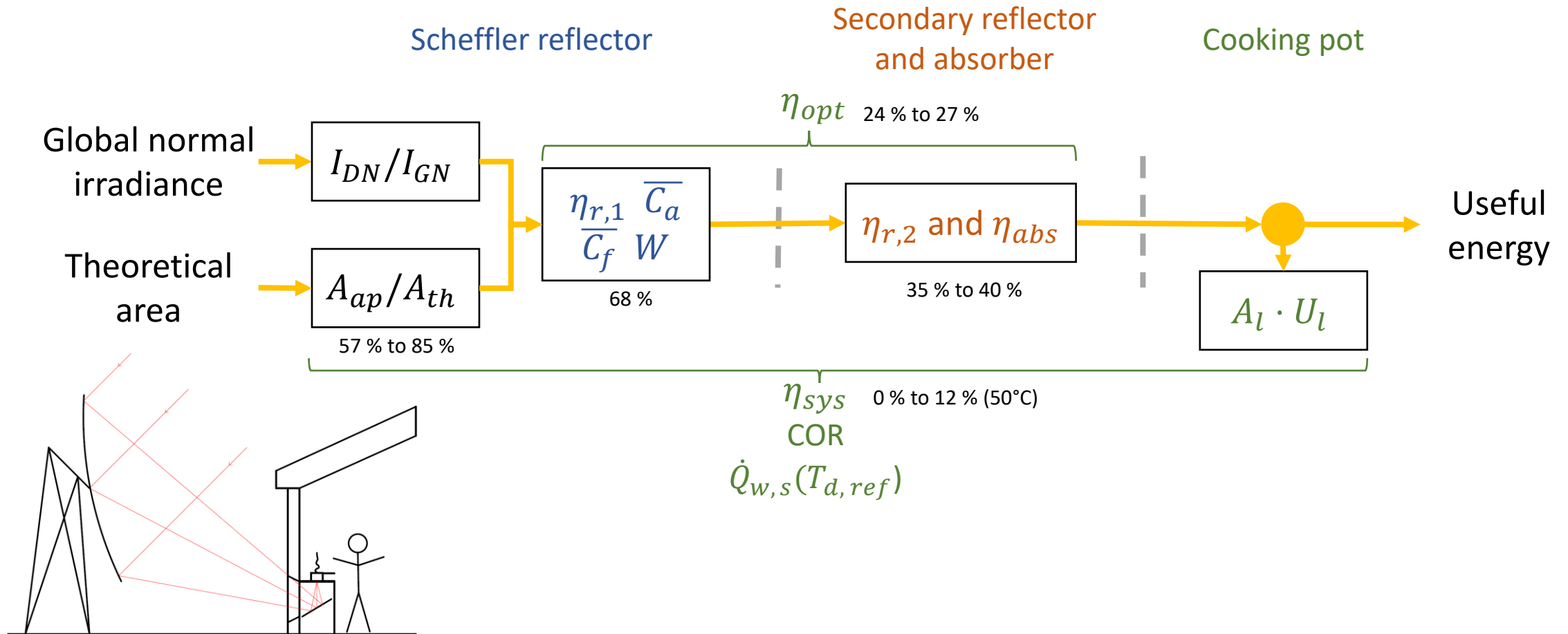
T. Fasquelle, Benjamin Kadoch, Gabriel Guillet, Séverine Barbosa, "Realistic Ray-Tracing Model of a Scheffler Reflector Based on Experimental Data, accepted in Renewable Energy

# General conclusion



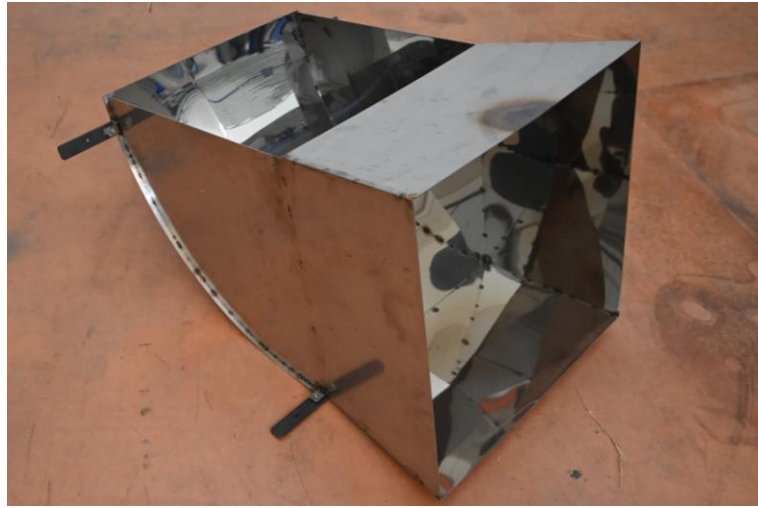
# General conclusion

## Solar cooking system



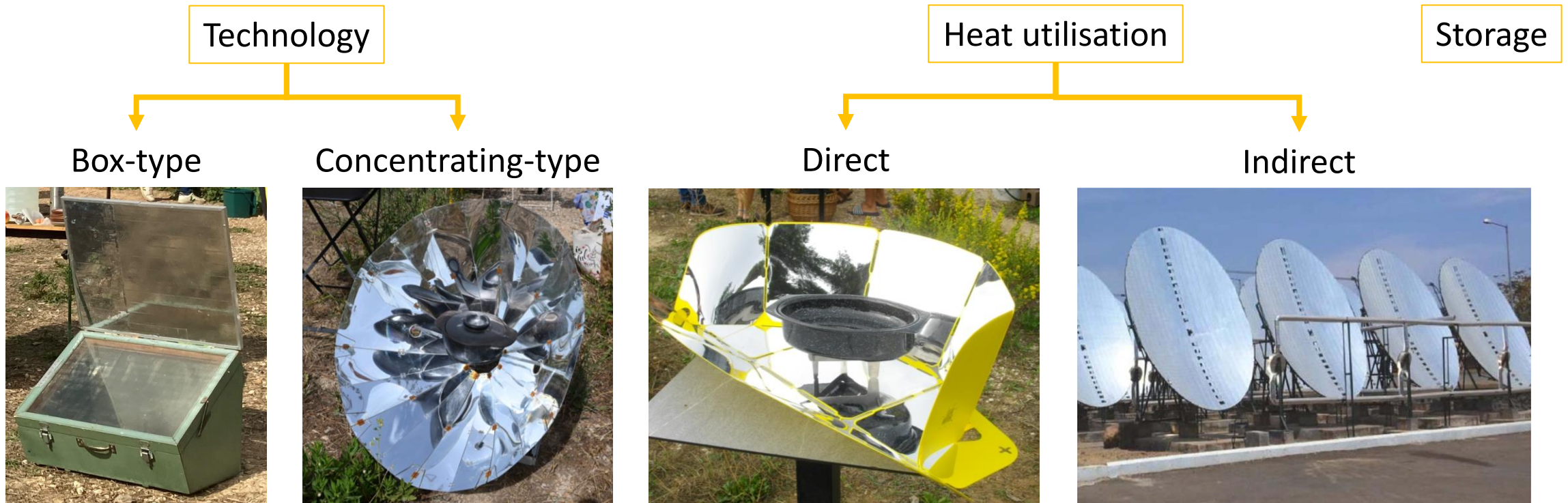
# Perspectives

## Non imaging optics



# Did you say “solar cooker”?

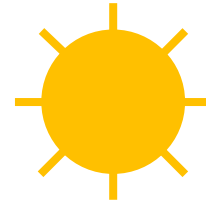
## Solar cookers classification



From Indora and Kandpal, 2018. © MNRE/CSH India

Schwarzer et al., 2008 ; Saxena et al., 2011 ; Cuce and Cuce, 2013; Aramesh et al., 2019

# Some definitions



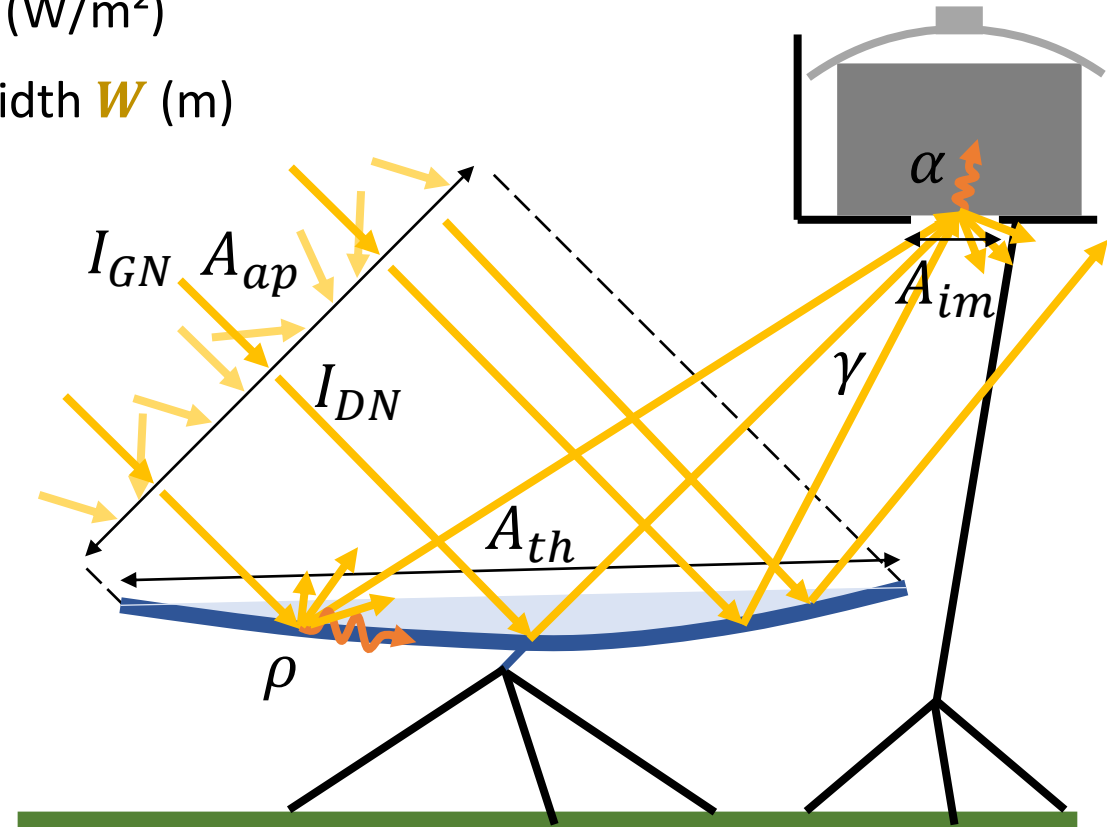
- Theoretical area  $A_{th}$  (m<sup>2</sup>)
- Global, diffuse and direct irradiance:  $I_{GN} = I_{DifN} + I_{DN}$  (W/m<sup>2</sup>)
- Aperture area  $A_{ap}$  (m<sup>2</sup>) / Image area  $A_{im}$  (m<sup>2</sup>) / Image width  $W$  (m)
- Specular reflectivity  $\rho$  / Interception factor  $\gamma$
- Absorptivity  $\alpha$

Efficiencies:

- $\eta_r = \rho \cdot \gamma$
- $\eta_{opt} = \rho \cdot \gamma \cdot \alpha$
- $\eta_{sys}$

Area concentration ratio:  $\overline{C_a} = A_{ap}/A_{im}$

Flux concentration ratio:  $\overline{C_f} = \eta_r \cdot \overline{C_a}$

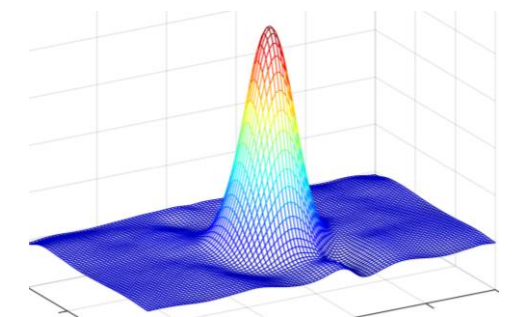
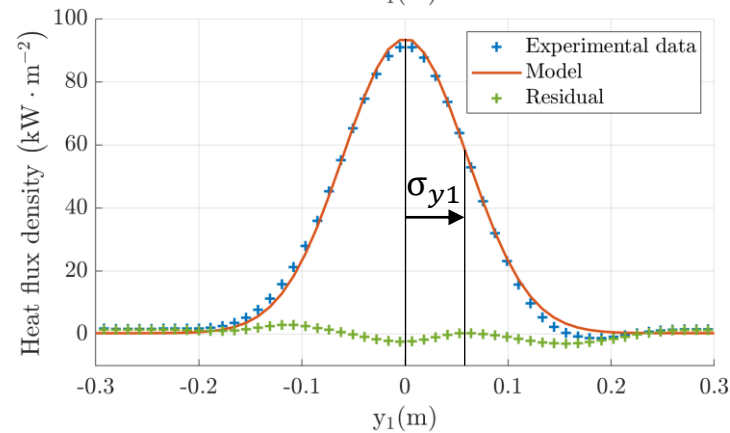
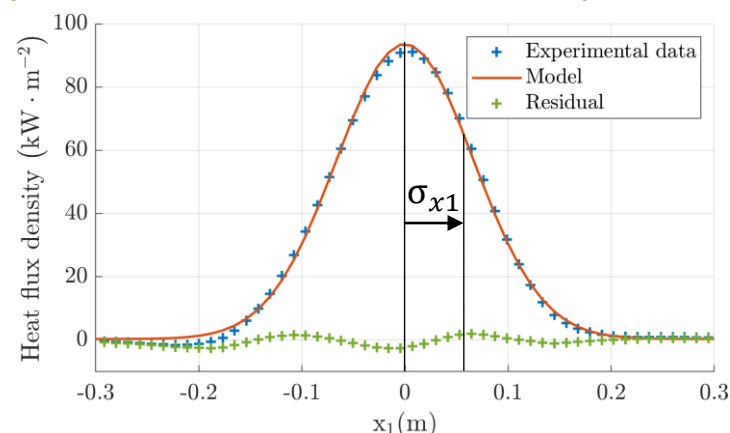
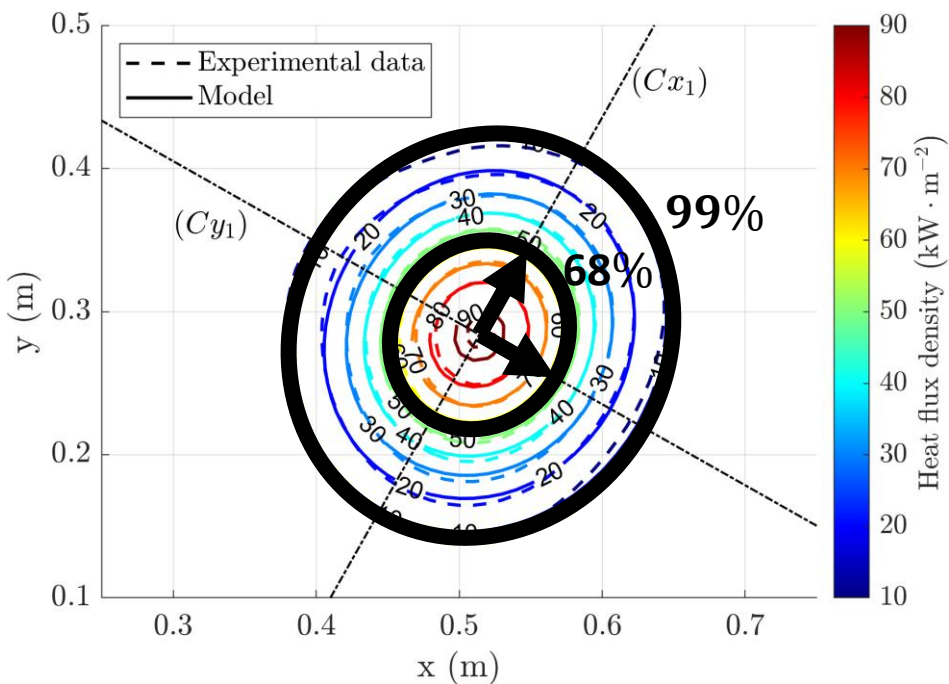


# Gaussian distribution (Guillet et al., 2024)

• Model:  $\varphi(x, y) = \varphi_{max} \cdot \exp(-a(x - x_c)^2 - 2b(x - x_c)(y - y_c) - c(y - y_c)^2) + \varphi_{offset}$

with  $a = \frac{\cos^2(\theta)}{2\sigma_{x1}^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{2\sigma_{y1}^2}$ ,  $b = +\frac{\sin(2\theta)}{4\sigma_{x1}^2} - \frac{\sin(2\theta)}{4\sigma_{y1}^2}$ , and  $c = \frac{\sin^2(\theta)}{2\sigma_{x1}^2} + \frac{\cos^2(\theta)}{2\sigma_{y1}^2}$

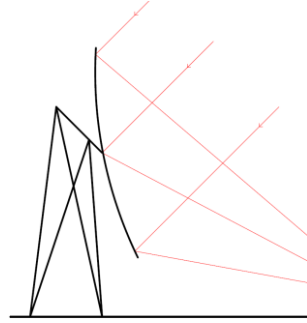
• Estimate:



Parameter	Value
$\varphi_{max}$ (kW/m <sup>2</sup> )	93.5
$\varphi_{offset}$ (kW/m <sup>2</sup> )	0.3
$x_c$ (mm)	514
$y_c$ (mm)	284
$\sigma_{x1}$ (mm)	66
$\sigma_{y1}$ (mm)	60
$\theta$ (°)	61

Figures from ©2024 Guillet et al. Published by Elsevier Ltd. CC BY-NC 4.0

## Conclusion 1<sup>st</sup> part



- Energy point of view
- Direct normal irradiance  
x  
aperture



$$\eta_r = 68 \% \pm 6 \%$$

$$\eta_r = \rho \cdot \gamma$$



Power delivered

- Geometrical point of view

Aperture area



$$\overline{C}_a = 26 \text{ to } 46$$

$$\overline{C}_a = A_{ap}/A_{im}$$



Image area

$$W_{major,99\%} = 0.46 \text{ m}$$

- Power density point of view

Solar power  
density



$$\overline{C}_f = 19 \text{ to } 29$$

$$\overline{C}_f = \eta_r \cdot \overline{C}_a$$



Power density  
delivered