



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 3 juin 2011

Solar Resource Knowledge Management

IEA SHC Task XXXVI

Ce projet vise à rendre accessible aux utilisateurs potentiels les données de gisement solaire sous une forme unifiée, précise, complète et simple à utiliser par l'intermédiaire d'un portail internet. Ces données peuvent être des archives, des valeurs générées par logiciel, des valeurs en ligne dérivées à partir de satellites météorologiques, ou des prévisions à court et moyen terme. Elles peuvent être gratuites ou payantes.

La sous-tâche A du projet consiste en la définition et l'application de critères de contrôle de qualité et de classification de banques de données de référence, principalement en ce qui concerne le rayonnement. Il s'agit également d'analyser et d'évaluer certains modèles permettant le passage d'une composante à une autre du rayonnement solaire.

Les sous-tâches C1 et C2 visent d'une part à l'amélioration du rayonnement de référence par ciel clair, et d'autre part à une étude des variations interannuelles à mettre en comparaison avec la précision des modèles d'évaluation et de prévision du rayonnement solaire.

Le projet a été mené conjointement avec le programme européen MESOR pour lequel un prototype de mise à disposition de différents paramètres de rayonnement et climatiques est d'ores et déjà en ligne sur le site du projet (www.mesor.org).

La participation de l'Université de Genève se situe principalement dans la modélisation de l'irradiance pour une meilleure connaissance du gisement solaire. En effet, l'amélioration de la qualité des données et des résolutions spatiale et temporelle passent par la modélisation.

Dans ce cadre, une analyse et une validation de différents modèles a été effectuée et de nouvelles techniques d'évaluation ont été développées. L'ensemble des résultats ont été publiés dans des revues spécialisées, rapportée dans des conférences et mise à disposition sous forme de rapport AIE disponibles en téléchargement.



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

**INSTITUT DES SCIENCES
DE L'ENVIRONNEMENT**

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de Recherche Energétique
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Cofinancement:

Université de Genève, 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

Responsable de domaine de l'OFEN: Andreas Eckmanns

Chef de programme de l'OFEN: Jean-Christophe Hadorn

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: 101498 / 151761

Table des matières

1. But du projet	4
2. Travaux effectués et résultats acquis.....	4
2.1. Meteonorm.....	4
2.2. Modèle de fraction diffuse.....	6
2.3. Modèle ciel clair	7
2.4. Trouble atmosphérique.....	7
2.5. Modèles satellite.....	9
2.6. Variabilité interannuelle	11
3. Collaboration internationale.....	13
4. Evaluation du projet	13
5. Publications dans le cadre du projet	13

Abstract

The goal of SHC Task 36 "Solar Resource Knowledge Management" is to provide the solar energy industry, the electricity sector, governments, researchers, and renewable energy organizations and institutions with the most suitable and accurate information of the solar radiation resources at the Earth's surface in easily-accessible formats and understandable quality metrics. The scope of solar resource assessment information includes historic data sets and currently derived data products using satellite imagery and other means.

Solar Resource Knowledge Management

1. But du projet

Les buts du projet sont de fournir aux acteurs de l'industrie solaire, du secteur de l'électricité, des gouvernements, des organisations et institutions ayant à faire avec les énergies renouvelables, l'information la plus précise et la plus complète en ce qui concerne le gisement solaire. Cette information devra être facilement accessible, dans un format simple et uniforme et de grande qualité. Elle comportera des données produites par logiciels pour des simulations, des données historiques mesurées pour le dimensionnement de systèmes, des données actuelles basées sur les images satellites, ainsi qu'une évaluation de possibles prévisions à court et moyen terme.

La première sous-tâche du projet consiste en une évaluation des différentes données historiques, présentes et futures accessibles dans le cadre d'un tel projet, de définir une procédure de contrôle de qualité et de classification des données suivant leur provenance, leur qualité et leur utilisation. Les sous-tâches C1 et C2 visent entre autres à l'amélioration du rayonnement de référence par ciel clair, et à une étude des variations interannuelles à mettre en comparaison avec la précision des modèles d'évaluation et de prévision du rayonnement solaire.

2. Travaux effectués et résultats acquis

2.1. Meteonorm

Dans un premier temps, une validation intensive du logiciel Meteonorm produit par Meteotest et financé par l'OFEN dans les années 1990 a été effectuée. Les tests principaux ont été axés sur le rayonnement et la température, les deux paramètres qui jouent un rôle clé dans les systèmes thermiques et photovoltaïques. Par ailleurs, il a paru important d'effectuer une étude des variations climatiques de ces dernières années en regard avec les données intégrées au logiciel (pour la Suisse, les données datent d'un vingtaine d'années).

En ce qui concerne la température, l'étude s'est concentrée sur les 3 mois d'été, période durant laquelle les données de température sont utilisées pour l'évaluation des besoins de climatisation. Les valeurs exceptionnelles rencontrées durant l'été 2003 ont motivé cette analyse. Il résulte de cette étude [Ineichen 2006a, Ineichen 2006d] que le logiciel peine à mettre en évidence les différences systématiques de température entre les zones urbaine et rurale, et que, même en y ajoutant des données réelles en valeurs moyennes mensuelles, le logiciel ne parvient pas à tenir compte des cas telles l'année 2003.

Le rayonnement solaire global et direct produit par le logiciel Meteonorm a été étudié et comparé sur huit années de 1998 à 2005, incluant l'année exceptionnelle 2003. Il en résulte que malgré l'utilisation de données moyennes mesurées pour des années spécifiques, les banques de données générées par le logiciel ne reflètent pas la réalité. A titre d'exemple, la Figure 1 montre que, s'il est évident que l'année 2003 était exceptionnelle, le logiciel ne le montre pas, par contre, il met en exergue l'année 1999 alors qu'en réalité celle-ci ne se différencie pas de la moyenne.

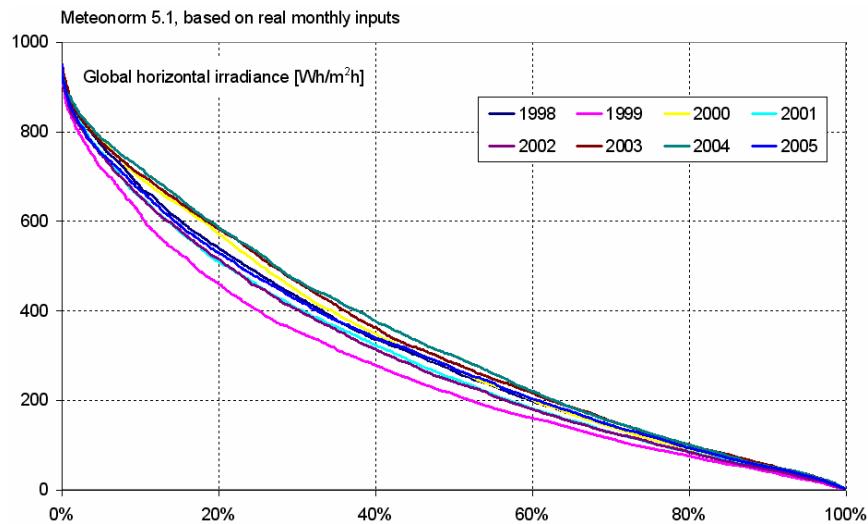


Figure 1 Fréquence d'occurrence cumulée du rayonnement global horizontal telle que générée par le logiciel Meteonorm et basé sur des valeurs moyennes mensuelles réelles mesurées.

Si la valeur moyenne du rayonnement est relativement bien reproduite par Meteonorm, un aspect important est mis en évidence par l'analyse des fréquences d'occurrence de l'indice de clarté (rayonnement global horizontal normalisé par la valeur correspondante en dehors de l'atmosphère). Ce paramètre est représentatif de la capacité du logiciel à produire la valeur correcte de rayonnement au bon moment de la journée.

Suite à cette étude, la nouvelle version du logiciel de génération de données Meteonorm a été testée sur des données mesurées à Genève [Ineichen 2006b]. Il en résulte une bonne amélioration pour les trois composantes du rayonnement, tant au niveau de la moyenne qu'au niveau de la dynamique. La figure 2 illustre l'amélioration de la représentation dynamique du rayonnement. Le graphe supérieur donne la fréquence d'occurrence relative d'une certaine valeur de l'indice de clarté direct pour les mesures en grisé, et les deux versions de Meteonorm. Le graphe inférieur donne la différence entre modèle et mesure. Il illustre bien l'amélioration d'une version à l'autre.

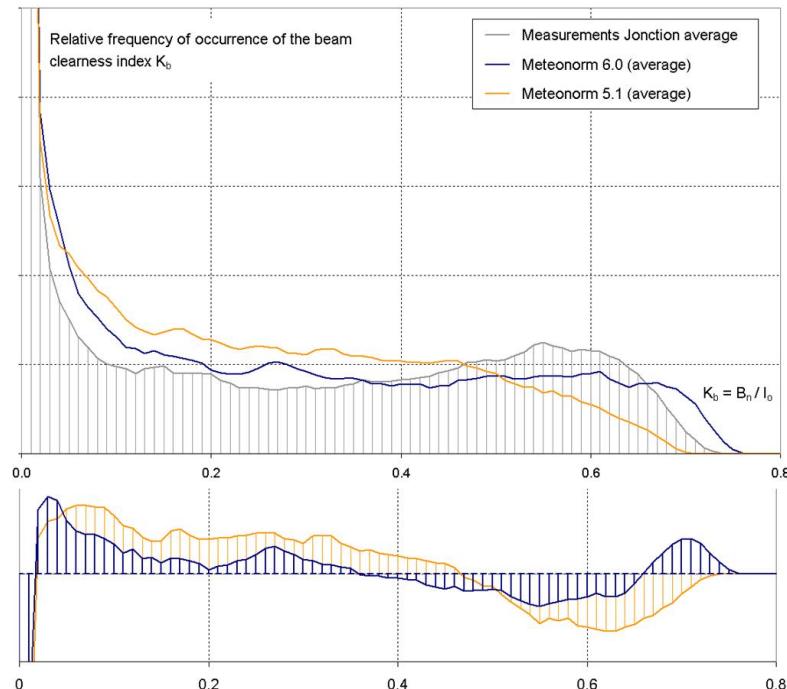


Figure 2 Fréquence d'occurrence relative de l'indice de clarté direct. En gris les valeurs mesurées, comparées aux valeurs modélisées par Meteonorm en jaune et en bleu. Sur le graphe du bas, la différence modèle mesure est représentée et montre l'amélioration de la version 5 à la version 6.

Les résultats sont quelque peu différents en testant le logiciel au moyen de données mesurées dans certaines stations situées en Europe et aux Etats-Unis (Camborne en Grande Bretagne, Boulder au Colorado et Toravere en Estonie); ils sont moins satisfaisants, que ce soit au niveau du biais ou de la précision. La Figure 3 illustre ces différences sous forme d'écarts relatifs entre le modèle et la mesure.

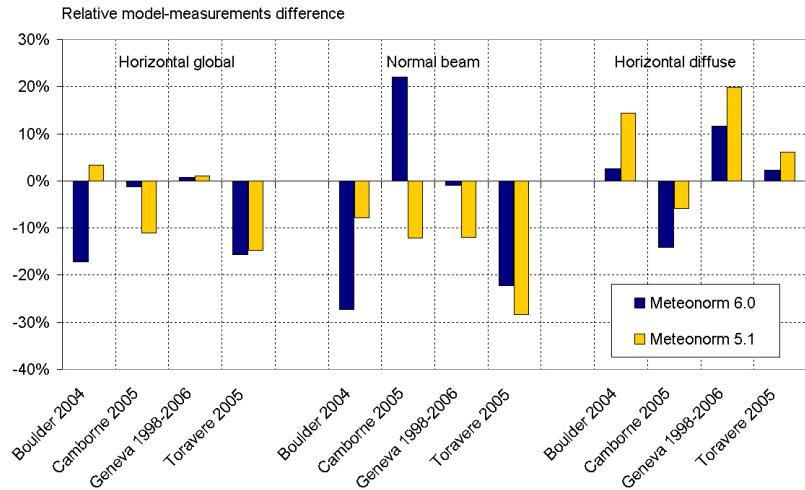


Figure 3 Différence relative modèle-mesure pour les 4 stations étudiées.
Si l'amélioration est marquée pour la station de Genève, elle est variable pour les autres sites.

2.2. Modèle de fraction diffuse

En ce qui concerne la dérivation du rayonnement direct à partir de la connaissance du rayonnement global, nous avons validé 3 state-of-the-art modèles au moyen de données de 22 stations de mesure en Europe et aux Etats-Unis; le modèle de Erbs sert ici de référence pour la comparaison. Les résultats en termes d'écarts quadratiques moyens sont variables selon les stations et se situent entre 65 et 120 W/m² pour le rayonnement direct normal. Les résultats sont illustrés sur la Figure 4 [Ineichen 2008].

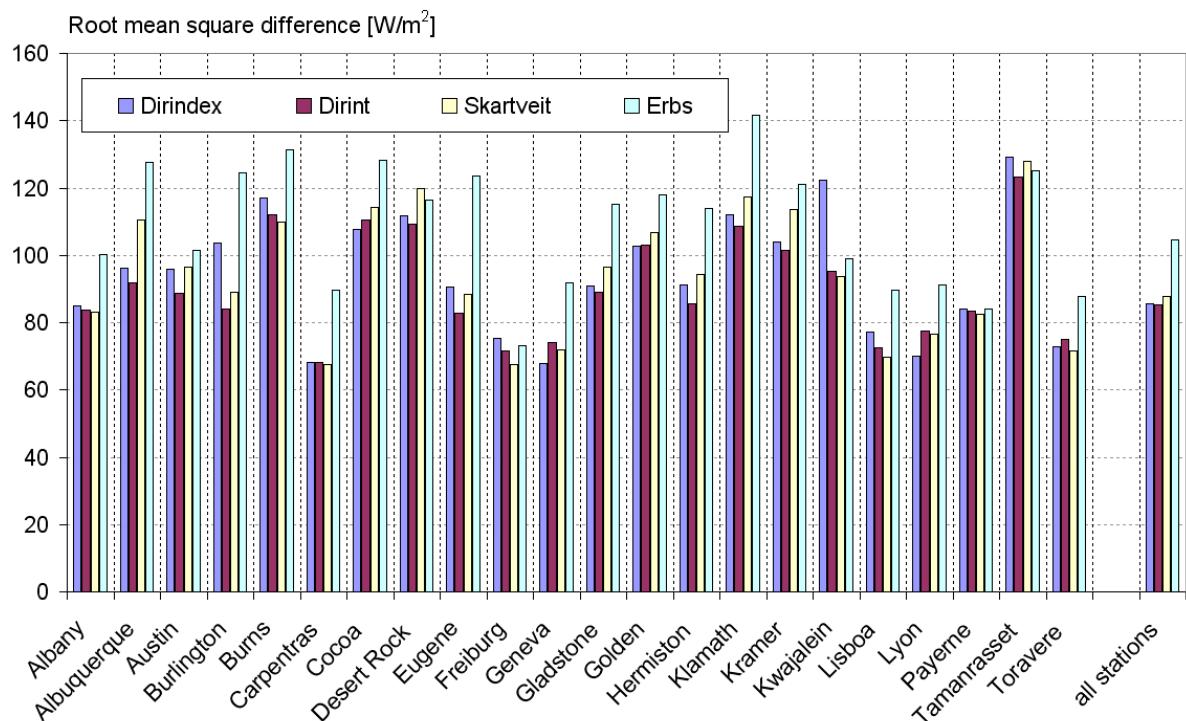


Figure 4 Ecarts quadratiques moyens entre modèles et mesures pour les 3 modèles (Erbs sert de référence) obtenus avec les données de 22 stations.

2.3. Modèle ciel clair

La modélisation du rayonnement par ciel clair est un élément clé pour tout le domaine de l'évaluation du rayonnement solaire. En effet, il représente la fonction de normalisation la plus généralement utilisée. Nous avons effectué une validation de huit modèles de ciel clair au moyen de données acquises en 16 sites [Ineichen 2006c]. Les résultats de cette validation sont donnés sur la Figure 5 en valeurs relatives

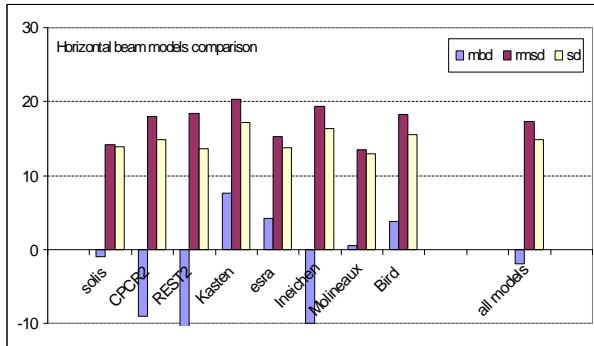


Figure 5 Biais moyen, déviation standard et écart quadratique moyen pour les huit modèles sur les 16 stations.

Les résultats de deux études annexes ont été publiés sous forme de notes techniques. La première porte sur une version simplifiée large bande et analytique du modèle de spectral ciel clair Solis [Ineichen 2008b]. La seconde concerne une expression reliant les contenus en aérosol et en vapeur d'eau de l'atmosphère au coefficient de trouble de Linke, jusqu'ici le plus communément utilisé [Ineichen 2008c]. Le principal résultat est illustré sur la figure 6.

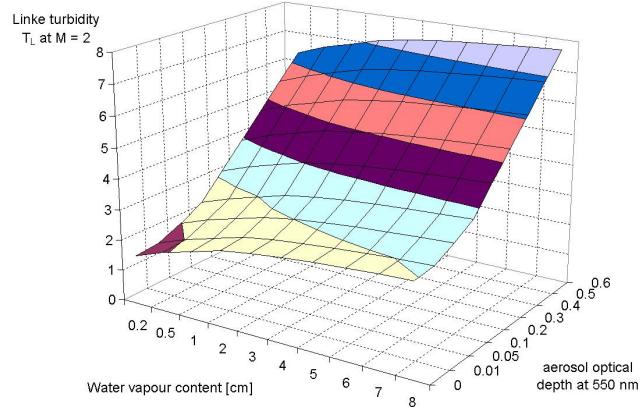


Figure 6 Coefficient de trouble de Linke représenté en fonction du contenu atmosphérique en vapeur d'eau et en aérosols.

2.4. Trouble atmosphérique

La plupart des modèles concernant l'irradiance solaire dépendent de la connaissance du rayonnement par ciel clair, lui-même lié à la quantité de vapeur d'eau condensable et d'aérosols dans l'atmosphère. Après avoir développé une version simplifiée du modèle ciel clair Solis [Ineichen 2008], nous avons mis au point une méthode d'analyse du rayonnement global permettant la détermination du trouble atmosphérique par retro calcul [Ineichen 2010a]. Connaissant la quantité d'eau condensable contenue dans l'atmosphère, il est possible d'estimer une valeur d'épaisseur optique. Sur la figure 7, le graphe de gauche est issu d'une mesure spectrale, alors que le graphe de droite du seul rayonnement global horizontal. Les valeurs mensuelles évaluées selon les deux méthodes sont comprises dans les écarts standards comme illustré sur la Figure 8 pour des mesures effectuées à Tamanrasset.

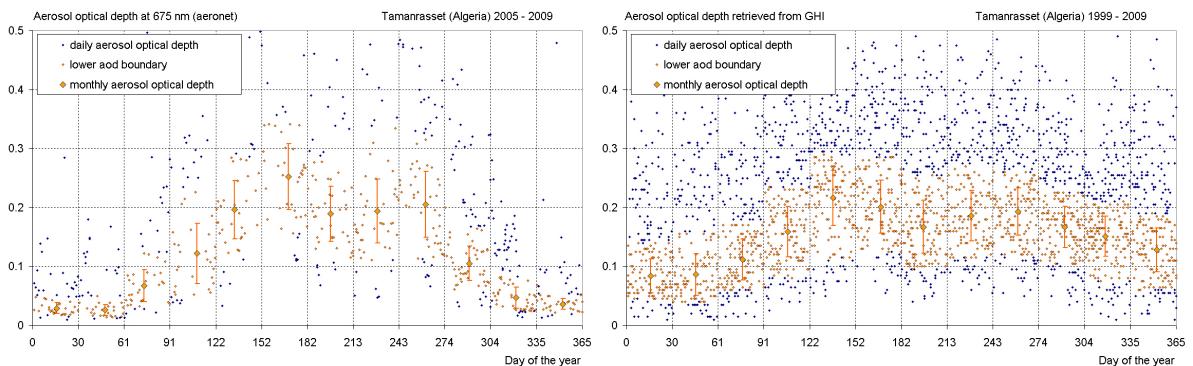


Figure 7 Epaisseurs optiques des aérosols évaluée sur la base de mesures spectrale à gauche, et de mesure large bande à droite pour le site de Tamanrasset.

Si par ailleurs, le rayonnement direct est également mesuré, cette méthode permet une estimation du type d'aérosols en question.

Le facteur de trouble de Linke étant un coefficient d'atténuation combinant la teneur atmosphérique en aérosols et en vapeur d'eau, il est possible d'appliquer la même méthode de retro calcul pour l'obtenir. Pour cela, le calcul est effectué au moyen d'un modèle ciel clair basé sur ce coefficient de trouble, en l'occurrence celui développé par l'ESRA. Une illustration pour le site de Bondville est donnée sur la Figure 8, à gauche calculé d'après le rayonnement direct, et à droite au moyen de la méthode décrite plus haut.

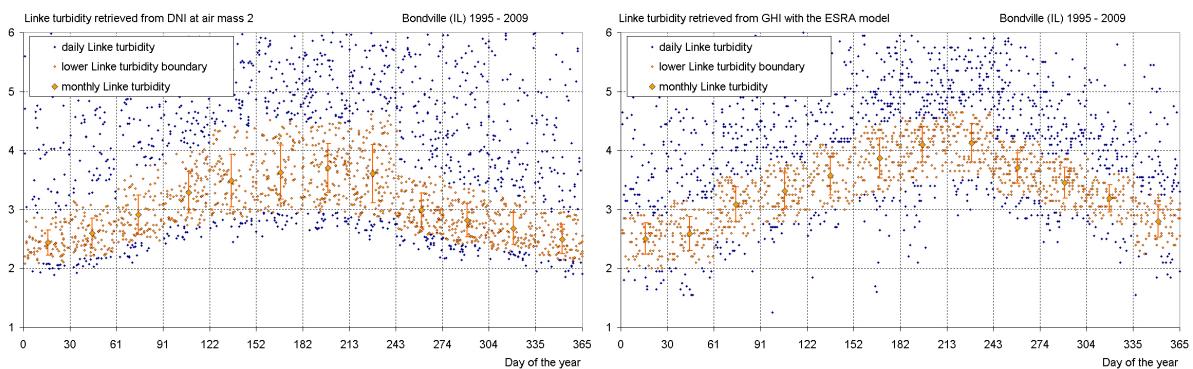


Figure 8 Trouble de Linke évalué à partir du rayonnement direct et retro calculé d'après le rayonnement global.

La méthode a été appliquée sur des mesures d'une trentaine de sites situés en Europe et aux Etats-Unis. Les résultats sont illustrés sur la Figure 9 en moyennes annuelles.

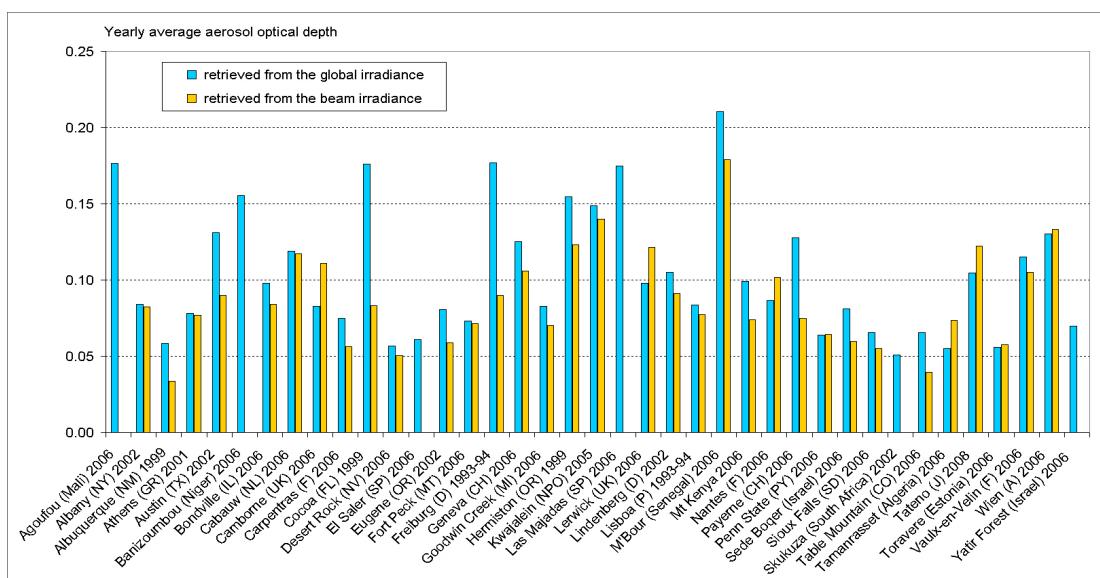


Figure 9 Détermination de l'épaisseur optique moyenne annuelle sur la base du rayonnement global et direct.

2.5. Modèles satellite

L'évolution des techniques de dérivation du rayonnement solaire à partir de données satellites ainsi que l'ampleur de la demande font que de nombreux laboratoires et compagnies privées offre des données de ce type. Les algorithmes d'évaluation des composantes globales et diffuses sont très divers, utilisant des données spécifiques d'entrée en plus des images du satellite météosat.

Par ailleurs, les logiciels de simulation de systèmes solaires nécessitent des données de la ressource solaire dont la précision se répercute directement sur les résultats. D'autre part, les progrès réalisés sur la technologie de concentration font que la composante directe de l'irradiance devient un besoin important.

Si un nombre non négligeable de stations de mesures sont répertoriées en Europe, ce n'est pas le cas sur le continent Africain. En effet, le nombre de sites de mesure est assez restreint, le rayonnement direct rarement mesuré, et les stations ne sont que peu entretenues de façon continue. Il en résulte un manque évident de données pour la validation des produits satellitaires.

Une fois les banques de données passées au crible d'un contrôle de qualité strict et unifié pour tous les paramètres utilisées, nous avons conduit une validation sur des données de 19 stations situées en Espagne, Israël et le nord de l'Afrique [Ineichen 2010]. Dans la mesure du possible, l'année 2006 a été utilisée, parfois partiellement. Un des problèmes qui s'est posé est le manque de précision dans la calibration des instruments. Dès lors que des données indépendantes étaient disponibles (principalement des données de trouble atmosphérique), la calibration des senseurs de rayonnement a pu être vérifiée, et le cas échéant un facteur de correction a été appliqué sur les données.

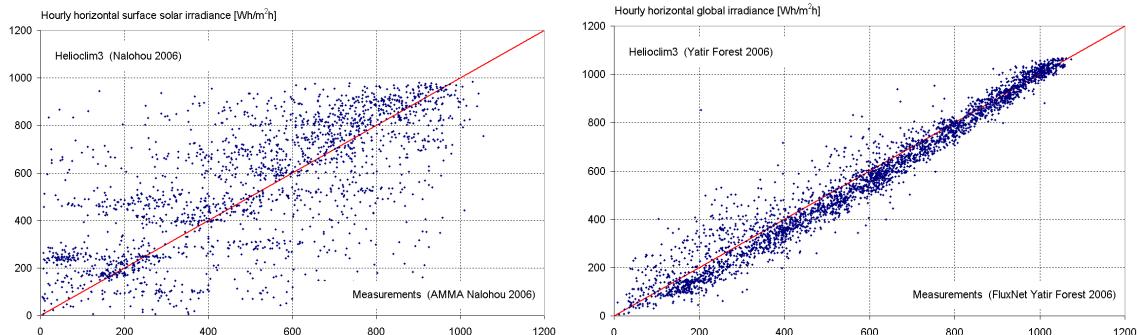


Figure 10 Rayonnement évalué à partir de l'image satellite en fonction du rayonnement mesuré au sol correspondant. A gauche un site pour lequel la qualité des données est mise en doute.

Les graphiques de la Figure 10 représentant le rayonnement calculé en fonction du rayonnement mesuré correspondant pour deux stations illustrent la difficulté d'interprétations de ceux-ci. En effet, il est quasi impossibles de différencier la dispersion due aux erreurs de mesures et celle induite par les modèles.

Les résultats obtenus sont donnés dans les graphiques de la Figure 11 en valeurs relatives pour le biais moyen et pour l'écart quadratique moyen. Meteonorm générant des données synthétiques, seul le biais peut être évalué.

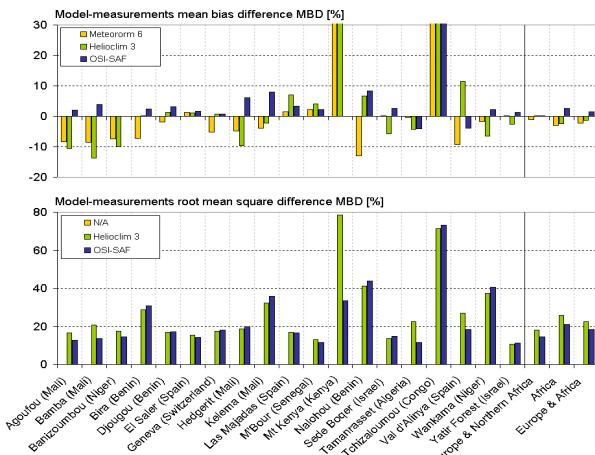


Figure 11 Ecart quadratique et biais moyen relatif pour le rayonnement global

Les principales conclusions de cette validation sont valables pour l'Europe, le nord et l'ouest de l'Afrique. Le biais moyen pour le continent Africain varie de $\pm 4\%$ ($\pm 25 \text{ W/m}^2$) suivant le modèle et la dispersion de l'ordre de 20% à 25% (115 à 145 W/m^2) ; les valeurs sont sensiblement meilleures pour l'Europe. La plus grande dispersion sur le continent Africain provient de la moins bonne qualité des mesures de référence ainsi que le manque de connaissance de la charge atmosphérique en aérosols. Il n'apparaît pas de sur- ou sous-estimation systématique avec les saisons. Par ailleurs, une surestimation la fréquence d'occurrence de l'indice de clarté global est quasi générale.

Notre laboratoire a conduit une comparaison et validation similaire de 5 produits disponibles sur l'Europe: Helioclim de MinesParisTech, EnMetSol de l'Université de Oldenburg, SolarGis de la société GeoModel de Slovaquie, les données de la société 3Tier aux Etats-Unis, et IrSolAv en Espagne [Ineichen 2011]. Ici, la validation a été effectuée sur 23 sites entre 30° et 60° de latitude. Pour la moitié d'entre eux une mesure du rayonnement direct ou diffus est disponible en complément du rayonnement global.

Les histogrammes des graphes de la Figure 12 donnent les résultats obtenus pour le rayonnement global. Il est à noter que les sites de hautes altitudes, avec couverture potentielle de neige, montrent des résultats nettement moins bons et sont exclus de la statistique générale.

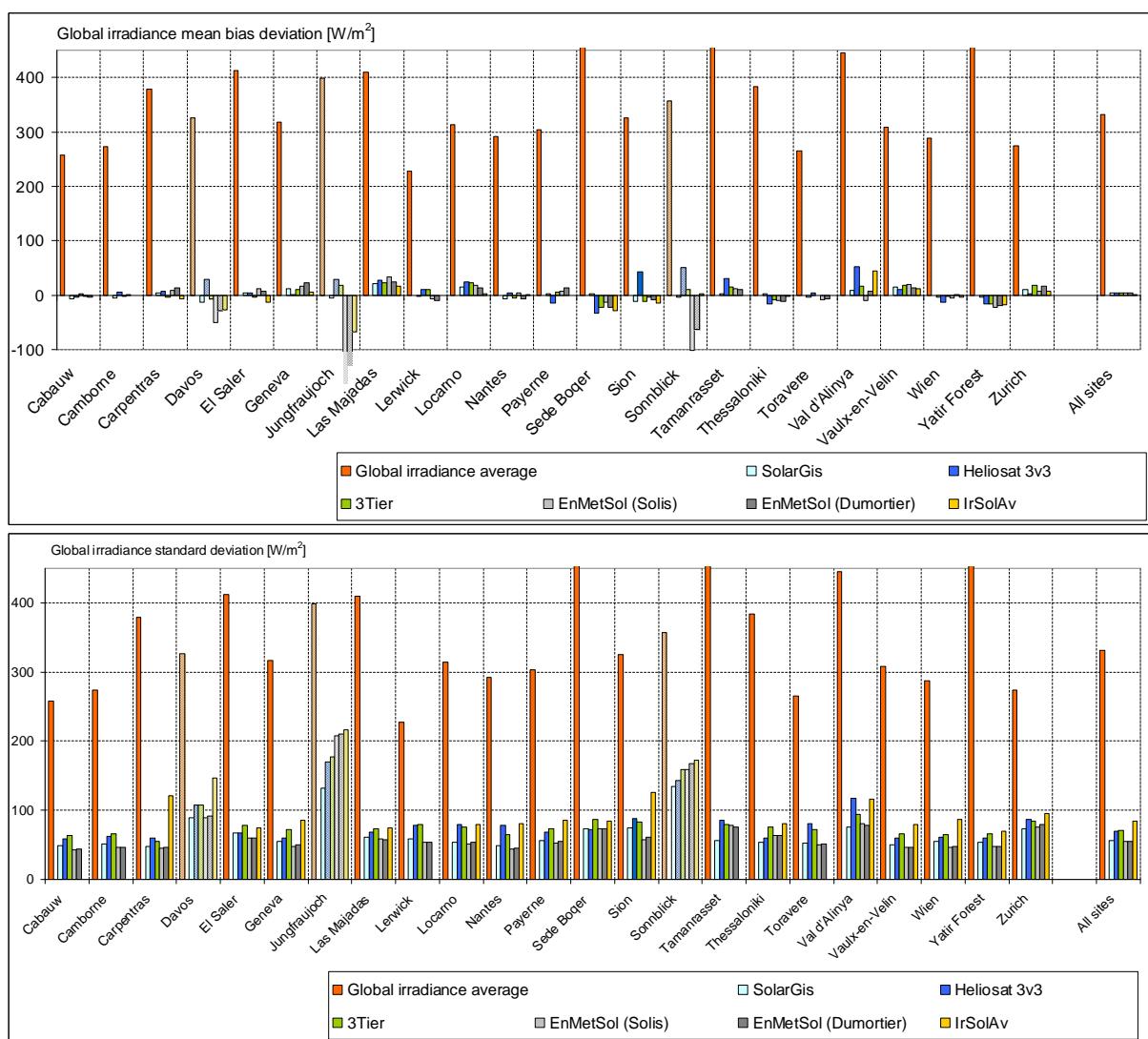


Figure 12 Biais moyen et écart quadratique moyen pour les différents modèles et sites. En couleurs clairs les sites éliminés de la statistique en raison de la neige.

Une analyse de la dépendance des écarts en fonction de différents paramètres a été effectuée. Il en résulte que les principales sources d'erreur proviennent de la charge atmosphérique en aérosols et en vapeur d'eau condensable; une part est également due à la géométrie comme illustré sur les graphes de la Figure 13.

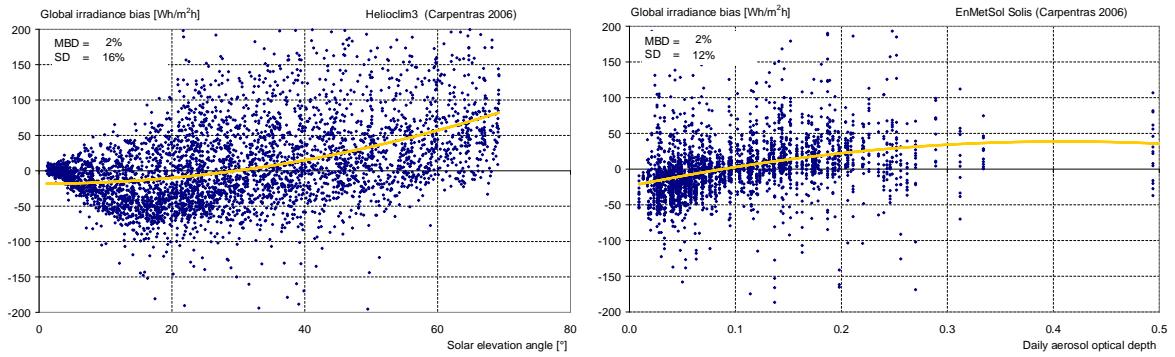


Figure 13 Dépendance du biais en fonction de la hauteur du soleil et de l'épaisseur optique

Il résulte également de la validation que tous les modèles ont tendance à sous-estimer le rayonnement par ciel clair et de le surestimer pour les autres conditions.

La validation a également été effectuée pour la composante directe du rayonnement solaire. Les résultats obtenus ne sont pas très différents, si ce n'est que les valeurs statistiques sont plus élevées. Les dépendances avec la géométrie solaire et le contenu atmosphérique en vapeur d'eau et en aérosols montrent les mêmes tendances que pour le rayonnement global.

Il est intéressant de noter que malgré les bons résultats globaux obtenus par exemple pour le site de Sede Boqer en Israël, de grandes disparités existent selon les paramètres étudiés. Dans ce cas particulier des améliorations restent à faire: en effet, on constate sur la Figure 14 que le rayonnement mesuré par ciel clair (borne supérieure du graphique de gauche) n'est jamais atteint par le modèle.

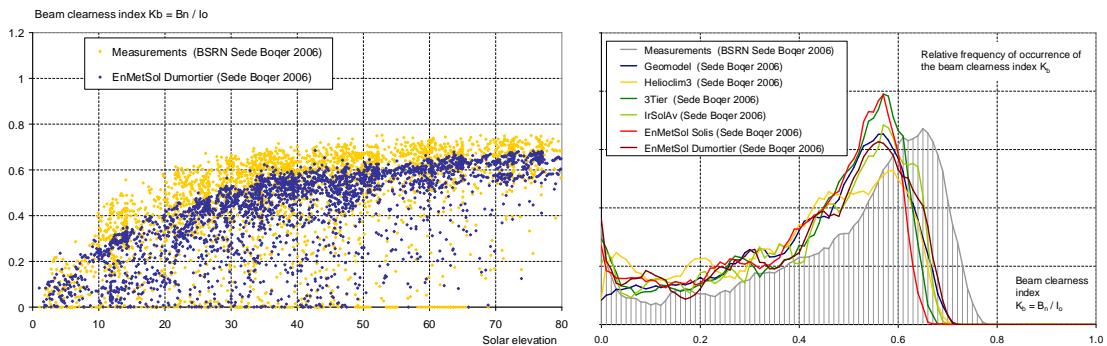


Figure 14 Indice de clarté direct en fonction de la hauteur du soleil et sa fréquence d'occurrence pour Sede Boqer

En conclusion, les modèles d'évaluation du rayonnement global et direct à partir d'images satellites donnent des résultats très satisfaisants, avec pour la composante globale un biais de l'ordre du pourcent et une dispersion de 15%, et pour la composante directe un biais de quelques pourcents et une dispersion de 35%. Il n'y a pas de dégradation notable des résultats obtenus pour des sites de latitude élevée.

2.6. Variabilité interannuelle

Les résultats obtenus lors la validation sont ensuite mis en comparaison avec la variabilité interannuelle du rayonnement [Ineichen 2010c]. Pour cela, une période de référence est déterminée (ici 1999 à 2006) pour laquelle une moyenne et un écart standard de variation sont calculés. Un vingtaine de sites Européens et Américains pour lesquels un périodes de 10 à 14 ans de mesures était disponible ont été utilisés pour effectuer cette analyse. Il s'avère qu'en total annuel, la plupart des modèles de dérivation du rayonnement global donnent des valeurs ne s'écartant pas plus de \pm un écart standard de la moyenne sur la période de référence. Ce résultat est illustré sur la Figure 15 pour la station de Genève.

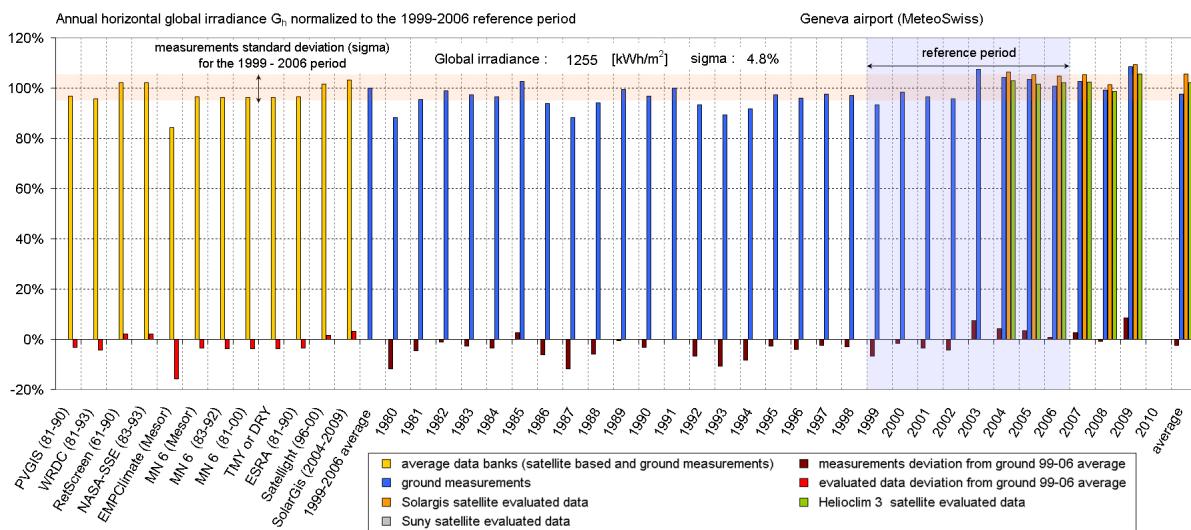


Figure 15 Modèles et mesures de l'irradiation totale annuelle normalisée par l'irradiation annuelle moyenne calculée sur la période 1999-2006. Les mesures sont représentées en bleu, les modèles en jaune, orange et vert. Les biais moyen sont représentés en rouge et brun.

Lorsque les données dérivées sont accessibles pour les mêmes années que pour les mesures au sol, il est possible de vérifier que le modèle utilisé suit de façon pertinente la variation interannuelle. Une illustration en est donnée sur la Figure 16 pour le site de Table Mountain au Colorado et Goodwin Creek (MI), où les valeurs mensuelles évaluées sont reportées en fonction des valeurs mesurées correspondantes. Il est à noter ici qu'en 1998, il y a eu changement d'algorithme. Les deux périodes sont représentées séparément, en rouge et en bleu.

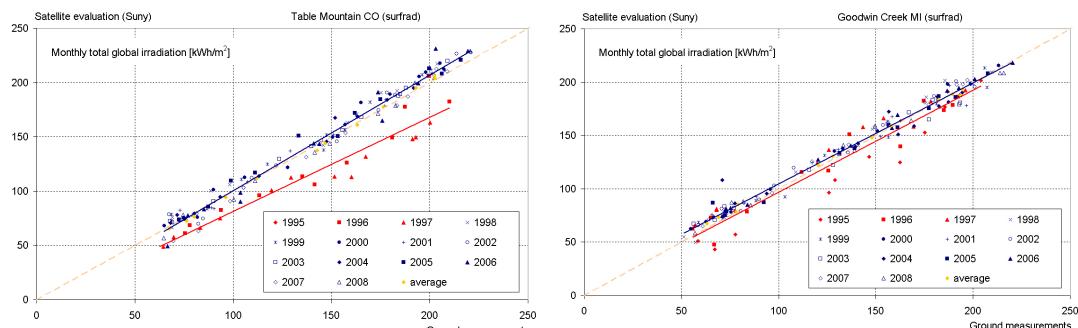


Figure 16 Total mensuel modélisé en fonction du total mesuré pour deux périodes distinctes pour deux sites aux Etats-Unis.

L'étude de ces variations interannuelles a fait apparaître un fait intéressant concernant l'évolution du rayonnement au cours des années suivant les sites. En effet, pour les sites représentés sur la Figure 17, si l'on considère une période de référence en faisant la moyenne du rayonnement annuel de 1996 à 2009, et en observant l'évolution des valeurs normalisées à la période de référence, on constate une augmentation non négligeable du rayonnement global.

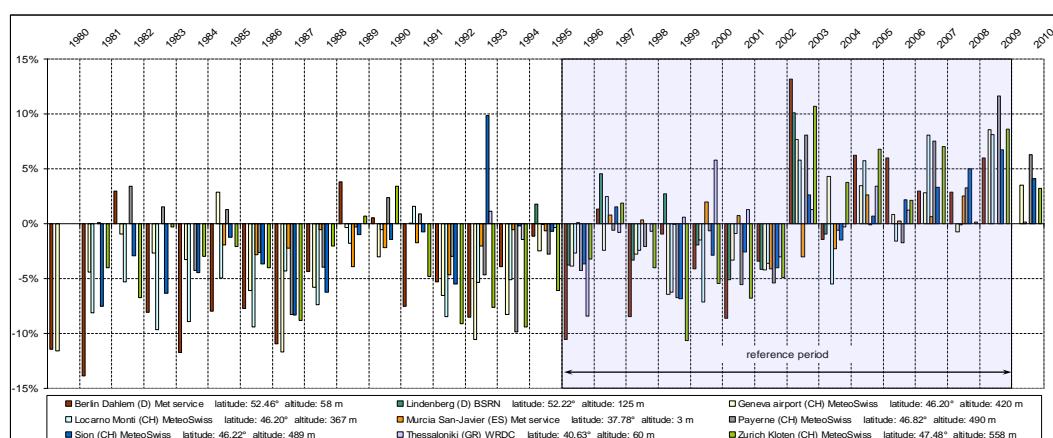


Figure 18 Evolution de l'irradiation annuelle relativement à la période 1996-2009

3. Collaboration internationale

Cette recherche entre dans le cadre de la Tâche 36 de l'AIE: *Solar Ressource Knowledge Management*. Les participants à cette Tâche sont le Canada, les Etats-Unis, la France, l'Allemagne, l'Espagne, la Russie et la Suisse.

Le programme est également étroitement lié au programme européen MESOR, pour lequel un prototype de diffusion des banques de données de rayonnement est disponible sur internet.

4. Evaluation du projet

Tous les travaux de validation intensive de modèles d'évaluation du rayonnement ainsi que le développement de nouvelles relations par notre institut ont débouché sur d'importants résultats qui sont publiés dans des documents internes à la Tâche, dans des journaux à comité de lecture, et présenté à des conférences internationales.

5. Publications dans le cadre du projet

- [1] Ineichen P. (2006a) M-été-O: données climatiques estivales dans la région genevoise, valeurs moyennes et extrêmes. Rapports de recherche du CUEPE N° 7, Université de Genève.
- [2] Ineichen P. (2006b) Meteonorm validation on measurements from Geneva, Pierre Ineichen, IEA Task 36, Denver.
- [3] Ineichen P. (2006c) Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. SE Vol 80, pp 468-478
- [4] Ineichen P (2006d) Summer climatic data for Geneva: average and extreme conditions. Proceedings PLEA 2006, Geneva.
- [5] Ineichen P. (2007) Irradiation modelling workshop, Pierre Ineichen, IEA Task 36, Hamburg.
- [6] Ineichen P (2008) Comparison and validation of three global-to-beam irradiance models against ground measurements. Pierre Ineichen. Solar Energy, Volume 82, Issue 6, Pages 501-512
- [7] Ineichen P. (2008b) A broadband simplified version of the Solis clear sky model. Pierre Ineichen. Solar Energy, Volume 82, Issue 8, Pages 758-762
- [8] Ineichen P. (2008c). Conversion function between the Linke turbidity and the atmospheric water vapour and aerosol content. Pierre Ineichen. Solar Energy, Volume 82, Issue 11, November 2008, Pages 1095-1097
- [9] Hoyer-Click, C., H. G. Beyer, D. Dumortier, P. Ineichen et al. (2008d) Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge. Eurosun 2008 Proceedings.
- [10] Ineichen P, C.S. Barroso; B. Geiger; R. Hollmann; A. Marsouin; R. Mueller (2009) Satellite Application Facilities irradiance products: hourly time step comparison and validation over Europe. Journal of Remote Sensing, Vol. 30, No. 21, 5549–5571
- [11] Suri M., Cebecauer T. Ineichen P. (2009b) Comparison of Direct Normal Irradiation Spatial Products for Europe. Solar Paces 2009 Proceedings
- [12] Hoyer-Click C., Ineichen P. et al. (2009c) MesOr - management and exploitation of solar resource knowledge. Solar Paces 2009 proceedings.
- [13] Ineichen P., (2010). Helioclim 3 and Meteonorm 6 short wave irradiance validation over Africa. IEA Report, University of Geneva
- [14] Ineichen P., Perez R. (2010a) Aerosol quantification and characterization from global and beam irradiance measurements. Proceedings SolarPaces 2010, Perpignan.
- [15] Ineichen P. (2010b) Helioclim 3 and Meteonorm 6 short wave irradiance validation over Africa, Pierre Ineichen, University of Geneva, IEA report.
- [16] Ineichen P. (2010c) Global irradiation: average and typical year, and year to year annual variability. University of Geneva, IEA report.
- [17] Ineichen P. (2011) Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations. Pierre Ineichen, University of Geneva, IEA report.

Toutes les références sont en téléchargement sur <http://www.unige.ch/energie>

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.