



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final du 30 juin 2015

Solar Resource Assessment and Forecasting

IEA SHC Task 46

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche Solaire thermique et stockage de chaleur
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement:

University of Geneva, CH-1227 Carouge

Mandataire:

Université de Genève
Institut des sciences de l'environnement
Battelle Bât. D, 7 rte de Drize
CH-1227 Carouge
www.unige.ch/energie

Auteurs:

Pierre Ineichen, Université de Genève, pierre.ineichen@unige.ch

SFOE Head of domain: Andreas Eckmanns

SFOE Programme manager: Jean-Christophe Hadorn

SFOE Contract number: SI/500184-03 / 500184

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Zusammenfassung

Die IEA-Task „Solar Resource Assessment and Forecasting“ (Abschätzung und Prognose der Solarstrahlung) soll der Solarindustrie, dem Elektrizitätssektor, den Regierungen sowie den Organisationen im Bereich der erneuerbaren Energietechnologien die Mittel zur Verfügung stellen, um die „bankability“ der vom öffentlichen und privaten Sektor gelieferten Daten zu verstehen.

Insbesondere soll das Projekt den verschiedenen Akteuren Informationen über die Genauigkeit kurzfristiger Solarstrahlungsprognosen (unter einer Stunde, 1-6 Stunden, 1-3 Tage) bereitstellen, damit die Versorgungsunternehmen den Betrieb von grossen Solaranlagen innerhalb ihrer Systeme planen können. Ein weiterer Schwerpunkt ist das Verständnis der kurzfristigen (1 Minute oder weniger) Fluktuationen der Solarstrahlung infolge des Wolkenzugs, die zu Energieschwankungen führen. Dies ist ein wichtiges Anliegen der Versorgungsunternehmen mit einem grossen Anteil von Solaranlagen.

Obwohl Solarenergie und Kältetechnologie an sich keine netzgebundenen Systeme sind, haben beide Technologien Einfluss auf den Netzbetrieb, da sie anstelle von traditionellen Brennstoffen oder Strom eingesetzt werden.

Résumé

La Tâche 36 de l'Agence Internationale de l'Energie avait pour but de rendre accessibles à tous les données de la ressource solaire par le biais d'un portail internet. Les données accessibles ont été validées au moyen de tests communs de façon à les rendre le plus comparables possible. La Tâche 46 poursuit cet effort en consolidant les connaissances de la ressource et en y ajoutant l'axe de la prévision à court et moyen terme de l'irradiance solaire.

Le but de la Tâche est de fournir aux industries, aux décideurs, aux ingénieurs du secteur de l'électricité, ainsi qu'aux différentes institutions actives dans le domaine des énergies renouvelables, un accès à des données précises, sûres et complètes, et certifiées de qualité. Ce but se poursuit selon quatre axes ou sous-tâches dans les domaines de la ressource sub-horaires, de l'intégration de données complémentaires aux différents sets de données d'irradiance, de la prévision à court et moyen terme, ainsi que l'amélioration des modèles d'évaluation de la ressource basé sur des données satellitaires.

Les domaines de recherche de l'Université de Genève se concentrent dans la standardisation et l'intégration des banques de données, de leur caractérisation, ainsi que la validation et de l'amélioration des modèles d'évaluation de l'irradiance.

Abstract

The IEA Task "Solar Resource Assessment and Forecasting" will provide the solar energy industry, the electricity sector, governments, and renewable energy organizations and institutions with the means to understand the "bankability" of data sets provided by public and private sectors. A major component of the task is to provide this sector with information on how accurately solar resources can be forecast in the near future (sub-hourly, 1-6 hours, and 1-3 days) so that utilities can plan for the operation of large-scale solar systems operating within their systems.

Another major component of the task is understanding short-term (1-minute or less) resource variability associated with cloud passages that cause power "ramps", an important concern of utility operators with large penetrations of solar technologies in their system. Although solar heating and cooling technologies are not, in themselves, "grid-tied" systems, the use of these technologies also impacts grid operations since they offset the use of conventional fuels or electricity.

Contexte

Cette recherche entre dans le cadre de la Tâche 46 de l'AIE: *Solar Ressource Assessment and Forecasting*. Les participants à cette Tâche sont l'Australie, l'Autriche, le Canada, les Etats-Unis, la France, l'Allemagne, la Slovaquie, l'Espagne, et la Suisse. Le Chili et la Russie sont hôtes invités.

Objectifs

La Tâche AIE 36 avait répondu partiellement aux besoins de la communauté solaire concernant les données de base de l'irradiance. Les participants se sont rendu compte qu'il fallait approfondir les connaissances de certains aspects de la ressource solaire, notamment la variabilité au pas de temps de l'ordre de la minute, la « banquabilité » des séries de données pour répondre aux différents investisseurs, la précision des prévisions de la ressource à court et moyen terme, ainsi que l'amélioration des différents modèles d'évaluation de la ressource à partir des mesures satellitaires.

Les différents axes du projet s'expriment au moyen de 4 sous-tâches : compréhension de la variabilité de la ressource à court terme pour l'intégration dans les réseaux, standardisation et intégration de données complémentaires dans les sets de données, prévision du rayonnement à court terme (du pas de l'heure et jusqu'à 7 jours), et amélioration des modèles d'évaluation de la ressource solaire.

Le rôle de l'Université de Genève consiste à travailler sur les bases de données de la ressource solaire et d'en valider la qualité et la précision. Les résultats de ces validations et les études de dépendance effectuées soulignent les points forts et les points faibles des différents modèles et bases de données satellitaires.

Résultats

1. Qualification des banques de données

L'analyse de la variabilité interannuelle du rayonnement global a souligné l'importance du travail qui doit être fait en amont de l'utilisation de sets de données d'irradiance. En effet, la calibration des senseurs est un point critique, il s'est avéré que même des bases de données réputées comme précises pouvaient montrer des déficiences dans ce domaine. Par conséquent, un contrôle de qualité stricte est à appliquer à toutes les données.

La validité des résultats obtenus sur la base de données mesurées est fortement dépendante de la qualité de la banque de données utilisée. Le contrôle de qualité est donc un point essentiel du processus de validation de modèles. Une partie de ce contrôle peut être automatisé et permet de détecter les problèmes principaux comme les défauts des senseurs, les erreurs de poursuite du soleil, d'orientation, de cohérence, etc.

D'autres problèmes comme par exemple une dérive de calibration, ne peuvent être adressées qu'au moyen d'un contrôle manuel qui consiste en une vérification de l'heure d'acquisition, d'une vérification de la calibration des senseurs et de la cohérence entre les différents paramètres d'irradiance mesurés.

1.1 L'heure d'acquisition

L'heure d'acquisition est utilisée pour le calcul de la géométrie solaire et une dérive de celle-ci induit des imprécisions et des erreurs dans tout le processus d'utilisation des données. Cette validation peut être effectuée visuellement par sélection de jours clairs durant l'année et d'en valider la symétrie des rayonnements par rapport au temps solaire. Cette vérification est illustrée sur la Figure 1 où les rayonnements direct et global sont représentés en fonction de la hauteur du soleil sur l'horizon pour des conditions claires sur toute la journée : les courbes du matin et de l'après-midi doivent être superposées.

Si ce premier test est positif, une vérification sur une longue période est possible au moyen des indices de clarté. Il s'agit de représenter sur un même graphique les valeurs du matin et les valeurs de l'après-midi en fonction, par exemple de la hauteur du soleil. Si l'heure est correctement enregistrée, les bornes supérieures représentatives de conditions claires doivent être confondues comme illustré sur la Figure 2 où le rayonnement par ciel clair modélisé est représenté en bleu clair. Ce test est sensible et un décalage de quelques minutes est aisément mis en évidence.

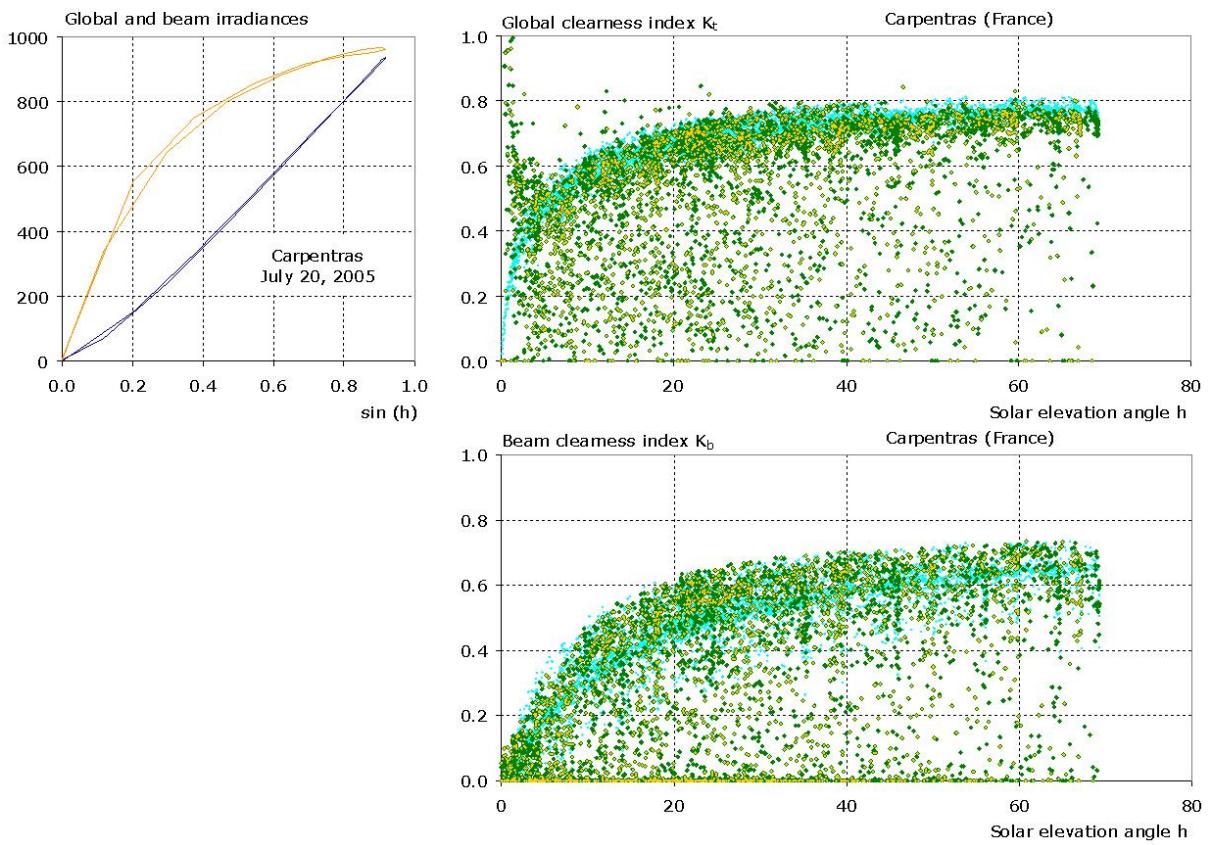


Figure 1 Rayonnements en fonction de hauteur du soleil

Figure 2 Indice de clarté différencié entre le matin et l'après-midi en fonction de la hauteur du soleil.

Si les deux conditions sont validées, l'heure d'acquisition peut être considérée comme correcte, et la géométrie solaire peut être calculée avec précision.

1.2 Calibration des senseurs

En représentant sur un graphique la valeur horaire la plus élevée de chaque jour de l'année, pour un rayonnement ou un indice de clarté, il est possible d'effectuer une comparaison entre différentes années d'une même station ou région, ou entre deux paramètres comme le rayonnement mesuré et le rayonnement par ciel clair évalué par modèle à partir, par exemple, de mesures spectrales.

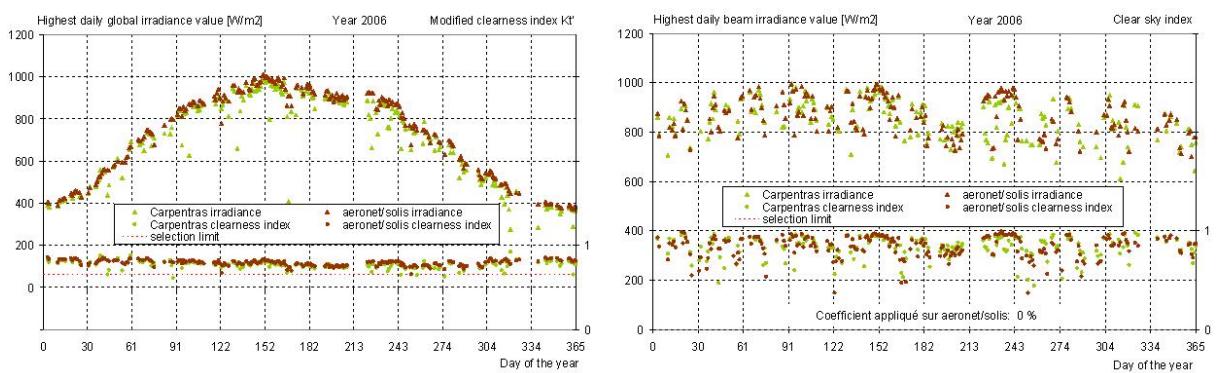


Figure 3 Valeurs horaires maximum par jour pour les rayonnements global et direct, représentés en fonction du jour de l'année. Les indices de clarté correspondants sont également représentés

Deux types de graphiques sont applicables pour vérifier la calibration. Dans le premier cas, si des mesures d'épaisseurs optiques sont disponibles, les données peuvent être comparées au rayonnement par ciel clair évalué au moyen du modèle Solis (Mueller 2004, Ineichen 2008). La Figure 3 illustre cette comparaison, les paramètres y étant représentés en fonction du jour de l'année. Sur ces graphiques, les limites supérieures (représentatives des conditions claires) doivent être confondues pour une calibration correcte. Si une différence apparaît, il n'est pas possible de déterminer lequel des senseurs est mal calibré ; néanmoins, si l'une des séries de données est fiable, cette méthode permet

une confirmation ou infirmation de la calibration de la deuxième série. Dans un deuxième cas, il est possible de comparer de la même façon les données de deux années différentes. Cette comparaison permet de mettre en évidence une dérive des coefficients de calibration.

Si deux stations se trouvent dans la même région climatique, et pas trop éloignées l'une de l'autre, il est possible de les comparer sous la forme d'un « scatter plot ». On reporte les valeurs sélectionnées précédemment d'une station en fonction de l'autre, en ne représentant que les valeurs horaires d'indice de clarté modifié K'_t (Perez 1990) supérieur à 0.65, c'est-à-dire de type clairs uniquement. Les points devraient s'aligner sur une diagonale si les calibrations sont correctes. La Figure 4 illustre cette représentation pour les rayonnements global et direct pour deux sites situés à une centaine de kilomètres l'un de l'autre. Compte tenu de la distance, on constate que les rayonnements directs maximums sont bien du même ordre de grandeur. En ce qui concerne le rayonnement global, la dispersion est plus élevée, mais l'ordre de grandeur est néanmoins respecté

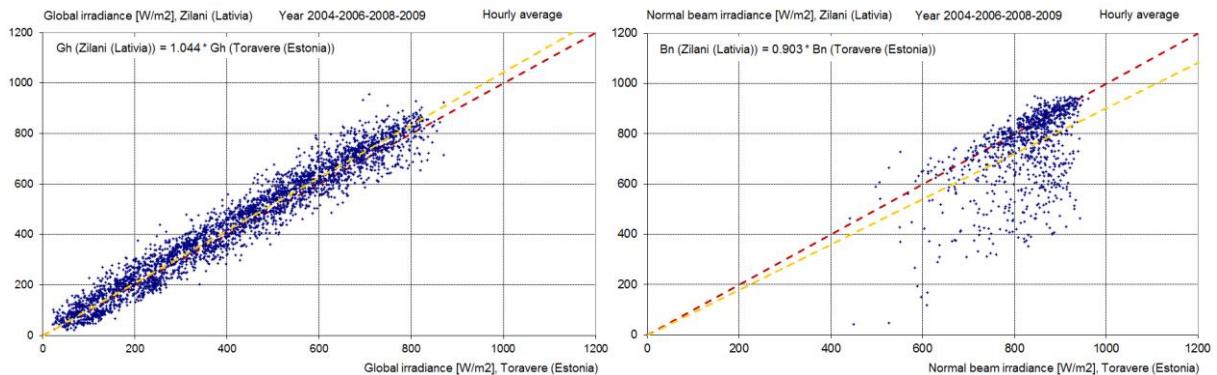


Figure 4 Valeurs horaires maximum par jour pour les rayonnements global et direct, pour un site en fonction de l'autre. La pente donnée sur le graphe représente la différence de calibration.

1.3 Cohérence des composantes

La cohérence entre les rayonnements direct et global mesurés peut être vérifiée au moyen des indices de clarté. Il s'agit de représenter l'indice de clarté direct en fonction de l'indice de clarté global tel qu'illustré sur la Figure 5. Sur cette Figure, les courbes correspondantes à un ciel clair pour différentes valeurs de turbidité sont également représentées. Les points horaires représentés sur le graphique ne devraient pas s'éloigner de façon significative de la zone déterminée par les courbes de ciel clair.

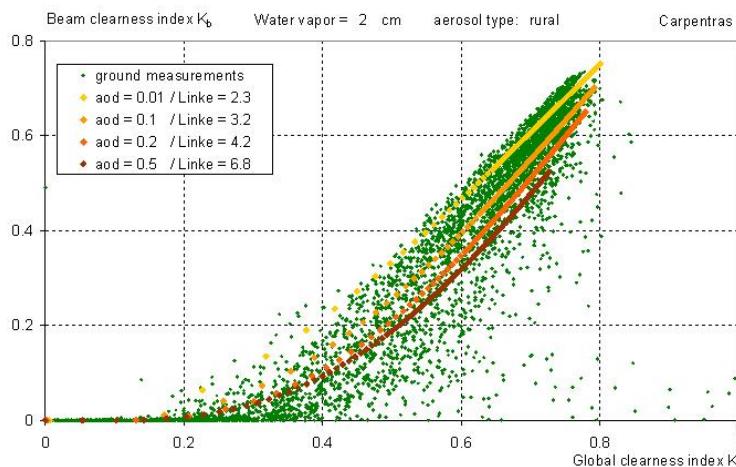


Figure 5 Indice de clarté direct en fonction de l'indice de clarté global. Les courbes représentent le ciel clair pour différentes valeurs de trouble atmosphérique

2. Validations des modèles d'irradiance

Une fois les bases de données dûment vérifiées, la validation des modèles d'irradiance peut être effectuée. Nous avons validé deux types de modèles : les modèles de ciel clair, et les modèles satellites toutes conditions. Nous avions déjà validés des modèles ciel clair précédemment sur une courte période. Ici, une validation à long terme est effectuée, et plus particulièrement dans le but d'évaluer le

nouveau modèle McClear de MinesParisTech. De même pour les modèles tous temps, un nouveau modèle a été développé par MinesParisTech en 2014, modèles que nous avons ajouté à la validation, mais sur un nombre restreint de site de mesures.

2.1 Sites de mesures

Des données de 22 sites européens et du pourtour Méditerranéen ont été utilisées pour effectuer la validation des différents modèles. Les sites couvrent des latitudes de 20° à 60°, des altitudes du niveau de la mer à 1600m, et une large palette de climat. Par ailleurs, les données du site de Skukuza en Afrique du Sud ont également été utilisées pour la validation du rayonnement global. La liste est donnée dans la Table II

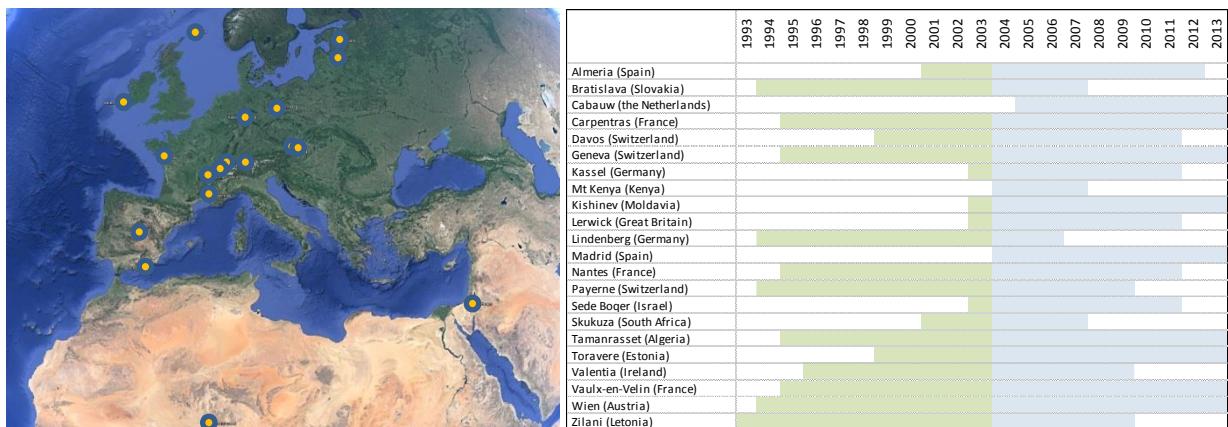


Table II Liste des sites utilisés pour la validation des modèles

2.1 Modèles ciel clair

Sept modèles de ciel clairs ont été analysés, cinq d'entre eux nécessitent l'épaisseur optique *aod* et la vapeur d'eau condensable *w* comme paramètres d'entrée, et deux utilisent le coefficient de trouble de Linke (qui contient les deux paramètres en un seul coefficient). Ce sont les suivants :

- **MacClear** (Lefèvre 2013) : nouveau modèle développé par MinesParisTech. Il est basé sur des calculs de transmission atmosphérique par transfert radiatif LibRadTran et traduit en LUT (look-up tables). Le type d'aérosol est déterminé par l'épaisseur optique dans deux bandes de longueurs d'onde distinctes.
- **Solis** (Ineichen 2006): le modèle est une version large bande du modèles spectral calculé sur la base de LibRadTran. Il est analytique et permet le calcul du ciel clair pour 4 types d'aérosols.
- **CPCR2** (Gueymard 1989) : est un modèle paramétré dans deux bandes de longueurs d'onde : l'UV et le visible d'une part, et l'infra-rouge d'autre part. Les fonctions de transmission atmosphériques sont déterminées pour chaque couche atmosphérique et combinée en une transmittivité globale.
- **REST2** (Gueymard 2003) : est une évolution de CPCR2 utilisant de nouvelles fonctions de transmission atmosphérique calculées au moyen de Smart2, modèle spectral de transmission atmosphérique.
- **Bird** (Bird 1980): est un modèle développé sur la base de calculs au moyen du modèle de transfert radiatif Soltran. Il nécessite la connaissance de l'épaisseur optique des aérosols dans deux longueurs d'onde distinctes (qui peuvent être combinées en une valeur large bande)
- **Kasten** (Kasten 1980): le modèle tient compte de l'absorption et de la diffusion du rayonnement à deux altitudes différentes : 2500m et 8000m. Il utilise le coefficient de trouble de Linke (1922) comme paramètre atmosphérique.
- **ESRA** (Rigolier 2000, Geiger 2002) : modèle utilisé dans le cadre de l'atlas européen de rayonnement solaire nécessitant également le coefficient de trouble de Linke comme paramètre d'entrée.

2.2 Modèles satellites tous temps

Huit modèles d'évaluation du rayonnement solaire à partir du satellite sont validés sur ces bases de données mesurées au sol. Il s'agit de :

- **Helioclim v3** : base de données développée par l'Ecole de Mines de Paris à Sophia Antipolis. Le calcul est basé sur la méthode Heliosat initialement développée par Cano (1986) pour le calcul de l'indice nuageux. Le rayonnement global est ensuite évalué sur la base du modèle ciel clair ESRA (Atlas européen), et la composante directe au moyen de la relation de Liu et Jordan.
- **SolarGIS** : développé par GeoModel en Slovaquie, le schéma utilise le modèle ciel clair Solis (Ineichen 2008) et le modèle de fraction diffuse Dirlnt (Perez-Ineichen 1998). Il utilise des valeurs journalières de turbidité obtenues du projet MACC-II.
- **Solemi** : basé sur le modèle ciel clair de Bird (Bird 1980) et DirIndex (Perez-ineichen 2002)
- **IrSOLaV** : c'est le seul modèle qui n'est pas basé sur la méthode Heliosat, mais sur une statistique de Box et Whistler. La composante directe est ensuite évaluée au moyen du modèle de Louche (1991) qui n'est autre qu'une formulation améliorée du model de Liu et Jordan.
- **Heliomont** : modèle de MétéoSuisse, basé sur la méthode Heliosat et combiné avec un nouveau modèle de ciel clair développé en collaboration avec le Climate Satellite Facility de EumetSat (Cm-SAF).
- **EnMetSol** : développé par l'université d'Oldenburg dans le cadre du programme européen Heliosat-3. Ce modèle est basé sur la méthode Heliosat, le ciel clair de Dumortier (1998) et la base de données de turbidité de haute résolution de Meteonorm.
- **Cm-SAF** : le modèle est basé sur la méthode Heliosat. L'albédo du sol est évalué sur une fenêtre de 7 jours précédent le temps de l'évaluation. Le modèle ciel clair utilisé est basé sur des Look-up tables calculées au moyen de LibRadTran.
- **MacRad** : le modèle est une évolution du modèle Helioclim v3. Il est basé sur des Look-up tables (LUT), utilise le modèle ciel clair McClear et des données atmosphériques issues du projet MACC-II.

2.3 Méthodes d'évaluation

Si l'on considère un ensemble de couples de valeurs, les unes issues de modèles, les autres de la mesure, on désire connaître l'erreur d'estimation sur la valeur modélisée. Les causes de la dispersion entre ces deux séries de valeurs sont les suivantes :

- Les erreurs de mesure : la comparaison est faite avec des mesures effectuées au sol dont la précision n'est pas toujours connue ou optimale. Ces mesures ne représentent pas la réalité, mais sont entachées d'erreurs dues à la méthode de mesure, le temps d'intégration, la calibration des instruments, leur précision, leur entretien, etc.
- Les paramètres entrant dans le modèle d'évaluation : les modèles sont déterminés physiquement ou empiriquement sur la base de mesures. Lors de l'élaboration d'un modèle, des hypothèses sont faites sur le nombre et le type de variables qui paramétrisent le modèle, ainsi que de la forme de leur effet.

Dans le domaine de l'énergie solaire, ce deuxième point est souvent très important ; on ramène des phénomènes extrêmement complexes par le nombre de variables et leur dynamique à des approximations relativement simples.

Les indicateurs les plus communément utilisés par les chercheurs lors de comparaison entre modèles et mesures sont le biais moyen, l'écart quadratique moyen, l'écart standard et le coefficient de corrélation. Il s'agit de statistique de premier ordre:

- Le **biais moyen** (mbd) traduit un écart systématique entre les données issues du modèle et les valeurs mesurées
- La **déviation standard** (sd) exprime la dispersion des estimations autour du biais, ou la précision intrinsèque du modèle ; elle ne tient pas compte des écarts systématiques.

- L'**écart quadratique moyen** (*rmsd*) donne la précision du modèle, compte tenu des écarts systématiques.
- Et le **coefficient de corrélation** *R*. Le coefficient de corrélation sert à quantifier la linéarité de la relation entre deux séries de données. Il est compris entre -1 et +1. Pour une bonne équivalence entre le modèle et la mesure, la valeur absolue du coefficient de corrélation se rapproche de 1. Le **coefficient de détermination** *R*², égal au carré du coefficient de corrélation, exprime la proportion de variance entre le modèle et la mesure.

Les indicateurs du second ordre utilisés sont définis par le test de Kolmogorov-Smirnov (Massey 1951, Espinar 2009). Ce test évalue la capacité d'un modèle à reproduire les fréquences d'occurrence pour chaque niveau de rayonnement.

3. Résultats

3.1 Modèles ciel clair

Les modèles ciel clair nécessitent la connaissance de l'épaisseur optique atmosphérique *aod* et de la quantité d'eau condensable *w* contenue dans l'atmosphère comme paramètre d'entrée de façon à pouvoir estimer avec précision le rayonnement maximum pouvant atteindre le sol. Ces paramètres peuvent être obtenus soit par mesure directe, soit au moyen de modèles de circulation atmosphérique. Le réseau Aeronet effectue des mesures directes et les met à disposition pour téléchargement. Malheureusement, le nombre de stations de mesures est relativement restreint. Pour améliorer la densité de mesures disponibles, nous avons mis au point une méthode de retro-calculation à partir de mesures des rayonnements global et/ou direct. De façon à valider la méthode, nous avons effectué une comparaison des diverses mesures de l'épaisseur optique. Pour cela, nous avons utilisés les mesures de trois sites du réseau Aeronet : Carpentras, Cabauw et Toravere. La comparaison est illustrée sur la Figure 6 où les valeurs obtenues par retro calcul sont représentées en fonction de celles obtenues du réseau Aeronet. L'écart par rapport à la diagonale du graphique donne un biais d'environ +5% et une déviation standard de 0.3 unité d'épaisseur optique. Le coefficient de corrélation est de 0.92

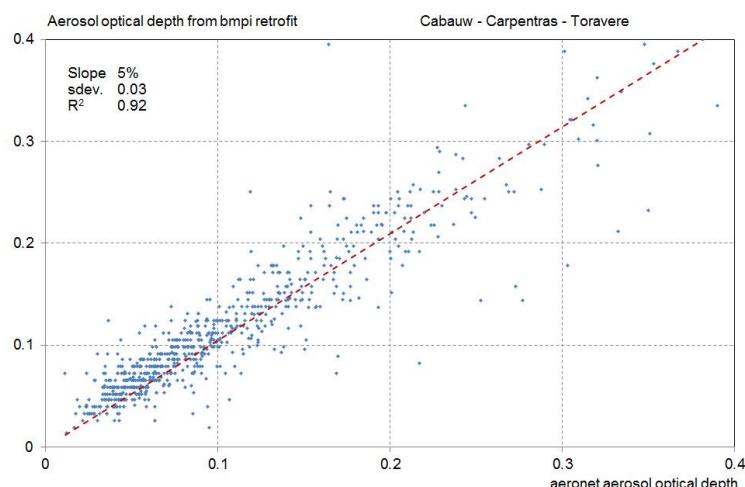


Figure 6 Comparaison des valeurs d'épaisseur optique

De façon à sélectionner les paires horaires de ciel clair, nous avons appliqué les critères suivants :

- Le direct calculé par différence et le direct mesuré doivent être à $\pm 50 \text{ W/m}^2 + 5\%$
- L'indice de clarté global des mesures doit être inférieur à 0.82
- L'indice de clarté modifié des mesures doit être supérieur à 0.65
- La stabilité $\Delta Kt'$ de l'indice de clarté modifié doit être inférieure à 0.01 (variation pour les deux heures entourant la valeur considérée)
- L'épaisseur optique doit être inférieure à 0.5

Ces conditions sont assez restrictives, mais elles garantissent la qualité de la sélection.

Un résumé des résultats obtenus est donné dans la Table III

Model	GHI [W/m ²]	Aerosol source: MACC			Aerosol source: bmpi			DNI [W/m ²]	Aerosol source: MACC			Aerosol source: bmpi		
		mbd	sd	bsd	mbd	sd	bsd		mbd	sd	bsd	mbd	sd	bsd
McClear	628	3.1%	3.7%	3.6%	4.4%	2.5%	4.6%	802	1.3%	10.1%	4.9%	2.2%	3.6%	4.4%
REST2	620	-4.5%	3.9%	5.3%	0.5%	2.6%	1.3%	796	-14.3%	11.6%	15.3%	0.3%	3.4%	2.8%
CPCR2	623	0.7%	3.6%	3.1%	3.5%	2.7%	3.7%	799	-15.4%	11.5%	16.6%	-0.1%	3.3%	2.6%
Solis 2008	620	-0.1%	3.9%	2.7%	2.9%	2.4%	3.2%	796	-15.2%	12.4%	16.4%	0.8%	3.4%	3.0%
Bird	622	3.2%	3.9%	4.3%	6.4%	3.4%	6.6%	799	-9.4%	11.5%	10.7%	5.5%	4.4%	6.2%
ESRA	622	-7.8%	6.1%	8.6%	0.8%	3.4%	1.9%	799	-14.8%	12.1%	15.8%	1.8%	3.4%	4.1%
Kasten	623	-1.2%	4.1%	2.8%	2.8%	2.8%	3.4%	799	-13.3%	11.3%	14.3%	0.5%	3.8%	3.1%

Table III Statistique de comparaison pour tous les sites, modèles et sources d'aérosols

Il est évident que les résultats obtenus avec comme donnée d'entrée une épaisseur optique mesurée directement ou indirectement au sol donnent de meilleurs résultats. Par contre, l'avantage des modèles de circulation est qu'ils permettent l'obtention de valeurs d'aod avec une bonne granularité temporelle et spatiale et couvrent le globe entier.

Ces résultats sont illustrés graphiquement sur la Figure 7

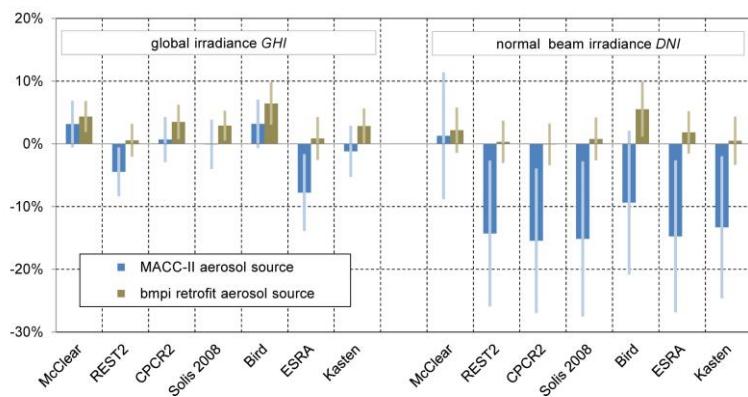


Figure 7 Résultats de la comparaison

Une étude de dépendance avec l'épaisseur optique et la saison n'a pas permis de mettre en évidence des comportements typiques. Un article présentant les résultats complets a été soumis à Solar Energy (Ineichen 2015).

3.2 Modèles tous temps

Les résultats principaux de la validation des modèles tous temps montrent que le rayonnement global peut être évalué à partir de données satellitaires avec un biais négligeable et une déviation standard entre 17% à 24% selon le modèle, et le rayonnement direct avec une précision de 34% à 49% avec un biais variable selon les sites et les modèles.

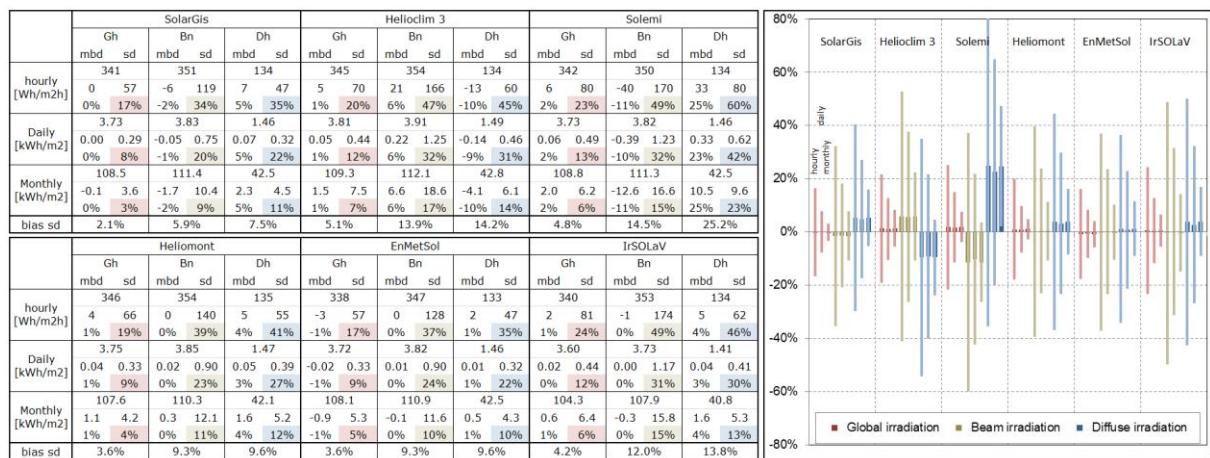


Table IV Résultats de la validation horaire, journalière et mensuelle.

La déviation standard du biais, ou stabilité spatiale des modèles varie de 2% à 5% pour la composante globale et de 6% à 14% pour le direct.

Une analyse détaillée des résultats et conclusions obtenus est disponible dans un rapport complet téléchargeable à partir de <http://www.unige.ch/energie/forel/energie/equipe/ineichen/annexes-iae.html>

L'étude de la variabilité interannuelle montre que tous les modèles d'évaluation du rayonnement global en temps réel présentent un biais qui est inférieur à la déviation standard naturelle calculée sur une période de référence entre 2004 et 2011. En ce qui concerne le rayonnement direct, seul un modèle présente un biais systématique qui se situe entre une et deux déviations standards.

Sites	Global irradiation, mean bias difference mbd										Beam irradiation, mean bias difference mbd															
	Yearly total [kWh/m ²] average over 2004-2010		standard deviation over 2004-2010		PVGIS-CM SAF	WindC (1981-1993)	RefScreen (1961-1990)	NASA-SSE (1983-2005)	MN7 (1980-2000)	ESRA (1981-1990)	Sunlight (1996-2000)	SolarGis (2004-2011)	Helioclim (2004-2011)	Soleini (2004-2011)	EnMetSoli (2004-2011)	iSOlAv (2006-2011)	Yearly total [kWh/m ²] average over 2004-2010	standard deviation over 2004-2010	NASA-SSE (1983-2005)	MN7 (1980-2000)	Sunlight (1996-2000)	SolarGis (2004-2011)	Helioclim (2004-2011)	Soleini (2004-2011)	EnMetSoli (2004-2011)	iSOlAv (2006-2011)
Almeria	1850	2.5%	1.8%	-8.1%	-8.1%	-3.0%	4.9%	0.4%	6.1%	3.0%	3.2%	-1.9%	0.3%	2126	5.5%	-3.8%	-11.1%	15.1%	-1.9%	12.1%	-3.0%	6.3%	-3.9%	-3.9%		
Bratislava	1176	2.9%	3.2%	1.0%	1.1%	-1.0%	1.7%	4.3%	-3.5%	3.2%	-0.2%	5.4%	2.8%	3.9%	4.4%	1191	7.4%	-0.9%	-7.5%	-11.9%	-9.6%	-2.1%	-21.8%	-15.3%	-2.7%	9.1%
Carpentras	1587	2.1%	2.5%	-4.8%	-15.0%	-6.0%	-2.8%	-5.4%	0.4%	0.3%	0.6%	2.7%	1.6%	2.2%	1.2%	1884	4.1%	0.4%	-10.1%	4.9%	-1.8%	-0.3%	-4.2%	3.0%	4.5%	-1.6%
Davos	1383	1.3%	-0.8%	-2.7%	-7.9%	2.1%	-2.9%	-17.5%	-4.2%	11.5%	-13.2%	-4.4%	-8.3%	-7.1%	1420	8.4%	-8.0%	18.1%	-26.2%	-2.8%	21.9%	-33.6%	-9.5%	-13.7%	-36.9%	
Geneva	1282	2.3%	3.5%	-6.3%	0.1%	0.1%	-4.0%	-5.5%	-0.6%	4.2%	0.1%	6.4%	3.5%	5.2%	5.3%	1274	6.4%	1.0%	-7.9%	-5.1%	2.0%	10.2%	-19.4%	-4.4%	11.0%	21.8%
Kassel	1048	2.7%	0.6%	-5.6%	-5.6%	-5.8%	-6.6%	-5.9%	-0.1%	-3.4%	0.8%	-2.9%	1.6%	4.0%	874	3.3%	4.3%	-9.8%	-0.9%	7.0%	1.9%	-4.2%	8.6%	10.9%	4.0%	
Lerwick	810	4.7%	-4.3%	9.2%	9.1%	-3.5%	-4.4%	-2.5%	0.7%	5.4%	3.8%	-3.2%	-4.4%	-4.4%	580	13.3%	55.5%	18.2%	0.8%	6.9%	50.4%	-11.5%	21.6%	14.4%		
Lindenberg	1120	3.8%	-3.7%	-3.8%	-3.8%	-9.8%	-3.9%	-12.3%	-4.5%	-3.1%	-2.1%	-3.5%	-4.8%	0.4%	-0.4%	1026	9.6%	-8.1%	1.4%	-0.4%	-6.4%	5.8%	-27.9%	-15.1%	3.5%	30.5%
Madrid	1697	4.9%	3.5%	-5.2%	-5.2%	-3.1%	-2.5%	1.7%	1.4%	4.4%	5.7%	5.6%	1.4%	1.9%	1798	5.2%	10.0%	-0.8%	14.1%	5.4%	8.6%	4.8%	16.4%	4.4%	-2.3%	
Nantes	1266	3.4%	1.5%	-5.2%	-3.4%	-6.7%	-2.2%	-0.9%	-2.7%	-3.3%	0.4%	3.3%	0.7%	-3.8%	1.3%	1307	6.7%	-12.1%	-9.6%	-8.8%	-8.4%	2.7%	-11.1%	4.2%	-9.7%	0.7%
Payerne	1278	2.4%	1.7%	-8.4%	-2.5%	0.4%	-1.9%	-8.3%	-2.8%	0.7%	-6.4%	1.8%	-0.1%	2.1%	-4.8%	1191	4.4%	11.1%	5.9%	2.0%	7.0%	-3.4%	-5.8%	6.1%	12.2%	12.5%
Sedé Boer	2114	1.2%	-9.2%	0.5%	-6.7%	-3.9%	-4.0%	0.6%	-6.1%	3.4%	4.7%	-3.9%	-1.7%	-1.7%	2382	3.6%	4.6%	-5.4%	-4.6%	-16.9%	-8.7%	-3.1%	-11.3%	-7.8%		
Tamanrasset	2345	1.8%	-2.8%	0.8%	2.6%	-8.1%	0.9%	-1.2%	2.1%	-1.8%	-1.0%	-0.8%	-0.8%	-0.8%	2355	4.0%	6.1%	18.1%		2.5%	14.7%	-10.5%	-9.2%	10.8%		
Torrevieja	981	3.8%	3.1%	3.1%	3.1%	-0.1%	4.6%	-2.3%	2.1%	-1.5%	-4.4%	-5.4%	-0.8%	-0.8%	1028	8.8%	8.4%	2.4%	7.2%	-6.5%	7.2%	-28.4%	-14.3%	-8.7%	1.9%	
Valentia	1021	4.6%	9.4%	-3.9%	-4.8%	8.0%	-5.3%	-4.7%	-4.2%	-3.6%	4.1%	3.2%	1.8%	-1.6%	1.4%	992	13.4%	10.7%	-21.5%	-21.3%	3.3%	-25.1%	-2.3%	-11.6%	1.9%	
Vaulx-en-Velin	1304	4.4%	3.4%	-7.8%	-4.0%	-3.0%	-6.3%	-3.3%	0.4%	3.1%	2.6%	7.3%	5.9%	2.4%	3.6%	1359	5.3%	-2.1%	-11.6%	-0.5%	-0.9%	4.2%	-4.7%	10.1%	0.1%	-0.5%
Wien	1175	2.7%	0.5%	-6.8%	-6.0%	-0.8%	1.0%	-7.0%	-1.4%	-0.3%	-3.0%	3.4%	0.4%	0.4%	0.7%	1112	8.0%	2.9%	-3.1%	-2.5%	-2.3%	4.0%	-12.7%	-3.5%	5.9%	15.0%
Zilani	1024	3.3%	-6.1%	-3.2%	2.5%	-2.6%	6.0%	-1.4%	10.9%	-3.2%	-2.6%	-6.3%	-17.6%	-17.6%	1000	9.1%	13.4%	-0.1%	20.5%	-0.2%	31.9%	-26.5%	-7.3%	-5.3%	-13.6%	
All sites	1359	2.9%	0.1%	-3.5%	-3.5%	-3.3%	-2.3%	-4.5%	-1.6%	-0.1%	1.4%	1.8%	1.0%	-0.8%	0.5%	1383	6.3%	3.8%	-1.6%	-0.1%	-1.6%	5.9%	-11.3%	0.1%	-0.1%	-0.4%
All sites absolute mean bias	3.4%	4.0%	5.1%	5.1%	3.0%	5.1%	3.9%	1.7%	3.9%	3.9%	2.9%	2.9%	2.9%	3.0%			7.5%	9.3%	9.5%	4.8%	10.0%	12.0%	7.8%	7.9%	7.8%	
Standard deviation of mbd	4.6%	4.6%	6.5%	6.3%	3.4%	5.7%	5.9%	2.1%	5.1%	4.8%	3.6%	3.6%	3.6%	4.2%			9.0%	11.9%	13.2%	5.9%	13.9%	14.5%	9.3%	9.4%	12.0%	
<i>mbd</i> within one standard deviation										<i>mbd</i> within two standard deviations										<i>mbd</i> higher than two standard deviations						

Table V Variabilité interannuelle comparé au biais moyen. Les différentes couleurs indiquent la marge d'erreur comparée à la variabilité interannuelle.

Un nouvel algorithme développé par le Climat SAF (CM-SAF) d'Eumetsat a été évalué selon les mêmes critères que les modèles précédemment validés. Les résultats ont été présentés dans le cadre d'un workshop qui s'est déroulé en mars 2014 à Grainau en Allemagne.

Par ailleurs, le modèle MacRad produit par MineParisTech à Sophia Antipolis et basé sur le projet MACC d'évaluation de la turbidité et de la vapeur d'eau atmosphérique de granularité tri-horaire dérivées de modèles de circulation chimique dans l'atmosphère est également en cours de validation. Il s'agit d'une évolution de Helioclim.

3.2.1 Validation du modèle Cm-SAF

Les mêmes critères de validation que ceux appliqués pour la validation ci-dessus au moyen de données de 18 sites européens et de Nord Afrique ont été appliquées au données CM-SAF.

Une illustration des résultats obtenus est donnée sur les graphes suivants :

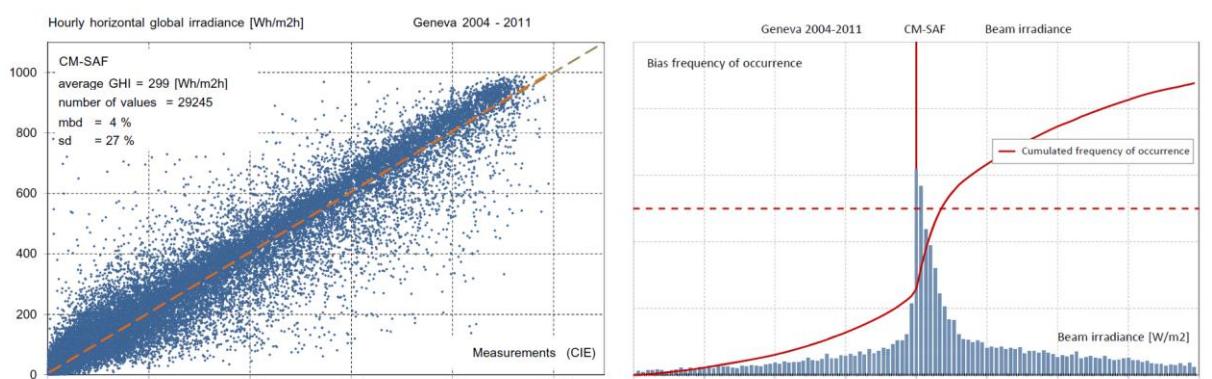


Figure 8 : Rayonnement global évalué en fonction du rayonnement mesuré (à gauche), distribution des écarts autour de l'axe 1:1 pour la composante directe (à droite)

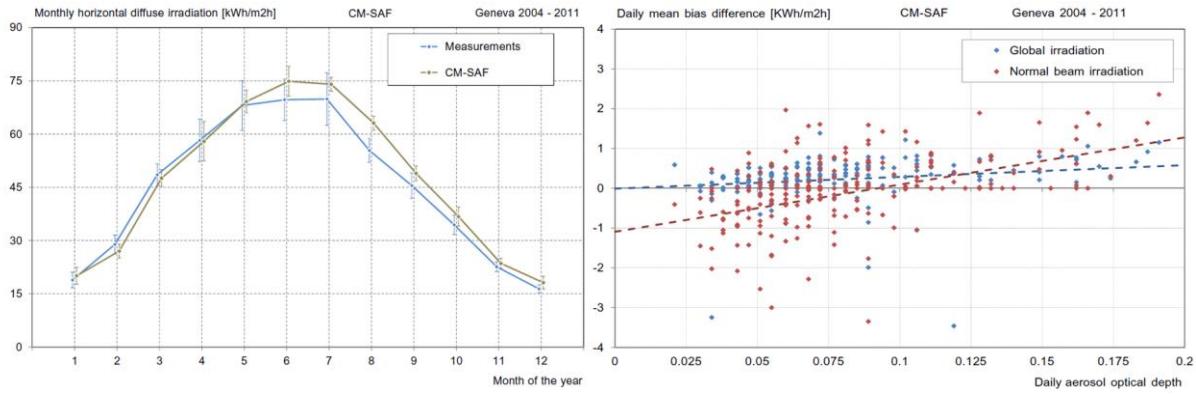


Figure 9 : Distribution mensuelle des écarts et déviations standards pour le rayonnement diffus (à gauche) et biais du modèle en fonction de l'épaisseur optique pour le GHI et le DNI (à droite)

La comparaison des résultats avec les différents algorithmes testés en 2013 est illustrée sur la Figure 10 et montre que le modèle CM-SAF présente une précision comparable aux autres modèles.

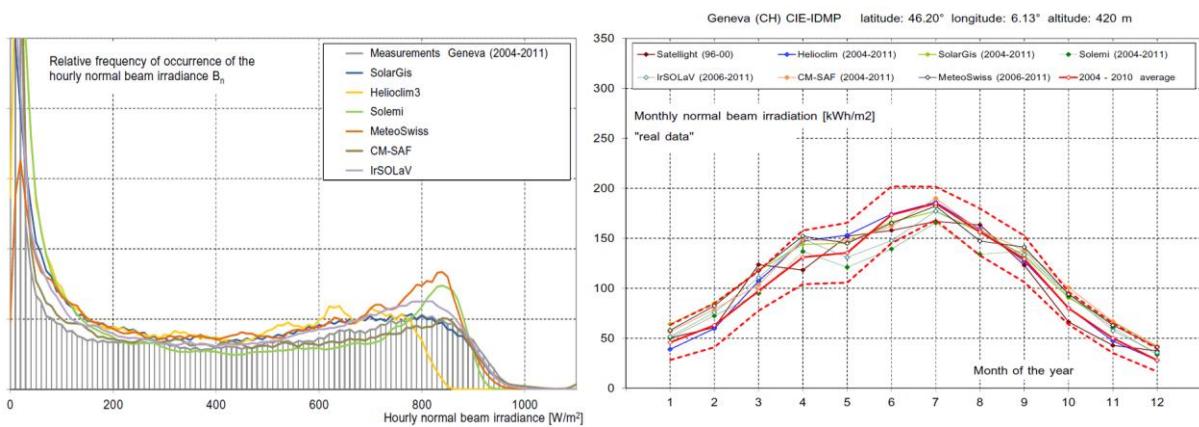


Figure 10 : comparaison des résultats obtenus avec les autres modèles testés pour le rayonnement direct.

Les principaux résultats obtenus lors de cette validation effectuée sur un total de 102 sites-ans, 470'000 valeurs horaires, 43'000 valeurs journalières et 1'500 valeurs mensuelles sont les suivants :

- Valeurs horaires biais négligeable $sd(Gh) = 16-20\%$ $SD(Bn) = 30-35\%$
- Valeurs journalières biais négligeable $sd(Gh) = 8-10\%$ $SD(Bn) = 20-25\%$
- Valeurs mensuelles biais négligeable $sd(Gh) = 3 - 5\%$ $SD(Bn) = 9-12\%$

3.2.2 Validation du modèle MacRad

Ce modèle, contrairement à la version 3 de Helioclim qui se basait sur des données climatiques mensuelles de turbidité, utilise des valeurs journalières d'épaisseur optique et de vapeur d'eau atmosphérique comme données d'entrée par l'intermédiaire du modèle ciel clair McClear validé ci-dessus. L'amélioration est notable tant au niveau du ciel clair que des résultats obtenus pour la composante directe du rayonnement. En effet, d'une part, cette composante est la plus sensible aux paramètres d'entrée, et d'autre part, la variabilité de ces paramètres est assez importante d'un jour à l'autre.

Une illustration des résultats obtenus est donnée sur la Figure 11 où le diagramme 1:1 est donné pour le rayonnement direct, ainsi que la répartition du biais en fonction du rayonnement.

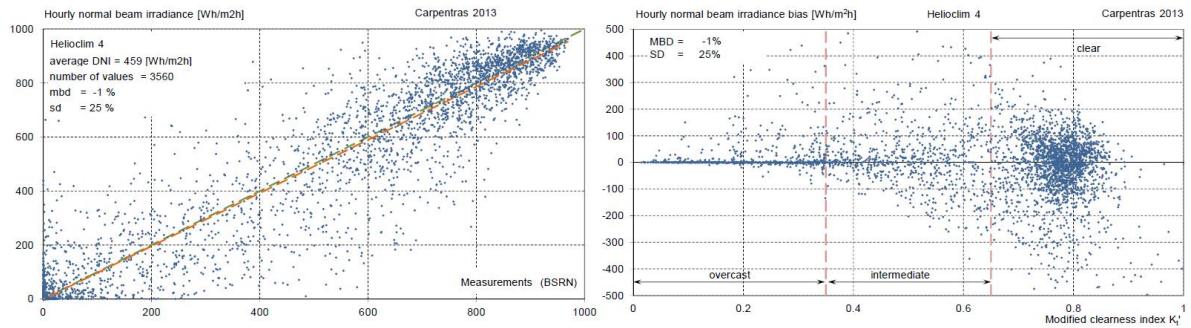


Figure 11 : Diagramme 1:1 de la composante directe pour le site de Carpentras (à gauche) et répartition du biais en fonction de ce rayonnement sur le graphe de droite.

L'amélioration obtenue est particulièrement mise en évidence par l'observation de la dépendance du biais avec l'épaisseur optique des aérosols comme illustré sur la Figure 12, où le graphe de gauche représente le biais de la version 3 de Helioclim, alors que le graphe de droite celui de la nouvelle version.

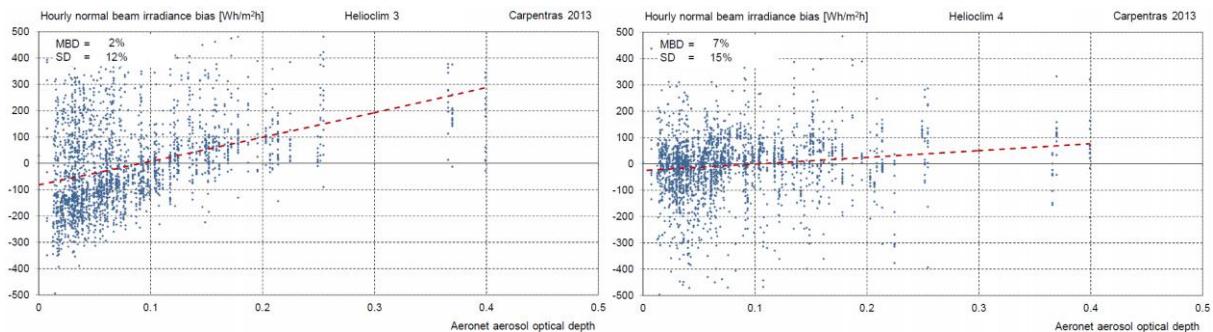


Figure 12 : Répartition du biais en fonction de l'épaisseur optique des aérosols, pour Helioclim v3 et MacRad (Helioclim v4)

Entre les deux versions, on constate également une amélioration de la fréquence de distribution des valeurs.

Cette évaluation a été effectuée sur une seule année et ne saurait être entièrement représentative de la valeur du modèle. Une évaluation complète sur toutes les mesures disponibles est en cours.

Evaluation des résultats

La validation indépendante des divers modèles d'irradiance est une phase essentielle dans le processus de développement et de banquabilité de la ressource solaire. Le point fort du travail que nous avons effectué réside en une méthodologie unifiée de comparaison. En effet, si les valeurs absolues issues de la validation ne sont pas directement comparables à d'autres travaux dans le domaine, elles permettent de mettre en évidence les points forts et faibles des différents algorithmes par une validation sur les mêmes couples de valeurs.

La validation sur le long terme est le second point essentiel d'une telle étude. En effet, les variations interannuelles des rayonnements global et diffus sont relativement importantes, ce qui peut avoir une influence non négligeable sur les résultats obtenus. Ce point a été mis en évidence lors de l'étude de cette variabilité interannuelle.

L'utilisation d'un nombre important de sites de validation répartis spatialement permet d'évaluer le bon comportement des modèles. En effet, même si le biais moyen sur tous les sites est faible, si la déviation standard de ces biais est élevée, le modèle, quel qu'il soit, est moins précis et moins fiable.

Conclusions

La première remarque concernant ce travail, est que le contrôle de qualité des données utilisées pour une telle validation est un élément clé de l'analyse. Même si les données ont été dûment vérifiées par l'organisme en charge de l'acquisition, des incertitudes persistent et ont une influence sur la validation. Le cas le plus favorable consiste en des mesures complémentaires et redondantes qui permettent une validation plus précise des données au sol.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Le modèle ciel clair Solis est le seul modèle ayant un comportement coherent sur toute la gamme de la géométrie solaire,
- Les distributions des écarts modèle-mesure sont proche d'une distribution normal, ce qui rend la statistique fiable,
- Trois des modèles ciel clair donne des résultats très comparables: McClear, REST2 et solis. La déviation standard est de l'ordre de respectivement 3% et 4-5% pour les rayonnements global et direct. La déviation standard du biais est du même ordre de grandeur,
- Quel que soit le modèle et le site, pour une valeur donnée d'indice de clarté, la valeur maximum de rayonnement direct n'est jamais atteinte par les modèles,
- La dépendance du biais avec l'épaisseur optique montre sensiblement le même comportement pour tous les modèles ciel clair,
- Aucune dépendance saisonnière systématique n'a pu être mise en évidence,
- pour des latitudes de 20° à 60°, des altitudes du niveau de la mer à 1600m et une large gamme de climats, le rayonnement global tout temps peut être évalué à partir de données satellitaires avec une précision de 17%, et le rayonnement direct de 34%,
- la variabilité du biais varie de 2% à 5% pour le rayonnement global horaire, et de 6% à 14% pour le direct,
- comme déjà mis en évidence, le principal effet sur la précision des modèles provient de la connaissance de la turbidité atmosphérique. En effet, une connaissance journalière de l'épaisseur optique améliore sensiblement les résultats obtenus par rapport à l'utilisation de banques de données climatiques généralement au pas de temps mensuel,
- même si la couverture neigeuse est prise en compte dans certains des modèles satellitaires, l'irradiance évaluée pour des sites en altitude comme Davos présente une dispersion plus élevée,
- pour la majorité des sites, SolarGis, Heliomont et EnMetSol donnent les meilleures statistiques pour toutes les composantes.

Coopération Nationale

La coopération nationale se borne à une application potentielle des résultats au modèle de ressource solaire Meteonorm développé par Meteotest. En effet, les deux participants suisses à la Tâche 46 effectuent des travaux différents mais complémentaires.

Coopération Internationale

Nous avons eu des échanges fructueux avec d'autres projets, notamment en ce qui concerne le rayonnement direct. Le lien avec la Tâche 14 PVPS est entretenu par Meteotest.

Références

- Bird, R.E., Huldstrom, R.L. (1980). Direct insolation models. *Trans. ASME J. Sol. Energy Eng.* 103, 182–192.
- Cano, D., Monget, J., Albuisson, M., Guillard, H., Regas, N., & Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37, 31-39
- Dumortier, D. (1995) Modelling global and diffuse horizontal irradiances under cloudless skies with different turbidities. Daylight II, JOU2-CT92-0144, Final Report Vol. 2.
- Geiger M, Diabaté L, Ménard L.,Wald L. (2002) A web Service for Controlling the Quality of Measurements of Global Solar Irradiation. *Solar Energy*, 73 (6), 475-480.
- Gueymard C. (1989) A two-band model for the calculation of clear Sky Solar Irradiance, Illuminance, and Photosynthetically Active Radiationb at the Erath Surface. *Solar Energy*, Vol. 43, N° 5, 253-265
- Gueymard C. (2003) Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part 1: Detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 355–379, Corrigendum: *Solar Energy* 76, 513 (2004).
- Ineichen P. (2008) A broadband simplified version of the Solis clear sky model. Pierre Ineichen. *Solar Energy*, Volume 82, Issue 8, Pages 758-762
- Kasten F. (1980) A Simple Parametrization of the Pyrheliometric Formula for Determining the Linke Turbidity Factor. *Meteorol. Rdsch.* 33, 124-127
- Lefèvre M. et al. (2013) McClear : a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*
- Liu B.Y.H, Jordan R.C (1960) The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Volume 4, Issue 3, Pages 1-19
- Louche, A., Notton, G., Poggi, P. and Simonnot, G., (1991) Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. *Solar Energy*. 46, 261-266.
- Massey Jr., F.J., (1951) The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association* 4, 68–78.
- Mueller R., Ineichen P. et al. (2004) Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment* 91, 160–174
- Perez R. Ineichen P. et al. (1990) Making full use of the clearness index for parametrizing hourly insolation conditions. *Solar Energy*, Vol. 45, N° 3,111-114
- Perez R., Ineichen P., Maxwell E., Seals R., Zelenka AQ. (1992) Dynamic global to direct irradiance conversion models. *ASHRAE Transactions-Research series*, pp354-369.
- Rigollier C., Bauer O., Wald L. (2000) On the Clear Sky Model of the ESRA - european Solar Radiation Atlas - with Respect to the Heliosat Method. *Solar Energy* 68 (1), 33-48.

Publications dans le cadre du projet

- [1] Ineichen P. (2011) Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations.
- [2] Ineichen P. (2011) Global irradiance on tilted and oriented planes: model validations.
- [3] Ineichen P. (2011) Global irradiation: average and typical year, and year to year annual variability.
- [4] Ineichen P. (2011) Global irradiance: typical year and year to year annual variability. In: ISES Solar World Congress, Proceedings. Kassel (Germany).
- [5] Meyer R., Gueymard C., Ineichen P. (2011) Standardizing and benchmarking of modeled DNI data products. In: Solar Paces. Perpignan (France).
- [6] Ineichen P. (2013) Long term satellite hourly, daily and monthly global, beam and diffuse irradiance validation. Interannual variability analysis. IAE report, University of Geneva
- [7] Ineichen P. (2013) Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation. International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry September 23-25, Freiburg, Germany.
- [8] Ineichen P. (2014) Long term CM-SAF satellite global and beam irradiance validation. Eumetsat CM-SAF User Workshop. Grainau, Germany
- [9] Ineichen P. (2014) Satellite irradiance based on MACC aerosols :helioclim 4 and SolarGis ; global and beam components validation. Eurosun 2014, 16-19 September
- [10] Ineichen P. (2015) Satellite Derived Irradiance: Clear Sky and All-Weather Models Validation on Skukuza Data. SA-SEC2015, Third Southern African Solar Energy Conference, 11 – 13 May 2015, Kruger National Park, South Africa
- [11] Ineichen P. (2015) Long Term Validation of Models that evaluate the Clear Sky Global and Beam Irradiance. Submitted to Solar Energy