

Modélisation du ciel clair pour la ressource solaire

Sylvain Cros

Laboratoire de Météorologie Dynamique – Ecole Polytechnique

Philippe Blanc

Centre Observation, Impact, Energie – Mines Paris - PSL

Journée thématique de la SFT

Groupe « Thermique atmosphérique et adaptation au changement climatique »



E4C
INTERDISCIPLINARY
CENTER



SIRTA
SITE INSTRUMENTAL DE RECHERCHE
PAR TÉLÉDÉTECTION ATMOSPHÉRIQUE





E4C
INTERDISCIPLINARY
CENTER



PSL 

Concept de « ciel clair »

Pourquoi un concept de « ciel clair » ?

- Modéliser la ressource solaire => estimer, prévoir l'**éclairement solaire au sol** (global, direct, diffus)
- L'éclairement solaire au sol varie à cause de :
 - La position angulaire topocentrique du soleil (connue avec précision)
 - L'état optique de l'atmosphère claire (vapeur d'eau, aérosols, ozone, etc.) qui varient en quelques heures
 - La couverture nuageuse (influence la plus importante et la plus variable)

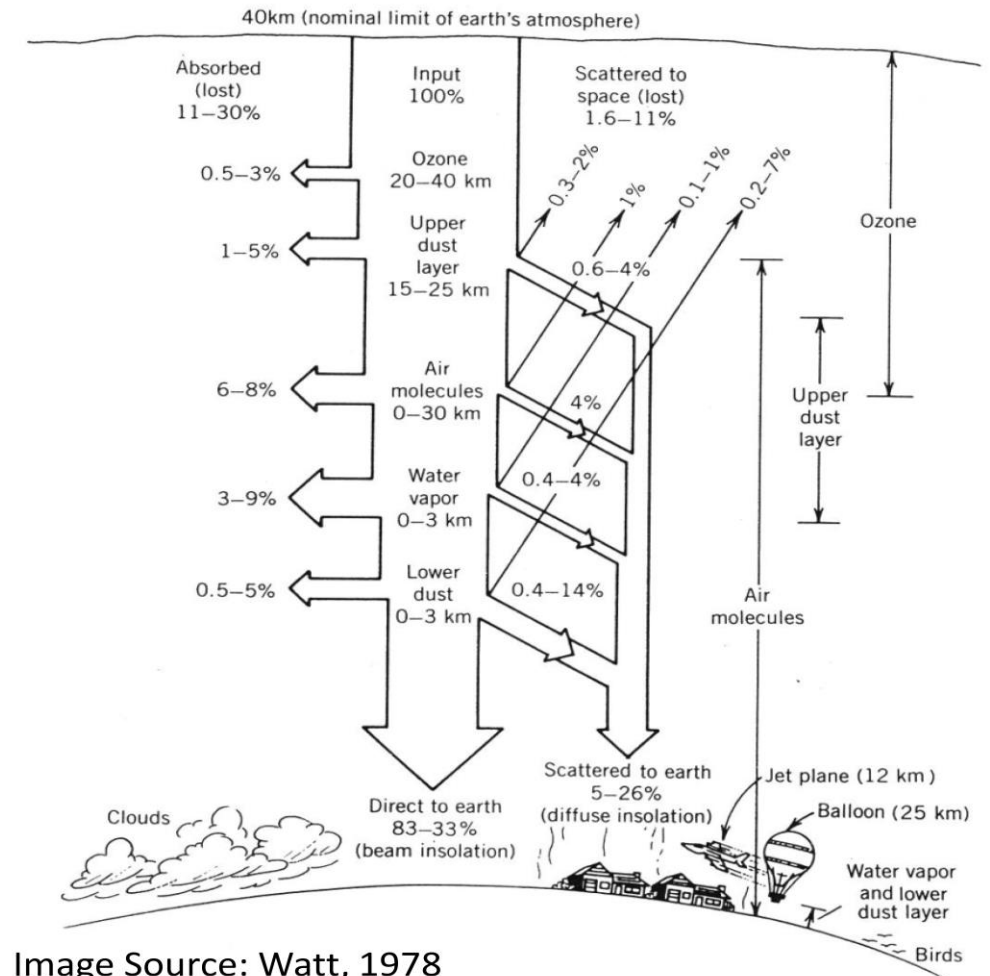
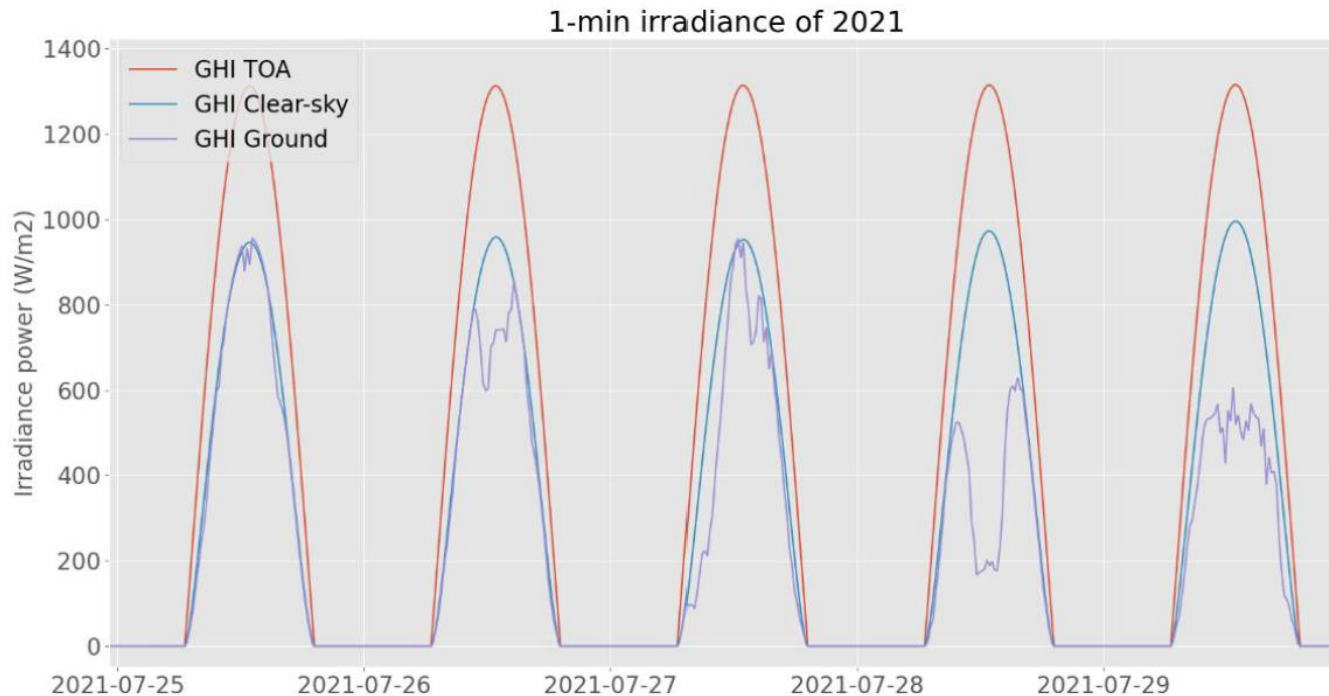


Image Source: Watt, 1978

Trois modélisations séparables



■ Eclaircement :

- Au sommet de l'atmosphère (TOA)
- Au sol sous un ciel clair (sans nuage)
- Au sol sous tout type de ciel

- 3 modélisation séparables
- Relevant de domaines physiques distincts :
 - Mécanique céleste
 - Physico-chimie de l'atmosphère
 - Météorologie

L'erreur de l'éclaircement sous ciel clair accentue l'erreur de l'éclaircement « tout ciel »



E4C
INTERDISCIPLINARY
CENTER



PSL 

Modélisation de l'éclairage sous « ciel clair » - enjeux et exemples

Bases de la modélisation

- La modélisation de l'éclairement solaire au sol sous ciel clair (*Global Horizontal Irradiation* ou GHI_{cc}) se base sur le calcul de l'éclairement direct monochromatique atteignant le sol I en fonction de cet éclairement au sommet de l'atmosphère et l'épaisseur optique du chemin traversé :

$$- I = I_0 * e^{-T}$$

- L'enjeu de la modélisation consiste à déterminer à partir de cette équation :
 - L'éclairement global, direct et diffus
 - L'éclairement total (toutes les longueurs d'ondes dans la VIS et proche IR, selon l'application souhaitée)
 - L'éclairement spectral
- 2 problèmes :
 - Le temps de calcul peut être très long
 - Les propriétés optiques des composants de l'atmosphère sont rarement disponibles
- Badescu et al. (2013) ont testé 54 modèles de ciel clair (Badescu, V., Gueymard, C. A., Cheval, S., Oprea, C., Baci, M., Dumitrescu, A., ... & Rada, C. (2012). Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1636-1656.)

Des modèles empiriques

$GHI_{cc} = f(a,b,c, \dots, \Theta)$, Θ angle zénithal solaire

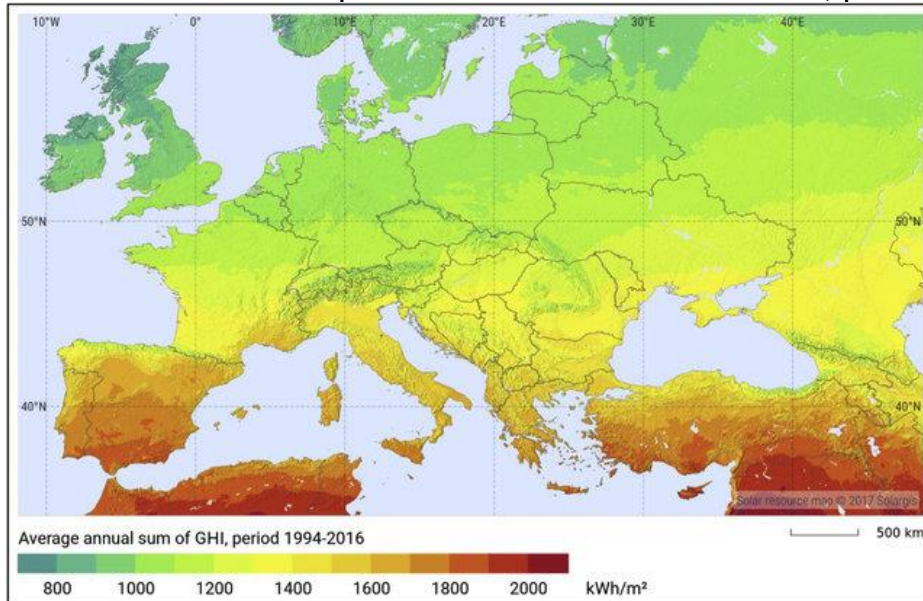
- Modèles empiriques avec coefficients à ajuster selon la localisation avec des mesures au sols
- Ces modèles ignorent les variations temporelles des composants optiquement de l'atmosphère
- **Pratique obsolète à déconseiller**
 - Bourges, G. (1979). Reconstitution des courbes de fréquence cumulées de l'irradiation solaire globale horaire reçue par une surface plane. Report CEE, 295, 77.
 - Vauge, P. D. B. (1983). Le gisement solaire-Evaluation de la ressource énergétique. Ciel et Terre, 99, 62.

Des modèles à paramétrisation simplifiée

- Simplification de modèles de transfert radiatif équations du transferts radiatifs avec :
 - Concentration supposé constante de composants atmosphériques (gaz ...)
 - Propriétés spectrales simplifiée
- $GHI_{cc} = f([H_2O], AOD, \rho_g, \Theta)$
 - $[H_2O]$, Water vapor concentration,
 - AOD, aerosol optical depth
 - ρ_g : ground albedo
- Codes existants, pratiques, mais sensibles aux incertitudes des paramètres d'entrée
 - Bird, R. E., & Hulstrom, R. L. (1981). Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces (No. SERI/TR-642-761). Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).
 - Powell, G. L. (1982). The ASHRAE clear sky model-an evaluation. ASHRAE J.:(United States), 24(11).
 - Gueymard, C. A. (2019). The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra. Solar Energy, 187, 233-253.

Paramétrisation des composants de l'atmosphère

- Données vapeur d'eau et aérosols étant difficiles à trouver, certains modèles utilisent la turbidité de l'air
 - Kasten, F. (1996). The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar energy*, 56(3), 239-244.
 - European Solar Radiation Atlas. Second Improved and Extended Edition, Vols. I and II. (1984) W. Palz (Ed.). Commission of the European Communities, DG Science, Research and Development, Report No. EUR 9344, Bruxelles.
- Une valeur unique représente l'absorption et la diffusion dues aux aérosols et la vapeur d'eau. Cette valeur est dérivée de la visibilité (disponible en prévision météorologique)
- Inconvénient : décomposition direct diffuse incertaine, pas de décomposition spectrale possible



European Solar Radiation Atlas
(2000)

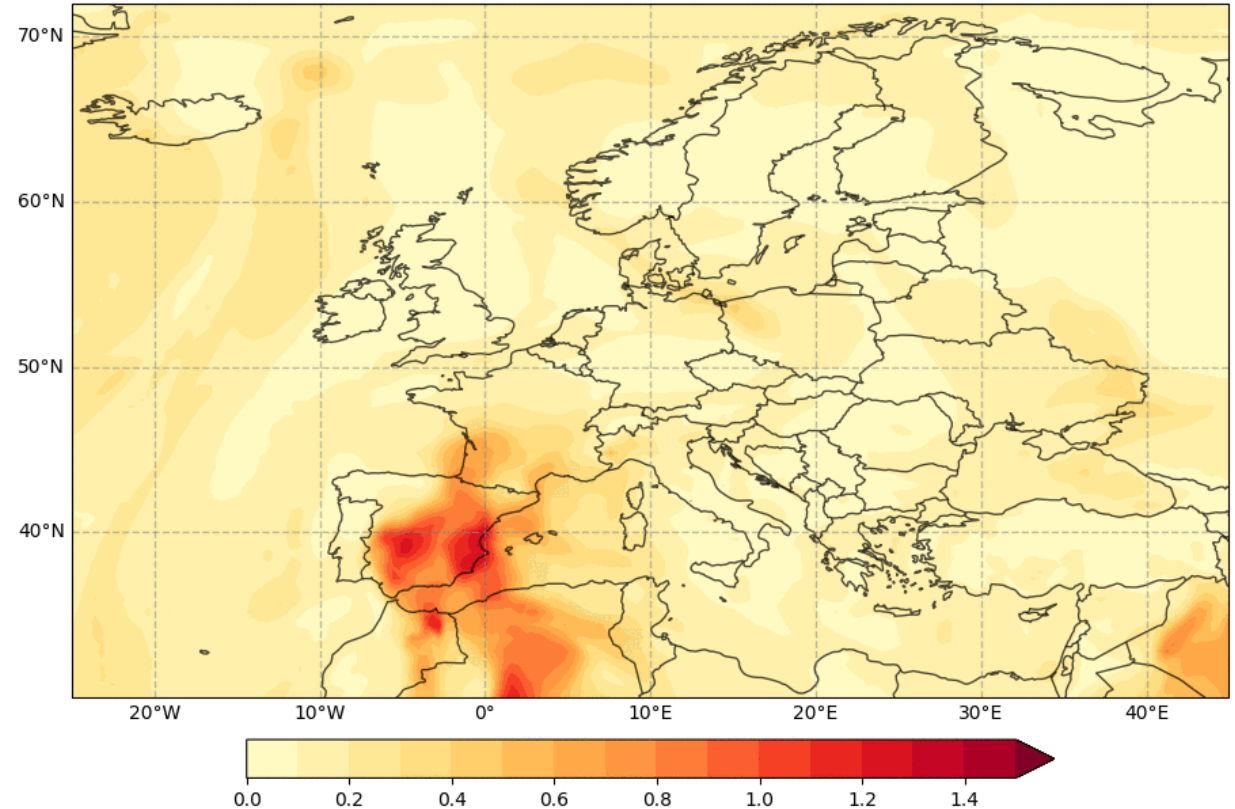
L'utilisation d'abaques pour accélérer les calculs

- Le calcul du rayonnement nécessite beaucoup de ressources surtout pour les différentes bandes spectrales
- Création d'abaques :
 - Intervalles échantillonnés de valeur d'AOD, H₂O, albedo ...
 - Pré-calculs du GHI_{cc} pour de nombreuses situations atmosphériques
 - Interpolation des valeurs précalculées
- Modèles SOLIS (Mueller et al., 2004, Ineichen 2006), s'utilise souvent avec des valeurs climatologiques mensuelles d'AOD
- McClear (Lefevre et al., 2013, Gschwind et al., 2019) : utilisation directe du service CAMS pour obtenir des données atmosphériques instantanées

Où trouver ces données ?

- Vapeur d'eau : services météorologiques, réanalyse
- Aérosols :
 - réseau de photomètres AERONET
 - Copernicus CAMS
 - NASA Geos-5
- Données NetCDF, HDF5

CAMS Forecast Total Aerosol Optical Depth at 550nm, 20220315T00 valid for 20220315T00

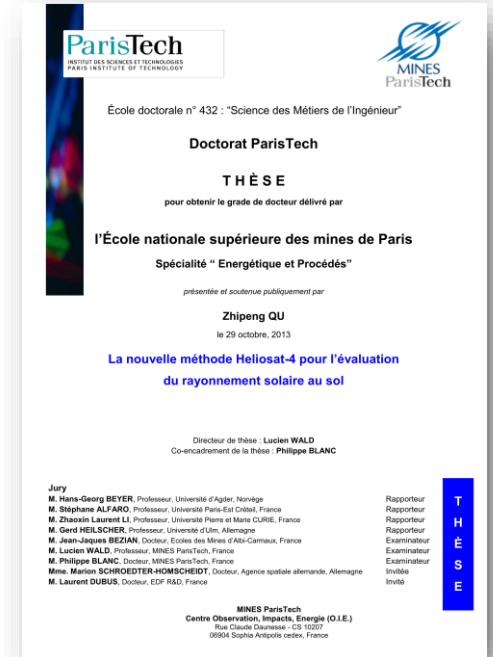


PROGRAMME OF
THE EUROPEAN UNION



McClear : une composante de la méthode Heliosat-4

- La méthode Heliosat-4 (Qu, 2013, Oumbe, 2009)
- Une approche physique "sans empirisme" permettant une caractérisation plus fine du rayonnement solaire (directe, diffus, spectral)
- Composante « ciel clair » McClear
 - Approche basée sur des abaques établies avec libRadtran (code de transfert radiatif)
 - Analyse de sensibilité aux paramètres (SZA, altitude, vapeur d'eau, O3, aérosols, gaz, etc.)
 - Noyaux d'interpolation spécifiques (eg. Beer-Lambert modifié)
- Papiers de principe + validations
 - Lefevre et al., 2013. McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions, AMT, doi:10.5194/amt-6-2403-201
 - Gschwind et al., 2019. Improving the McClear model estimating the downwelling solar radiation at ground level in cloud-free conditions – McClear-v3, Meteorologische Zeitschrift, doi:0.1127/metz/2019/0946, https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/OIE/search/index?q=McClear%2A&docType_s=ART



McClear : une composante de CAMS

Radiation



- Accès gratuit (inscription obligatoire)
- Couverture mondiale, depuis 2004 à la date courante moins 2 jours
- Irradiation totale globale, diffuse sur plan horizontal et directe normale (1-min à 1-mois)

CAMS McClear Service for irradiation under clear-sky

<< Back to SoDa

Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) McClear Clear-Sky Irradiation service delivers time series of irradiation that would be observed in a specific site in the world under cloudfree conditions, with a time step ranging from 1 min to 1 month. The Global, Direct and Diffuse Horizontal Irradiation, as well as the Beam Normal Irradiation are provided. Time coverage is 2004-01-01 up to current day-2. [Licence terms](#)

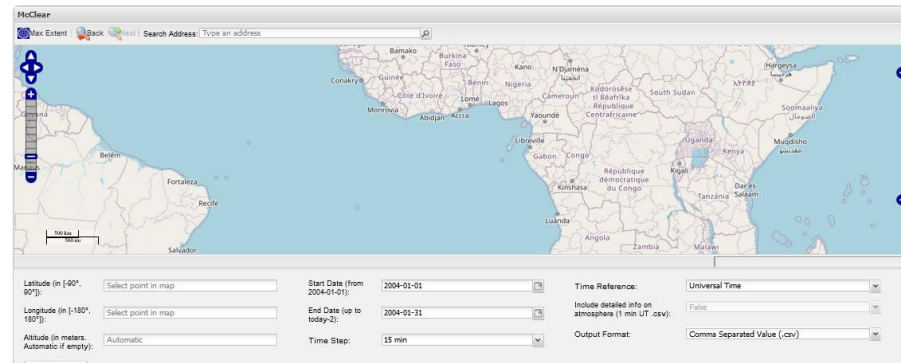
Please note that so far, the service is free of charge and unlimited. However, be aware that any abuse will automatically result in the deactivation of your SoDa-CAMS account credentials.



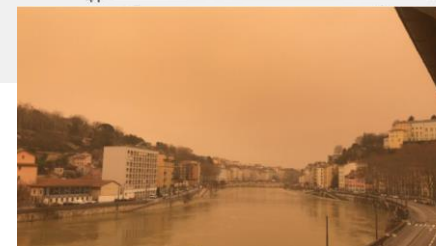
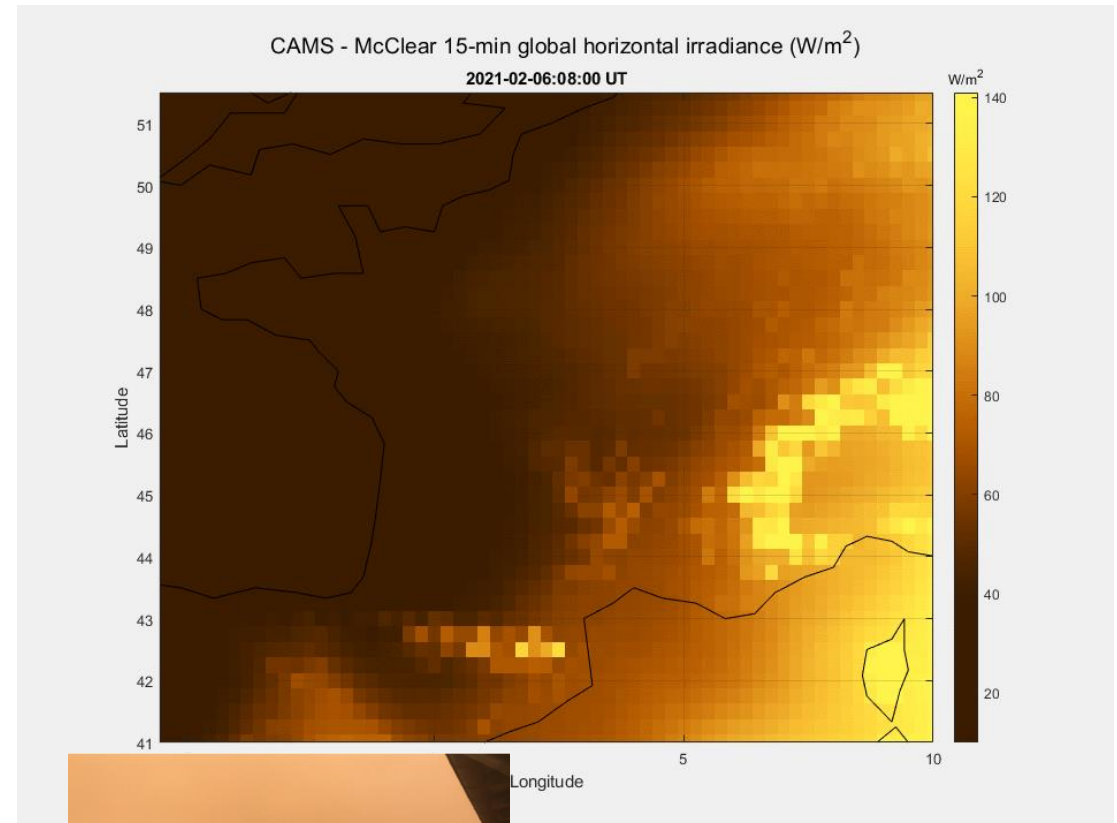
to download a volume of CAMS radiation and CAMS McClear data over Europe or Africa

<< Go to CAMS radiation

[Official documentation >](#)
[More information >>](#)



Automatic access (WGET, WPS) : <https://www.soda-pro.com/help/cams-services/cams-mcclear-service/automatic-access#xml>

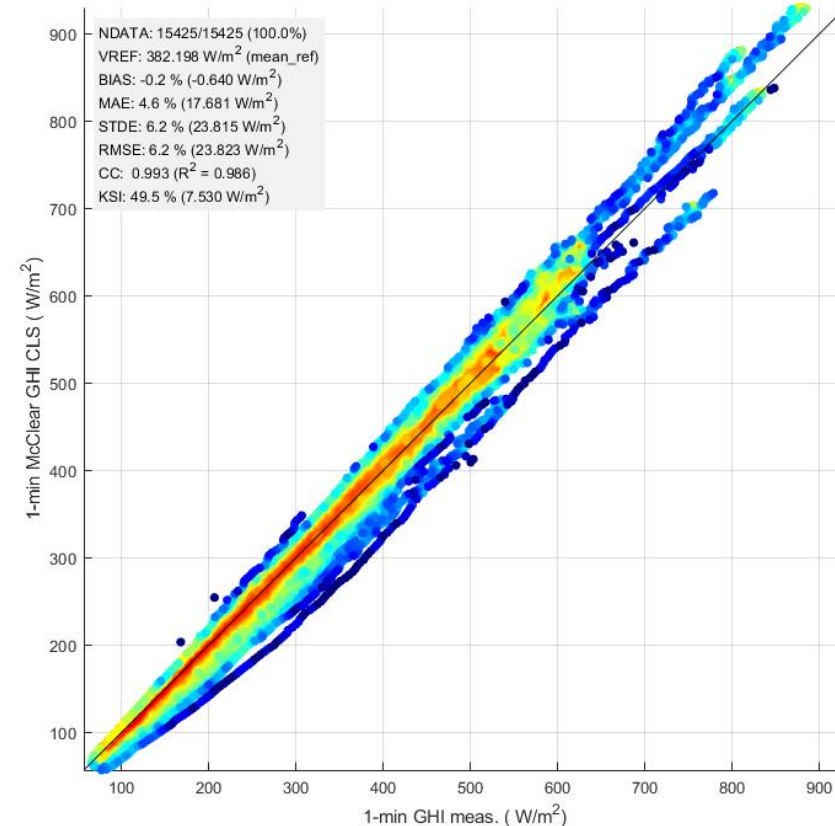
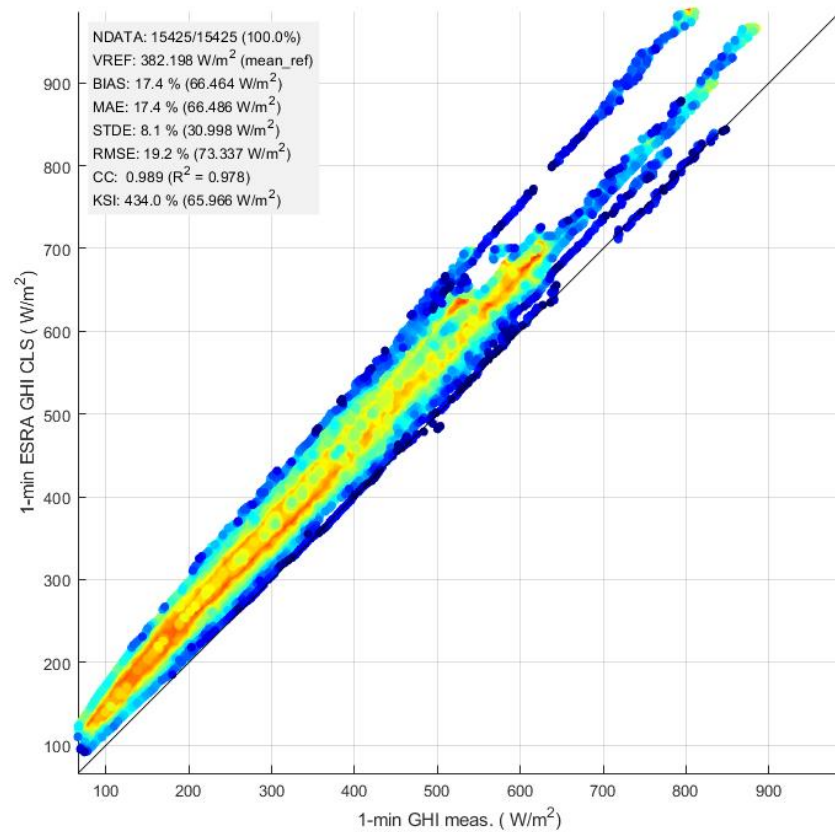


The sky over Leon turned a dramatic colour today thanks to sand from the Sahara Desert

McClear : une composante de CAMS

Radiation

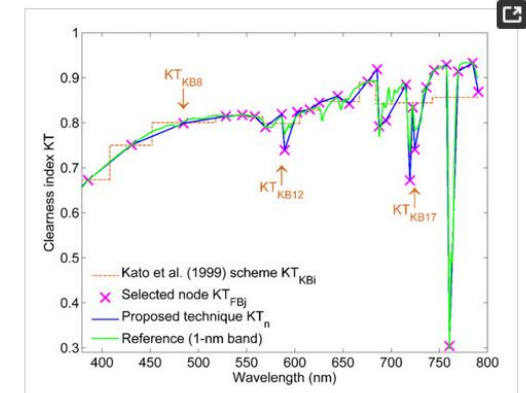
- Exemple de comparaison avec des mesures in-situ de GHI par ciel clair à Shanghai



Extension de McClear : définition spectrale

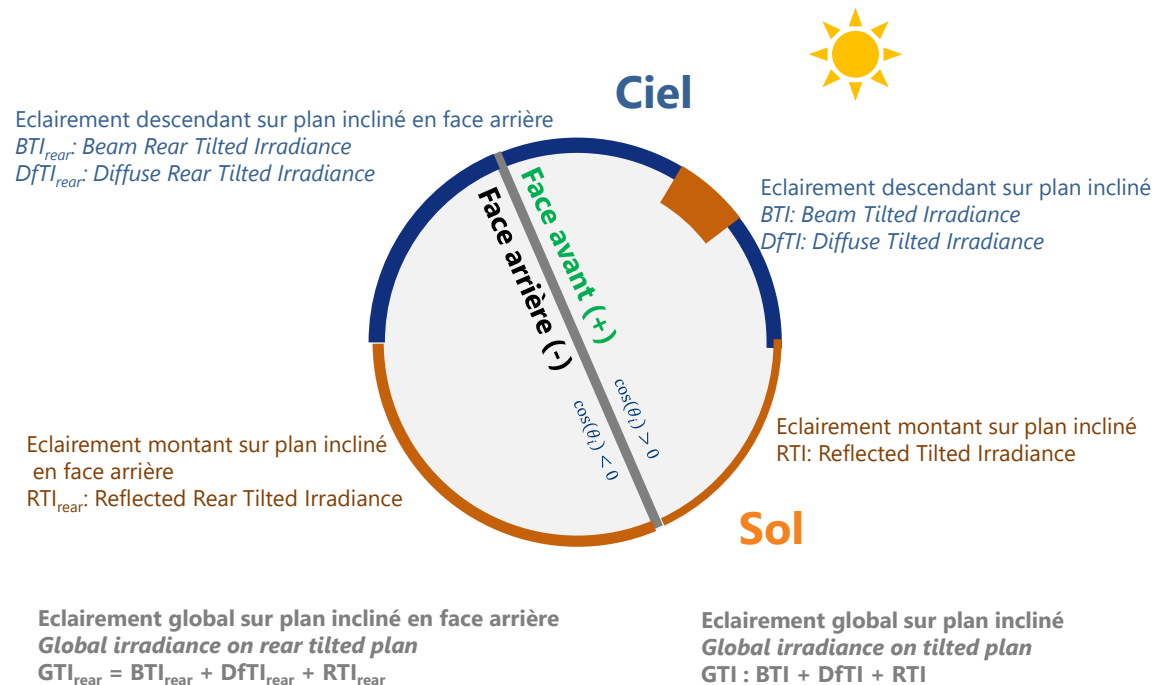
Thèse de (Wandji Nyamsi, 2015)

- Vers une méthode automatique d'estimation de la distribution spectrale du rayonnement solaire. Cas du ciel clair. Applications à la lumière du jour, photosynthèse et ultraviolet
- Technique spécifique de rééchantillonnage spectral
- utilisant :
 - L'approche d'approximation Kato et al. (1999) sur 32 bandes spectrales avec libRadtran
 - Le calcul spectral détaillé spectral pour quelques longueurs d'onde clés (libRadtran line-by-line)
- Papiers
 - Wandji Nymasi et al., 2021. Using Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) Products to Assess Illuminances at Ground Level under Cloudless Conditions. Atmosphere. doi: 10.3390/atmos12050643
 - Wandji Nymasi et al., 2015. Estimating the photosynthetically active radiation under clear skies by means of a new approach. Adv. Sci. Res., doi:10.5194/asr-12-5-2015



Extension de McClear : de l'éclairement à la luminance

- Thèse en cours de Sara Bham (OIE, MINES Paris –PSL)
Modelling of angular distribution of solar downwelling and upwelling radiances on a different surface plane under clear sky conditions
- Estimation des éclairements inclinés par ciel clair, y compris en face arrière (ex. Module PV bifacial)



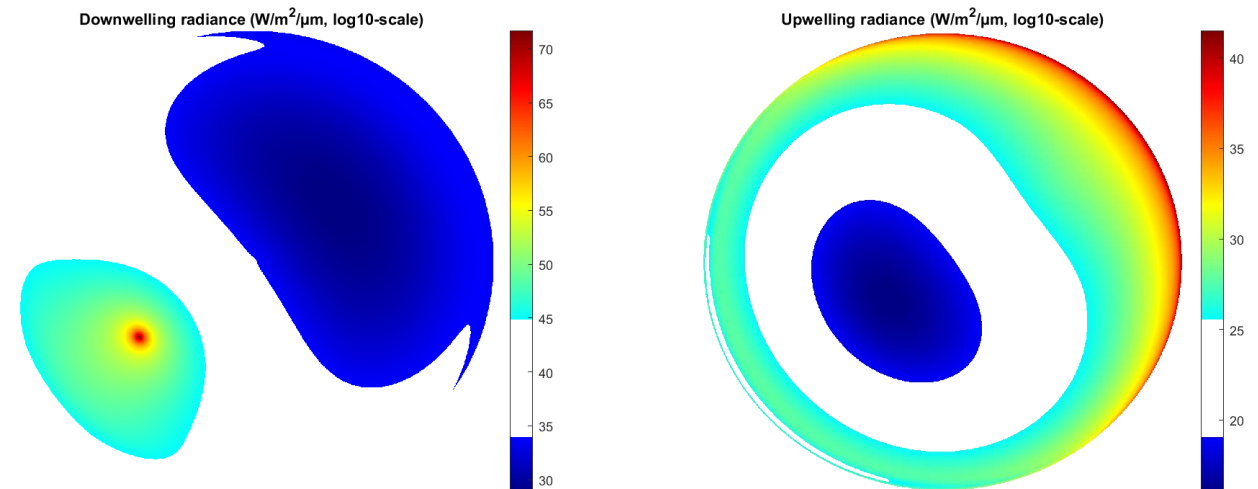
Extension de McClear : de l'éclairement à la luminance

○ De l'éclairement à la luminance énergétique montante et descendante

- Utilisation de libRadtran et des mêmes entrées que McClear (CAMS wv, O3, aerosols) pour définir une approche rapide de calcul des luminances montantes et descendantes
 - Luminance montante L_{\downarrow} : état de l'atmosphère claire et position angulaire topocentrique du soleil
 - Luminance descendante L_{\uparrow} : produit angulaire et spectrale de L_{\downarrow} et de la réflectance du sol (bidirectionnelle, modèle de Ross-Li)



Exemple d'une deux images fish-eye tête-bêche



Conclusion & Perspective

- Modélisation du rayonnement sous clair : une pratique pour séparer le déterminisme (course du soleil et de la variation spatiotemporelle de la composition de l'atmosphère) de la stochasticité de la couverture nuageuse
- Les enjeux de cette modélisation reposent sur:
 - Le compromis entre coût de calcul et précision
 - La disponibilité des paramètres optiquement actifs de l'atmosphère
- L'interpolation de valeurs pré-calculées dans un abaque et la connexion à un service de données ont apportés des solutions performantes
- Le modèle ciel clair doit s'adapter aux nouvelles pratiques du PV:
 - Panneaux PV bifaciaux
 - Panneaux orientés verticalement (façades, agrivoltaïsme)
- L'utilisation de l'apprentissage profond peut améliorer la conception et l'efficacité des abaques
- La plupart des modèles citées sont disponibles via la librairie Python pvlib
- https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/user_guide/clearsky.html

Merci pour votre attention !



lvain.cros@polytechnique.edu

philippe.blanc@mines-paristech.fr



E4C
INTERDISCIPLINARY
CENTER



SIRTA
SITE INSTRUMENTAL DE RECHERCHE
PAR TÉLÉDÉTECTION ATMOSPHÉRIQUE

