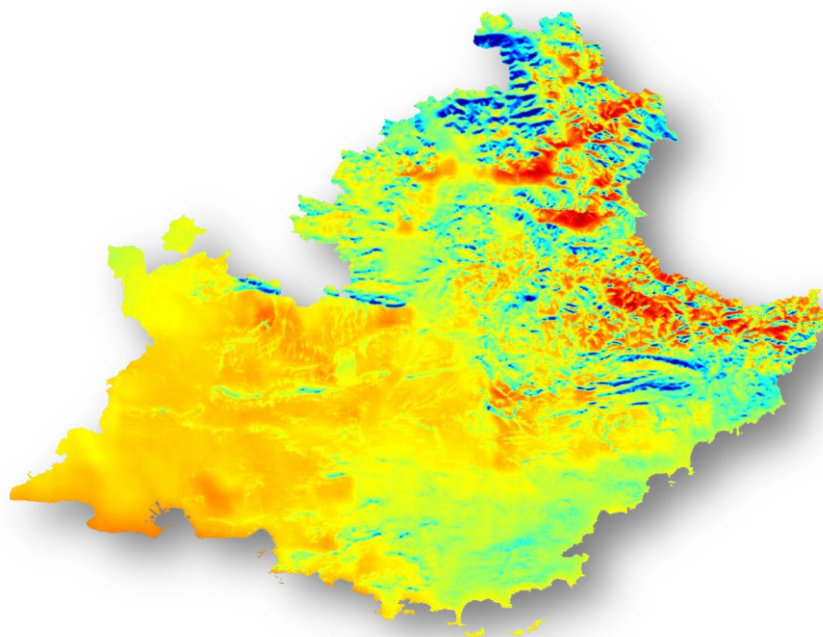


---

# ATLAS DU POTENTIEL SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ET THERMODYNAMIQUE EN REGION PACA – RAPPORT FINAL –

---



BLANC Philippe

Centre Energétique et Procédés, MINES ParisTech/ARMINES

- 28/11/2011 -

(Edition 1.1)

Atlas Solaire



Provence-Alpes-Côte d'Azur

**– Page laissée volontairement blanche –**

## HISTORIQUE DES CHANGEMENTS

Edition	Nature des changements	Auteurs	Date
0.1	Création du Document en version « draft »	Ph. BLANC	15/11/2010
1.0	Edition de la version 1.0	Ph. BLANC	01/12/2010
1.1	Ajout en annexe de la plaquette et de la communication au congrès international "ISES Solar World Congress 2011 in Kassel, Germany"	Ph. BLANC	28/11/2011

**– Page laissée volontairement blanche –**



# SOMMAIRE

<b>TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX .....</b>	<b>7</b>
<b>RAPPORT D'ETUDE .....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>11</b>
<b>2 TERMES ET DOCUMENTS DE REFERENCE .....</b>	<b>11</b>
<b>3 PRINCIPE DE LA CREATION DE L'ATLAS SOLAIRE.....</b>	<b>15</b>
<b>4 LES STATIONS METEOROLOGIQUES POUR L'ETALONNAGE .....</b>	<b>17</b>
4.1 Les stations météorologiques de Météo-France en PACA .....	17
4.1.1 <i>Identification des stations Météo France en PACA .....</i>	<i>17</i>
4.1.2 <i>Analyse des mesures pyranométriques journalières des stations MF .....</i>	<i>21</i>
4.2 Les trois stations RSP dédiées au projet.....	24
4.2.1 <i>Identification des stations RSP.....</i>	<i>26</i>
4.2.2 <i>Analyse des mesures pyranométriques des stations RSP.....</i>	<i>28</i>
<b>5 ETABLISSEMENT DES MODELES DE DECOMPOSITION DIRECT / DIFFUS .....</b>	<b>33</b>
<b>6 ETALONNAGE DES SERIES TEMPORELLES GH1d DE HC3 .....</b>	<b>36</b>
6.1 Comparaison des mesures in-situ de GH1d et des estimations HC3 avant étalonnage.....	36
6.2 Méthode d'étalonnage pour les stations en zone non montagneuse .....	43
6.2.1 <i>Méthode d'étalonnage pour les stations en zone montagneuse .....</i>	<i>44</i>
6.3 Description de la méthode de l'étalonnage par interpolation et de sa validation.....	46
<b>7 CREATION DES FICHIERS NUMERIQUES POUR DE L'ATLAS SOLAIRE .....</b>	<b>52</b>
7.1 Définition de la grille d'échantillonnage spatiale de l'atlas solaire .....	52
7.2 Fourniture des données de rayonnements HC3.....	54
7.3 Constitution de la base de données d'horizons à partir de SRTM.....	54
7.4 Constitution des cartes d'irradiations de l'atlas.....	55
<b>8 DISSEMINATION DE L'ATLAS SOLAIRE.....</b>	<b>61</b>

8.1	Mise en place d'un « mapserver » de type Web Map Service (WMS) .....	61
8.2	Mise en place d'un service web spécifique d'interrogation de l'atlas solaire en un géo-point donné....	63
8.3	Présentations et articles relatifs au projet .....	63
8.3.1	<i>Présentations publiques</i> .....	63
8.3.2	<i>Articles de presse, reportage télévisuel</i> .....	64
9	<b>CONCLUSION</b> .....	64
<b>ANNEXE A : CORRECTION DES EFFETS D'OMBRAJE SUR LES DIFFERENTES COMPOSANTES DE L'IRRADIATION INCIDENTE AU SOL</b> .....		67
<b>ANNEXE B : ESTIMATION DES HORIZONS A PARTIR D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN</b> .....		71
1	<b>PRESENTATION DE L'ALGORITHME DE DETERMINATION DE L'HORIZON</b> .....	71
2	<b>ELEMENTS DE VALIDATION</b> .....	71
3	<b>APPLICATION A L'ATLAS SOLAIRE PACA</b> .....	72
<b>ANNEXE C : ESTIMATION DES HORIZONS POUR LES STATIONS METEOROLOGIQUES MF ET RSP DU PROJET</b> .....		77
<b>ANNEXE D : PRINCIPE DE LA METHODE HELIOSAT-2</b> .....		85
<b>ANNEXE E : PLAQUETTE DE PRESENTATION DE L'ATLAS</b> .....		89
<b>ANNEXE F : COMMUNICATION AU CONGRES INTERNATIONAL "ISES SOLAR WORLD CONGRESS 2011 IN KASSEL, GERMANY"</b> .....		93

## TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 :	schéma général de la génération de l'atlas. ....	15
Figure 2 :	géolocalisation des 29 stations météorologiques de Météo France identifiées en région PACA pour le projet. Le symbole ▲ signale une station MF dite « en zone montagneuse » pour laquelle l'orographie avoisinante est considérable. ....	20
Figure 3 :	cellules de Voronoï associées à chacune des stations de Météo France. Les couleurs représentent les distances moyennes de chacune des stations avec les stations voisines (i.e. dont les cellules de Voronoï sont contigües). ....	21
Figure 4 :	disponibilité des mesures d'irradiations journalières issues des 29 stations MF identifiées en PACA (gris : GHId uniquement, vert : GHId et DHId, noir : GHId et DNId, bleu : GHId, DHId et DNId). ....	22
Figure 5 :	disponibilité des mesures d'irradiations journalières issues des deux stations MF Carpentras et Carpentras-DSO (gris : GHId uniquement, vert : GHId et DHId, noir : GHId et DNId, bleu : GHId, DHId et DNId). ....	23
Figure 6 :	écarts quadratiques moyens constatés entre les mesures de GHI entre les couples de stations, classés par leurs distances géodésiques (ronds bleus). La courbe rouge correspond à la moyenne de ces écarts. ....	24
Figure 7 :	emplacements marqués par des carrés rouges des stations météorologiques RSP dédiées au projet, à Volx (1), Berre l'Etang (2) et Nice (3). A titre indicatif, les stations MF sont de nouveau représentées par les symboles ronds et triangles bleus, sans leur numérotation. ....	25
Figure 8 :	emplacement de la station météorologique de Volx (04). ....	26
Figure 9 :	emplacement de la station météorologique de Berre l'Etang. ....	27
Figure 10 :	station RSP installée le 30 juillet 2009, sur le toit du bâtiment Audibergue du CADAM, à Nice. ....	28
Figure 11 :	irradiations journalières des trois stations RSP : (a) GHId, (b) DHId et (c) DNId. ....	30
Figure 12 :	scatterogramme entre les mesures de GHId de MF-20 (en abscisse) et celles de RSP-3 (en ordonnées). ....	33
Figure 13 :	représentation des couples (KTd, KDd) des cinq stations de mesure (points rouges) avec les limites représentées par des points verts. ....	34
Figure 14 :	GHIm mesurée par la station MF-2 (VILLAR-ST-PANCRACE) en rouge avec le symbole o et estimation de HC3 correspondante en bleu avec le symbole +. ....	40
Figure 15 :	Série temporelle de GHIm mesurée par la station MF-25 (FREJUS-PLAINE) en rouge avec le symbole o et estimation de HC3 correspondante en bleu avec le symbole +. ....	40
Figure 16 :	représentation des biais relatifs (cercles rouges en cas de surestimation et magentas en cas de sous-estimation) et des erreurs quadratiques moyennes relatives (cercles verts) issus des bilans de comparaisons du GHIm entre HC3 et l'ensemble des stations MF et RSP (cf. tableau 16). Le symbole x signifie l'absence de mesures des stations correspondantes sur la période de HC3. ....	42
Figure 17 :	schéma d'optimisation pour l'intégration des effets d'orographie lors de la détermination des coefficients d'étalonnage pour les stations montagneuses. ....	45

Figure 18 : estimation moyenne par classes de distances des erreurs (MBE et RMSE) d'estimation du GHIm lors de la procédure de validation croisée LOOCV. ....	49
Figure 19 : représentation des biais relatifs (cercles rouges en cas de surestimation et magentas en cas de sous-estimation) et des erreurs quadratiques moyennes relatives (cercles verts) issus des bilans de comparaisons du GHIm entre HC3 après étalonnage et correction des effets de l'orographie et l'ensemble des stations MF et RSP. Le symbole x signifie l'absence de mesures des stations correspondantes sur la période de HC3. ....	50
Figure 20 : représentation en bleu des estimations du DNIm par HC3 après étalonnage du GHI, correction de l'orographie et application de la régression linéaire, comparées aux mesures des stations MF-14 (CARPENTRAS), RSP-1 (VOLX), RSP-2 (BERRE-L-ETANG) et RSP-3 (NICE).....	52
Figure 21 : zone correspondant à la région PACA (en rouge) avec une bordure supplémentaire d'une vingtaine de pixels (en vert). ....	53
Figure 22 : moyenne du GHId de HelioClim-3 établi sur la période 2005-2009 (5 ans). ....	54
Figure 23 : carte des irradiances annuelles globales sur plan horizontal, moyennées sur la période de HC3 entre 2004 et 2010. ....	57
Figure 24 : carte des écarts types relatifs des irradiances annuelles globales sur plan horizontal sur la période de HC3 entre 2004 et 2010.....	58
Figure 25 : carte des irradiances annuelles globales sur plan incliné à 35°, plein Sud, moyennées sur la période de HC3 entre 2004 et 2010.....	59
Figure 26 : carte des irradiances annuelles directes en incidence normale, moyennées sur la période de HC3 entre 2004 et 2010.....	60
Figure 27 : Visualisation sous Google Earth du fichier kml Atlas_PACA_ghi.kml ci-dessus. ....	62
Figure 28 : photo d'écran du service web spécifique <a href="http://www.atlas-solaire.fr/atlas-solaire-paca">http://www.atlas-solaire.fr/atlas-solaire-paca</a> .....	63
Figure 29 : comparaison des relevés par théodolites et par calcul à partir du MNT SRTM v4 à Corte (a) et Soviera (b) en Corse. Les relevés par théodolites ont été effectués par un doctorant de l'Université de Corse, Pierrick Haurant. ....	72
Figure 30 : base de données altimétrique SRTM (a) et base de données du géoïde EGM08 (b) sur la région PACA.....	73
Figure 31 : horizon calculé en un point de la région PACA. Les points jaunes représentent la position du soleil durant l'année. ....	74
Figure 32 : (a) exemple de variation temporelle des ombres portées à quatre heures de la journée du 15 déc. 2009 sur une zone de 5 km par 5 km centrée sur la commune d'Annot. (b) Variabilité spatiale de l'intégration au cours de cette même journée du rayonnement direct en incidence normale. ....	74
Figure 33 : fractions en %, sur la zone présentée par la figure 32, représentant la variabilité du rayonnement global sur plan horizontal représentant par rapport au point central de la zone. ..	75
Figure 34 : couverture et résolution des images MSG utilisées tous les ¼ d'heure par la méthode Heliosat-2 pour constituer la base de données HelioClim-3. ....	85
Figure 35 : représentation schématique du principe de la méthode HelioSat-2. Ici, le rayonnement perçu par le satellite au dessus de la cible 2 est plus grand, que celui perçu au dessus de la cible 1. C'est ainsi que le rayonnement évalué est plus grand à la cible 1 qu'à la cible 2. ....	86

Figure 36 : exemple de carte d'Europe du rayonnement solaire représentant la somme annuelle de rayonnement global sur plan horizontal, exprimée en kWh/m <sup>2</sup> .	87
Tableau 1 : termes de référence.	12
Tableau 2 : documents de référence du projet.	13
Tableau 3 : références bibliographiques.	14
Tableau 4 : liste des 29 stations météorologiques de Météo France en région PACA identifiées pour le projet. Le soulignement du nom signale les stations MF dites « en zone montagneuse » pour lesquelles l'orographie avoisinante est considérable.	19
Tableau 5 : statistiques des mesures journalières de GHId, DHId et DNId sur les stations de Météo France en région PACA sur la période entre 1985 et 2010.	23
Tableau 6 : bilans d'erreurs entre les mesures de GHId, DHId et DNId des deux stations Carpentras et Carpentras-DSO sur des périodes communes, propres à chacune des modalités de mesures (GHId, DHId ou DNId).	23
Tableau 7 : localisations géographiques et périodes de fonctionnement des trois stations RSP.	28
Tableau 8 : irradiations mensuelles GHIm, DHIm et DNIm mesurées par la station RSP-1 (VOLX).	31
Tableau 9 : irradiations mensuelles GHIm, DHIm et DNIm mesurées par la station RSP-2 (BERRE L'ETANG).	31
Tableau 10 : irradiations mensuelles GHIm, DHIm et DNIm mesurées par la station RSP-3 (NICE).	32
Tableau 11 : statistiques des différences des mesures de GHId entre la station RSP-3 de Nice et la station MF-20 de l'aéroport de Nice sur la commune entre le 1 <sup>er</sup> août 2009 et le 31 juillet 2010.	32
Tableau 12 : coefficients des modèles M1 et M2 optimisés avec l'ensemble des couples (KTd, KDd), toutes stations confondues.	35
Tableau 13 : tableau comparatif des performances des modèles M1 et M2 optimisés et du modèle ESRA (RB15) en terme d'estimation du DHId et du BHId.	35
Tableau 14 : bilan des performances d'estimation du BHId station par station du modèle M2 optimisé avec toutes les stations.	36
Tableau 15 : Bilans par station et global des différences de GHId entre les estimations HC3 et les mesures des stations MF et RSP.	37
Tableau 16 : Bilan par station et bilan global des différences de GHIm entre les estimations HC3 et les mesures des stations MF et RSP.	38
Tableau 17 : comparaison des bilans d'erreur d'estimation de HC3 de GHId sur les stations MF et RSP montagneuses ou non.	39
Tableau 18 : Bilans global des différences de GHIm entre les estimations HC3 et les mesures des stations MF et RSP séparément puis conjointement.	41
Tableau 19 : bilan des erreurs d'estimation de GHId et GHIm de HC3, avant et après étalonnage, sur les stations MF en zone non montagneuse.	44
Tableau 20 : bilan des erreurs d'estimation de GHId et GHIm de HC3, avant et après étalonnage et prise en compte de l'orographie, sur les stations MF en zone montagneuse.	45

Tableau 21 : liste des 20 stations MF d'étalonnage utilisées pour l'interpolation des coefficients d'étalonnage (les stations apparaissant en souligné sont celles considérées comme étant dans un environnement montagneux). .....	46
Tableau 22 : bilan des erreurs d'estimation du GHId, GHIm, BHId et BHIm après l'étalonnage et la correction d'orographie, pour l'ensemble des stations MF et RSP.....	47
Tableau 23 : bilan de validation, sur les stations de test RSP, des erreurs d'estimation du GHId, GHIm, BHId et BHIm après l'étalonnage et la correction d'orographie.....	48
Tableau 24 : stations MF d'étalonnage les plus proches de chacune des stations MF d'étalonnage.....	48
Tableau 25 : bilan de validation croisée de type LOOCV, sur les stations MF et RSP, des erreurs d'estimation du GHId et GHIm après l'étalonnage et la correction d'orographie.....	48
Tableau 26 : bilan d'erreur d'estimation de HC3 du BNId et BNIm, après étalonnage du GHI et correction des effets d'orographie. ....	51
Tableau 27 : bilan d'erreur d'estimation de HC3 du BNIm, après étalonnage du GHI, correction des effets d'orographie et correction <i>a posteriori</i> par régression linéaire du DNIm. ....	51
Tableau 28 : définition de la grille d'échantillonnage native de l'atlas PACA dans la projection géographique EPSG :4326. ....	53
Tableau 29 : boite englobante géographique de l'atlas solaire PACA dans la projection géographique EPSG:4326. ....	53
Tableau 30 : liste des orientations choisies pour la première génération de l'atlas solaire PACA. ....	56

# RAPPORT D'ETUDE

## 1 INTRODUCTION

L'objet de ce rapport est de décrire les différentes étapes d'élaboration et les différents moyens de dissémination du projet d'Atlas du potentiel solaire photovoltaïque et thermodynamique en région PACA.

Ce projet, labélisé par le PRIDES CAPENERGIE, est le fruit d'un Financement Régional pour l'Environnement et l'Energie (FREE) de la région Provence Alpes Côte d'Azur et de l'ADEME PACA, ainsi que d'un financement du Conseil Général des Alpes Maritimes. Il a été initié en janvier 2009 et s'est terminé en décembre 2011.

L'atlas du potentiel solaire en région PACA est un ensemble de cartes à 250 mètres de résolution permettant la caractérisation fine du rayonnement solaire en sommes mensuelles, suivant les composantes globales, directes et diffuses. Basé sur des données d'éclairement solaire HelioClim et étalonné par des séries temporelles de mesures pyranométriques *in-situ*, cet atlas a pour objectif de servir de référence régionale pour le potentiel solaire aussi bien photovoltaïque que thermodynamique. Les différents acteurs publics et privés du domaine de l'énergie solaire pourront alors avoir recours à cet atlas pour déterminer, de manière rationnelle et quantitative, des sites d'implantation de systèmes de production d'énergie solaire, de les dimensionner ou encore d'en évaluer, de manière fiable, la rentabilité.

L'atlas s'appuie sur les bases de données de rayonnement solaire HelioClim-3 établies par Mines ParisTech / ARMINES suivant la méthode Heliosat (**RB12**) s'alimentant d'images satellitales à 4 km de résolution issues des satellites Meteosat depuis février 2004. Un résumé de la méthode Heliosat-2 est donné en annexe D de ce document.

La base de données d'altitude SRTM suivant une résolution d'environ 100 m (**RB5**) est utilisée afin de rendre compte, à la résolution de 200 m, des effets d'ombres portées et de variation de l'épaisseur atmosphérique sur l'estimation du rayonnement solaire.

Enfin, un étalonnage de l'atlas a été effectué par des séries temporelles de mesures pyranométriques *in-situ*, en sommes journalières, faites à partir de stations météorologiques dédiées au projet ou appartenant au réseau de stations de Météo-France. Cet étalonnage permet l'affinage d'une part de l'estimation des sommes journalières du rayonnement global sur plan horizontal et d'autre part des méthodes de dérivation des rayonnements diffus et direct sur plan incliné à partir du rayonnement global sur plan horizontal. L'analyse statistique des erreurs d'estimation après ces étalonnages avec des stations de validation ou des méthodes de validation croisée permet en outre l'évaluation des incertitudes associées aux différentes estimations de rayonnement.

## 2 TERMES ET DOCUMENTS DE REFERENCE

Pour toute la suite, on utilisera, notamment pour les figures, les abréviations suivantes :

Abréviations et termes généraux	
<b>PACA</b>	Région Provence Alpes Côte d'Azur
<b>HC1</b>	Base de données d'irradiation solaire HelioClim-1
<b>HC3</b>	Base de données d'irradiation solaire HelioClim-3
<b>MF</b>	Station météorologique du réseau de Météo France
<b>RSP</b>	Station météorologique spécifique au projet, en location auprès de la société CSP Service
Abréviations et termes relatifs aux mesures d'irradiation	
<b>TOAd</b>	Irradiation journalière sur plan horizontal, hors atmosphère
<b>GHId</b>	Irradiation journalière globale sur plan horizontal (Daily Global Horizontal Irradiation)
<b>DHId</b>	Irradiation journalière diffuse sur plan horizontal (Daily Diffuse Horizontal Irradiation)
<b>BHId</b>	Irradiation journalière directe sur plan horizontal (Daily Beam Horizontal Irradiation)
<b>DNId / BNId</b>	Irradiation journalière directe en incidence normale (Daily Direct ou Beam Normal Irradiation)
<b>TOAm</b>	Irradiation mensuelle sur plan horizontal, hors atmosphère
<b>GHIm</b>	Irradiation mensuelle globale sur plan horizontal (Monthly Global Horizontal Irradiation)
<b>DHI</b>	Irradiation mensuelle diffuse sur plan horizontal (Monthly Diffuse Horizontal Irradiation)
<b>BHIm</b>	Irradiation mensuelle directe sur plan horizontal (Monthly Beam Horizontal Irradiation)
<b>DNIm/ BNIm</b>	Irradiation mensuelle directe en incidence normale (Monthly Direct ou Beam Normal Irradiation)
Abréviations et termes relatifs aux bilans d'erreur entre deux séries temporelles	
<b>NDA</b>	<b>Nombre de données valides en commun utilisées pour le bilan d'erreur</b>
<b>MREF</b>	Moyenne de référence
<b>MBE</b>	Moyenne relative de l'erreur exprimée en % par rapport à MREF (Mean Bias Error)
<b>MAE</b>	Moyenne relative de la valeur absolue de l'erreur exprimée en % par rapport à MREF (Mean Absolute Error)
<b>STDE</b>	Ecart type relatif de l'erreur exprimée en % par rapport à MREF (STandard Deviation Error)
<b>RMSE</b>	Erreur quadratique moyenne relative exprimée en % par rapport à MREF (Root Mean Square Error)
<b>CC</b>	Coefficient de corrélation
<b>KSI</b>	Test de Kolmogorov-Smirnov intégré exprimé en % par rapport à la valeur critique à 95 % de l'écart intégrée entre les deux estimations de fonction de répartition

Tableau 1 : termes de référence.



Documents du projet	
<b>DP1</b>	Dossier de demande de subvention F.R.E.E. pour le projet d'atlas du potentiel solaire photovoltaïque et thermodynamique en région PACA. ARMINES. Juin 2008. 31 pp.
<b>DP2</b>	Site Preparation Manual for the installation of the MDI meteorological measurement station Northern Hemisphere (Client : ARMINES). CSP Service. Révision du 10 février 2009.
<b>DP3</b>	Specification of the MDI Meteo-Station Site Preparation in Nice. ARMINES. Edition 0.2 (14/05/2009). 10 pp.
<b>DP4</b>	Specification of the MDI Meteo-Station Site Preparation in Berre l'Etang. ARMINES. Edition 0.2 (14/05/2009). 9 pp.
<b>DP5</b>	Plan de prévention pour l'installation de la station météorologique sur le toit de l'Audibergue du Centre Administratif des Alpes Maritimes. ARMINES. Edition 1.0 (mai 2009). 20 pp.
<b>DP6</b>	Contrat d'installation et d'entretien de la station météorologique à Berre l'Etang. Edition 1.0 (12/06/2009). 24 pp.

**Tableau 2 :** documents de référence du projet.

Références bibliographiques	
<b>RB1</b>	Arlot, S., A. Celisse, 2010. <i>A survey of cross-validation procedures for model selection</i> . Statistics Surveys. 4:40–79.
<b>RB2</b>	Baillargeon, S., 2005. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de M.Sc. de l'Université de Laval. 137 pp.
<b>RB3</b>	Beyer, H.G., J.P. Martinez, M. Suri, J.L. Torres, E. Lorenz, S.C. Müller, C. Hoyer-Klick, P. Ineichen, 2009. Report on Benchmarking of Radiation Products (D.1.1.3). Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge. Project EU FP6 (CA – Contract No. 038665). 160 pp.
<b>RB4</b>	Dozier, J., J. Frew. 1990. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28:963-969.
<b>RB5</b>	Farr, T. G., et al., 2007. <i>The Shuttle Radar Topography Mission</i> , Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
<b>RB6</b>	Geiger, M., L. Diabaté, L. Ménard, L. Wald, 2002. <i>A Web service for controlling the quality of global solar irradiation</i> . Solar Energy, 73, 6, 475-48.
<b>RB7</b>	Geuder, N., F. Trieb, C. Schillings, R. Meyer, V. Quaschnig, 2003. Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. <i>In proceedings of the 3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations</i> , 19th-21st of February 2003, Torremolinos, Spain. 9 pp.
<b>RB8</b>	Long, C.N., Y. Shi, 2006. The QCRad Value Added Product: Surface Radiation Measurement Quality Control Testing, Including Climatologically Configurable Limits. Atmospheric Radiation Measurement Program Technical Report, ARM TR-074, 69 pp.
<b>RB9</b>	Pavlis, N.K., J. K. Factor, S. A. Holmes, 2006. Terrain-Related Gravimetric Quantities Computed for the Next EGM. <i>In: proceedings of IGFS 2006</i> , Istanbul, Turkey.
<b>RB10</b>	Perez, R., P. Ineichen, E.L. Maxwell, R. Seals, A. Zelenka, 1992. <i>Dynamic global to direct irradiance conversion model</i> . ASHRAE Transactions Research Series, 354-369.
<b>RB11</b>	Perez, R., P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, 1990. <i>Modelling daylight availability and irradiance components</i> . Solar Energy, 44:271-289.
<b>RB12</b>	Rigollier, C., M. Lefèvre, L. Wald, 2004. <i>The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation data from satellite images</i> . Solar Energy, 77(2), 159-169.
<b>RB13</b>	Ruiz-Arias, J. A., 2009. <i>Modelization of the terrain's morphology influence on the solar radiation field at the Earth's surface</i> . Doctoral thesis. University of Jaén. April 2009. 202 pp.
<b>RB14</b>	Ruiz-Arias, J.A., H. Alsamamra, J. Tovar-Pescador, D. Pozo-Vázquez, 2010. <i>Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions</i> . Energy Conversion and Management, 51: 881–893.
<b>RB15</b>	The European Solar Radiation Atlas. Vol. 2 : Database and exploitation software. Coordinators : K. Scharmer, J. Greif. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. 296 pages.
<b>RB16</b>	Wahab, A. M., M. El-Metwally, R. Hassan, M. Lefèvre, A. Oumbe, L. Wald, 2008. <i>Assessing surface solar irradiance in Northern Africa desert climate and its long-term variations from Meteosat images</i> . International Journal of Remote Sensing, 31(01), 261 – 280.
<b>RB17</b>	Wahba G, 1990. Spline models for observational data, In the CBMS-NSF Regional. <i>Conference Series in applied mathematics</i> , Philadelphia, Pennsylvania USA, 59, XII, 169.
<b>RB18</b>	Xia, Y., M. Winterhalter, P. Fabian. 2000. <i>Interpolation of Daily Global Solar Radiation with Thin Plate Smoothing Splines</i> . Theory of Applied Climatology, 66:109-115.

**Tableau 3 :** références bibliographiques.

### 3 PRINCIPE DE LA CREATION DE L'ATLAS SOLAIRE

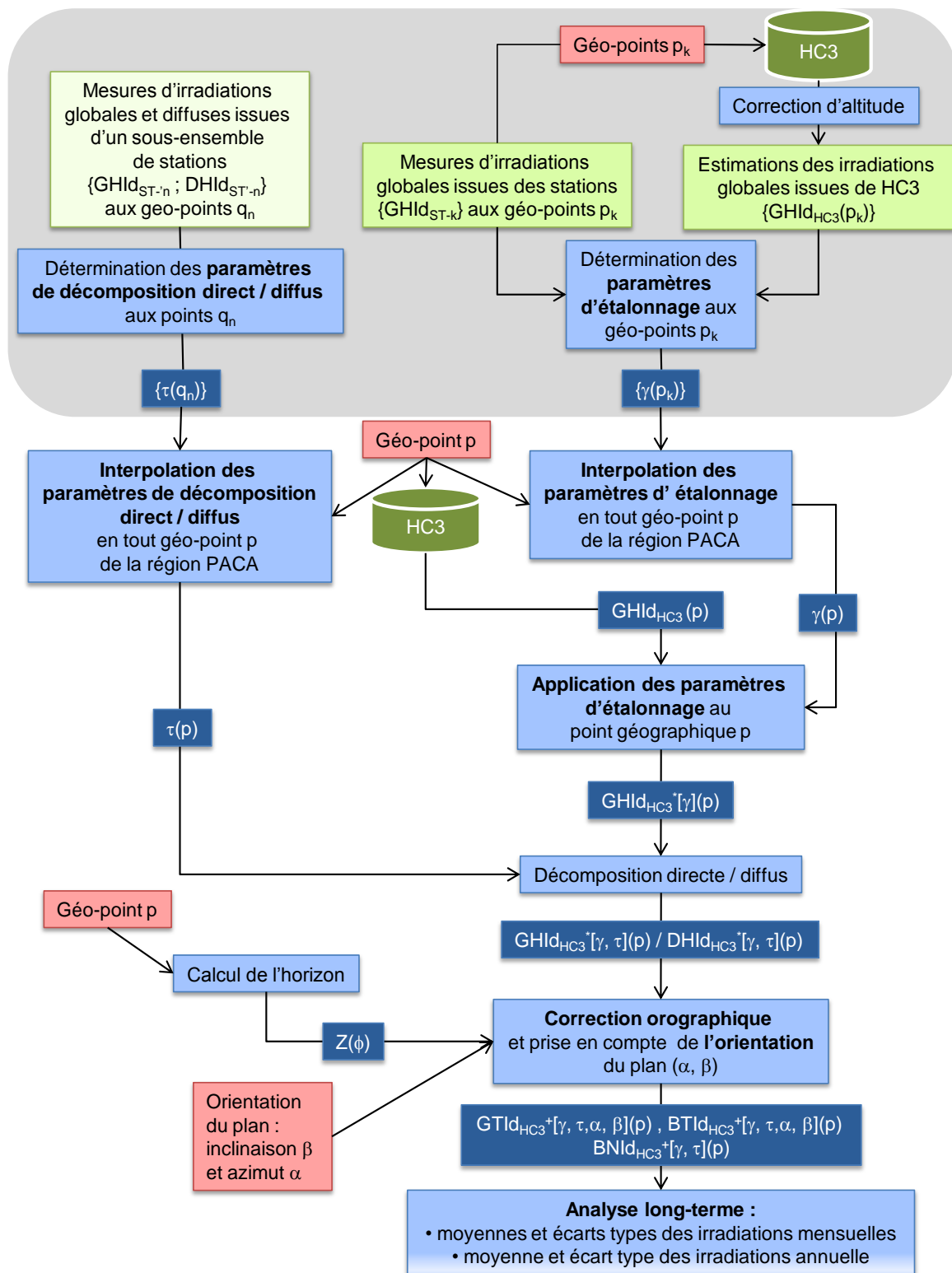


Figure 1 : schéma général de la génération de l'atlas.

La figure 1 correspond au schéma général pour la création de l'atlas solaire : les étapes principales sont représentées dans le diagramme sous forme de rectangles bleus ciels.

La partie du haut, en grisé, correspond à une analyse préliminaire visant à établir les paramètres d'étalonnage des irradiations globales sur plan horizontal et de décomposition direct / diffus sur la base des stations de mesures pyranométriques.

- Détermination du modèle de décomposition directe / diffus du GHId :

Cette étape consiste en la détermination des fonctions paramétriques empiriques et des paramètres associés pour la décomposition de l'irradiation journalière globale GHId en irradiation journalière diffuse DHId et directe BHId, sur plan horizontal. Les fonctions paramétriques choisies sont celles inspirées des travaux de **RB14**, adaptées au cas de mesures journalières et non pas horaires. Cette détermination s'appuie sur les 5 stations du projet offrant la mesure concomitante du GHId et du DHId.

- Etalonnage des estimations GHId provenant de HC3

Cette étape consiste à déterminer, sur la base des stations de mesure de GHId disponible en région PACA, une méthode d'étalonnage des estimations des bases de données HelioClim.

Cet étalonnage nécessite dans un premier temps la détermination du mode de correction paramétrique des séries temporelles HelioClim. Dans un second temps, il s'agit, pour chaque station où cela est possible, de déterminer les paramètres locaux d'étalonnage vis-à-vis de mode de correction choisi. Pour des raisons d'effet d'ombrage marqué, cette procédure de détermination des paramètres d'étalonnage est différente selon que la station est en zone montagneuse ou pas. Dans un troisième temps, ces paramètres de correction, établis sur un ensemble discret de points géographiques en PACA, doivent pouvoir être étendus en tout point de PACA par le biais d'une méthode d'interpolation appropriée. La méthode d'interpolation choisie est la méthode d'interpolation de type plaque-mince (cf. **RB17**). Enfin, cet étalonnage s'accompagne de procédures de validation. Une première validation consiste à réserver des stations de contrôle qui n'entre pas dans la procédure d'étalonnage pour lesquelles sont évaluées les erreurs d'estimation après étalonnage. Une deuxième validation s'appuie sur une démarche de type « validation croisée » ou cross-validation suivant le schéma *leave-one-out*, ou LOOCV (**RB1**).

La deuxième partie du schéma correspond à l'estimation des séries mensuelles d'irradiation pour un géo-point quelconque de la région PACA. L'enchaînement de cette dernière partie pour l'ensemble des géo-points correspondant à une grille régulière en latitude et longitude en région PACA, avec un pas de 200 m, permet alors de constituer les différentes cartes d'irradiation qui constituent l'atlas solaire.

Cette deuxième partie correspond à l'application à la série temporelle de GHId issue de l'estimation de HelioClim-3 au géo-point considéré des étapes suivantes :

- Etalonnage du GHId :

Cette étape consiste à appliquer la méthode d'interpolation des paramètres d'étalonnage au géo-point considéré puis d'appliquer le modèle d'étalonnage avec ces paramètres locaux.

- Application du modèle de décomposition direct / diffus à la série temporelle de GHId :

Les paramètres du modèle paramétrique de décomposition direct / diffus sont établis par interpolation au géo-point considéré et ce modèle est appliqué à la série journalière étalonnés.

- Prise en compte de l'orographie locale dans l'estimation des irradiances journalière :

Cette étape consiste à évaluer les différentes composantes de l'irradiation (directe, diffuse et globale) en incidence normale ou suivant une orientation du plan définie par l'inclinaison et l'azimut de sa normale, en tenant compte des effets de l'orographie locale au point considéré.

Nous avons considéré deux effets de l'orographie sur les différentes composantes de du rayonnement solaire. Le premier effet – et le plus important – consiste correspond aux effets d'ombrage induit par l'orographie au point géographique considéré. L'approche, explicitée en annexe A de ce document, est basée sur la prise en compte des horizons locaux ; cette approche est basée sur celle proposée dans **RB13**, adaptée aux séries journalières en définissant des profils typiques de valeurs intra-journalières d'irradiation de GHI et DHI à partir des valeurs journalières de ces dernières. Ces profils typiques sont issus de **RB15**. En annexe B est présentée le principe et la validation du calcul des horizons.

Le deuxième effet est celui induit par la différence d'altitude (et donc de l'épaisseur atmosphérique traversé par le rayonnement solaire incident) entre le géo-point considéré et celui pour laquelle a été évaluée l'estimation HelioClim dans la cellule Météosat la plus proche. Cette correction s'appuie sur l'article **RB16**. Elle est appliquée de manière systématique lors de l'interrogation de la base de données HC3. Cette partie n'est pas explicitée dans ce document.

- L'analyse long-terme :

Cette étape consiste tout d'abord à agréger les séries d'irradiation journalière en série d'irradiation mensuelle. Ces séries temporelles mensuelles permettent alors d'évaluer les moyennes et écart type des irradiances mensuelles et annuelles des différentes séries d'irradiation.

Avant de présenter les détails et les résultats de ces différentes étapes, nous allons tout d'abord présenter les différentes stations météorologiques considérées pour le projet.

## 4 LES STATIONS METEOROLOGIQUES POUR L'ETALONNAGE

### 4.1 Les stations météorologiques de Météo-France en PACA

#### 4.1.1 Identification des stations Météo France en PACA

Météo France dispose sur tout le territoire français d'un grand nombre de stations de mesures météorologiques automatiques.

Grâce au site <http://publitheque.meteo.fr>, nous avons établi une liste de trente stations de mesure de Météo France, notées MF, fournissant *a minima* des mesures journalières de rayonnement global sur plan horizontal sur la période de janvier 1985 à juillet 2010.

Sur ces trente stations, deux stations, à Carpentras, sont espacées de moins de 180 mètres :

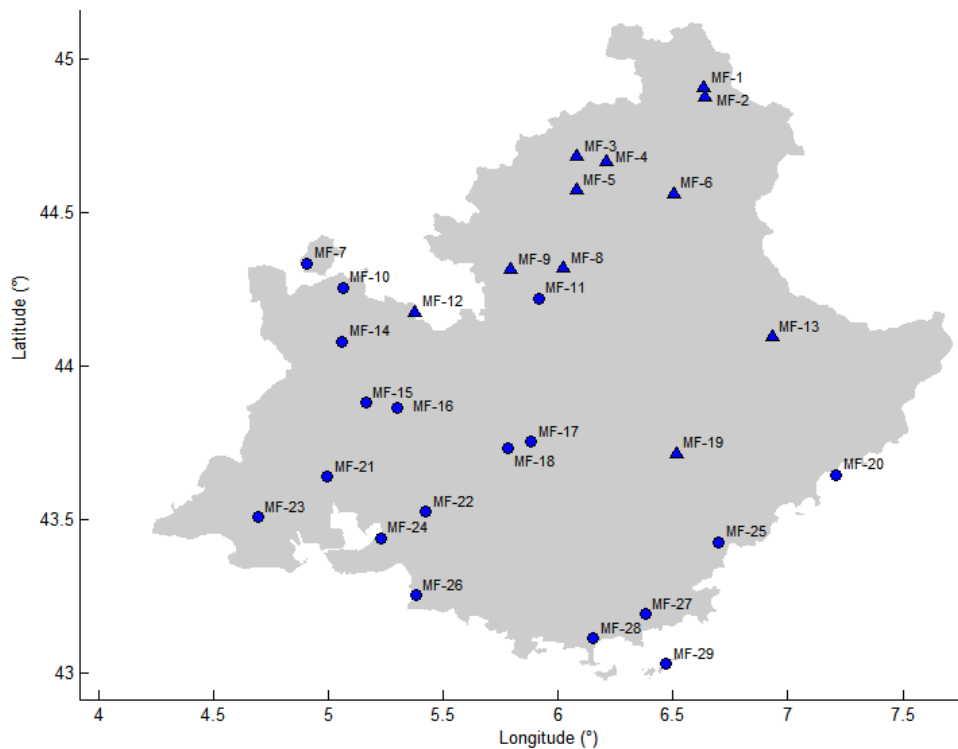
- Carpentras (84031001)
- Carpentras DSO (84031003)

La deuxième station – Carpentras DSO – présente nettement moins de mesures journalières d’irradiation que la station voisine : nous avons décidé de ne pas la prendre en considération pour l’étalonnage des estimations d’irradiations.

Ainsi, le tableau 4 et la figure 2 présentent-elles la liste des 29 stations MF sélectionnées pour l’étude avec leur identifiant Météo France et leur géolocalisation. L’ordre des stations est en latitude décroissante et longitude croissante.

#	Nom d'usage	Identifiant	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
MF-01	<u>BRIANCON</u>	05023001	44.9083°N	6.6350°E	1324.0 m
MF-02	<u>VILLAR ST PANCRACE</u>	05183001	44.8800°N	6.6400°E	1310.0 m
MF-03	<u>ST BONNET</u>	05132002	44.6850°N	6.0800°E	1015.0 m
MF-04	<u>ST-JEAN-ST-NICOLAS</u>	05145002	44.6700°N	6.2083°E	1210.0 m
MF-05	<u>GAP</u>	05061009	44.5767°N	6.0783°E	885.0 m
MF-06	<u>EMBRUN</u>	05046001	44.5650°N	6.5017°E	871.0 m
MF-07	VISAN	84150001	44.3367°N	4.9050°E	141.0 m
MF-08	<u>LA MOTTE DU CAIRE</u>	04134002	44.3217°N	6.0233°E	665.0 m
MF-09	<u>LARAGNE</u>	05070003	44.3183°N	5.7933°E	565.0 m
MF-10	VAISON LA ROMAINE	84137001	44.2583°N	5.0633°E	240.0 m
MF-11	SISTERON	04209005	44.2233°N	5.9150°E	500.0 m
MF-12	<u>SAVOILLAN</u>	84125003	44.1783°N	5.3750°E	510.0 m
MF-13	<u>PEONE</u>	06094002	44.0983°N	6.9300°E	1784.0 m
MF-14	CARPENTRAS	84031001	44.0817°N	5.0583°E	99.0 m
MF-15	CABRIERES D'AVIGNON	84025001	43.8833°N	5.1633°E	142.0 m
MF-16	BONNIEUX/PLAINE	84020004	43.8683°N	5.3017°E	175.0 m
MF-17	GREOUX	04094002	43.7567°N	5.8833°E	359.0 m
MF-18	VINON/VERDON	83150002	43.7333°N	5.7817°E	271.0 m
MF-19	<u>COMPS-ENTERRON</u>	83044004	43.7183°N	6.5133°E	836.0 m
MF-20	NICE	06088001	43.6483°N	7.2083°E	2.0 m
MF-21	SALON-DE-PROVENCE-INRA	13103004	43.6417°N	4.9933°E	62.0 m
MF-22	AIX EN PROVENCE	13001009	43.5283°N	5.4233°E	173.0 m
MF-23	ARLES	13004003	43.5100°N	4.6933°E	1.0 m
MF-24	MARIGNANE	13054001	43.4417°N	5.2267°E	5.0 m
MF-25	FREJUS-PLAINE	83061005	43.4283°N	6.7000°E	7.0 m
MF-26	MARSEILLE	13055025	43.2550°N	5.3800°E	5.0 m
MF-27	BORMES LES MIMOSAS	83019002	43.1950°N	6.3783°E	88.0 m
MF-28	HYERES-PLAGE	83069016	43.1150°N	6.1533°E	9.0 m
MF-29	ILE DU LEVANT	83069003	43.0317°N	6.4683°E	118.0 m

**Tableau 4 :** liste des 29 stations météorologiques de Météo France en région PACA identifiées pour le projet. Le soulignement du nom signale les stations MF dites « en zone montagneuse » pour lesquelles l'orographie avoisinante est considérable.

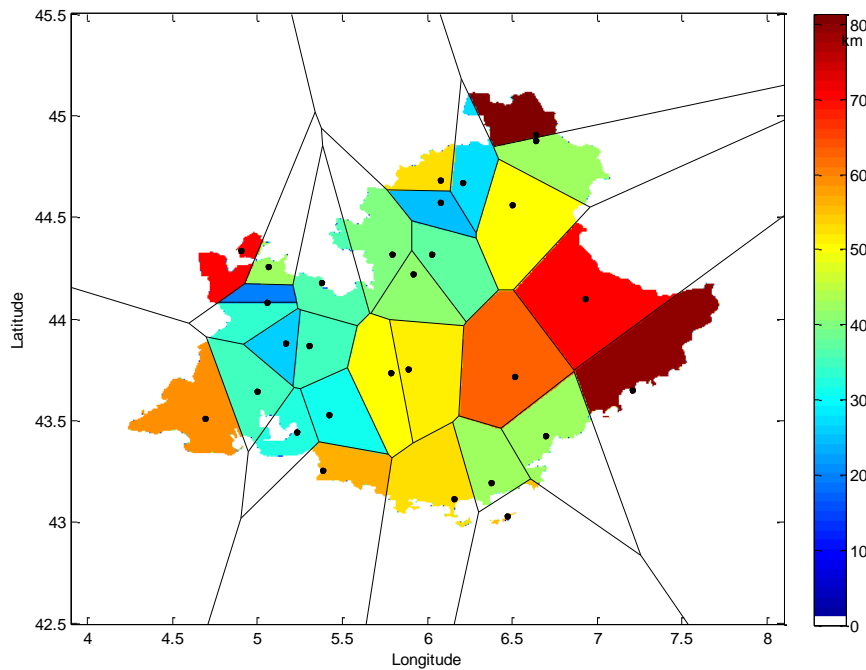


**Figure 2 :** géolocalisation des 29 stations météorologiques de Météo France identifiées en région PACA pour le projet. Le symbole ▲ signale une station MF dite « en zone montagneuse » pour laquelle l'orographie avoisinante est considérable.

Les stations apparaissant en souligné dans le tableau précédent sont celles dont l'orographie dans leur voisinage est à considérer car susceptible de générer des effets d'ombrage non négligeable sur les mesures journalières d'irradiation. En annexe C sont présentées les estimations des horizons pour ces stations.

La distance moyenne entre les différentes stations est d'environ 46 km. La figure 3 représente les cellules de Voronoï associées à chacune de ces stations MF. La cellule associée à une station correspond à la portion de la région pour laquelle la station est la plus proche au sens de la distance euclidienne. Cette figure permet d'apprécier la relative hétérogénéité de la densité des stations MF.





**Figure 3 :** cellules de Voronoï associées à chacune des stations de Météo France. Les couleurs représentent les distances moyennes de chacune des stations avec les stations voisines (*i.e.* dont les cellules de Voronoï sont contigües).

#### 4.1.2 Analyse des mesures pyranométriques journalières des stations MF

L'ensemble des stations identifiées mesurent le rayonnement global journalier sur plan horizontal (GHId). Parmi ces stations, seulement deux stations, Marignane et Carpentras, mesurent en outre le rayonnement diffus horizontal journalier (DHId) ; enfin, La station de Carpentras est la seule à délivrer des mesures journalières du rayonnement direct en incidence normale (DNId).

Concernant les mesures de GHId, nous avons procédé au contrôle de qualité préconisé par (RB6) consistant à vérifier les trois conditions « de plausibilité » suivantes :

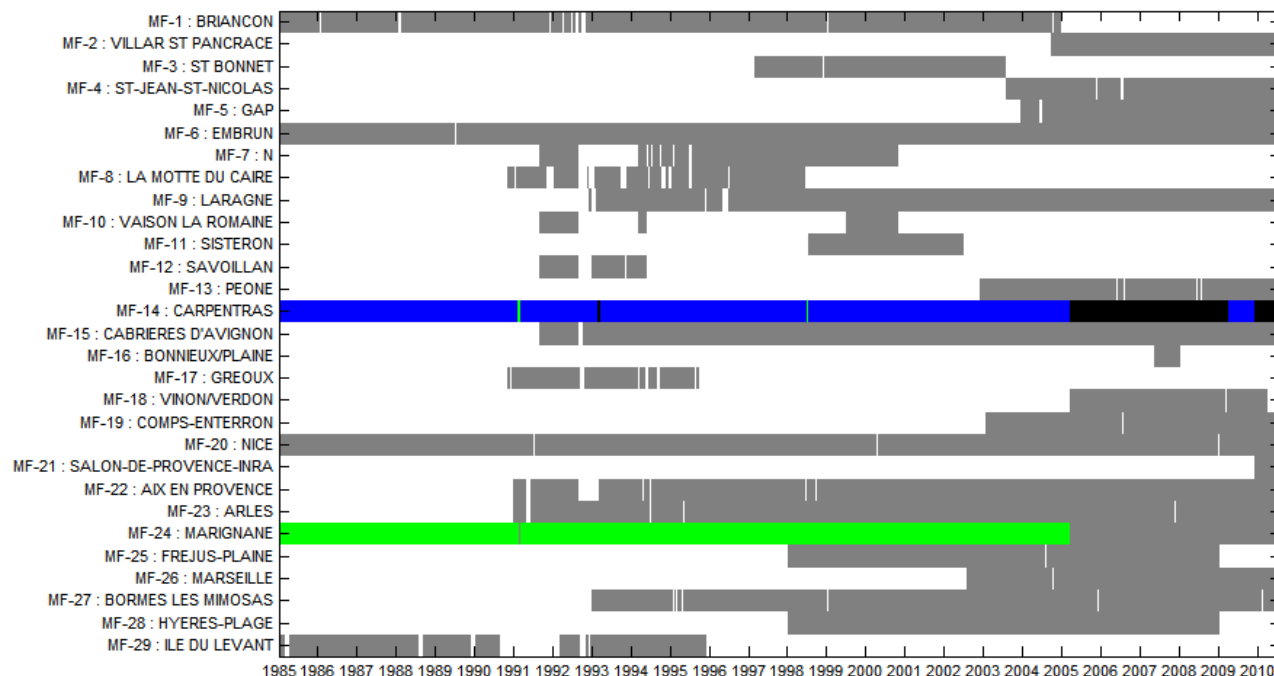
- les mesures de GHId doivent être strictement inférieures à l'irradiation journalière hors atmosphère ;
- les mesures de GHId doivent être strictement supérieure à 3 % de l'irradiation journalière hors atmosphère ;
- les mesures de GHId doivent être strictement inférieures à 110 % de l'irradiation journalière par ciel clair dans des conditions extrêmes de pureté de l'atmosphère (*i.e.* avec un trouble de Linke égal à 1).

Le non-respect d'une de ces trois conditions conduit au rejet de la mesure de GHI ainsi que des mesures de DHId et DNId correspondantes, le cas échéant, par mesure de prudence.

De même, lorsque la mesure du DHId est disponible en même temps que celle du GHId, un test de cohérence est effectué en éliminant les mesures lorsque le DHId est supérieur strictement au GHId.

Sur les 119414 mesures GHId provenant des 29 stations MF entre janvier 1985 et juillet 2010, 130 n'ont pas passé le crible du contrôle de qualité, soit un taux de rejet très faible de l'ordre de 1.1 %.

La figure 4 représente par des codes de couleurs la disponibilité des mesures d'irradiation journalières GHId uniquement (en gris), GHId et DHId (en vert), GHId et DNId (en noir) et, enfin, GHId et DHId et DNId (en bleu).



**Figure 4 :** disponibilité des mesures d'irradiations journalières issues des 29 stations MF identifiées en PACA (gris : GHId uniquement, vert : GHId et DHId, noir : GHId et DNId, bleu : GHId, DHId et DNId).

Parmi ces 29 stations MF identifiées, 21 stations permettent de disposer de mesures journalières de rayonnement global sur plan horizontal sur la période correspondant à celle de HC3 (*i.e.* à partir de février 2004) et 27 sur la période correspondant à HC1.

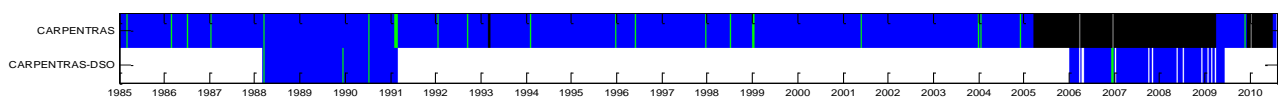
Pour procéder à l'étalonnage des estimations des irradiations journalières, nous avons donc récupéré les mesures journalières de ces 29 stations MF dans la période allant du 1<sup>er</sup> janvier 2005 au 31 juillet 2010. Compte tenu des périodes de fonctionnement très différentes d'une station MF à l'autre, nous disposons d'environ 119414 mesures valides de GHId, 14995 de DHId et 9044 de DNId, sur la période de 9404 jours entre le 01/01/1985 et le 31/07/2010.

Les statistiques des mesures de GHId, du DHId et du DNId sur l'ensemble des stations sont données par le tableau ci-dessous :

	GHId	DHId	DNId
<b>Nombre de jours (days)</b>	119414 days	14995 days	9243 days
<b>Moyenne (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	4.20 kWh/m <sup>2</sup>	1.40 kWh/m <sup>2</sup>	4.87 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Ecart type en % (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	56 % (2.35 kWh/m <sup>2</sup> )	53 % (0.74 kWh/m <sup>2</sup> )	67 % (3.28 kWh/m <sup>2</sup> )
<b>Valeur efficace (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	4.82 kWh/m <sup>2</sup>	1.58 kWh/m <sup>2</sup>	5.87 kWh/m <sup>2</sup>

**Tableau 5 :** statistiques des mesures journalières de GHId, DHId et DNId sur les stations de Météo France en région PACA sur la période entre 1985 et 2010.

Comme indiqué en début de section, la station de Carpentras dispose, à proximité immédiate (moins de 180 mètres de distance), d'une deuxième station, avec des périodes communes de mesures de GHId, DHId et DNId (cf. figure 5).



**Figure 5 :** disponibilité des mesures d'irradiations journalières issues des deux stations MF Carpentras et Carpentras-DSO (gris : GHId uniquement, vert : GHId et DHId, noir : GHId et DNId, bleu : GHId, DHId et DNId).

Il nous a semblé intéressant d'exploiter cette configuration particulière pour comparer les mesures de ces deux stations qui doivent mesurer les mêmes irradiations compte tenu de leur extrême proximité. Dans la comparaison, nous avons choisi la station Carpentras comme celle de référence.

Pour toute la suite de ce rapport, nous avons utilisé un protocole standard d'estimation des erreurs entre deux séries temporelles de mesure d'irradiation (**RB3**) avec les notations précisées par la troisième section du tableau 1.

	NDA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
<b>GHId</b>	2267 days	4.25 kWh/m <sup>2</sup>	0.0 %	0.5 %	1.2 %	1.2 %	1.000	2.5 %
<b>DHId</b>	1156 days	1.44 kWh/m <sup>2</sup>	5.2 %	5.5 %	7.7 %	9.3 %	0.992	34.6 %
<b>DNId</b>	2223 days	5.13 kWh/m <sup>2</sup>	0.2 %	0.9 %	6.7 %	6.7 %	0.995	3.2 %

**Tableau 6 :** bilans d'erreurs entre les mesures de GHId, DHId et DNId des deux stations Carpentras et Carpentras-DSO sur des périodes communes, propres à chacune des modalités de mesures (GHId, DHId ou DNId).

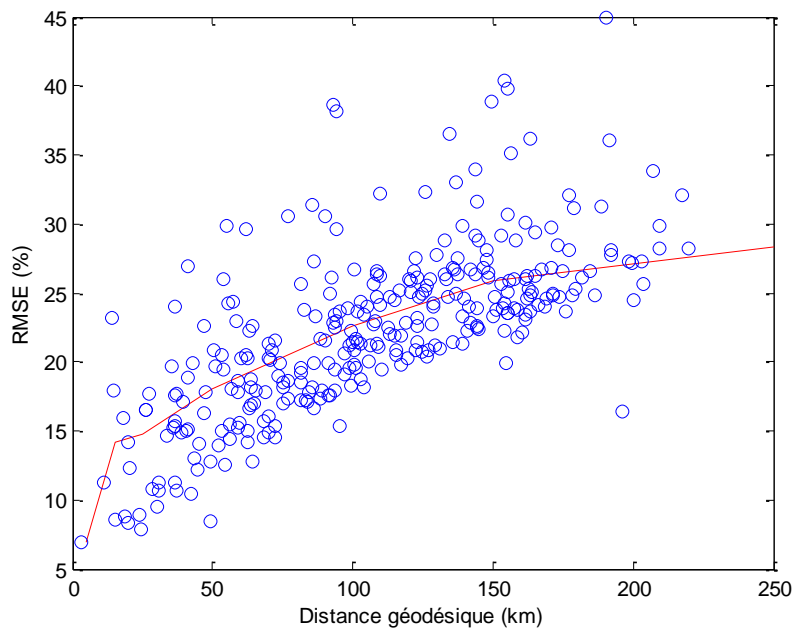
On note tout d'abord la grande précision – en biais et en erreur quadratique moyenne – avec laquelle les mesures de GHId concordent. Avec une hypothèse de non-corrélation des erreurs des deux stations de mesure la dispersion de mesure de GHId est de l'ordre 35 Wh/m<sup>2</sup>.

Les mesures de DNId présentent entre elles un biais quasiment nul, avec, une erreur quadratique moyenne de 6,6 %. Une hypothèse de non-corrélation des erreurs de mesure de DNI entre les deux stations indiquent donc une dispersion de mesure du DNId de l'ordre de 240 Wh/m<sup>2</sup>.

Les mesures de DHId sont, elles, sensiblement plus différentes entre les deux stations. L'écart systématique est de l'ordre de 75 Wh/m<sup>2</sup> et la dispersion des mesures ramenée à une seule

station avec une hypothèse de non-corrélation des erreurs est alors de l'ordre de  $78 \text{ Wh/m}^2$  (hors biais).

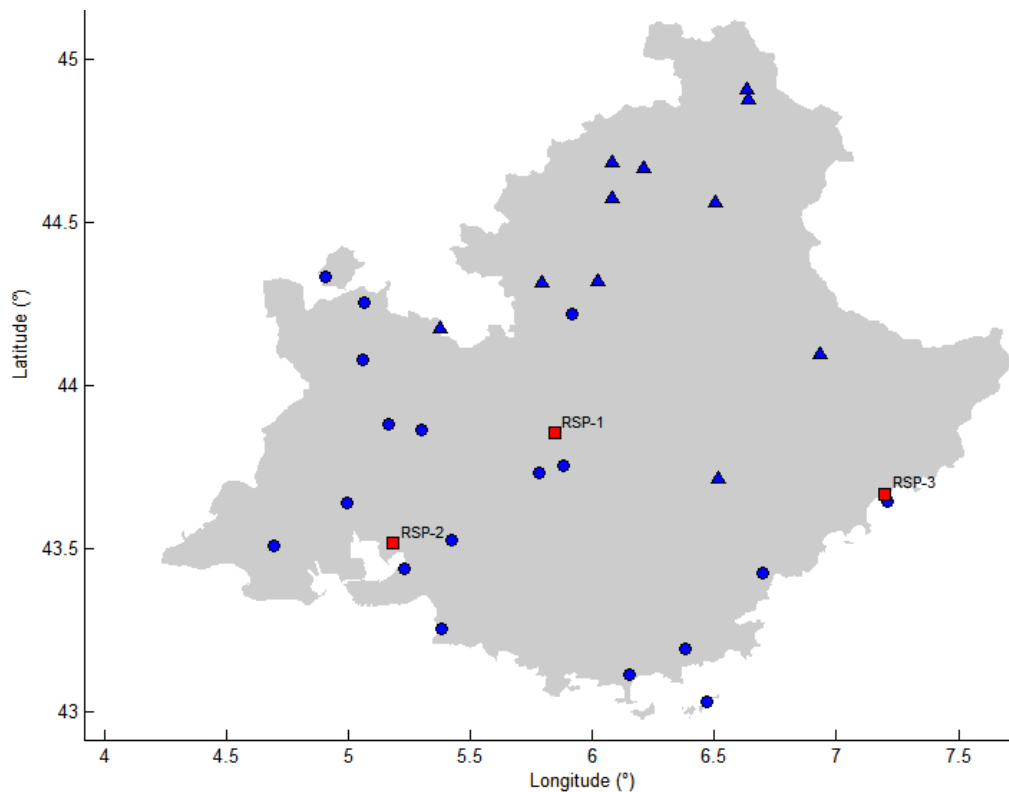
Par ailleurs, ce réseau de 29 stations nous a permis d'évaluer l'écart quadratique moyen relatif par rapport à la valeur moyenne de GHI de  $4,25 \text{ kWh/m}^2$  entre des mesures de GHI concomitantes entre deux stations, en procédant par chacun des couples de stations. Le report de ces différences en fonction de la distance géodésique séparant chacun de ces 406 couples de stations permet d'avoir une idée de variabilité spatiale « intrinsèque » du GHI sur la région PACA. Ainsi, la figure 6 montre-t-elle, par exemple, que les stations distantes de moins de 15 km voient leurs GHI différer, en terme d'écart quadratique moyen, de 7 % à 23 %, avec une moyenne de l'ordre de 16 %.



**Figure 6 :** écarts quadratiques moyens constatés entre les mesures de GHI entre les couples de stations, classés par leurs distances géodésiques (ronds bleus). La courbe rouge correspond à la moyenne de ces écarts.

## 4.2 Les trois stations RSP dédiées au projet

Les stations météorologiques dédiées au projet sont au nombre de trois : une située à Volx (04), une à Berre l'Etang (13) et une à Nice (06) (cf. figure 7). Pour toute la suite, ces stations spécifiques seront dénommées RSP, avec les numéros suivants : RSP-1 pour celle près de Volx, RSP-2 pour celle près de Berre l'Etang et, enfin, RSP-3 pour celle près de Nice.



**Figure 7 :** emplacements marqués par des carrés rouges des stations météorologiques RSP dédiées au projet, à Volx (1), Berre l'Etang (2) et Nice (3). A titre indicatif, les stations MF sont de nouveau représentées par les symboles ronds et triangles bleus, sans leur numérotation.

Ces trois stations, identiques dans leur principe, permettent la mesure très précise, *via* le principe du *Rotating Shadow Band*, toutes les 10 minutes, des rayonnements global et diffus sur plan horizontal, ainsi que direct en incidence normale. Ces mesures pyranométriques sont accompagnées de mesures météorologiques standards comme la température de l'air et l'humidité relative. Seule la station de Volx disposait en outre de capteurs spécifiques pour la vitesse et la direction du vent à 10 mètres. Une description précise de ce type de station météorologique se trouve dans **RB7**.

L'intérêt pour le projet de ces stations météorologiques comparées à celles du réseau de Météo France est la mesure concomitante des rayonnements global et diffus sur plan horizontal permettant l'estimation très précise des rayonnements globaux, diffus et directs sur un plan incliné quelconque ainsi qu'en incidence normale.

### 4.2.1 Identification des stations RSP



Figure 8 : emplacement de la station météorologique de Volx (04).

La première station météorologique RSP installée à Volx ( $43.8570^{\circ}\text{N}$ ,  $5.8430^{\circ}\text{E}$ ,  $325\text{ m}$ ) par le DLR pour le compte de la société TRANSFIELD a été installée le 16 avril 2008 et désinstallée lors du deuxième trimestre 2009. TRANSFIELD a gracieusement mis à disposition du projet l'ensemble des mesures de cette station sur la période du 17 avril 2008 au 30 avril 2009 (379 jours).

Les deux autres stations près de Berre l'Etang et près de Nice ont été louées directement pour le projet, pendant un peu plus de un an, à la société CSP Service (spin-off du DLR). La location ainsi que l'exploitation et la maintenance de la station de Nice a été entièrement financée par le Conseil Général des Alpes Maritimes. Celle de Berre l'Etang a bénéficié elle d'un co-financement de la région PACA et de l'ADEME PACA.

La période de mesure de ces deux stations, commençant en août 2009 et se terminant le 30 septembre 2010, ne recouvre pas celle de la première station à Volx.

Il est de plus à noter que nous avons opté pour ne pas inclure dans ces deux dernières stations les capteurs pyranométriques, pour des raisons de sécurité pour la station installée sur le toit d'un bâtiment à Nice.



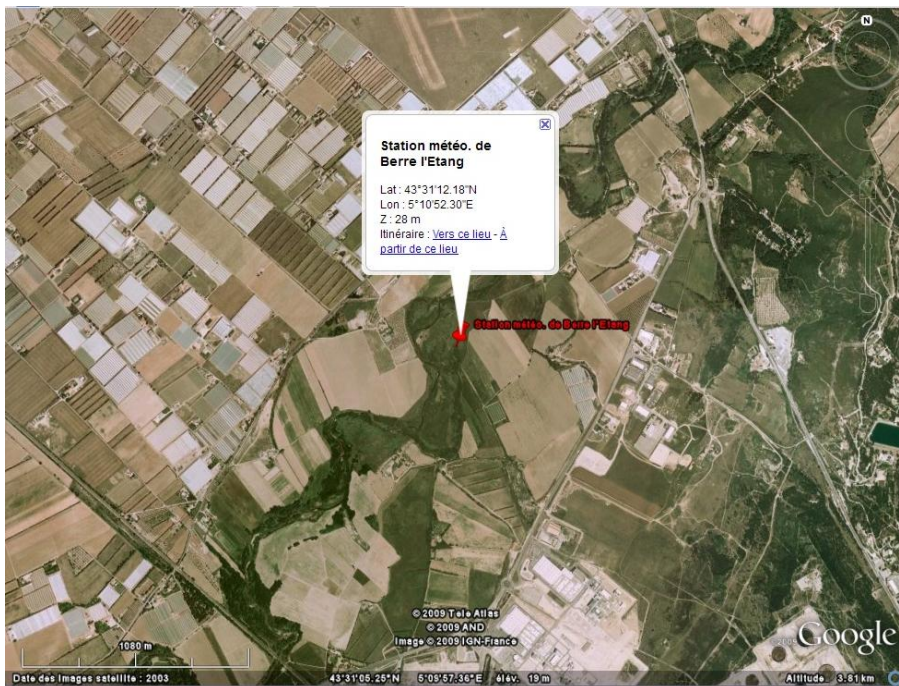


Figure 9 : emplacement de la station météorologique de Berre l'Etang.

Eric Marmioli, consultant pour TRANSFIELD, nous a proposé de mettre à disposition gracieusement un emplacement sur un terrain près de Berre l'Etang, dans le département des bouches du Rhône ( $43.520^{\circ}N$ ,  $5.182^{\circ}E$ ,  $25\text{ m}$ ).

Nous avons alors procédé à la préparation du site suivant la spécification **DP4** éditée par ARMINES et validée par CSP Service ; cette spécification est dérivée d'une spécification plus générale fournie par CSP Service (**DP2**) afin de tenir compte des caractéristiques du site et de la station ne comprenant pas le mât de 10 m accueillant les capteurs pyranométriques.

La station de Berre l'Etang a été installée et mise en opération le 29 juillet par la société CSP Service et finalement désinstallée le 30 septembre 2010.

Afin d'assurer d'excellentes mesures de rayonnement, la station a fait l'objet de visites de contrôle et de nettoyage des capteurs réguliers assurés par Eric Marmioli (cf. **DP6**) et de visites trimestrielles de maintenance par CSP Service.

Le station RSP de Nice a, quant à elle, été installée et mise en opération le 30 juillet 2009 sur le toit du bâtiment « Audibergue » du Centre Administratif des Alpes Maritimes (CADAM), à Nice, près de l'aéroport ( $43.671^{\circ}N$ ,  $7.199^{\circ}E$ ,  $40.0\text{ m}$ ). Elle fait l'objet de visites de contrôle et de nettoyage tous les mois assurées par ARMINES et d'une visite de maintenance par la société CSP Service tous les trois mois. La station a finalement été démontée le 29 septembre 2010.

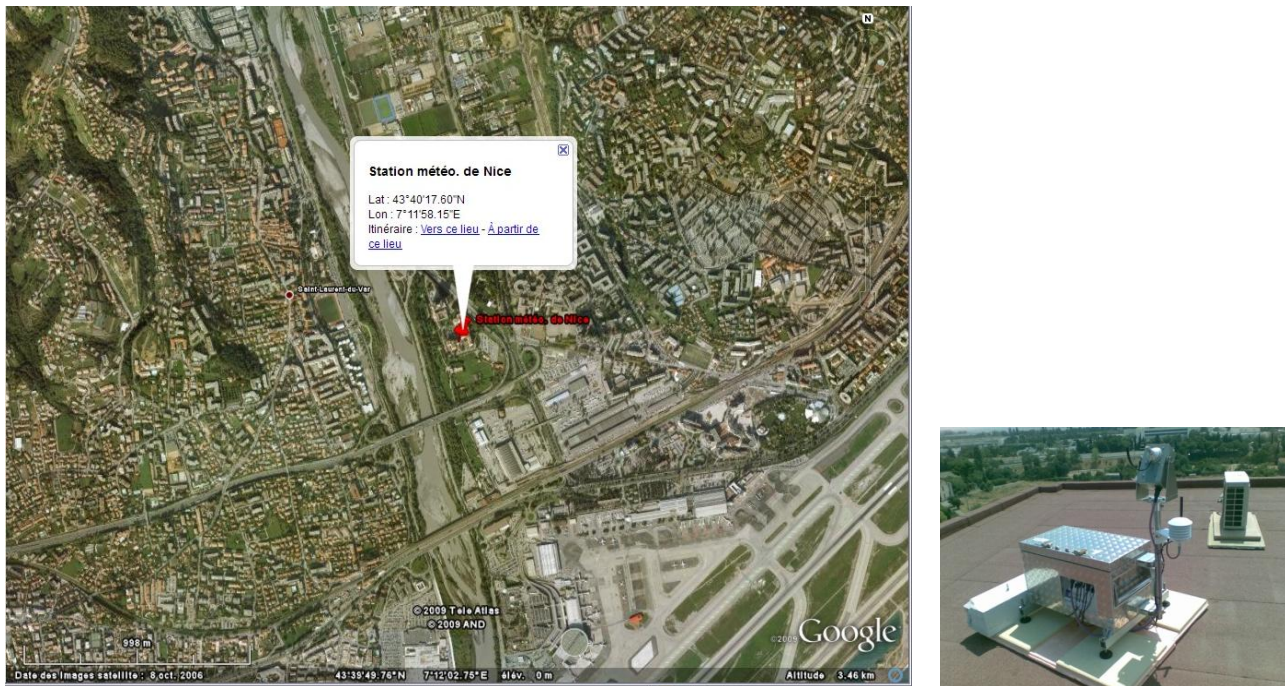


Figure 10 : station RSP installée le 30 juillet 2009, sur le toit du bâtiment Audibergue du CADAM, à Nice.

#	Nom d'usage	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Date de début	Date de fin
RSP-01	VOLX	43.857°N	5.843°E	325 m	17/04/2008	30/04/2009
RSP-02	BERRE L'ETANG	43.520°N	5.182°E	25 m	01/08/2009	29/09/2010
RSP-03	NICE	43.671°N	7.199°E	40 m	01/08/2009	28/09/2010

Tableau 7 : localisations géographiques et périodes de fonctionnement des trois stations RSP.

#### 4.2.2 Analyse des mesures pyranométriques des stations RSP

Les stations RSP fournissent, entre autres mesures météorologiques de surface (température, humidité, vitesse et direction du vent<sup>1</sup>), des séries temporelles à 10 minutes de résolution d'irradiation de type global horizontal, diffus horizontal et direct en incidence normale. Ces 10 minutes de résolution signifie qu'il s'agit de mesures toutes les 10 minutes des mesures d'irradiation intégrées sur les 10 minutes précédentes.

Ces mesures d'irradiation ont tout d'abord été analysées avec une procédure de test de qualité préconisées par **RB8**. Ces mêmes tests sont appliqués sur les mesures d'irradiation issues du réseau de stations pyranométriques du BSRN (Baseline Solar Radiation Network<sup>2</sup>). Ces tests consistent tout d'abord à vérifier que les mesures d'irradiation ne dépassent pas les bornes maximales physiques en testant, avec certaines tolérances, l'absence d'irradiations négatives ou supérieures aux valeurs horizontales ou en incidence normale, hors atmosphère. Ensuite, un test

<sup>1</sup> Uniquement pour la station RSP-1 de Volx.

<sup>2</sup> <http://www.bsrn.awi.de>

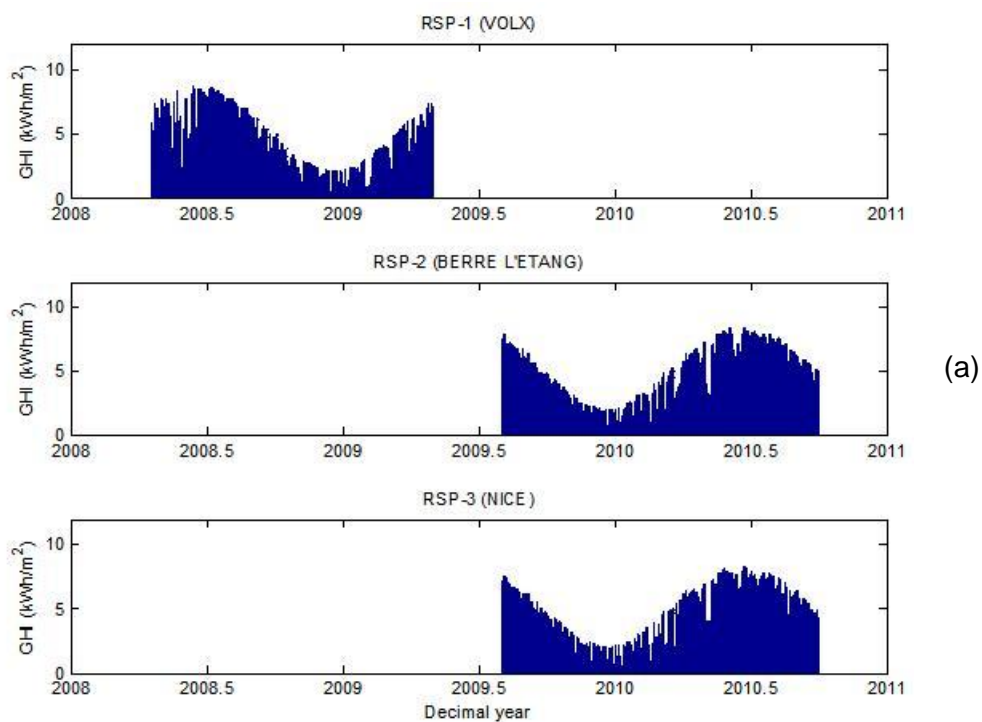


de « redondance » est effectué en analysant les mesures conjointes des irradiances globales, diffuses et directes en incidence normale.

L'ensemble des mesures d'irradiation des trois stations RSP passent positivement le crible de cette procédure de test.

Chaque station RSP présente quelques mesures à 10 minutes manquantes : ces données manquantes sont cependant en nombre très limité, inférieur à 5 sur l'ensemble des stations sur plus de 370 jours de mesures chacune.

Ces séries temporelles d'irradiation intra-journalières, à 10 minutes de résolution, sont ensuite sommées jour par jour pour constituer les séries journalières GHId, DHId et DNId, puis les séries mensuelles GHIm, DHIm et DNIm.



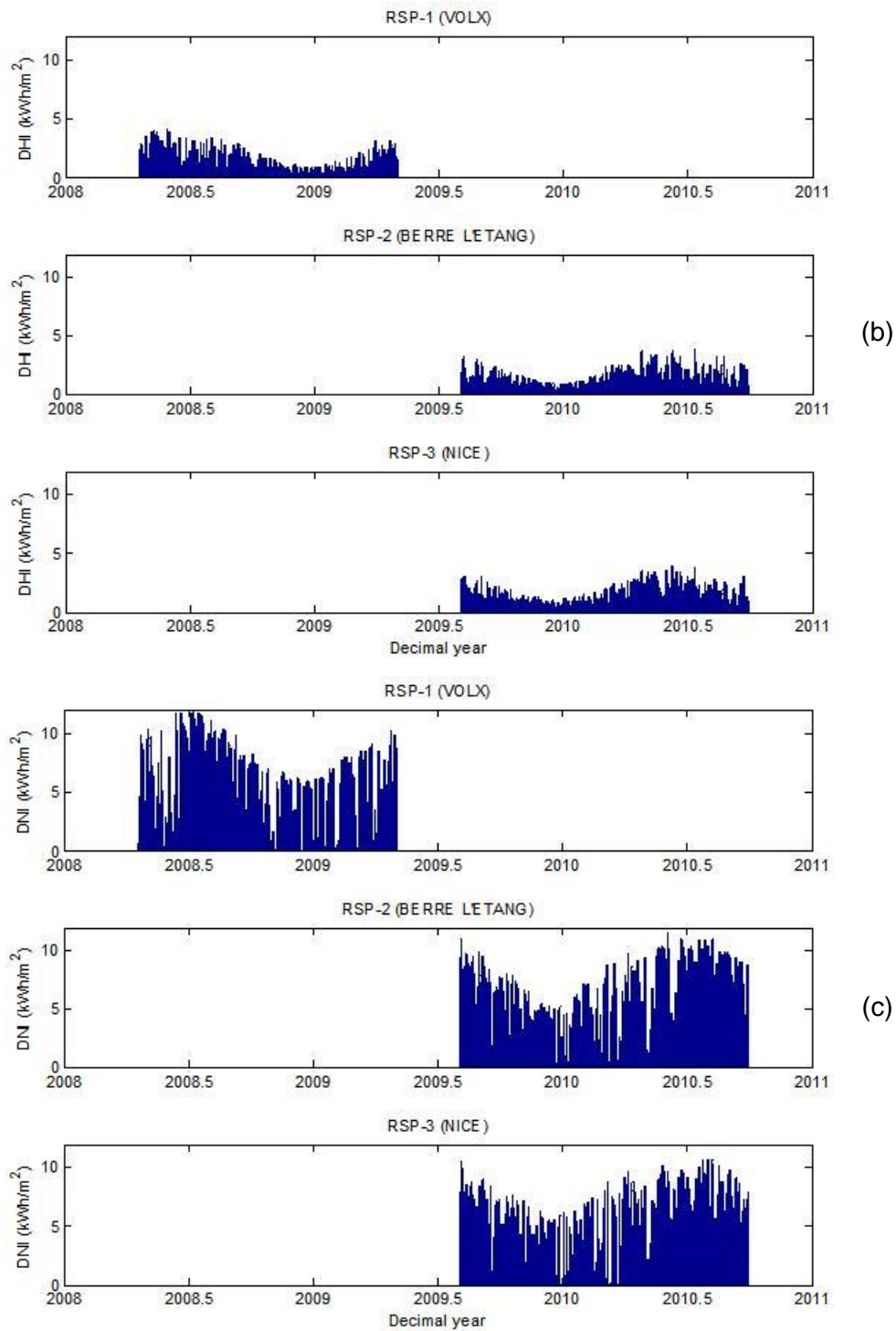


Figure 11 : irradiations journalières des trois stations RSP : (a) GHId, (b) DHId et (c) DNId.

RSP-1 (VOLX)				
Année	Mois	GHIm	DHIm	DNIm
2008	05	162.6 kWh/m <sup>2</sup>	82.4 kWh/m <sup>2</sup>	119.9 kWh/m <sup>2</sup>
2008	06	200.9 kWh/m <sup>2</sup>	63.8 kWh/m <sup>2</sup>	200.1 kWh/m <sup>2</sup>
2008	07	230.2 kWh/m <sup>2</sup>	50.7 kWh/m <sup>2</sup>	271.0 kWh/m <sup>2</sup>
2008	08	198.8 kWh/m <sup>2</sup>	47.0 kWh/m <sup>2</sup>	244.3 kWh/m <sup>2</sup>
2008	09	137.6 kWh/m <sup>2</sup>	51.8 kWh/m <sup>2</sup>	152.7 kWh/m <sup>2</sup>
2008	10	90.5 kWh/m <sup>2</sup>	34.7 kWh/m <sup>2</sup>	117.1 kWh/m <sup>2</sup>
2008	11	57.5 kWh/m <sup>2</sup>	23.2 kWh/m <sup>2</sup>	98.4 kWh/m <sup>2</sup>
2008	12	41.4 kWh/m <sup>2</sup>	16.7 kWh/m <sup>2</sup>	80.4 kWh/m <sup>2</sup>
2009	01	53.5 kWh/m <sup>2</sup>	19.6 kWh/m <sup>2</sup>	102.7 kWh/m <sup>2</sup>
2009	02	81.1 kWh/m <sup>2</sup>	24.0 kWh/m <sup>2</sup>	133.8 kWh/m <sup>2</sup>
2009	03	126.6 kWh/m <sup>2</sup>	43.5 kWh/m <sup>2</sup>	158.0 kWh/m <sup>2</sup>
2009	04	138.0 kWh/m <sup>2</sup>	57.0 kWh/m <sup>2</sup>	124.3 kWh/m <sup>2</sup>

Tableau 8 : irradiations mensuelles GHIm, DHIm et DNIm mesurées par la station RSP-1 (VOLX).

RSP-2 (BERRE L'ETANG)				
Année	Mois	GHIm	DHIm	DNIm
2009	08	203.7 kWh/m <sup>2</sup>	49.4 kWh/m <sup>2</sup>	240.6 kWh/m <sup>2</sup>
2009	09	143.7 kWh/m <sup>2</sup>	44.5 kWh/m <sup>2</sup>	172.0 kWh/m <sup>2</sup>
2009	10	101.4 kWh/m <sup>2</sup>	34.1 kWh/m <sup>2</sup>	147.3 kWh/m <sup>2</sup>
2009	11	59.9 kWh/m <sup>2</sup>	27.0 kWh/m <sup>2</sup>	90.1 kWh/m <sup>2</sup>
2009	12	43.3 kWh/m <sup>2</sup>	18.1 kWh/m <sup>2</sup>	79.0 kWh/m <sup>2</sup>
2010	01	49.8 kWh/m <sup>2</sup>	22.9 kWh/m <sup>2</sup>	77.6 kWh/m <sup>2</sup>
2010	02	65.1 kWh/m <sup>2</sup>	29.8 kWh/m <sup>2</sup>	85.9 kWh/m <sup>2</sup>
2010	03	116.2 kWh/m <sup>2</sup>	48.6 kWh/m <sup>2</sup>	128.2 kWh/m <sup>2</sup>
2010	04	157.3 kWh/m <sup>2</sup>	52.3 kWh/m <sup>2</sup>	169.1 kWh/m <sup>2</sup>
2010	05	184.2 kWh/m <sup>2</sup>	64.9 kWh/m <sup>2</sup>	178.6 kWh/m <sup>2</sup>
2010	06	209.3 kWh/m <sup>2</sup>	60.8 kWh/m <sup>2</sup>	218.1 kWh/m <sup>2</sup>
2010	07	232.0 kWh/m <sup>2</sup>	46.9 kWh/m <sup>2</sup>	271.0 kWh/m <sup>2</sup>
2010	08	96.7 kWh/m <sup>2</sup>	22.2 kWh/m <sup>2</sup>	115.8 kWh/m <sup>2</sup>

Tableau 9 : irradiations mensuelles GHIm, DHIm et DNIm mesurées par la station RSP-2 (BERRE L'ETANG).

RSP-3 (NICE)				
Année	Mois	GHIm	DHIm	DNIm
2009	08	196.4 kWh/m <sup>2</sup>	53.9 kWh/m <sup>2</sup>	219.7 kWh/m <sup>2</sup>
2009	09	137.3 kWh/m <sup>2</sup>	43.8 kWh/m <sup>2</sup>	162.5 kWh/m <sup>2</sup>
2009	10	102.0 kWh/m <sup>2</sup>	34.5 kWh/m <sup>2</sup>	143.0 kWh/m <sup>2</sup>
2009	11	57.9 kWh/m <sup>2</sup>	26.2 kWh/m <sup>2</sup>	88.0 kWh/m <sup>2</sup>
2009	12	40.2 kWh/m <sup>2</sup>	17.3 kWh/m <sup>2</sup>	75.0 kWh/m <sup>2</sup>
2010	01	47.1 kWh/m <sup>2</sup>	23.6 kWh/m <sup>2</sup>	68.4 kWh/m <sup>2</sup>
2010	02	58.8 kWh/m <sup>2</sup>	27.3 kWh/m <sup>2</sup>	77.0 kWh/m <sup>2</sup>
2010	03	111.4 kWh/m <sup>2</sup>	46.8 kWh/m <sup>2</sup>	119.6 kWh/m <sup>2</sup>
2010	04	159.6 kWh/m <sup>2</sup>	60.1 kWh/m <sup>2</sup>	157.1 kWh/m <sup>2</sup>
2010	05	185.2 kWh/m <sup>2</sup>	72.6 kWh/m <sup>2</sup>	162.6 kWh/m <sup>2</sup>
2010	06	197.7 kWh/m <sup>2</sup>	68.1 kWh/m <sup>2</sup>	180.2 kWh/m <sup>2</sup>
2010	07	221.5 kWh/m <sup>2</sup>	59.2 kWh/m <sup>2</sup>	235.0 kWh/m <sup>2</sup>
2010	08	88.6 kWh/m <sup>2</sup>	25.3 kWh/m <sup>2</sup>	94.6 kWh/m <sup>2</sup>

**Tableau 10 :** irradiations mensuelles GHIm, DHIm et DNIm mesurées par la station RSP-3 (NICE).

La station RSP-3 de Nice est très proche de la station MF de Nice (MF- situé à une extrémité de l'aéroport de Nice. En effet, la distance est d'environ 2,6 km avec une différence d'altitude de moins de 30 mètres. Nous avons procédé à une comparaison journalière des irradiations globales sur plan horizontal entre les deux stations sur la période commune entre le 1<sup>er</sup> aout 2009 et le 31 juillet 2010, soit 365 jours dont 354 jours valides à la fois entre les deux stations.

Le tableau ci-dessous présente le bilan de différence entre ces deux stations.

Différences RSP-2 / MF-20	GHId	GHIm
<b>NDATA</b>	354 days	11 months
<b>MREF</b>	4.34 kWh/m <sup>2</sup>	132.4 kWh/m <sup>2</sup>
<b>MBE</b>	-3.4 % (-146 Wh/m <sup>2</sup> )	-3.6 % (-4.8 kWh/m <sup>2</sup> )
<b>MAE</b>	3.8 % (166 Wh/m <sup>2</sup> )	3.6 % (4.8 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>STD</b>	4.2 % (180 Wh/m <sup>2</sup> )	2.7 % (3.6 kWh/m <sup>2</sup> )
<b>RMSE</b>	5.4 % (232 Wh/m <sup>2</sup> )	4.5 % (6.0 kWh/m <sup>2</sup> )
<b>CC</b>	0.998	0.999
<b>KSI</b>	21.2 %	-

**Tableau 11 :** statistiques des différences des mesures de GHId entre la station RSP-3 de Nice et la station MF-20 de l'aéroport de Nice sur la commune entre le 1<sup>er</sup> aout 2009 et le 31 juillet 2010.

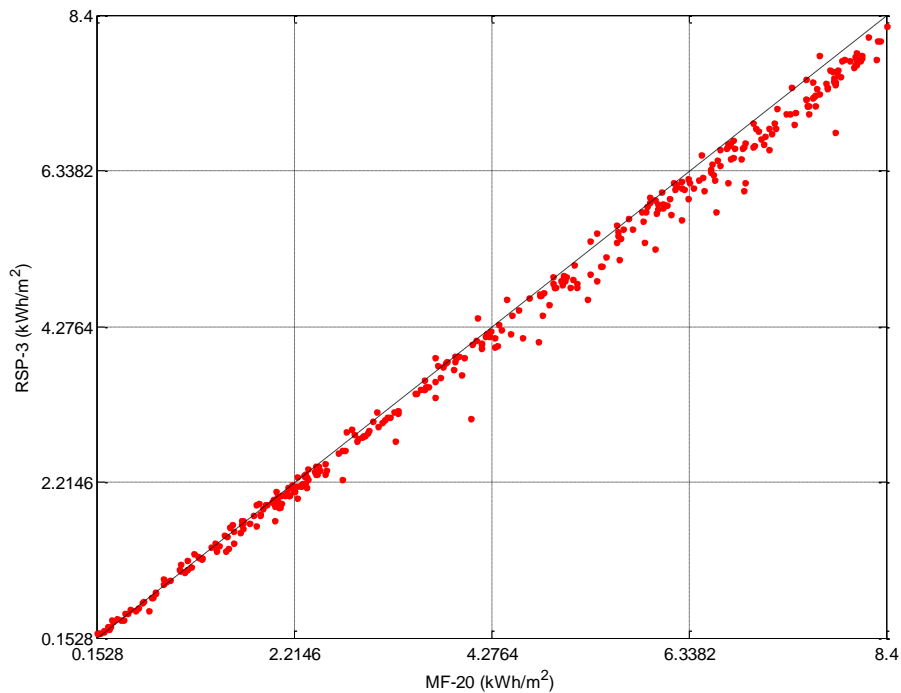


Figure 12 : scatterogramme entre les mesures de GHId de MF-20 (en abscisse) et celles de RSP-3 (en ordonnées).

On note que les différences entre ces deux stations sont certes faibles, de l'ordre de 5,4 % en erreur quadratique moyenne mais ne sont pas nulles. La corrélation entre ces deux séries de mesures est cependant très élevée, comme l'atteste le niveau de corrélation de 0.998 ainsi que la faible dispersion des points du scatterogramme de la figure 12.

## 5 ETABLISSEMENT DES MODELES DE DECOMPOSITION DIRECT / DIFFUS

Comme résumé dans la section précédente §□, cette étape consiste en la détermination des fonctions paramétriques empiriques et des paramètres associés pour la décomposition de l'irradiation journalière globale GHId en irradiation journalière diffuse DHId et directe BHId, sur plan horizontal.

Les fonctions paramétriques choisies sont celles inspirées des travaux de **RB14**, adaptées au cas de mesures journalières et non pas horaires. Elles correspondent à des fonctions de transfert permettant la détermination de la fraction de diffus KDd définie comme le rapport DHId sur GHId à partir de la donnée de l'indice de clarté KTd défini comme rapport GHId sur TOAd. Ces fonctions de transfert peuvent aussi dépendre, en plus du KTd, de variables externes.

Plus précisément, les deux fonctions paramétriques testées sont les suivantes :

- Modèle M1 : modèle à 5 paramètres, en fonction uniquement de KTd.

$$KDd[\tau](KTd) = \tau_1 + \tau_2 \exp\left(-\exp(\tau_3 + \tau_4 KTd + \tau_5 KTd^2)\right) \quad [1]$$

- Modèle M2 : modèle à 8 paramètres, en fonction de KTd et d'une variable externe notée Vd.

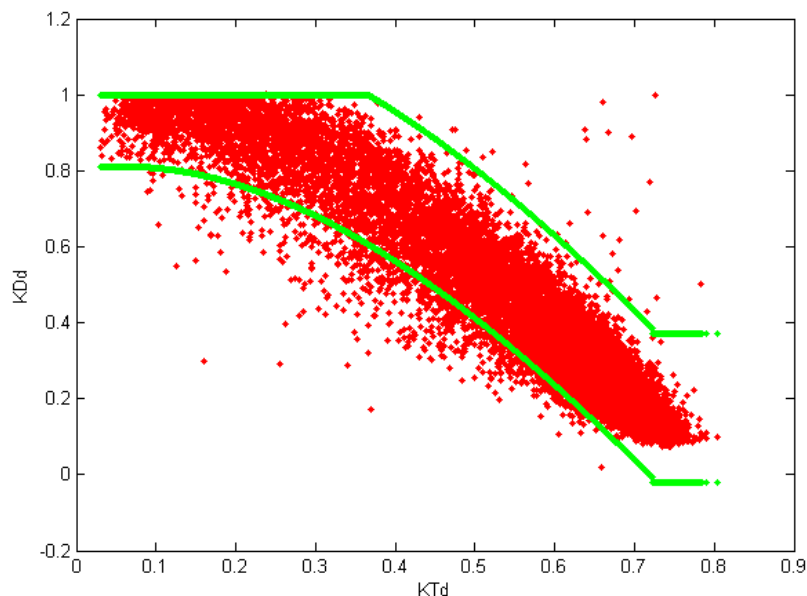
$$KDd[\tau](KTd) = \tau_1 + \tau_2 \exp\left(-\exp\left(\tau_3 + \tau_4 KTd + \tau_5 KTd^2 + \tau_6 Vd + \tau_7 Vd^2 + \tau_8 KTd Vd\right)\right) \quad [2]$$

Cette détermination s'appuie sur les 5 stations du projet offrant la mesure concomitante du GHId et du DHId : MF-24 (MARGINANE), MF-14 (CARPENTRAS), RSP-1 (VOLX), RSP-2 (BERRE-L-ETANG) et RSP-3 (NICE).

La variable externe journalière  $Vd$  choisie pour le modèle M2 est l'angle horaire de coucher du soleil. Cette variable externe aurait pu être choisie différente comme, par exemple l'élévation solaire maximale de la journée ou encore la durée astronomique du jour. Différents tests ont été menés avec différentes variables externes journalière et l'angle horaire du coucher du soleil permettait des performances de décomposition légèrement meilleures.

Le modèle paramétrique de décomposition direct / diffus proposé dans **RB15**, composée de polynômes par morceaux de degré 1 ou 2, utilise cette même variable externe. Nous n'avons cependant pas choisi de tester ce modèle paramétrique. En effet, la définition de ces polynômes par morceaux nécessite 13 paramètres comprenant les coefficients des polynômes ainsi que les bornes des intervalles de chacun d'entre eux. Ce grand nombre de paramètres dont certains très sensibles comme les bornes des intervalles des polynômes par morceaux rend délicat l'optimisation.

Toujours en s'inspirant des travaux présentés dans **RB14**, les données des couples  $(KTd, KDd)$  des différentes stations ont été filtrées de manière drastique en écartant les couples dont l'écart du modèle direct / diffus proposé dans **RB15** est supérieur à 2.5 fois l'écart type de l'écart quadratique moyen ou dont la fraction de diffus est supérieur à 1 (cf. figure 13).



**Figure 13 :** représentation des couples  $(KTd, KDd)$  des cinq stations de mesure (points rouges) avec les limites représentées par des points verts.

Ce filtre a, en définitive, retenu 97.9 % des 16212 couples de mesures  $(KTd, KDd)$ . Ainsi, ces 15867 couples ont été utilisés par des procédures d'optimisation de type Levenberg-Marquardt pour déterminer les paramètres des différents modèles paramétriques M1 et M2. Les coefficients des deux modèles optimisés sont consignés dans le tableau 12.

	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$
<b>M1</b>	1.0806	-1.4483	0.8459	-0.3883	-2.6322	-	-	-
<b>M2</b>	1.0929	-1.4876	0.6895	-1.3712	-2.9365	0.5058	-0.2677	0.7793

**Tableau 12 :** coefficients des modèles M1 et M2 optimisés avec l'ensemble des couples (KTd, KDd), toutes stations confondues.

Le tableau 13 montre la comparaison des performances en termes d'écart d'estimation du DHId et du BHId des deux modèles optimisés M1 et M2 ainsi que le modèle journalier ESRA (**RB15**).

		DHId	BHId
<b>NDATA</b>		15867 days	15867 days
<b>MREF</b>		1.39 kWh/m <sup>2</sup>	2.92 kWh/m <sup>2</sup>
<b>ESRA</b>	MBE	14.7 %	-7 %
	MAE	19.4 %	9.2 %
	STDE	21.4 %	10.2 %
	RMSE	26.0 %	12.4 %
	CC	0.924	0.991
	KSI	374.3 %	192.8 %
<b>M1</b>	MBE	0.9 %	-0.4 %
	MAE	15.0 %	7.1 %
	STDE	20.1 %	9.6 %
	RMSE	20.1 %	9.6 %
	CC	0.927	0.992
	KSI	130.1 %	36.1 %
<b>M2</b>	MBE	-0.1 %	0.0 %
	MAE	14.3 %	6.8 %
	STDE	19.6 %	9.4 %
	RMSE	19.6 %	9.4 %
	CC	0.929	0.992
	KSI	75.4 %	24.6 %

**Tableau 13 :** tableau comparatif des performances des modèles M1 et M2 optimisés et du modèle ESRA (RB15) en terme d'estimation du DHId et du BHId.

On remarque tout d'abord que le modèle ESRA, pour les 5 stations du projet en PACA, a tendance à surestimer assez fortement (200 Wh/m<sup>2</sup>) le rayonnement diffus journalier. Cette surestimation se traduit évidemment par une sous-estimation du rayonnement direct BHId de 200 Wh/m<sup>2</sup> correspondant à 7 % rapporté à la moyenne du BHId de référence (2.92 kWh/m<sup>2</sup>).

Les deux modèles M1 et M2, après optimisation, présentent, eux, un biais quasiment nul (par construction) et des performances en RMSE, MAE ou KSI bien supérieures au modèle ESRA. Le

modèle M2 présente des performances légèrement meilleures que celles du modèle M1 : c'est donc le modèle M2 qui a finalement été retenu pour l'établissement de l'atlas PACA.

Le tableau 14 montre, pour l'estimation du BHId avec le modèle M2 optimisé globalement avec toutes les stations, le bilan d'erreur station par station. On voit que pour les stations RSP, le modèle M2 optimisé globalement induit un biais 2 à 3 % sur le BHId, soit une légère surestimation de 40 à 80 Wh/m<sup>2</sup>.

	MF-24	MF-14	RSP-1	RSP-2	RSP-3
	BHId	BHId	BHId	BHId	BHId
<b>NDA</b>	7224 days	7453 days	367 days	417 days	406 days
<b>MREF</b>	2.92 kWh/m <sup>2</sup>	2.92 kWh/m <sup>2</sup>	2.80 kWh/m <sup>2</sup>	3.13 kWh/m <sup>2</sup>	2.89 kWh/m <sup>2</sup>
<b>MBE</b>	-0.4 % (-12 Wh/m <sup>2</sup> )	0.7 % (21 Wh/m <sup>2</sup> )	1.6 % (43 Wh/m <sup>2</sup> )	-2.6 % (-82 Wh/m <sup>2</sup> )	-2.9 % (-83 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>MAE</b>	6.6 % (192 Wh/m <sup>2</sup> )	6.8 % (198 Wh/m <sup>2</sup> )	8.6 % (240 Wh/m <sup>2</sup> )	7.7 % (240 Wh/m <sup>2</sup> )	8.9 % (260 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>STDE</b>	8.9 % (261 Wh/m <sup>2</sup> )	9.4 % (275 Wh/m <sup>2</sup> )	12.0 % (336 Wh/m <sup>2</sup> )	9.9 % (310 Wh/m <sup>2</sup> )	11.8 % (342 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>RMSE</b>	8.9 % (261 Wh/m <sup>2</sup> )	9.4 % (276 Wh/m <sup>2</sup> )	12.9 % (339 Wh/m <sup>2</sup> )	10.3 % (352 Wh/m <sup>2</sup> )	12.1 % (274 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>CC</b>	0.993	0.993	0.992	0.988	0.992
<b>KSI</b>	18.3 %	20.0 %	13.9 %	23.2 %	25.8 %

**Tableau 14 :** bilan des performances d'estimation du BHId station par station du modèle M2 optimisé avec toutes les stations.

Nous avons optimisé le modèle M2 station par station, amenant ainsi un biais quasiment nul pour chacune des stations. Cette optimisation station par station apporte seulement une légère amélioration sur le biais mais ne modifie pas notablement les autres termes du bilan d'erreur. Par contre, l'optimisation station par station soulève le problème de l'attribution en chaque point géographique de la région PACA des coefficients du modèle M2 ainsi rendu local, sachant que les 5 stations sont mal réparties géographiquement sur la région PACA.

Nous avons fait des tentatives en attribuant, pour un géo-point, les coefficients de la station la plus proche au sens de la distance géodésique parmi le groupe des 5 stations. Si cette solution est envisageable pour une détermination de la ressource en point particulier de PACA, elle génère des artefacts visuels sur les cartes d'irradiation au niveau des frontières du pavage de Voronoï<sup>3</sup> de ces stations.

## 6 ETALONNAGE DES SERIES TEMPORELLES GHId DE HC3

### 6.1 Comparaison des mesures in-situ de GHId et des estimations HC3 avant étalonnage

Les deux tableaux ci-dessous montrent les différences entre les estimations du GHId et du GHIm de HC3 et les stations MF et RSP.

<sup>3</sup> Frontières linéaires constituées de segments de médiatrices entre chaque couple de station correspondant aux frontières de changement de station servant de référence.



#	NDATA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
MF-1	315 days	4.38 kWh/m <sup>2</sup>	14.5 %	17.3 %	18.5 %	23.5 %	0.936	79.7 %
MF-2	2115 days	3.74 kWh/m <sup>2</sup>	21.3 %	24.3 %	24.8 %	32.7 %	0.919	254.5 %
MF-3	0 day	-	-	-	-	-	-	-
MF-4	2317 days	4.18 kWh/m <sup>2</sup>	4.8 %	16.7 %	23.2 %	23.7 %	0.922	80.8 %
MF-5	2325 days	4.27 kWh/m <sup>2</sup>	5.3 %	13.7 %	17.8 %	18.5 %	0.949	92.1 %
MF-6	2362 days	4.38 kWh/m <sup>2</sup>	7.0 %	13.5 %	16.9 %	18.3 %	0.952	112.8 %
MF-7	0 day	-	-	-	-	-	-	-
MF-8	0 day	-	-	-	-	-	-	-
MF-9	2357 days	4.19 kWh/m <sup>2</sup>	3.5 %	9.1 %	11.2 %	11.7 %	0.980	54.6 %
MF-10	0 day	-	-	-	-	-	-	-
MF-11	0 day	-	-	-	-	-	-	-
MF-12	0 day	-	-	-	-	-	-	-
MF-13	2290 days	4.25 kWh/m <sup>2</sup>	11.6 %	20.1 %	23.8 %	26.5 %	0.910	160.9 %
MF-14	2361 days	4.47 kWh/m <sup>2</sup>	1.8 %	7.9 %	9.5 %	10.0 %	0.984	39.3 %
MF-15	2360 days	4.46 kWh/m <sup>2</sup>	3.4 %	8.6 %	10.7 %	11.2 %	0.981	55.5 %
MF-16	238 days	4.68 kWh/m <sup>2</sup>	4.7 %	9.7 %	12.8 %	13.7 %	0.973	35.2 %
MF-17	0 day	-	-	-	-	-	-	-
MF-18	1811 days	4.39 kWh/m <sup>2</sup>	1.8 %	8.4 %	10.7 %	10.8 %	0.981	39.3 %
MF-19	2347 days	4.24 kWh/m <sup>2</sup>	8.8 %	12.6 %	14.0 %	16.5 %	0.970	131.7 %
MF-20	2338 days	4.43 kWh/m <sup>2</sup>	3.3 %	7.8 %	9.5 %	10.0 %	0.985	65.0 %
MF-21	232 days	4.57 kWh/m <sup>2</sup>	5.7 %	9.1 %	10.1 %	11.6 %	0.986	30.0 %
MF-22	2358 days	4.50 kWh/m <sup>2</sup>	4.1 %	8.3 %	9.9 %	10.7 %	0.984	69.6 %
MF-23	2354 days	4.50 kWh/m <sup>2</sup>	3.8 %	8.8 %	10.4 %	11.1 %	0.982	70.6 %
MF-24	405 days	4.37 kWh/m <sup>2</sup>	2.6 %	8.2 %	9.9 %	10.2 %	0.984	25.6 %
MF-25	1791 days	3.69 kWh/m <sup>2</sup>	22.9 %	22.9 %	14.2 %	26.9 %	0.987	264.9 %
MF-26	2349 days	4.61 kWh/m <sup>2</sup>	2.4 %	7.6 %	9.6 %	9.9 %	0.984	50.6 %
MF-27	2341 days	4.38 kWh/m <sup>2</sup>	6.2 %	9.5 %	10.9 %	12.6 %	0.981	92.6 %
MF-28	1795 days	4.07 kWh/m <sup>2</sup>	13.1 %	13.4 %	10.3 %	16.6 %	0.988	167.7 %
MF-29	0 day	-	-	-	-	-	-	-
RSP-1	373 days	4.21 kWh/m <sup>2</sup>	4.1 %	9.2 %	11.5 %	12.2 %	0.979	26.3 %
RSP-2	378 days	4.38 kWh/m <sup>2</sup>	5.3 %	8.5 %	10.1 %	11.4 %	0.984	33.0 %
RSP-3	377 days	4.22 kWh/m <sup>2</sup>	5.3 %	9.0 %	10.5 %	11.8 %	0.985	37.8 %
MF	41117 days	4.31 kWh/m <sup>2</sup>	6.6 %	11.9 %	15.2 %	16.5 %	0.964	387.5 %
RSP	1128 days	4.27 kWh/m <sup>2</sup>	4.9 %	8.9 %	10.7 %	11.8 %	0.982	52.6 %
MF+RSP	42245 days	4.31 kWh/m <sup>2</sup>	6.6 %	11.8 %	15.1 %	16.4 %	0.964	390.1 %

Tableau 15 : Bilans par station et global des différences de GHId entre les estimations HC3 et les mesures des stations MF et RSP.

Nom	NDATA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
MF-1	10 months	135.9 kWh/m <sup>2</sup>	14.1 %	15.0 %	11.1 %	17.9 %	0.996	-
MF-2	67 months	112.1 kWh/m <sup>2</sup>	21.8 %	22.0 %	20.4 %	29.9 %	0.945	-
MF-3	0 month	-	-	-	-	-	-	-
MF-4	71 months	126.9 kWh/m <sup>2</sup>	4.5 %	11.4 %	14.4 %	15.1 %	0.980	-
MF-5	75 months	129.6 kWh/m <sup>2</sup>	5.1 %	9.7 %	10.6 %	11.8 %	0.992	-
MF-6	76 months	133.3 kWh/m <sup>2</sup>	6.9 %	9.8 %	9.9 %	12.1 %	0.995	-
MF-7	0 month	-	-	-	-	-	-	-
MF-8	0 month	-	-	-	-	-	-	-
MF-9	76 months	127.1 kWh/m <sup>2</sup>	3.4 %	4.7 %	4.8 %	5.9 %	0.997	-
MF-10	0 month	-	-	-	-	-	-	-
MF-11	0 month	-	-	-	-	-	-	-
MF-12	0 month	-	-	-	-	-	-	-
MF-13	70 months	126.6 kWh/m <sup>2</sup>	10.6 %	15.3 %	16.3 %	19.5 %	0.979	-
MF-14	76 months	135.8 kWh/m <sup>2</sup>	1.8 %	4.2 %	5.0 %	5.3 %	0.998	-
MF-15	76 months	135.7 kWh/m <sup>2</sup>	3.3 %	5.2 %	5.5 %	6.4 %	0.997	-
MF-16	6 months	130.4 kWh/m <sup>2</sup>	3.9 %	8.2 %	9.1 %	9.9 %	0.995	-
MF-17	0 month	-	-	-	-	-	-	-
MF-18	57 months	134.0 kWh/m <sup>2</sup>	2.0 %	4.3 %	5.1 %	5.5 %	0.997	-
MF-19	75 months	128.5 kWh/m <sup>2</sup>	8.4 %	9.8 %	9.0 %	12.2 %	0.996	-
MF-20	74 months	134.9 kWh/m <sup>2</sup>	3.3 %	5.0 %	5.0 %	6.0 %	0.999	-
MF-21	7 months	147.9 kWh/m <sup>2</sup>	5.9 %	6.6 %	5.3 %	7.9 %	0.998	-
MF-22	76 months	136.8 kWh/m <sup>2</sup>	4.0 %	5.5 %	5.6 %	6.9 %	0.998	-
MF-23	75 months	137.5 kWh/m <sup>2</sup>	3.8 %	6.2 %	6.6 %	7.6 %	0.997	-
MF-24	12 months	136.5 kWh/m <sup>2</sup>	2.6 %	4.8 %	5.1 %	5.7 %	0.999	-
MF-25	56 months	111.7 kWh/m <sup>2</sup>	22.9 %	22.9 %	13.1 %	26.3 %	0.998	-
MF-26	76 months	139.9 kWh/m <sup>2</sup>	2.4 %	4.5 %	5.2 %	5.8 %	0.997	-
MF-27	74 months	134.8 kWh/m <sup>2</sup>	6.2 %	6.5 %	5.4 %	8.2 %	0.998	-
MF-28	57 months	124.4 kWh/m <sup>2</sup>	13.0 %	13.0 %	8.0 %	15.3 %	0.998	-
MF-29	0 month	-	-	-	-	-	-	-
RSP-1	12 months	126.7 kWh/m <sup>2</sup>	3.9 %	4.6 %	5.4 %	6.7 %	0.997	-
RSP-2	13 months	127.9 kWh/m <sup>2</sup>	5.3 %	5.5 %	5.6 %	7.7 %	0.998	-
RSP-3	13 months	123.4 kWh/m <sup>2</sup>	5.3 %	6.3 %	6.5 %	8.4 %	0.998	-
MF	1306 months	131.0 kWh/m <sup>2</sup>	6.4 %	8.6 %	10.4 %	12.2 %	0.986	91.3 %
RSP	38 months	126.0 kWh/m <sup>2</sup>	4.9 %	5.5 %	5.9 %	7.6 %	0.998	-
MF+RSP	1344 months	130.9 kWh/m <sup>2</sup>	6.4 %	8.5 %	10.3 %	12.1 %	0.986	91.8 %

Tableau 16 : Bilan par station et bilan global des différences de GHIm entre les estimations HC3 et les mesures des stations MF et RSP.

Ces bilans sur l'ensemble des stations de mesure montrent que, globalement, HC3 produit des estimations de GHId et de GHIm très corrélées avec les mesures *in-situ* (corrélation de l'ordre 0.962 en journalier et de 0.986 en mensuel) mais toujours surévaluées, de moins de 7 %. Les erreurs quadratiques moyennes relatives sont de l'ordre de 17 % pour le GHId et diminuent pour atteindre un niveau de 12.5 % lorsque les séries temporelles sont agrégées mensuellement.

Ces moyennes sur l'ensemble des stations cachent cependant une grande variabilité des performances d'estimation HC3. Ainsi, pour la station CARPENTRAS (MF-14), HC3 permet-elle une estimation du GHId avec un biais relatif de moins de 1 % et une erreur quadratique moyenne relative de moins de 9 %, alors que les estimations du GHId pour certaines stations atteignent des biais relatifs de 10 à 23 % et des erreurs quadratiques relatives de 15 à 26 %.

On remarque tout d'abord que les performances d'estimation de HC3 sont dégradées pour les stations en zone montagneuse, avec des niveaux de surestimation et d'erreur quadratique moyenne plus élevés que pour les autres stations.

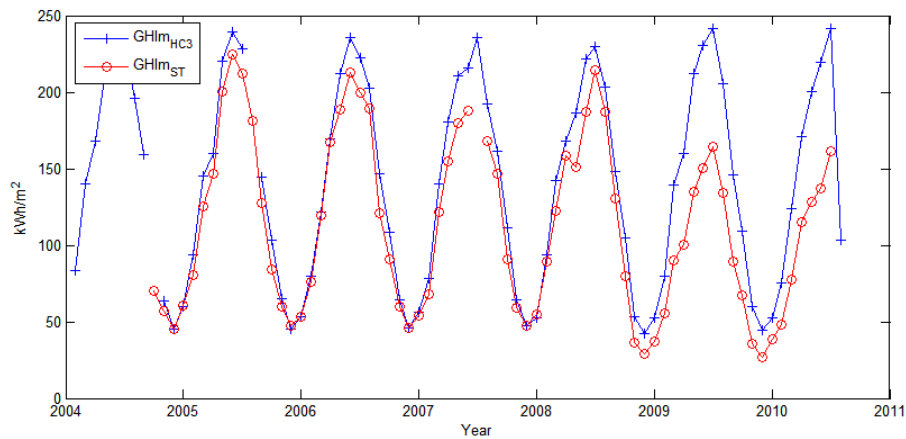
Zone	Non montagneuse	Montagneuse
<b>NDA</b>	25817 days	16428 days
<b>MREF</b>	4.39 kWh/m <sup>2</sup>	4.19 kWh/m <sup>2</sup>
<b>MBE</b>	5.30 % (232 Wh/m <sup>2</sup> )	8.6 % (362 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>MAE</b>	9.5 % (419 Wh/m <sup>2</sup> )	15.5 % (647 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>STD</b>	11.4 % (500 Wh/m <sup>2</sup> )	19.7 % (826 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>RMSE</b>	12.6 % (551 Wh/m <sup>2</sup> )	21.5 % (901 Wh/m <sup>2</sup> )
<b>CC</b>	0.979	0.940
<b>KSI</b>	268.1 %	307.5 %

**Tableau 17 :** comparaison des bilans d'erreur d'estimation de HC3 de GHId sur les stations MF et RSP montagneuses ou non.

Cet état de fait était tout à fait prévisible puisque l'orographie autour de ces stations montagneuses est suffisamment marquée pour induire une forte diminution des irradiations GHId mesurées par ces dernières.

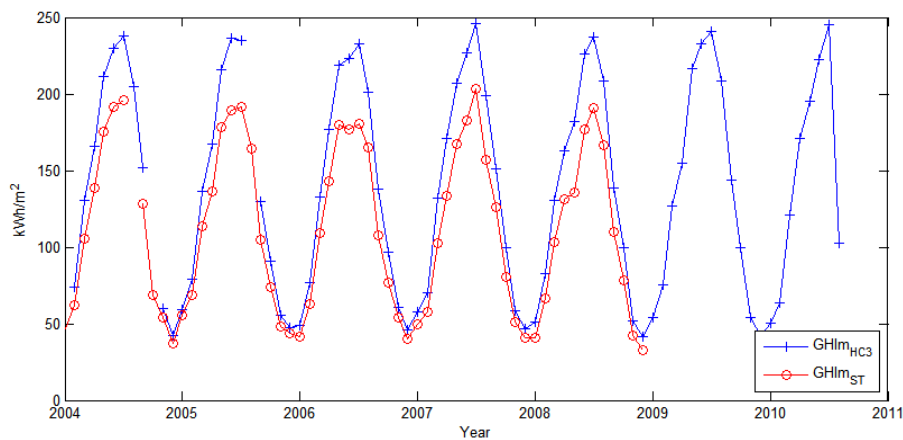
Cependant, pour une station en zone montagneuse particulière, – la station MF-2 (VILLAR-ST-PANCRACE) – l'estimation du GHIm de HC3 présente un niveau de corrélation anormalement bas puisqu'il est de 0.945 alors que pour l'ensemble des autres stations en zone montagneuse ou pas, le niveau de corrélation n'est jamais en dessous de 0.979. Une analyse temporelle du GHIm, présentée par la figure 14, montre que l'année 2009 et l'année 2010 en cours présentent des valeurs anormalement basses par rapport aux autres années, essentiellement pour les mois d'été.

Nous avons choisi de supprimer les valeurs de GHId de cette station pour les années 2009 à 2010.



**Figure 14 :** **GHI<sub>m</sub> mesurée par la station MF-2 (VILLAR-ST-PANCRACE) en rouge avec le symbole o et estimation de HC3 correspondante en bleu avec le symbole +.**

Par ailleurs, la station MF-25 (FREJUS-PLAINE), bien que n'étant pas en zone montagneuse, présente des mesures de GHI<sub>d</sub> anormalement plus faibles de près de 23 % comparée aux estimations de HC3. Les estimations HC3 sont par contre très corrélées avec les mesures avec un niveau de corrélation de 0.987. Comme le montre la figure 15, ce déficit vient essentiellement des mois d'été. Compte tenu de ce caractère atypique de cette station particulière, nous avons décidé de ne pas l'intégrer dans la procédure d'étalonnage de HC3.



**Figure 15 :** **Série temporelle de GHI<sub>m</sub> mesurée par la station MF-25 (FREJUS-PLAINE) en rouge avec le symbole o et estimation de HC3 correspondante en bleu avec le symbole +.**

Une analyse des mesures station par station a permis de vérifier que les stations autres que celle FREJUS-PLAINE et de VILLAR-ST-PANCRACE ne présentent pas de valeurs aussi atypique.

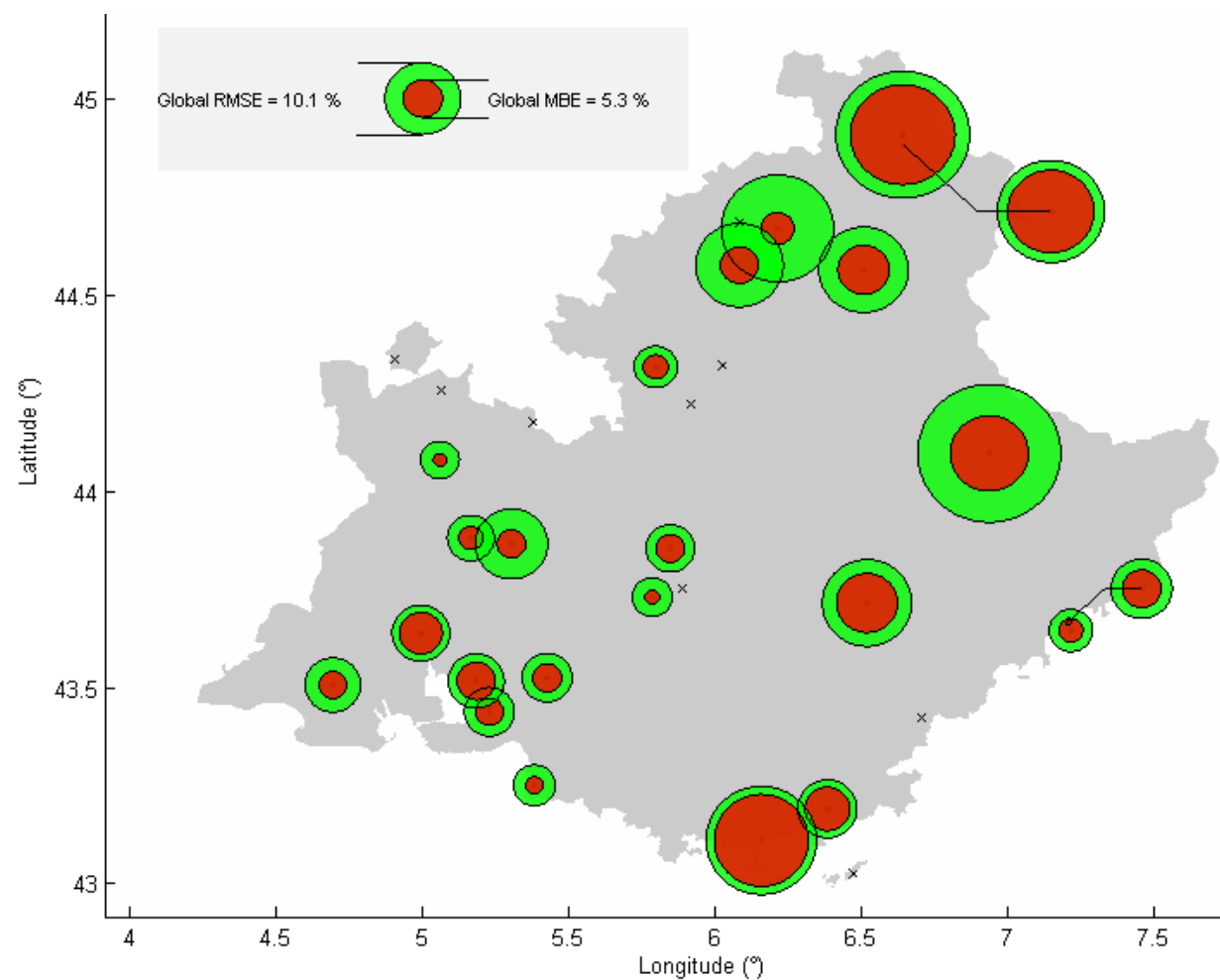
Nom	NDATA	MREF	MBE	MAE	STD	RMSE	CC	KSI
<b>MF</b>	1231 months	132.4 kWh/m <sup>2</sup>	5.3 %	7.6 %	8.7 %	10.2 %	0.991	81.1 %
<b>RSP</b>	38 months	126.0 kWh/m <sup>2</sup>	4.9 %	5.5 %	5.9 %	7.6 %	0.998	-
<b>MF+RSP</b>	1269 months	132.2 kWh/m <sup>2</sup>	5.3 %	7.5 %	8.7 %	10.1 %	0.992	81.7 %

**Tableau 18 :** Bilans global des différences de GH<sub>lm</sub> entre les estimations HC3 et les mesures des stations MF et RSP séparément puis conjointement.

Cependant, même en écartant les stations en zone montagneuse et celle près de Fréjus, les estimations GH<sub>ld</sub> provenant de HC3 présentent des erreurs et notamment des biais suivant une variabilité non négligeable sur l'ensemble des stations en région PACA.

Pour représenter ces variabilités, nous avons représenté sur une carte de la région PACA les biais relatifs et les erreurs quadratiques moyennes relatives pour les différentes stations sous la forme de disques concentriques respectivement de couleur rouge (surestimation) ou magenta (sous-estimation) et verte dont les rayons sont en proportion. Cette carte est représentée par la figure 16.

Cette constatation nous a enclin à imaginer une procédure d'étalonnage non pas globale mais locale que nous allons décrire.



**Figure 16 :** représentation des biais relatifs (cercles rouges en cas de surestimation et magentas en cas de sous-estimation) et des erreurs quadratiques moyennes relatives (cercles verts) issus des bilans de comparaisons du GHIm entre HC3 et l'ensemble des stations MF et RSP (cf. tableau 16). Le symbole x signifie l'absence de mesures des stations correspondantes sur la période de HC3.

## 6.2 Méthode d'étalonnage pour les stations en zone non montagneuse

On considère ici une station de mesure de GHId, en zone non montagneuse, à l'endroit de laquelle nous disposons d'une estimation concomitante de HC3. On note GHId<sub>ST</sub> et GHId<sub>HC3</sub> les séries temporelles de GHId provenant respectivement de la station et de HC3, sur une période de temps commune. On considère aussi, sur le même lieu et la même période de temps, la série temporelle journalière d'irradiation horizontale hors atmosphère notée TOAd.

Ces données d'irradiation hors atmosphère permettent de normaliser les deux séries d'irradiation GHId en les divisant par le TOAd, produisant ainsi des séries temporelles journalières d'indice de clarté notées respectivement KTd<sub>ST</sub> et KTd<sub>HC3</sub>.

On cherche, à partir de ces deux séries, à trouver une régression linéaire entre KTd<sub>ST</sub> d'une part et KTd<sub>HC3</sub> et une série de variables « externes », d'autre part, permettant de diminuer sensiblement l'erreur d'estimation de HC3, après régression. Autrement dit, pour N-2 variables externes, on cherche les N paramètres  $\gamma = [\gamma_1, \dots, \gamma_N]$  tels que :

$$\|KTd_{HC3}^*[\gamma] - KTd_{ST}\|^2 = \sum_{j=j_0}^{j_1} (KTd_{HC3}^*[\gamma](j) - KTd_{ST}(j))^2 \text{ minimum} \quad [3]$$

$$\text{où } KTd_{HC3}^*[\gamma] = \gamma_1 KTd_{HC3} + \sum_{k=2}^{N-1} \gamma_k V_k + \gamma_N$$

La détermination de ces N paramètres de régression linéaire se fait par la méthode des moindres carrés. La série temporelle HC3 étalonnées est alors définie par la relation suivante :

$$GHId_{HC3}^*[\gamma](j) = TOAd(j) \times KTd_{HC3}^*[\gamma](j) \quad [4]$$

Plusieurs tests ont été menés pour déterminer les variables externes les plus efficaces – au sens des moindres carrés – pour minimiser les différences entre GHId<sub>HC3</sub><sup>\*</sup>[ $\gamma$ ] et GHId<sub>ST</sub>.

Les variables suivantes ont, par exemple, été testés : les latitudes, longitudes et élévations des stations, le numéro de jours dans l'année, l'année, l'angle d'élévation solaire maximale dans la journée, la durée du jour, etc. Une seule variable externe  $V_1$  a été finalement retenue comme étant la plus efficace vis-à-vis de la réduction de l'erreur quadratique moyenne : elle correspond au jour angulaire dans l'année normalisée centrée sur le milieu de l'année, ramenée sur  $[0, 2\pi]$  et élevée au carré :

$$V_1 = \left( \frac{2\pi \text{DoY}(j)}{365.2422} - \pi [2\pi] \right)^2 \quad [5]$$

Où DoY(j) désigne le numéro du jour dans l'année (Day Of Year) du jour julien j.

Le tableau 19 montre les bilans d'erreur d'estimation de GHId et GHIm provenant de HC3, avant et après étalonnage pour les stations MF. Ces bilans tiennent compte de la suppression de la station de FREJUS-PLAINE et de la suppression des années 2009 et 2010 de la station VILLAR-ST-PANCRACE.



Nom	NDA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
<b>GHId<sub>HC3</sub></b>	22898 days	4.45 kWh/m <sup>2</sup>	4.2 %	8.7 %	10.5 %	11.3 %	0.982	210.2 %
<b>GHId<sub>HC3</sub><sup>*</sup>[<math>\gamma</math>]</b>	22898 days	4.45 kWh/m <sup>2</sup>	0.1 %	5.5 %	7.3 %	7.3 %	0.991	42.4 %
<b>GHIm<sub>HC3</sub></b>	730 months	135.5 kWh/m <sup>2</sup>	4.1 %	5.8 %	6.3 %	7.5 %	0.996	53.0 %
<b>GHIm<sub>HC3</sub><sup>*</sup>[<math>\gamma</math>]</b>	730 months	135.5 kWh/m <sup>2</sup>	0.1 %	2.4 %	3.2 %	3.2 %	0.998	10.9 %

**Tableau 19 :** bilan des erreurs d'estimation de GHId et GHIm de HC3, avant et après étalonnage, sur les stations MF en zone non montagneuse.

Le gain de l'étalonnage est très significatif, que ce soit pour les estimations d'irradiation globale journalière ou mensuelle. Il est à souligner que l'étalonnage annule en pratique les biais d'estimation mais, en outre, améliore très sensiblement les critères de second ordre comme l'erreur quadratique moyenne, ou le coefficient de corrélation. Le critère du KSI est lui aussi significativement amélioré.

### 6.2.1 Méthode d'étalonnage pour les stations en zone montagneuse

En zone montagneuse, la méthode d'étalonnage décrit précédemment n'est pas directement applicable car une grande part de la différence entre les estimations du GHId par HC3 et les mesures de ces stations sont dues à l'orographie très marquée au voisinage de ces dernières.

La difficulté réside dans le fait que la prise en compte de l'orographie pour compenser son effet sur l'estimation de HC3 est très sensible à la décomposition de l'irradiation globale en ses composantes directe et diffuse. En effet, les effets d'ombrage sont modélisés très différemment selon ces deux composantes. Or, cette décomposition est établie sur la base d'une fonction de transfert empirique fortement non linéaire (*cf.* section §5) avec de forte variation : un biais sur l'estimation de l'indice de clarté en entrée de fonction de transfert peut se traduire donc par une forte erreur systématique dans l'estimation de la composante diffuse, et donc, dans la prise en compte de l'orographie.

L'idée est de déterminer, par une méthode d'optimisation non-linéaire itérative de type Levenberg-Marquardt, les paramètres  $\gamma$  d'étalonnage associés à chaque station en zone montagneuse. On cherche ainsi à déterminer par une optimisation visant à réduire l'écart quadratique moyen entre d'une part, l'estimation de GHId provenant de HC3 après étalonnage et prise en compte de l'orographie et les mesures *in-situ*, d'autre part. Le schéma de principe de cette optimisation dédiée à l'étalonnage des stations en zone montagneuse est présenté par la figure 17.

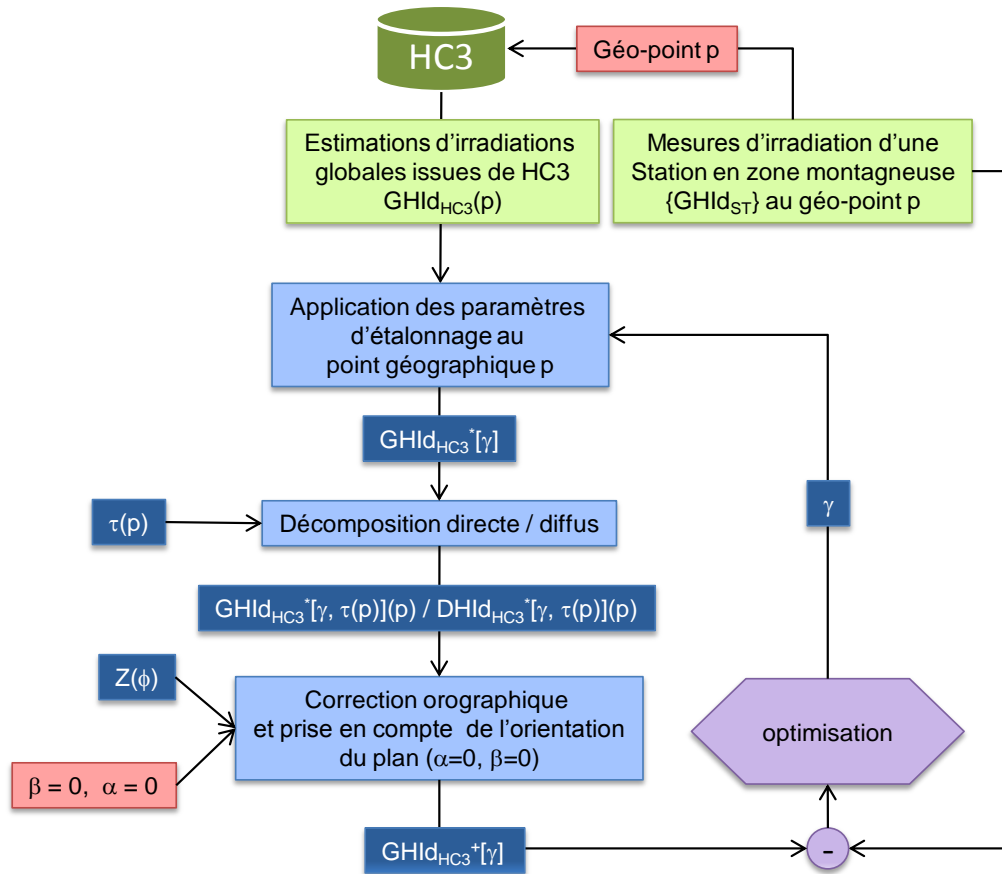


Figure 17 : schéma d'optimisation pour l'intégration des effets d'orographie lors de la détermination des coefficients d'étalonnage pour les stations montagneuses.

Nom	NDATA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
GHId <sub>HC3</sub>	15851 days	4.23 kWh/m <sup>2</sup>	7.4 %	14.4 %	18.5 %	20.0 %	0.946	266.4 %
GHId <sub>HC3</sub> <sup>+</sup> [γ,τ]	15851 days	4.23 kWh/m <sup>2</sup>	-0.4 %	8.8 %	12.6 %	12.6 %	0.973	53.8 %
GHIm <sub>HC3</sub>	501 months	127.9 kWh/m <sup>2</sup>	7.1 %	10.3 %	11.5 %	13.5 %	0.987	69.2 %
GHIm <sub>HC3</sub> <sup>+</sup> [γ,τ]	501 months	127.9 kWh/m <sup>2</sup>	-0.6 %	4.2 %	5.8 %	5.8 %	0.992	10.1 %

Tableau 20 : bilan des erreurs d'estimation de GHId et GHIm de HC3, avant et après étalonnage et prise en compte de l'orographie, sur les stations MF en zone montagneuse.

La procédure d'étalonnage couplée à la prise en compte de l'orographie améliore considérablement les bilans d'erreur d'estimation de HC3 vis-à-vis des mesures des stations MF en zone montagneuse : les biais systématiques sont quasiment annulés et les erreurs quadratiques moyennes considérablement diminuées avec -37 % pour celui relatif à GHId et -57 % pour celui relatif à GHIm.

Cependant, on note que les performances de l'étalonnage sur zone montagneuse est nettement en retrait par rapport à celles obtenues pour les autres stations. Ceci peut s'expliquer notamment par le fait que la prise en compte de l'orographie se fait par le biais d'une succession de modélisations dont :

- La modélisation de l'orographie par SRTM ;
- La modélisation de la décomposition de l'irradiation globale en rayonnement direct et diffus ;
- La modélisation de la répartition intra-journalière des irradiances globales et diffuses ;
- La modélisation de la décomposition du diffus en diffus isotrope et diffus circumsolaire ;
- La modélisation de la partie réfléchi par le sol ;

Chacune de ces modélisations génère ses propres erreurs induisant, au total, le long de la chaîne de traitements, des erreurs d'estimation de GHd et du GHm corrigées et étalonnées plus importantes dans le cas montagneux que dans le cas où l'orographie est négligeable.

### 6.3 Description de la méthode de l'étalonnage par interpolation et de sa validation

Les paramètres d'étalonnage  $\gamma$  ont été estimés pour un ensemble discret de points géographiques en PACA correspondant aux stations de mesure où les deux procédures d'étalonnage décrites dans les deux sections précédentes ont pu être appliquées. Le tableau 21 donne la liste des 20 stations MF d'étalonnage dont les paramètres d'étalonnage ont été utilisés pour l'interpolation.

#	Nom d'usage	#	Nom d'usage
MF-01	<u>BRIANCON</u>	MF-18	VINON/VERDON
MF-02	<u>VILLAR ST PANCRACE</u>	MF-19	<u>COMPS-ENTERRON</u>
MF-04	<u>ST-JEAN-ST-NICOLAS</u>	MF-20	NICE
MF-05	<u>GAP</u>	MF-21	SALON-DE-PROVENCE-INRA
MF-06	<u>EMBRUN</u>	MF-22	AIX EN PROVENCE
MF-09	<u>LARAGNE</u>	MF-23	ARLES
MF-13	<u>PEONE</u>	MF-24	MARIGNANE
MF-14	CARPENTRAS	MF-26	MARSEILLE
MF-15	CABRIERES D'AVIGNON	MF-27	BORMES LES MIMOSAS
MF-16	BONNIEUX/PLAINE	MF-28	HYERES-PLAGE

Tableau 21 : liste des 20 stations MF d'étalonnage utilisées pour l'interpolation des coefficients d'étalonnage (les stations apparaissant en souligné sont celles considérées comme étant dans un environnement montagneux).

Ces paramètres d'étalonnage doivent pouvoir être étendus en tout géo-point de PACA par le biais d'une méthode d'interpolation appropriée.

La méthode d'interpolation choisie est la méthode d'interpolation de type plaque-mince (**RB17**). Cette méthode d'interpolation avec les techniques de krigeage ou co-krigeage ou encore les méthodes à base de moyenne pondérée par l'inverse de distances aux stations sont souvent utilisées et citées dans les articles comme des méthodes d'interpolation adaptées aux mesures météorologiques de surface (température, précipitation, pression, irradiation, etc.) avec des performances finalement très proches (**RB2**, **RB13**, **RB18**). La méthode d'interpolation de type plaque mince permet cependant de contrôler la « rigidité » de la surface d'interpolation : grâce à ce

coefficient de raideur, il est ainsi possible de ne pas avoir une interpolation exacte des coefficients d'étalonnage en permettant ainsi la régularisation de ces derniers.

Pour éviter des phénomènes de bord sur la région PACA liée à l'interpolation pour geo-points n'appartenant pas à l'enveloppe convexe des stations MF utilisées pour l'étalonnage, nous avons choisi de créer des stations fictives pour l'étalonnage avec comme coefficients associés les coefficients d'étalonnage obtenus en considérant l'ensemble des stations en zone non montagneuse dans l'optimisation au sens des moindres carrés.

Enfin, cet étalonnage par interpolation s'accompagne de procédures de validation :

- stations de test : une première validation consiste à réserver des stations de test qui n'entrent pas dans la procédure d'étalonnage pour lesquelles sont évaluées les erreurs d'estimation après étalonnage. Nous avons ainsi choisi d'utiliser les stations RSP comme stations de test : leurs coefficients d'étalonnage ne sont pas donc pas utilisés comme données d'entrée de l'interpolation ;
- LOOCV : une deuxième validation s'appuie sur une démarche de type « validation croisée » ou cross-validation suivant le schéma *leave-one-out*, ou LOOCV<sup>4</sup> (**RB1**). Ce schéma de validation croisée consiste à éliminer tour à tour chacune des stations utilisées normalement pour l'interpolation et d'évaluer l'erreur sur l'estimation du GHId induit par l'interpolation des coefficients d'étalonnage.

Ces deux procédures de validation ont été utilisées pour déterminer le coefficient de raideur de l'interpolation par plaque mince en veillant à uniformiser – autant que faire ce peu – les performances de l'étalonnage par l'interpolation plaque mince nominale (*i.e.* utilisant toutes les stations sauf celles de test) et celles obtenues lors de la procédure de validation croisée LOOCV.

Le tableau 22 ci-dessous établit les différences pour l'ensemble des stations MF et RSP des estimations HC3 après étalonnage et correction des effets orographiques.

MF et RSP	NDA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
<b>GHId<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[γ,τ]</b>	39877 days	4.35 kWh/m <sup>2</sup>	-0.2 %	6.7 %	9.6 %	9.6 %	0.984	55.3 %
<b>GHIm<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[γ,τ]</b>	1269 months	132.2 kWh/m <sup>2</sup>	-0.2 %	3.1 %	4.3 %	4.3 %	0.996	10.9 %
<b>BHId<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[γ,τ]</b>	2213 days	3.09 kWh/m <sup>2</sup>	-0.2 %	13.3 %	18.1 %	18.1 %	0.969	27.4 %
<b>BHIm<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[γ,τ]</b>	70 months	93.6 kWh/m <sup>2</sup>	-0.2 %	4.6 %	6.0 %	6.0 %	0.994	5.7 %

**Tableau 22 :** bilan des erreurs d'estimation du GHId, GHIm, BHId et BHIm après l'étalonnage et la correction d'orographie, pour l'ensemble des stations MF et RSP.

On note que l'ensemble des estimations d'irradiation globales ou diffuses, que ce soit en valeurs journalières ou mensuelles présentent globalement un biais nul. Les estimations en sommes mensuelles présentent d'excellents niveaux de corrélation, supérieures à 0.994. L'erreur quadratique moyenne d'estimation du GHIm est de l'ordre de 4.3 % et est légèrement plus importante pour l'estimation du direct uniquement, avec une erreur de l'ordre de 6 %.

<sup>4</sup> Leave-One-Out Cross-Validation

Le tableau 23, quant à lui, correspond à la première validation consistant à évaluer les différences d'estimation du GHId, GHIm, BHId et BHIm après correction sur les stations RSP qui n'ont pas été utilisées pour l'interpolation des coefficients d'étalonnage.

RSP	NDA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
<b>GHId<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[<math>\gamma, \tau</math>]</b>	1128 days	4.27 kWh/m <sup>2</sup>	0.4 %	5.5 %	7.8 %	7.8 %	0.991	11.7 %
<b>GHIm<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[<math>\gamma, \tau</math>]</b>	38 months	126.0 kWh/m <sup>2</sup>	0.4 %	2.5 %	3.1 %	3.1 %	0.998	-
<b>BHId<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[<math>\gamma, \tau</math>]</b>	1128 days	2.85 kWh/m <sup>2</sup>	0.2 %	14.0 %	19.1 %	19.1 %	0.970	28.2 %
<b>BHIm<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[<math>\gamma, \tau</math>]</b>	38 months	84.0 kWh/m <sup>2</sup>	-0.1 %	5.5 %	7.0 %	7.0 %	0.992	-

**Tableau 23 :** bilan de validation, sur les stations de test RSP, des erreurs d'estimation du GHId, GHIm, BHId et BHIm après l'étalonnage et la correction d'orographie.

Ce tableau montre des bilans d'erreur d'estimation des irradiances globales et directes sur plan horizontal sur les stations RSP utilisées comme stations de test très proches de ceux présentés par le tableau 22, pour l'ensemble des stations. Cet état de fait laisse à penser que l'interpolation des coefficients d'étalonnage à l'endroit de ces stations est de bonne qualité.

A titre d'information, le tableau 24 montre, pour chacune des stations RSP, la station MF la plus proches au sens de la distance géodésique :

RSP	Stations MF d'étalonnage
<b>RSP-1 (VOLX)</b>	MF-18 (VINON/VERDON) : 14.6 km
<b>RSP-2 (BERRE-L-ETANG)</b>	MF-24 (MARGINANE) : 9.4 km
<b>RSP-3 (NICE)</b>	MF-20 (NICE) : 2.6 km

**Tableau 24 :** stations MF d'étalonnage les plus proches de chacune des stations MF d'étalonnage.

Enfin, nous avons procédé à la validation suivant le schéma LOOCV de validation croisée. Cette analyse a été effectuée uniquement sur l'impact de la validation croisée sur les stations d'étalonnage sur l'estimation du GHId et du GHIm. Le bilan des erreurs d'estimation est donné par le tableau 25 :

MF et RSP	NDA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
<b>GHId<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[<math>\gamma, \tau</math>] – LOOCV</b>	1128 days	4.35 kWh/m <sup>2</sup>	-0.6 %	7.6 %	10.7 %	10.8 %	0.981	60.5 %
<b>GHIm<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[<math>\gamma, \tau</math>] – LOOCV</b>	1267 months	132.2 kWh/m <sup>2</sup>	-0.7 %	4.4 %	6.1 %	6.2 %	0.991	14.3 %

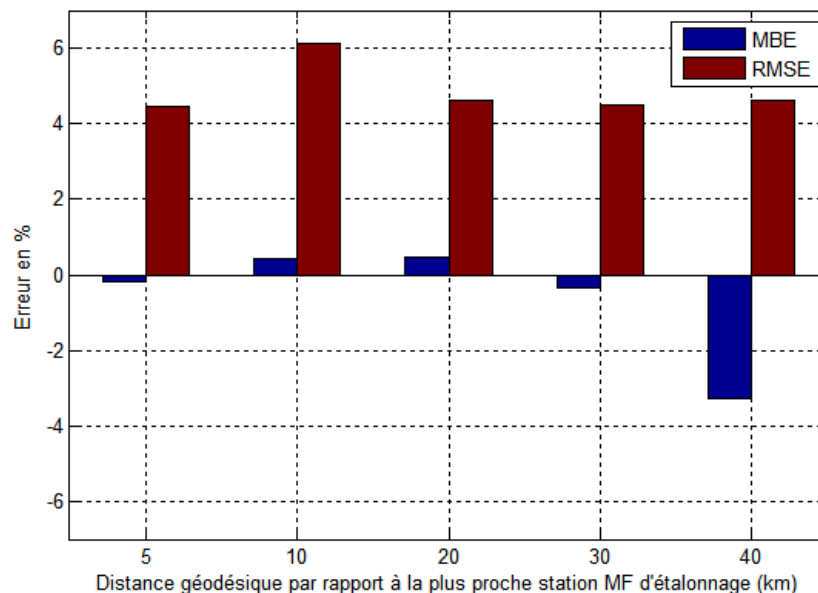
**Tableau 25 :** bilan de validation croisée de type LOOCV, sur les stations MF et RSP, des erreurs d'estimation du GHId et GHIm après l'étalonnage et la correction d'orographie.

Là encore, comme pour la validation par stations de test, on note que le bilan de validation croisée est très proche de celui du tableau 22, pour l'ensemble des stations.

De plus, lors de la procédure de validation croisée, à chaque itération où une station MF d'étalonnage est supprimée de l'interpolation, nous avons relevé l'erreur d'estimation du GHIm en

ce lieu, ainsi que la distance avec la station MF d'étalonnage la plus proche. Ainsi, nous avons pu établir des moyennes d'erreur (MBE et RMSE) d'estimation du GHIm par classes de distance avec la station la plus proche. Ces moyennes rangées par distance sont présentées par la figure 18.

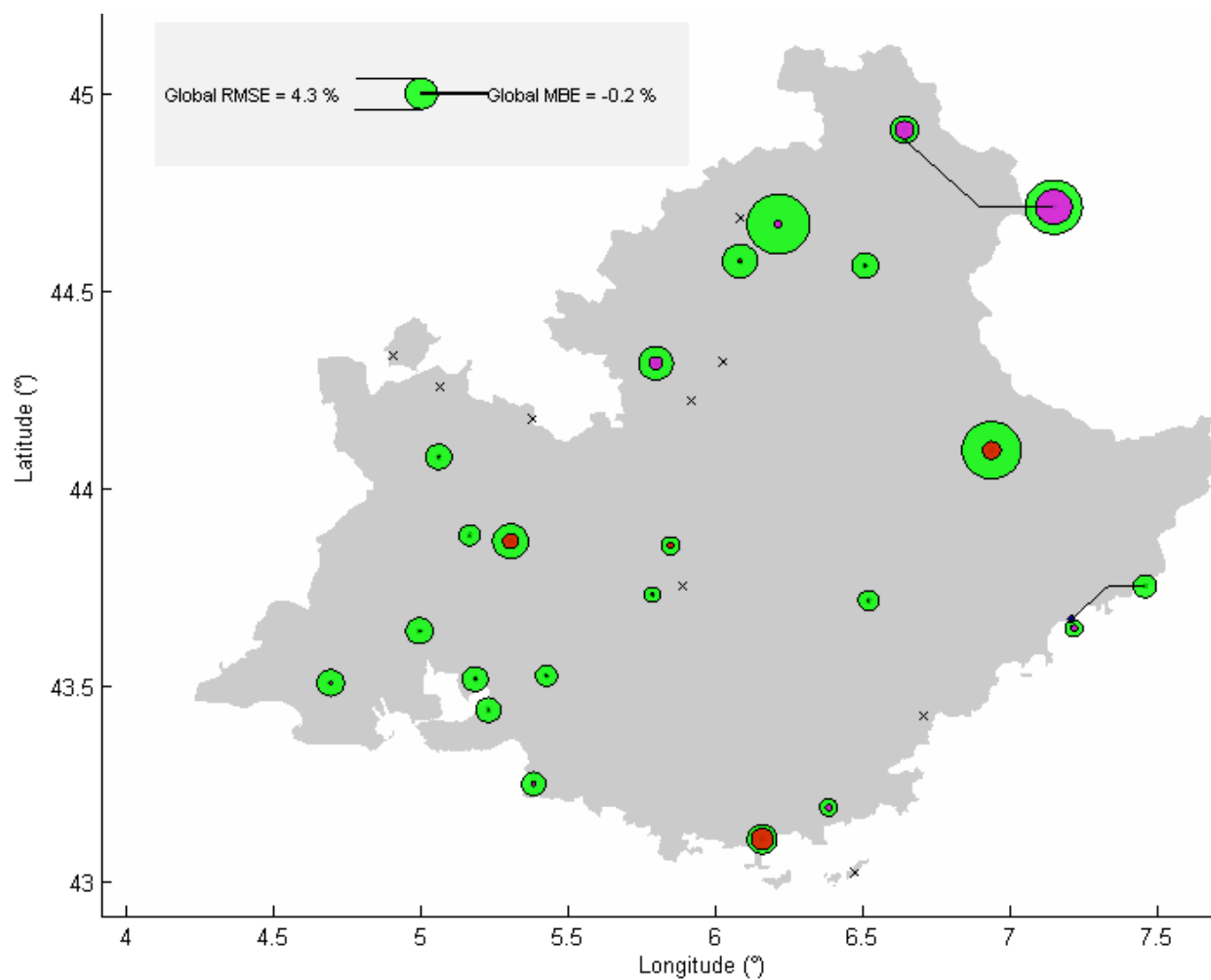
L'analyse de ces moyennes d'erreur montre une relative stabilité de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) avec la distance. L'erreur systématique relative (MBE) elle, reste faible mais au-delà de 35 km, prend de l'importance avec une sous-estimation moyenne de près de -3.3 %.



**Figure 18 :** estimation moyenne par classes de distances des erreurs (MBE et RMSE) d'estimation du GHIm lors de la procédure de validation croisée LOOCV.

On peut conclure par ces deux procédures de validation différentes que la méthode d'interpolation par plaque mince des coefficients d'étalonnage à partir des stations MF d'étalonnage est validée.

De la même manière que nous avons présenté avec la figure 16, la répartition géographique des erreurs d'estimation du GHIm avant étalonnage, nous présentons avec la figure 19, la même représentation avec le même facteur proportionnel entre les rayons des cercles et les erreurs relatives (biais et erreurs quadratiques moyennes).



**Figure 19 :** représentation des biais relatifs (cercles rouges en cas de surestimation et magentas en cas de sous-estimation) et des erreurs quadratiques moyennes relatives (cercles verts) issus des bilans de comparaisons du GHlm entre HC3 après étalonnage et correction des effets de l'orographie et l'ensemble des stations MF et RSP. Le symbole x signifie l'absence de mesures des stations correspondantes sur la période de HC3.



Nous avons aussi évalué sur les trois stations RSP et la station MF-14 (CARPENTRAS) les bilans d'erreur d'estimation de la composante directe en incidence normale en valeurs journalières et mensuelles BNId et BNIm.

MF-14 et RSP	NDA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
<b>BNId<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[<math>\gamma, \tau</math>]</b>	3492 days	5.16 kWh/m <sup>2</sup>	9.1 %	18.3 %	22.3 %	24.1 %	0.944	139.9 %
<b>BNIm<sub>HC3</sub><sup>+</sup>[<math>\gamma, \tau</math>]</b>	114 months	155.8 kWh/m <sup>2</sup>	9.5 %	10.4 %	9.1 %	12.8 %	0.977	37.8 %

**Tableau 26 :** bilan d'erreur d'estimation de HC3 du BNId et BNIm, après étalonnage du GHI et correction des effets d'orographie.

On note une dégradation très sensible des performances d'estimation de la composante directe en incidence normale comparée à celle, excellente des composantes sur plan horizontal. Notamment, on note une surestimation d'environ 9 % et 6 % respectivement sur les valeurs journalières et mensuelles du BNI. Cette surestimation est sûrement due en grande partie à la modélisation des valeurs intra-journalières du GHI et du DNI à partir des valeurs journalières de ces dernières à partir de profils typiques. Lorsque ces profils typiques sont utilisés pour évaluer la composante en incidence normale, les effets en début et en fin de journée, atténués pour les plans fixes à faibles inclinaisons, sont ici rehaussés, générant des erreurs systématiques.

Cependant, on remarque le niveau relativement élevé - supérieur à 0.97 - de la corrélation sur les valeurs mensuelles. Cette valeur élevée de corrélation nous a enclin à procéder à un nouvel étalonnage spécifique au DNIm. Nous avons opté pour un étalonnage « simple » consistant en un facteur multiplicatif de correction. Une détermination au sens des moindres carrés a permis de déterminer ce coefficient de correction multiplicatif égal à 0.925.

Avec cette correction, on obtient les bilans de performances d'estimation du BNIm suivants, toutes stations confondues ainsi que station par station :

0.925 BNIm <sub>HC3</sub> <sup>+</sup> [ $\gamma, \tau$ ]	NDA	MREF	MBE	MAE	STDE	RMSE	CC	KSI
<b>MF-14 et RSP</b>	112 months	155.8 kWh/m <sup>2</sup>	0.9 %	6.3 %	7.9 %	7.9 %	0.977	10.2 %
<b>MF-14</b>	76 months	160.6 kWh/m <sup>2</sup>	2.3 %	6.2 %	7.4 %	7.8 %	0.979	-
<b>RSP-1</b>	12 months	150.2 kWh/m <sup>2</sup>	0.0 %	6.8 %	9.1 %	9.1 %	0.980	-
<b>RSP-2</b>	13 months	151.8 kWh/m <sup>2</sup>	-2.9 %	6.5 %	7.5 %	8.0 %	0.983	-
<b>RSP-3</b>	13 months	141.9 kWh/m <sup>2</sup>	-3.6 %	6.5 %	7.5 %	8.3 %	0.986	-

**Tableau 27 :** bilan d'erreur d'estimation de HC3 du BNIm, après étalonnage du GHI, correction des effets d'orographie et correction *a posteriori* par régression linéaire du DNIm.

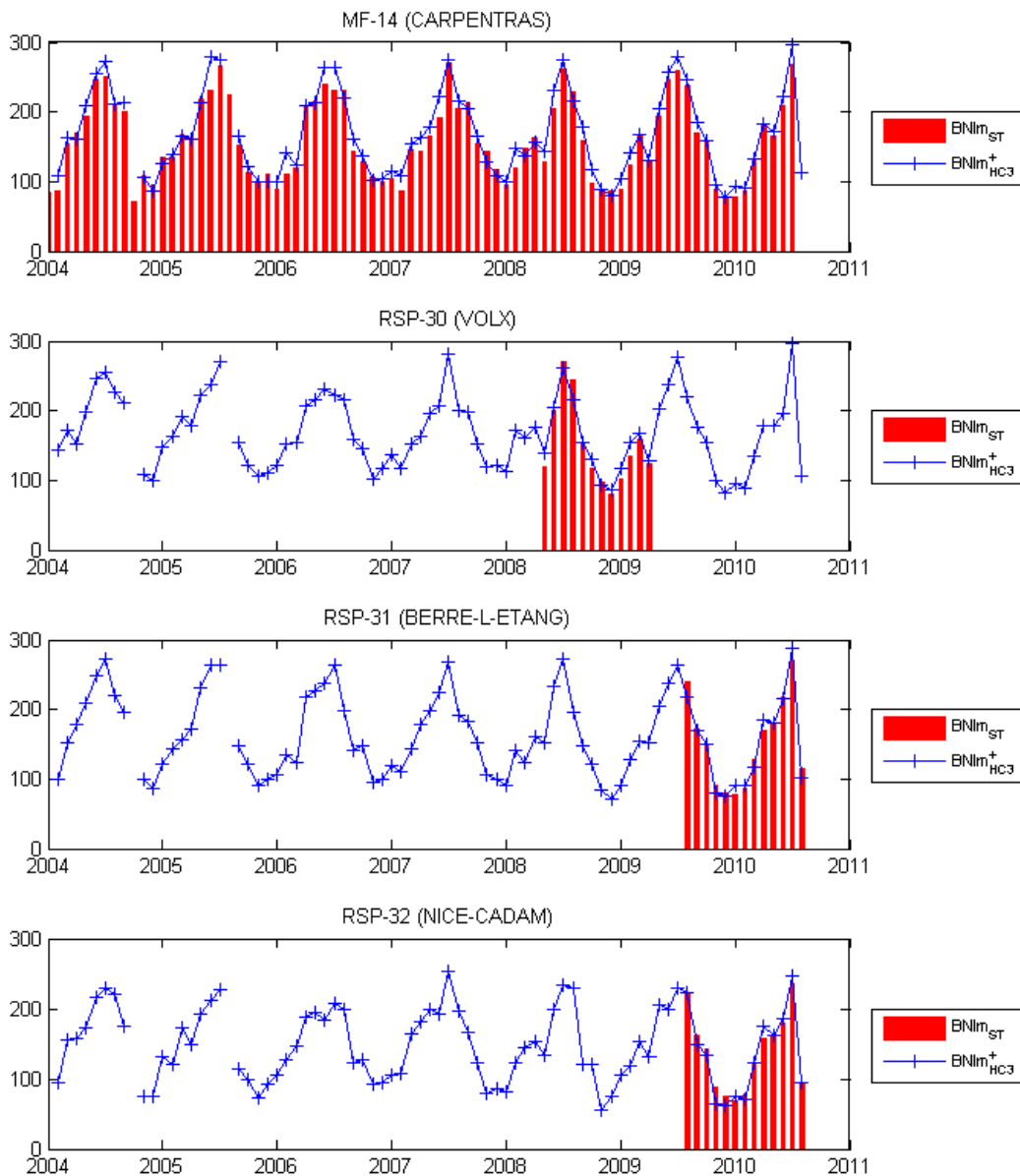


Figure 20 : représentation en bleu des estimations du DNIm par HC3 après étalonnage du GHI, correction de l'orographie et application de la régression linéaire, comparées aux mesures des stations MF-14 (CARPENTRAS), RSP-1 (VOLX), RSP-2 (BERRE-L-ETANG) et RSP-3 (NICE).

## 7 CREATION DES FICHIERS NUMERIQUES POUR DE L'ATLAS SOLAIRE

### 7.1 Définition de la grille d'échantillonnage spatiale de l'atlas solaire

La grille d'échantillonnage spatiale de l'atlas solaire a été choisie dans la projection géographique standard en latitude et longitude avec l'ellipsoïde de référence WGS84. Cette projection

correspond à la dénomination<sup>5</sup> EPSG:4326. Le pas de la grille a été déterminée égale à 6 arcsec en latitude et 9 arcsec en longitude, soit un pas d'environ 200 m.

Géo-point haut-gauche	pas latitude x pas longitude	Nombre de lignes x nombre de colonnes
<b>45°24'57"N</b>	-6" (185.5 m)	1500
<b>3°55'3"E</b>	9" (199.6 m)	1640

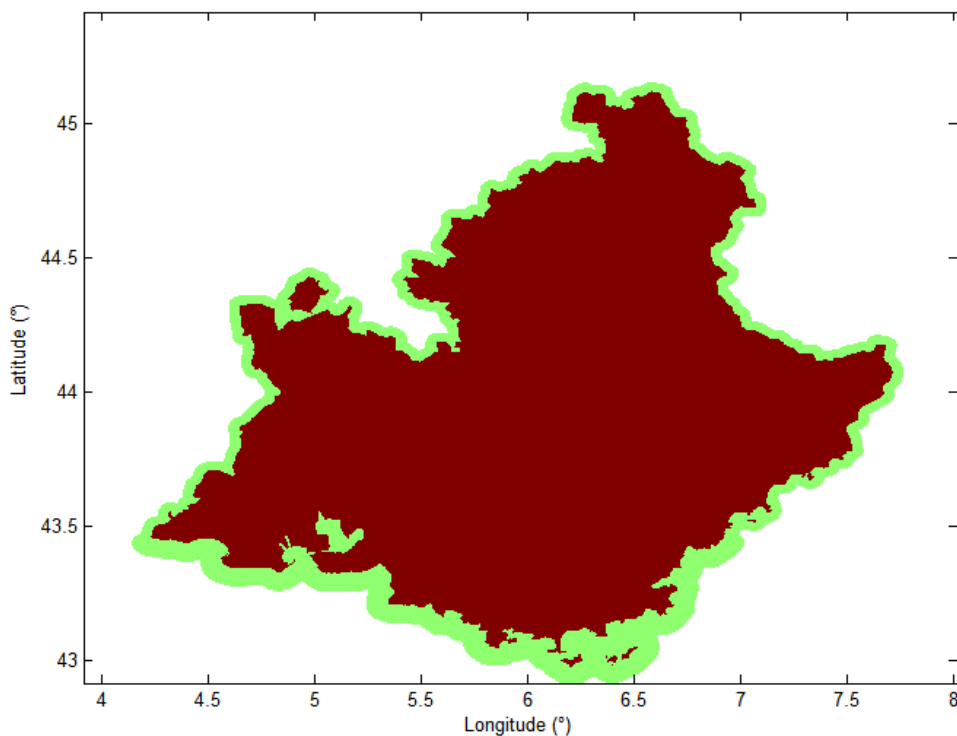
**Tableau 28 :** définition de la grille d'échantillonnage native de l'atlas PACA dans la projection géographique EPSG :4326.

La boîte englobante géographique de l'atlas solaire PACA est donc :

	45°24'57"N	
3°55'3"E		8°00'54"
	42°55'03"N	

**Tableau 29 :** boîte englobante géographique de l'atlas solaire PACA dans la projection géographique EPSG:4326.

Cette zone rectangulaire a été restreinte sur la région PACA avec une bordure en plus d'une vingtaine de pixels constituant ainsi environ 1035000 géo-points (cf. figure 21).



**Figure 21 :** zone correspondant à la région PACA (en rouge) avec une bordure supplémentaire d'une vingtaine de pixels (en vert).

<sup>5</sup> European Petroleum Survey Group (<http://www.epsg.org>).

## 7.2 Fourniture des données de rayonnements HC3

Des scripts spécifiques ont été mis en place pour « extraire » la région PACA de la base de données journalières de HelioClim-3.

La base de données HC3 a ainsi été extraite directement dans sa géométrie native correspondant à celle de *Meteosat Second Generation*, uniquement sur la région PACA. Cette extraction d'irradiation journalière contient environ 50 lignes par 90 colonnes sur une profondeur 2400 jours environ. La résolution en latitude et longitude est d'environ 2,5 minutes correspondant à une résolution en mètres de 4.5 km dans la direction Nord-Sud et 3,2 km dans le sens Est-Ouest.

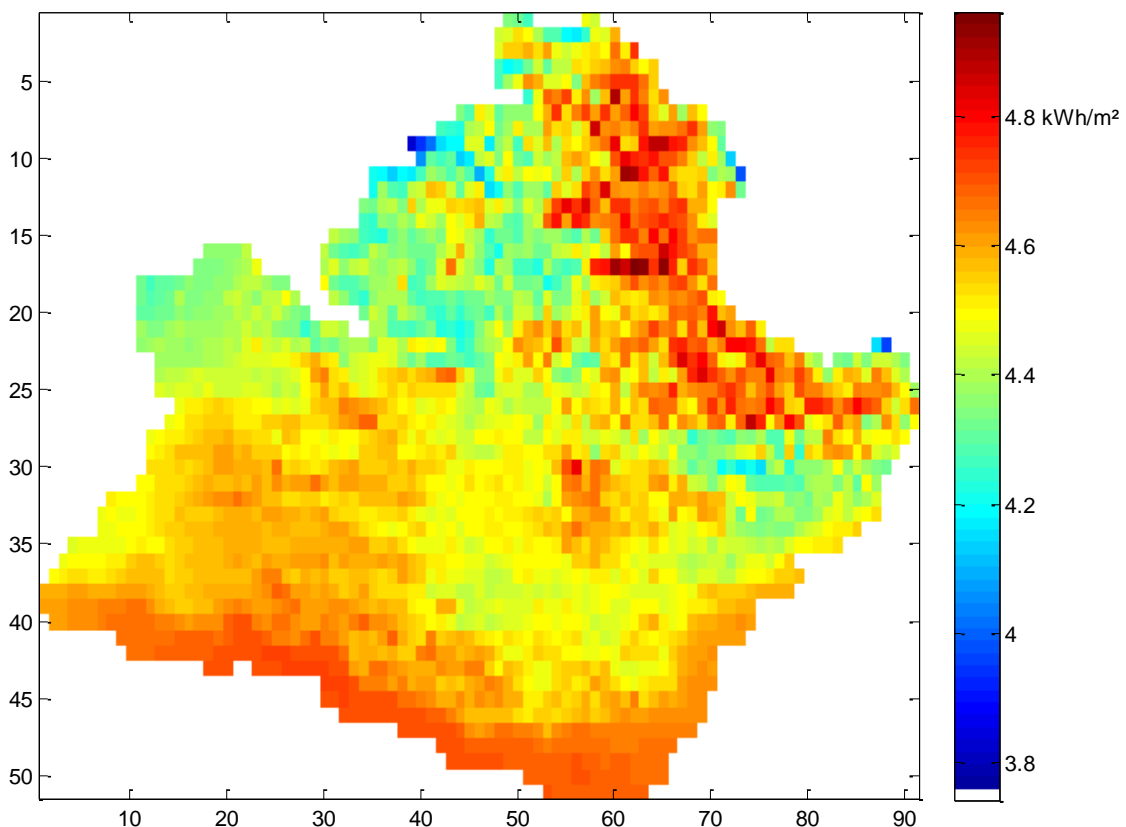


Figure 22 : moyenne du GHId de HelioClim-3 établi sur la période 2005-2009 (5 ans).

## 7.3 Constitution de la base de données d'horizons à partir de SRTM

Un algorithme a été mis en place sous permettant d'évaluer en chaque point de la région PACA l'horizon compte tenu du relief fourni au 1 / 100 000 par la base de données altimétriques SRTM v4 (**RB5**). La description détaillée de cet algorithme est donnée en annexe B de ce document.

L'horizon, pour un azimut donné, correspond à l'angle d'élévation à partir duquel aucune portion du relief ne vient occulter le soleil en direct.

Actuellement avec un Core duo 2 GHz avec MATLAB, le calcul d'un horizon tel que défini dans l'annexe C, nécessite environ 0.5 seconde. L'ensemble des géo-points de l'atlas PACA a ainsi nécessité seulement 1 jour complet d'une machine à 8 processeurs. La base de données d'horizon

contenant 360 valeurs d'élévation angulaire par géo-points de l'atlas ainsi créée est d'environ 1.4 Go.

#### 7.4 Constitution des cartes d'irradiations de l'atlas

Nous avons mis en place un code de calcul permettant de générer point par point les différentes cartes d'irradiation. Ce code permet de générer, pour chaque orientation du plan désirée :

- MEAN\_GTI\_month\_\$(mm)\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 12 cartes d'irradiations globales mensuelles moyennées sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- STD\_GTI\_month\_\$(mm)\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 12 cartes des écarts types relatifs des valeurs d'irradiations globales mensuelles sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- MEAN\_BTI\_month\_\$(mm)\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 12 cartes d'irradiations directes mensuelles moyennées sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- STD\_BTI\_month\_\$(mm)\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 12 cartes des écarts types relatifs des valeurs d'irradiations directes mensuelles sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
  
- MEAN\_GTI\_year\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 1 carte des irradiations globales annuelles moyennées sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- STD\_GTI\_year\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 1 carte des écarts types relatifs des valeurs d'irradiations globales annuelles sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- MEAN\_BTI\_year\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 1 carte des irradiations directes annuelles moyennées sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- STD\_BTI\_year\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 1 carte des écarts types relatifs des valeurs d'irradiations directes annuelles sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;

Enfin, nous avons généré les cartes d'irradiations directes en incidence normale :

- MEAN\_BNI\_month\_\$(mm)\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 12 cartes d'irradiations directes en incidence normale mensuelles moyennées sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- STD\_BNI\_month\_\$(mm)\_\$(tilt)\_\$(azimut) : 12 cartes des écarts types relatifs des valeurs d'irradiations directes en incidence normale mensuelles sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- MEAN\_BNI\_year : 1 carte des irradiations directes en incidence normale annuelles moyennées sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;
- STD\_BNI\_year : 1 carte des écarts types relatifs des valeurs d'irradiations directes en incidence normale annuelles sur la période HC3 entre 2004 et 2010 ;

Nous avons pour le moment généré cet atlas pour 9 orientations différentes définies par le tableau ci-dessous, constituant ainsi 494 cartes d'irradiations.

# Orientation	Inclinaison en ° (en %)	Azimut en °
1	0° (0 %)	-
2	16.7° (30 %)	180° (Sud)
3	16.7° (30 %)	135° (Sud-Est)
4	16.7° (30 %)	190° (Est)
5	16.7° (30 %)	225° (Sud-Ouest)
6	16.7° (30 %)	270° (Ouest)
7	16.7° (30 %)	0° (Nord)
8	35° (70 %)	180° (Sud)
9	45° (100 %)	180° (Sud)

**Tableau 30 :** liste des orientations choisies pour la première génération de l'atlas solaire PACA.

Chaque géo-point de l'atlas nécessite une dizaine de secondes pour être calculées, soit un temps de génération de l'atlas solaire PACA de 5 jours en mobilisant 32 processeurs de calcul.

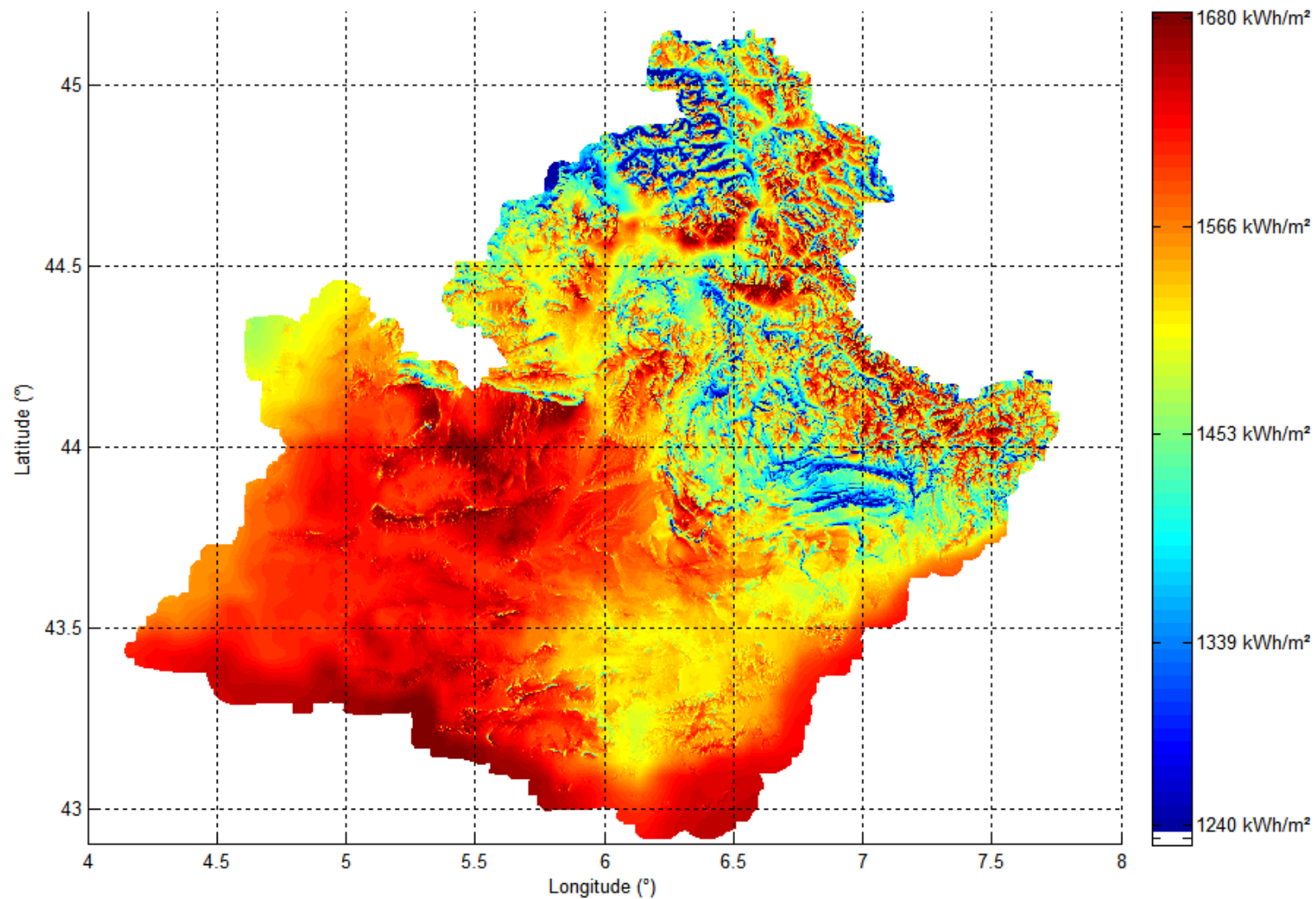


Figure 23 : carte des irradiations annuelles globales sur plan horizontal, moyennées sur la période de HC3 entre 2004 et 2010.



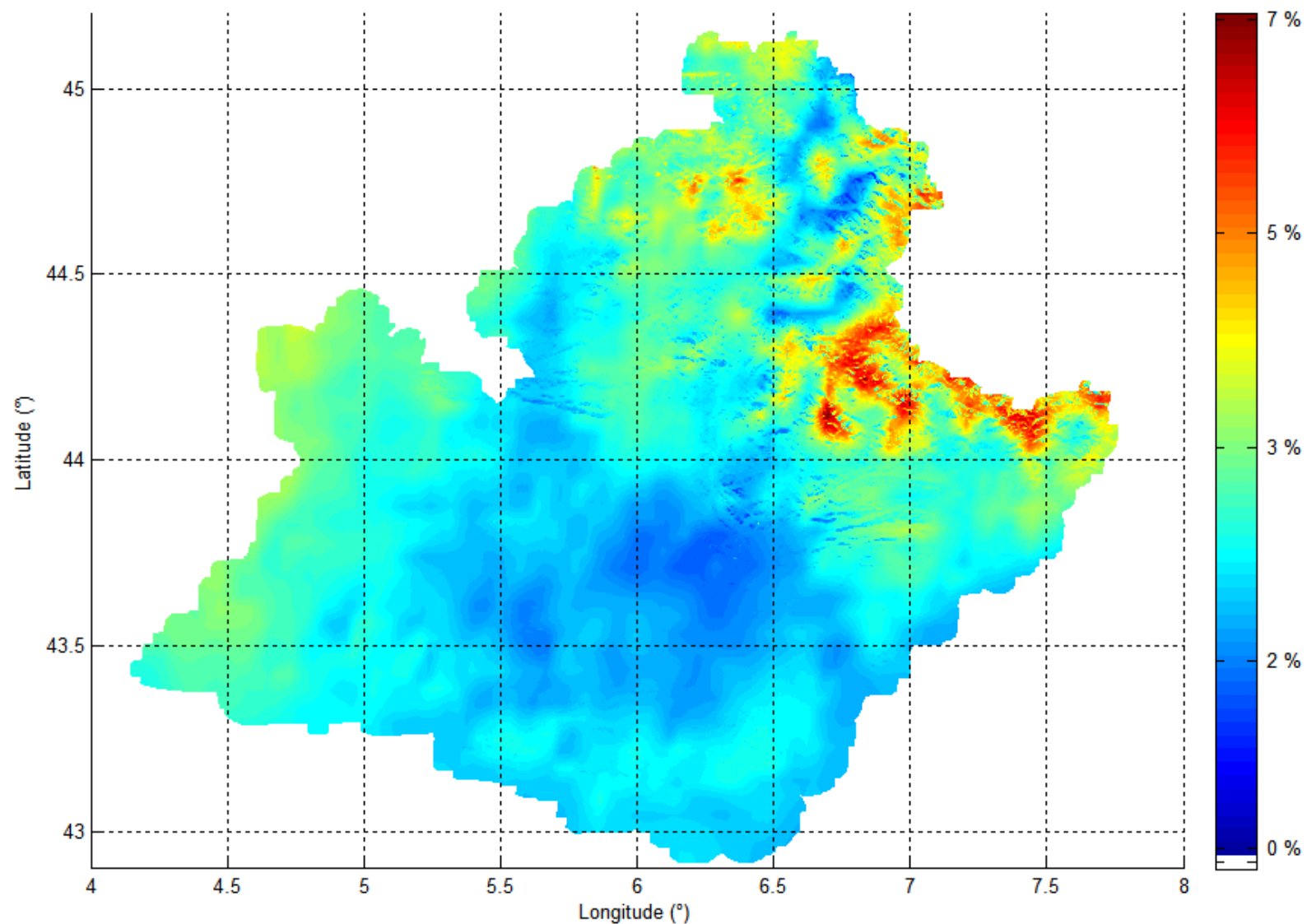


Figure 24 : carte des écarts types relatifs des irradiances annuelles globales sur plan horizontal sur la période de HC3 entre 2004 et 2010.

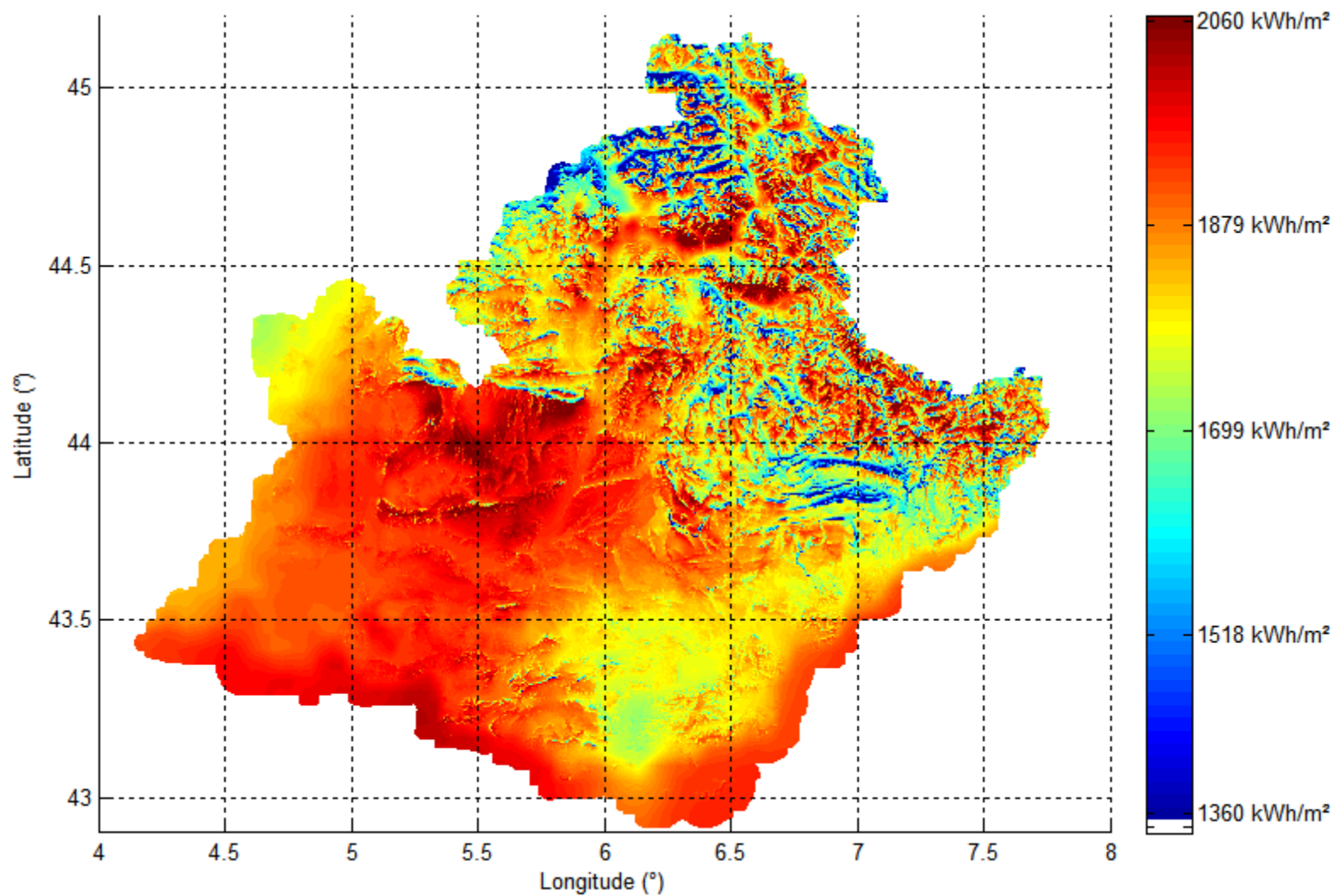


Figure 25 : carte des irradiances annuelles globales sur plan incliné à 35°, plein Sud, moyennées sur la période de HC3 entre 2004 et 2010.

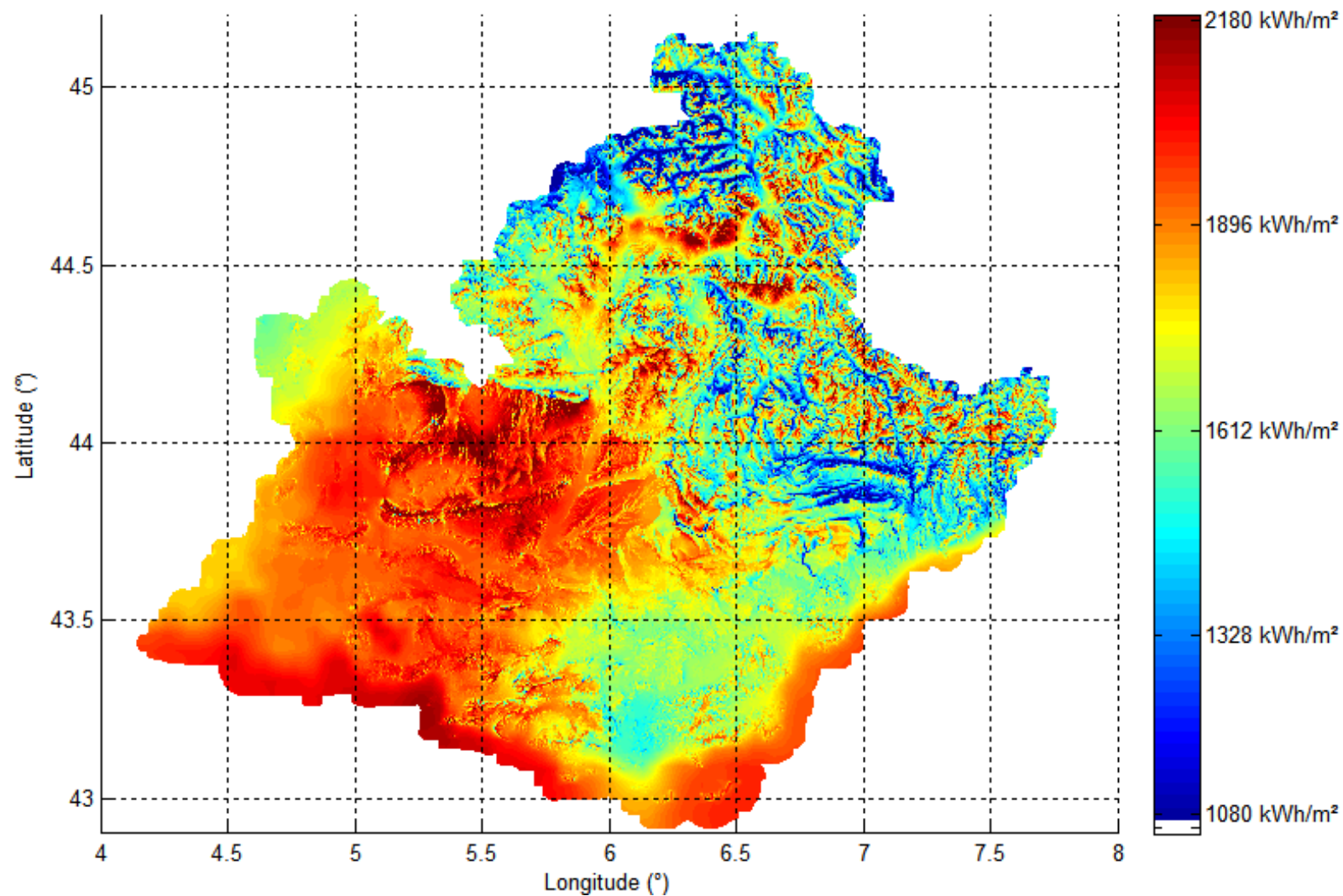


Figure 26 : carte des irradiances annuelles directes en incidence normale, moyennées sur la période de HC3 entre 2004 et 2010.

## 8 DISSEMINATION DE L'ATLAS SOLAIRE

### 8.1 Mise en place d'un « mapserver » de type Web Map Service (WMS)

Un Web Map Service (WMS) a été mis en place pour délivrer les cartes d'irradiation principales de l'atlas solaire en région PACA. Ce service web répond aux normes du consortium international OGC (<http://www.opengeospatial.org/standards/wms>).

Pour le moment, ce service est en version *1.0beta* et ne délivre que les cartes moyennes annuelles d'irradiations globales sur plan horizontal et sur plan incliné à 35° direction Sud ainsi que les celles d'irradiations directes en incidence normale.

L'adresse du WMS est la suivante :

[http://www.webservice-energy.org/mapserv/atlas\\_paca\\_v1.0\\_beta](http://www.webservice-energy.org/mapserv/atlas_paca_v1.0_beta)

Le « GetCapabilities » de ce WMS se trouve à l'adresse suivante :

[http://www.webservice-energy.org/mapserv/atlas\\_paca\\_v1.0\\_beta?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities](http://www.webservice-energy.org/mapserv/atlas_paca_v1.0_beta?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities)

Il existe plusieurs moyens de « visualiser » les cartes issues d'un WMS. Le moyen actuel le plus répandu est l'outil gratuit et multi-plate-forme Google Earth. Le code xml ci-dessous sauvé au format kml (nom de fichier terminant par .kml) permet de visualiser la couche de l'irradiation GHI annuelle :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml
xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2"
xmlns:gx="http://www.google.com/kml/ext/2.2"
xmlns:kml="http://www.opengis.net/kml/2.2"
xmlns:atom="http://www.w3.org/2005/Atom">
<Document>
  <name>ATLAS SOLAIRE PACA - WMS (version 1.0beta)</name>
  <Folder>
    <name>WMS : GHI annuelles moyennées sur la période de HC3 (2004-2010)</name>
    <GroundOverlay>
      <name>WMS - Atlas Solaire PACA v1.0beta</name>
      <Icon>
        <href>
http://www.webservice-
energy.org/mapserv/atlas_paca_v1.0_beta?VERSION=1.1.1&REQUEST=GetMap&SRS=EPSG:4326&WIDTH=1024&HEIGHT=1024&LAYERS=ghi_mean_year&TRANSPARENT=TRUE&FORMAT=image/png&
        </href>
        <viewRefreshMode>onStop</viewRefreshMode>
        <viewBoundScale>0.75</viewBoundScale>
      </Icon>
      <LatLonBox>
        <north>45.88736198532362</north>
        <south>42.35554235853098</south>
```

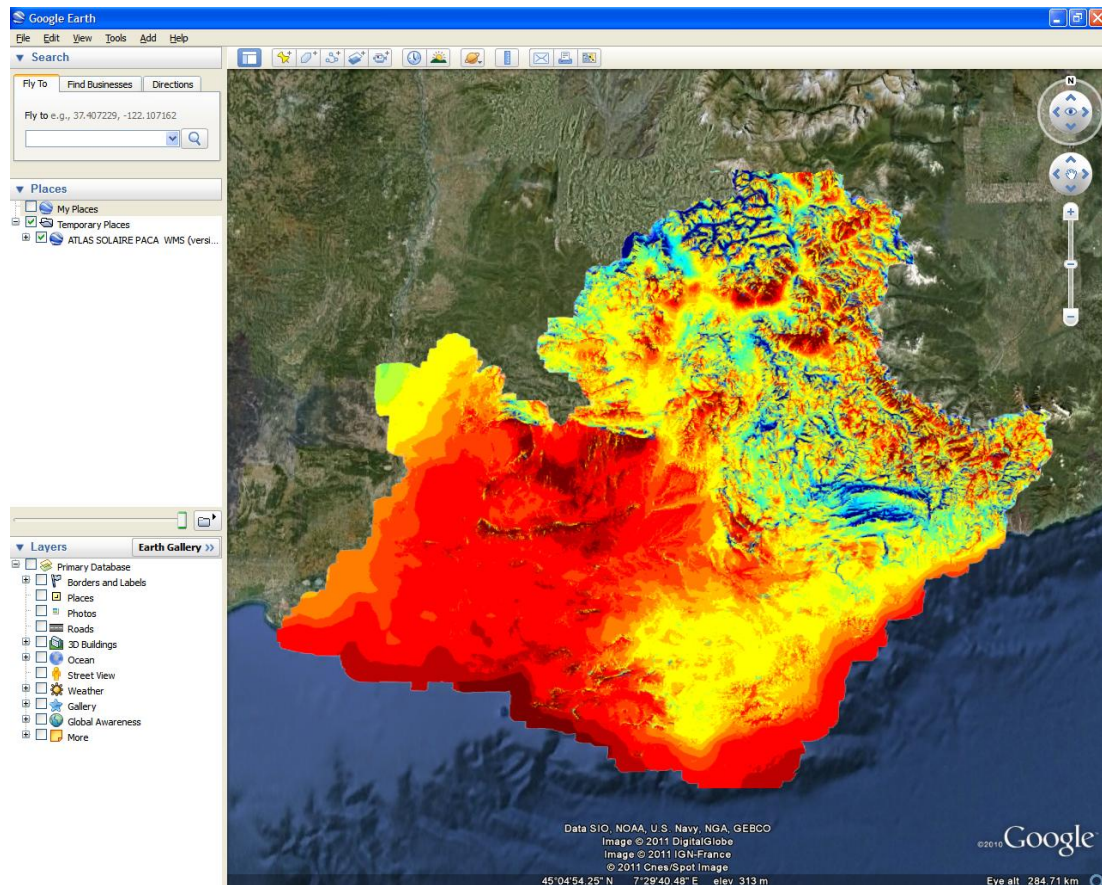


```

      <east>8.809849728601865</east>
      <west>3.12265027139815</west>
    </LatLonBox>
  </GroundOverlay>
</Folder>
</Document>
</kml>

```

**Code 1 :** exemple de code kml invoquant le service WMS [http://www.webservice-energy.org/mapserv/atlas\\_paca\\_v1.0\\_beta](http://www.webservice-energy.org/mapserv/atlas_paca_v1.0_beta) pour le layer ghi\_mean\_year (à sauver par exemple sous le nom Atlas\_PACA\_ghi.kml)



**Figure 27 :** Visualisation sous Google Earth du fichier kml Atlas\_PACA\_ghi.kml ci-dessus.

Par ailleurs, ce WMS pourra être utilisé très simplement par le biais de clients web de type SIG (Système d'Information Géographique), comme par exemple :

- Le SIG du CG06 <http://www.carto-cq06.fr> ;
- Le SIG CARMEN <http://carmen.ecologie.gouv.fr> ;
- Le site GEO-PORTAL <http://www.geoportal.org>

## 8.2 Mise en place d'un service web spécifique d'interrogation de l'atlas solaire en un géo-point donné.

Un site internet [www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr) a été mis en place et sera maintenu dans la durée afin de présenter le projet et les résultats de l'atlas solaire en région PACA.

A l'adresse <http://www.atlas-solaire.fr/atlas-solaire-paca> nous avons mis en place un service web spécifique permettant de recueillir en un géo-point particulier de la région PACA les données d'irradiation mensuelles globales, directes et diffuses suivant les différentes orientations de plan pré-calculées (cf. tableau 30).

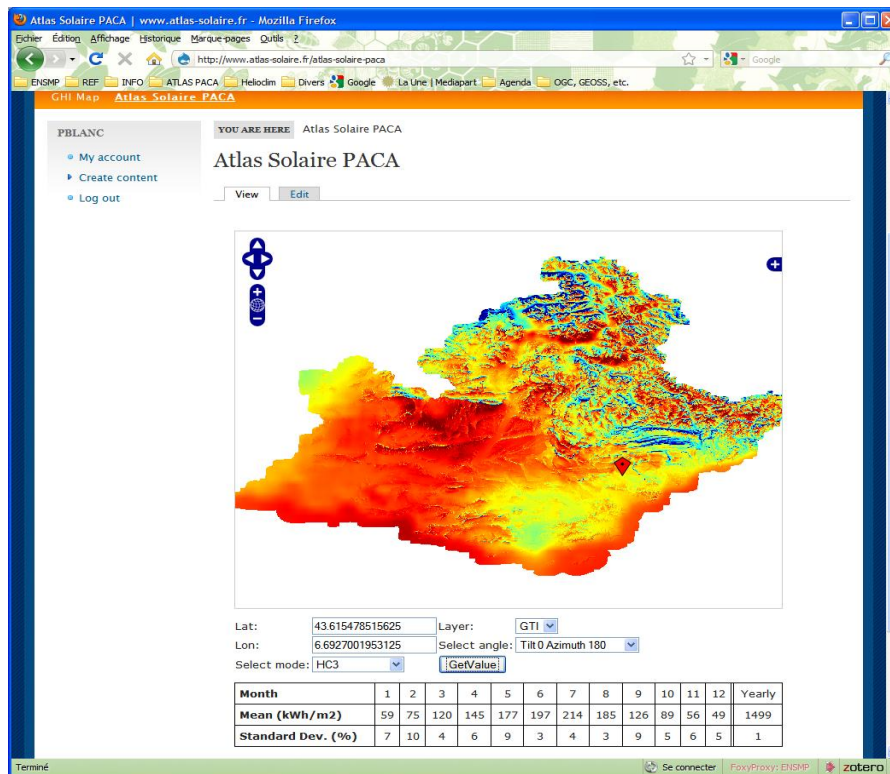


Figure 28 : photo d'écran du service web spécifique <http://www.atlas-solaire.fr/atlas-solaire-paca>.

Ce service web déjà fonctionnel est en cours d'amélioration, notamment pour l'ajout de la courbe d'horizon pour le géo-point considéré.

## 8.3 Présentations et articles relatifs au projet

### 8.3.1 Présentations publiques

Durant la dernière période, de septembre 2009 à avril 2010, le projet d'atlas solaire en région PACA a fait l'objet de nombreuses présentations. Ainsi, par ordre chronologique inverse et de manière non exhaustive :

- Colloque "Photovoltaïque" organisé par le CAUE de Nice en décembre 2009 : le Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement des Alpes-Maritimes (CAUE) organise le 17 décembre un colloque "Le photovoltaïque", sous la présidence

de M. Estrosi, ministre en charge de l'industrie, M. Ciotti, président du Conseil Général des Alpes Maritimes et M. Asso, président du CAUE. Notamment, au cours de ce colloque, le projet de l'Atlas Solaire PACA a été présenté [\[pdf1\]](#) ainsi que les travaux de trois étudiants du MASTER-EUREC (MASTER cogéré par MINES ParisTech) sur l'analyse de sensibilité des paramètres techniques (ressource solaire, orientation des panneaux PV, localisation, effet de masquage) et économique (subventions, taux d'actualisation, etc.) sur la rentabilité économique (VAN, TRA, etc.) d'un système PV pour un particulier (2,9 kWc) [\[pdf2\]](#).

- Réunion plénière "Plan Climat" du Conseil Général des Alpes Maritimes, décembre 2009 : une présentation de l'atlas solaire en région PACA [\[pdf\]](#) a été faite lors de la réunion "plan climat / énergie" du Conseil Général des Alpes Maritimes le jeudi 3 décembre dans l'hémicycle du Conseil Général avec la présence du président de Conseil Général, M. Ciotti. (contact : Mme Laurence DALSTEIN-RICHIER [ldalstein-richier@cg06.fr](mailto:ldalstein-richier@cg06.fr)).
- Fête de la science, en novembre 2009 : conférences "grand public" destinées notamment à des collégiens du département [\[pdf\]](#)
- Réunion de travail "Plan Climat" du Conseil Général des Alpes Maritimes en octobre 2009 [\[pdf\]](#).
- Salon Eco-Habitat à Vence en avril 2010 [\[pdf\]](#).
- Réunion de travail "Plan Climat" du Conseil Général des Alpes Maritimes en novembre 2010 [\[pdf\]](#).

### 8.3.2 Articles de presse, reportage télévisuel

Le projet d'atlas solaire a fait aussi l'objet d'un certain nombre d'articles, dont voici une liste (non exhaustive) et les liens internet, le cas échéant :

- Article dans Meridien Mag « Un atlas solaire pour des investissements efficaces », édition novembre 2010 / janvier 2011 [\[pdf\]](#) ;
- Article dans Energie & développement durable Magazine « le Soleil en ligne », édition d'octobre / novembre 2010 [\[pdf\]](#) ;
- Article dans Environnement Magazine « un atlas de l'ensoleillement en région Paca », édition d'octobre 2010 [\[pdf\]](#) ;
- Article sur le site de Team Côte d'Azur, édition du 11 mai 2010 [\[html\]](#) ;
- Article dans les pages locales du Figaro, édition du 8 décembre 2009 [\[jpg\]](#) ;
- Article dans la Tribune Côte d'Azur, édition n°508 (Archive du journal en pdf, extrait de l'article, page 3 [\[pdf\]](#) ;
- Référence dans un article dans La Tribune [\[html\]](#) ;
- Reportage sur France 3 du 1<sup>er</sup> décembre 2008 [\[Vidéo streaming\]](#). Dans le cadre d'un reportage de France 3 Région Côte d'Azur sur la problématique de l'énergie en PACA, une équipe est venue dans nos locaux nous interviewer sur les panneaux PV et l'Atlas Solaire en région PACA. Le reportage englobant différents interviews dont un de M. Estrosi sur la solution alternative du doublement de ligne Boute-Carros, a été diffusé au JT 19-20 du lundi 1<sup>er</sup> décembre 2008.

## 9 CONCLUSION

Les procédures de validation directe ou croisée présentées dans ce document permettent de montrer l'apport très important de l'étalonnage et de la prise en compte des effets orographiques



(ombrage et différence d'altitude) sur la qualité de l'estimation pourvue par l'atlas solaire des différentes composantes de l'irradiation mensuelles, comparée celle issue directement de la base de données HelioClim-3.

Ainsi, pour l'irradiation mensuelle globale sur plan horizontal (GHIm), les performances d'estimation de l'atlas sont-elles estimées, sur la base des stations de mesures MF et RSP, à 4 à 5 % en termes d'erreur quadratique moyenne relative (entre 5 et 7 kWh/m<sup>2</sup>), avec un biais quasiment nul. A titre de comparaison, sur le même ensemble de stations, les performances de la base de données HelioClim-3 sont de l'ordre de 10 % en erreur quadratique moyenne relative, avec un biais de l'ordre 5 à 6 %. Les performances de l'atlas solaire sont cependant différentes selon que l'on considère les zones montagneuses ou planes. Les zones montagneuses se révèlent être des zones où les performances d'estimation de l'atlas solaire sont moins bonnes avec une erreur quadratique moyenne relative de 6 % contre 3 % pour les zones planes. Dans les deux types de zone, le biais d'estimation est toujours quasiment nul.

Les erreurs quadratiques moyennes d'estimation des irradiances mensuelles directes et diffuses sur plan horizontal (BHIm et DHIm) sont du même ordre, typiquement entre 5 et 7 kWh/m<sup>2</sup> avec un biais quasiment nul. Il est à noter que ces performances d'estimation ont été évaluées à partir d'un plus faible nombre de stations de mesure que pour les irradiances globales.

Comme pour les irradiances directes sur plan horizontal, les performances de l'atlas solaire vis-à-vis de l'estimation des irradiances mensuelles directes en incidence normale (DNIm) ont été évaluées avec un nombre restreint de stations de mesure. Cette évaluation montre des performances sensiblement moins bonnes que pour les irradiances mensuelles directes et globales sur plan horizontal. Ainsi, estime-t-on que l'erreur d'estimation du DNIm par l'atlas solaire est de l'ordre de 3 % en erreur systématique (~ 5 kWh/m<sup>2</sup>) et de 8 à 9 % en erreur quadratique moyenne relative correspondant à environ 14 kWh/m<sup>2</sup>. Les stations de mesures ayant permis cette évaluation de performance étant toutes en zones planes, nous supposons, par une évaluation au *pro rata* par rapport aux erreurs d'estimation du GHIm, que les performances de DNIm en zone montagneuse sont de l'ordre de 13 à 15 % en erreur quadratique moyenne relative (~ 24 kWh/m<sup>2</sup>).

Par ailleurs, l'ensemble des résultats présentés de ce document est limité à la base de données HelioClim-3. Or, à l'origine du projet, nous avons pensé pouvoir utiliser aussi la base de données HelioClim-1 couvrant la période 1985 – 2005, avec des données journalières d'irradiation, suivant une résolution de l'ordre de 20 km. La comparaison des cartes d'irradiation générées avec HelioClim-1 sur la période 1985 – 2005 d'une part et les cartes issues de HelioClim-3 sur la période 2004 – 2010 d'autre part montre une grande différence de résolution spatiale qui n'est hélas pas traitée par les procédures d'étalonnage avec les stations de mesure. Des études sont actuellement en cours pour déterminer une procédure couplant l'étalonnage de HelioClim-1 avec les stations de mesure de Météo France, l'étalonnage de HelioClim-1 sur HelioClim-3 sur la période commune entre février 2004 et décembre 2005 ainsi qu'un algorithme de fusion spécifique pour compenser le déficit de résolution entre les deux sources de données d'irradiation.

Du point de vue de la dissémination de l'atlas solaire pour promouvoir et faciliter son utilisation, nous avons mis en place des services web permettant à tout un chacun, librement et gratuitement, d'accéder :

- aux cartes d'irradiances moyennes en somme mensuelles et annuelles via des services web de type WMS à l'adresse suivante : <http://www.webservice->

[energy.org/mapserv/atlas\\_paca\\_v1.0\\_beta?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities](http://energy.org/mapserv/atlas_paca_v1.0_beta?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities) ;

- aux données d'irradiations en somme mensuelles et annuelles en moyenne et en écart type sur la période 2004 – 2010 pour un point quelconque de la région PACA géoréférence en latitude / longitude, via le service web spécifique disponible à l'adresse suivante : <http://www.atlas-solaire.fr/atlas-solaire-paca>

Un accès de type professionnel plus complet à l'atlas solaire PACA, permettant d'obtenir des séries temporelles journalières, voire intra-journalière, d'irradiations suivant des plans inclinés non pré-calculés est prévu. Cet accès professionnel sera assuré sur le plan commercial par la société Transvalor Innovation, déjà en charge de la commercialisation notamment de la base de données HelioClim-3, via le site [www.soda-is.com](http://www.soda-is.com).

## ANNEXE A : CORRECTION DES EFFETS D'OMBRES SUR LES DIFFERENTES COMPOSANTES DE L'IRRADIATION INCIDENTE AU SOL

Cette annexe décrit en détail l'algorithme basé permettant de corriger des effets d'ombrage liés à l'orographie l'estimation d'irradiation sur plan horizontal par satellite et d'évaluer cette dernière sur des plans inclinés quelconques.

On considère, en un point quelconque sur Terre, la donnée à un instant  $t$  donnée des irradiances globale  $GHI_{dt}$  et diffuse  $DHI_{dt}$  sur plan horizontal, suivant une période d'intégration comprise entre  $t-dt$  et  $t$ .

La composante directe sur plan horizontal  $BHI_{dt}$  se déduit directement :

$$BHI_{dt} = GHI_{dt} - DHI_{dt} \quad [C.1]$$

La composante directe en incidence normale  $BNI_{dt}$  en fonction de l'angle d'élévation solaire  $\gamma_s$  lorsqu'il est positif s'obtient de la manière suivante :

$$BNI_{dt} = \frac{BHI_{dt}}{\sin(\gamma_s)} \quad \uparrow_{\gamma_s > 0} \quad [C.2]$$

Pour la prise en compte des ombres portées, **RB13** distingue la composante diffuse isotrope et circumsolaire du rayonnement diffus. Cette distinction s'appuie sur les développements de **RB10** et **RB11**.

$$\begin{aligned} DHI_{dt-circ} &= F_1 \times DHI_{dt} \\ DHI_{dt-iso} &= (1 - F_1) \times DHI_{dt} \end{aligned} \quad [C.3]$$

Le paramètre  $F_1$  est évalué à partir de l'expression suivante :

$$F_1 = \min(\max(F_{11}(b(\varepsilon)) + \Delta F_{12}(b(\varepsilon)) + \theta_s F_{13}(b(\varepsilon)), 0), 1) \quad [C.4]$$

Où :

- $\theta_s$  est l'angle zénithal solaire complémentaire de l'élévation solaire  $\gamma_s$  ;
- $\Delta$  est l'indice de luminosité du ciel (*sky brightness*) ;
- $b$  est une table de correspondance avec comme entrée l'indice de clarté  $\varepsilon$  (*clearness index*) retournant un indice dans les trois tableaux de valeurs  $F_{11}$ ,  $F_{12}$  et  $F_{13}$ .

$$b(\varepsilon) = \begin{cases} 1 & \text{si } \varepsilon \in [1, 1.065[ \\ 2 & \text{si } \varepsilon \in [1.065, 1.230[ \\ 3 & \text{si } \varepsilon \in [1.230, 1.5[ \\ 4 & \text{si } \varepsilon \in [1.5, 1.95[ \\ 5 & \text{si } \varepsilon \in [1.955, 2.8[ \\ 6 & \text{si } \varepsilon \in [2.8, 4.5[ \\ 7 & \text{si } \varepsilon \in [4.5, 6.2[ \end{cases} \quad [C.5]$$

$$\begin{aligned}
 F_{11} &= [-0.0083 \ 0.1299 \ 0.3297 \ 0.5682 \ 0.8730 \ 1.1326 \ 1.0602 \ 0.6777] \\
 F_{12} &= [0.5877 \ 0.6826 \ 0.4869 \ 0.1875 \ -0.3920 \ -1.2367 \ -1.5999 \ -0.3273] \\
 F_{13} &= [-0.0621 \ -0.1514 \ -0.2211 \ -0.2951 \ -0.3616 \ -0.4118 \ -0.3589 \ -0.2504]
 \end{aligned}
 \tag{C.6}$$

L'indice de luminosité du ciel  $\Delta$ , quant à lui, est établi *via* l'équation suivante mettant en jeu la composante diffuse  $DHI_{dt}$ , le rayonnement hors atmosphère en incidence normale  $E0_{dt}$  et le facteur relatif d'atténuation optique de l'épaisseur atmosphérique  $m$  (*relative optical air mass factor*) :

$$\Delta = m \frac{DHI_{dt}}{E0_{dt}}
 \tag{C.7}$$

Ce facteur relatif d'atténuation optique de l'épaisseur atmosphérique  $m$  est obtenu à partir de l'élévation solaire  $\gamma_s$  (exprimée en radian) et l'élévation du site  $h$  (exprimé en m) par la relation suivante :

$$m = \exp\left(-\frac{h}{8434.5}\right) \left( \sin(\gamma_s + \Delta\gamma_s) + 0.50572 \left( \frac{180}{\pi} (\gamma_s + \Delta\gamma_s) + 6.07995 \right)^{-1.6364} \right)^{-1}
 \tag{C.8}$$

Le terme  $\Delta\gamma_s$  (en radian) correspond à la correction liée à la réfraction atmosphérique de l'élévation solaire suivant la relation :

$$\Delta\gamma_s(\gamma_s) = 0.0010709 \frac{0.1594 + 64.3432\gamma_s + 215.5359\gamma_s^2}{1 + 166.1257\gamma_s + 910640.9614\gamma_s^2}
 \tag{C.9}$$

Enfin, l'indice de clarté  $\varepsilon$  se détermine, quant à lui, en fonction des composantes directes et diffuses du rayonnement ainsi que l'angle zénithal solaire  $\theta_s$  (en radian) :

$$\varepsilon = \left( \frac{DHI_{dt} + BNI_{dt}}{DHI_{dt}} + 1.041 \theta_s^3 \right) (1 + 1.041 \theta_s^3)^{-1}
 \tag{C.10}$$

L'ensemble de ces équations permettent ainsi de décomposer l'irradiation diffuse  $DHI_{dt}$  en :

- irradiation diffuse circumsolaire  $DHI_{dt-circ}$  ;
- irradiation diffuse isotrope  $DHI_{dt-iso}$ .

Nous allons maintenant expliciter les méthodes pour estimer à partir de ces différentes irradiances sur plan horizontal, les irradiances, y compris celle réfléchiée par le sol, sur plan incliné d'azimut  $\alpha$  et de tilt  $\beta$ , en tenant des effets d'ombrage.

Cet effet d'ombrage de l'environnement est défini par la fonction d'horizon  $Z(\phi)$ . Cette fonction définit, pour un azimut donné  $\phi$ , l'angle zénithal à partir duquel le soleil est visible.

On note, pour toute la suite,  $\theta_i(\alpha, \beta)$  l'angle d'incidence du rayonnement direct du soleil en position  $(\alpha_s, \theta_s)$  où  $\alpha_s$  désigne l'azimut solaire. Le cosinus de cet angle d'incidence vérifie la relation suivante :

$$\cos \theta_i(\alpha, \beta) = \cos \beta \cos \theta_s + \sin \beta \sin \theta_s \cos(\alpha_s - \alpha)
 \tag{C.11}$$

Le facteur noté  $R_B(\alpha, \beta)$  rendant compte de l'effet des ombres portées sur le rayonnement direct, vérifie la relation suivante :

$$R_B(\alpha, \beta) = \frac{\cos \theta(\alpha, \beta)}{\cos \theta_s} \hat{1}(\theta_s < Z(\alpha_s)) \hat{1}(\cos \theta_s > 0) \hat{1}(\cos \theta_l(\alpha, \beta) > 0) \quad [\text{C.12}]$$

Ce facteur s'applique aussi sur le rayonnement diffus circumsolaire.

Le facteur noté  $R_D(\alpha, \beta)$  nommé *sky-view factor* (cf. **RB4**) rendant compte de l'effet sur le rayonnement diffus isotrope et des ombres portées sur le rayonnement direct, vérifie la relation suivante :

$$R_D(\alpha, \beta) = \frac{1}{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{Z(\phi)} \sin \theta (\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\phi - \alpha))_+ d\theta d\phi$$

où

$$(x)_+ = \begin{cases} x & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad [\text{C.13}]$$

On vérifie que si  $Z(\phi) = \pi/2$  (absence d'effet d'ombrage), alors, dans le cas d'un plan horizontal,  $R_D(\alpha, \beta = 0) = 1$ .

Pour l'évaluation de  $R_D(\alpha)$ , on s'intéresse au signe de  $\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\phi - \alpha)$ .

Comme, la condition  $\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\phi - \alpha) \geq 0$  est équivalente à  $\tan \theta \cos(\phi - \alpha) \sin \beta \geq -\cos \beta$ , on a deux cas de figure :

**Cas 1 :**  $\cos(\phi - \alpha) \geq 0$ , alors  $\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\phi - \alpha) \geq 0$

**Cas 2 :**  $\cos(\phi - \alpha) < 0$

Ainsi, pour que  $\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\phi - \alpha) \geq 0$ , il faut que

$$\tan \theta \leq \frac{-1}{\tan \beta \cos(\phi - \alpha)}$$

Si l'on note  $\theta_+(\theta, \alpha, \beta) = \text{atan}(-(\cos(\phi - \alpha) \tan \beta)^{-1})$ , alors la condition est que  $\theta \leq \theta_+(\theta, \alpha, \beta)$ .

Si de plus, on pose  $\theta_+(\theta, \alpha, \beta) = \pi/2$  lorsque  $\cos(\phi - \alpha) \geq 0$  et  $Z_+(\phi, \alpha, \beta) = \min(Z(\phi), \theta_+(\phi, \alpha, \beta))$ , alors,

$$\begin{aligned} \pi R_D(\alpha, \beta) &= \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{Z_+(\phi, \alpha, \beta)} \sin \theta (\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\phi - \alpha)) d\theta d\phi \\ &= \cos \beta \int_0^{2\pi} \left( \int_{\theta=0}^{Z_+(\phi, \alpha, \beta)} \sin \theta \cos \theta d\theta \right) d\phi + \sin \beta \int_0^{2\pi} \cos(\phi - \alpha) \left( \int_{\theta=0}^{Z_+(\phi, \alpha, \beta)} \sin^2 \theta d\theta \right) d\phi \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left( \sin^2 Z_+(\phi, \alpha, \beta) \cos \beta + \cos(\phi - \alpha) (Z_+(\phi, \alpha, \beta) - \sin Z_+(\phi, \alpha, \beta) \cos Z_+(\phi, \alpha, \beta)) \sin \beta \right) d\phi \end{aligned}$$

$$\text{Car } \int_{\theta=0}^Z \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{\sin^2 Z}{2} \text{ et } \int_{\theta=0}^Z \sin^2 \theta d\theta = \frac{1}{2}(Z - \sin Z \cos Z)$$

Donc, en définitive, on a :

$$R_D(\alpha, \beta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sin^2 Z_+(\phi) \cos \beta + \cos(\phi - \alpha)(Z_+(\phi) - \sin Z_+(\phi) \cos Z_+(\phi)) \sin \beta) d\phi$$

Où

$$Z_+(\phi) = \min(Z(\phi), \theta_+(\phi, \alpha, \beta)) \quad [\text{C.14}]$$

$$\theta_+(\theta) = \begin{cases} \text{atan}\left(-(\cos(\phi - \alpha) \tan \beta)^{-1}\right) & \text{si } \cos(\phi - \alpha) < 0 \\ \pi/2 & \text{sinon} \end{cases}$$

En l'absence d'effet d'ombrage,  $Z(\phi) = \pi/2$  et le sky-view factor vérifie :

$$R_D(\alpha, \beta) = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad [\text{C.15}]$$

Enfin, la composante réfléchie de l'irradiation, notée  $R_I$ , est définie par la relation suivante :

$$RTI_{dt}^+(\alpha, \beta) = \rho R_R(\alpha, \beta) (\hat{1}(\theta_s < Z(\alpha_s)) (BHI_{dt} + DHI_{dt-circ}) + R_D(0,0) DHI_{dt-iso}) \quad [\text{C.16}]$$

En définitive, les relations ci-dessous expriment les différentes composantes du rayonnement sur plan incliné d'orientation  $(\alpha, \beta)$ , tenant compte de l'orographie par l'intermédiaire de la fonction d'horizon  $Z$ .

- Rayonnement direct sur plan incliné  $(\alpha, \beta)$  corrigé de l'orographie :

$$BTI_{dt}^+(\alpha, \beta) = R_B(\alpha, \beta) BHI_{dt} \quad [\text{C.17}]$$

- Rayonnement diffus circumsolaire sur plan incliné  $(\alpha, \beta)$  corrigé de l'orographie :

$$DTI_{dt-circ}^+(\alpha, \beta) = R_B(\alpha, \beta) DHI_{dt-circ} \quad [\text{C.18}]$$

- Rayonnement diffus isotrope sur plan incliné  $(\alpha, \beta)$  corrigé de l'orographie :

$$DTI_{dt-iso}^+(\alpha, \beta) = R_D(\alpha, \beta) DHI_{dt-iso} \quad [\text{C.19}]$$

- Rayonnement réfléchi par le sol d'albédo  $\rho$  sur plan incliné  $(\alpha, \beta)$  corrigé de l'orographie :

$$RTI_{dt}^+(\alpha, \beta) = \rho R_R(\alpha, \beta) (BTI_{dt}^+(0,0) + DTI_{dt-circ}^+(0,0) + DHI_{dt-iso}^+(0,0)) \quad [\text{C.20}]$$

- Rayonnement global sur plan incliné  $(\alpha, \beta)$  corrigé de l'orographie :

$$GTI_{dt}^+(\alpha, \beta) = BTI_{dt}^+(\alpha, \beta) + DTI_{dt-circ}^+(\alpha, \beta) + DHI_{dt-iso}^+(\alpha, \beta) + RTI_{dt}^+(\alpha, \beta) \quad [\text{C.21}]$$

## ANNEXE B : ESTIMATION DES HORIZONS A PARTIR D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

### 1 PRESENTATION DE L'ALGORITHME DE DETERMINATION DE L'HORIZON

Le principe du calcul de l'horizon est de déterminer, pour un observateur en un point géographique ( $lat_0, lon_0, h_0$ ) donné, et une direction d'observation défini par un azimut  $\phi$  donné, l'angle d'élévation  $Z(\phi)$  à partir duquel le relief n'empêche pas de voir le soleil.

Le relief est ici modélisé par un modèle numérique de terrain (MNT) permettant de connaître sur une grille régulière dans une projection géographique donnée l'altitude du terrain au dessus du niveau de la mer ou au dessus d'un géoïde de référence.

Partant de la position de l'observateur ( $lat_0, lon_0$ ), et dans la direction de l'azimut  $\phi$ , on évalue, par interpolation du MNT, en fonction de la distance géodésique  $d$ , l'altitude  $h(\phi, d)$  du terrain par rapport à une ellipsoïde de référence. Cette évaluation est limitée à une distance  $d_{max}$  et se fait à partir d'une distance  $d_{min}$  typiquement de l'ordre de 2 fois la taille de la cellule du MNT.

L'horizon  $Z(\phi)$  est alors défini par la relation :

$$Z(\phi) = \max_{d \in [d_{min}, d_{max}]} \arctan\left(\frac{h(\phi, d) - h_0}{d}\right) \quad [B.1]$$

Le calcul de  $Z(\phi)$  est alors évalué pour un échantillonnage de  $\phi$  entre 0 et  $2\pi$ .

### 2 ELEMENTS DE VALIDATION

Un doctorant de l'Université de Corse, Pierrick Haurant, a procédé en deux lieux en Corse au relevé de l'horizon avec un théodolite :

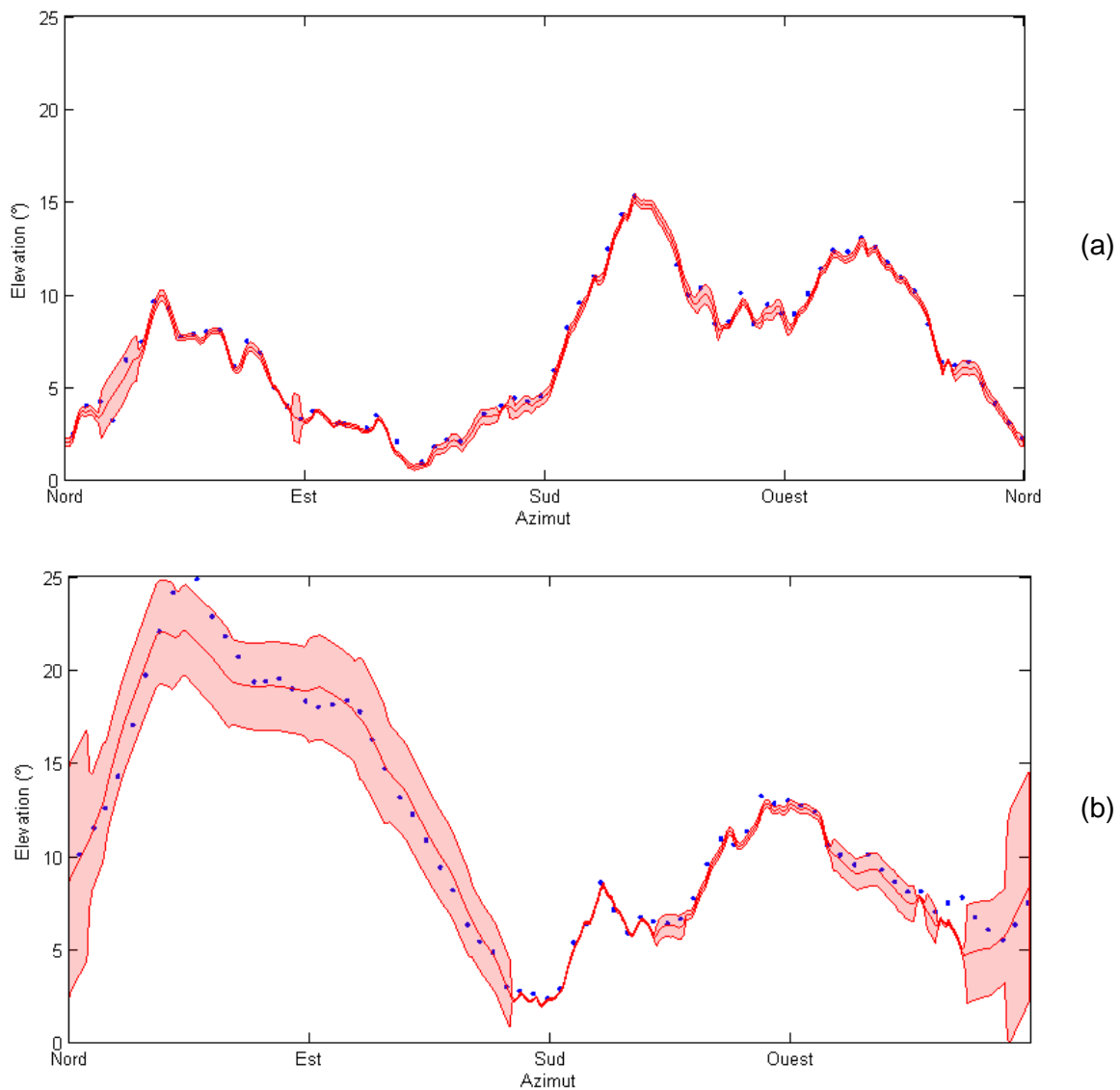
- Un relevé à Corte : (42.3011°N, 9.1712°E)
- Un relevé à Soviera : (42.3440°N, 9.1744°E)

En récupérant les données SRTM et EGM08 sur la Corse, nous avons pu comparer les résultats du calcul d'horizon avec les relevés par théodolites.

La figure 29 montre la comparaison entre les relevés par théodolite et la modélisation avec le modèle numérique de terrain SRTM v4, présentée par la suite. La zone rouge semi-transparente correspond à l'estimation de l'incertitude d'estimation de l'horizon par MNT. Cette incertitude a été établie en évaluant l'impact de l'erreur altimétrique typique de SRTM en fonction de la distance à laquelle se trouve le point d'horizon. En effet, plus ce point d'horizon est proche de l'observateur, plus l'erreur d'altimétrie génère une erreur importante dans l'estimation de l'horizon.

On note que pour le site près de Corte, la correspondance est excellente : l'erreur quadratique moyenne est alors ici de l'ordre de  $0.3^\circ$ . Par contre, l'écart est plus important pour le site près de Soviera. Cependant, le relief est de ce cas est très proche pour la partie Nord à Sud-Est (de l'ordre de 400 m) et donc l'erreur altimétrique de SRTM génère une incertitude relativement importante sur l'évaluation de l'horizon dans cette zone. D'ailleurs les relevés faits par théodolites sont globalement dans la zone d'incertitude.





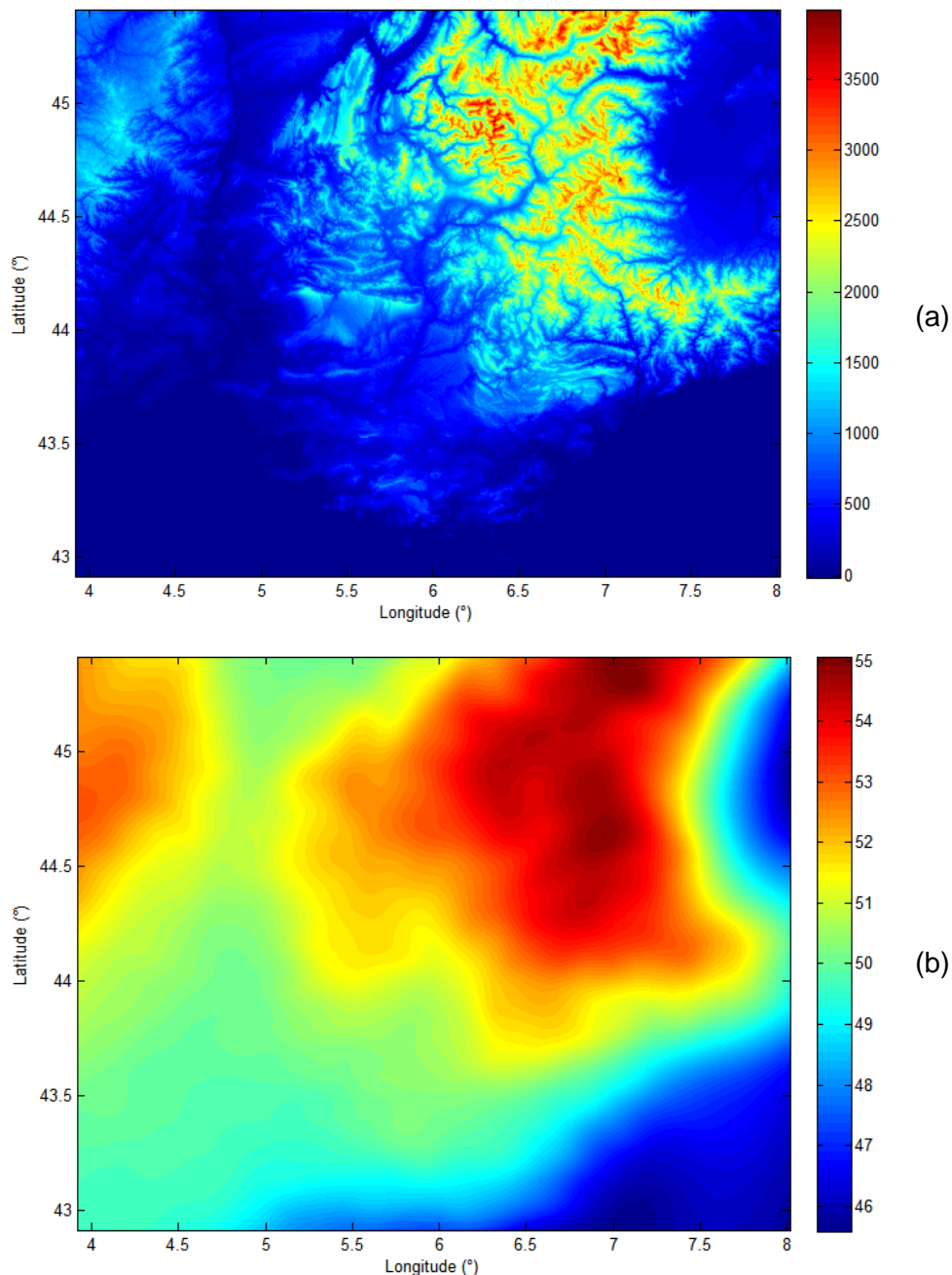
**Figure 29 :** comparaison des relevés par théodolites et par calcul à partir du MNT SRTM v4 à Corte (a) et Soveria (b) en Corse. Les relevés par théodolites ont été effectués par un doctorant de l'Université de Corse, Pierrick Haurant.

### 3 APPLICATION A L'ATLAS SOLAIRE PACA

Nous avons choisi comme modèle numérique d'élévation la base de données SRTM v4 (cf. **RB5**). Cette base de données fournit une altitude avec une précision meilleure que 10 m pour 90 % des points suivant une résolution en latitude / longitude de 3 arcsec. En région PACA, cela correspond à une résolution Nord-Sud de 93 m et une résolution Est-Ouest de 67 m.

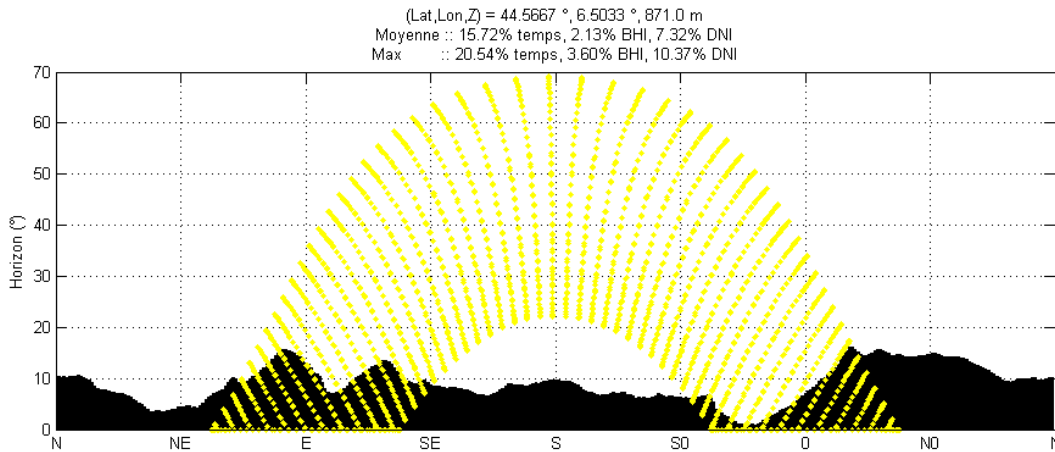
L'algorithme développé permet de calculer l'horizon avec un échantillonnage en azimut tous les degrés et une distance maximale de 40 km en moins de 0.5 seconde par géo-point.

La base de données SRTM fournissant l'altitude au dessus du niveau moyen de la mer, elle est définie par rapport au géoïde (altitude orthométrique). Pour obtenir une altitude par rapport à une ellipsoïde de référence, nous avons choisi d'utiliser la base de données EGM08 (**RB9**) permettant de définir l'altitude du géoïde par rapport à l'altitude de l'ellipsoïde de référence WGS84. Ainsi, l'altitude  $h$  désirée est-elle la somme de l'altitude SRTM avec l'altitude EGM08.



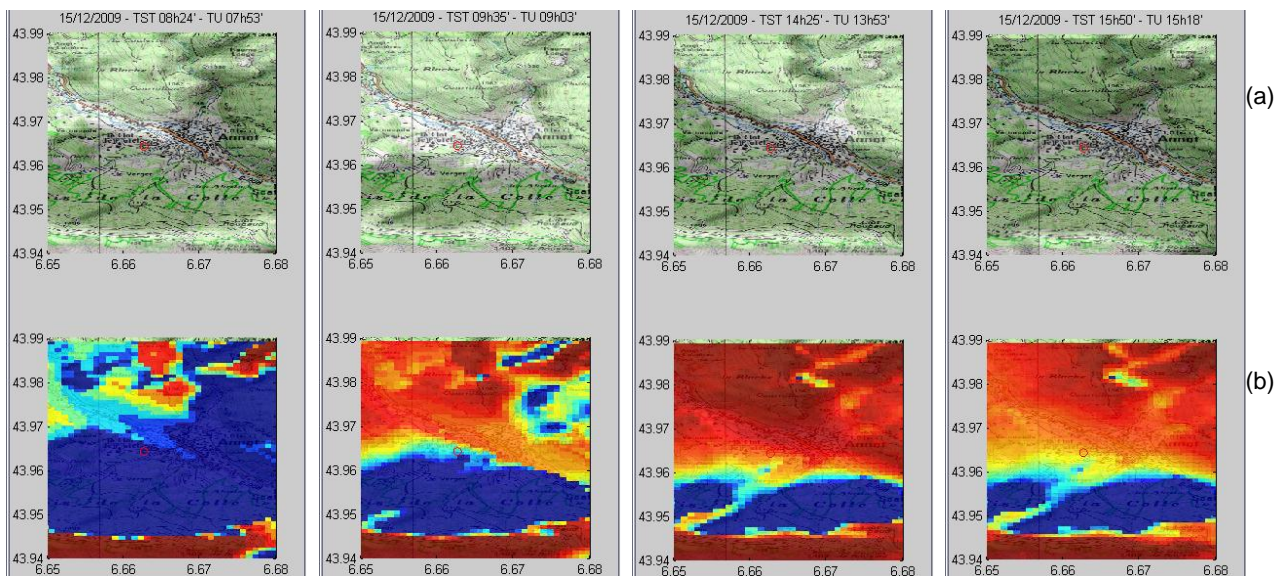
**Figure 30 :** base de données altimétrique SRTM (a) et base de données du géoïde EGM08 (b) sur la région PACA.

La figure 31 montre un exemple d'un calcul d'horizon avec cet algorithme, sur la commune d'Annot.

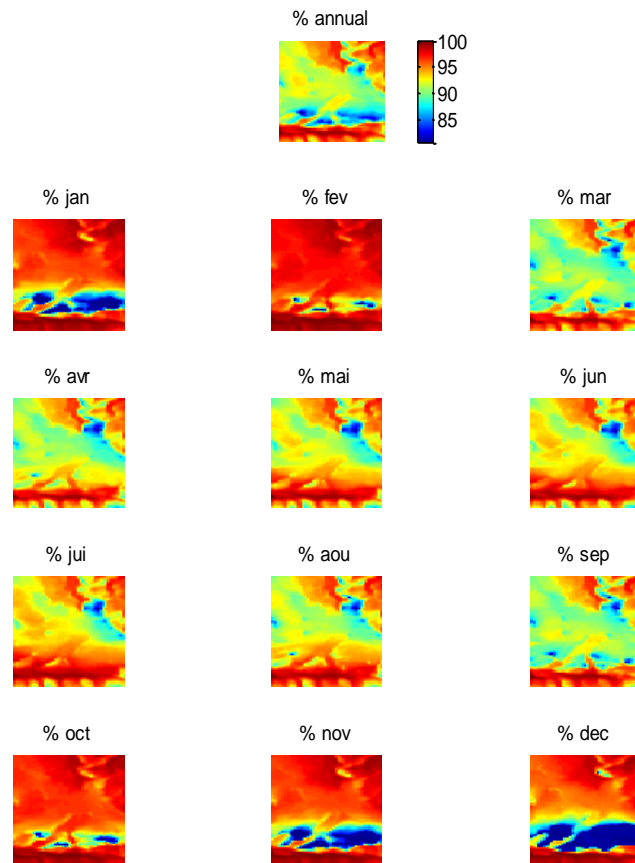


**Figure 31 :** horizon calculé en un point de la région PACA. Les points jaunes représentent la position du soleil durant l'année.

La figure 32 et la figure 33 correspondent à un exemple de l'effet des ombres portées sur le rayonnement direct en incidence normale évaluée à partir de l'algorithme décrit dans l'annexe A avec une calcul d'horizon effectué tous les 50 m à l'intérieur de la zone de 5 km par 5 km autour de la commune d'Annot.



**Figure 32 :** (a) exemple de variation temporelle des ombres portées à quatre heures de la journée du 15 déc. 2009 sur une zone de 5 km par 5 km centrée sur la commune d'Annot. (b) Variabilité spatiale de l'intégration au cours de cette même journée du rayonnement direct en incidence normale.

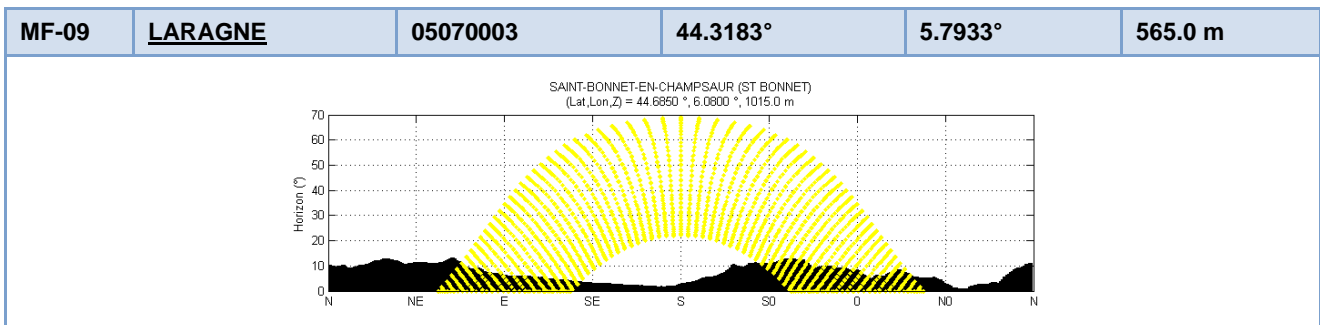
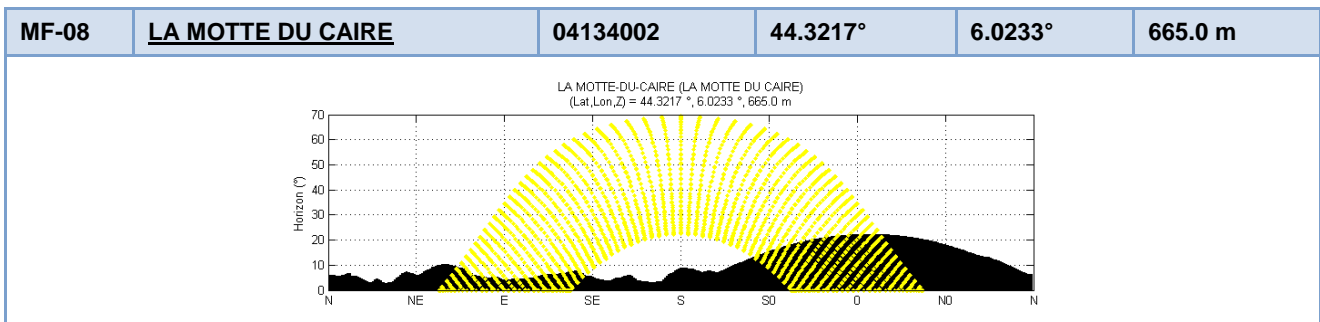
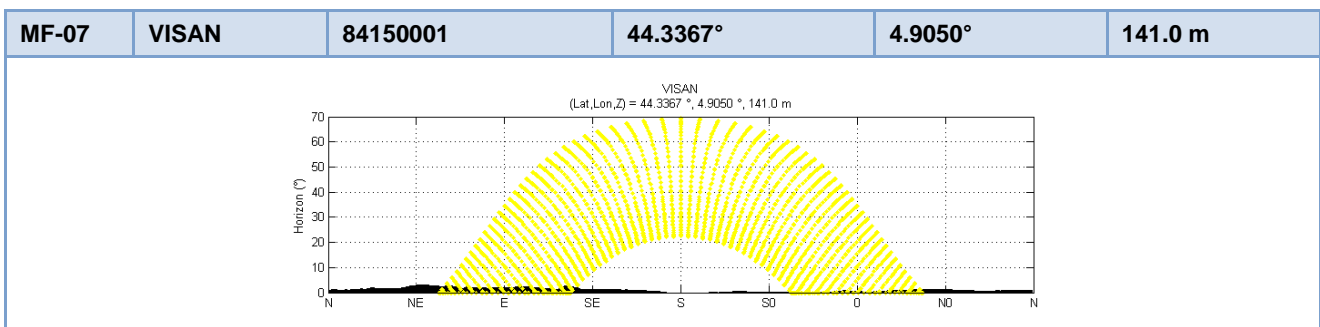
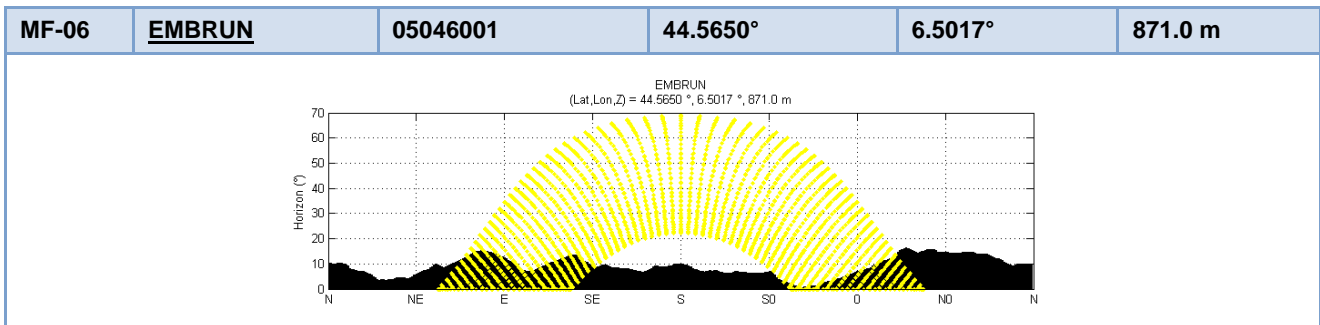
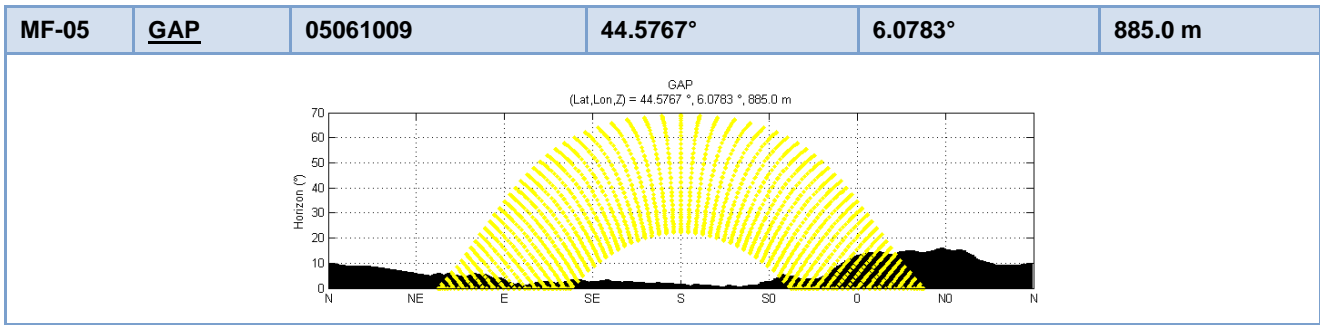


**Figure 33 :** fractions en %, sur la zone présentée par la figure 32, représentant la variabilité du rayonnement global sur plan horizontal représentant par rapport au point central de la zone.

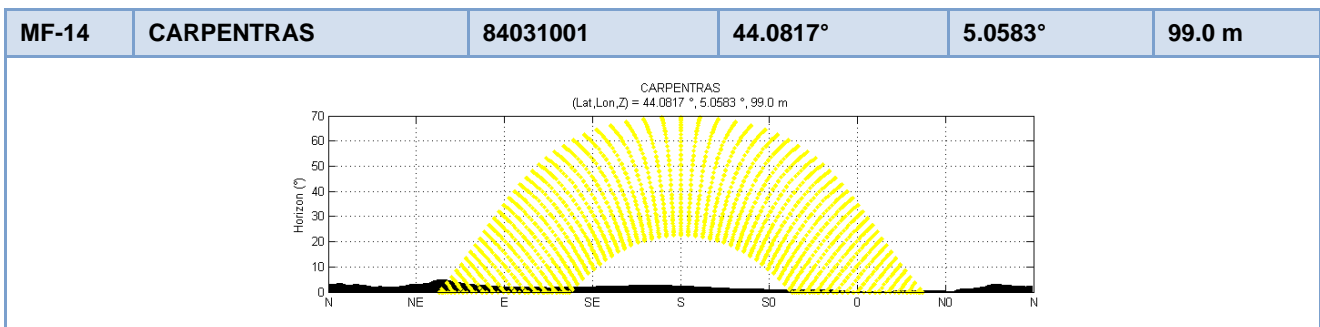
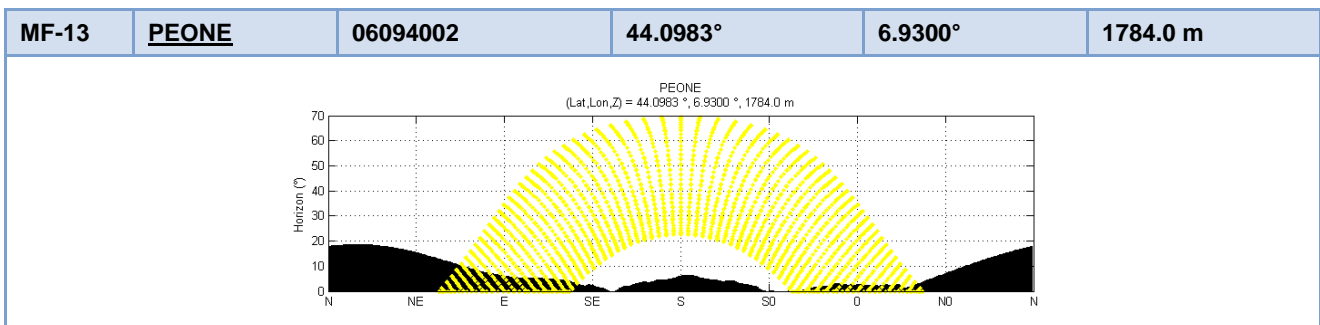
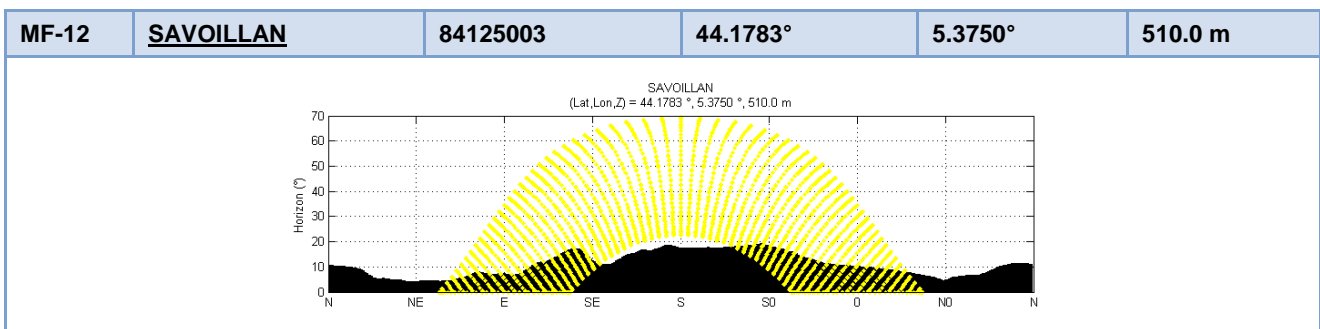
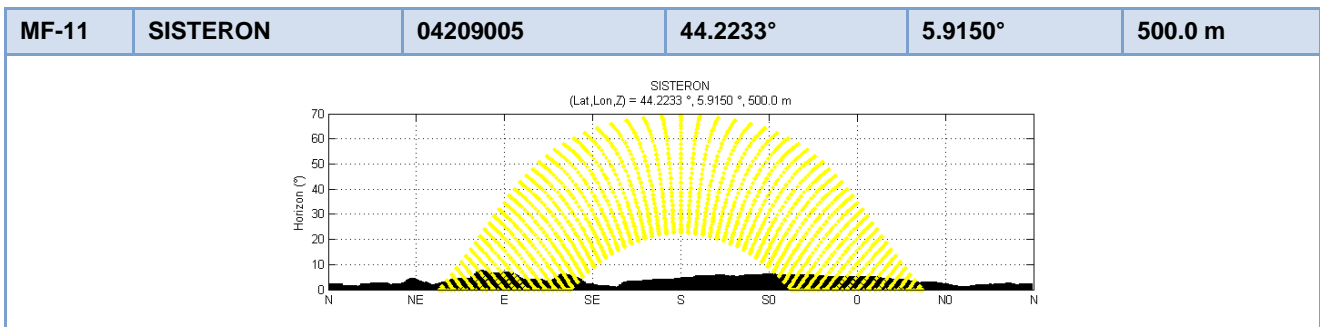
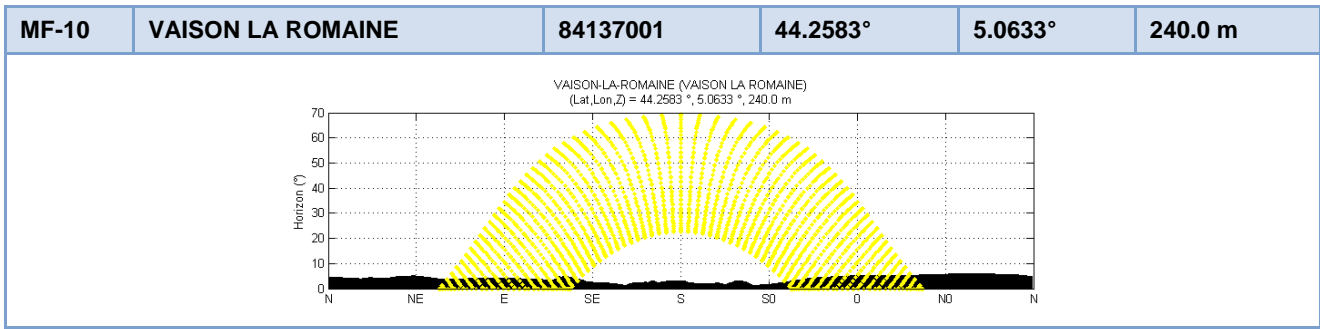


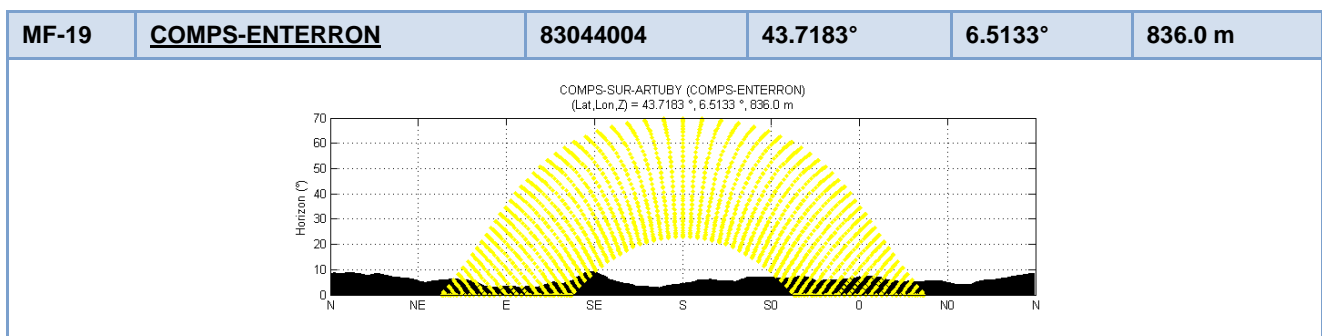
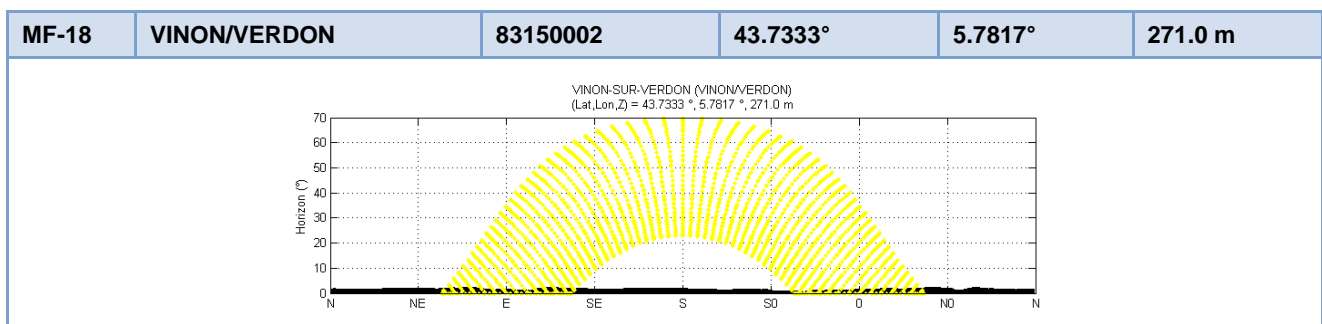
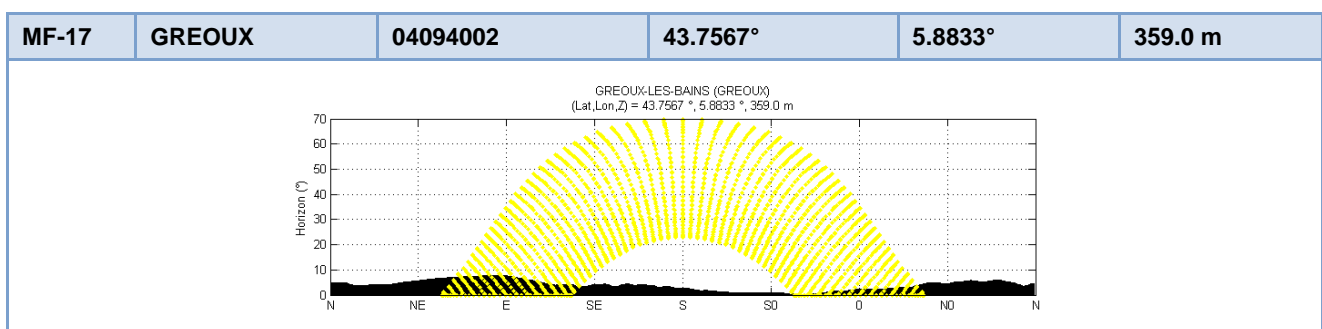
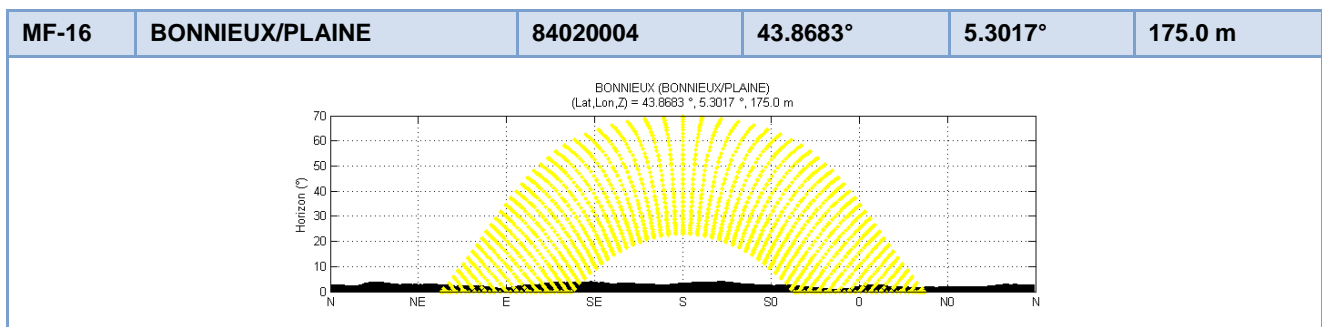
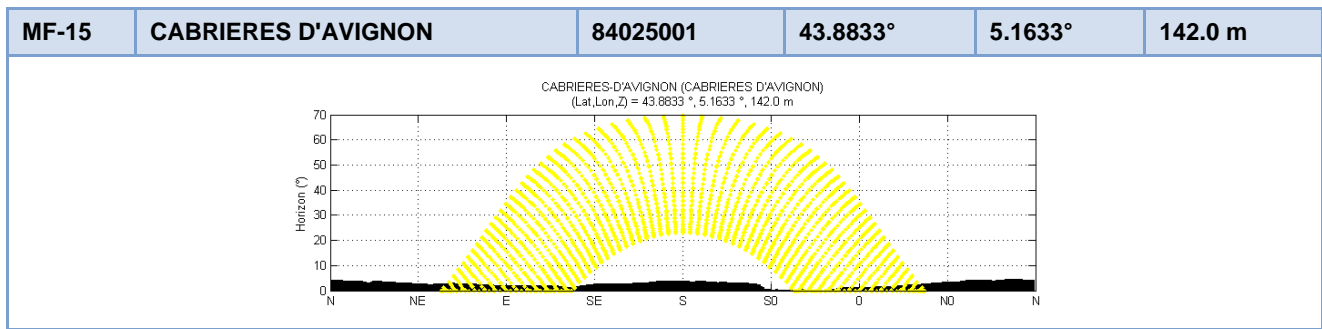
## ANNEXE C : ESTIMATION DES HORIZONS POUR LES STATIONS METEOROLOGIQUES MF ET RSP DU PROJET

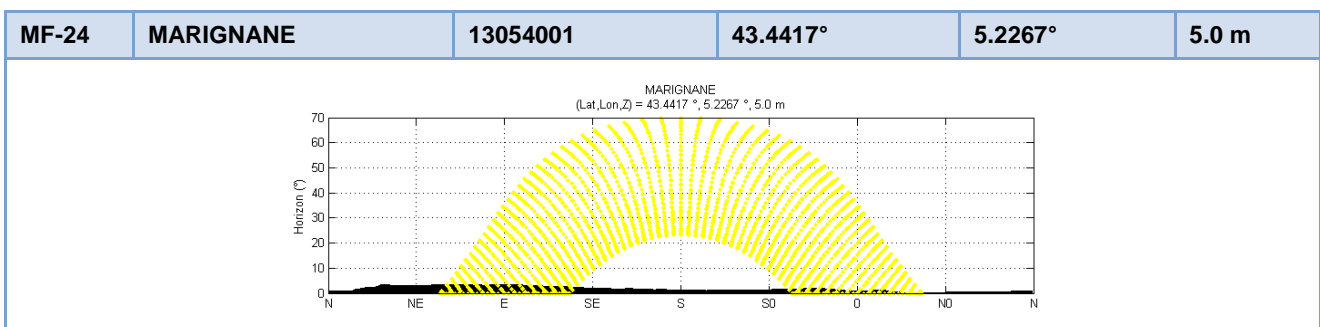
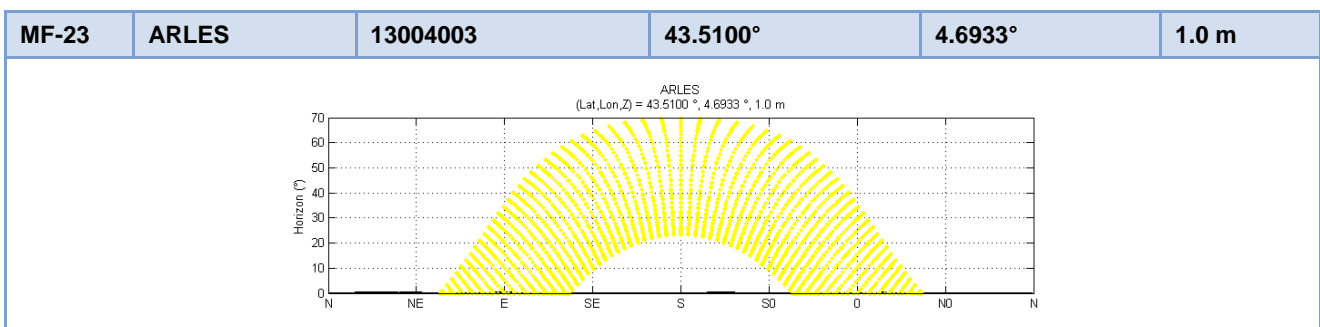
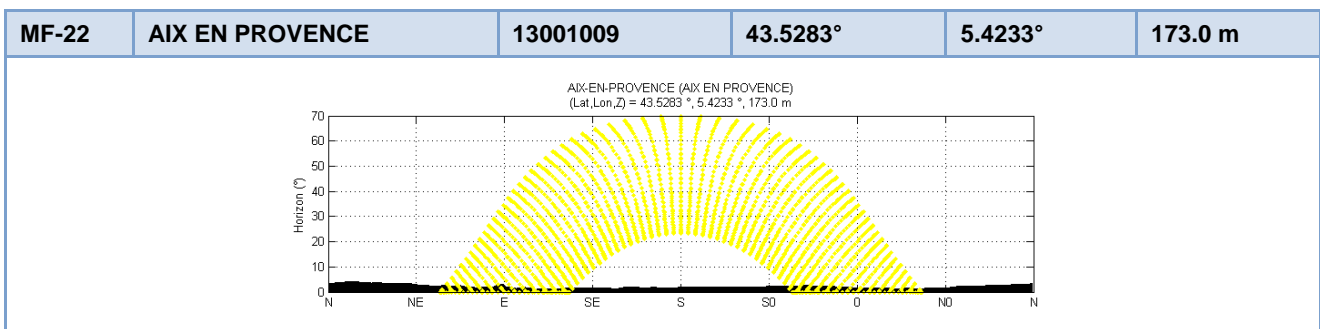
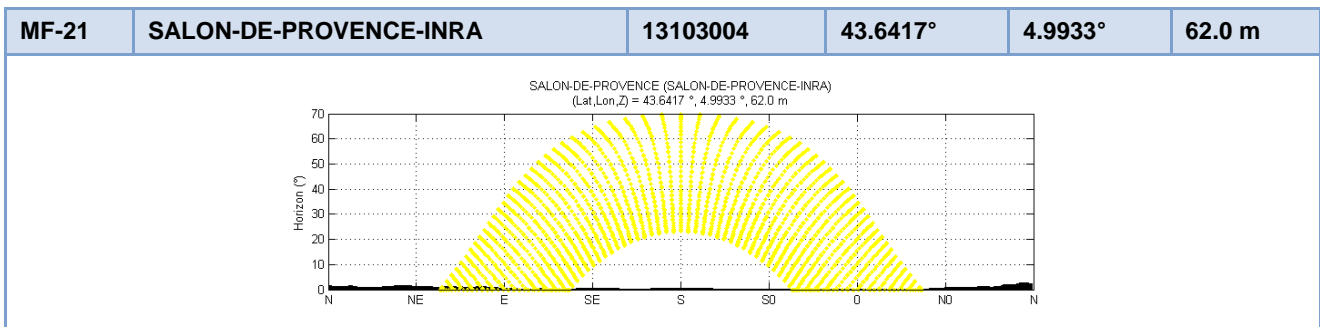
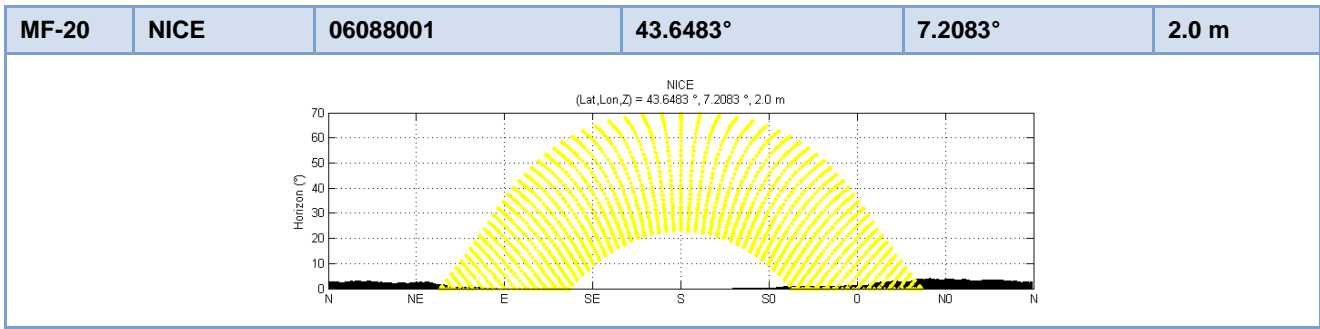
MF-01	<u>BRIANCON</u>	05023001	44.9083°	6.6350°	1324.0 m
<p>BRIANCON (Lat, Lon, Z) = 44.9083°, 6.6350°, 1324.0 m</p>					
MF-02	<u>VILLAR ST PANCRACE</u>	05183001	44.8800°	6.6400°	1310.0 m
<p>VILLAR-SAINT-PANCRACE (VILLAR ST PANCRACE) (Lat, Lon, Z) = 44.8800°, 6.6400°, 1310.0 m</p>					
MF-03	<u>ST BONNET</u>	05132002	44.6850°	6.0800°	1015.0 m
<p>SAINT-BONNET-EN-CHAMPSAUR (ST BONNET) (Lat, Lon, Z) = 44.6850°, 6.0800°, 1015.0 m</p>					
MF-04	<u>ST-JEAN-ST-NICOLAS</u>	05145002	44.6700°	6.2083°	1210.0 m
<p>SAINT-JEAN-SAINT-NICOLAS (ST-JEAN-ST-NICOLAS) (Lat, Lon, Z) = 44.6700°, 6.2083°, 1210.0 m</p>					

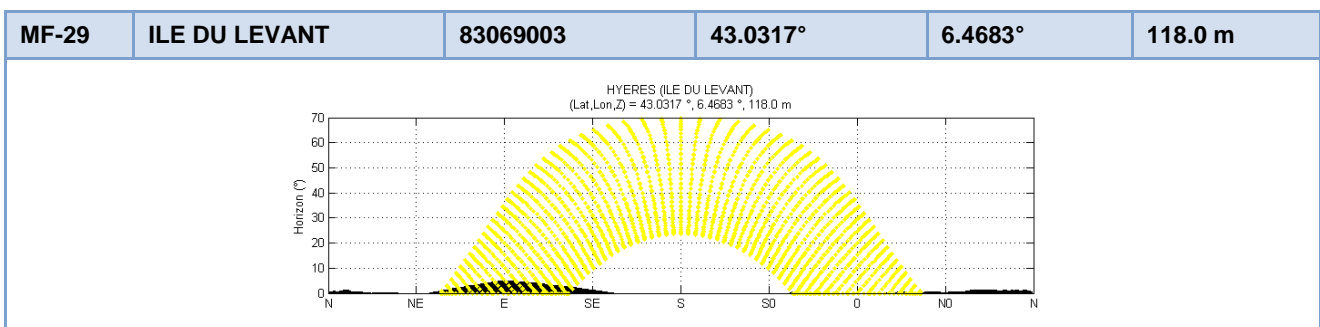
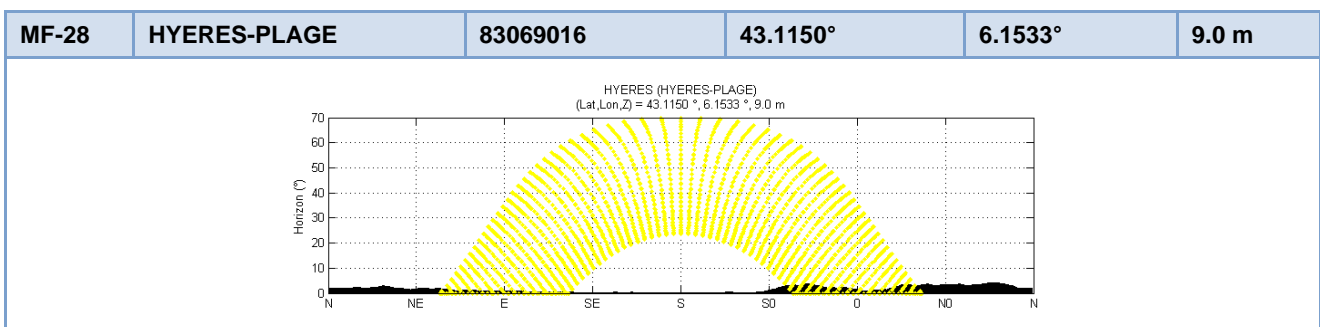
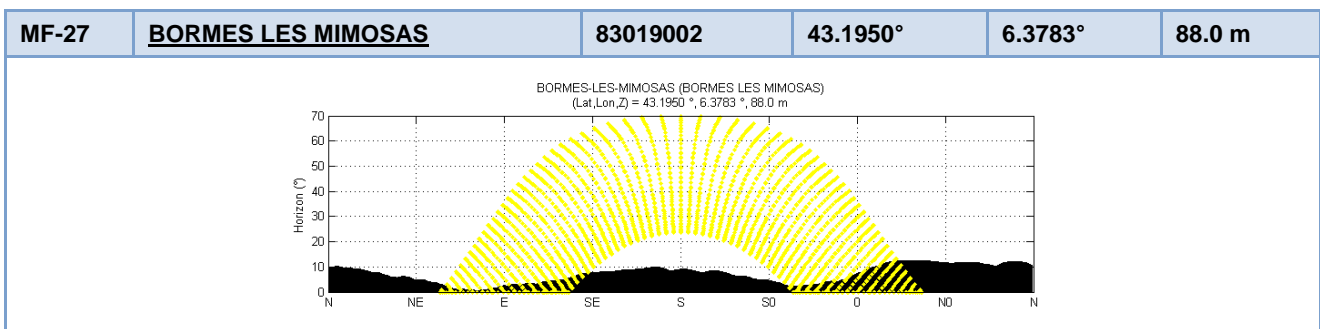
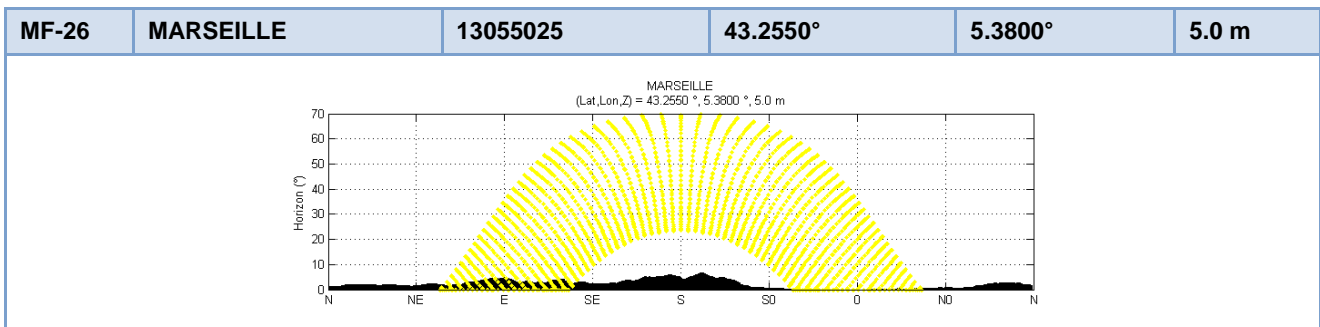
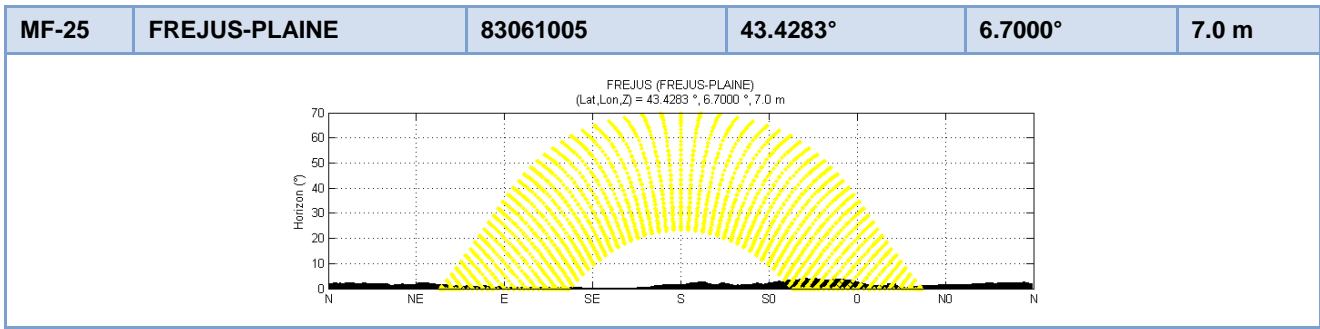


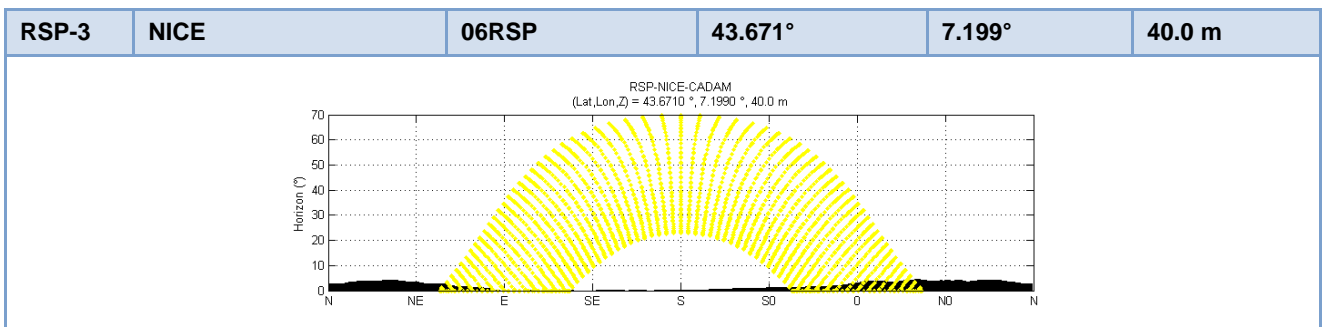
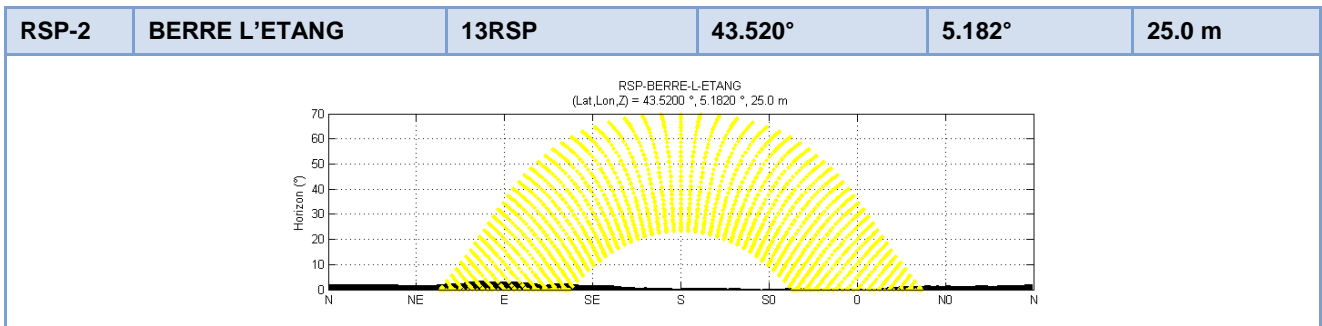
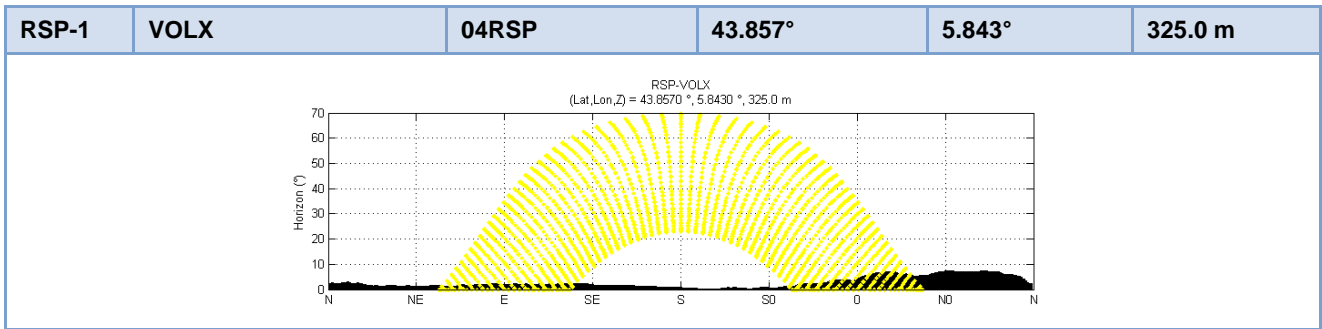








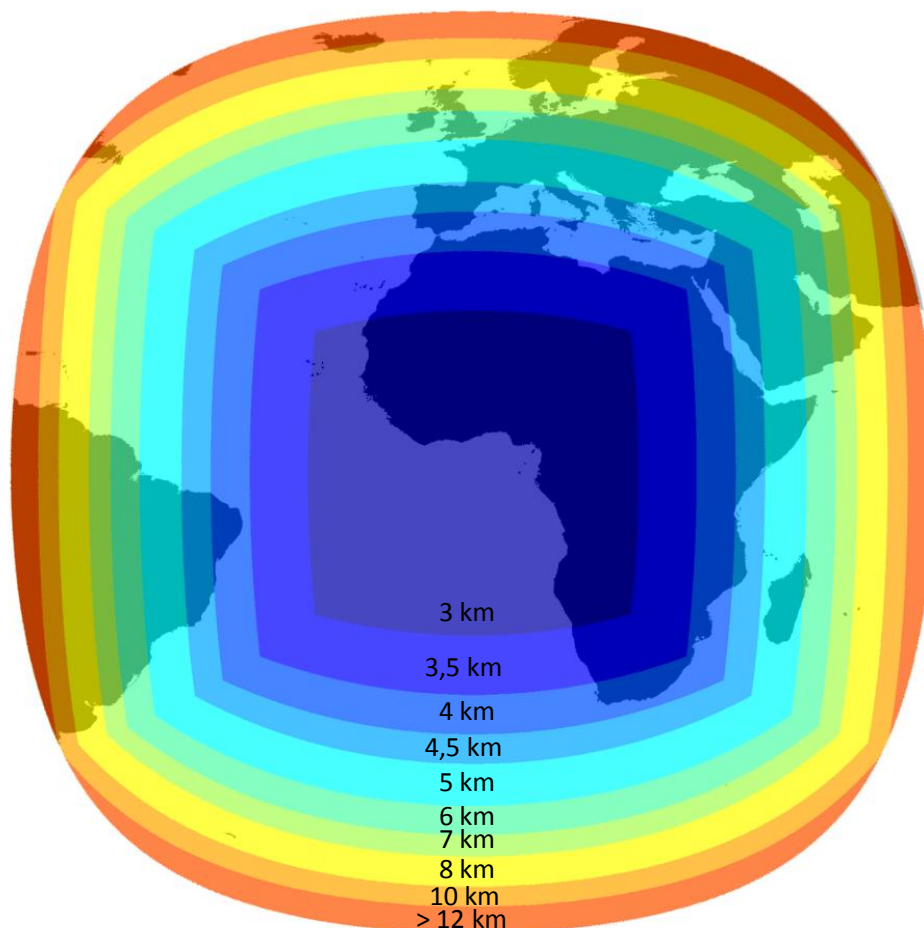




**– Page laissée volontairement blanche –**

## ANNEXE D : PRINCIPE DE LA METHODE HELIOSAT-2

La méthode Heliosat-2, dont est issue la base de données HelioClim-3 utilisée dans cette étude, exploite toutes les 15 minutes des images satellitales pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol. Ces images satellitales sont des images à 3 km de résolution à l'équateur provenant du satellite en orbite géostationnaire appelé *Meteosat Second Generation* (MSG)<sup>6</sup>.



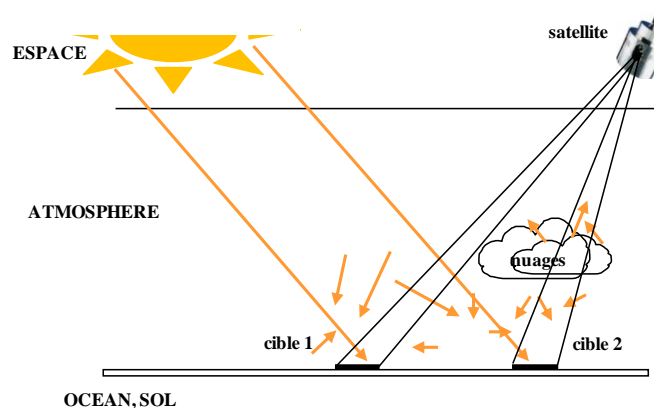
**Figure 34 :** couverture et résolution des images MSG utilisées tous les ¼ d'heure par la méthode Heliosat-2 pour constituer la base de données HelioClim-3.

La méthode Heliosat-2 a pour principe le fait qu'une variation de luminance perçue par le capteur est considérée comme une variation de la couverture nuageuse au dessus du pixel et a pour entrées les images satellitales brutes ou étalonnées (cf. figure 35). Ses entrées résultent de l'ensemble des interactions rayonnement-atmosphère-sol et une inversion du signal est faite pour évaluer le rayonnement global incident au sol, sur plan horizontal.

<sup>6</sup> Cf. [http://www.eumetsat.int/HOME/Main/What\\_We\\_Do/Satellites/Meteosat\\_Second\\_Generation/index.htm](http://www.eumetsat.int/HOME/Main/What_We_Do/Satellites/Meteosat_Second_Generation/index.htm)



Des modèles empiriques permettent alors de décomposer le rayonnement global en composantes directe et diffuses nécessaire à l'évaluation du rayonnement sur plan incliné (fixe ou à orientation variable).



**Figure 35 :** représentation schématique du principe de la méthode HelioSat-2. Ici, le rayonnement perçu par le satellite au dessus de la cible 2 est plus grand, que celui perçu au dessus de la cible 1. C'est ainsi que le rayonnement évalué est plus grand à la cible 1 qu'à la cible 2.

Les deux étapes principales de la méthode Heliosat-2 sont :

### 1 - La conversion de l'image en indice d'ennuagement

L'indice d'ennuagement résulte d'une comparaison entre ce qui est observé par le capteur avec ce qui devrait être observé au-dessus de ce pixel si le ciel était clair, *i.e.* sans nuages. Cet indice représente en quelque sorte l'atténuation optique de l'atmosphère et s'exprime comme suit :

$$n_c = \frac{\rho_{sat} - \rho_{sat\ clair}}{\rho_{sat\ nuage} - \rho_{sat\ clair}} = \frac{\rho_{sat} - min}{max - min}$$

Les variables *min* et *max*, sont déterminés par analyse statistique et correspondent respectivement aux réflectances mesurées par le satellite ( $\rho_{sat}$ ) par ciel clair ( $\rho_{sat\ clair}$ ) et par ciel couvert ( $\rho_{sat\ nuage}$ ).

### 2 - La conversion de l'indice d'ennuagement en éclaircissement

Le calcul de l'éclaircissement se fait alors à partir de l'indice de ciel clair  $K_c$ , donné par la relation empirique suivante :

$$\begin{array}{ll} n < -0,2 & K_c = 1,2 \\ -0,2 < n < 0,8 & K_c = 1 - n \\ 0,8 < n < 1,1 & K_c = 2,0667 - 3,6667 n + 1,6667 n^2 \\ n > 1,1 & K_c = 0,05 \end{array}$$

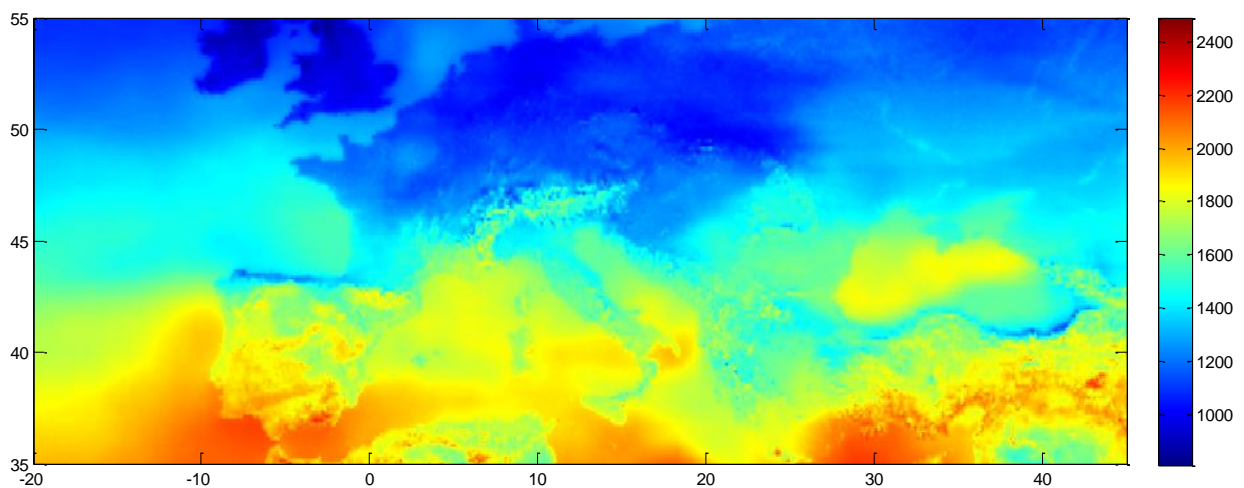
L'éclaircissement au sol  $E$  est ensuite déterminé par multiplication avec l'éclaircissement par ciel clair  $E_{clair}$

$$E = K_c E_{clair}$$

$E_{clair}$  est estimé par le modèle ESRA (RB15).

La méthode Heliosat-2 ainsi que ses performances sont décrites de manière plus précise dans **RB12**.

Les méthodes d'estimation du rayonnement par images satellitales comme Heliosat-2 offrent donc la possibilité d'établir des bases de données géographiquement dense de rayonnement solaire, comme l'exemple de la figure 36. Elles sont donc complémentaires des mesures faites par des réseaux de stations météorologiques dont l'interpolation n'est plus envisageable lorsque la distance qui sépare les stations sont supérieures à typiquement 20 km à 50 km.



**Figure 36 :** exemple de carte d'Europe du rayonnement solaire représentant la somme annuelle de rayonnement global sur plan horizontal, exprimée en kWh/m<sup>2</sup>.

**– Page laissée volontairement blanche –**

# ANNEXE E : PLAQUETTE DE PRESENTATION DE L'ATLAS

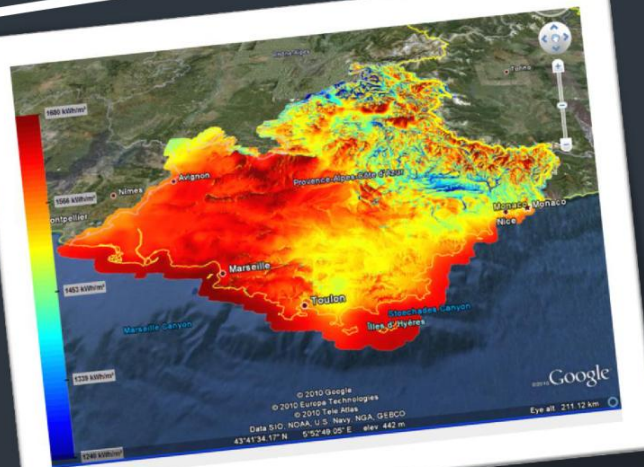
[www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr)

Atlas Solaire



Provence-Alpes-Côte d'Azur

## Atlas du gisement solaire en région Provence-Alpes-Côte d'Azur



*« Jamais le Soleil ne voit d'ombre »  
Léonard de Vinci*







**Satellite Meteosat Seconde Génération**

Credits: EUMETSAT



**Carte du relief dérivée de SRTM-V4**

Credits: NASA/PI-Cornell



Credits: JOE/FINEL

**UN ATLAS A HAUTE RESOLUTION SPATIALE DE LA RESSOURCE SOLAIRE**

**AU SERVICE DU DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE SOLAIRE EN REGION PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR**

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur dispose d'un formidable potentiel d'énergie renouvelable d'origine solaire. L'atlas du gisement solaire de cette dernière est un ensemble de cartes à **200 mètres de résolution** permettant la caractérisation fine et précise du rayonnement solaire en **sommes mensuelles**, suivies de ses composantes **globale, directe et diffuse**.

Diffusé **librement et gratuitement par internet**, cet atlas a pour ambition de servir de référence régionale pour l'évaluation du potentiel des filières de conversion **PV, thermique et thermodynamique** du rayonnement solaire. Les différents acteurs **publics et privés** du domaine pourront utiliser cet atlas pour identifier des sites d'implantation de systèmes de production d'énergie par voie solaire, de manière objective et quantitative, de les dimensionner selon l'application visée ou encore d'en évaluer, de manière fiable, la rentabilité financière voire les bénéfices environnementaux.

La haute résolution spatiale de l'atlas est tout à fait adaptée aux besoins des professionnels et installateurs qui sont orientés vers le marché des particuliers, pour la mise en place de systèmes solaires de production d'énergie (chauffe eau solaire individuel ou collectif, système solaire combiné ou photovoltaïque individuel). Cet atlas est un outil accessible par le web qui peut largement contribuer à sensibiliser le grand public sur le potentiel solaire disponible sur sa région, voire l'orienter plus facilement vers une solution solaire pour ses besoins propres.

**METHODOLOGIE**

L'atlas s'appuie sur la base de données de rayonnement solaire **HelioClim-3** établie par **MINES ParisTech - ARMINES** suivant la méthode **Heliosat-2** ([www.helioclim.org](http://www.helioclim.org)) utilisant depuis février 2004 des images satellitaires à **4 km de résolution** issues du satellite **Meteosat Seconde Génération** opérée par l'organisation européenne **EUMETSAT** (<http://hdp://www.eumetsat.int>).

Le modèle numérique de terrain **SRTM-V4** disponible à une résolution d'environ **100 m** est utilisé afin de rendre compte, localement à la résolution de **200 m**, des **effets d'ombres portés du relief** et de la variation de l'épaisseur atmosphérique sur l'estimation locale du rayonnement solaire.

Enfin, un **étalementage** de l'atlas a été effectué par des séries temporelles de mesures pyrométriques *in-situ*, issues de **stations météorologiques** dédiées au projet ou appartenant au réseau de stations de **Météo France** (cf. encart sur les stations météorologiques). Cet étalementage permet l'amélioration de l'estimation du rayonnement solaire, dans ses différentes composantes directes, diffusées et globales, sur plan incliné.

**EFFET D'OMBRE PORTÉE MODULÉ LOCALEMENT PAR LE RELIEF**

Exemple de résultats du calcul d'horizon sur 360° évalué en un lieu de la région PACA, à partir du modèle numérique de terrain SRTM-V4.

Les positions angulaires du soleil durant une année, toutes les 15 minutes sont représentées par des points jaunes.



**LOCALISATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES POUR L'ETALONNAGE**

Emploi en région PACA des stations météorologiques ● du réseau Météo France et des stations pyrométriques ■ spécifiques de type Rothing Stralovland Pyrometers (RSP) louées pendant 1 an à la société CSP Service ([www.csp-services.eu](http://www.csp-services.eu)).

Le médaillon en haut à gauche correspond à la station Météo France de Laragne-Montagnin (Hautes-Alpes). Le médaillon en bas à droite représente la station RSP installée à Nice, sur le toit d'un bâtiment du Centre Administratif des Alpes Maritimes.



Credits: Météo France / Météo-Data

Credits: MINES ParisTech / ARMINES

**PRECISION**

L'analyse statistique par des méthodes de validation directe ou croisée des erreurs d'estimation après étalementage avec les stations pyrométriques a permis d'établir les **incertitudes** associées à l'atlas solaire.

La précision de l'estimation des **irradiations mensuelles** est de l'ordre de **5 %** (~ 5 kWh/m<sup>2</sup>) pour les irradiations globales, directes et diffusées sur plan horizontal, sans erreur systématique notable. La précision d'estimation des irradiations mensuelles **directes en incidence normale** est, elle, de l'ordre de **10 %** (~ 15 kWh/m<sup>2</sup>).

**LES PARTENAIRES**

L'atlas solaire est le résultat d'un projet mené par le Centre Energétique et Protédés (CEP), laboratoire de recherche commun **MINES ParisTech - ARMINES**. Ce projet, labellisé par le pôle de compétitivité **CAPENERGES**, a été financé par **ADOME** au titre de l'accord cadre Etat-Région-ADOME 2007-2013, ainsi que par le **Conseil Général des Alpes Maritimes**



**UN ACCES WEB PUBLIC**

Dans sa définition de données de rayonnement solaire moyennes en sommes mensuelles, l'atlas solaire est accessible gratuitement et librement sur le site [www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr) :

- un serveur de cartes d'irradiation au standard OGC (Open Geospatial Consortium)
- un service web spécifique pour un accès ponctuel

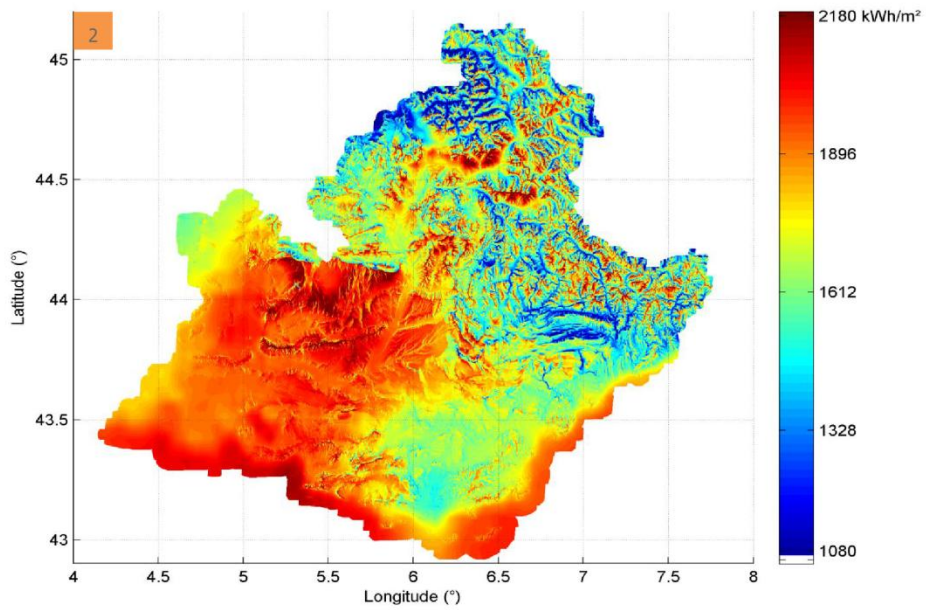
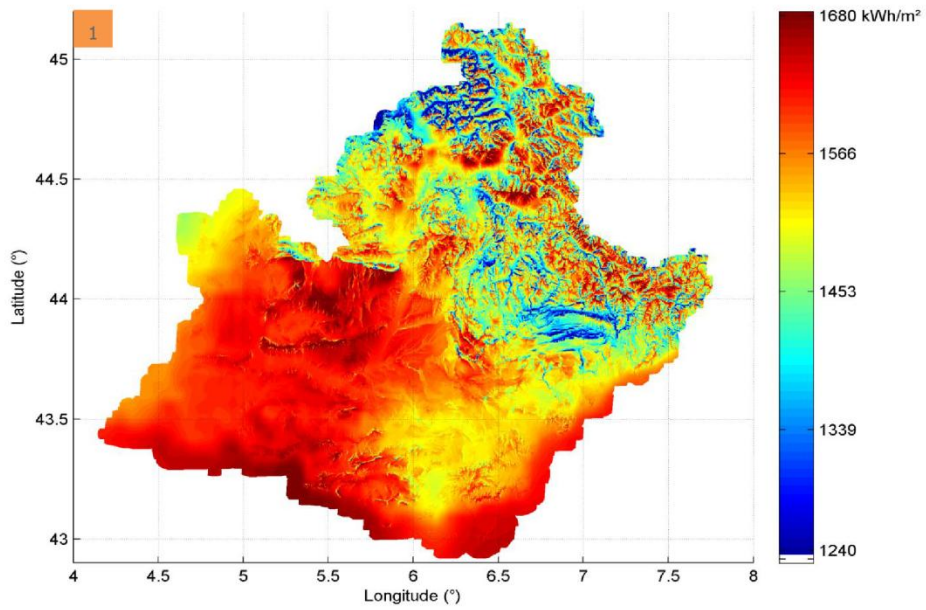


**UN ACCES EXPERT**

Un accès de type **expert /ingénieur** plus complet à l'atlas solaire permettant d'obtenir des séries temporelles journalières, voire intra-journalières, d'irradiations suivant des plans inclinés non pré-calculés est prévu. Cet accès spécifique sera assuré sur le plan commercial par la société **Transvalor Innovation**, délégué en charge de la commercialisation notamment de la base de données **HelioClim-3**, via le site [www.soda3.com](http://www.soda3.com)



Edition 1.0 - 09/2011



**Cartes des irradiations annuelles globales sur plan horizontal (1) et directes en incidence normale (2), moyennées sur la période 2004 – 2010**

Plaquette d'information sur l'Atlas du gisement solaire en région PACA (Edition 1.0 - 09/2011). Plus de détails sur le site [www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr)

**Atlas Solaire**



Provence-Alpes-Côte d'Azur

**CONTACT**

Dr Philippe BLANC  
 Centre Energétique et Procédés  
 MINES ParisTech / ARMINES  
 1, rue Claude Daunesse, BP 207  
 F-06904 Sophia Antipolis Cedex  
 Téléphone : 04 93 95 74 04  
[philippe.blanc@mines-paristech.fr](mailto:philippe.blanc@mines-paristech.fr)

**– Page laissée volontairement blanche –**



## **ANNEXE F : COMMUNICATION AU CONGRES INTERNATIONAL "ISES SOLAR WORLD CONGRESS 2011 IN KASSEL, GERMANY"**

### **Référence**

BLANC P., ESPINAR B., GSCHWIND B., MENARD L., THOMAS C., WALD L., "High spatial resolution solar atlas in Provence-Alpes-Côte d'Azur". Proceeding of the ISES Solar World Congress, Theme: Resource Assessment, August 28 - September 2, 2011, Kassel (Germany), International Solar Energy Society, p. 174-182.

### **Résumé**

Considering the spatial resolution of satellite-based databases of surface solar irradiation such as HelioClim-3, the geographic scale of solar mapping that can be derived is approx. 1 / 5 000 000. This geographic scale is suitable for continent or country solar mapping. Nevertheless, customers' feedback notably states that there is a need of spatial resolution improvement.

In this context, the project of solar atlas in Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), finalized in December 2010, aims at increasing spatial resolution of HelioClim-3 to derive 200 m resolution solar maps. The solar atlas accounts for the global, direct and diffuse on inclined plane or in normal incidence irradiations and their temporal variations intra and inter-annual, on a monthly basis, since February 2004.

The Digital Elevation Model SRTM-V4 is used to get topographic data with a spatial resolution of approximately 100 m and a localization accuracy of typically 10 m. This topographic data is used to estimate high-resolution terrain effects on HelioClim-3 derived solar radiation fields, taking into account orographic effects:

Effects of optical path length variations due to terrain elevation;

Shadow effects on direct and circumsolar diffuse radiation computed from local horizon estimation;

Horizon effects on isotropic diffuse radiation with the sky view factor estimation.

These orographic phenomena are indeed the source of significant local spatial variations in solar radiation values and potentially discriminating in choosing the location, the calculation of profitability or the sizing of photovoltaic or thermodynamic solar power systems.

Moreover, in order to establish an accurate mapping at 200 m with associated uncertainty using HelioClim-3 data, procedures of calibration has been established with meteorological ground stations. The global horizontal irradiation is calibrated thanks to the Météo France meteorological network comprising, in PACA, about 30 automatic ground stations delivering at least daily global irradiation on horizontal plane. A strict data quality control has been applied to these ground data to guarantee their quality as reference ground-based daily irradiation data. The diffuse and direct irradiations are calibrated thanks to three specific ground stations dedicated expressly to the project, delivering one year of simultaneous 10-min global and diffuse irradiations on the horizontal plan and direct irradiation on normal incidence.

Statistical analysis of direct and cross-validation estimation errors after calibration with the pyranometric ground stations has been made to establish the uncertainties associated with the solar atlas. The root mean square error of monthly irradiation estimation is about 5% (c. 5 kWh m<sup>-2</sup>) for global, direct and diffuse components on horizontal plane, without significant bias error. The accuracy of monthly direct normal irradiation is about 10% (c. 15 kWh m<sup>-2</sup>).

Dissemination is a key activity and MINES ParisTech has participated since several years to Global Earth Observation System of System (GEOSS) initiative. GEOSS promotes interoperability and harmonization of various systems and addresses exchange and dissemination of interoperable data, metadata and products. MINES ParisTech has selected the GEOSS recognized OGC (Open Geospatial Consortium) standard such as WMS (Web Map Services) to disseminate solar radiation resources on the Web. A dedicated Community Portal has been set-up ([www.webservice-energy.org](http://www.webservice-energy.org)) and provides free access to several energy and environmental resources as from of Web services. Data from the solar atlas in PACA is also available for free on a dedicated portal [www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr).

## HIGH SPATIAL RESOLUTION SOLAR ATLAS IN PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR

Philippe Blanc<sup>1</sup>, Bella Espinar<sup>1</sup>, Benoit Gschwind<sup>1</sup>, Lionel Menard<sup>1</sup>, Claire Thomas<sup>2</sup> and Lucien Wald<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MINES ParisTech / ARMINES, Centre for Energy and Processes, Sophia Antipolis (France)

<sup>2</sup>TRANSVALOR, Sophia Antipolis (France)

### 1. Introduction

Most existing solar atlases cover a continent or a country with a spatial resolution coherent with such visualization. These atlases generally depict yearly sum of Global Horizontal Irradiation (GHI). Thus they give a good idea of the large scale solar trends, which are particularly suited for an application of identification of wide areas of high solar potential. However, these large scale atlases of yearly GHI data are not appropriate for the local estimation of solar systems, such as the precise estimation of the electrical production from PV plants, Concentrated Photovoltaic CPV technologies and from Concentrated Solar Power (CSP) systems.

Such applications require a finer spatial resolution, as well as the knowledge of the other solar components (direct or Beam Normal Irradiation, BNI, and Diffuse Horizontal Irradiation, DHI) in conjunction with their temporal evolution through the seasons of the year. This communication introduces the Solar Atlas over the French region of Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) which aims at fulfilling these requirements. The PACA Solar Atlas was launched in January 2009 and has been finalized in December 2010. The purpose is to create 250 m resolution solar maps for different plane orientations: horizontal, tilted and normal to sun rays. The atlas will account for the temporal intra and inter-annual variations on a monthly basis of the different components of the incident sun radiation.

It exploits the advantages of both the satellite-based solar radiation databases and the *in situ* ground station measurements. Satellite-based datasets provide homogeneous information over a large area, but with a spatial resolution limited to the one of the satellite image. Networks of ground stations generally offer very precise information at the location of the stations but the geographical distribution of this information is scarce and heterogeneous. The PACA Solar Atlas combines both sources of radiation by calibrating the satellite-based solar radiation database HelioClim-3 using the available ground stations.

The enhancement of the spatial resolution from the approx. 5 km of HelioClim-3 to the announced 250 meters of the atlas has been achieved using the high resolution Digital Elevation Model (DEM) named Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Farr *et al.*, 2007). This orographic information is exploited to modulate the intra-pixel radiation due to the shadowing effect of the horizon and to introduce the variation of the atmospheric layer thickness above a given geographical location.

Mines ParisTech, located in Sophia Antipolis in the French Riviera, realized the Solar Atlas project thanks to the support and funding of local and regional organizations and councils: ADEME PACA, the PACA region, the council of the Department "Alpes Maritimes", as well as CAPENERGIES, a competitive cluster for Energy in PACA. One reason which motivated this investment is the weakness of the electrical network in the French department of "Alpes Maritimes". Indeed, only one double line provides the electricity from the national electricity network to the whole department, due to the fact that the PACA region is located at the end of one of the distribution lines. This drastic constraint led several times to a shortage of electricity during a few hours, for instance like a freezing morning in winter 2009. Therefore, regional organizations and councils are interested in promoting alternative electricity generation and associated tools.

This orientation in the energy policy of our region is coherent with the large increase in the number of PV installations, and with the growing interest of the population and companies for the renewable energies. The PACA Solar Atlas is designed for a wide audience by providing an access-free tool for all to discover or exploit the solar potential of the region. With its online map and time series services, it is an interesting

trade-off between an educative and a fully expert tool to access the solar radiation information. It is suitable for sizing large and small individual solar systems (small PV system, solar water heating systems, etc). Accurate and well-presented solar maps are concrete and instructive for everybody (e.g. education) to promote solar energy.

## 2. Data and calibration

Since February 2004, the Heliosat-2 algorithm (Rigollier *et al.* 2004) applied to Meteosat Second Generation (MSG) SEVIRI images has been used to update, every night, the solar resource database HelioClim-3 (HC3). This database covers Europe, Africa, the Mediterranean Basin, the Atlantic Ocean and part of the Indian Ocean with a spatial resolution of approximately 5 km (see Fig. 1) at a fifteen minutes temporal resolution. The MSG data are received in real time from Eumetsat and processed overnight.

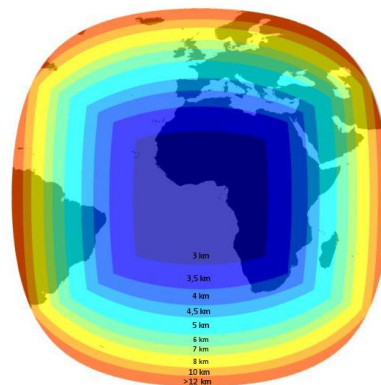


Fig. 1: Spatial coverage and resolution of HelioClim3 solar resource database

The ground stations used for the HC3 calibration over the PACA region are displayed on Fig. 2. They consist in twenty-nine ground stations from Météo France (MF, blue markers) and three Rotating Shadowband Pyranometers (RSP, red squares) dedicated to the project. The blue triangles identify the MF stations located in mountainous areas, i.e. the MF stations affected by the shadowing effect of the horizon. To make the HC3 data and the ground station measurements comparable, mountainous ground station data have been specifically processed to take into account the horizon effect in the calibration procedure.

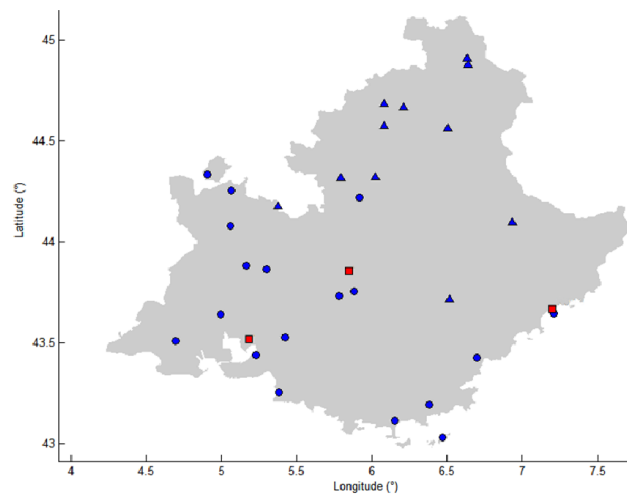


Fig. 2: Location in the PACA region of the twenty-nine meteorological stations from Météo France (blue circles and triangles) and of the three RSP stations (in red). Blue triangles correspond to meteorological stations in mountainous areas.

The three RSP stations were expressly rent for the duration of the project, to the company CSP Service, a spin-off of the German national centre for aeronautics and space (DLR). They provide global and diffuse irradiation on the horizontal plane with a 10 minutes sampling, as well as the ambient temperature and the relative humidity. The RSP systems return accurate values and are very robust with respect to dust and misalignments (Geuder *et al.* 2003).

Most stations of the MF network only provide GHI. In the zone of interest, only the station of Carpentras, which also belongs to the high quality ground station network Baseline Surface Radiation Network (BSRN, [www.bsrn.avi.de](http://www.bsrn.avi.de)) network, also returns DHI and BNI values (Ohmura *et al.* 1998). The dedicated RSP stations deliver complete GHI, DHI and BNI information; please note that this last is computed and not directly measured like the other two components.

The calibration was performed on the data reduced to a daily basis. This avoids the need to take into account the numerous missing hourly values in the MF data, as well as the potential time shift which we noticed in the past. These imperfections are smoothed out with the daily time step. Only full day of data have been considered in the evaluation and calibration protocols.

The data quality control described in Geiger *et al.* (2002) and Long and Shi (2006) has been applied to the data from all the stations. Also an analysis of the distribution of missing data in the period from 2004 to 2010 has been done in order to exclude stations that do not have in this period a sufficient number of daily observations for statistical studies. After these procedures, twenty MF stations were deemed of satisfying quality, and were used for the project with the three RSP stations.

First of all, a method for the parametric correction of the HC3 data was determined. The parameters of the calibration have been estimated at each exact location of the stations. Then, next step consisted in propagating these limited number of discrete correction parameters to whole area of the PACA region (Baillargeon 2005, Wahba *et al.* 1990). After several tests, the thin plate interpolation method (Xia *et al.* 2000) turned out to return the most appropriate maps of correction parameters to be directly applied on the HC3 irradiation maps.

### 3. Horizon

The spatial resolution enhancement is obtained exploiting two HC3 intra-pixel effects induced by the relief, the optical depth variations of the atmosphere and the shadowing effect from the far horizon (Dozier and Frew 1990, Pavlis *et al.* 2006.). The DEM used for this spatial resolution improvement is SRTM (Farr *et al.* 2007), with 100 m of spatial resolution and a localization accuracy better than 10 m.

Abdel Wahab *et al.* (2008) show that the irradiation values can be modulated by the optical depth variations of the atmosphere. For instance, at the summit of a mountain, the atmospheric thickness is smaller than at the bottom of a valley. As the atmosphere thins, more radiation reaches the ground. Consequently, the intra pixel radiation value can be multiplied by a coefficient which is a function of the altitude.

But the main influence of orography on the different radiation components is the shadowing effect produced by the horizon at a given geographical location. Fig. 3 depicts an example of the orographic horizon (black area) and the different trajectories of the sun along the year (yellow lines) in clear sky conditions. In the first and last hours of the days, the sun is occulted by the surrounding hills and mountains.

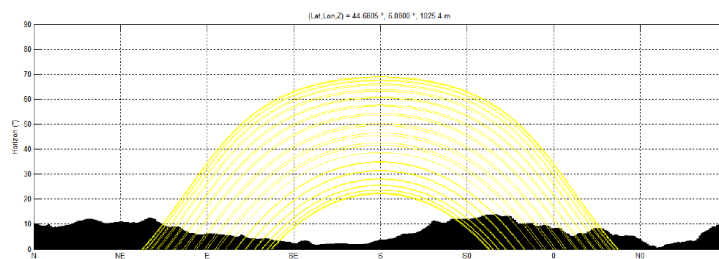


Fig. 3: Example of horizon (black area) computed from the DEM SRTM at the location (44.6805°N, 6.08°E). The daily trajectories of the sun are represented in yellow (three trajectories per month along the year). The x axis is the azimuth orientation, beginning from the North. The y axis is the elevation angle, in degrees.

To achieve this purpose, the different components of the intra-pixel radiation have been modulated using the models proposed by Ruiz-Arias (2009). Beside an isotropic model for the DHI and the “on/off” behaviour of the Beam Horizontal Irradiation (BHI) component when the sun is masked behind the horizon, this publication has investigated the impact of the circumsolar ring of the sun during daytime into the diffuse component.

### 4. Results

The methodology for the atlas creation can be summarized into the following steps:

- Calibration of HC3 with the 20 MF ground stations which passed the quality check procedure and the 3 RSP stations,
- Improvement of spatial resolution of HC3 by the use of the SRTM model,
- Decomposition of this corrected GHI into BNI and DHI (based on the algorithms of ESRA 2000, Ruiz-Arias *et al.* 2010, Perez *et al.* 1990 and 1992).

The results are maps of the annual and monthly values for the three solar irradiation components with a spatial resolution of 250 m over the PACA region. These maps are available for horizontal incidence of the solar components as well as for incidence on normal and tilted planes. Fig. 4 and 5 are two examples of yearly sums of GHI and BNI respectively.



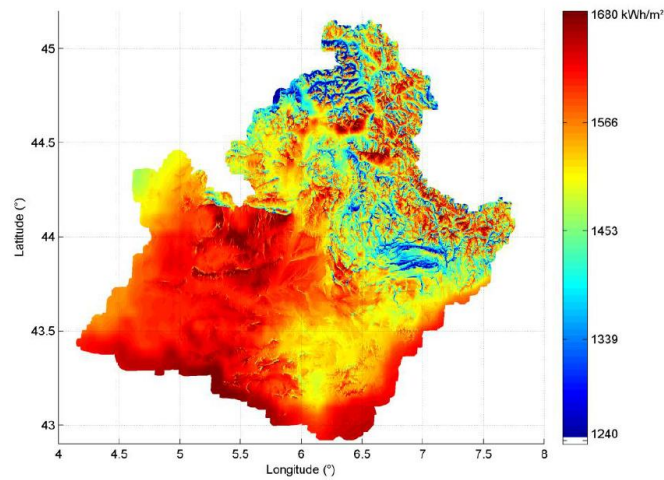


Fig. 4: Map of yearly average sum of global horizontal irradiation (GHI, kWh/m<sup>2</sup>). The period for the average is from 2004 to 2010.

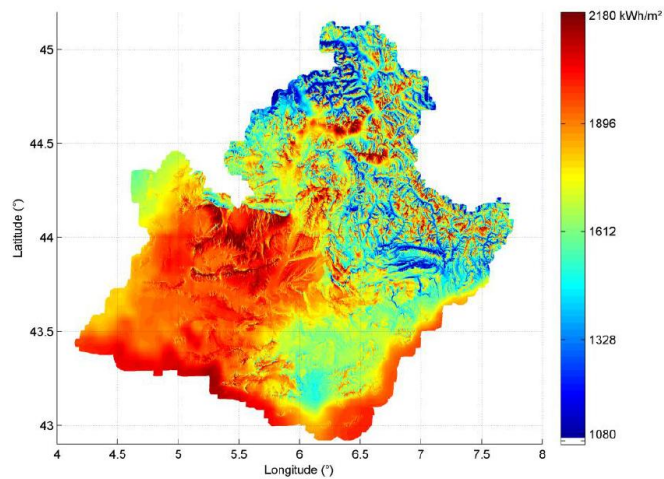


Fig 5: Map of yearly average sum of direct normal irradiation (BNI, kWh/m<sup>2</sup>). The period for the average is from 2004 to 2010.

## 5. Validation and estimation of the uncertainty of the solar atlas

The uncertainties of the monthly sums of GHI provided by the solar atlas have been assessed in two ways:

- The statistical analysis, before and after the calibration procedure, of the residual discrepancies of the estimation of the monthly sums of GHI with respect to the twenty MF meteorological ground stations. In addition, as all these stations have been used for the calibration, a statistical analysis based on the Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) approach (Arlot and Celisse, 2010) was also made.
- The statistical analysis, before and after the calibration procedure, of the residual discrepancies of the estimation of the monthly sums of GHI with respect the three RSP stations considered as test stations because they have not been used for the calibration.

The statistical measures of the discrepancy of a time series of irradiation with respect to a reference are the mean bias error (MBE), the mean absolute error (MAE), the root mean square error (RMSE) and the



correlation coefficient (CC). Apart from the last one, these measures are relative to the mean value of the reference time series (MREF) and are expressed in percentage. NDATA corresponds to the number of data that have been used for the comparison.

Fig. 6 represents graphically these statistical results before any calibration or orographic effect correction of HC3 at all the ground stations locations over the PACA region.

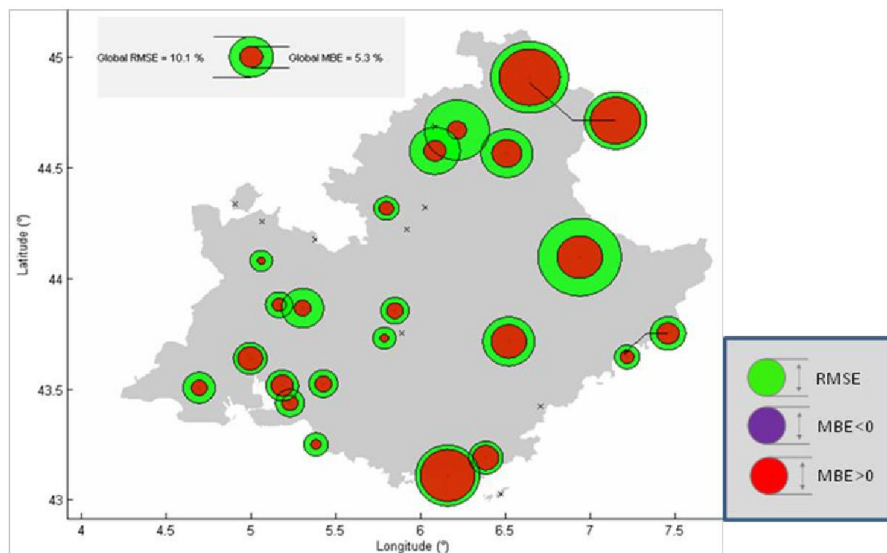


Fig. 6: Graphical representation of the monthly GHI estimation errors between HC3 and the ground station measurements before the calibration of HC3 and before the correction from orographic effects. When a couple of stations is too close to each other for this representation of errors, they are connected by a line. This is the reason why one station of each couple is represented outside the PACA region. The black crosses represent the MF stations not used for the atlas.

Table 1 gives the summarization of all the statistical results for the comparison between the ground stations and HC3 before any calibration or correction from orographic effects.

	NDATA	MREF	MBE	MAE	RMSE	CC
<b>Monthly sums of GHI (Ref.: MF stations)</b>	1269 months	132.2 kWh/m <sup>2</sup>	5.3 %	7.5 %	10.1 %	0.992

Table 1: Results of the statistical analyses of the monthly GHI estimation error between HC3 and the ground station measurements before the calibration of HC3 and the correction from the orographic effects.

Table 2 gives the results of these statistical analyses between the ground stations and HC3 after calibration and correction from orographic effects. The statistical comparisons with the MF stations without and with the LOOCV approach and with the RSP stations are corroborating each other. The MBE of the estimation of monthly sums of GHI is less than 1 % and its RMSE is close to 5 % (i.e. ~ 7 kWh/m<sup>2</sup>). It is important to note that these values are an average over the region. For mountainous areas, the RMSE is around 6 % (with almost no bias) whereas for non mountainous areas, the value is around 3.5 %.

	NDATA	MREF	MBE	MAE	RMSE	CC
<b>Monthly sums of GHI (Ref.: MF stations)</b>	1269 months	132 kWh/m <sup>2</sup>	-0.2 %	3.1 %	4.3 %	0.996
<b>Monthly sums of GHI (LOOCV - Ref.: MF stations)</b>	1267 months	132 kWh/m <sup>2</sup>	-0.7 %	4.4 %	6.2 %	0.991
<b>Monthly sums of GHI (Test: 3 RSP stations)</b>	38 months	126 kWh/m <sup>2</sup>	0.4 %	2.5 %	3.1 %	0.998

Table 2: Results of the statistical analyses for the uncertainty of the monthly sums of GHI provided by the solar atlas.

Fig. 7 represents graphically these statistical results after calibration and orographic effects correction of HC3 at all the ground stations locations over the PACA region.

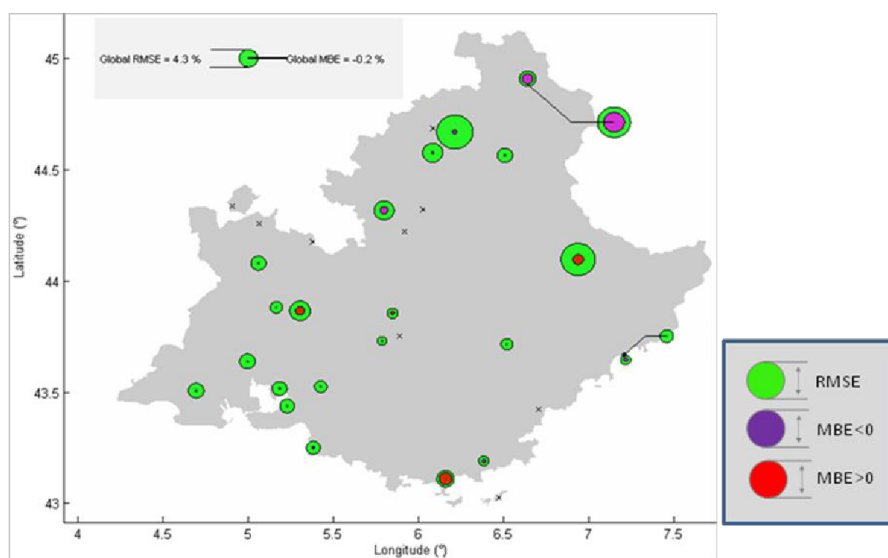


Fig. 7: Graphical representation of the monthly GHI estimation error between the calibrated and corrected (from orographic effects) HC3 and the ground stations measurements. When a couple of stations are too close to each other for this representation of errors, they are connected by a line. This is the reason why one station of each couple is represented outside the PACA region. The black crosses represent the MF stations not used for the atlas.

We have also analyzed the quality of the monthly HC3 BNI values after the calibration and orography corrections. For the estimation of monthly sums of BNI, the statistical analysis was based on the comparisons with the only MF station providing BNI measurements (Carpentras) and the three RSP stations. Table 3 gives the results of this analysis. Although the mean bias error is still lower than 1 %, the RMSE for the BNI estimation is around 8 % (i.e. ~12.5 kWh/m<sup>2</sup>) and is greater than for the GHI estimation.

	NDATA	MREF	MBE	MAE	RMSE	CC
<b>Monthly sums of DNI (1 MF stations and 3 RSP stations)</b>	112 months	156 kWh/m <sup>2</sup>	0.9 %	6.3 %	7.9 %	0.977

Table 3: Results of the statistical analyses for the uncertainty of the monthly sums of DNI provided by the solar atlas.

## 6. Conclusion, dissemination and perspectives

A new solar atlas over the French region of Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) has been presented. It is based on the satellite-derived solar database Helioclim-3 (HC3) calibrated with ground stations. The spatial resolution has been increased from 5 km to 250 m using the DEM SRTM (Farr *et al.*, 2007). This enhancement has been achieved taking into account the variation of the incident solar irradiation, inside of each of the HC3 pixels, in two ways: considering the fraction of the sky hidden by the orographic horizon as well as the effect of optical path length variation due to terrain elevation.

The solar atlas PACA is freely available at [www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr). It provides yearly averaged irradiation maps for the GHI, DHI and BNI solar components, as well as their monthly variation for all the period of HC3 (2004-2010). The availability of this different irradiation information as well as the spatial and temporal resolution of the atlas is suitable as a help in choosing the location, the calculation of profitability or the sizing of photovoltaic or thermodynamic solar power systems.

The regional organizations and councils which funded the project believe that the local atlas represents an efficient promotion tool for alternative electricity generation and for help in decision making. It enables a better prediction to control the introduction of renewable energies in the local grid.

The uncertainty of the atlas has been established by a direct statistical analysis with a set of reference ground stations as well as by cross-validation error estimation. The RMSE of monthly irradiation estimation is about 5 % (i.e.  $\sim 7 \text{ kWh/m}^2$ ) for the global irradiation on horizontal plane, without significant bias error. The RMSE of monthly direct normal irradiation is about 8 % (i.e.  $\sim 12.5 \text{ kWh/m}^2$ ).

The developed web map service of the atlas is coherent with the Open Geospatial Consortium (OGC) conventions, and is available at [www.webservice-energy.org/mapserv/atlas\\_paca\\_v1.0\\_beta](http://www.webservice-energy.org/mapserv/atlas_paca_v1.0_beta). A non-exhaustive list of clients for visualization and exploitation can be composed of Google Earth (WMS implementation), Web GIS clients (GEO-portal and the GIS of the French department of ecology CARMEN), GIS software (e.g. the freeware Quantum-GIS).

Further actions to disseminate and extend the basis of the current work have already started.

- In the European FP7 funded ENDORSE project ([www.endorse-fp7.eu](http://www.endorse-fp7.eu)) the PACA Solar Atlas will be improved and disseminated further as a downstream service, paving the way to extend this concept to other regions in Europe. In particular, the atlas will be enriched with more information layers like the minimum/maximum temperatures, the maximum of the monthly wind speed, the distances to the nearest electricity grid line, ...
- In the German Federal Ministry for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety under the International Climate Initiative funded SolarMedAtlas project ([www.solar-med-atlas.com](http://www.solar-med-atlas.com)), an atlas covering the countries located on the south of the Mediterranean sea will be made available to facilitate the development of solar energy projects in this region.

The lack of availability of ground station GHI data in some regions is currently an issue to extend this Solar Atlas concept in all the zones with high solar potential. This issue is even more acute for the measure of BNI. To overcome these limitations and lighten the need for ground station calibration, models to obtain irradiation from satellite images need to be improved.

## 7. References

- Arlot, S., A. Celisse, 2010. A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys*, 4: 40–79.
- Baillargeon, S., 2005. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de M.Sc. de l'Université de Laval. 137 pages.
- Dozier, J., J. Frew. 1990. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28: 963-969.

- Farr, T. G., et al., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Geiger, M., L. Diabaté, L. Ménard, L. Wald, 2002. A Web service for controlling the quality of global solar irradiation. *Solar Energy*, 73, 6, 475-48.
- Geuder, N., F. Trieb, C. Schillings, R. Meyer, V. Quaschnig, 2003. Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. In proceedings of the 3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, 19th-21st of February 2003, Torremolinos, Spain. 9 pages.
- Long, C.N., Y. Shi, 2006. The QCRad Value Added Product: Surface Radiation Measurement Quality Control Testing, Including Climatologically Configurable Limits. Atmospheric Radiation Measurement Program Technical Report, ARM TR-074, 69 pages.
- Ohmura, A., H. Gilgen, H. Hegner, G. Müller, M. Wild, E. G. Dutton, B. Forgan, C. Fröhlich, R. Philipona, A. Heimo, G. König-Langlo, B. McArthur, R. Pinker, C. H. Whitlock, K. Dehne, 1998. Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2115-2136.
- Pavlis, N.K., J. K. Factor, S. A. Holmes, 2006. Terrain-Related Gravimetric Quantities Computed for the Next EGM. In: proceedings of IGFS 2006, Istanbul, Turkey.
- Perez, R., P. Ineichen, E.L. Maxwell, R. Seals, A. Zelenka, 1992. Dynamic global to direct irradiance conversion model. *ASHRAE Transactions Research Series*, 354-369.
- Perez, R., P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, 1990. Modelling daylight availability and irradiance components. *Solar Energy*, 44: 271-289.
- Rigollier, C., M. Lefèvre, L. Wald, 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation data from satellite images. *Solar Energy*, 77(2), 159-169.
- Ruiz-Arias, J. A., 2009. Modelization of the terrain's morphology influence on the solar radiation field at the Earth's surface. Doctoral thesis. University of Jaén. April 2009. 202 pages.
- Ruiz-Arias, J.A., H. Alsamamra, J. Tovar-Pescador, D. Pozo-Vázquez, 2010. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 51: 881–893.
- The European Solar Radiation Atlas. 2000. Database and exploitation software. Coordinators : K. Scharmer, J. Greif. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. Vol. 2, 296 pages.
- Wahab, A. M., M. El-Metwally, R. Hassan, M. Lefèvre, A. Oumbe, L. Wald, 2008. Assessing surface solar irradiance in Northern Africa desert climate and its long-term variations from Meteosat images. *International Journal of Remote Sensing*, 31(01), 261 – 280.
- Wahba G, 1990. Spline models for observational data, In the CBMS-NSF Regional. Conference Series in applied mathematics, Philadelphia, Pennsylvania USA, 59, XII, 169.
- Xia, Y., M. Winterhalter, P. Fabian. 2000. Interpolation of Daily Global Solar Radiation with Thin Plate Smoothing Splines. *Theory of Applied Climatology*, 66: 109-115.