

M. H. Andriamahefa<sup>1</sup>, V. Bourdin<sup>2</sup>, J. Parra<sup>3</sup>, J. Badosa<sup>3</sup>, A. Migan-Dubois<sup>1</sup> et X. Mininger<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Sorbonne Université, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France

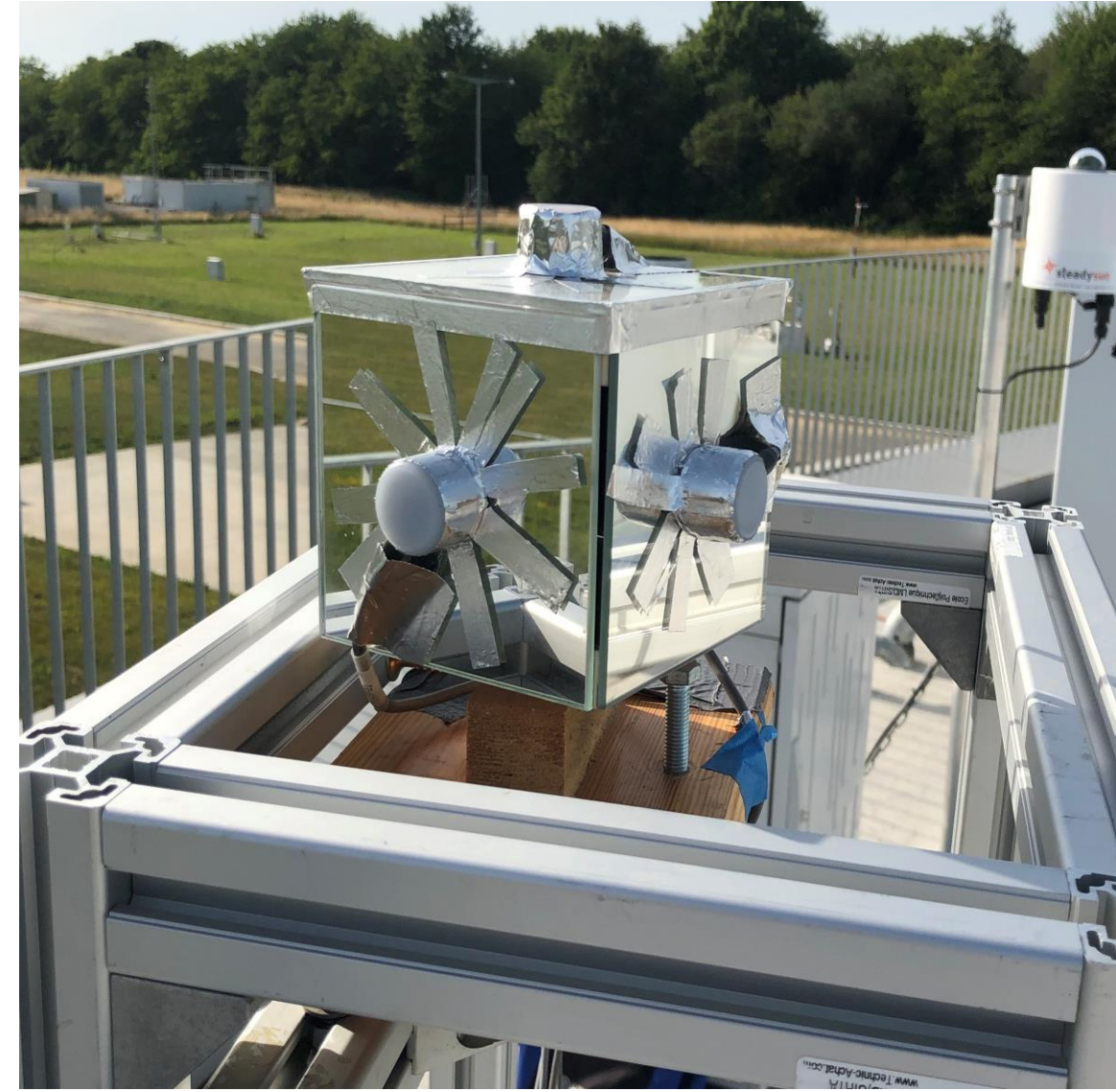
<sup>2</sup> CNRS, LISN, Université Paris-Saclay, GeePs, CentraleSupélec, Bâtiment 507, Rue du Belvédère, 91405 Orsay, France

<sup>3</sup> Institut Polytechnique de Paris, LMD, ENS, IPSL, Sorbonne Université, Route de Saclay, 91128 Palaiseau, France

## Contexte et motivation



Système standard de mesure de BNI et DHI (radflux 1)



Cube radiométrique

La mesure de la densité de flux composante directe (BNI) et de la composante diffuse (DHI) de l'irradiance solaire d'une surface horizontale joue un rôle important dans les applications de l'énergie solaire. Elle permet d'estimer l'éclairement global d'une surface ayant une inclinaison et azimuth quelconques **afin d'analyser ou d'optimiser la performance d'un système photovoltaïque ou de commander les mouvements d'un système récepteur mobile.**

L'objet de notre étude est **la conception d'un système sous forme de cube** constitué de quatre capteurs d'éclairement à base de photodiode sur les faces Est, Sud, Ouest et supérieure dans le but de déterminer le BNI et le DHI.

Ce cube radiométrique fixe est **beaucoup moins cher, très simple à mettre en place et ne nécessite pas une surveillance aussi fréquente** que le système standard de mesure de BNI et de DHI, qui est composé d'un dispositif de suivi de soleil.

Ce cube radiométrique est destiné à piloter de façon optimale en temps réel des inclinaisons d'un système photovoltaïque à faible concentration (LCPV) composé d'un réflecteur plan en face d'un module photovoltaïque.

## Étalonnage des capteurs



Les quatre capteurs à photodiode (RG100) ont été calibrés par comparaison avec un pyranomètre de référence (CMP22) **suivant la norme de l'ISO 9847.**

- Calibration horizontale
- Sous conditions ciel clair
- Détermination du facteur de calibration (CF) de chaque RG100

$$Irradiance = V_{output} \times CF$$

### Indicateurs d'erreur après l'étalonnage:

	RG100_1	RG100_2	RG100_3	RG100_4
rMBE (%)	-0.7	0.3	0.5	-0.2
rMAE (%)	2.8	2.7	3.2	4.1

## Principe de l'estimation de BNI et DHI

- BNI et DHI sont estimés à partir de la combinaison des expressions mathématiques de l'éclairement global mesuré sur les quatre faces du cube

$$I_{sup} = GHI = BNI \cos(\zeta) + DHI$$

$$I_{Est} = BNI \cos(\theta_{Est}) + \frac{1}{2} DHI + \frac{1}{2} \rho GHI \quad , \text{ si } \cos(\theta_{Est}) \geq 0$$

$$I_{Ouest} = BNI \cos(\theta_{Ouest}) + \frac{1}{2} DHI + \frac{1}{2} \rho GHI \quad , \text{ si } \cos(\theta_{Ouest}) \geq 0$$

$$I_{Sud} = BNI \cos(\theta_{Sud}) + \frac{1}{2} DHI + \frac{1}{2} \rho GHI \quad , \text{ si } \cos(\theta_{Sud}) \geq 0$$

- Le modèle isotrope est utilisé pour l'éclairement diffus et réfléchi

**Cas 1: Le matin:**  $I_{Ouest} = I_{min}$  et **l'après-midi:**  $I_{Est} = I_{min}$

$$\begin{cases} DHI = 2I_{min} - \rho I_{sup} \\ BNI = \sqrt{(I_{max} - I_{min})^2 + (I_{sud} - I_{min})^2 + (I_{sup}(\rho + 1) - 2I_{min})^2} \end{cases}$$

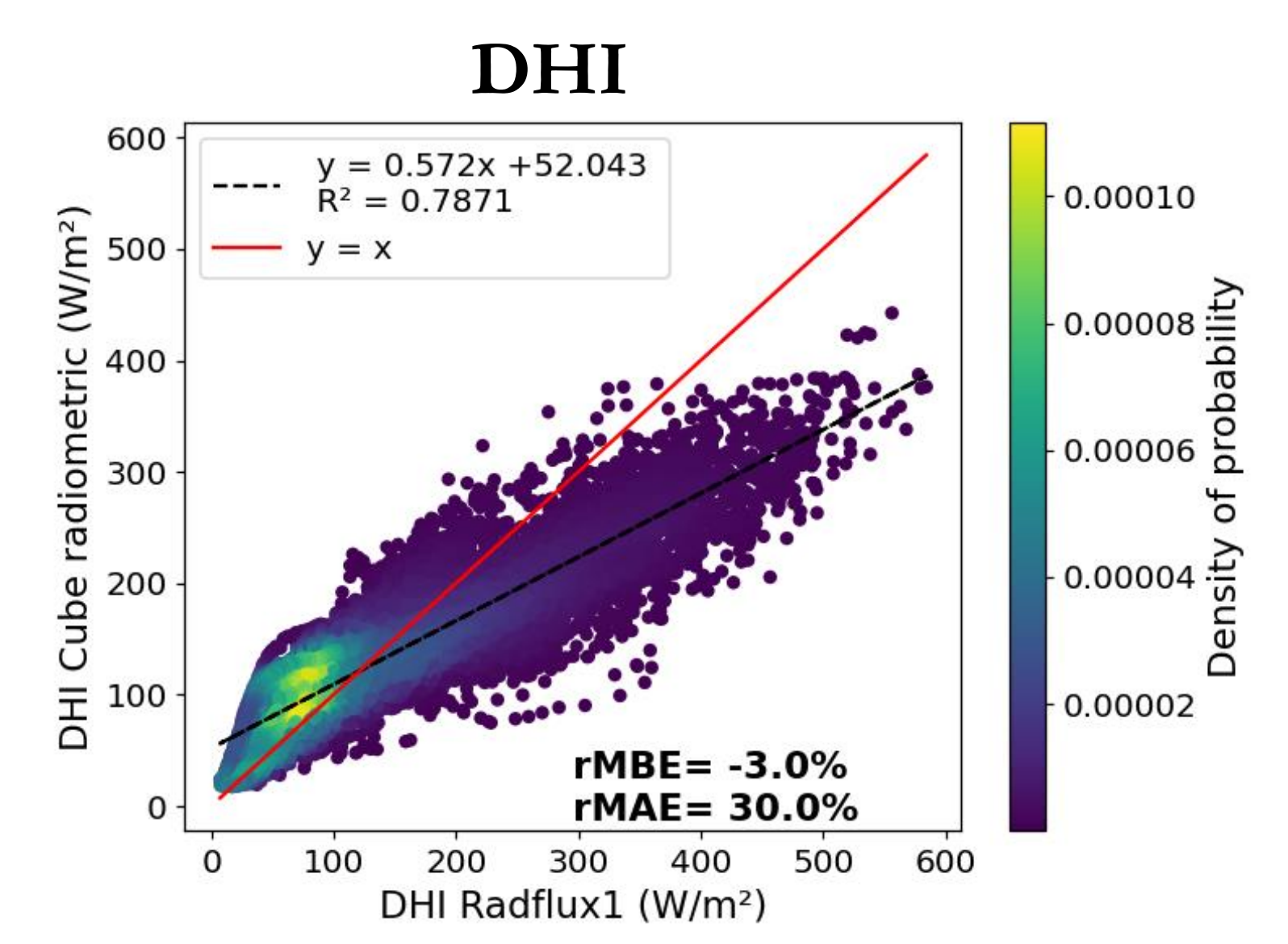
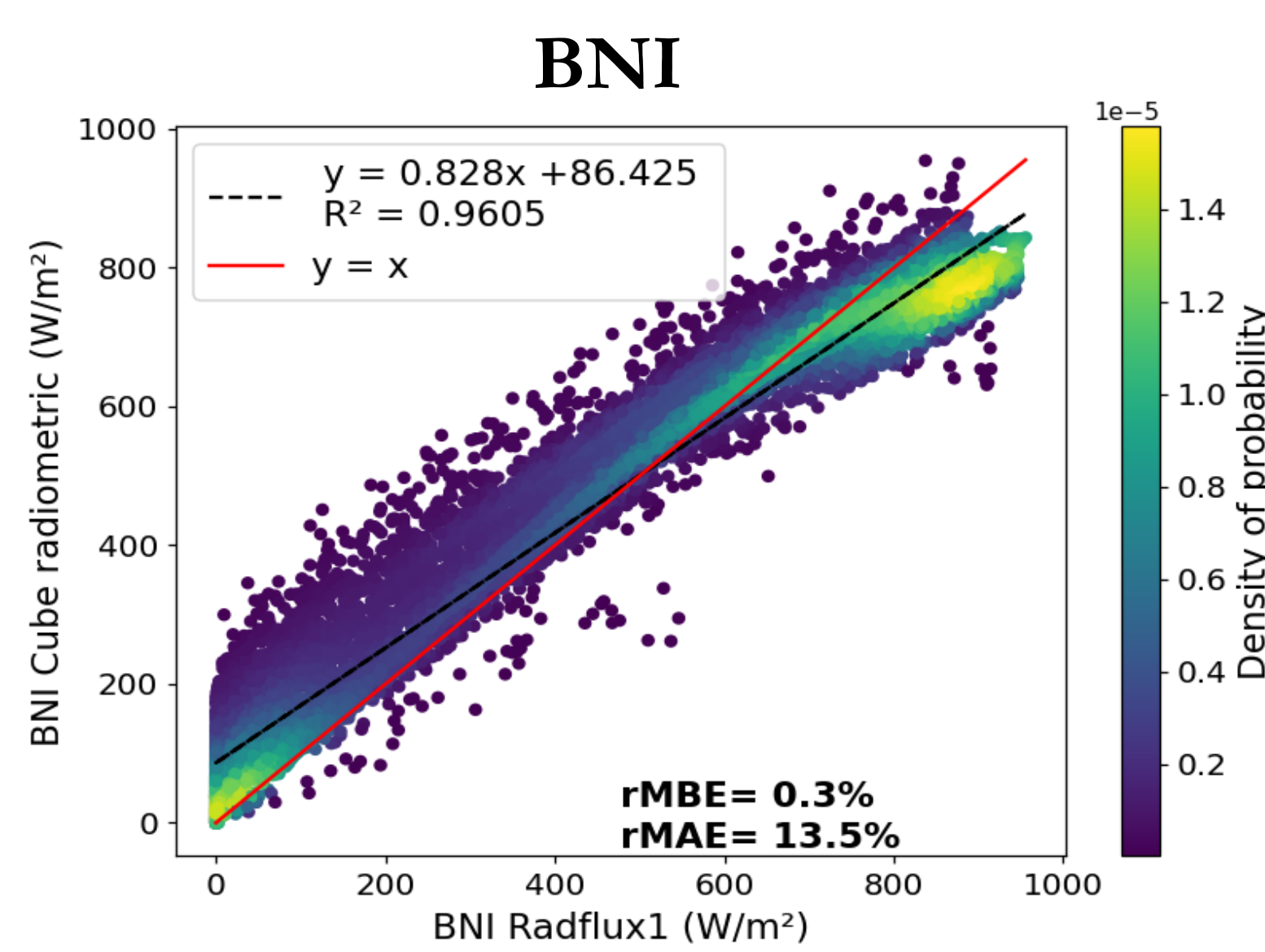
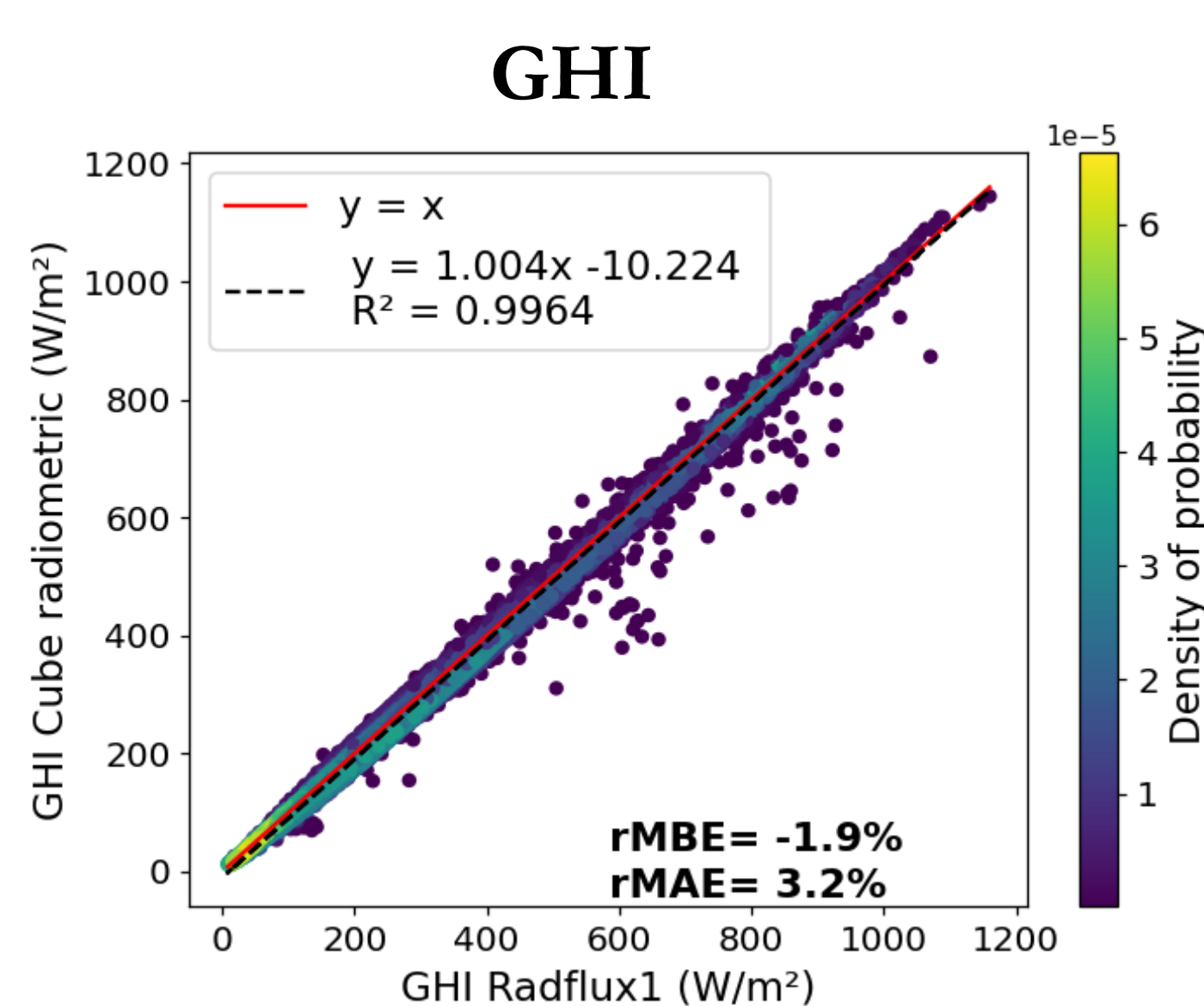
**Cas 2: Midi solaire vrai,**  $I_{Ouest} = I_{Est}$

$$\begin{cases} DHI = I_{Est} + I_{Ouest} - \rho I_{sup} \\ BNI = \sqrt{(I_{sud} - \frac{I_{Est} + I_{Ouest}}{2})^2 + (I_{sup}(\rho + 1) - I_{Est} - I_{Ouest})^2} \end{cases}$$

**Cas 3: Complètement nuageux,**  $I_{Ouest} = I_{Est} = I_{Sud}$

$$\begin{cases} DHI = \frac{2(I_{sud} + I_{ouest} + I_{est})}{3} - \rho I_{sup} \\ BNI = 0 \text{ (W/m}^2\text{)} \end{cases}$$

## Résultats du 09/07/2022 au 28/08/2022



- L'éclairement global d'une surface horizontale (GHI) mesuré par le cube radiométrique a une bonne correspondance avec les mesures de radflux 1, comme le démontre le très bon coefficient R et la pente unitaire de la régression linéaire, ce qui confirme également la bonne calibration des capteurs. Les petites dispersions sont dues à la différence de temps de réponse des capteurs et à la gamme de longueur d'ondes limitée des photodiodes.
  - La comparaison de BNI montre une bonne corrélation. À des éclaircements élevés, le BNI du cube est inférieur à celui donné par radflux 1, ce qui est dû au champ de vu du pyrhéliomètre ( $\pm 5^\circ$ ) de radflux 1 qui intègre une partie du circumsolaire dans le BNI, alors que l'interprétation des mesures du cube est faite avec l'hypothèse d'un faisceau solaire parfaitement parallèle ce qui correspond à un soleil ponctuel à l'infini. L'hypothèse d'une luminance de la voûte céleste uniforme est aussi une source importante des écarts entre les mesures du cube et celles de radflux1. Les imperfections géométriques du cube sont également une source d'écarts systématiques.
  - À faible DHI, les mesures du cube sont supérieures à celles de radflux 1. Cela s'explique par la prise en compte du circumsolaire dans la composante diffuse estimée par le cube. La bonne correspondance entre les GHI mesurés par les deux systèmes prouve que le transfert opéré du rayonnement circumsolaire vers le diffus respecte la conservation de l'énergie.
- Ces résultats montrent le fort potentiel du cube radiométrique comme sonde pour l'optimisation de la commande d'un LCPV ou d'un suiveur solaire. L'étude du mode de commande à partir du cube radiométrique est notre prochaine étape.