
Rapport de stage

Mise à niveau d'un instrument de mesure du rayonnement diffus par arc
d'ombrage

Du 06 avril 2021 au 04 juin 2021

Stagiare:
Alexandre PARASSOURAMIN
Master 1 énergie
n° étudiant : 35003702

Responsable Pédagogique:
Mme Béatrice MOREL
Maître de conférences H.D.R

Tutrice de stage :
Mme Béatrice MOREL
Maître de conférences H.D.R

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma tutrice de stage Mme Béatrice MOREL.

Je tiens ensuite à remercier tout particulièrement M. Jeanty PATRICK, M. Mathieu DELSAUT et M. Christian BROUAT pour l'accompagnement durant le stage.

Je tiens aussi à remercier M. Yannis HOARAU pour l'utilisation de l'imprimante 3D.

Sommaire

Introduction	3
1 Environnement	3
2 Les travaux effectués et les apports du stage	3
2.1 Montage du CM121C	3
2.1.1 Alignement nord-sud par pointage géographique	6
2.1.2 Alignement nord-sud par boussole solaire fixe	7
2.2 Programmation	9
2.2.1 Calendrier du Cm121	10
2.2.2 Suppression des données non utilisés, non acquis et abérantes	12
2.2.3 Calcul des facteurs de correction	12
2.2.4 Analyse statistique et étalonnage	13
2.2.5 Représentation graphique de l'erreur relative	14
2.2.6 Histogramme	15
2.2.7 Selection des mesures entre deux intervalles	16
2.2.8 exécution de l'analyse statistique	16
2.2.9 Etallonage du cm121 avec le spn1	16
2.2.10 Impact de la ventilation sur les mesures du cm121	17
2.3 Les apports du stage	19
3 Conclusion	20
4 Bibliographie	21

Introduction

Dans le cadre de mon master 1 j'ai dû réaliser un stage de huit semaines, le stage s'est déroulé au sein du laboratoire LE2P de l'université de la Réunion.

Le stage avait pour objectif le montage d'un pyranomètre à arc d'ombrage cm121, l'élaboration d'un calendrier de maintenance pour le cm121, la mise en place d'un protocole permettant le réglage la position Nord-sud, le développement des programmes sous python permettant l'analyse statistique des mesures de rayonnement diffus. Le stage vise aussi à répondre à deux questions, la premières est de savoir si les mesures du rayonnement diffus du cm121 sont plus proches du spn1 ou du tracker, et finalement de savoir si l'installation d'une ventilation à un impact sur les mesures du rayonnement diffus du CM121.

1 Environnement

Le laboratoire LE2P, a été créé en 2006, il est membre de l'Observatoire des Milieux Naturels et des Changements Globaux au sein de la Faculté des Sciences et Technologies de L'Université de La Réunion. Le laboratoire comporte trois opérations scientifiques qui sont au cœur des projets menés par la Région Réunion.

L'opération scientifique gisement Solaire : variabilité à La Réunion et en zone tropicale, métrologie et modélisation vise à offrir une documentation sur la variabilité du rayonnement solaire.

L'opération scientifique optimisation-contrôle et stockage de l'énergie, se penche sur la conception et le design d'une Pile A Combustible réversible ainsi que la modélisation et le contrôle d'une Pile A Combustible de type PEMFC.

L'opération scientifique réseau interconnecté et transport de l'énergie étudie l'évolution énergétique d'un réseau, le développement de topologies et de protocoles de routage à faible coût énergétique et la récupération d'énergie RF.

2 Les travaux effectués et les apports du stage

2.1 Montage du CM121C

Le CM121 comporte cinq parties, la base, le pilier, la barre transversale, la barre coulissante et le support pour pyranomètre. Le montage consiste juste à assembler chaque partie à l'aide des boulons fournis.



Figure 1: cm121

La première étape pour le positionnement du cm121 consiste à s'assurer que sa base est plane, pour se faire la base comporte 3 boulons permettant à l'aide d'un niveau à bulle de mettre la base à l'horizontale..



Figure 2: Base horizontal

La barre coulissante doit être parallèle à l'axe polaire, pour se faire l'angle entre l'horizon et la barre doit être égal à la latitude du site, pour l'Université de la Réunion cela implique un angle de -20.9° . L'angle est réglé grâce à une application mobile qui offre une précision acceptable, le réglage pouvant se faire à 1-4 degrés près selon la datasheet.



Figure 3: Axe polaire

Le pyranomètre est installé sur son socle. Une fois effectuer la ventilation est installé est raccordé en 12 volts. La ventilation permet de garder le pyranomètre à température constante, permettant ainsi de faire l'acquisition des mesures dans les mêmes conditions de températures toute l'année.

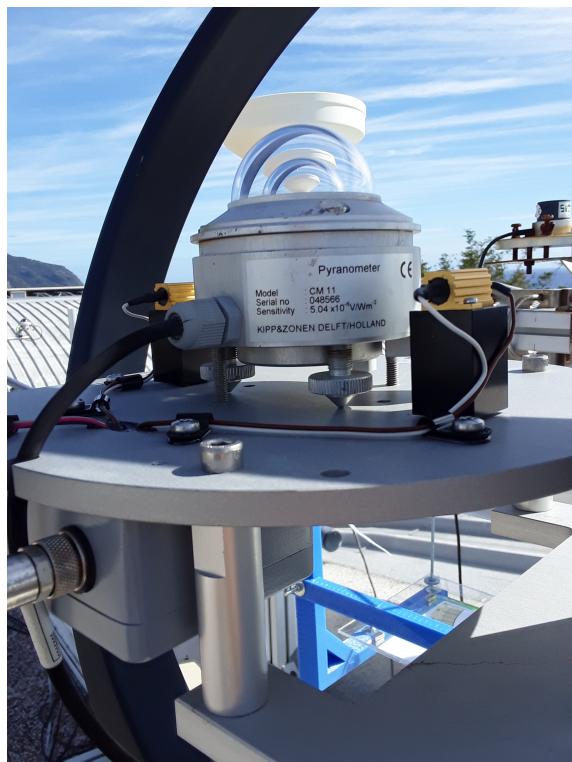


Figure 4: Installation pyranomètre

L'étape la plus importante et le réglage de la position nord-sud, un mauvais réglage nord-sud peuvent entraîner des données aberrantes, du fait que le capteur est susceptible de recevoir du rayonnement global à certains moments de la journée. Une première approche pourrait consister à utiliser un compas magnétique mais la présence d'éléments ferreux donne une indication fausse du nord. La méthode retenue est l'utilisation d'une boussole solaire.

Le principe de la boussole solaire est de projeter l'ombre du soleil sur une surface plane, sur cette surface plane se trouve un cadran gradué représentant l'azimut, en connaissant l'azimut du soleil et en reportant l'ombre sur le cadran nous obtenons la position nord-sud.

2.1.1 Alignement nord-sud par pointage géographique

Le premier alignement Nord-sud fut effectué par une boussole solaire totalement indépendante de l'arc d'ombrage, le but consiste à l'aide d'une feuille excel et de l'heure actuelle, de calculer l'azimut, de la reporter sur la boussole solaire en la faisant pivoter et de pointer un point géographique passant dans l'axe nord-sud de la boussole solaire. Une fois ce point géographique trouvé, nous effectuons la même démarche en reportant ce point dans l'axe de la barre coulissante. Cette méthode donne de bons résultats, mais elle nous expose à des erreurs d'angle notamment lors du pointage du point géographique et le vent faisant bouger le fil, elle a aussi pour inconvénient une mise en place assez lourde avec l'obligation d'avoir un ordinateur portable sous la main.

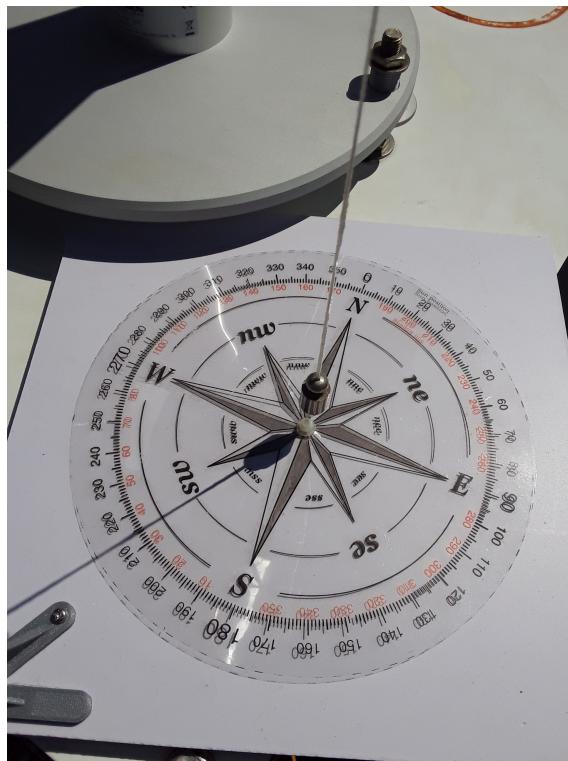


Figure 5: Boussole solaire



Figure 6: Point géographique

2.1.2 Alignement nord-sud par boussole solaire fixe

Pour pallier les problèmes de la boussole solaire traditionnelle, il fit élaborer une boussole solaire fixe. Le but est de faciliter le réglage nord-sud, mais aussi de diminuer les erreurs d'angles de la boussole traditionnelle, pour se faire la boussole devra être fixée à la barre transversale du cm121.

Pour faciliter la maintenance le choix de la conception s'est porté sur l'impression 3D, la modélisation fut effectué sur le logiciel fusion 360 (figure *). La boussole comporte 4 parties imprimer en 3D (deux bases et deux longerons), une plaque de plexiglas permettant de placer notre cadran d'azimut et une tige filetée qui sert de support au fil.

Les quatre parties imprimées en 3D sont assemblées à l'aide de quatre boulons de 3*20mm.

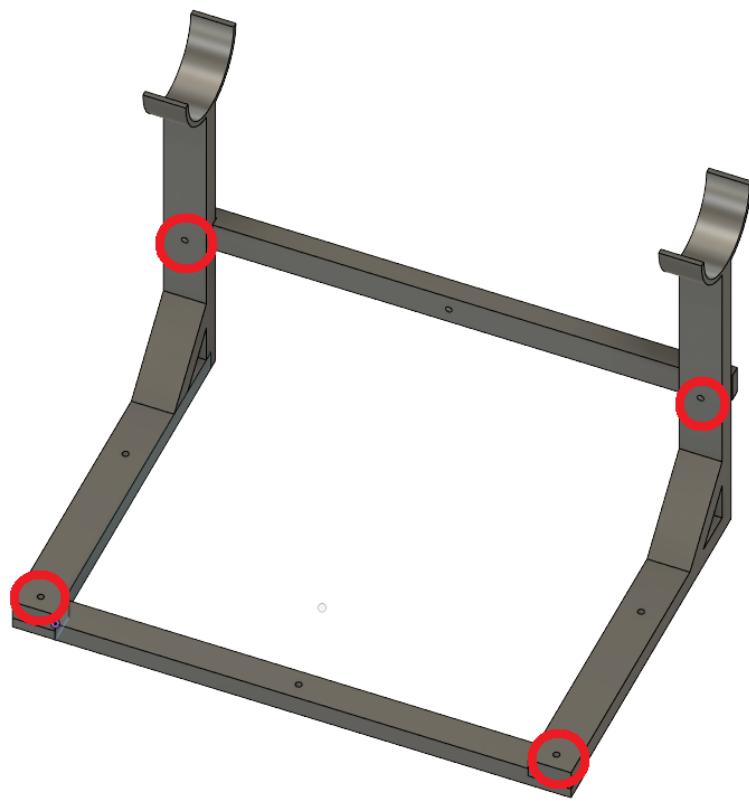


Figure 7: Assemblage bases et longerons

Trois boulons de 3*30mm viennent se placer aux endroits prévus, ces boulons permettent de régler la plaque de plexiglas pour qu'elle soit horizontale. La plaque de plexiglas est coupé dans du plexiglas de 3 mm et les passages de boulon sont percé par une mèche de 3 mm. La plaque repose sur les trois boulons de 3*30mm.

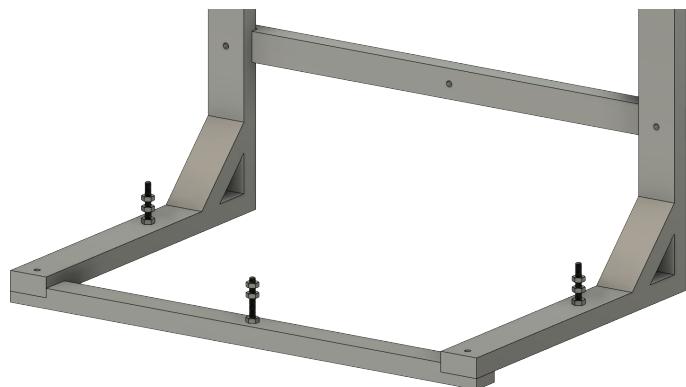


Figure 8: cadran d'azimut

Le cadran d'azimut est imprimé sur du papier ordinaire puis plastifié pour résister aux intempéries, il est fixé sur la plaque de plexiglas grâce à huit aimants qui permettent de faire coïncider les bords pour être parallèle avec la plaque de plexiglas et donc indirectement avec la barre transversale du cm121.

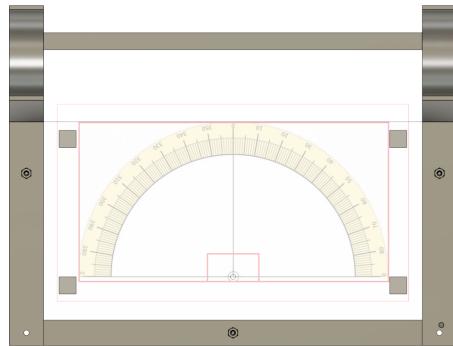


Figure 9: cadran d'azimut

Viens ensuite la mise en place de la tige filetée de 3 mm qui supporte le fil. Le fil passe dans l'intersection du cadran d'azimut et la plaque de plexiglas par un trou de 3 mm, cela permet de réduire les effets du vent sur l'oscillation du fil.

Le cadran est par la suite fixé à la barre transversale à l'aide de Colliers rilsan, la plaque de plexiglas doit ensuite être réglée à l'horizontale, pour se faire un niveau de surface est utilisé et les ajustements se font par les trois boulons de 3*30mm.



Figure 10: Boussole solaire installée sur le cm121

Nous devons maintenant connaître l'azimut du soleil, la solution la plus simple est d'utiliser un site internet comme par exemple suncalc.org. L'azimut obtenu doit ensuite être reporté sur le cadran, pour se faire il suffit de faire pivoter la base du cm121 sur son axe vertical. Le positionnement Nord-sud est effectué.

Cette méthode comporte quand même des limites, elle ne marche que pour les jours ensoleillés et la présence de masques cache à certains moments de la journée le soleil ce qui empêche le positionnement nord-sud.

2.2 Programmation

J'ai dû développer lors du stage des programmes en python permettant de calculer le calendrier pour la maintenance du cm121, mais aussi d'effectuer l'analyse statistique d'une série de mesure.

Pour ce faire mes programmes permettant d'effectuer l'analyse statistique fonctionnent avec des dataframes, j'ai porté mon choix vers les dataframes car elles sont simples à manipuler.

Tous les programmes développés sont disponibles sur le github du LE2P [6].

2.2.1 Calendrier du Cm121

Le calendrier de maintenance du CM121 comporte deux informations, l'heure du midi solaire et la position de la barre coulissante.

La position de la barre coulissante est calculée en fonction de la déclinaison du soleil, par l'expression :

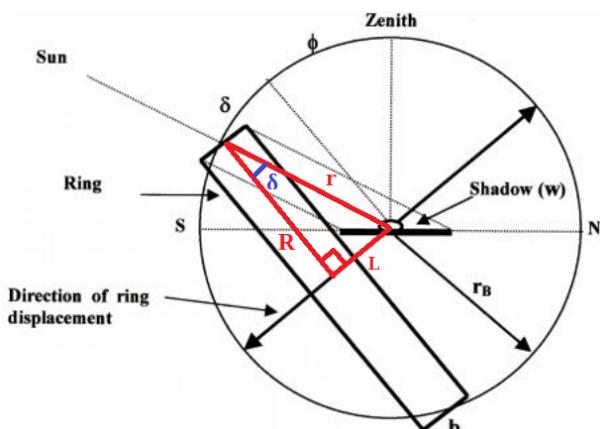
$$L = 297 \tan(\delta)$$

Avec :

L : la position de la barre coulissante

δ : la déclinaison du soleil

Nous pouvons retrouver cette équation en calculant le côté opposé à l'angle aigu d'un triangle rectangle, comme sur la figure suivante:



$$R = 297 \text{ mm}$$

$$\tan(\delta) = \frac{L}{R}$$

$$L = R \tan(\delta)$$

$$L = 297 \tan(\delta)$$

Le programme calcul aussi les maintenances minimums à effectuer en se basant sur la déclinaison du soleil. Etant donné que la position de la barre coulissante est obtenue en fonction de la déclinaison nous pouvons calculer les jours de maintenance minimum au cours de l'année. Pour se faire on place la barre coulissante pour le jour correspondant (la position normale), puis nous déplaçons la barre pour obtenir l'ombre à 0.5mm du dome en verre du pyranomètre (la position limite).



Figure 11: Position normale



Figure 12: Position limite

Il suffit maintenant de savoir la déclinaison pour la position normale et la position limite, pour savoir la déclinaison de la position limite il nous suffit de lire la position de la barre coulissante et de regarder sur notre calendrier de maintenance à quel jour elle correspond et de calculer la déclinaison. On peut désormais calculer la différence des déclinaisons.

$$\Delta\delta = \delta_{\text{position normale}} - \delta_{\text{position limite}}$$

$$\Delta\delta = 1.3^\circ$$

Nous trouvons un delta de 1.3° , cela signifie que si la déclinaison subit une variation de $\pm 1.3^\circ$ entre la dernière maintenance et aujourd'hui nous devons repositionner la barre coulissante.

Le programme retourne alors trois calendriers, un calendrier au format csv, un calendrier au format xlsx et un calendrier ics. Le calendrier csv est obtenu par du texte brut ce qui signifie qu'il fonctionne avec tous les logiciels de traitement de texte, mais ce format ne permet pas la mise en forme. Le calendrier xlsx permet d'intégrer la mise en forme au calendrier, nous obtenons ainsi des codes couleurs, en vert les jours fériés, en bleu les weekends et en rouge les maintenances minimums à effectuer sur le cm121. Le calendrier ics permet d'avoir les positions du cm121 au format iCalendar ce qui permet entre autres d'avoir le midi-solaire, la position de la barre coulissante et les maintenance minimum via son smartphone.

calendrier_cm121_2021											
January 2021	February 2021	March 2021	April 2021	May 2021	June 2021	July 2021	August 2021	September 2021	October 2021	November 2021	December 2021
Fri 1 Midi solaire : 12:21:40 Position = -126	Sat 1 Midi solaire : 12:31:39 Position = -92	Sun 1 Midi solaire : 12:30:23 Position = -41	Mon 1 Midi solaire : 12:15:10 Position = 78	Tue 1 Midi solaire : 12:21:59 Position = 119	Wed 1 Midi solaire : 12:24:25 Position = 97	Thu 1 Midi solaire : 12:18:3 Position = 44	Fri 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75	Sat 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75	Sun 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75	Mon 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75	Tue 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75
Sat 2 Midi solaire : 12:22:8 Position = -125	Sun 2 Midi solaire : 12:31:46 Position = -91	Mon 2 Midi solaire : 12:30:11 Position = -39	Tue 2 Midi solaire : 12:21:37 Position = 80	Wed 2 Midi solaire : 12:16:5 Position = 80	Thu 2 Midi solaire : 12:27:44 Position = 42	Fri 2 Midi solaire : 12:27:44 Position = 76	Sat 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76	Sun 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76	Mon 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76	Tue 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76	Wed 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76
Sun 3 Midi solaire : 12:22:36 Position = -125	Mon 3 Midi solaire : 12:31:53 Position = -58	Tue 3 Midi solaire : 12:29:58 Position = -37	Wed 3 Midi solaire : 12:21:20 Position = 26	Thu 3 Midi solaire : 12:16:15 Position = 81	Fri 3 Midi solaire : 12:24:16 Position = 40	Sat 3 Midi solaire : 12:24:16 Position = 93	Sun 3 Midi solaire : 12:7:53 Position = -119	Mon 3 Midi solaire : 12:7:53 Position = -119	Tue 3 Midi solaire : 12:7:53 Position = -119	Wed 3 Midi solaire : 12:7:53 Position = -119	Thu 3 Midi solaire : 12:7:53 Position = -119
Mon 4 Midi solaire : 12:23:3 Position = -126	Tue 4 Midi solaire : 12:31:58 Position = -87	Wed 4 Midi solaire : 12:29:45 Position = -35	Thu 4 Midi solaire : 12:21:2 Position = 28	Fri 4 Midi solaire : 12:16:26 Position = 122	Sat 4 Midi solaire : 12:22:32 Position = 125	Sun 4 Midi solaire : 12:24:11 Position = 93	Mon 4 Midi solaire : 12:13:46 Position = -80	Tue 4 Midi solaire : 12:13:46 Position = -80	Wed 4 Midi solaire : 12:13:46 Position = -80	Thu 4 Midi solaire : 12:8:17 Position = -120	Fri 4 Midi solaire : 12:8:17 Position = -120
Tue 5 Midi solaire : 12:23:30 Position = -124	Wed 5 Midi solaire : 12:32:3 Position = -56	Thu 5 Midi solaire : 12:29:32 Position = -33	Fri 5 Midi solaire : 12:20:45 Position = 30	Sat 5 Midi solaire : 12:14:46 Position = 122	Sun 5 Midi solaire : 12:16:36 Position = 85	Mon 5 Midi solaire : 12:22:42 Position = 125	Tue 5 Midi solaire : 12:24:5 Position = 61	Wed 5 Midi solaire : 12:24:5 Position = 61	Thu 5 Midi solaire : 12:24:5 Position = 61	Fri 5 Midi solaire : 12:1:40 Position = -82	Sat 5 Midi solaire : 12:8:42 Position = -23
Wed 6 Midi solaire : 12:23:57 Position = -123	Thu 6 Midi solaire : 12:32:8 Position = -84	Fri 6 Midi solaire : 12:29:18 Position = -31	Sat 6 Midi solaire : 12:20:45 Position = 32	Sun 6 Midi solaire : 12:14:42 Position = 86	Mon 6 Midi solaire : 12:22:58 Position = 123	Tue 6 Midi solaire : 12:22:58 Position = 124	Wed 6 Midi solaire : 12:22:58 Position = 90	Thu 6 Midi solaire : 12:26:28 Position = 35	Fri 6 Midi solaire : 12:1:42 Position = -83	Sat 6 Midi solaire : 12:9:7 Position = -122	Sun 6 Midi solaire : 12:9:7 Position = -122
Thu 7 Midi solaire : 12:24:23 Position = -122	Fri 7 Midi solaire : 12:32:11 Position = -82	Sat 7 Midi solaire : 12:29:4 Position = -34	Sun 7 Midi solaire : 12:20:11 Position = 28	Mon 7 Midi solaire : 12:14:38 Position = 88	Tue 7 Midi solaire : 12:23:51 Position = 124	Wed 7 Midi solaire : 12:16:4 Position = 88	Thu 7 Midi solaire : 12:25:53 Position = 33	Fri 7 Midi solaire : 12:1:45 Position = -85	Sat 7 Midi solaire : 12:9:33 Position = -123	Sun 7 Midi solaire : 12:9:33 Position = -123	Mon 7 Midi solaire : 12:9:33 Position = -123

Figure 13: calendrier au format csv

January 2021	February 2021	March 2021	April 2021	May 2021	June 2021	July 2021	August 2021	September 2021	October 2021	November 2021	December 2021
Fri 1 Midi solaire : 12:21:40 Position = -126	Sat 1 Midi solaire : 12:31:39 Position = -92	Sun 1 Midi solaire : 12:30:23 Position = -41	Mon 1 Midi solaire : 12:15:10 Position = 78	Tue 1 Midi solaire : 12:21:59 Position = 119	Wed 1 Midi solaire : 12:24:25 Position = 97	Thu 1 Midi solaire : 12:18:3 Position = 44	Fri 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75	Sat 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75	Sun 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75	Mon 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75	Tue 1 Midi solaire : 12:7:43 Position = -75
Sat 2 Midi solaire : 12:22:8 Position = -125	Sun 2 Midi solaire : 12:31:46 Position = -91	Mon 2 Midi solaire : 12:30:11 Position = -39	Tue 2 Midi solaire : 12:21:37 Position = 80	Wed 2 Midi solaire : 12:16:5 Position = 80	Thu 2 Midi solaire : 12:22:10 Position = 126	Fri 2 Midi solaire : 12:27:44 Position = 96	Sat 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76	Sun 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76	Mon 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76	Tue 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76	Wed 2 Midi solaire : 12:7:38 Position = -76
Sun 3 Midi solaire : 12:22:36 Position = -125	Mon 3 Midi solaire : 12:31:53 Position = -58	Tue 3 Midi solaire : 12:29:58 Position = -37	Wed 3 Midi solaire : 12:21:20 Position = 26	Thu 3 Midi solaire : 12:14:57 Position = 81	Fri 3 Midi solaire : 12:22:21 Position = 126	Sat 3 Midi solaire : 12:24:16 Position = 126	Sun 3 Midi solaire : 12:7:53 Position = -119	Mon 3 Midi solaire : 12:13:46 Position = -119	Tue 3 Midi solaire : 12:13:46 Position = -119	Wed 3 Midi solaire : 12:13:46 Position = -119	Thu 3 Midi solaire : 12:13:46 Position = -119
Mon 4 Midi solaire : 12:23:3 Position = -126	Tue 4 Midi solaire : 12:31:58 Position = -87	Wed 4 Midi solaire : 12:29:45 Position = -35	Thu 4 Midi solaire : 12:21:2 Position = 28	Fri 4 Midi solaire : 12:16:26 Position = 122	Sat 4 Midi solaire : 12:22:32 Position = 125	Sun 4 Midi solaire : 12:24:11 Position = 93	Mon 4 Midi solaire : 12:13:46 Position = -80	Tue 4 Midi solaire : 12:13:46 Position = -80	Wed 4 Midi solaire : 12:13:46 Position = -80	Thu 4 Midi solaire : 12:8:17 Position = -120	Fri 4 Midi solaire : 12:8:17 Position = -120
Tue 5 Midi solaire : 12:23:30 Position = -124	Wed 5 Midi solaire : 12:32:3 Position = -56	Thu 5 Midi solaire : 12:29:32 Position = -33	Fri 5 Midi solaire : 12:20:45 Position = 30	Sat 5 Midi solaire : 12:14:46 Position = 122	Sun 5 Midi solaire : 12:16:36 Position = 85	Mon 5 Midi solaire : 12:22:42 Position = 125	Tue 5 Midi solaire : 12:24:5 Position = 61	Wed 5 Midi solaire : 12:24:5 Position = 61	Thu 5 Midi solaire : 12:24:5 Position = 61	Fri 5 Midi solaire : 12:1:40 Position = -82	Sat 5 Midi solaire : 12:8:42 Position = -23
Wed 6 Midi solaire : 12:23:57 Position = -123	Thu 6 Midi solaire : 12:32:8 Position = -84	Fri 6 Midi solaire : 12:29:18 Position = -31	Sat 6 Midi solaire : 12:20:45 Position = 32	Sun 6 Midi solaire : 12:14:42 Position = 86	Mon 6 Midi solaire : 12:22:58 Position = 123	Tue 6 Midi solaire : 12:22:58 Position = 124	Wed 6 Midi solaire : 12:22:58 Position = 90	Thu 6 Midi solaire : 12:26:28 Position = 35	Fri 6 Midi solaire : 12:1:42 Position = -83	Sat 6 Midi solaire : 12:9:7 Position = -122	Sun 6 Midi solaire : 12:9:7 Position = -122
Thu 7 Midi solaire : 12:24:23 Position = -122	Fri 7 Midi solaire : 12:32:11 Position = -82	Sat 7 Midi solaire : 12:29:4 Position = -34	Sun 7 Midi solaire : 12:20:11 Position = 28	Mon 7 Midi solaire : 12:14:38 Position = 88	Tue 7 Midi solaire : 12:23:51 Position = 124	Wed 7 Midi solaire : 12:16:4 Position = 88	Thu 7 Midi solaire : 12:25:53 Position = 33	Fri 7 Midi solaire : 12:1:45 Position = -85	Sat 7 Midi solaire : 12:9:33 Position = -123	Sun 7 Midi solaire : 12:9:33 Position = -123	Mon 7 Midi solaire : 12:9:33 Position = -123

Figure 14: calendrier au format xlsx

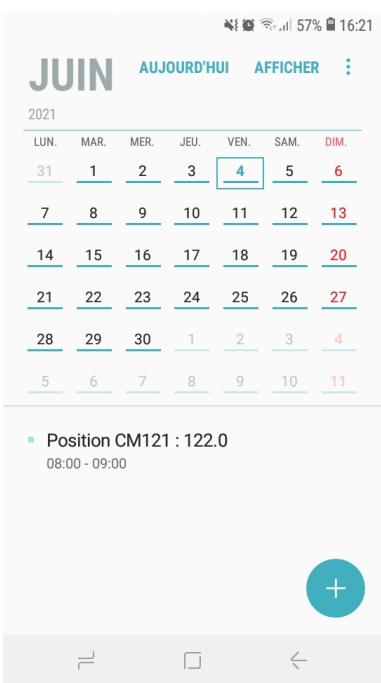


Figure 15: calendrier au format ics

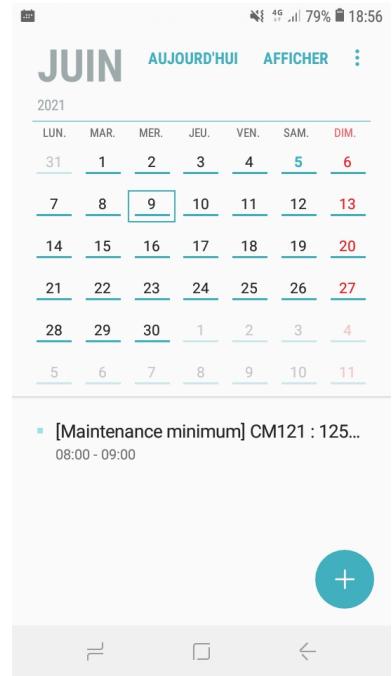


Figure 16: calendrier au format ics, maintenance minimum

2.2.2 Suppression des données non utilisés, non acquis et abérantes

Le fichier de mesure comporte généralement des données non acquises pouvant bloquer l'exécution de certains programmes, mais aussi les données pour la nuit qui sont intéressantes dans le cas du DHI ou du GHI, la création d'une fonction pour supprimer ces mesures fut nécessaire.

2.2.3 Calcul des facteurs de correction

Les données du cm121 doivent être corrigées car l'arc d'ombrage masque une partie du diffus. L'expression permettant de calculer le facteur de correction donné dans la datasheet se base sur les travaux de Drummond. Cette correction fait l'hypothèse que le ciel est isotropique ce qui donne une correction des mesures purement géométrique en se basant sur les deux figures suivante.

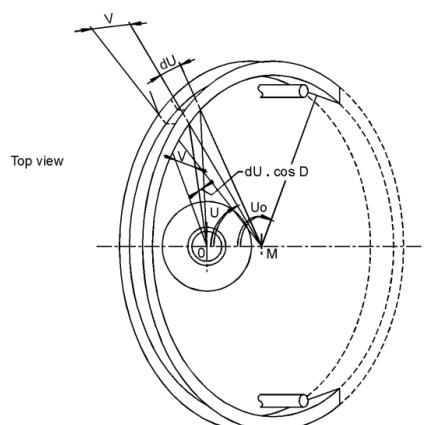


Figure 17: Schéma de l'arc d'ombrage vue de haut

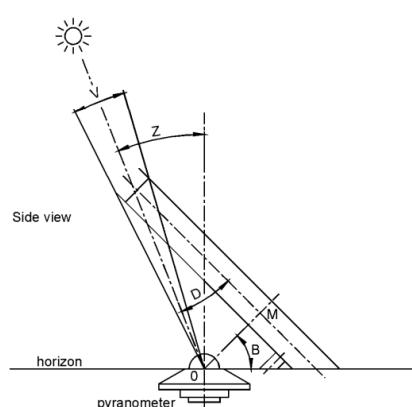


Figure 18: Schéma de l'arc d'ombrage vue de côté

Le facteur de correction C est obtenu par la relation :

$$C = \frac{1}{1 - S}$$

Où S est le rayonnement diffus intercepté par l'arc d'ombrage

$$S = \frac{2V \cdot \cos D \cdot (U_0 \cdot \sin B \cdot \sin D + \sin U_0 \cdot \cos B \cdot \cos D)}{\pi}$$

Avec

$$U_0 = \cos^{-1}(-\tan B \cdot \tan D)$$

V : 0.185 rad

B : latitude du site

D : déclinaison

Les mesures du CM121 sont corrigées par une fonction qui calcule le facteur de correction en se basant sur l'heure ou la mesure a été prise et l'applique par la suite aux mesures.

2.2.4 Analyse statistique et étalonnage

Lors de l'étalonnage les mesures subissent une régression linéaire par rapport à des mesures de références, nous obtenons alors une droite d'équation $y = ax + b$ que nous voulons ramener pour obtenir une droite d'équation $y = x$.

La fonction développé permet d'effectuer l'étalonnage mais aussi l'analyse statistique. L'analyse statistique permet d'obtenir sur le graphique le coefficient de détermination R^2 , la variance, l'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne.

Le coefficient de détermination R^2 est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire. Si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100 % de la distribution des points. Cela signifie alors que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres "a" et "b" calculés sont ceux qui déterminent la distribution des points.

La variance permet de mesurer la dispersion des valeurs d'un échantillon, plus elle est élevée, plus la dispersion est élevée. On définit la variance d'une variable discrète composée de n observations comme suit :

$$\sigma^2 = \frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n}$$

\bar{X} : moyenne

X : valeur incluse dans l'ensemble des données

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) fournit une indication par rapport à la dispersion ou la variabilité de la qualité de la prédition, il est souvent relié à la variance car les valeurs de RMSE sont difficiles à interpréter parce que l'on n'est pas en mesure de dire si on a une variance faible ou

forte, l'erreur quadratique moyenne donne plus de poids aux erreurs élevées. On définit l'erreur quadratique moyenne comme suit :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

L'erreur absolue moyenne (MAE) représente l'erreur systématique, toutes les différences individuelles ont le même poids.

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i|$$

La fonction renvoie le graphique ci-dessous.

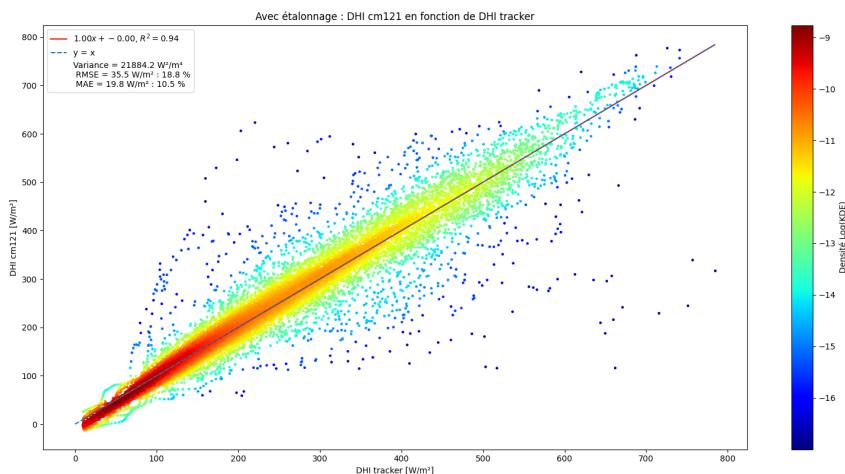


Figure 19: régression linéaire pour mars 2021

2.2.5 Représentation graphique de l'erreur relative

Il est intéressant d'avoir la représentation de l'erreur relative en fonction de l'azimut et de l'élévation du soleil, cela permet de mettre en lumière des journées particulières comme par exemple le dysfonctionnement de l'acquisition des mesures, mais aussi la présence de masques ou de reflet impactant le pyranomètre. Les erreurs aberrantes qui sont identifiées grâce à cette méthode peuvent donc être supprimées.

La fonction renvoie le graphique ci-dessous.

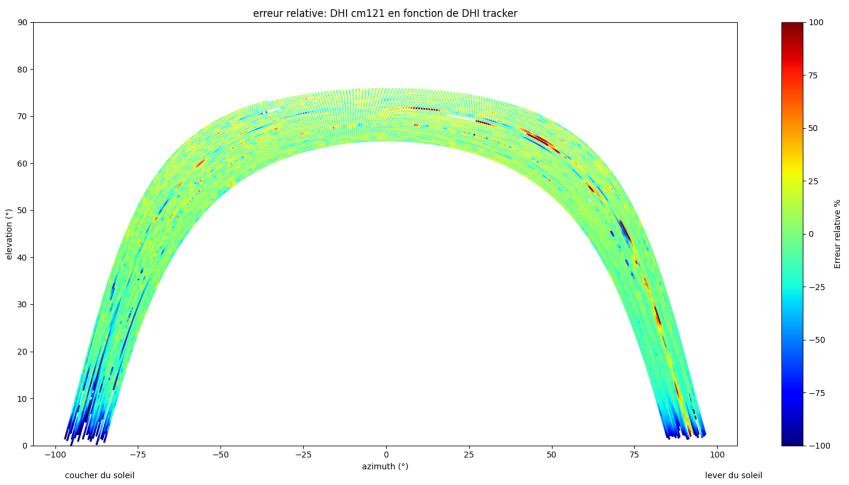


Figure 20: erreur relative

2.2.6 Histogramme

La dernière fonction pour l'analyse statistique donne la représentation graphique de la répartition d'une variable, dans notre cas la fonction donne la répartition du rayonnement diffus et de l'erreur relative.

Elle renvoie les graphiques ci-dessous.

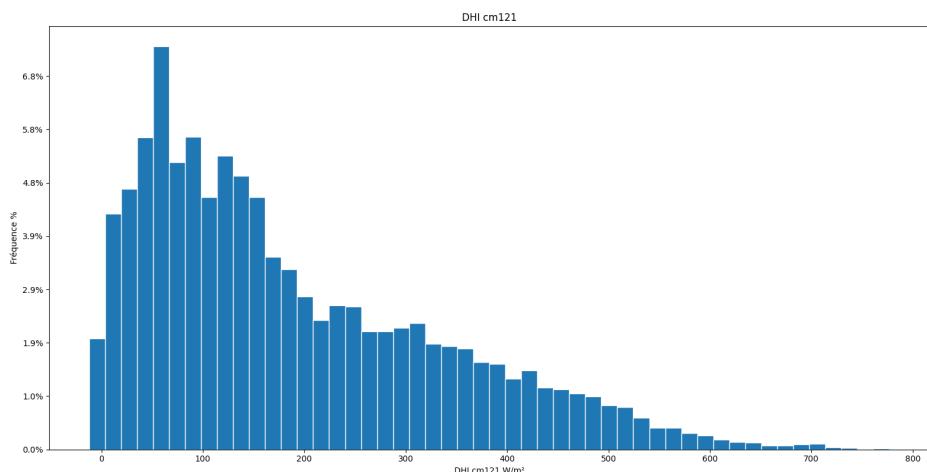


Figure 21: régression linéaire

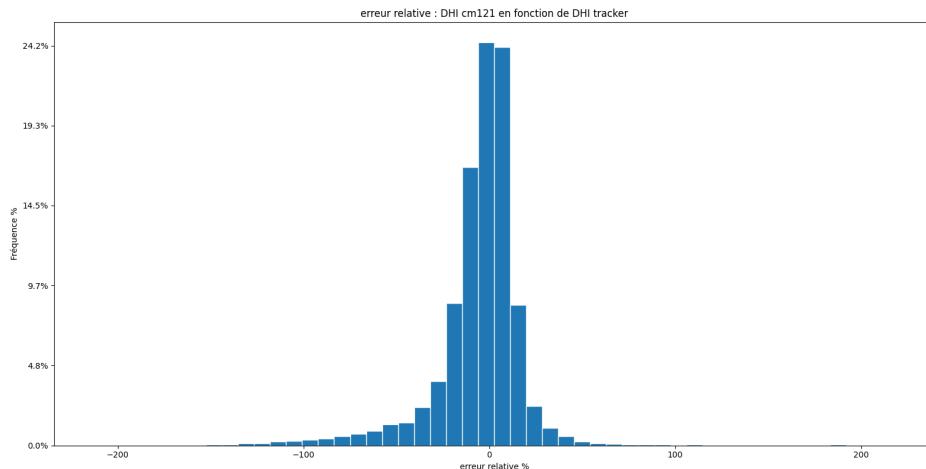


Figure 22: régression linéaire

2.2.7 Selection des mesures entre deux intervalles

Deux fonctions ont été créer pour sélectionner les mesures entre une période donnée, la première permet d'avoir les mesures entre deux dates et la dernière permet d'avoir les mesures pour une tranche horaire spécifiée.

2.2.8 exécution de l'analyse statistique

Pour faciliter l'utilisation du programme celui-ci s'exécute via un terminal, pour ce faire l'utilisateur doit juste renseigner le nom de son fichier de mesure, choisir les valeurs pour la mesure et les valeurs pour la référence. Si l'utilisateur le souhaite il est aussi en mesure de renseigner la période sur laquelle il souhaite l'analyse statistique.

2.2.9 Etallonage du cm121 avec le spn1

Pour effectuer l'étalonnage du cm121, les mesures de référence sont celles du tracker. Nous cherchons à savoir si les mesures du CM121 sont plus proches du spn1 ou du tracker, si les mesures sont plus proche de celle du spn1 alors il semble préférable d'effectuer l'étalonnage avec les mesures du spn1. Le CM121 et le spn1 utilise tous deux un arc pour masquer le rayonnement direct du soleil, cet arc donne un angle de vue de 10.8° pour le cm121 et le spn1, alors que le masque du tracker donne un angle de vue de 5° .

L'analyse statistique est effectuée entre le 01 janvier 2021 jusqu'au 01 avril 2021.

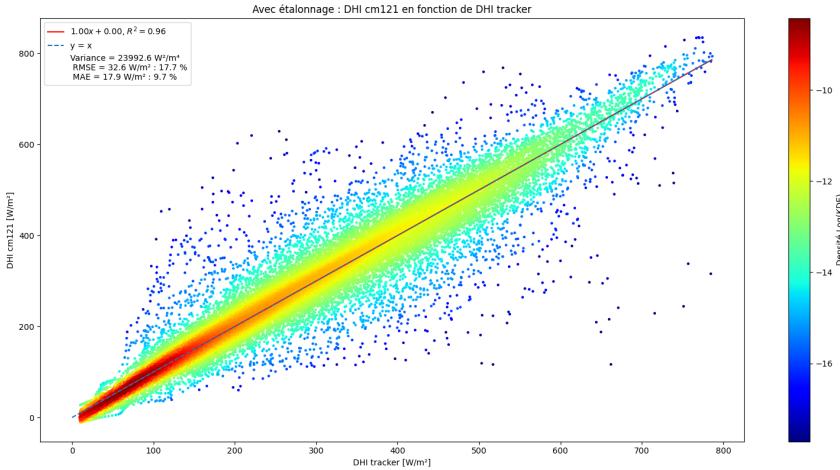


Figure 23: cm121 en fonction du tracker

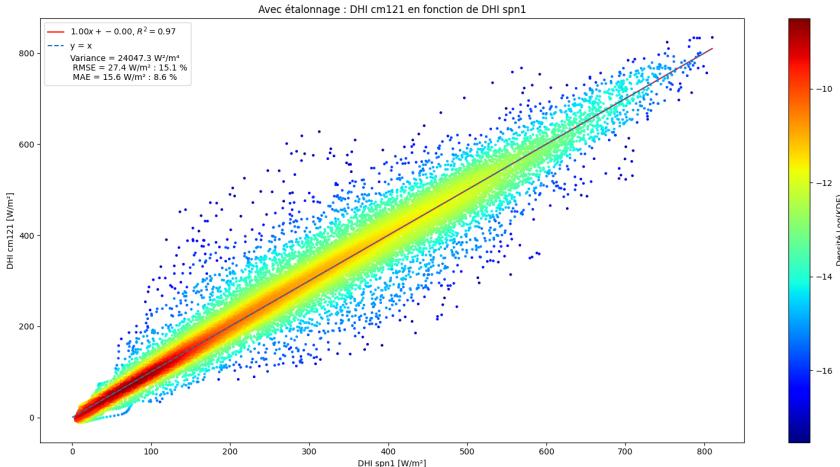


Figure 24: cm121 en fonction du spn1

	R^2	$\sigma^2 [\text{W}^2 \text{m}^4]$	RMSE [%]	MAE [%]
CM121 vs tracker	0.96	23992.6	17.7	9.7
CM121 vs spn1	0.97	24047.3	15.1	8.6

Table 1: Indicateur statistique CM121 vs tracker et CM121 vs spn1

On constate que les variances sont approximativement les mêmes, qui plus est en étalonnant le cm121 avec le spn1 l'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne sont plus faibles et le coefficient de détermination est plus élevé. Les mesures du cm121 sont donc plus proches des mesures du spn1 que celles du tracker, il est donc possible d'étalonner le cm121 avec le spn1.

2.2.10 Impact de la ventilation sur les mesures du cm121

Les mesures avec la ventilation opérationnelle ont été acquise entre le 21 avril 2021 et le 31 mai 2021, nous devons donc comparer les mesures avec ventilation et sans ventilation sur une même

période de 41 jours, les mesures entre le 21 avril 2021 et le 31 mai 2021 (avec ventilation) sont comparées aux mesures entre le 11 mars et le 20 avril (sans ventilation).

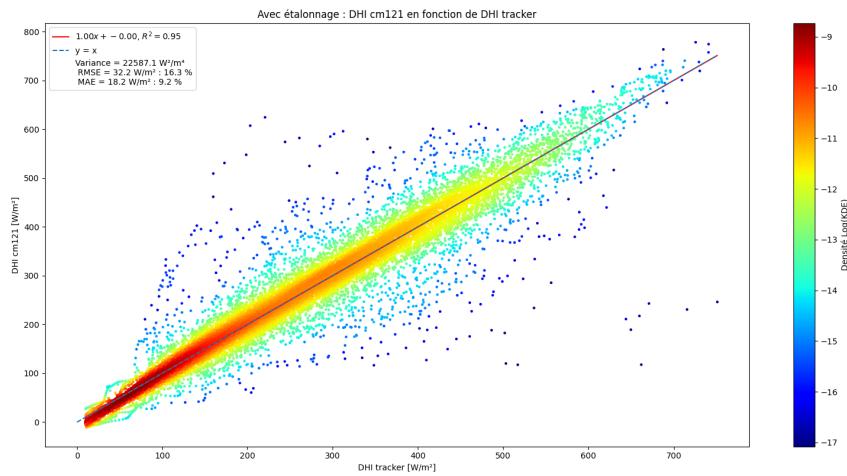


Figure 25: Sans ventilation

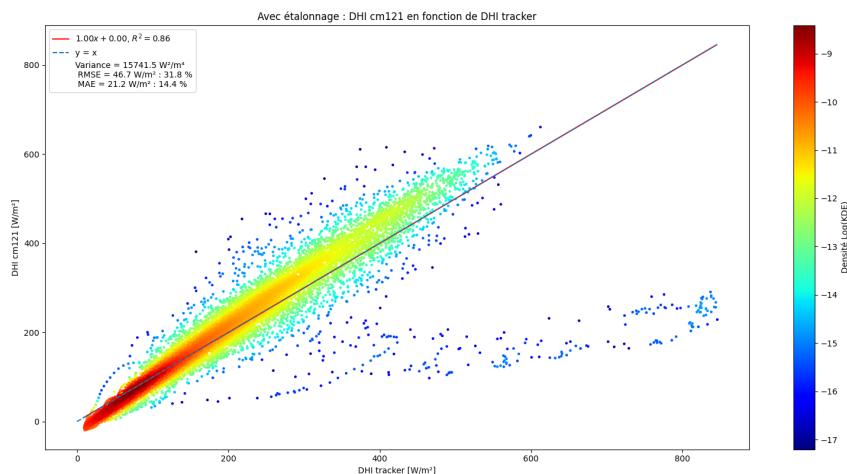


Figure 26: Avec ventilation

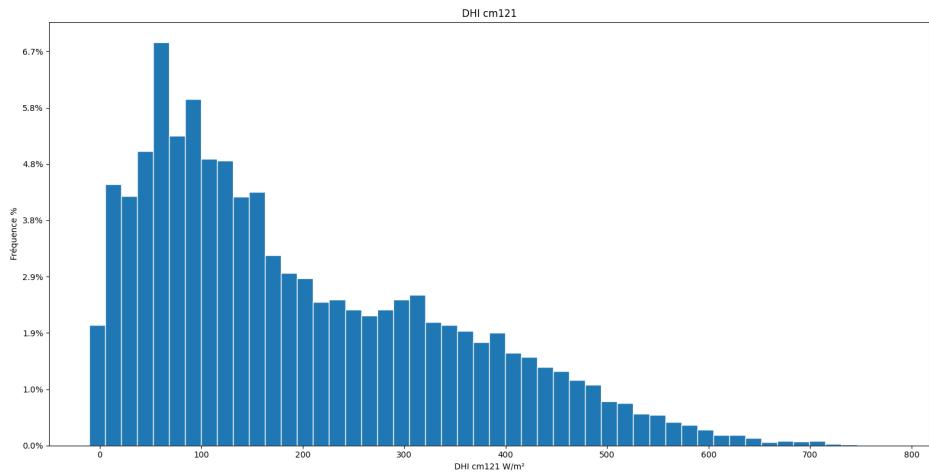


Figure 27: répartition du DHI sans ventilation

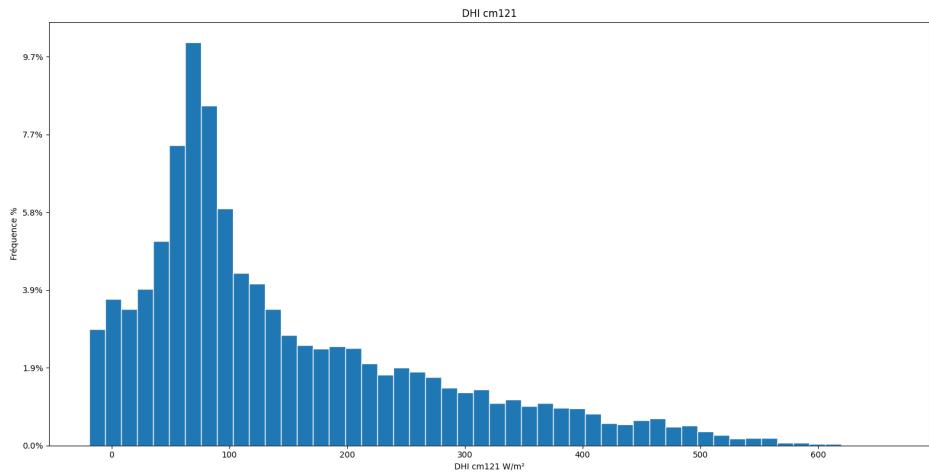


Figure 28: répartition du DHI avec ventilation

	R^2	$\sigma^2 [\text{W}^2/\text{m}^4]$	RMSE [%]	MAE [%]
Avec ventilation	0.86	15741.5	31.8	14.4
Sans ventilation	0.95	22587.1	16.3	9.2

Table 2: Indicateur statistique pour l'impact de la ventilation sur les mesures du CM121

Les histogrammes nous montrent que pour les deux périodes la répartition du DHI est similaire. Nous obtenons avec la mise en place de la ventilation un RMSE et un MAE plus élevé, en revanche la variance est plus faible, les mesures ont donc moins de dispersion avec la ventilation. Pour obtenir des résultats plus concrets il faudrait réaliser la même étude sur une période plus longue.

2.3 Les apports du stage

Le stage m'a permis de découvrir un nouveau langage de programmation, ainsi que l'utilisation de github qui permet d'enregistrer les différentes versions de son projet, mais aussi les bonnes

pratiques que ce soit pour la programmation ou l'organisation de son répertoire de travail. J'ai également pu apprendre l'utilisation d'un logiciel de modélisation 3D ainsi que le principe de la boussole solaire.

3 Conclusion

Le stage a mis en lumière que les mesures du cm121 sont plus proches du spn1 que du tracker, l'étude statistique a montré une variance similaire dans le cas où le cm121 est comparé au tracker et dans le cas où le cm121 est comparé au spn1, ce qui signifie que dans les deux cas la dispersion des mesures est la même. La comparaison avec le spn1 donne l'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne la plus faible, ce qui montre que les mesures ont moins d'erreur élevée et systématique, les mesures du cm121 sont donc plus proche du spn1 que du tracker.

Le stage a aussi montré que la ventilation permet d'avoir moins de dispersion, mais paradoxalement elle donne une erreur quadratique moyenne et une erreur absolue moyenne plus élevé, divers facteurs peuvent expliquer cela comme notamment une période d'acquisition trop courte, pour valider ce résultat il semble judicieux de refaire cette analyse statistique pour une plus grande période.

4 Bibliographie

- [1] The assessment of four different correction models applied to the diffuse radiation measured with a shadow ring using global and normal beam radiation measurements for Beer Sheva, Israel. (2008). Solar Energy, [online] 82(2), pp.144–156. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X07001338> [Accessed 5 Jun. 2021].
- [2] Sánchez, G., Serrano, A. and Cancillo, M.L. (2013). Shadow-band correction for diffuse ultraviolet radiation measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(9), pp.3807–3816.
- [3] Shadow-band radiometer measurement of diffuse solar irradiance: Calculation of geometrical and total correction factors. (2016). Solar Energy, [online] 139, pp.85–99. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X16304327#:~:text=Taking%20into%20account%20that%20a> [Accessed 5 Jun. 2021].
- [4] On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. (1995). Solar Energy, [online] 54(2), pp.105–114. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038092X9400115T> [Accessed 5 Jun. 2021].
- [5] A shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation on a vertical surface in a tropical zone. (2016). Solar Energy, [online] 136, pp.629–638. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X16303012#:~:text=A%20shadow%2Dring%20device%20is> [Accessed 5 Jun. 2021].
- [6] https://github.com/LE2P/pyranometre_arc_ombrage