



CNRS - IGE
Institut des Géosciences de l'Environnement



Gaël LEMIERE
Spécialité IESE
Rapport de stage (2022).

Estimation automatique du rayonnement solaire via l'utilisation conjointe
d'une caméra hémisphérique et de mesures instrumentales

Tome Principal
Et
Annexes

2021-2022
Du 21/03/2022 au 02/09/2022

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon stage.

Tout d'abord, je tiens tout particulièrement à remercier mon tuteur de stage, **Théo CHAMARANDE**, qui a été constamment présent pour m'aider à prendre du recul sur le travail que je réalisais et de m'avoir accompagné et guidé tout au long de ce stage. Je tiens également à remercier mes autres tuteurs et porteurs de ce projet, Monsieur **Philippe BLANC** et Monsieur **DALLA-MURA Mauro**, pour leur bienveillance et leur encadrement.

Je souhaite remercier toute l'équipe HMCIS et tous les membres du laboratoire pour leur accueil et le partage de leurs expériences. Mes remerciements sont aussi adressés à Monsieur **Christophe ROUSSEAU**, ingénieur de la station Grenoble INP – ENSE3 et G2LAB, ainsi qu'à tous les membres de l'équipe de recherche de l'O.I.E. Mines ParisTech pour leur disponibilité et leur assistance à mon égard durant ce stage.

Mes remerciements vont également à tous mes proches qui m'ont soutenu durant cette période et qui ont contribué à la relecture de ce rapport.

Finalement, je tiens à remercier Madame **Sylvie CHARBONNIER** pour son suivi et son écoute en tant que tuteur pédagogique. Un grand merci est aussi adressé à tous mes enseignants de Polytech Grenoble pour la polyvalence et la flexibilité de leurs enseignements ainsi qu'à tous les membres de Polytech qui ont participé au bon fonctionnement de ma scolarité.

Table des matières

1	Introduction.....	2
1.1	Présentation du laboratoire.....	2
1.2	Contexte du stage.....	4
1.3	Gestion du projet.....	5
2	Le rayonnement solaire.....	6
2.1	Les systèmes de conversion énergétique.....	6
2.2	Origine et composition de l'irradiance solaire.....	7
2.3	Différentes composantes et le problème de la zone circumsolaire.....	8
2.4	Géométrie solaire.....	10
3	Mesures de la station météo.....	11
3.1	Mesures des différentes composantes du rayonnement solaire.....	11
3.2	La station météo GreEn-Er de Grenoble INP ENSE3 et du G2ELab.....	13
3.3	Sources d'incertitudes et défauts de mesures.....	15
3.3.1	Sources d'incertitudes.....	15
3.3.2	Analyse des mesures.....	16
4	Le pyranomètre SPN1 et son fonctionnement.....	18
5	Modèle de référence machine learning pour la correction des biais.....	20
5.1	Analyse et discussion.....	20
5.2	Modèle de référence sélectionné – Random Forest.....	21
6	Estimation théorique via l'utilisation d'images du ciel.....	23
6.1	Calibration de la caméra et transformation des images.....	23
6.1.1	Déformation d'une caméra hémisphérique fish-eye.....	23
6.1.2	Processus de calibration.....	24
6.1.3	Estimation de la position angulaire de la caméra.....	25
6.1.4	Inclinaison de l'image.....	26
6.1.5	Transformation en image panoramique.....	27
6.2	L'estimation théorique.....	28
6.2.1	La méthode.....	28
6.2.2	Résultats.....	30
7	Compétences acquises.....	31
7.1	Compétence transversale.....	31
7.2	Situation professionnelle : Actualisation des connaissances.....	31
8	Conclusion et perspectives.....	32
	Glossaire & nomenclature.....	33
	Annexes.....	34

Table des figures

Figure 1 : IGE - Maison Climat Planète	2
Figure 2 : Chauffe-eau solaire.....	6
Figure 3 : Centrale solaire parabolique	6
Figure 4 : Centrales solaires photovoltaïques.....	6
Figure 5 : Spectre solaire de référence (ASTM G-173) [12]	7
Figure 6 : Influence de l’atmosphère sur le rayonnement solaire [13]	8
Figure 7 : Effet des aérosols et fins nuages de glaces sur la zone circumsolaire	9
Figure 8 : Ellipsoïde géographique de référence.....	10
Figure 9 : Diagramme de la position angulaire du Soleil [15]	10
Figure 10 : Schéma représentatif de l’angle solide [21].....	11
Figure 11 : Mesures des différentes composantes du rayonnement solaire.....	12
Figure 12 : Schéma du signal de sortie du RSR2 lors du passage de la bande d’ombre.....	13
Figure 13 : Description des équipements de la station météo GreEn-Er de Grenoble.....	14
Figure 14 : Tableau des incertitudes combinées affectant les mesures de la station BSRN de Payerne [18].....	15
Figure 15 : Scatterogrammes du rayonnement global (W/m^2) pour des journées de ciel clair	16
(a) SPN1 CMP3 (b) SPN1 RSR2	16
Figure 16 : Racine de la moyenne de l’erreur au carré (RMSE).....	17
Global CMP3 – Global RSR2 (unite en W/m^2)	17
Figure 17 : Photo du capteur CMP3 avec réglage du niveau.....	17
Figure 18 et 19 : Photo du SPN1 [19] à gauche ; Vue du dessus du masque d’ombre et des 7 thermopiles de l’appareil [23] à droite	18
Figure 20 : Tracé du taux de variance expliquée attribuable à chaque caractéristique d’entrée et du cumul de cette variance expliqué pour le jeu de donnée trié (orange) et non-trié (bleu)	20
Figure 21 : Scatterogramme entre les valeurs cibles de test (Diffus RSR2) et les prédictions du modèle	22
Figure 22 : Modèle de lentille fish-eye [25]	23
Figure 23 : Exemple de détection automatique de coins d’un échiquier	24
Figure 24 : Description des angles de rotation : Roulis - Tangage - Lacet	25
Figure 25 : Tracés de la trajectoire de la Lune durant 5 nuits au cours de l’année 2021-2022	25
Figure 26 et 27 : À gauche : Grille de coordonnées cartésiennes converties en coordonnées sphériques (rayon=1 assumé) ; À droite : Même grille de points à laquelle la matrice de rotation de la caméra a été appliquée.....	26
Figure 28 : Grille de coordonnées cartésiennes convertie en coordonnées sphériques	27
Figure 29 et 30 : Image de base (en haut) et image en affichage Azimut/Élévation (en bas)	27
Figure 31 : Tracés des trajectoires de la Lune durant 5 nuits sur une image transformée	28
Figure 32 : Ciel (en affichage panoramique : azimut [0 à 360°] élévation [0 à 90°]) vu sous les motifs d’ombrage vus par les 7 capteurs.	29
Figure 33 : Scatterogramme entre les mesures de diffus du SPN1 et le diffus réestimé via la méthode théorique.....	30

1 Introduction

Du 23 mars au 2 septembre 2022, ce projet de fin d'étude a été effectué dans l'équipe de recherche HMCIS à l'Institut des Géosciences de l'Environnement sous tutelle du CNRS à Grenoble, en France.

L'objectif principal du stage est de développer une nouvelle méthode d'estimation du rayonnement solaire, considéré comme une source d'énergie nécessitant une bonne caractérisation par la mesure. Mesurer et caractériser avec précision le rayonnement solaire nécessite classiquement des instruments de mesures coûteux et demandent une maintenance soutenue, particulièrement dans les milieux fortement agressifs (poussières et épisodes convectifs violents). Le développement récent d'instruments plus abordables et plus robustes, couplé à des méthodes optimisant leur fonctionnement pourrait réduire ces contraintes. Dans ce cadre, la station météorologique GreEn-ER de Grenoble INP ENSE3 et du G2Lab a été choisie. Ses équipements permettent de faire une intercomparaison des mesures de rayonnement et possèdent une caméra hémisphérique capturant le ciel ainsi qu'un dernier capteur, le SPN1, qui est au cœur de ce projet.

Dans ce rapport, nous détaillerons premièrement les notions liées au rayonnement solaire et présenterons les phénomènes physiques associés à la diffusion du rayonnement dans notre atmosphère. Les données et équipements de la station météorologique seront ensuite introduit pour subséquemment présenter le capteur SPN1, ses hypothèses de fonctionnement et ses biais. À cela nous présenterons une première proposition de méthode d'estimation via un modèle de machine learning. Puis, nous aborderons l'estimation théorique utilisant les images de la caméra. Celles-ci nécessitent une transformation qui en amont demande une calibration de cette dernière. Enfin, une conclusion permettra de résumer et présenter les perspectives de ce projet.

1.1 Présentation du laboratoire

L'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) de Grenoble est un laboratoire public de recherche en Sciences de la Planète et de l'Environnement, créé le 1^{er} janvier 2017. L'IGE est une unité mixte de recherche sous les tutelles du centre national de la recherche scientifique (CNRS), de l'institut de recherche pour le développement (IRD), de l'Université Grenoble Alpes (UGA) et Grenoble-INP.



L'effectif moyen du laboratoire est d'environ 270 personnes, dont 155 membres permanents (chercheurs, enseignants chercheurs, ingénieurs, techniciens et personnels administratifs) et environ 120 non permanents (doctorants, post-doctorants et personnels en contrat à durée déterminée). Le laboratoire accueille aussi chaque année une centaine de stagiaires et visiteurs scientifiques. Le laboratoire est installé sur trois sites du Campus universitaire de Grenoble (sites Molière, OSUG-B et Maison Climat Planète dont une photo est donnée ci-contre en figure 1).



Figure 1 : IGE - Maison Climat Planète

L'IGE mène ses recherches sur le climat et l'anthropisation de notre planète (transformation de l'environnement par la présence de l'être humain) en combinant glaciologie, hydrologie, océanographie, sciences atmosphériques et environnementales, sciences inter et transdisciplinaires. Les chercheurs de l'IGE sont organisés en huit équipes.

L'IGE se positionne là où les enjeux sociétaux et environnementaux sont les plus prégnants : les régions polaires dont le réchauffement est deux fois plus rapide que sous nos latitudes et dont les calottes sont des témoins et acteurs des changements ; la zone intertropicale où le changement climatique, les pressions urbaine et la démographique accentuent les tensions déjà fortes sur l'usage des terres et l'accès aux ressources en eau, et sont des sources inquiétantes de conflits et d'instabilités politiques ; ou encore les zones de montagne (Andes, Himalaya et les Alpes) où les glaciers sont à la fois des ressources d'eau vitales mais aussi à l'origine de potentiels risques naturels.

Durant ce stage, j'ai intégré l'équipe HMCIS : HydroMétéorologie, Climat et Interactions avec les Sociétés, composée elle-même d'une quarantaine de chercheurs, ingénieurs et doctorants représentant des expertises scientifiques variées. Les thèmes de recherche de l'équipe se déclinent selon les trois axes suivants :

- La compréhension de la variabilité multi-échelle des précipitations afin d'estimer l'aléa et la ressource en milieux insuffisamment documentés.
- L'anticipation de l'évolution des extrêmes hydrométéorologiques et leurs impacts sanitaires et socio-économiques.
- Répondre et contribuer aux enjeux de la transition énergétique.

Tous les lundis, un séminaire est organisé pour exposer le travail d'un des membres de l'équipe. Ainsi, toute l'équipe peut s'informer des travaux de chacun. De plus, une fois par mois, une réunion plus formelle sur le budget, les projets, les sujets de thèses et les appels d'offres en cours ainsi que sur l'organisation globale de l'équipe a lieu.

Par ailleurs, ce stage s'est déroulé en collaboration avec le GIPSA-Lab (Grenoble Image Parole Signal Automatique) où mon tuteur M. Mauro DALLA MURA exerce en tant qu'enseignant chercheur et maître de conférences à Grenoble INP et l'ENSE³. Faisant partie de l'équipe de recherche Sigmaphy (Signal image physique) reconnue par l'Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble, il s'est principalement intéressé à la partie machine learning de ce projet.



Enfin, ce projet a été fondé avec l'assistance de Philippe Blanc, enseignant chercheur du centre O.I.E Mines ParisTech (Observation, Impacts, Energie) qui m'a encadré tout au long de mon stage. Les activités de ce centre se positionnent sur les domaines de l'énergie, de l'environnement et de l'observation de la Terre.



1.2 Contexte du stage

L'énergie solaire est considérée comme étant une alternative prometteuse à la demande croissante en énergie. Il s'agit d'une ressource renouvelable qui, utilisée à bon escient via des technologies solaires comme le photovoltaïque (PV), les systèmes à concentration solaire, la thermochimie solaire et autres applications, pourrait permettre de substituer une partie de la production énergétique des systèmes traditionnels utilisant des ressources fossiles.

Le potentiel énergétique total annuel que représente l'énergie solaire est environ 1240 fois plus important que la consommation énergétique mondiale en 2015. En comparaison, si la totalité de la ressource en pétrole découverte sur Terre était convertie en énergie en un an, cela permettrait de fournir seulement 18 fois la quantité d'énergie nécessaire pour la consommation annuelle mondiale, soit moins de 2% de l'énergie solaire annuelle [1]. Dans ce contexte actuel de transition énergétique mondial, dont l'objectif principal est de limiter le réchauffement climatique, les pays du monde entier s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (Accord de Paris [2]). Pour respecter ces engagements, des investissements et des financements croissants dans les énergies renouvelables sont indispensables. Et sur ces cinq dernières années, le solaire photovoltaïque représente à lui seul 60 % de tous les ajouts de capacité renouvelable. Ainsi, la production en énergie solaire photovoltaïque mondiale est passée de 250 TWh en 2015 à 994 TWh en 2021 (selon l'IAE).

Bien que largement critiqué pour son prix et son inefficacité à ses débuts, les progrès technologiques couplés à l'amélioration des systèmes de stockage ont rendu l'énergie solaire compétitivement viable. De plus, même si la chaîne de production des équipements pour l'exploitation de la ressource solaire est encore très carbonée (62% de l'énergie utilisée pour la production de panneaux solaires photovoltaïques provient du charbon [3]), les émissions associées à l'ensemble du cycle de vie de l'électricité photovoltaïque représentent moins de 10% de celles associées à une turbine à gaz et moins de 3% de celles associées à une centrale à charbon [4].

Le développement rapide des applications citées précédemment a accru le besoin de mesures et d'évaluations de la ressource solaire. En effet, il est primordial d'avoir une bonne connaissance et caractérisation du rayonnement solaire pour la planification de l'installation et du dimensionnement de centrales photovoltaïques, de leur maintenance ainsi que de l'optimisation du rendement de ce type d'aménagement. Une bonne connaissance de la production en énergie permettra de répondre plus efficacement à la demande.

De plus, les mesures de rayonnement sont utilisées pour d'autres usages tels que les applications éco-hydrologiques comme l'étude du comportement de la végétation vis-à-vis des différentes composantes solaires, l'étude de la composition atmosphérique et de sa variation dans le temps et l'espace ou bien pour la validation de réanalyse atmosphérique ou d'estimations satellitaires [5]. Ce domaine est donc source de nombreux projets, d'applications et de recherches dans le monde entier.

L'évaluation des ressources solaires est effectuée à partir d'équipements spécialisés qui, du fait de leurs coûts et leurs besoins en maintenance, sont difficilement implémentables à très grandes échelles. Par conséquent, de nombreuses alternatives *low-cost* utilisant des imageurs du ciel sont explorées. Contrairement aux mesures instrumentales classiques, les images du ciel apportent de l'information sur la couverture nuageuse et sa variation. En effet, les nuages sont la principale source de variation sur la production de l'énergie solaire. De grandes fluctuations de la couverture nuageuse rendent les prédictions plus compliquées. Ainsi, plusieurs méthodes utilisant des imageurs du ciel ont prouvé leur intérêt pour des prévisions immédiates et à court terme [6]–[8].

Les chercheurs de l'IGE souhaitent mettre en place un réseau de mesure du rayonnement diffus et direct en Afrique de l'Ouest avec des capteurs robustes et abordables. Ainsi, le capteur SPN1 est un appareil prometteur et pourrait réduire ces contraintes. Cependant, ce capteur est sujet à des biais de mesures non négligeables liés à une mauvaise prise en compte de la répartition de la

luminance du ciel. L'objectif de ce stage est de développer une méthode de correction de ces biais via l'utilisation d'une caméra hémisphérique.

1.3 Gestion du projet

L'organisation générale du projet ainsi que sa planification ont été déterminées au préalable de mon stage. Différentes étapes chronologiques de réalisation du projet ont donc été définies :

- Appropriation du sujet et des données
- Développement d'outils et transformation des images.
- Développement des méthodes d'estimations du rayonnement :
 - o Via une méthode théorique basée sur un modèle physique.
 - o Via une méthode utilisant des modèles de machine learning.
- Tests sur des données externes.

Les tâches qui ont été identifiées comme prioritaires sont l'analyse des mesures de la station météo ainsi que la caractérisation des biais présents sur les capteurs. Il était nécessaire de correctement s'approprier et d'évaluer la qualité des données à ma disposition. De plus, la transformation des images du ciel était la principale mission à réaliser car elle était cruciale pour l'étape d'estimation théorique et constituait une matière première très intéressante pour des modèles de deep learning.

Dans le cadre de la planification des tâches, certains ajustements ont dû être mis en place pour tenir compte des difficultés rencontrées. Par exemple, la calibration de la caméra a été très chronophage et m'a demandé de réitérer l'acquisition de photos de mire.

Au niveau des ressources à ma disposition, j'ai pu travailler en autonomie, principalement dans les locaux de l'IGE à un poste de travail qui m'était consacré. J'ai également eu l'occasion de me rendre au Gipsa-Lab à plusieurs reprises. De plus, je suis parti en mission à Sophia Antipolis au milieu de mon stage pour présenter mon travail à l'équipe de chercheurs de l'OIE. Les équipements de mesure utilisés pour ce stage sont exploités au G2Elab. Cela a été une légère contrainte car chaque opération ou manipulation des équipements de mesure et de la caméra nécessitait de prendre un rendez-vous avec l'ingénieur s'occupant de la station.

Au niveau des langages utilisés, la majorité du développement et de la programmation que j'ai réalisée s'est faite sur Python. Je me suis également servi d'une version de MatLab tournant sur les serveurs de l'IGE pour comparer les performances de la calibration de la caméra.

Les objectifs de mon stage ainsi que du projet confié comportaient un certain nombre de livrables. Ainsi, je devais réaliser :

- la totalité des codes commentés,
- un Jupyter Notebook interactif et pédagogique sur les points clés de mon travail (Calibration de la caméra et transformation des images en format panoramique),
- le rapport, la soutenance et la présentation orale à l'équipe de chercheurs.

Dans le cadre de la conduite du projet, j'ai tout d'abord créé un dépôt Git sur la plate-forme Gricad-gitlab de façon à pouvoir assurer un suivi de mon avancement ainsi qu'une sauvegarde de mon travail. Cela m'a également permis de travailler sur différents ordinateurs efficacement lorsque cela a été nécessaire comme lors de mon voyage à Sophia Antipolis. De plus, chaque semaine, une réunion avait lieu avec mon maître de stage pour faire un point sur mon avancement et discuter de mes résultats et mes interrogations. Par ailleurs, différentes réunions se sont tenues tout au long de mon stage avec les autres porteurs du projet de façon à planifier les prochaines étapes à entreprendre.

2 Le rayonnement solaire

2.1 Les systèmes de conversion énergétique

Il existe différents systèmes de conversion de l'énergie solaire en électricité, soit directement en utilisant des cellules photovoltaïques ou indirectement en la convertissant d'abord en chaleur (solaire thermodynamique à concentration). Ces différents systèmes profitent de l'énergie solaire différemment et doivent impérativement avoir une étude préliminaire adaptée à leurs conditions de fonctionnement de façon à dimensionner et optimiser le rendement de l'installation. En effet, ces dispositifs se basent généralement soit sur l'éclairement global, soit sur sa composante directe (rayons provenant de la position du soleil), plus intense, et fonctionnent à différentes plages de longueur d'onde.

Quelques exemples de systèmes de conversion énergétique solaire :

- Le chauffe-eau solaire exploite l'irradiance globale (inclinée) pour faire chauffer de l'eau indirectement via un fluide caloporteur et de bande de longueur d'onde typiquement entre $0.35 \mu\text{m}$ et $2.5 \mu\text{m}$, figure 2. [9]
- Les centrales solaires thermodynamiques à concentration sont des dispositifs qui utilisent des lentilles et/ou des miroirs pour focaliser le rayonnement direct (rayons provenant de la position du soleil avec un demi-angle d'ouverture typiquement entre 0.7° et 2.3°) en un point pour faire chauffer un fluide caloporteur et générer de l'électricité. Il en existe de différents types (centrale solaire à tour, parabolique, miroir cylindro-parabolique, etc...), de bande de longueur d'onde typiquement entre $0.35 \mu\text{m}$ et $2.5 \mu\text{m}$. Un exemple de centrale solaire parabolique est donné en figure 3. [10]
- Les systèmes photovoltaïques utilisent l'irradiance globale inclinée et peuvent être motorisés pour suivre la trajectoire du soleil et ainsi optimiser le rendement. Selon les cellules PV utilisées, la bande de longueur d'onde est comprise entre $0.3 \mu\text{m}$ et $1 \mu\text{m}$. Une photo d'une centrale solaire photovoltaïque est donnée en figure 4. [11]
- Les panneaux photovoltaïques à concentration sont des modules photovoltaïques composés de lentilles et de cellules PV. Ces installations exploitent le rayonnement normal direct (de demi-angle d'ouverture typiquement entre 0.5° et 5°) avec une bande de longueur d'onde dépendante des cellules PV utilisées.



Figure 2 : Chauffe-eau solaire



Figure 3 : Centrale solaire parabolique



Figure 4 : Centrales solaires photovoltaïques

Comme nous pouvons le remarquer, ces dispositifs sont systématiquement inclinés. L'intérêt est de capter au maximum les rayons provenant du Soleil en inclinant les appareils dans la direction de celui-ci. Il est fréquent que ces systèmes soient montés sur une pièce mobile à un axe (pivot Est-Ouest) ou deux axes (pour plus de précision). Cela permet de suivre la position du Soleil durant une journée et ainsi maximiser la quantité d'énergie reçue et donc optimiser le rendement des équipements.

2.2 Origine et composition de l'irradiance solaire

Les réactions nucléaires de fusion qui se produisent au sein du Soleil libèrent une immense quantité d'énergie et le maintiennent à une température élevée. Une part de cette énergie émise sous forme de rayonnement électromagnétique est reçue par la Terre et représente une source d'énergie lumineuse et thermique.

Pour décrire l'énergie solaire reçue sur la surface de notre planète, nous utilisons les grandeurs radiométriques d'irradiation et d'irradiance solaire. L'irradiation est le flux d'énergie incidente reçue par unité de surface, exprimé en J/m^2 ou Wh/m^2 . L'irradiance solaire, aussi appelée éclairement énergétique solaire, est le flux de puissance incidente par unité de surface exprimé W/m^2 .

L'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil est composé de toute la gamme de rayonnement, allant des rayons gamma (longueur d'onde < 5 pm) jusqu'aux ondes radio (de 10 à 1 cm de longueur d'onde), en passant par le domaine du visible. Une partie de ce rayonnement solaire traverse l'espace pour venir s'écraser à la surface de l'atmosphère (Top Of Atmosphere, TOA) avec une puissance moyenne d'environ $1\,367\, W/m^2$. C'est ce que l'on appelle la constante solaire. Une partie de ce rayonnement, notamment les ondes courtes (rayons gamma, X et UV), est filtrée par la couche d'ozone puis diffusée dans les autres couches de l'atmosphère, avant d'atteindre la surface de la Terre. La **figure 5** montre la répartition spectrale solaire au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer.

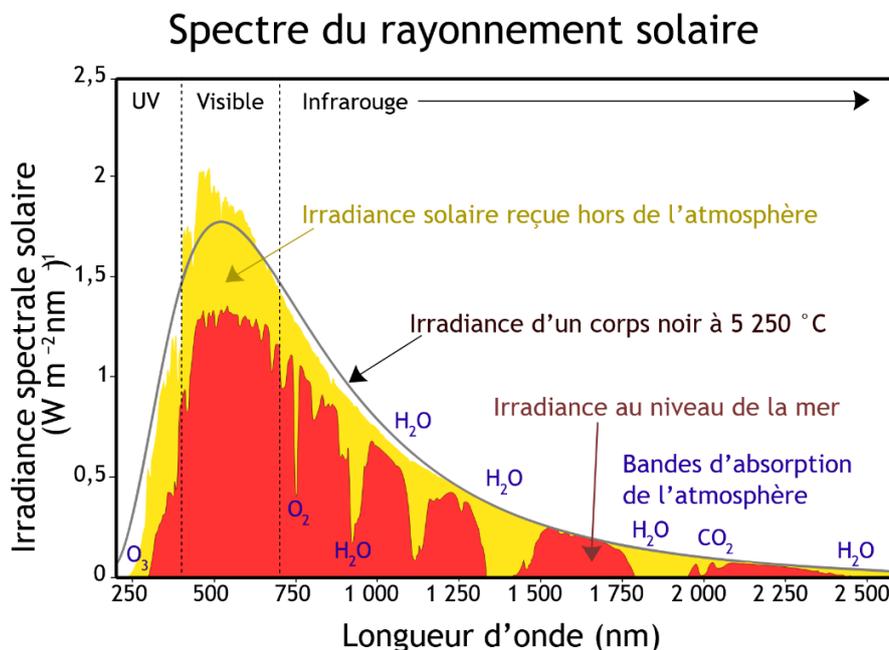


Figure 5 : Spectre solaire de référence (ASTM G-173) [12]

Cette répartition varie en fonction de la géolocalisation, due au fait de la composition en aérosols (sel, sulfate, noir de carbone, etc.), en molécules gazeuses et en petites particules mais aussi de l'inclinaison par rapport au plan horizontal (les rayons traversent moins de distance pour atteindre le sol au niveau de l'équateur qu'aux pôles).

2.3 Différentes composantes et le problème de la zone circumsolaire

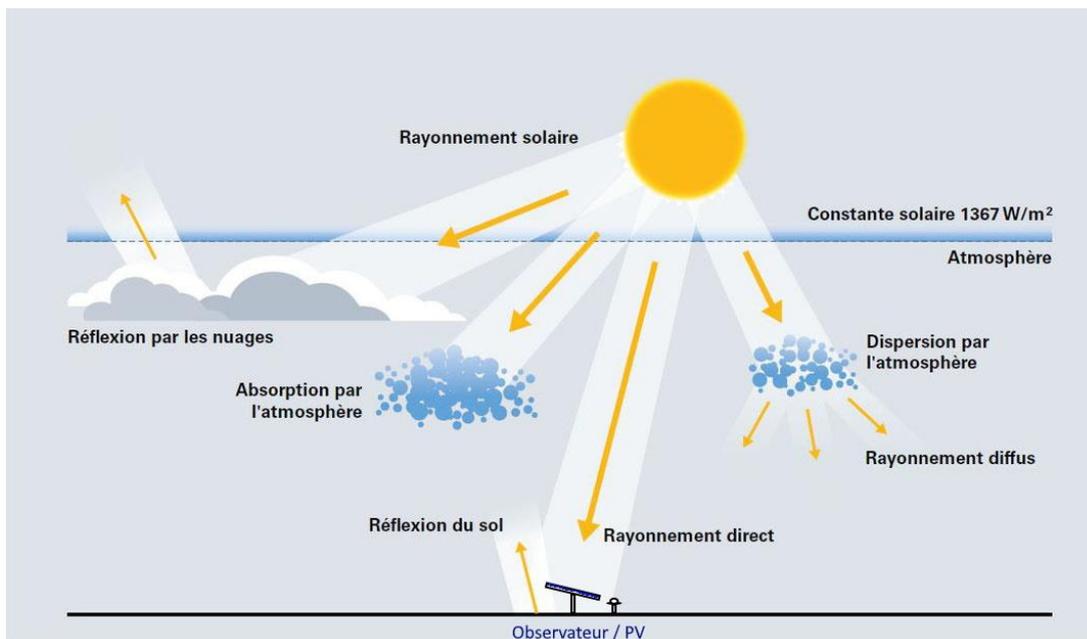


Figure 6 : Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire [13]

Comme mentionné précédemment, les particules présentes dans l'atmosphère rerayonnent l'énergie des ondes incidentes dans toutes les directions. Une part de cette énergie est partiellement absorbée lors de la rencontre entre les particules et les rayons solaires, puis diffusée dans toutes les directions. Ce rayonnement diffus reste un potentiel énergétique intéressant et non négligeable pour un panneau solaire. Ainsi, pour bien modéliser l'irradiance globale dans le plan d'un panneau solaire, il est nécessaire de se familiariser aux différentes composantes de la lumière et les méthodes pour les mesurer individuellement.

Les trois composantes du rayonnement solaire sont le rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi représentés dans la figure 6 :

- Le faisceau ou composante directe B se réfère aux rayons qui proviennent directement de la position du Soleil (dans un petit angle solide défini dans la partie 4.1 Géométrie Solaire). Elle est notée DNI ou BNI (Direct/Beam Normal Irradiance) lorsque le plan local considéré fait directement face au Soleil ou BHI (Beam Horizontal Irradiance) lorsque les rayons directs sont tangents au plan.
- La composante diffuse D correspond aux rayons provenant du ciel du fait de la diffusion (en excluant le petit angle solide). Elle est notée DHI (Diffuse Horizontal Irradiance).
- La composante réfléchie R se rapporte aux rayons diffusés provenant du sol et dépend fortement de l'albedo du sol (capacité réfléchissante). Cette composante est généralement incluse dans la composante diffuse.

A partir de ces définitions, il est possible de définir le rayonnement global G , l'irradiance totale de l'hémisphère vue par un observateur en un point et une orientation de son plan, comme étant la somme de ces trois composantes. On note le rayonnement global GHI (Global Horizontal Irradiance).

$$G = B + D + R$$

Il est particulièrement difficile de modéliser la composante diffuse de façon précise et rigoureuse du fait de deux phénomènes.

Premièrement l'éclaircissement de l'horizon qui résulte de l'augmentation de l'intensité de la diffusion lumineuse proche de l'horizon.

Et secondement, la diffusion de la lumière autour du disque solaire par l'atmosphère, c'est ce que l'on appelle le problème de la zone circumsolaire. Ainsi, vu depuis l'extérieur de l'atmosphère, le soleil apparaît comme un disque de rayon angulaire d'ouverture d'environ 0.266° . Alors que si nous l'observons depuis le sol terrestre, en fonction de la turbidité de l'atmosphère et de l'effet des aérosols ou de la couverture nuageuse, le disque solaire apparent peut avoir un rayon angulaire jusqu'à 10 fois (voir 15 à 20) plus grand. Un exemple de cette variation est donné en figure 7.

De ce fait, l'irradiance diffuse est souvent modélisée comme étant isotrope, c'est-à-dire qu'elle est uniforme en intensité en tout point de l'hémisphère. Bien que cette hypothèse permette de grandement simplifier les calculs, elle ignore les phénomènes cités ci-dessus.



Figure 7 : Effet des aérosols et fins nuages de glaces sur la zone circumsolaire

À gauche : le 07/05/2021 à 10h et à droite : le 12/02/2022 à 12h avec un ciel couvert par un nuage de glace d'haute altitude à Grenoble. Images de la station GreEnEr de Grenoble INP ENSE3 et du G2ELab.

Selon les conditions atmosphériques, la part du rayonnement diffus provenant de la zone circumsolaire peut être plus ou moins importante. Cependant, les mesures de rayonnement direct prennent ordinairement en compte une large partie du rayonnement circumsolaire, qui n'est pas purement direct, comme nous l'avons exposé précédemment. Certains systèmes de conversion énergétique comme les centrales solaires thermiques à concentration utilisent exclusivement le potentiel énergétique du rayonnement direct. Par conséquent, l'effet circumsolaire doit être pris en compte pour l'évaluation du rendement et des performances de ce type d'installation.

Les rayons directs sont plus intenses et représentent donc un plus grand potentiel énergétique par rapport aux rayons diffus. Néanmoins, ces derniers ne sont pas négligeables et contribuent beaucoup à la production énergétique dans certaines conditions. Par temps nuageux, les panneaux solaires photovoltaïques génèrent généralement 10 à 25% de leur production par temps clair.

Nous pouvons conclure qu'il est nécessaire d'avoir plusieurs définitions du rayonnement direct en fonction de l'application envisagée.

2.4 Géométrie solaire

La quantité de puissance reçue sur un emplacement géographique terrestre donné (renseigné par sa longitude et sa latitude) varie dans le temps : entre le jour et la nuit du fait de la rotation de la Terre et entre les saisons en raison de l'orbite elliptique terrestre et de l'inclinaison de l'axe de la Terre. À un temps donné, elle varie également dans l'espace à cause de l'inclinaison des rayons solaires avec la longitude et la latitude. Par conséquent, la quantité d'énergie reçue à un emplacement, une orientation du plan local et en un temps donnés dépend de la position relative du Soleil et de la Terre. C'est pourquoi la géométrie Terre-Soleil et le temps jouent un rôle important dans la caractérisation et la conversion de l'énergie solaire.

Considérons un observateur local, localisé par sa latitude φ (en $^\circ$), sa longitude λ (en $^\circ$) et son élévation h (en m) selon une ellipsoïde géographique de référence, représenté dans la figure 8 [14] ci-contre.

Pour cet observateur local, la position du soleil (ou un astre) définie par :

- Son angle d'élévation γ_s : l'angle formé par la direction du Soleil et l'horizon, 0° lorsque le Soleil est à l'horizon et 90° lorsque celui-ci est au zénith. Son angle complémentaire, l'angle de zénith est noté θ_s .
- Son angle d'azimut ψ_s : l'angle formé par la projection de la direction du Soleil sur le plan horizontal, défini du Nord vers l'Est, suivant la norme ISO 19115. Il existe plusieurs conventions pour la définition de cet angle. Durant toute la suite de ce rapport, nous considérerons un angle d'azimut compris entre 0 et 360° .

Une représentation de cet affichage est donnée en figure 9.

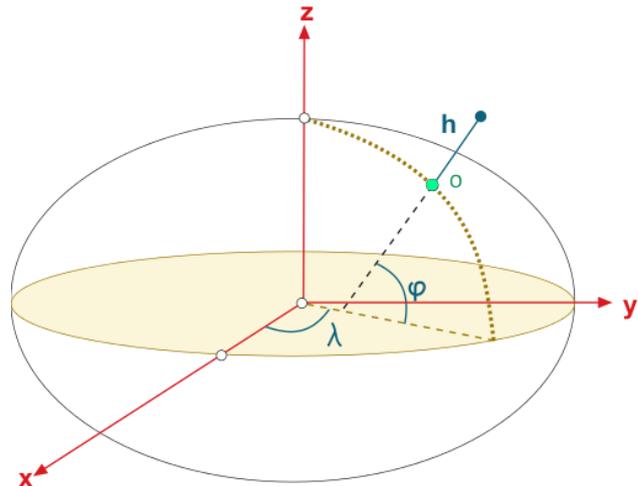


Figure 8 : Ellipsoïde géographique de référence

Point O, position de l'observateur

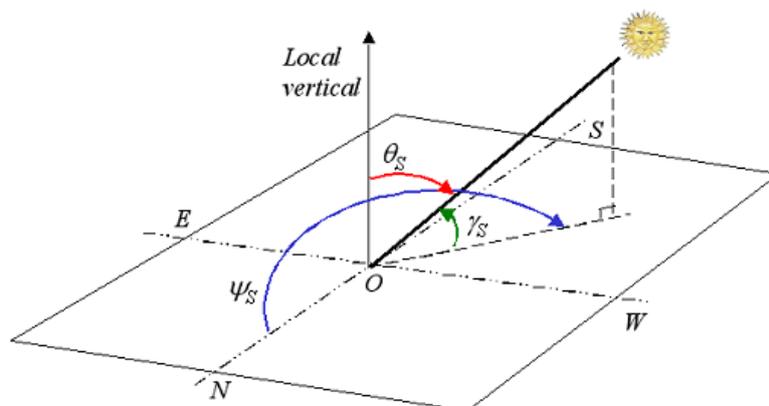


Figure 9 : Diagramme de la position angulaire du Soleil [15]

L'angle solide est le rapport entre la surface d'une sphère (ou demi-sphère dans notre cas) intercepté par un cône et le carré du rayon de cette surface (cf figure 10 ci-contre).

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \text{ exprimé en stéradian (sr)}$$

Dans notre application, nous l'utilisons pour définir la part du ciel à considérer comme source du rayonnement direct.

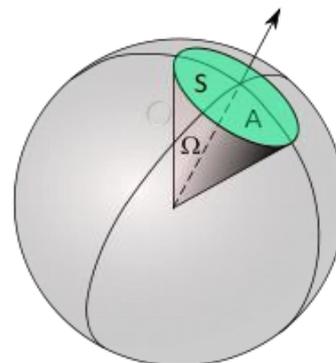


Figure 10 : Schéma représentatif de l'angle solide [21]

3 Mesures de la station météo

Comme vu précédemment, il est primordial de faire des mesures de qualité adaptées à l'application considérée. Le besoin de toute station météorologique est d'obtenir des mesures fiables, sur le long terme, avec une faible incertitude. Le réseau de rayonnement de surface de référence (Baseline Surface Radiation Network, BSRN, OMM, 1998 [16]) donne un aperçu de l'état le plus récent des mesures de rayonnement.

Un pyranomètre est un appareil de mesure de l'irradiance solaire. Il en existe différents types qui peuvent être classés en deux groupes : les pyranomètres à thermopile et les pyranomètres photovoltaïques (utilisant soit une photodiode en silicium, soit une cellule photovoltaïque). Une thermopile est un appareil avec des jonctions de différents métaux dont une surface noire qui capte le rayonnement solaire et une surface séparée qui n'absorbe pas le rayonnement. Une tension proportionnelle à la différence de température entre ces deux surfaces est générée par le capteur et permet une mesure indirecte de l'irradiance.

Les pyranomètres à thermopile mesurent le rayonnement entre 300 et 2800 nm avec une sensibilité spectrale plate sur cette bande. À contrario, les pyranomètres photovoltaïques ne peuvent détecter qu'une partie du spectre solaire (domaine optique entre 400 et 1100 nm). La photodiode, utilisée dans ce type de pyranomètre, est un composant semi-conducteur qui convertit un rayonnement en signal électrique.

3.1 Mesures des différentes composantes du rayonnement solaire

Une station de référence pour la mesure du rayonnement solaire est généralement composée de trois appareils de mesure : un pour la mesure de chacune des composantes. Cela permet de s'assurer de la qualité des mesures étant donné que le rayonnement global peut être retrouvé à partir des autres composantes. Ainsi, si l'un des appareils de mesures fournis des données erronées, il est possible d'identifier lequel des appareils pose un problème. En outre, cela permet également de combler les données manquantes dans le cas d'une panne d'un appareil de mesure.

Le pyranomètre destiné à mesurer le rayonnement global est un pyranomètre avec une thermopile mesurant l'énergie solaire de toute l'hémisphère sur l'ensemble du spectre solaire. Il peut mesurer :

- Sur une surface horizontale : le rayonnement global horizontal (GHI)
- Sur un plan incliné : le rayonnement global incliné (GTI pour Global Tilted Irradiation)

Pour mesurer le rayonnement diffus, un pyranomètre à thermopile identique à celui consacré à la mesure du rayonnement global est utilisé. Cependant, celui-ci est monté sur un système motorisé qui traque la position du Soleil et fait déplacer un anneau d'ombre (ou boule d'ombre) entre la direction du soleil et la thermopile, laissant atteindre tout l'éclairement solaire de l'hémisphère à l'exception d'un angle solide autour du soleil. Ce type de dispositif nécessite un bon alignement de l'anneau d'ombre (ou de la boule) et donc d'une maintenance rigoureuse ainsi qu'une correction pour l'impact de l'anneau sur la part du diffus du reste de l'hémisphère. Ce système peut mesurer tout aussi bien l'éclairement diffus horizontal (DHI) comme incliné (DTI).

Le capteur employé pour mesurer le rayonnement direct est un capteur à thermopile spécial nommé pyréliomètre. Ce capteur est composé d'un tube de collimation permettant de capter uniquement les rayons provenant de la direction où il pointe (avec un demi-angle typiquement entre 2.5 et 5°). Il est monté sur un suiveur solaire automatique à 2 axes de haute précision permettant de suivre la position du soleil.

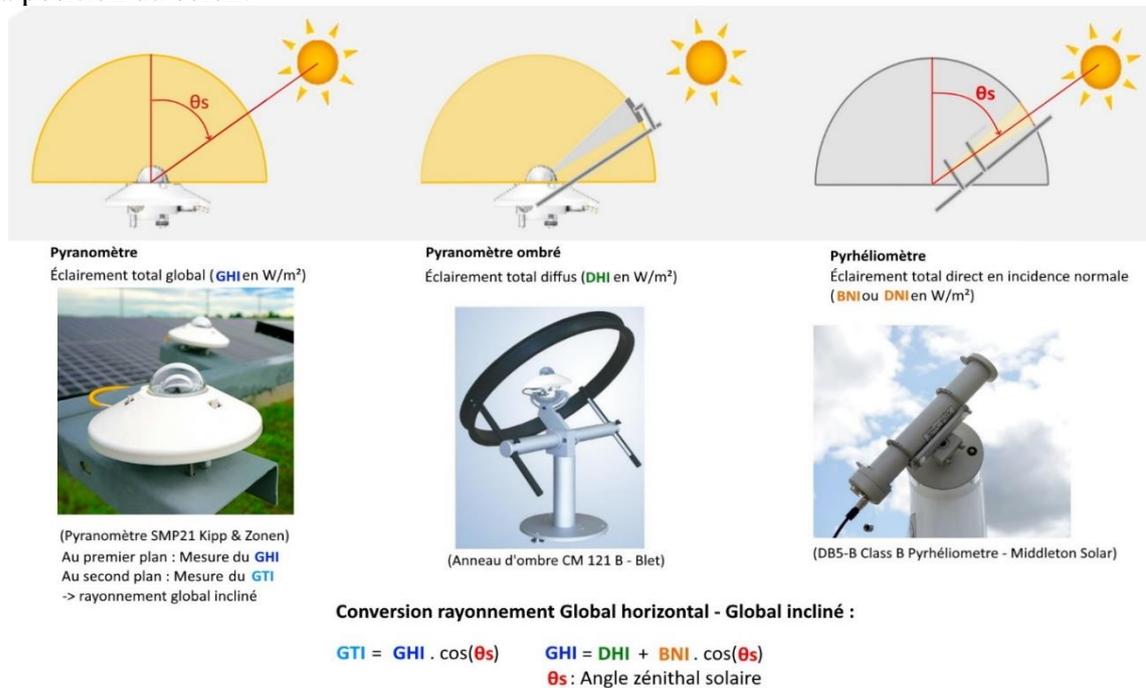


Figure 11 : Mesures des différentes composantes du rayonnement solaire

La figure 11 ci-dessus récapitule les différents appareils utilisés et les mesures réalisées dans une station de référence pour la mesure du rayonnement solaire.

Ce modèle d'installation de mesure du rayonnement solaire soumis à des niveaux de performance BSRN [16], offre une grande précision des mesures avec une résolution temporelle élevée (de 1 à 3 minutes). Le prix pour l'ensemble de ces équipements s'élève jusqu'à 100 000€ sans prendre en compte les coûts d'installation, de fonctionnement et de maintenance. En effet, la complexité technologique des appareils utilisés fait que ces stations sont très sensibles au désalignement angulaire avec la position du Soleil, aux effets d'encrassement et à l'humidité. Il est donc impératif de mettre en place une maintenance fréquente et complexe de haute qualité.

3.2 La station météo GreEn-Er de Grenoble INP ENSE3 et du G2ELab

La station météorologique GreEn-Er est une station Grenoble INP ENSE3 et G2ELab qui fournit des mesures pour la formation et la recherche. Dans le cadre de la mesure du rayonnement solaire, la configuration des appareils de mesures choisie est une alternative au système de mesure classique cité précédemment. Cette configuration est, certes moins performante, mais plus robuste. Elle nécessite également un investissement et des coûts de fonctionnement et de maintenance moindre. En effet, cette station s'affranchit de tout système de suivi du soleil comme pour le pyranomètre ombré et le pyréliomètre. Des mesures du rayonnement solaire sont réalisées depuis début 2017 avec une résolution temporelle d'une minute avec deux appareils de mesure. Depuis début mai 2021, un troisième capteur, le SPN1, a été installé en complément et permet l'intercomparaison des mesures.

Les données sont en heure UTC (heure locale d'été -2 ou heure locale d'hiver -1), ce qui évite le problème des passages heure d'été / heure d'hiver. Elles sont sauvegardées en permanence sur les serveurs du G2ELAB.

Les appareils de mesure employés sont :

- Un pyranomètre CMP3 à thermopile classique mesurant le rayonnement global sur le plan horizontal.

- Un pyranomètre à occultation RSR2 fournissant une valeur pour chacune des composantes solaires. Cet appareil utilise une photodiode en silicium et a besoin d'une calibration pour fournir des mesures cohérentes avec un capteur à thermopile. Toutes les minutes, une bande noire motorisée fait un tour complet autour de l'appareil, obstruant le soleil pendant un instant par la même occasion. Lorsque la bande est hors du "champ de vision" du pyranomètre, celui-ci mesure le rayonnement global. Lorsque que la bande masque le soleil et ombre totalement la photodiode, l'appareil mesure le rayonnement diffus. Finalement, le rayonnement direct est déduit de ces deux valeurs. Un schéma explicatif est donné ci-contre en figure 12.

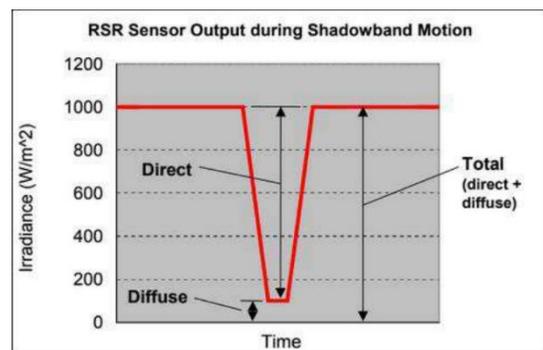


Figure 12 : Schéma du signal de sortie du RSR2 lors du passage de la bande d'ombre

Ce capteur propose un degré de précision sur ces mesures de l'ordre de 3% et il est destiné à être notre référence pour les mesures de rayonnement diffus.

- Le dernier capteur ajouté qui permet d'intercomparer les mesures est le pyranomètre SPN1. Ce capteur donne la mesure du global et du diffus, la composante directe en est déduite. Il ne possède aucune pièce mobile et demande une maintenance standard ce qui le rend particulièrement intéressant pour des stations météorologiques localisées dans des milieux sensibles à l'encrassement dû à la poussière et l'humidité, comme en Afrique où l'on trouve actuellement peu de stations de mesure. Le fonctionnement de ce capteur repose sur des hypothèses fortes qui engendrent un biais important. L'un des principaux objectifs de ce stage est de corriger ce biais et ainsi améliorer la précision des mesures du rayonnement diffus. De ce fait, le fonctionnement de ce capteur et les hypothèses employées seront détaillées dans la partie 4.

- En supplément, une caméra Axis capture des photos du ciel à la même résolution temporelle. Ces photos nous fournissent une vue d'ensemble à 360° du dôme céleste et ainsi nous apporte de l'information sur la couverture nuageuse et la répartition de l'intensité lumineuse du ciel. Il s'agit donc d'une source de renseignement de la distribution du rayonnement diffus. Par ailleurs, cette caméra est résistante à la poussière et offre une qualité d'image élevée même en cas de faible éclairage pendant la nuit.

La figure 13 ci-dessous recense les équipements de la station et leurs caractéristiques.

Image de l'appareil	Nom et fournisseur	Type de mesures	Degré de précision	Réponse spectrale	Prix sur le marché
 [17]	Pyranomètre CMP3 Kipp & Zonen	Global	$\pm 10\%$	300 nm - 2800 nm	~ 840 €
 [18]	Pyranomètre à occultation Irradiance	Global Diffus Direct (par calcul) <i>Rayon angulaire d'ouverture ~2.9°</i>	$\pm 2-3\%$ Pour le direct $> 200\text{W}/\text{m}^2$	400 nm - 1200 nm	~ 7 200 €
 [19]	Pyranomètre SPN1 Delta-T	Global Diffus Direct (par calcul) <i>Rayon angulaire d'ouverture >2.5°</i>	$\pm 8\%$ (biais estimé >5%)	400 nm - 2700 nm	~ 4 900 €
 [20]	Caméra réseau M3027-PVE AXIS	Images hémisphériques	/	Visible : 380 nm - 780 nm	~ 850 €

Figure 13 : Description des équipements de la station météo GreEn-Er de Grenoble

Par ailleurs, pour l'analyse des données ainsi que le développement des méthodes d'estimation, les mesures de rayonnement ainsi que les images de la caméra utilisées excluent les mesures où l'angle d'élévation du Soleil est inférieur à 18°. Cela permet d'éviter de prendre en compte l'influence des massifs environnants (Chartreuse, Vercors et Belledonne) ainsi que des éclairages nocturnes de la presque-île de Grenoble. D'autre part, l'intérêt des mesures du rayonnement solaire se porte principalement aux instants où le potentiel énergétique de l'éclairement solaire est le plus important.

3.3 Sources d'incertitudes et défauts de mesures

3.3.1 Sources d'incertitudes

Nous pouvons distinguer différentes sources d'incertitudes des pyranomètres à thermopile. Elles interviennent à différents stades de la mesure et sont les suivantes :

- La sensibilité des appareils : calibration et étalonnage, réponse cosinus, dépendance avec la température, vieillissement, etc...
- La mesure des signaux : bruit électronique (système d'acquisition), résolution de l'enregistreur de données,
- Offset thermique,
- Opérationnel : encrassement, erreurs d'installation (nivellement).

La figure 14 suivante recense les estimations des incertitudes affectant les mesures de la station BSRN de pointe à Payerne (Suisse).

Une correction peut être appliquée aux sources d'incertitude (ncor indique l'incertitude sans la correction et cor indique l'incertitude avec toutes les corrections appliquées). Comme la plupart des incertitudes sont proportionnelles aux signaux mesurés, les incertitudes sont données pour de petits signaux (50 W/m² : Small Signal) et pour de grands signaux (1000 W/m² pour le global et le direct et 500W/m² pour le diffus : Large Signal). L'incertitude élargie (expanded uncertainty) est une mesure de l'incertitude qui définit un intervalle autour duquel se situe la valeur d'une mesure avec certitude. Elle est obtenue en multipliant l'incertitude standard par un facteur k = 2.

	Correction	Quantity	Expanded (W m ⁻²)			Standard (W m ⁻²)	
			Small Signal ^c	Large Signal ^c		Small Signal ^c	Large Signal ^c
Global	ncor	GHI	11–15	18–23	2.3 %	5.7–7.5	9.0–11.6
	cor		10–14	14–17		5.0–7.0	7.2–8.7
Direct	ncor	DNI	5.8	16.3	1.6 %	3.0	8.3
	cor		5.8	12.8		2.9	6.5
Diffuse	ncor	DfHI	7.1–7.9	10–12	2.2 %	3.6–4.0	4.9–6.0
	cor		4.4–5.6	7.9–8.2		2.2–2.8	4.0–4.2

Figure 14 : Tableau des incertitudes combinées affectant les mesures de la station BSRN de Payerne [18]

3.3.2 Analyse des mesures

Pour comparer les mesures de différents pyranomètres, nous réalisons un scatterogramme. Cet affichage permet de tracer les valeurs des deux appareils pour chaque mesure et ainsi analyser les écarts. La figure 15 suivante donne les scatterogrammes pour des journées de ciel clair (sans nuage) entre le SPN1 et les deux autres appareils ; (a) avec le CMP3 et (b) avec le RSR2.

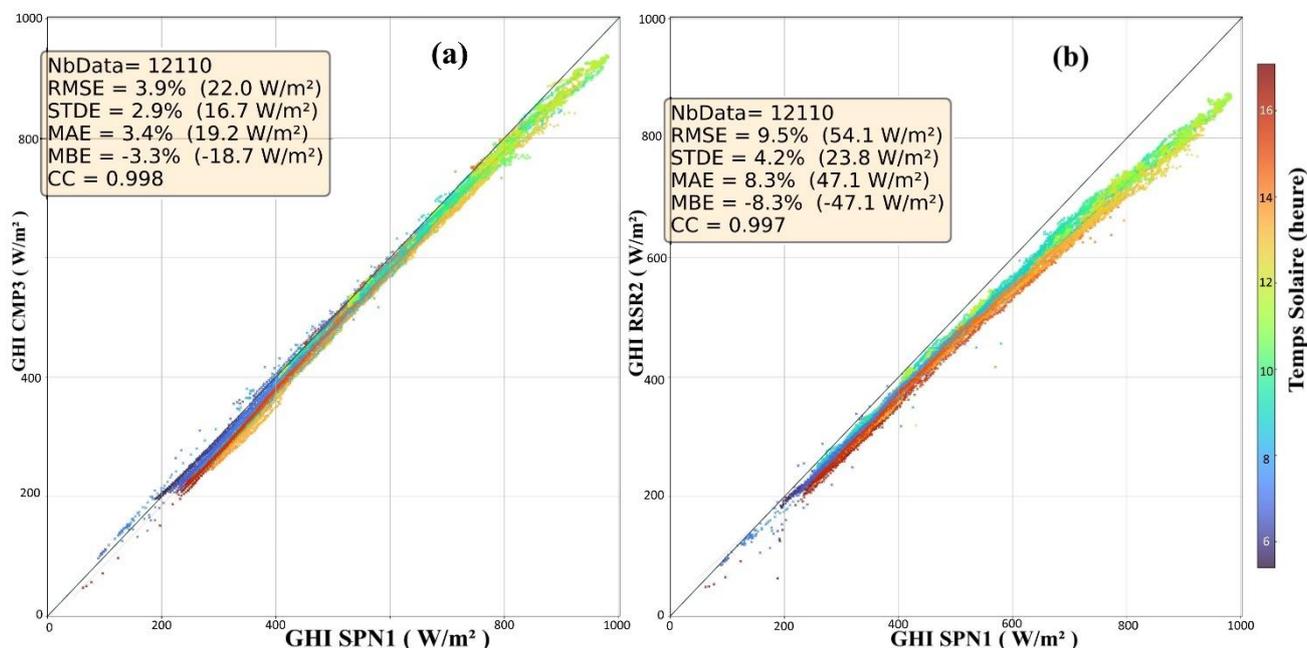


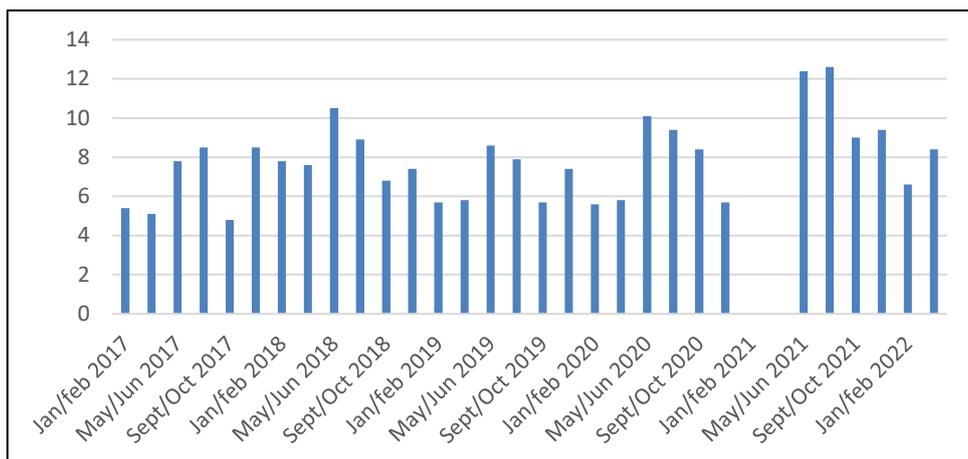
Figure 15 : Scatterogrammes du rayonnement global (W/m²) pour des journées de ciel clair
(a) SPN1|CMP3 **(b) SPN1|RSR2**

Le gradient de couleur utilisé code pour le temps solaire, qui correspond à l'angle horaire du soleil en un lieu et à un moment défini. Ainsi, le midi solaire est l'instant où le Soleil est au plus haut dans le ciel.

Nous pouvons premièrement observer sur ces figures que le CMP3 et le RSR2 sont déphasés par rapport au SPN1. En effet, il y a une différence notable entre les mesures matinales (bleu-vert) et les mesures de l'après-midi (jaune-rouge). Le CMP3 donne des valeurs inférieures à celles fournies par le SPN1 dans l'après-midi. Cela dénote de l'inclinaison d'un des deux capteurs par rapport à l'autre. Il est vraisemblable que le CMP3 soit légèrement incliné vers l'Est ce qui résulte en une surestimation en début de journée et une sous-estimation en fin de journée. Nous pouvons observer ce même phénomène avec le capteur RSR2.

Néanmoins, nous pouvons noter que le CMP3 et le SPN1 sont plutôt bien calibrés entre eux : la racine de la moyenne de l'erreur au carré (RSME) est de 3.9%. À contrario, le RSR2 fournit des valeurs bien inférieures aux valeurs attendues : RMSE de 9.5%.

Le graphique à la page suivante (Figure 16) recense les valeurs de RMSE entre le rayonnement global du CMP3 et celui du RSR2, calculées tous les deux mois sur l'ensemble des données recueillies depuis janvier 2017.



**Figure 16 : Racine de la moyenne de l'erreur au carré (RMSE)
Global CMP3 – Global RSR2 (unite en W/m²)**

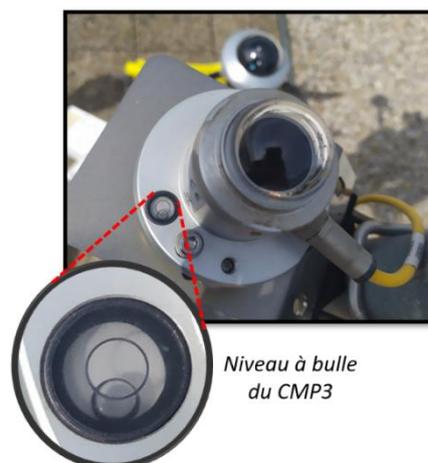
Nous pouvons observer deux résultats à partir de cette figure :

- L'évolution saisonnière de l'erreur qui résulte de l'inclinaison d'un ou des deux capteurs.
- Une tendance croissante de l'erreur qui indique une dérive de calibration du RSR2.

Les mesures du RSR2 étant faussées, cela pose un gros problème pour l'évaluation de nos méthodes d'estimation du rayonnement diffus.

Une maintenance a été réalisée le 3 mai 2022 pour laquelle je me suis rendu à la station météorologique avec l'ingénieur de la station. L'objectif de cette maintenance était de constater l'inclinaison des capteurs et de les remettre à niveau. La figure 17 ci-contre, montre une photo du capteur CMP3 et de son niveau à bulle avant le réglage.

Nous avons ainsi confirmé l'inclinaison du CMP3 et du RSR2. Le SPN1 était correctement installé.



Niveau à bulle
du CMP3

**Figure 17 : Photo du capteur
CMP3 avec réglage du niveau**

4 Le pyranomètre SPN1 et son fonctionnement

Le SPN1 (Wood,1999 [21]) est un pyranomètre sans partie mobile qui mesure l'irradiance totale et diffuse sur une large bande de longueur d'onde. Le fabricant spécifie une précision globale pour le GHI et le DHI de $\pm 8\%$ pour les mesures ponctuelles à la minute, ce qui est proche de la classification « Good Quality Pyranometer » de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) [22].

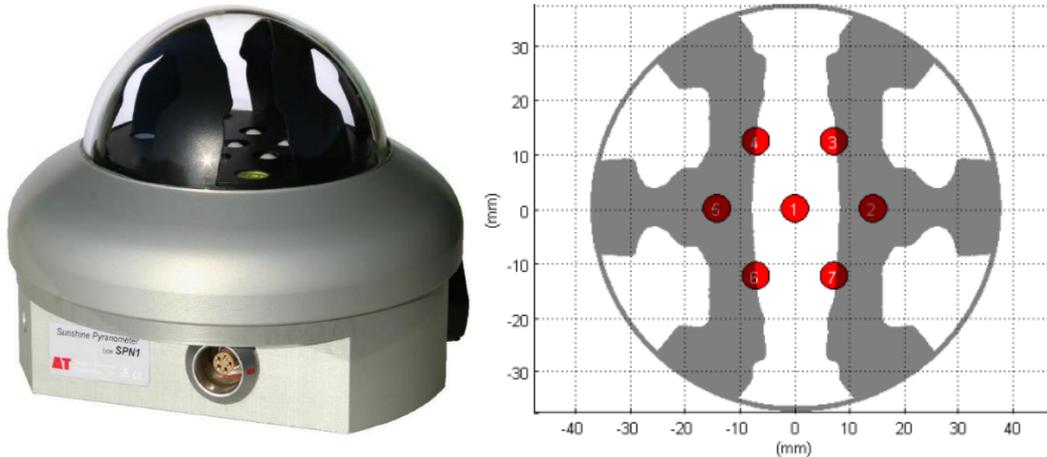


Figure 18 et 19 : Photo du SPN1 [19] à gauche ; Vue du dessus du masque d'ombre et des 7 thermopiles de l'appareil [23] à droite

Le SPN1 est composé de sept thermopiles (6 thermopiles placées sur une grille hexagonale et un septième capteur au centre) sous un masque d'ombrage statique complexe permettant d'avoir une configuration spécifique (cf figures 18 et 19). La configuration du masque est telle que, à tout instant et à tout emplacement :

- Au moins une thermopile est totalement ensoleillée.
- Au moins une thermopile est totalement ombragée.
- L'angle solide du masque est égal à π et donc celui-ci masque la moitié de l'hémisphère vers laquelle le SPN1 est orienté.

Le traitement solaire pour déterminer les valeurs d'irradiances horizontales globales, directes et diffuses (notées G_g , G_b et G_d) à partir des 7 valeurs de thermopiles (notés G_k pour $k \in [1 : 7]$) est le suivant :

Soit G_{max} et G_{min} , respectivement les valeurs maximales et minimales des 7 valeurs de thermopiles d'une mesure. En considérant les spécificités du masque d'ombrage, G_{max} est la somme du rayonnement direct horizontal et une fraction η_{max} de la composante diffuse (thermopile totalement ensoleillée). Et G_{min} est une autre fraction η_{min} de la composante diffuse (thermopile totalement ombragée).

$$G_{max} = G_b + \eta_{max} \cdot G_d \quad (1) \quad \text{et} \quad G_{min} = \eta_{min} \cdot G_d \quad (2)$$

Le constructeur fait l'hypothèse que le rayonnement diffus est isotrope, ainsi le coefficient d'anisotropie $\eta = \eta_{max} = \eta_{min} = 1/2$. Cela revient à dire que le masque d'ombrage bloque exactement la moitié du rayonnement diffus total.

Les différentes composantes de l'éclairement peuvent être alors simplement calculées :

$$G_d = 2 \cdot G_{min} \quad (3)$$

$$G_b = G_{max} - G_{min} \quad (4)$$

$$G_g = G_{max} + G_{min} \quad (5)$$

D'autres éléments de calibration sont ensuite appliqués (cf **Annexe 1** pour plus de détails).

Malheureusement, l'hypothèse d'éclairement diffus isotrope est trop forte et elle ignore deux problèmes mentionnés dans la partie 2.3 de ce rapport :

- Le rayonnement diffus n'est pas isotrope et sa répartition n'est pas uniforme en tout point de l'hémisphère.
- La composante directe n'est pas un pic resserré en un point et la région circumsolaire doit également être considérée.

Cela a pour conséquence d'induire un biais non négligeable de l'ordre de 7 à 8% sur les mesures de rayonnement diffus et direct en comparaison à des mesures basées sur des méthodes utilisant des instruments traquant avec précision la position du Soleil (pyrhéliomètres) [24].

5 Modèle de référence machine learning pour la correction des biais

5.1 Analyse et discussion

Comme exposé précédemment, le pyranomètre SPN1 possède un biais important sur ses mesures de rayonnement diffus. Dans l'estimation théorique, nous tentons de corriger ce biais en recalculant les coefficients d'anisotropie utilisés dans l'algorithme de calcul des composantes solaires du SPN1. Nous nous intéressons ici à améliorer les mesures de rayonnement diffus du SPN1 via une méthode de machine learning.

Nous souhaitons évaluer s'il est possible d'améliorer ces mesures en utilisant uniquement les valeurs brutes des 7 thermopiles qui composent le SPN1. L'objectif est de réaliser des prédictions du diffus via une analyse statistique sur les données. La mesure du rayonnement solaire est sujet à de nombreuses variabilités qu'il n'est pas possible d'approximer via un modèle simple comme une régression linéaire.

Nous avons à notre disposition comme caractéristiques d'entrée les valeurs des thermopiles et les angles solaires (azimut et élévation). À noter que les capteurs à thermopiles du SPN1 mesurant la valeur maximale et la valeur minimale seront différents à différent instant en fonction de la position du Soleil dans le ciel. Il est donc judicieux de trier préalablement ces valeurs. La figure 20 suivante montre les résultats de l'analyse en composantes principales, réalisée sur le jeu de données avec les valeurs des thermopiles sans trier les valeurs et triées dans l'ordre croissant.

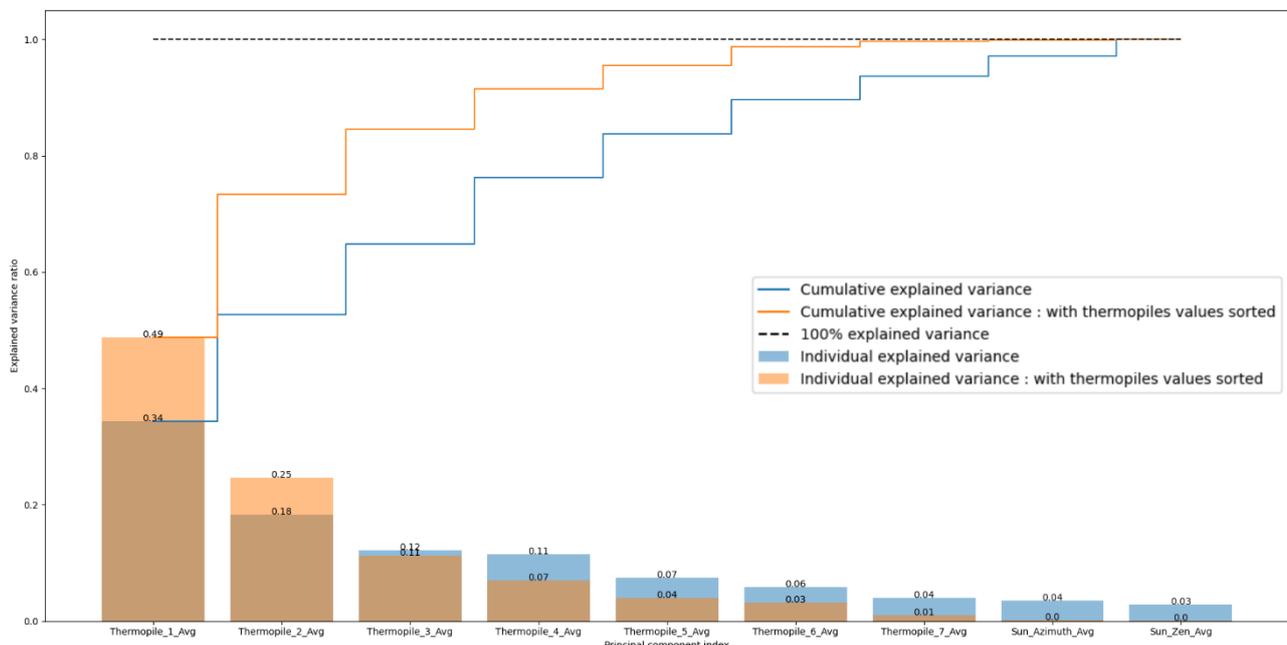


Figure 20 : Tracé du taux de variance expliquée attribuable à chaque caractéristique d'entrée et du cumul de cette variance expliqué pour le jeu de donnée trié (orange) et non-trié (bleu)

Nous remarquons que trier les valeurs des thermopiles permet de réduire la dimension du jeu de données de 9 à 7 si nous souhaitons conserver 100% de la variance et donc maximiser la quantité d'information. Nous utiliserons donc les valeurs des thermopiles triées comme caractéristiques d'entrée de notre modèle.

Par ailleurs, étant donné que le jeu de données est une série temporelle qui présente de fortes corrélations saisonnières, journalières et également hebdomadaires dans une moindre mesure, il est nécessaire d'entraîner notre modèle et de le tester sur des données disjointes. Ainsi, nous scindons le jeu de données pour l'entraînement du modèle et pour la phase de test sur une année complète (du 01/06/2021 au 01/06/2022) comme tel :

- Les trois premières semaines de chaque mois, représentant 70% de la base de données, sont pour l'entraînement (21 premiers jours).
- Le test se fera sur les jours restants de chaque mois (30% des données).

5.2 Modèle de référence sélectionné – Random Forest

Qu'est-ce que l'algorithme Random Forest (RF – forêt aléatoire) ?

Le Random Forest (forêt aléatoire) est un algorithme d'apprentissage supervisé basé sur la méthode d'apprentissage ensembliste et les arbres de décision.

L'apprentissage ensembliste combine plusieurs algorithmes d'apprentissage pour obtenir de meilleures prédictions. Dans le cas d'un Random Forest, la méthode d'apprentissage utilisée est le *bootstrap aggregating* ou *bagging*. Cette technique consiste à générer de nouveaux sous-ensembles d'entraînement à partir de la base d'entraînement initiale par échantillonnage uniforme et avec remise. De la sorte, certaines observations peuvent être répétées dans chaque sous-ensemble. Ensuite, chaque sous-ensemble permet d'entraîner différents modèles. Finalement, la prédiction finale est obtenue en faisant la moyenne de la sortie de tous ces modèles.

Un arbre de décision est une représentation graphique de toutes les solutions possibles basées sur certaines conditions, où chaque nœud interne décrit un test sur une variable d'apprentissage, chaque branche représente un résultat du test, et chaque feuille contient la valeur de la variable cible. Lorsque la variable cible peut prendre des valeurs continues comme dans notre cas (une valeur d'irradiance diffuse), ces modèles sont appelés arbres de régression. Si la variable cible prend comme valeur une étiquette de classe, il s'agit alors d'arbres de classification.

Ainsi, cette technique permet de réduire la variance et d'éviter le surapprentissage. Bien qu'elle soit principalement appliquée aux méthodes d'arbres de décision, elle peut être utilisée avec n'importe quel type de méthode d'apprentissage.

Le nom Random Forest vient de l'idée de randomisation des données par la méthode de bagging (*Random*) et de la construction de plusieurs arbres de décision (*Forest*).

Quels sont ses avantages et inconvénients ?

Le Random Forest permet de limiter le plus gros désavantage des arbres de décisions : le surapprentissage (*over-fitting*). Premièrement, il utilise un sous-ensemble unique des données initiales pour chaque modèle de base, ce qui contribue à rendre les arbres de décision moins corrélés. Deuxièmement, il divise chaque nœud de chaque arbre de décision en utilisant un ensemble aléatoire des caractéristiques d'entrées. Une telle approche signifie qu'aucun arbre unique ne voit toutes les données. Ainsi ces modèles se concentrent sur les patrons généraux dans les données d'apprentissage réduisant la sensibilité au bruit.

Cependant, un Random Forest n'est pas en mesure d'extrapoler à partir de la base de données. Ainsi, les prédictions seront toujours dans la plage de l'ensemble d'apprentissage. Il est donc nécessaire d'avoir une base de données la plus complète possible. Le modèle développé ne pourra fournir des prédictions que pour la localisation considérée et un nouvel apprentissage accompagné d'un nouveau dataset sera nécessaire pour faire des prédictions sur une nouvelle station.

De plus, le Random Forest est peu interprétable par rapport à un arbre de décision. Par ailleurs, un modèle RF pré-entraîné peut nécessiter une mémoire importante car il conserve les informations de plusieurs centaines d'arbres individuels.

Ce modèle a été sélectionné car il propose de bien meilleures performances par rapport à un modèle de régression linéaire, tout en étant facilement implémentable et rapide d'exécution. Cependant, un algorithme de Gradient boosting (autre méthode d'apprentissage ensembliste) aura tendance à offrir de meilleures prédictions.

La figure 21 ci-dessous montre les résultats des prédictions sous la forme d'un scatterogramme. L'erreur absolue moyenne mesurée est de 8.46 W/m² et la RMSE est de 12.3 W/m².

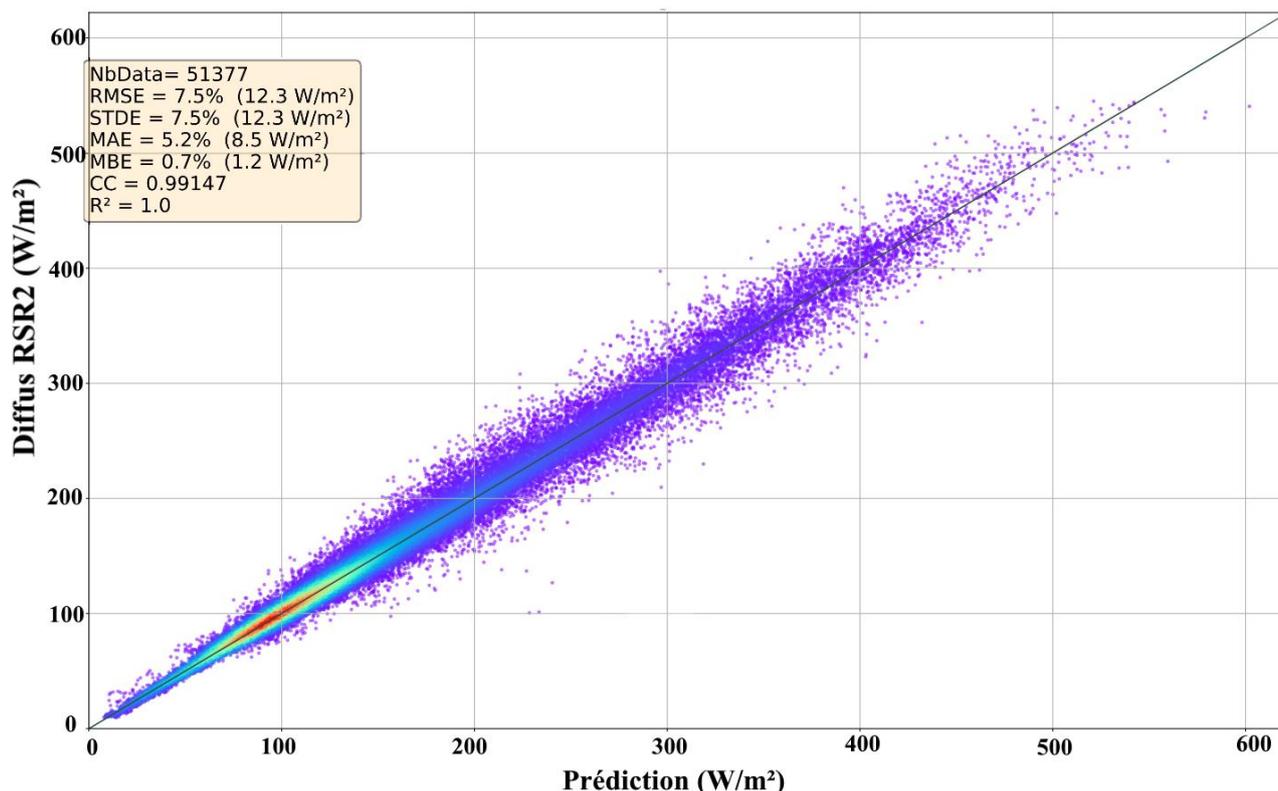


Figure 21 : Scatterogramme entre les valeurs cibles de test (Diffus RSR2) et les prédictions du modèle

Le gradient de couleur utilisé code pour la densité de points.

Les hyperparamètres du modèle ont été optimisés via la fonction de *Tuning* de la bibliothèque Sklearn : *RandomizedSearchCV*. Le modèle est constitué de 850 arbres (*n_estimators*) composés d'un maximum du 95 nœuds (*max_depths*).

Cette méthode qui a été développée pourrait fonctionner, cependant, étant donné que notre référence de diffus est erronée, nous ne pouvons pas correctement la tester. De plus, nous ne pouvons pas conclure quant à la généralisation de cette méthode pour d'autres géolocalisations. Cette méthode devra être testée avec un nouveau jeu de données pour une nouvelle position. En effet, les valeurs brutes des sept lectures du SPN1 proposeront un comportement différent en fonction de la composition de l'atmosphère en aérosols et particules, de la proximité du Soleil etc...

À contrario, la méthode théorique présentée dans la suite est plus généralisable du fait de l'utilisation d'images du ciel. Celles-ci apportent de l'information supplémentaire sur l'environnement considéré.

6 Estimation théorique via l'utilisation d'images du ciel

6.1 Calibration de la caméra et transformation des images

6.1.1 Déformation d'une caméra hémisphérique fish-eye

Nous souhaitons déterminer les distorsions de la lentille de la caméra (paramètres intrinsèques) ainsi que la position angulaire (paramètres extrinsèques) de celle-ci de façon à reformer (projeter) une image en azimut/élévation.

Nous cherchons à modéliser le processus de formation des images. Le but est de trouver la relation entre les coordonnées spatiales d'un point de l'espace (X, Y, Z) avec le point associé dans l'image.

Par leur symétrie sphérique, les lentilles de caméra provoquent une distorsion : une déformation de l'image réelle. Ceci est particulièrement vrai pour les caméras utilisant un objectif fish-eye comme dans notre cas. Cet objectif est un système de lentilles capable d'élargir le champ de vue d'une caméra jusqu'à 190° (cf figure 22) et qui courbe fortement toutes les lignes droites ne passant pas par le centre.

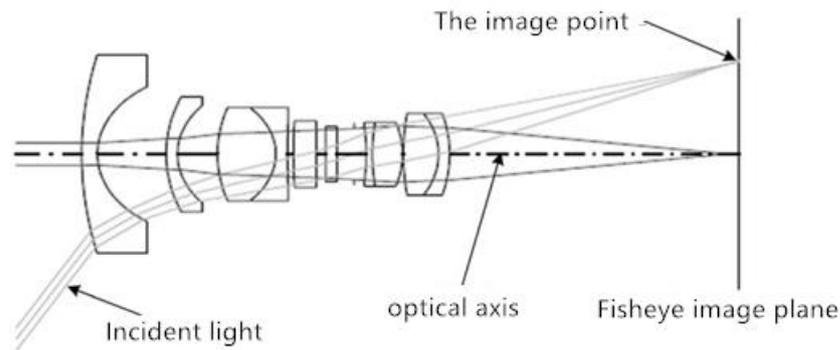


Figure 22 : Modèle de lentille fish-eye [25]

Il existe plusieurs modèles décrivant le processus de formation des images par une caméra.

Je me suis confronté à deux de ces modèles durant ce stage :

- Le modèle du sténopé (*pin-hole*) qui est le plus couramment utilisé. La librairie python OpenCV propose des fonctions permettant de calibrer une caméra et utilise ce modèle [26]. Cette librairie soumet d'autres fonctions utiles au traitement d'images d'une caméra calibrée.
- Le modèle de caméra omnidirectionnelle utilisé par la toolbox OCamCalib de MatLab par Davide Scaramuzza [27]–[29] et sa traduction python par Thomas Pönitz [30]

Dans les deux cas, l'objectif de la calibration est de déterminer les paramètres intrinsèques de la caméra et les paramètres extrinsèques. Ces paramètres nous seront utiles pour transformer correctement nos images.

6.1.2 Processus de calibration

Le processus de calibration nécessite de définir une série de coordonnées de points 3D en utilisant un motif d'un échiquier de taille connue. Ce type de motif a l'avantage d'avoir des points facilement détectables. Via une détection de coins automatique sur plusieurs images, nous pourrons lier les coordonnées 3D (X, Y, Z) à leurs coordonnées en pixel sur l'image (u, v) ce qui nous permettra ensuite de définir les paramètres de la caméra (cf figure 23 ci-dessous).



Figure 23 : Exemple de détection automatique de coins d'un échiquier

Je me suis donc rendu à la station pour réaliser une quinzaine d'acquisition avec le motif d'échiquier. Un problème rencontré fut qu'il était difficile d'avoir un retour instantané des images. Et pour avoir une calibration de la meilleure qualité possible, il est nécessaire d'exposer le motif le plus proche possible de l'objectif tout en couvrant au maximum le champ de vue entier de la caméra. Après avoir constaté que la première série d'acquisition ne suffisait pas, je me suis rendu une nouvelle fois à la station pour compléter mes images cibles.

Les modèles de caméra utilisés pour la calibration ainsi que le type de résultats obtenables pour ces modèles sont donnés en annexe :

Annexe 2 : Modèle du sténopé - OpenCV

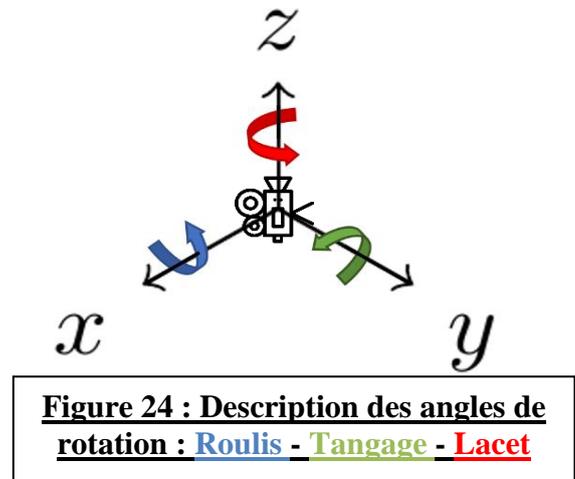
Annexe 3 : Modèle Caméra Omnidirectionnelle - MatLab

6.1.3 Estimation de la position angulaire de la caméra

Pour réaliser une projection panoramique précise de l'hémisphère, il est nécessaire de déterminer l'inclinaison de la caméra par rapport au plan horizontal et ensuite de la prendre en compte dans la transformation de l'image.

La figure 24 ci-contre représente les trois angles de rotation que nous cherchons à déterminer.

Pour estimer ces angles, nous avons besoin de points de référence sur les images dont nous connaissons les positions exactes dans l'espace. Grâce à la calibration, nous pouvons simuler la formation d'une image et donc la position sur l'image d'un point dans l'espace.



Contrairement au Soleil, la position sur l'image de la Lune peut être précisément détectée (pas ou peu d'halo). Ainsi, à partir de séries temporelles de trajectoires de la Lune [31], nous pouvons comparer les projections de ces trajectoires sur le plan de l'image avec les positions détectées sur les images correspondant aux mêmes séries temporelles. Les trajectoires de la Lune sont renseignées avec les angles d'azimut et d'élévation. Les coordonnées des points sont converties en coordonnées sphériques puis projetées sur le plan de l'image.

L'angle de lacet est premièrement estimé à 135°, il correspond à l'orientation de la caméra par rapport au Nord. Les angles sont ensuite estimés en minimisant l'erreur géométrique entre les deux séries de trajectoires (réelle-projetée et détectée sur l'image). Différents algorithmes proposés par les fonctions de la librairie Scipy (python) ont été testés, donnant des résultats équivalents. L'erreur minimale a été obtenue avec la méthode du gradient conjugué (CG) pour les angles suivants :

$$\text{Roulis ; Tangage ; Lacet} = [\alpha, \beta, \gamma] = [-2,48^\circ ; -0,67^\circ ; 134,76^\circ]$$

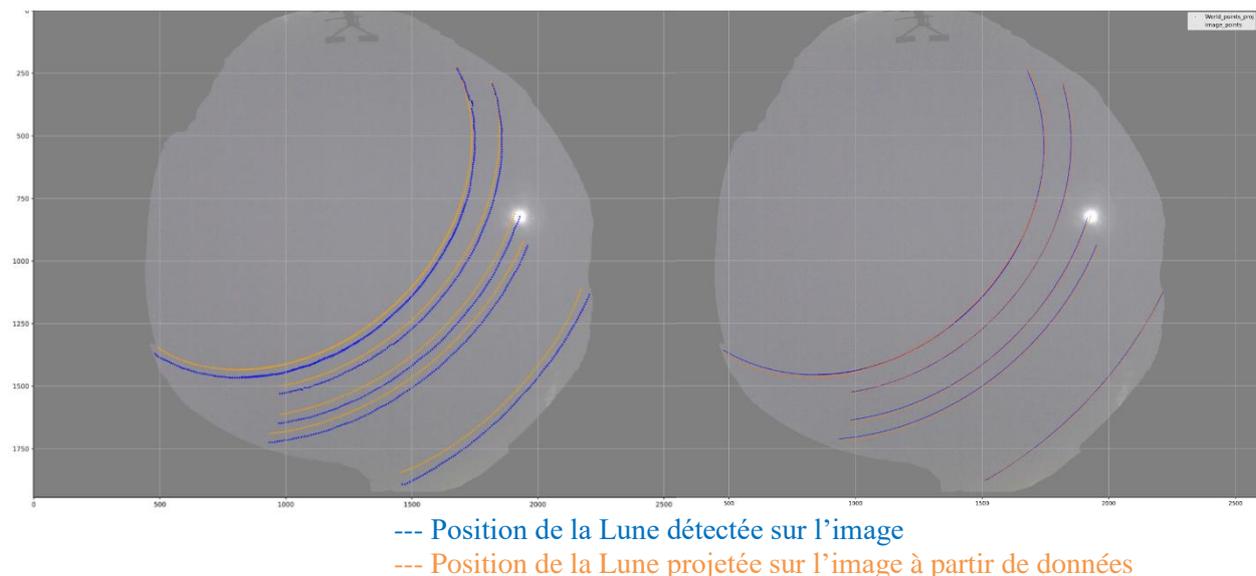


Figure 25 : Tracés de la trajectoire de la Lune durant 5 nuits au cours de l'année 2021-2022

À gauche : Avant détermination du *roulis* et du *tangage* (Erreur géométrique moyenne ≈ 30 px)

À droite : Nouvelle projection après optimisation des angles d'inclinaison de la caméra (Erreur géométrique moyenne ≈ 8.8 px)

6.1.4 Inclinaison de l'image

Plusieurs approches pour prendre en compte l'inclinaison de la caméra ont été évaluées. Une projection en perspective de l'image sur un plan ayant subi les angles d'inclinaison peut être réalisée. Cependant, cette méthode était trop dépendante de la qualité de la calibration et peu flexible. Nous avons donc opté pour la solution suivante : appliquer les rotations lors de l'étape de transformation en image panoramique. En effet, cette étape inclue la création d'une grille de points 3D qui sera ensuite projetée sur le plan de l'image. Appliquer les rotations à ce nuage de points permet de prendre en compte l'inclinaison de la caméra.

Les rotations que nous souhaitons appliquer autour de chaque axe (X, Y, Z) correspondent à des transformations linéaires qui peuvent être écrites sous la forme de matrices de rotations 3x3. La matrice de rotation générale s'obtient par multiplication matricielle de ces 3 matrices comme présenté ci-dessous :

$$R = R_z(\gamma) R_y(\beta) R_x(\alpha) = \begin{matrix} \text{Lacet} & & \text{Tangage} & & \text{Roulis} \\ \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \end{matrix}$$

De même, la rotation du nuage de points 3D se fait par une multiplication de la matrice de rotation avec chaque point. Les figures 26 et 27 ci-dessous montrent la grille de points avec et sans les rotations.

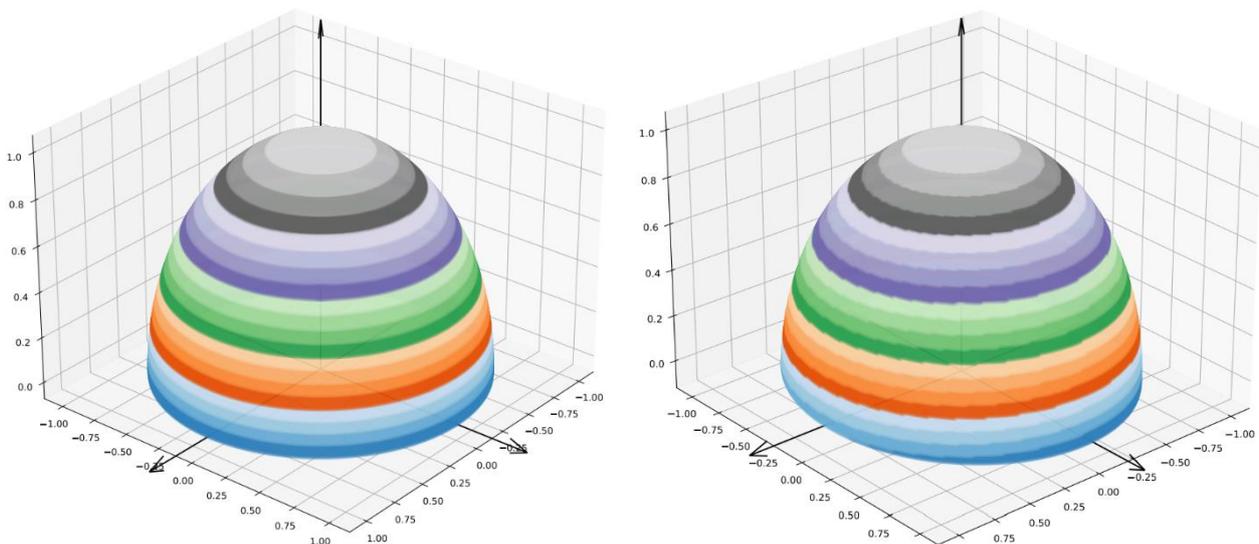


Figure 26 et 27 : À gauche : Grille de coordonnées cartésiennes converties en coordonnées sphériques (rayon=1 assumé) ; À droite : Même grille de points à laquelle la matrice de rotation de la caméra a été appliquée
 Carte de couleur séquentielle codant pour l'élévation pour visualiser l'inclinaison

6.1.5 Transformation en image panoramique

La transformation en image panoramique consiste à créer une grille de coordonnées 2D (codant pour l'azimut allant de 0 à 360° et l'élévation allant de 0 à 90°) régulièrement espacées de taille correspondant à la résolution de l'image finale voulue. Il faut ensuite convertir la grille de points cartésiens en coordonnées sphériques (cf Figure 28) et subséquentment calculer les coordonnées sur l'image de ces points 3D en prenant en compte les distorsions (décrites par les paramètres intrinsèques) (cf **Annexe 4**).

Finalement, nous pouvons réaliser une interpolation entre cette projection des points dans le plan de l'image et les pixels de l'image pour chacun des canaux R, G, B (rouge, vert, bleu) de l'image. Un exemple du résultat final obtenu est donné en figure 30.

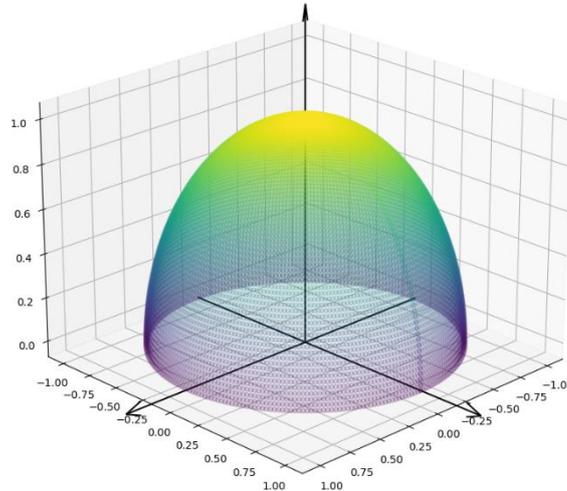


Figure 28 : Grille de coordonnées cartésiennes convertie en coordonnées sphériques

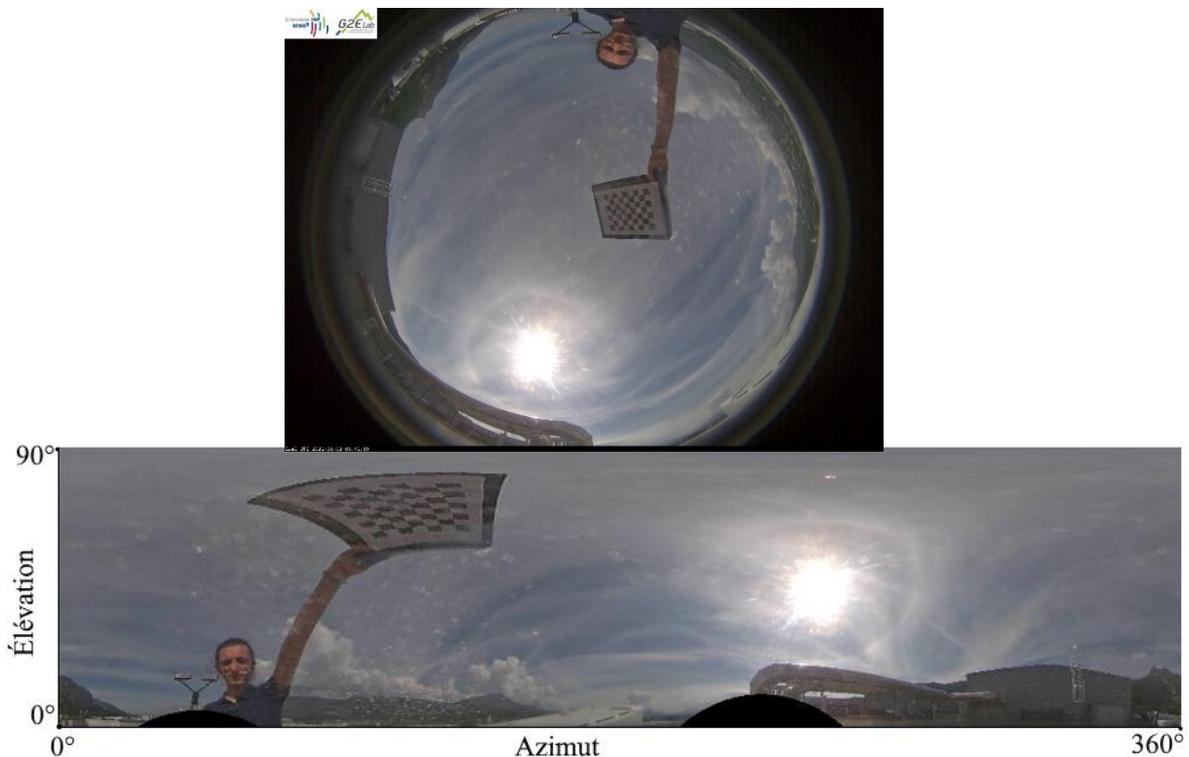


Figure 29 et 30 : Image de base (en haut) et image en affichage Azimut/Elévation (en bas)

Pour évaluer la qualité des images finales obtenues, nous pouvons à nouveau comparer les trajectoires de la Lune que nous détectons sur les images avec des séries temporelles des trajectoires de la Lune (cf figure 31 ci-dessous).

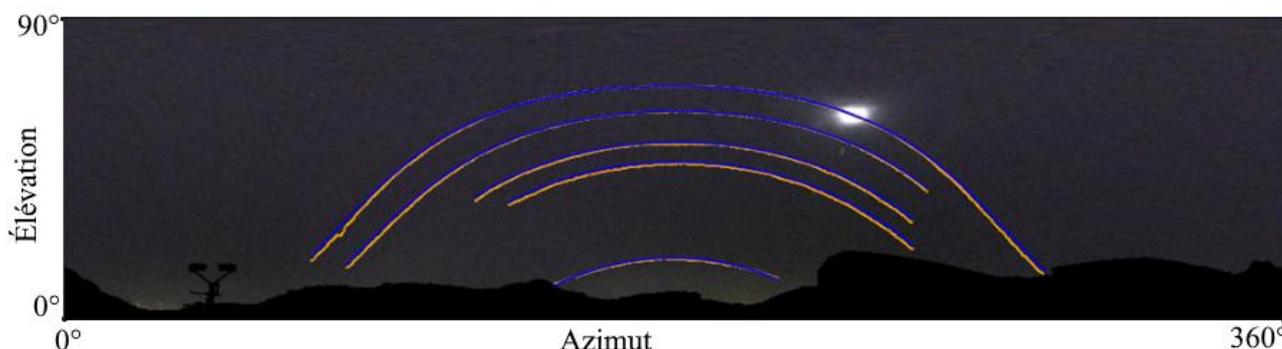


Figure 31 : Tracés des trajectoires de la Lune durant 5 nuits sur une image transformée

--- : Trajectoires détectées

--- : Trajectoires issues des séries temporelles

L'erreur géométrique moyenne calculée est d'environ 2.8 pixels

Nous remarquons sur cette figure que les trajectoires pour des angles d'élévation supérieurs à 45° sont presque superposées. Les écarts observables correspondent à des décalages en élévation. Ainsi, sachant que la résolution des images finales est 1024 par 256 pixels, l'erreur géométrique correspond à un décalage en moyenne d'environ 1° . Nous pouvons en conclure que les résultats obtenus actuellement sont satisfaisants.

Pour affiner encore plus cette transformation, une nouvelle calibration avec un polynôme décrivant les distorsions de degré plus élevé pourrait aider. Cela nécessitera de nouvelles acquisitions du motif d'échiquier avec la caméra en faisant bien attention à couvrir les bords de l'image, ce qui n'a pas été évident pour moi.

6.2 L'estimation théorique

6.2.1 La méthode

L'objectif de cette méthode théorique est de faire une estimation du coefficient d'anisotropie pour chaque mesure des thermopiles et donc de réévaluer le ratio du rayonnement diffus "vu" par les thermopiles par rapport au rayonnement diffus total. Les différentes composantes pourront être recalculées à partir des équations (1) et (2).

Les images de la caméra nous donnent une partition hémisphérique dynamique de l'éclairement du ciel. Les valeurs des pixels de l'image ne nous renseignent pas sur la valeur d'éclairement en ce point, dû au fait que la gamme spectrale de la caméra est du domaine du visible uniquement. Cependant, les valeurs de luminance des pixels de l'image nous confèrent une indication sur l'intensité relative de l'irradiance diffuse sur toute l'hémisphère et à tout instant. Cette méthode possède également l'avantage d'être généralisable à toute géolocalisation grâce à l'information sur l'environnement et les conditions atmosphériques du milieu considéré qu'apporte les images.

En projetant le motif d'ombrage du masque vu par les 7 capteurs sur l'image (ces motifs sont donnés en Figure 32 à la page suivante) nous pouvons retrouver le ratio de diffus intercepté par chaque capteur.

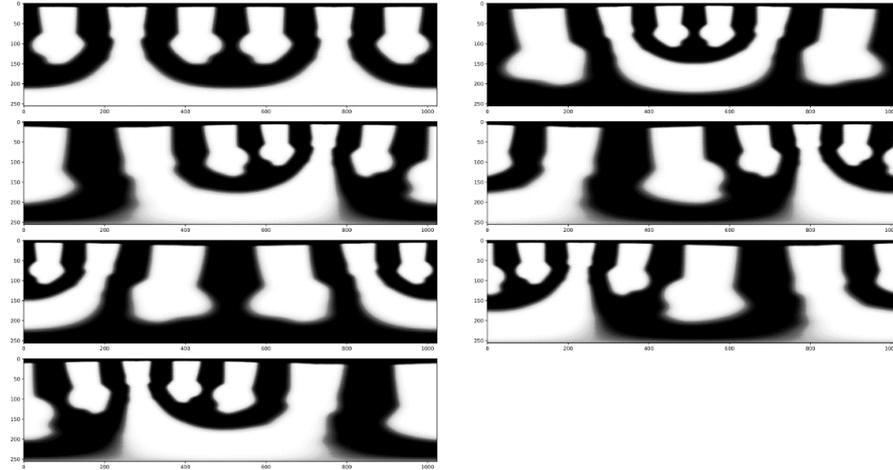


Figure 32 : Ciel (en affichage panoramique : azimut [0 à 360°] élévation [0 à 90°]) vu sous les motifs d'ombrage vus par les 7 capteurs.

Les calculs d'intégrales de luminosité G_k peuvent être exprimés comme une combinaison linéaire de la luminosité de tous les pixels de l'image.

$$G_k = \iint_{\text{hemisphere}} \text{Lum}(\psi, \gamma) \cdot M_k(\psi, \gamma) \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\gamma) \cdot d\gamma \cdot d\psi \quad (6)$$

Avec :

- Ψ l'angle d'azimut et γ l'angle d'élévation.
- $\text{Lum}(\psi, \gamma)$ la valeur de luminosité relative de l'image au point d'azimut/élévation (ψ, γ) . Elle correspond à la moyenne des valeurs des 3 canaux de couleur.
- M_k le masque d'ombrage associé au capteur k et projeté dans le même affichage panoramique que l'image. Il correspond à une matrice de même dimension que l'image.

De même, nous calculons l'irradiance totale (non-masquée) :

$$G_{tot} = \iint_{\text{hemisphere}} \text{Lum}(\psi, \gamma) \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\gamma) \cdot d\gamma \cdot d\psi \quad (7)$$

Nous pouvons alors calculer les coefficients d'anisotropie comme tels :

$$\eta_k = \frac{G_k}{G_{tot}} = \frac{\text{Éclairement Diffus masqué par le motif } k}{\text{Éclairement Diffus total}}$$

Remarque :

Pour projeter correctement les motifs du masque d'ombrage sur l'image, une étude préalable a été menée dans le but d'associer les motifs du masque à leur valeur de mesure donnée par le SPN1. De plus, il a fallu déterminer la position angulaire du SPN1 par rapport au Nord (azimut = 0°) et ensuite appliquer une translation aux motifs de façon à respecter ce décalage angulaire. La méthode qui a été employée fut de calculer les G_k pour toutes les valeurs d'azimut. Le décalage angulaire sélectionné est celui qui satisfaisait au mieux la correspondance entre les valeurs maximales et minimales des thermopiles et des calculs d'irradiance G_k .

6.2.2 Résultats

La méthode a été appliquée sur l'ensemble des mesures du SPN1 sur une année complète en sous-échantillonnant à un pas de 1/8 pour des raisons de temps de calculs.

En figure 33, un scatterogramme présente la comparaison entre les mesures de rayonnement diffus du SPN1 et les valeurs déterminées via cette méthode théorique utilisant un nouveau ratio d'anisotropie.

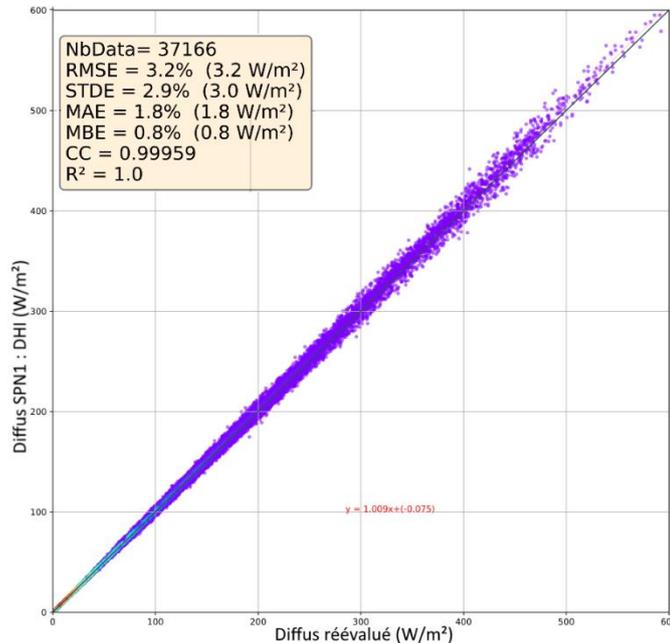


Figure 33 : Scatterogramme entre les mesures de diffus du SPN1 et le diffus réestimé via la méthode théorique
Le gradient de couleur utilisé code pour la densité de points

Les résultats obtenus sont cohérents car cette méthode semble pouvoir rehausser les valeurs de diffus. Cependant, la correction appliquée exerce un biais entre les mesures que de l'ordre de 0.8%. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que cette méthode ne semble pas être capable de corriger totalement les biais de mesures présent sur le SPN1 (qui sont de l'ordre de 7 à 8%). Il sera également nécessaire de réitérer cette méthode avec de nouvelles mesures pour les comparer avec des valeurs de référence fiables.

7 Compétences acquises

7.1 Compétence transversale

La compétence que j'ai choisi de développer ici est la capacité à prendre des responsabilités, des initiatives et opérer des choix. Cette compétence est à mon sens particulièrement importante et a été un point déterminant qui m'a fait choisir l'IGE et ce projet comme stage de fin d'étude. En effet, ce projet de recherche et l'environnement de travail à l'IGE m'ont offert une grande liberté d'action et d'organisation personnelle. Peu de contraintes m'étaient imposées ce qui a contribué à mon épanouissement personnel au travers des différentes notions et des aptitudes professionnelles abordées durant ce stage. La liberté d'exploration que j'ai expérimentée m'a permis d'être dans les meilleures conditions pour assimiler et approfondir les compétences de traitement d'image et de vision par ordinateur qui me passionne. De surcroît, mon initiative personnelle a été sollicitée pour faire avancer ce projet ouvert vers d'éventuelles innovations et améliorations.

J'ai notamment pu mettre en application cette capacité au travers de l'étape de calibration de la caméra et de la transformation des images. J'ai eu l'opportunité de prendre plusieurs fois l'initiative de contacter l'ingénieur s'occupant de la station météorologique du G2lab et de Grenoble INP ENSE3 pour réaliser des maintenances des équipements de mesure ainsi que des séries d'acquisition avec la caméra et une mire. En outre, du fait de mon autonomie sur l'élaboration de la transformation des images, j'ai été enclin à réaliser mes propres recherches pour mettre en place les meilleures solutions aux problèmes posés. Cela s'est spécialement vérifié lors de la prise en compte de l'inclinaison de la caméra sur les images. J'ai été contraint à expérimenter différentes approches jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant. Cet aspect m'a permis d'enrichir grandement mes connaissances et mes compétences sur des méthodes et des approches variées. Également, j'ai eu l'occasion d'explorer plusieurs librairies pour la calibration de la caméra. J'ai ainsi pu comparer les différentes méthodes proposées sur MatLab et Python pour finalement choisir une solution à la fois la plus performante et accessible.

7.2 Situation professionnelle : Actualisation des connaissances

Ce stage a été l'occasion pour moi de découvrir le domaine du rayonnement solaire et de sa mesure. J'ai eu la chance d'avoir des experts de ce milieu qui ont pu m'initier aux bases de l'observation de cette source d'énergie. L'identification et la compréhension des phénomènes physiques liés au comportement du rayonnement solaire et de sa diffusion dans notre atmosphère sont des notions que j'ai dû étudier et assimiler de façon à pouvoir correctement m'approprier les données de la station ainsi qu'analyser et détecter les anomalies dans les mesures.

Durant la cinquième année de formation à Polytech, les formations en traitement d'images et d'apprentissage automatique m'ont apporté une base de connaissance que j'ai pu directement mettre en application vis-à-vis des approches émergentes utilisant des images du ciel pour évaluer le rayonnement diffus. Cet aspect s'est notablement vérifié durant ma formation continue sur la calibration de caméra. Cette compétence est un atout que j'ai eu l'occasion d'approfondir et qui pourra prouver son utilité dans d'autres domaines que celui de la mesure du rayonnement solaire.

La polyvalence des divers domaines étudiés en cours m'a permis de développer ma méthodologie de travail et de recherche dans la démarche de mise en place de solutions innovantes. Ces approches ont eu recours à un ensemble de compétences en géométrie, en traitement de l'information et en communication que j'ai continuellement exercé et perfectionné tout à long de ce stage. Ce stage m'a aussi fait prendre conscience que le travail de recherche ne peut pas toujours aboutir, et que, à l'égard des délais disponibles et des contraintes, il est plus important de parfaire la démarche plutôt que de précipiter des résultats.

8 Conclusion et perspectives

Pour finir, mon expérience à l'Institut des Géosciences de l'Environnement pendant ce stage aura été très constructive et m'aura permis de finaliser ma formation d'ingénieur IESE à Polytech Grenoble. Durant cette période de 6 mois, j'ai mis en pratique mes connaissances théoriques acquises durant mon cursus et j'ai développé une panoplie de compétences dans divers domaines, allant de capacités techniques et opérationnelles à des compétences comportementales. Cela m'a également permis de confirmer mon envie de poursuivre dans le domaine de la recherche en tant qu'ingénieur de recherche dans le milieu de la mesure instrumentale et de la vision par ordinateur.

Cette expérience de travail de recherche s'est déroulée en plusieurs étapes. Premièrement, a eu lieu une phase de bibliographie et de documentation sur les notions concernant le rayonnement solaire et sa mesure. Cette étape a été suivie d'une période de développement d'outils pour l'analyse et la manipulation des données de la station météorologique qui m'ont permis de détecter les anomalies dans les mesures. Le cœur du stage portait ensuite sur la calibration de la caméra de façon à obtenir un affichage panoramique sans distorsion des images de la caméra ciel. La conclusion de cette phase m'a permis d'enchaîner sur le développement de méthodes d'estimation du rayonnement solaire diffus par la correction des biais de mesure d'un capteur spécifique.

Tout au long de mon stage, j'ai eu l'opportunité de rencontrer et d'échanger avec de nombreuses personnes spécialisées dans différents milieux et applications. Les nombreux séminaires et présentations qui se sont déroulés au sein de l'équipe HMCIS de l'IGE et au Gipsa-Lab ont éveillé ma curiosité sur des domaines que je n'avais jamais abordés. De plus, les échanges avec l'ingénieur de la station météo ainsi que les chercheurs et ingénieurs du centre OIE Mines ParisTech ont été très enrichissants et ont ouvert mes horizons.

Finalement, ce projet a, quant à lui, des perspectives intéressantes pour se prolonger et continuer d'évoluer. Du fait des défauts de calibration de l'appareil de mesure de référence utilisé durant ce stage, il sera nécessaire de réappliquer les méthodes développées avec des mesures de bonne qualité de manière à tester et valider leurs intérêts. Cela pourra aboutir à la rédaction d'un article de recherche et à la mise en place d'un réseau de mesure robuste, utilisant ces méthodes en Afrique de l'Ouest. Par ailleurs, une perspective éventuelle serait de créer un nouveau projet ou stage pour évaluer le potentiel d'une approche de Deep Learning avec une architecture complexe via l'utilisation de réseaux de neurones convolutifs en employant les images panoramiques produites durant ce stage.

Glossaire & nomenclature :

GHI	[W/m ²]	Rayonnement global horizontal
DNI ou BNI	[W/m ²]	Rayonnement normal direct
DHI	[W/m ²]	Rayonnement diffus horizontal
GTI	[W/m ²]	Rayonnement global incliné
φ	[°]	Latitude
λ	[°]	Longitude
γ_s	[°]	Angle d'élévation solaire
θ_s	[°]	Angle de zénith solaire
Ψ_s	[°]	Angle d'azimut solaire
Ω	[sr]	Angle solide dont le diamètre est l'angle d'ouverture [°]
η_k	[-]	Coefficients d'anisotropie
α	[°]	Angle de rotation : Roulis
β	[°]	Angle de rotation : Tangage
γ	[°]	Angle de rotation : Lacet

IGE	Institut des Géosciences de l'Environnement
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
HMCIS	HydroMétéorologie, Climat et Interactions avec les Sociétés
O.I.E.	Observatoire Impact Énergie – Mines ParisTech
Gipsa-Lab	Laboratoire Grenoble Images Parole Signal Automatique
GreEnEr	Grenoble Energie – Enseignement et recherche Ce bâtiment accueille notamment, l'école d'ingénieurs Grenoble INP - Ense3 et le laboratoire G2Elab.
G2ELab	Laboratoire Grenoble Ingénierie Électrique

Annexes

Annexe 1
(Citée page 19)
Calculs des sorties du SPN1
Traduction issue du manuel d'utilisation du SPN1

Le motif d'ombrage se compose de zones égales de bandes noires et dégagées. Cela signifie que tous les capteurs reçoivent 50 % du rayonnement diffus, prélevé sur tout le ciel et qu'au moins un capteur ne reçoit que ce rayonnement. Au moins un capteur reçoit également la totalité du rayonnement direct du soleil. Ces capteurs particuliers dépendent de la position du soleil dans le ciel, mais celui qui est complètement exposé est toujours le capteur qui reçoit le plus de rayonnement, et celui qui est complètement ombragé le moins. Tous les capteurs sont mesurés par l'électronique et les valeurs maximale et minimale des sept lectures sont utilisés pour le calcul. La lecture maximale représente le rayonnement direct + la moitié du rayonnement diffus. La lecture minimale représente la moitié du rayonnement diffus.

L'algorithme du SPN1 :

Soit MAX et MIN la plus grande et la plus petite des lectures des sept thermopiles, après avoir été ajustées par un facteur d'étalonnage (l'étalonnage est réalisé dans une sphère intégrante par rapport à une norme de transfert). L'algorithme est le suivant :

$$\text{TOTAL} = \text{MAX} + \text{MIN}$$

$\text{DIFFUS} = 2 * \text{MIN} * 1,02$ (les 2 % supplémentaires suppriment un petit biais systématique dû à un écart de 1 % à 2 % entre les capteurs dans des conditions d'éclairage identiques)

SI ($\text{DIFFUS} > \text{TOTAL}$) alors $\text{DIFFUS} = \text{TOTAL}$ (vérification car le diffus ne peut évidemment jamais être supérieur au total dans des conditions réelles)

Il y a ensuite une correction supplémentaire due à la réponse spectrale des capteurs donnant une sensibilité différente à la lumière directe et diffuse dans la plupart des conditions :

$$\text{DIRECT} = (\text{TOTAL} - \text{DIFFUS}) * 0,99$$

$$\text{DIFFUS} = \text{DIFFUS} * 1,14$$

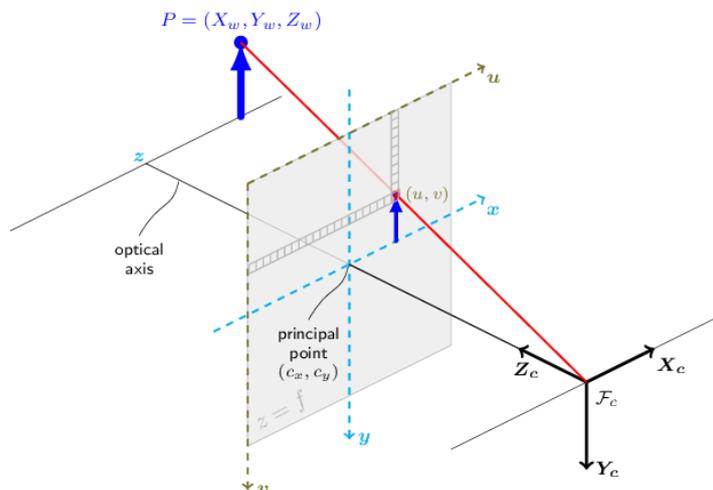
$$\text{TOTAL} = \text{DIRECT} + \text{DIFFUS} \quad (\text{TOTAL \& DIFFUS sont les sorties})$$

La présence du soleil est calculée à l'aide du rapport entre le Total et le Diffus :

$$\text{ENSOLEILLEMENT si } \text{TOTAL/DIFFUS} > \text{RATIO et } \text{TOTAL} > 24 \text{ W/m}^2$$

La valeur de RATIO est 1,35 pour un SPN1 standard avec un seuil du rayon direct de 120 W/m², et 1,55 pour la variante MeteoSwiss du SPN1 qui a un seuil du rayon direct à 200 W/m². La valeur 24 W/m² coupe les moments où le rayonnement est si faible qu'il ne peut y avoir d'ensoleillement direct mais la valeur TOTAL/DIFFUS peut être élevée en raison du bruit ou des décalages dominant les valeurs de lecture basse.

Annexe 2
(Citée page 24)
Modèle du sténopé (pin-hole) - OpenCV



Les vrais objectifs ont généralement une certaine distorsion, principalement une distorsion radiale et une légère distorsion tangentielle.

Points de l'image $\left\{ \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \right\} = K [R \quad T] \left\{ \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \right\}$ Points dans l'espace

Paramètres Intrinsèques **Paramètres Extrinsèques**

Avec R la matrice de rotation et T la matrice de translation.

Et K la matrice de la caméra :

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où f_x et f_y désignent la focale de la caméra en nombre de pixels suivant les direction x et y. c_x et c_y désignent le centre de l'image.

De plus la calibration OpenCV permet de déterminer les paramètres de distorsions radiales et tangentielles :

$$d = (k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$$

Distorsions radiales :

$$x_{\text{distorted}} = x(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6)$$

$$y_{\text{distorted}} = y(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6)$$

Distorsions tangentielles :

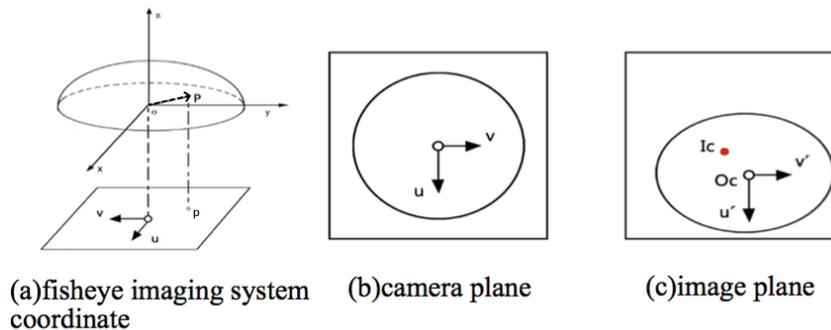
$$x_{\text{distorted}} = x + [2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2)]$$

$$y_{\text{distorted}} = y + [p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy]$$

Annexe 3 (Citée page 24)

Modèle de caméra omnidirectionnelle (OCamCalib: Omnidirectional Camera Calibration Toolbox for Matlab)

Soit p un pixel sur l'image. u et v sont ses coordonnées en pixels par rapport au centre de l'image $I_c = (x_c, y_c)$. Soit P son vecteur 3D de coordonnées (x, y, z) , issu du point de vue effectif de la lentille fish-eye. Le but de la calibration est d'estimer la fonction f qui cartographie un point p de l'image vers son vecteur 3D associé P .



On peut noter :

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ f(u, v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ f(\rho) \end{bmatrix}$$

$$\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$f(\rho) = a_0 + a_1 \rho + a_2 \rho^2 + a_3 \rho^3 + \dots$$

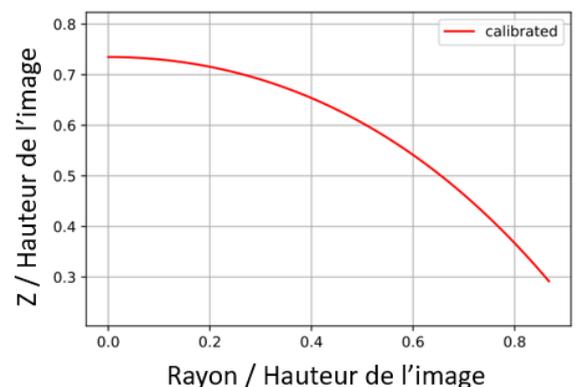
Cependant, il peut y avoir un potentiel désalignement de la lentille avec l'objectif de la caméra et, en raison du processus de numérisation de la caméra, les pixels peuvent ne pas être carrés (fig c). Pour modéliser et prendre en considération ces déviations, une transformation affine est appliquée :

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & d \\ e & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} xc' \\ yc' \end{bmatrix}$$

La solution finale est optimisée via l'algorithme de Levenberg-Marquardt permettant de minimiser la somme des carrés des déviations. Cette optimisation est premièrement réalisée avec le sous-ensemble d'images puis avec toutes les images.

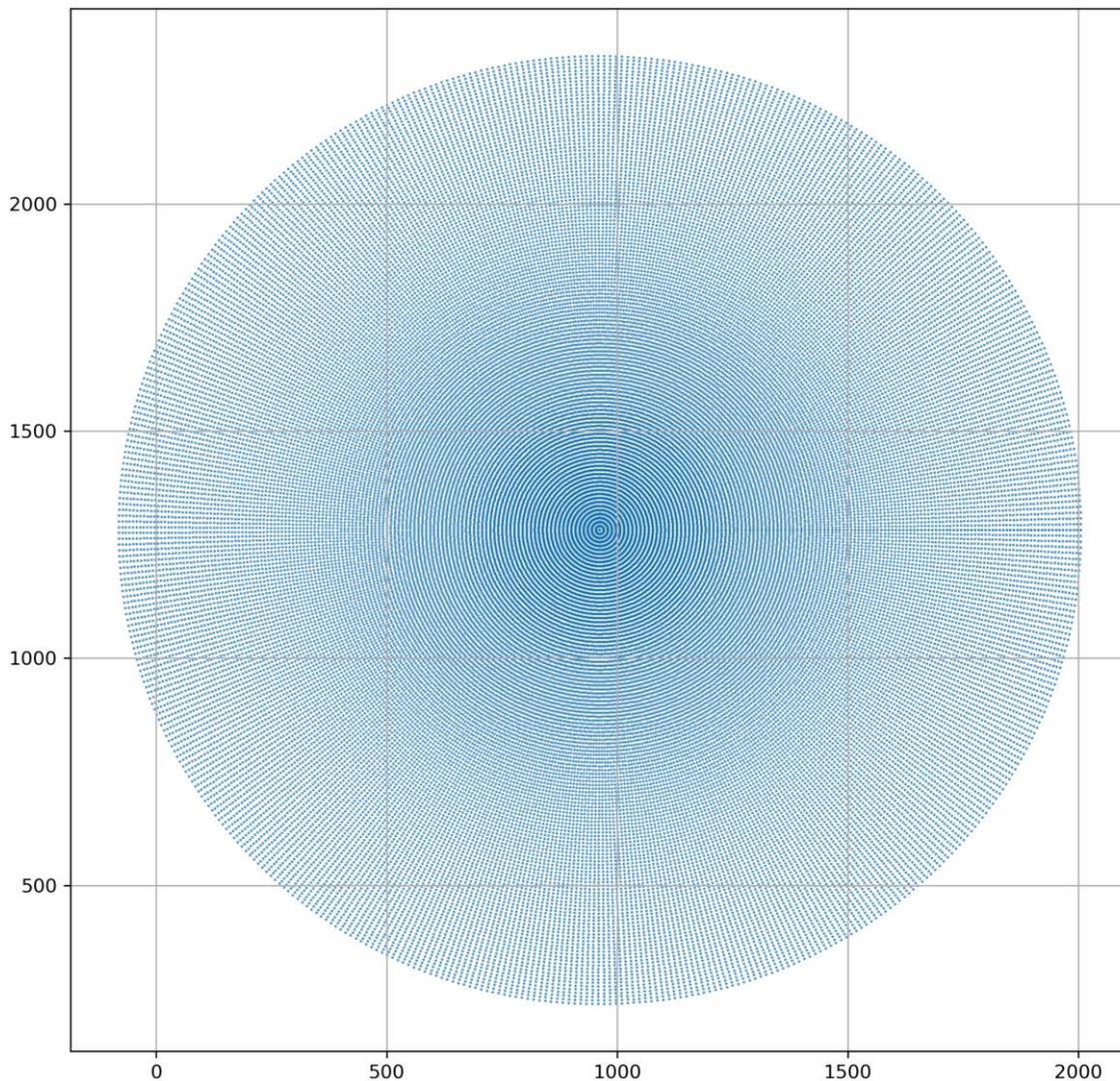
Ci-contre un exemple du polynôme qui décrit les distorsions de l'image.

Polynôme décrivant les distorsions de l'image



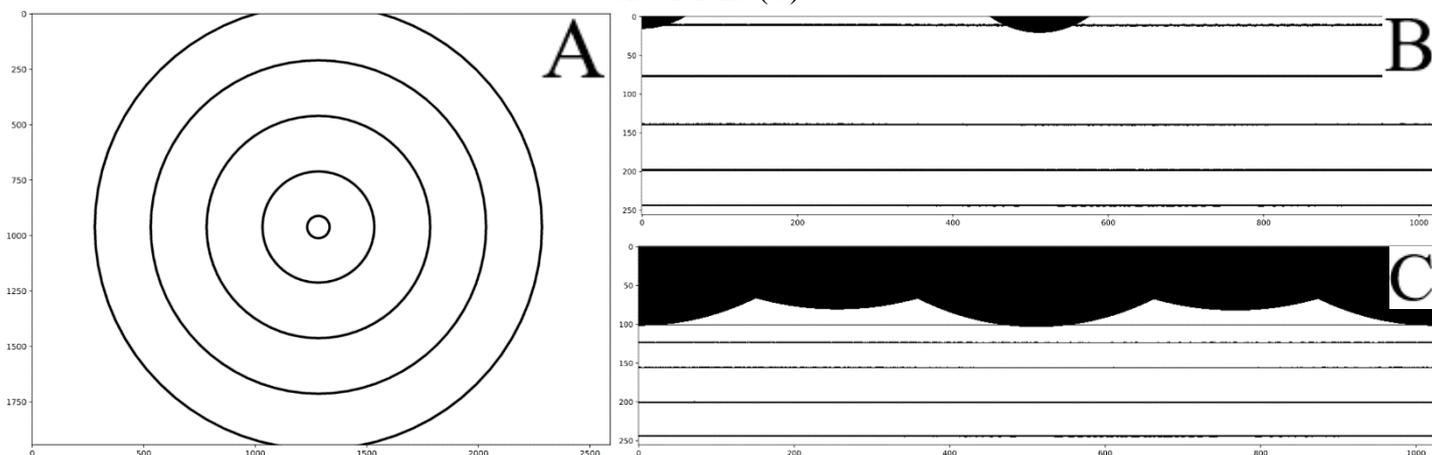
Annexe 4
(Cité en page 27)

Projection de la grille de points3D sur le plan de l'image



Ceci est une bonne représentation des distorsions de l'image

Motif de référence (A) et ses transformations en image panoramique avec (B) et sans les distorsions (C) :



Références bibliographiques :

- [1] R. Perez et M. Perez, « A fundamental look at energy reserves for the planet », vol. 50, janv. 2009.
- [2] « L'Accord de Paris | CCNUCC ». <https://unfccc.int/fr/processus-et-reunions/l-accord-de-paris/l-accord-de-paris> (consulté le 23 août 2022).
- [3] « Solar PV Global Supply Chains – Analysis », *IEA*. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- [4] R. Besseau, « Analyse de cycle de vie de scénarios énergétiques intégrant la contrainte d'adéquation temporelle production-consommation ».
- [5] « CIMO Guide | World Meteorological Organization ». <https://community.wmo.int/activity-areas/imop/cimo-guide>
- [6] S. Dev, F. Savoy, Y. H. Lee, et S. Winkler, « Estimating solar irradiance using sky imagers », *Atmospheric Meas. Tech.*, vol. 12, p. 5417-5429, oct. 2019, doi: 10.5194/amt-12-5417-2019.
- [7] N. B. Blum *et al.*, « Measurement of diffuse and plane of array irradiance by a combination of a pyranometer and an all-sky imager », *Sol. Energy*, vol. 232, p. 232-247, janv. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2021.11.064.
- [8] C. D. Sánchez-Segura *et al.*, « Solar irradiance components estimation based on a low-cost sky-imager », *Sol. Energy*, vol. 220, p. 269-281, mai 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.02.037.
- [9] « Chauffe-eau solaire - Vikidia, l'encyclopédie des 8-13 ans ». https://fr.wikidia.org/wiki/Chauffe-eau_solaire
- [10] B. Appel, *Centrale solaire parabolique (projet DISH-STIRLING à Font-Romeu-Odeillo)*. 2005. [En ligne]. Disponible sur: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dish-stirling-at-odeillo.jpg>
- [11] C. P. de Salvator, *Panneaux photovoltaïques au coucher du soleil, commune des Mées (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. 2013. [En ligne]. Disponible sur: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panneaux_PhotV_Les_M%C3%A9es.JPG
- [12] « Spectre du rayonnement solaire — Wikipédia ». https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_fr.svg
- [13] VIESSMAN, *Influence de l'atmosphère - composantes solaires*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/solaire-1/>
- [14] « Cartesian and ellipsoidal coordinates - Navipedia ». https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Cartesian_and_ellipsoidal_coordinates
- [15] Ph. Blanc et L. Wald, « The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period », *Sol. Energy*, vol. 86, n° 10, p. 3072-3083, oct. 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.07.018.
- [16] « Baseline Surface Radiation Network: Baseline Surface Radiation Network ». <https://bsrn.awi.de/> (consulté le 16 août 2022).
- [17] « Surveillance de l'irradiance solaire : un guide de base - Kipp & Zonen ». <https://cn.kippzonen.com/News/681/>
- [18] *Mesure de l'éclairement global et diffus avec un capteur au silicium avec un anneau d'ombre rotatif Photo: DLR, Plateforme Solaire d'Almeria*.
- [19] SOLS MESURES, « PYRANOMETRE SPN1 - fiche technique ». <http://www.sols-mesures.com/?product=pyranometre-spn1>
- [20] « AXIS M3027-PVE Network Camera - Assistance produit | Axis Communications ». <https://www.axis.com/fr-fr/products/axis-m3027-pve/support>

- [21] J. G. Wood, « Solar radiation sensor », WO1999013359A1, 18 mars 1999 [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/WO1999013359A1/en>
- [22] « Organisation météorologique mondiale ». <https://public.wmo.int/fr> (consulté le 20 août 2022).
- [23] P. Blanc, « Memo: Solar Processing for SPN1 », p. 4, juill. 2013.
- [24] J. Badosa *et al.*, « Solar irradiances measured using SPN1 radiometers: uncertainties and clues for development », *Atmospheric Meas. Tech.*, vol. 7, n° 12, p. 4267-4283, déc. 2014, doi: 10.5194/amt-7-4267-2014.
- [25] « Fisheye camera imaging model », *Huawei Enterprise Support Community*. <https://forum.huawei.com/enterprise/en/fisheye-camera-imaging-model/thread/522673-887> (consulté le 24 août 2022).
- [26] « OpenCV: Camera Calibration and 3D Reconstruction ». https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html
- [27] D. Scaramuzza, A. Martinelli, et R. Siegwart, « A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras », in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, oct. 2006, p. 5695-5701. doi: 10.1109/IROS.2006.282372.
- [28] D. Scaramuzza, A. Martinelli, et R. Siegwart, « A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structure from Motion », in *Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06)*, New York, NY, USA, 2006, p. 45-45. doi: 10.1109/ICVS.2006.3.
- [29] M. Rufli, D. Scaramuzza, et R. Siegwart, « Automatic detection of checkerboards on blurred and distorted images », in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, sept. 2008, p. 3121-3126. doi: 10.1109/IROS.2008.4650703.
- [30] « GitHub - tasptz/py-omnicalib: Omnidirectional camera calibration in python ». <https://github.com/tasptz/py-omnicalib>
- [31] « Altitude and Azimuth of the Sun or Moon During One Day ». <https://aa.usno.navy.mil/data/AltAz> (consulté le 18 août 2022).

DOS DU RAPPORT

Etudiant : LEMIERE Gaël

Année d'étude dans la spécialité : 2021-2022

Entreprise : IGE - Institut des Géosciences de l'Environnement

Adresse :

Adresse de l'Institut :

70 rue de la physique

Domaine universitaire 38 400 St Martin d'Hères

Adresse postale de l'Institut :

UGA - IGE

CS 40700

38 058 Grenoble Cedex 9

Responsable administratif : Catherine Podymski

Téléphone : 04 38 38 82 14

Courriel : ige-contact@univ-grenoble-alpes.fr

Tuteur de stage : CHAMARANDE Théo

Téléphone : 06 81 63 75 06

Courriel : theo.chamarande@univ-grenoble-alpes.fr

Enseignant-référent : CHARBONNIER Sylvie

Téléphone : 04 76 82 64 15

Courriel : Sylvie.Charbonnier@univ-grenoble-alpes.fr

Titre : Estimation automatique du rayonnement solaire via l'utilisation conjointe d'une caméra hémisphérique et de mesures instrumentales

Résumé :

Ce rapport décrit mon expérience de stage qui s'est réalisée au sein de l'Institut des Géosciences de l'Environnement à Grenoble (IGE) sur le domaine du rayonnement solaire du 21/03/2022 au 02/09/2022. Dans le cadre de la transition énergétique mondiale, les chercheurs de l'IGE souhaitent mettre en place un réseau de mesure robuste du rayonnement solaire et de ses composantes en Afrique de l'Ouest qui est un milieu en manque de mesures de référence avec de fortes contraintes.

L'objectif de ce stage était donc de mettre en place une méthode d'estimation du rayonnement solaire via l'utilisation d'images du ciel fournies par une caméra hémisphérique et de mesures instrumentales. Ce type d'approche émerge progressivement car les images du ciel permettent d'apporter de l'information manquante aux appareils de mesure classiquement utilisés. Deux approches sont abordées et s'appuient sur la correction de biais de mesure d'un appareil prometteur qui sont dues à des hypothèses fortes. Une première solution est basée sur un modèle théorique et l'autre repose sur une méthode d'apprentissage automatique.

Les travaux réalisés comprennent l'analyse et le traitement de l'information ainsi que la calibration d'une caméra. Finalement, je propose un processus complet de réévaluation du rayonnement diffus développé en Python.

Abstract:

This report describes my internship experience which took place within the Institute of Environmental Geosciences in Grenoble (IGE) in the field of solar radiation from 03/21/2022 to 09/02/2022. As part of the global energy transition, IGE researchers want to set up a robust measurement network for solar radiation and its components in West Africa, which is an environment lacking reference measurements with strong constraints.

The main objective of this internship was therefore to set up a method for estimating solar radiation through the usage of sky images provided by a hemispherical camera and instrumental measurements. This type of approach is gradually emerging because sky images can provide information that classical measuring devices are missing. Two approaches are discussed and rely on the measurement bias correction of a promising device. Those bias comes from strong assumption about the operation of this device. A first solution is based on a theoretical model and the other is based on a machine learning method.

The work carried out includes the analysis and processing of information as well as the calibration of a camera. Finally, I propose a complete diffuse radiation reassessment process developed in Python.