



HAL
open science

Caractérisation des campagnes de mesures pour l'étalonnage de l'irradiation globale horizontale de la base de données satellitales HelioClim-3

Christophe Vernay

► **To cite this version:**

Christophe Vernay. Caractérisation des campagnes de mesures pour l'étalonnage de l'irradiation globale horizontale de la base de données satellitales HelioClim-3. 2011. <hal-00678399>

HAL Id: hal-00678399

<https://hal.science/hal-00678399v1>

Submitted on 12 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

MASTERE spécialisé

**Energies Renouvelables &
leurs Systèmes de Production**



**Caractérisation des campagnes de
mesures pour l'étalonnage de l'irradiation
globale horizontale de la base de données
satellitaires HelioClim-3**



Institut Ensam de Corse

Maison du Parc technologique
20601 BASTIA
Tel : 04 95 30 96 34
Fax : 04 95 30 96 35

TUTEUR ENTREPRISE : Sébastien PITAVAL

NOM ELEVE MASTERE : Christophe VERNAY

Année : 2010-2011

Auteur : VERNAY Christophe

Titre : Caractérisation des campagnes de mesures pour l'étalonnage de l'irradiation globale horizontale de la base de données satellitales HelioClim-3

Encadrement du travail : PITAVAL Sébastien

Partenaire du travail : MINES ParisTech / ARMINES (Centre Énergétique et Procédés)

76 pages, 9 références bibliographiques

Résumé : Les bases de données satellitales sont une source fiable pour l'estimation de l'irradiation globale horizontale (GHI) lorsqu'aucune station sol n'est suffisamment proche du site étudié. Néanmoins, les variabilités interannuelles et inter-sites ne sont pas négligeables pour une même base de données. Ce document se concentre sur la base de données HelioClim-3 (HC3) construite depuis 2004 à partir du traitement des images du satellite Meteosat Second Generation par la méthode Heliosat-2. L'erreur faite par HC3 sur l'indice de clarté (et donc le GHI) est caractérisée à l'aide des mesures de 9 stations sol situées en zone non montagneuse de la Région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA). Il en découle un algorithme d'étalonnage validé sur ces 9 sites, à partir d'un jeu important de mesures, permettant la caractérisation des campagnes de mesures (période, durée) ainsi que l'évaluation des performances attendues.

Abstract: Satellite databases are a performing way to assess the global horizontal irradiation (GHI) when a ground station is not in the near vicinity of the site. However, the inter-annual and inter-site variabilities are not negligible for a same database. This paper focuses on HelioClim-3 (HC3) database which has been constructed since 2004 through the processing of Meteosat Second Generation satellite images by the Heliosat-2 method. The error made by the HC3 estimation on the clearness index (and thus on GHI) is characterized using the ground measurements of 9 non-mountainous stations in Provence Alpes Côte d'Azur (PACA) Region. This leads to a calibration procedure which is validated for these 9 sites using a large set of measurements. This validation allows characterizing measurement campaigns (period, duration) and assessing the expected performances.

Mots clés : irradiation solaire ; base de données satellitales ; HelioClim-3 ; irradiation globale horizontale ; indice de clarté ; incertitudes ; étalonnage ; campagne de mesures locales.

Keywords: solar radiation; satellite-based database; HelioClim-3; global horizontal irradiation; clearness index; uncertainties; calibration; local measurement campaign.

Partie à remplir par le responsable du projet		
<i>Accessibilité du rapport (entourer la mention correcte)</i>		
LIBRE	CONFIDENTIEL	pendant ___ an(s)
Date	Nom du signataire	Signature

1. REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toute l'équipe de SOLAÏS pour leur chaleureux accueil et leur bonne humeur. Premier enseignement : toujours verrouiller sa session avant de s'absenter du bureau... C'est avec grand plaisir que je rejoins officiellement l'équipe pour des journées professionnellement, humainement et naturellement ensoleillées. Tlib' !!

Mes remerciements traversent également les rues de Sophia Antipolis pour parvenir à l'École des Mines. Un grand merci à Philippe BLANC pour m'avoir si gentiment et si efficacement transféré une (infime) partie de ses connaissances.

« Integrity underpins everything » était un article de la charte d'un précédent employeur. J'ai trouvé au sein de SOLAÏS et de l'École des Mines son application au quotidien.

Un énorme merci enfin à Christine qui, en plus d'avoir fait autant l'essuie-glace à St Germain et survécu à la relecture de ce document, m'a toujours encouragé lors de ces 3 dernières années de reconversion professionnelle.

2. TABLE DES MATIERES

1.	Remerciements.....	3
2.	Table des matières.....	4
3.	Table des figures et tableaux.....	5
4.	Acteurs.....	8
4.1.	SOLAÏS.....	8
4.2.	MINES ParisTech - ARMINES	9
5.	Problématique des projets PV	10
5.1.	Convention	10
5.2.	Prédiction sur le productible	10
5.3.	Objectifs de la thèse professionnelle	12
6.	Différentes sources sur l'estimation de l'irradiation	14
7.	Comparaison de series de données.....	20
7.1.	Rappels de statistiques.....	20
7.2.	Protocole standard	21
8.	Base de données satellitales HelioClim-3	23
8.1.	Présentation	23
8.2.	Performances de la base de données HC3 en Région PACA	24
9.	Caractérisation de l'estimation de l'indice de clarté	29
9.1.	Réponse spectrale	29
9.2.	Phasage de la sinusoïde.....	33
10.	Étalonnage des zones non montagneuses de PACA	36
10.1.	Principe d'étalonnage.....	36
10.2.	Détail des étalonnages considérés	38
10.3.	Résultats de l'étalonnage sur les 9 stations MF	39
10.4.	Caractéristiques de l'étalonnage « sinus ».....	40
10.5.	Caractérisation de la campagne de mesures	42
10.6.	Saisonnalité des performances	48
10.7.	Caractérisation de la convergence de l'étalonnage	49
10.8.	Sensibilité de l'étalonnage au site étudié.....	51
10.9.	Sensibilité aux conditions de ciel clair	52
10.10.	Sensibilité à la connaissance du phasage de la sinusoïde	52
10.11.	Sensibilité au masque lointain.....	54
10.12.	Sensibilité à un biais initial élevé.....	55
10.13.	Sensibilité à la région.....	57
11.	Conclusions.....	59
11.1.	Résultats	59
11.2.	Limitations des travaux	59
11.3.	Now what ?.....	60
12.	Bibliographie.....	61
13.	Acronymes.....	62
14.	ANNEXES.....	63
14.1.	Résultats de l'étalonnage « sinus » en zone non montagneuse	63

3. TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

<i>Figure 1 : Exemple de diagramme des pertes pour un système PV.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 2 : Impact de l'incertitude du productible sur le prix de revient et le tarif de vente de l'électricité.</i>	<i>12</i>
<i>Figure 3 : Localisation des 327 stations MF de la Métropole mesurant le GHI.</i>	<i>16</i>
<i>Figure 4 : Distribution de la distance géodésique minimale des stations météorologiques de France Métropolitaine.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 5 : Distribution de la distance effective minimale des stations météorologiques de France Métropolitaine.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 6 : Moyenne relative de l'erreur en % de l'irradiance globale horizontale estimée par 6 sources satellitales sur un ensemble de 20 sites étudiés.</i>	<i>18</i>
<i>Figure 7 : Représentation graphique d'une loi normale pour laquelle chaque bande colorée a la largeur d'un écart-type.</i>	<i>20</i>
<i>Figure 8 : Evolution temporelle des 2 séries de données d'irradiation.</i>	<i>21</i>
<i>Figure 9 : Distribution des 2 séries de données d'irradiation.</i>	<i>21</i>
<i>Figure 10 : Satellite Météosat-8, premier exemplaire de la série MSG.</i>	<i>23</i>
<i>Figure 11 : Exemple d'image Météosat prise le 7 septembre 2010 à 12:00 (Temps Universel).</i>	<i>23</i>
<i>Figure 12 : Résolution spatiale des images satellitales de Météosat Seconde Génération (MSG).</i>	<i>24</i>
<i>Figure 13 : Localisation des 9 stations MF en zone non montagneuse sélectionnées pour la Région PACA.</i>	<i>25</i>
<i>Figure 14 : Evolution temporelle de l'erreur faite sur l'indice de clarté pour la station de BORMES et VINON. En rouge figure une allure sinusoïdale ; en cyan figure la régression linéaire.</i>	<i>30</i>
<i>Figure 15 : Transformée de Fourier de l'erreur faite sur l'indice de clarté, sans traitement de la dérive.</i>	<i>31</i>
<i>Figure 16 : Transformée de Fourier de l'erreur faite sur l'indice de clarté, une fois la dérive supprimée.</i>	<i>31</i>
<i>Figure 17 : Evolution de la période correspondant au pic principal pour chacune des 9 stations MF en fonction de la durée des échantillons (une couleur par station).</i>	<i>32</i>
<i>Figure 18 : Phasage de l'erreur pour la fréquence F_0</i>	<i>33</i>
<i>Figure 19 : Evolution du phasage de la sinusoïde relativement au 31 décembre 2005 en fonction du nombre de données traitées par l'algorithme d'étalonnage.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 20 : Principe d'étalonnage des 7 années de données HC3.</i>	<i>36</i>
<i>Figure 21 : Principe de simulation de campagnes de mesures à partir de données concomitantes MF et HC3.</i>	<i>37</i>
<i>Figure 22 : Evolution des performances de l'étalonnage « sinus », en termes de MBE, pour des campagnes de mesures effectuées à AIX, débutées en janvier 2005 (vert) et janvier 2006 (rouge). ...</i>	<i>41</i>
<i>Figure 23 : Evolution des performances de l'étalonnage « sinus », en termes de MBE, pour des campagnes de mesures débutées en janvier 2004 à BORMES (en rouge) et à CARPENTRAS (en bleu).</i>	<i>42</i>
<i>Figure 24 : Performance des régressions « basique », « sinus » et « sinus+cosinus » pour la station CARPENTRAS.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 25 : Performance saisonnière du MBE pour la régression « sinus » et pour l'ensemble des 9 stations MF de la zone non montagneuse.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 26 : Evolution du MBE obtenu pour des campagnes de mesures débutant en février 2004 pour la station MF AIX.</i>	<i>46</i>
<i>Figure 27 : Performance saisonnière du RMSE mensuel pour la régression « sinus » et pour l'ensemble des 9 stations MF de la zone non montagneuse.</i>	<i>47</i>
<i>Figure 28 : Exemple d'une distribution de mesures de l'indice de clarté sur une campagne de mesures de 6 mois.</i>	<i>48</i>

Figure 29 : Corrélation pour le site de CARPENTRAS entre la distribution des mesures de l'indice de clarté et les performances de la régression « sinus » pour une campagne de mesures de durée égale à 4 mois.	49
Figure 30 : Distribution de la dérivée de l'écart-type des trois coefficients γ (constante, proportionnel et sinus).	50
Figure 31 : Distribution de la dérivée de l'écart-type du coefficient γ_{SINUS} et de la dérivée du MBE (en valeur absolue), exprimées en % par jour de mesure supplémentaire.....	51
Figure 32 : Performance saisonnière du MBE pour la régression « sinus+cosinus » et pour l'ensemble des 9 stations MF de la zone non montagneuse.	53
Figure 33 : Horizon lointain pour les 9 stations MF en zone non montagneuse ainsi que la station LARAGNE en zone montagneuse (rouge).	54
Figure 34 : Masque lointain (en rouge) et course du soleil (en bleu) pour la station LARAGNE.....	54
Figure 35 : Evolution saisonnière de la norme de l'écart-type des coefficients γ pour les 9 stations MF en zone non montagneuse ainsi que la station LARAGNE en zone montagneuse (rouge).....	55
Figure 36 : Performance saisonnière du MBE pour la régression « sinus » de la station HYERES-PLAGE présentant un biais initial de 13.1 %.	56
Figure 37 : Analyse temporelle et fréquentielle de l'erreur sur l'indice de clarté pour le site de LA ROCHE SUR YON.	57
Figure 38 : Performance saisonnière du MBE pour la régression « sinus » du site LA ROCHE SUR YON.	58
Figure 39 : MBE après étalonnage « sinus » - AIX	63
Figure 40 : MBE après étalonnage « sinus » - ARLES.....	64
Figure 41 : MBE après étalonnage « sinus » - BORMES.....	64
Figure 42 : MBE après étalonnage « sinus » - CABRIERES.	65
Figure 43 : MBE après étalonnage « sinus » - CARPENTRAS.	65
Figure 44 : MBE après étalonnage « sinus » - MARIGNANE.	66
Figure 45 : MBE après étalonnage « sinus » - MARSEILLE.....	66
Figure 46 : MBE après étalonnage « sinus » - NICE.	67
Figure 47 : MBE après étalonnage « sinus » - VINON.....	67
Figure 48 : MBE après étalonnage « sinus » - AIX.	68
Figure 49 : MBE après étalonnage « sinus » - ARLES.....	69
Figure 50 : MBE après étalonnage « sinus » - BORMES.	70
Figure 51 : MBE après étalonnage « sinus » - CABRIERES.....	71
Figure 52 : MBE après étalonnage « sinus » - CARPENTRAS.....	72
Figure 53 : MBE après étalonnage « sinus » - MARIGNANE.....	73
Figure 54 : MBE après étalonnage « sinus » - MARSEILLE.	74
Figure 55 : MBE après étalonnage « sinus » - NICE.....	75
Figure 56 : MBE après étalonnage « sinus » - VINON.	76

<i>Tableau 1 : Spécifications de bases de données issues de stations météorologiques au sol.</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 2 : Spécifications de bases de données issues d'images satellitales.</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 3 : Spécifications de bases de données hybrides.</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 4 : Abréviations et termes relatifs aux bilans d'erreur entre deux séries temporelles.</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 5 : Bilan d'erreur pour l'exemple du site MERCUROL.</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 6 : Caractéristiques des 9 stations MF de la Région PACA en zone non montagneuse.</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 7 : Performances journalières et mensuelles des stations MF de la Région PACA en zone non montagneuse.</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 8 : Performances mensuelles des stations MF de la Région PACA en zone montagneuse.</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 9 : Phasage à l'hiver 2005-2006 pour chaque station MF du minimum de la sinusoïde de fréquence principale.</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 10 : Performances journalières des étalonnages « basique » et « sinus » pour les 9 stations MF de la zone non montagneuse.</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 11 : Performances mensuelles des étalonnages « basique » et « sinus » pour les 9 stations MF de la zone non montagneuse.</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 12 : Définition des 3 zones de caractérisation du type de ciel.</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 13 : Performances initiales journalières et mensuelles de la station MF HYERES-PLAGE.</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 14 : Caractéristiques de la station de LA ROCHE SUR YON, en dehors de la Région PACA.</i>	<i>57</i>

4. ACTEURS

Cette thèse professionnelle s'inscrit dans l'effort de SOLAÏS d'améliorer son expertise sur l'estimation de l'irradiation et d'apporter de la plus-value à la filière photovoltaïque (PV), au travers d'une étroite collaboration avec le Centre Energétique et Procédés (CEP) de MINES ParisTech / ARMINES.

Ce chapitre présente les 2 acteurs du projet.

4.1. SOLAÏS

SOLAÏS est un cabinet d'ingénierie et de conseil photovoltaïque indépendant, positionné sur le marché des professionnels, industriels et collectivités territoriales, depuis plus de trois ans.

SOLAÏS conseille et accompagne ses clients sur l'ensemble des problématiques (techniques, économiques, financières, assurantielles, juridiques, fiscales...) pour assurer la conduite, l'aboutissement et le suivi de leurs projets photovoltaïques.

La volonté de SOLAÏS est d'apporter une approche pragmatique et personnalisée dans le développement et la gestion de chaque projet photovoltaïque.

Ce positionnement de spécialiste permet à SOLAÏS :

- D'intervenir de bout en bout sur un projet : de l'étude de faisabilité jusqu'à l'assistance à maîtrise d'ouvrage.
- D'assurer le suivi des centrales photovoltaïques grâce à une solution de monitoring indépendante et compatible avec l'ensemble des onduleurs présents sur le marché.
- De répondre à des problématiques spécifiques : études de réverbération, expertise judiciaire, due diligence, réception, ...

SOLAÏS est installé à Sophia Antipolis.

SOLAÏS est certifié en ingénierie photovoltaïque par l'organisme OPQIBI depuis le 1er juin 2009, garantie de son savoir-faire reconnu auprès de ses clients existants :



SOLAÏS est membre du pôle de compétitivité CAPENERGIES :

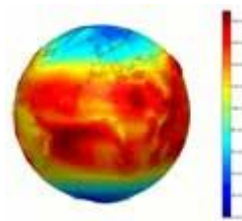


4.2. MINES PARISTECH - ARMINES

Le Centre Energétique et Procédés (CEP), créé en 1976, est un centre de recherche commun MINES ParisTech / ARMINES qui se situe parmi les principaux acteurs de la recherche française sur l'efficacité énergétique et les filières énergétiques du futur. Il compte aujourd'hui environ 160 personnes et plus d'une centaine d'étudiants, répartis sur quatre implantations géographiques : Paris, Palaiseau, Fontainebleau et Sophia Antipolis.

Le CEP développe des compétences dans de nombreux domaines utiles à l'étude de la transformation de la matière et de l'énergie. Dans un contexte d'épuisement des réserves naturelles de combustibles fossiles, il s'intéresse aux systèmes énergétiques complexes, notamment en régimes variés, et à la maîtrise de leurs émissions. Cette diversité thématique permet au Centre d'assurer ses missions de Formation, de Recherche, et de diffusion des développements technologiques les plus récents vers tous les secteurs d'activité.

A Sophia Antipolis, le CEP compte une soixantaine de personnes et une trentaine d'étudiants. Sur ce site, les activités sont organisées autour de 4 groupes de Recherche, dont le groupe OMD (Observation, Modélisation, Décision) spécialisé dans l'observation de la Terre depuis l'espace et la compréhension des processus intervenant dans la formation du signal, depuis son émission à la surface jusqu'au niveau du capteur.



MINES ParisTech / ARMINES a développé en collaboration avec plusieurs partenaires européens la méthode Heliosat-2 laquelle réunit un modèle de calcul du rayonnement par ciel clair ainsi qu'un modèle d'extinction du rayonnement obtenu dû à la présence de nuage. Considérée comme l'une des plus performantes parmi les différentes méthodes utilisant des images du spectre visible des satellites météorologiques, cette méthode est le miroir de l'expertise de MINES ParisTech / ARMINES sur la connaissance de l'irradiation solaire.

5. PROBLEMATIQUE DES PROJETS PV

5.1. CONVENTION

Afin d'éviter toute confusion lors de la lecture de ce document, l'usage des 2 termes suivants est clarifié :

- Irradiance : puissance du rayonnement solaire par unité de surface, exprimée en $[W/m^2]$.
- Irradiation : énergie du rayonnement solaire par unité de surface, *i.e.* l'intégrale de l'irradiance, exprimée en $[Wh/m^2]$.

Le terme « irradiation » sera utilisé pour traiter indépendamment de la puissance ou de l'énergie.

5.2. PREDICTION SUR LE PRODUCTIBLE

Le montage technico-économique des projets PV est basé sur l'estimation de l'énergie électrique annuelle, ou productible, exprimée en $[kWh/an]$, qui sera injectée dans le réseau de distribution et donc rémunérée lors des N années d'exploitation du système PV. Cette estimation prend en compte les 2 aspects suivants :

- La prédiction de l'irradiation globale dans le plan des modules, exprimée en $[kWh/(m^2.an)]$, attendue sur le site et par nature indépendante du système considéré ;
- La modélisation des pertes inhérentes au système PV considéré, telles que la transposition dans le plan des capteurs, les ombrages, les pertes dues à la température, à l'encrassement, les pertes en lignes, l'efficacité des onduleurs... Ces performances propres au système se traduisent par l'indice de performance, ou Performance Ratio (PR).

La Figure 1 présente à titre d'exemple le diagramme des pertes d'un système PV existant afin d'illustrer ce cheminement : de l'irradiation dans le plan horizontal vers l'énergie électrique injectée dans le réseau de distribution.

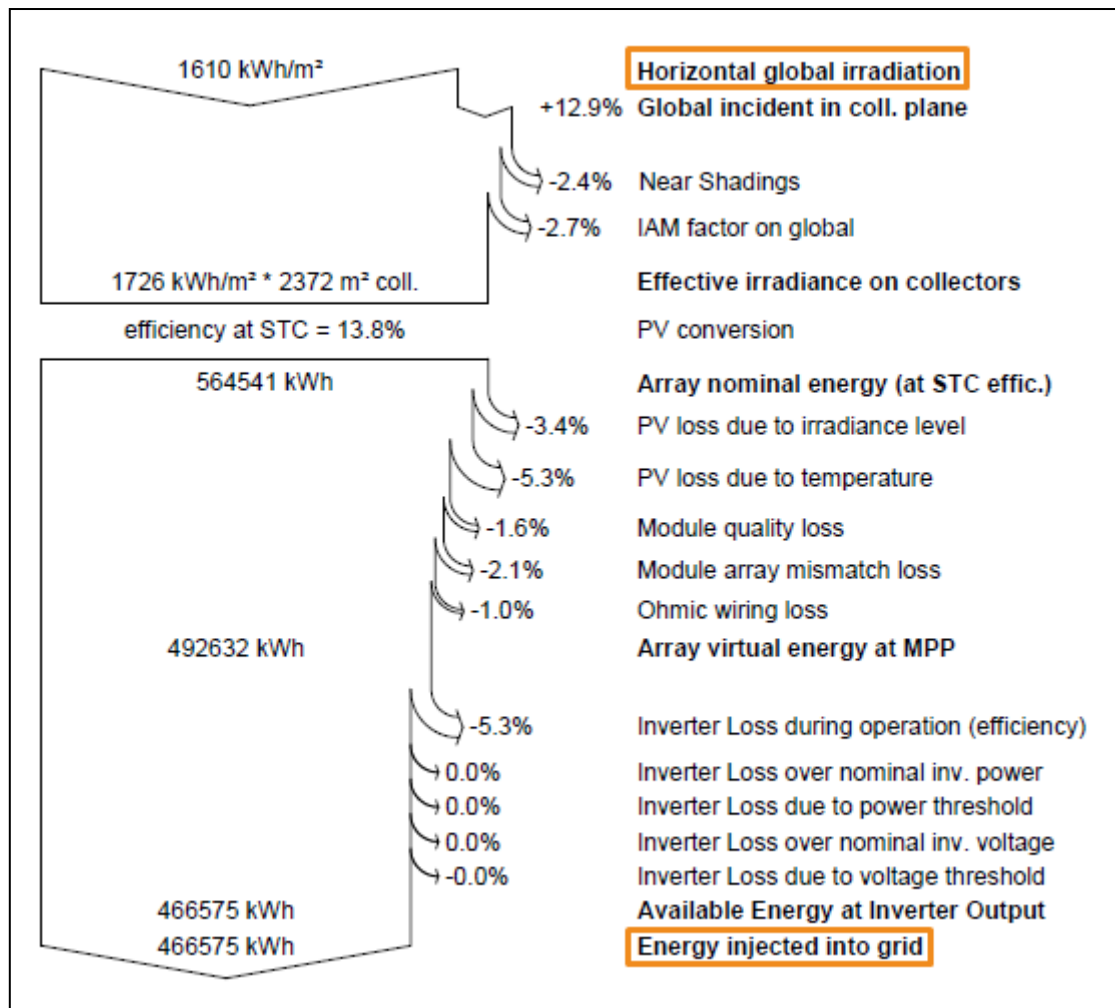


Figure 1 : Exemple de diagramme des pertes pour un système PV.

A chacun de ces postes est associée une incertitude dont l'impact global sur le long terme représentera soit une sous-estimation, soit une surestimation de la production finale d'électricité. Il est de l'intérêt des investisseurs, banquiers et assureurs de connaître au mieux la prédiction sur ce productible afin de consolider le modèle économique du projet PV.

La Figure 2 illustre ces propos à partir du modèle économique d'une centrale PV existante pour lequel a été déterminé l'impact de l'incertitude du productible sur les 2 tarifs unitaires suivants :

- Le prix de revient du kWh électrique qui prend en compte l'investissement initial ainsi que les coûts de maintenance ;
- Le tarif de vente de l'électricité permettant d'atteindre un même taux de rentabilité interne (TRI).

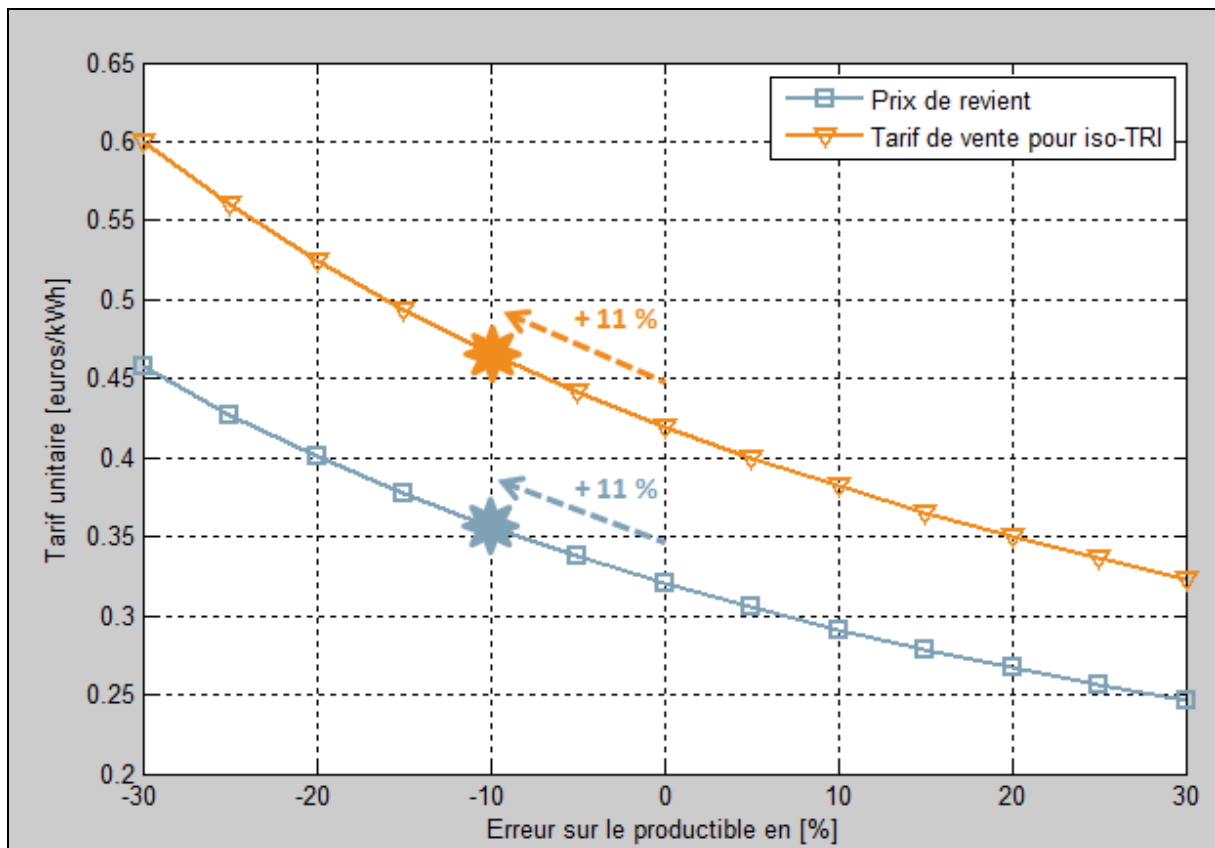


Figure 2 : Impact de l'incertitude du productible sur le prix de revient et le tarif de vente de l'électricité.

Nous constatons que pour ce projet, une erreur de -10 % sur l'estimation du productible (*i.e.* une surestimation de la production électrique due aux incertitudes évoquées précédemment) génère une hausse d'environ 11 % du prix de revient et du tarif de vente de l'électricité. L'exercice similaire montre que l'impact est également conséquent sur les différents temps de retour du projet et autres indicateurs économiques.

Affiner l'estimation du productible s'avère naturellement être un enjeu important pour le montage de projets PV complexes et coûteux, et ce d'autant plus que le contexte économique est tendu.

5.3. OBJECTIFS DE LA THESE PROFESSIONNELLE

Cette thèse professionnelle s'inscrit entièrement dans le projet de SOLAÏS portant sur le diagnostic de la ressource solaire locale. Ce projet a été initié par le constat que la décision de porter ou non un projet PV aux coûts très élevés repose en grande partie sur une estimation d'irradiation dont la fiabilité reste aujourd'hui encore incertaine (*cf.* chapitre 6).

Le projet de SOLAÏS repose sur la volonté de corréliser les représentativités spatiales et temporelles des mesures satellitaires avec la représentativité locale d'une station météorologique installée sur le site étudié.

Ce projet est ainsi composé des 2 volets suivants :

1. Un premier volet de Recherche scientifique visant à :
 - faire l'état de l'art sur l'estimation locale de l'irradiation pour les projets PV ;
 - caractériser la durée et le phasage des campagnes de mesure locale nécessaires au calibrage des bases de données satellitaires.
2. Un second volet industriel avec le prototypage d'une station sol pour l'application concrète des algorithmes précédemment déterminés.

La thèse professionnelle, dont les résultats sont présentés dans ce document, porte sur le premier volet, avec un focus sur l'irradiation globale horizontale (GHI) des zones non montagneuses de la Région PACA. L'étude sur l'irradiation diffuse fera l'objet de travaux ultérieurs.

Le chapitre 6 présente l'état de l'art sur l'estimation de l'irradiation : stations météorologiques (*e.g.* Météo France), bases de données satellitaires et bases de données hybrides.

Le chapitre 7 présente le protocole standard proposé par les professionnels de l'irradiation et utilisé dans nos travaux pour la comparaison de deux séries de données.

Le chapitre 8 présente la base de données satellitaires HelioClim-3 (HC3), utilisée par SOLAÏS, ainsi que les performances brutes de 9 sites localisés en zone non montagneuse de PACA.

Le chapitre 9 caractérise l'erreur faite par HC3, pour chacun de ces 9 sites, sur l'estimation journalière de l'indice de clarté (traduisant le GHI) permettant ainsi de déduire une expression analytique simplifiée de cette erreur.

La caractérisation étant faite, le chapitre 10 présente enfin l'algorithme proposé pour l'étalonnage des estimations HC3 à partir des campagnes de mesures ainsi que ses performances, lesquelles sont directement liées au phasage de la campagne (début et durée). Différentes études de sensibilité sont réalisées dans ce même chapitre.

6. DIFFERENTES SOURCES SUR L'ESTIMATION DE L'IRRADIATION

Il existe plusieurs bases de données météorologiques traitant de l'irradiation, comme l'ont présenté les récents travaux de l'Université de Kessel, en Allemagne [BIBLIO1] dont sont tirés les tableaux ci-après.

Ces bases de données diffèrent par la nature de la mesure disponible, la zone géographique couverte, la méthode, la période de mesure disponible, la résolution temporelle et spatiale. Elles peuvent se répartir en 2 catégories :

- Bases de données issue d'un réseau de stations météorologiques au sol disposant d'instruments mesurant tout ou partie de l'irradiation globale et/ou directe et/ou diffuse (cf. Tableau 1) ;
- Bases de données issues du traitement des images satellitaires (cf. Tableau 2).

	Région	Nombre de stations	Période
World Radiation Data Center (WRDC)	Monde	1195	1964-2004 (irrégulier)
Global Energy Balance Archive (GEBA)	Monde	1600	Irrégulier
Baseline Surface Radiation Network (BSRN)	Monde	46	≥ 1994 Irrégulier
International Daylight Measurement Program (IDMP)	Monde	48	≥ 1990 Irrégulier
Meteo France (MF)	France métropolitaine	327	Irrégulier

Tableau 1 : Spécifications de bases de données issues de stations météorologiques au sol.

	Région	Source	Période	Résolution spatiale
SSE rel. 6 (NASA)	Monde	GEWEX / SRB 3	1983-2005	100 x 100 km
HelioClim – 1 (Mines-ParisTech)	Europe, Afrique	Meteosat 2..5	1985-2005	20 x 20 km
HelioClim – 3 (Mines-ParisTech)	Europe, Afrique	Meteosat 8, 9	≥ 2004	5 x 5 km
Satel-light (ENTPE)	Europe	Meteosat 5..7	1996 – 2000	5 x 7 km
3TIER	Europe, Afrique, Asia	Meteosat 5, 7, 9 GOES, GMS	1999-2009	3 x 3 km
SOLEMI (DLR)	Europe, Afrique, Asia	Meteosat 5, 7	1991-2005 1999-2006	2,5 x 2,5 km
EnMetSol (University of Oldenburg)	Europe, Afrique	Meteosat	≥ 1995	(3 x 7) km (1 x 3) km
Focus Solar	Europe, Afrique, Etats-Unis, Mexique, Asie, Australie	Meteosat 9, GOES, MTSAT	2005-2009 1998-2008 2007-2008	2 x 2 km
SolarGIS		Meteosat 9	≥ 2004	5 x 5 km

Tableau 2 : Spécifications de bases de données issues d'images satellitaires.

Face à la multiplicité de ces bases de données, la première question venant à l'esprit est de savoir quelle est la source d'information la plus fiable.

« La littérature scientifique spécifie que les images prises par les satellites géostationnaires sont une source fiable pour obtenir des données d'irradiance solaire avec une couverture spatiale quasi continue. [...] Il est préférable de se fier à une carte d'ensoleillement provenant d'une évaluation faite à partir de données satellitaires que d'une interpolation entre les stations, lorsque la distance entre ces dernières excède 20 à 25 km. » [BIBLIO2] et [BIBLIO3].

Dans le cas de projets PV en France métropolitaine, l'utilisation systématique des stations Météo France (MF) est délicate dans la mesure où les 327 stations MF mesurant le GHI (cf. Figure 3) sont distantes « géodésiquement » parlant en moyenne de 24 km avec un maximum de 60 km (cf. Figure 4). La valeur de l'irradiation étant fortement liée à l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire, il est important de considérer la différence d'altitude entre les 2 sites à comparer, pour ainsi déterminer une distance « effective » [BIBLIO4]. Ces mêmes 327 stations MF sont alors « effectivement » distantes en moyenne de 46 km avec un maximum de 355 km (cf. Figure 5).

Ce faible maillage confirme, pour la Métropole, la nécessité d'exploiter une base de données satellitaires d'autant plus que les stations sols ont l'inconvénient d'être fortement tributaires du bon entretien et de la fréquente calibration des instruments de mesures.

SOLAÏS a pris le parti d'utiliser la base de données HelioClim-3 (en orange dans le Tableau 2) qui, en plus d'une bonne résolution spatiale, présente l'avantage de s'enrichir au fil des jours et de proposer

dès à présent plus de 7 années de mesures de l'irradiation. Le chapitre 8 présente cette base de données.



Figure 3 : Localisation des 327 stations MF de la Métropole mesurant le GHI.

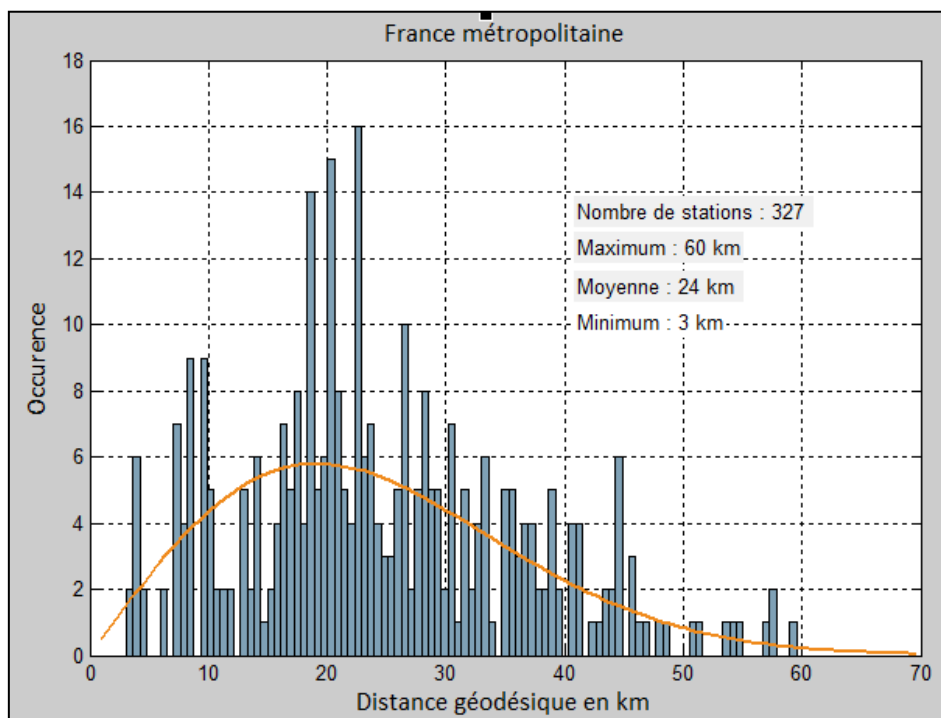


Figure 4 : Distribution de la distance géodésique minimale des stations météorologiques de France Métropolitaine.

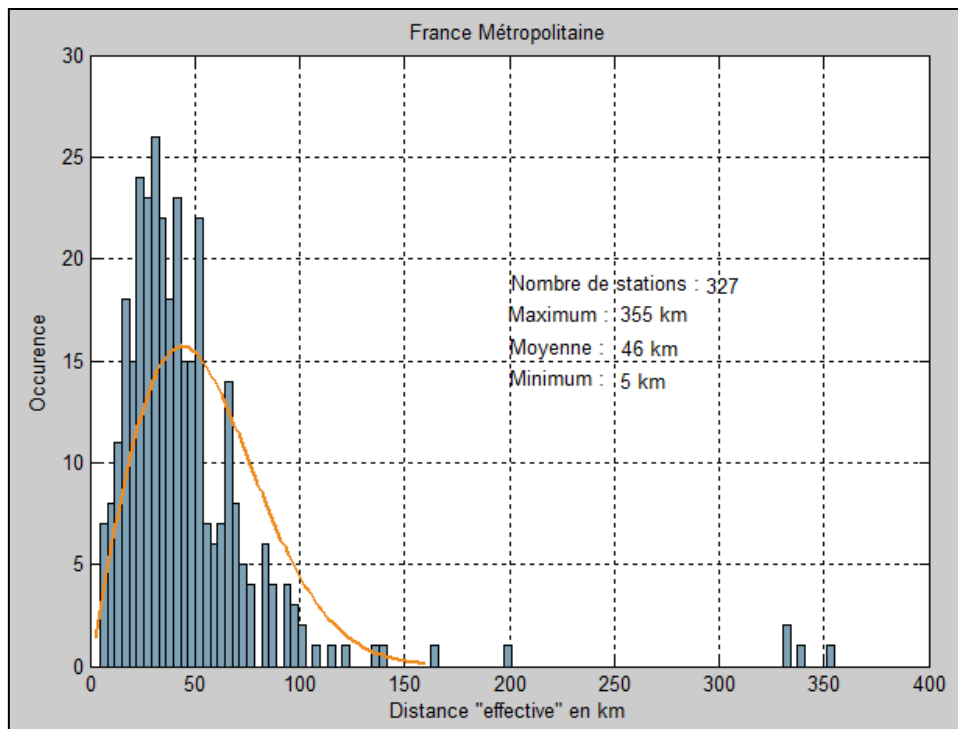


Figure 5 : Distribution de la distance effective minimale des stations météorologiques de France Métropolitaine.

Des études ont été réalisées afin d'évaluer et comparer les différentes bases de données satellitales présentées dans le Tableau 2. Les travaux de P. Ineichen [BIBLIO5] montrent qu'il est possible de dégager de bonnes indications sans toutefois pouvoir dresser des conclusions générales. Ainsi, sur plus de 20 sites de référence localisés à différentes latitudes et pour lesquels étaient disponibles des mesures d'irradiation, les travaux montrent que :

- la cause principale de l'écart observé vient de la modélisation de l'épaisseur optique de l'atmosphère, *i.e.* le degré de transparence du milieu traversé par le rayonnement ;
- en moyenne, l'erreur faite sur l'estimation de l'irradiance est négligeable pour chacune des bases de données alors que l'écart-type peut descendre jusqu'à 16 % pour les meilleurs algorithmes.

Les indications plutôt satisfaisantes de ce dernier point sont à relativiser dans la mesure où :

- la pertinence de la comparaison dépend de la qualité de la donnée de référence, *i.e.* la mesure de la station sol, dont la calibration est une procédure toujours délicate.
- Les résultats sont propres aux sites et à la période sélectionnés (la variabilité interannuelle n'est ainsi pas prise en compte).
- Le détail des résultats pour 20 sites, présenté à la Figure 6, montre que le biais de l'erreur est très variable quelle que soit la base de données et est loin d'être nul : il n'est pas rare de le voir approcher les ± 4 % et peut dépasser les 10 % pour certains sites. Cette dernière variabilité met en exergue la caractéristique locale, microscopique, d'un site étudié pour lequel des mesures précises de l'irradiation ne sont généralement pas disponibles.

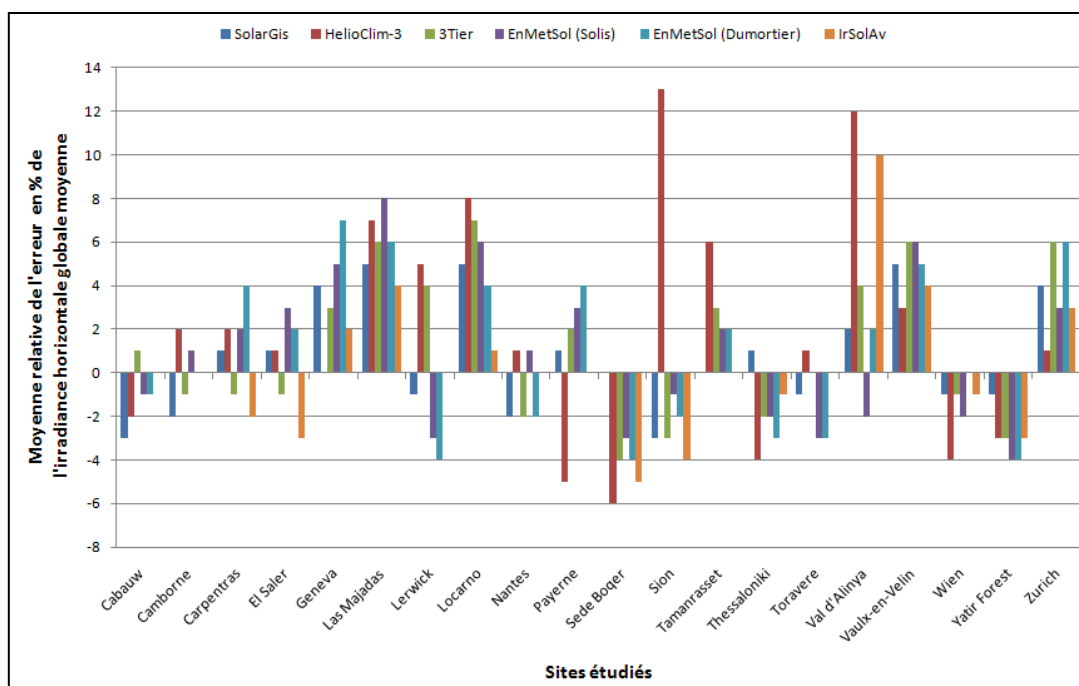


Figure 6 : Moyenne relative de l'erreur en % de l'irradiance globale horizontale estimée par 6 sources satellitaires sur un ensemble de 20 sites étudiés.

Il est ainsi difficile de comparer différentes bases de données satellitaires entre elles et de dresser des conclusions générales. Il est important de se concentrer sur l'une d'entre elles afin de s'efforcer de minimiser les erreurs faites sur l'estimation de l'irradiation.

Afin de terminer ce tour d'horizon des sources d'information sur l'irradiation, notons qu'il existe une troisième catégorie de bases de données, dite « hybrides », plus ou moins sophistiquées, utilisant la réanalyse des données des stations météorologiques et/ou des satellites (cf. Tableau 3).

	Région	Source	Période	Résolution spatiale
EMP Climate (Mines-ParisTech)	Monde	Données satellite et réanalyse	1990-2004	10 x 10 km
NCEP/NCAR (ESRL)	Monde	Réanalyse	≥ 1948	250 x 250 km
ERA – Interim (ECWMF)	Monde	Réanalyse	≥ 1989	80 x 80 km
Meteonorm 6.1 (Meteotest)	Monde	1422 stations météo et données satellite	1981-2000 Irrégulier	Interpolation
ESRA (Mines-ParisTech)	Europe	586 stations météo et données satellite	1981-1990	10 x 10 km
PVGIS (Joint Research Center)	Europe, Afrique	566 stations météo	1981-1990	1 x 1 km 2 x 2 km

Tableau 3 : Spécifications de bases de données hybrides.

La comparaison de 8 bases de données stations sols, satellites et hybrides faite par l'équipe ayant développé le logiciel PVsyst, sur un ensemble de 12 sites, ne permet pas non plus de déterminer

quelle est la source la plus représentative de la réalité. Ceci confirme la difficulté de l'exercice de comparaison, comme annoncé précédemment.

La publication de ces résultats est mise en ligne sur leur site Internet.

7. COMPARAISON DE SERIES DE DONNEES

7.1. RAPPELS DE STATISTIQUES

L'incertitude associée à une estimation est souvent exprimée en termes de biais ou Mean Bias Error (MBE), écart-type σ ou STandard Deviation Error (STDE) ainsi que Root Mean Square Error (RMSE), définis de la manière suivante :

$$\text{Équation 1 : } MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{est,i} - X_{mes,i})$$

$$\text{Équation 2 : } RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{est,i} - X_{mes,i})^2}$$

$$\text{Équation 3 : } RMSE^2 = MBE^2 + STDE^2$$

où :

- X est la grandeur physique à estimer ;
- Les indices *est* et *mes* font référence respectivement à l'estimation et à la mesure ;
- N est le nombre d'échantillons.

MBE, STDE et RMSE sont exprimés dans la même unité que la grandeur physique considérée ; ils sont néanmoins souvent exprimés en pourcentage de la valeur moyenne de référence.

L'écart-type σ (ou variance σ^2) représente l'incertitude « aléatoire » de l'estimation alors que le MBE représente l'erreur systématique de cette incertitude. Ainsi, l'agrégation mensuelle de données journalières permet de diminuer l'écart-type (l'aspect aléatoire étant lissé) alors que le MBE reste identique car propre à l'estimation.

La Figure 7 ci-dessous rappelle enfin, à titre d'information, une des propriétés de l'écart-type σ pour les lois normales : 68 % (respectivement 95 %) des échantillons sont contenus dans l'intervalle $\mu \pm 1\sigma$ (respectivement $\mu \pm 2\sigma$) où μ représente la valeur médiane.

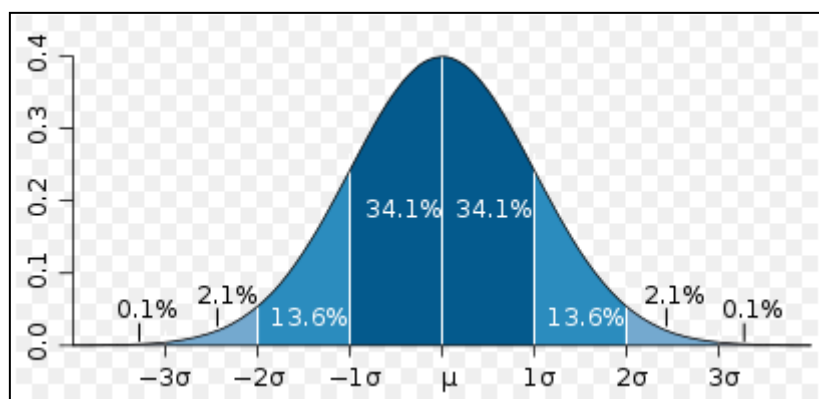


Figure 7 : Représentation graphique d'une loi normale pour laquelle chaque bande colorée a la largeur d'un écart-type.

7.2. PROTOCOLE STANDARD

Les travaux présentés dans la suite de ce document font largement appel à la comparaison de couples de séries concomitantes de données. L'exemple ci-après permet d'illustrer le protocole retenu pour effectuer une telle comparaison :

- Série 1 : le GHI mensuel mesuré par la station MF MERCUROL, dans la Drôme, à partir de février 2004 ;
- Série 2 : le GHI mensuel estimé par la base de données satellitales Helioclim-3 (HC3) pour ce même site et pendant cette même période.

Les Figure 8 et Figure 9 présentent respectivement l'évolution temporelle et la distribution de ces 2 séries de données, ce qui permet d'avoir une première idée de leur corrélation.

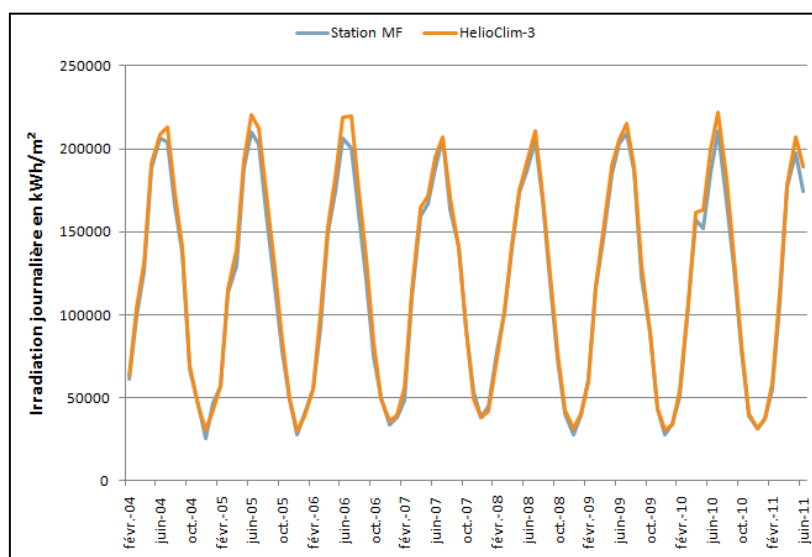


Figure 8 : Evolution temporelle des 2 séries de données d'irradiation.

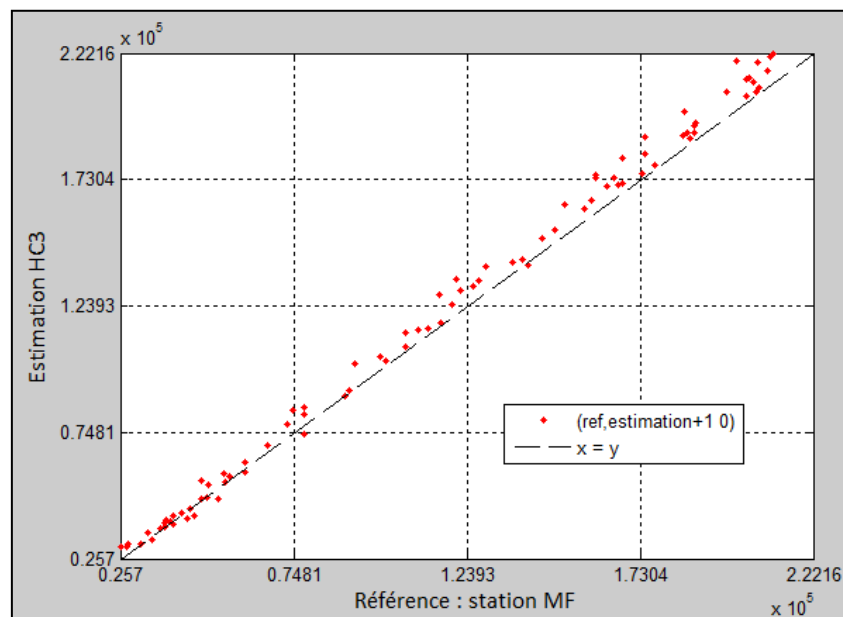


Figure 9 : Distribution des 2 séries de données d'irradiation.

Afin d'aller au-delà d'une simple comparaison visuelle, nous utilisons dans nos travaux le protocole standard d'estimation des erreurs entre deux séries temporelles, issu du projet européen MESoR (Management and Exploitation of Solar Resource knowledge), [BIBLIO6]. Ce protocole consiste à dresser le bilan d'erreur présenté dans le Tableau 4, et ce en considérant une des 2 séries comme étant la référence (en principe la mesure est considérée comme la référence).

NDATA		Nombre de données valides en commun utilisées pour le bilan d'erreur
MREF	Moyenne de REFérence	Moyenne de la série considérée comme la référence
MBE	Mean Bias Error	Moyenne relative de l'erreur exprimée en % par rapport à MREF
MAE	Mean Absolute Error	Moyenne relative de la valeur absolue de l'erreur exprimée en % par rapport à MREF
STDE	STandard Deviation Error	Ecart type relatif de l'erreur exprimée en % par rapport à MREF
RMSE	Root Mean Square Error	Erreur quadratique moyenne relative exprimée en % par rapport à MREF
CC		Coefficient de corrélation

Tableau 4 : Abréviations et termes relatifs aux bilans d'erreur entre deux séries temporelles.

Le bilan d'erreur pour l'exemple du site de MERCUROL, présenté dans le Tableau 5, permet de conclure sur une excellente corrélation des deux séries de données (CC=0.9981) ainsi qu'un biais et écart-type de l'ordre de 4 %.

NDATA	89 mois
MREF	116208 Wh/m ²
MBE	3.90 %
MAE	4.35 %
STD	4.11 %
RMSE	5.66 %
CC	0.9981

Tableau 5 : Bilan d'erreur pour l'exemple du site MERCUROL.

L'utilisation de ce protocole sera systématisée dans la suite de ce document.

8. BASE DE DONNEES SATELLITALES HELIOCLIM-3

8.1. PRESENTATION

La série des satellites géostationnaires Météosat, situés au dessus du Golfe de Guinée, délivre des vues synoptiques de l'Europe, de l'Afrique et de l'Océan Atlantique à des fins météorologiques. Initié par l'Agence Spatiale Européenne, ce programme est actuellement exploité par l'agence européenne Eumetsat et a pour mission principale d'améliorer les prévisions météorologiques quotidiennes et d'anticiper les phénomènes violents.

Meteosat Second Generation (MSG) est la seconde génération de ces satellites météorologiques et est en service depuis le 1^{er} février 2004, date à partir de laquelle sont acquises les images dans le visible nécessaires à la dérivation des informations d'irradiation.



Figure 10 : Satellite Météosat-8, premier exemplaire de la série MSG.

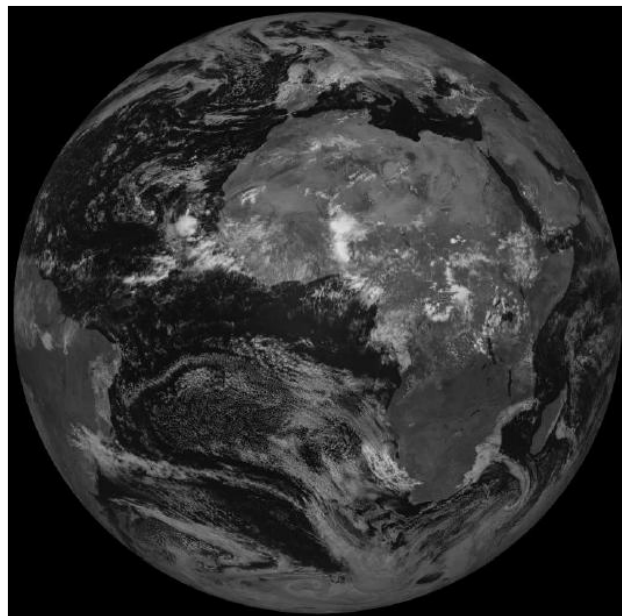


Figure 11 : Exemple d'image Meteosat prise le 7 septembre 2010 à 12:00 (Temps Universel).

La résolution spatiale de ces images satellitaires est de 3 km au nadir, *i.e.* à la verticale du satellite, et d'environ 5 km en Europe (*cf.* Figure 12).

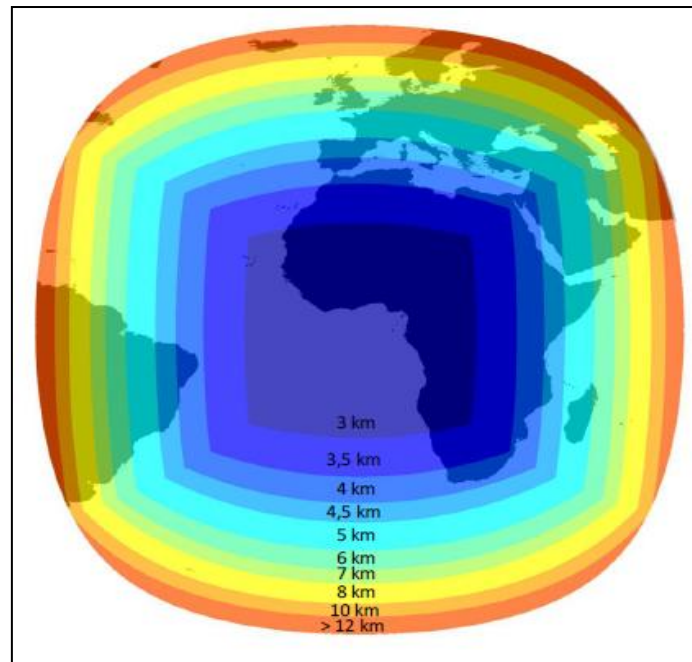


Figure 12 : Résolution spatiale des images satellitaires de Meteosat Seconde Génération (MSG).

Ces images sont traitées grâce à la méthode Heliosat-2 [BIBLIO7] qui déduit le rayonnement solaire à partir de la luminance perçue par le satellite. Cette méthode réunit un modèle de calcul du rayonnement par ciel clair en chaque point géographique et à tout moment, et un modèle d'extinction du rayonnement obtenu dû à la présence de nuage. Elle a été développée à MINES ParisTech en collaboration avec plusieurs partenaires européens et est considérée comme l'une des plus performantes parmi les différentes méthodes utilisant des images du spectre visible des satellites météorologiques.

La mise en œuvre de la méthode Heliosat-2 sur l'ensemble des données satellitaires Météosat est portée par le projet HelioClim [BIBLIO8], initiative de MINES ParisTech pour l'élaboration de la base de données d'irradiation à partir :

- des images de Meteosat First Generation (MFG) : base de données HelioClim-1 (HC1) pour la période 1985-2005 ;
- des images de Meteosat Second Generation (MSG) : base de données HelioClim-3 (HC3) à partir de février 2004.

Les données d'irradiation utilisées dans les travaux présentés dans les chapitres suivants sont issues de la base de données HC3.

8.2. PERFORMANCES DE LA BASE DE DONNEES HC3 EN REGION PACA

Les travaux de P. Ineichen [BIBLIO5] ont mis en avant la variabilité de la performance des bases de données satellitaires en fonction du site étudié et de la période considérée (cf. chapitre 6). Afin de resituer la problématique des présents travaux dans le contexte métropolitain, nous nous sommes concentrés sur la Région PACA pour laquelle de nombreuses données d'irradiation de stations MF sont disponibles sur la publithèque de Météo France. Ce « zoom » est d'autant plus pertinent qu'en Métropole, une grande partie des projets PV de forte puissance sont situés dans le Sud de la France où l'irradiance est meilleure et donc les projets plus attractifs.

Nous avons sélectionné 9 stations MF de PACA situées en zone non montagneuse pour lesquelles sont disponibles plus de 5 années de mesures d'irradiations journalières concomitantes des estimations HC3. Ces stations seront utilisées dans la suite des travaux pour la caractérisation des campagnes de mesures.

La Figure 13 localise ces stations MF sur une carte de la Région et le Tableau 6 présente leurs caractéristiques.

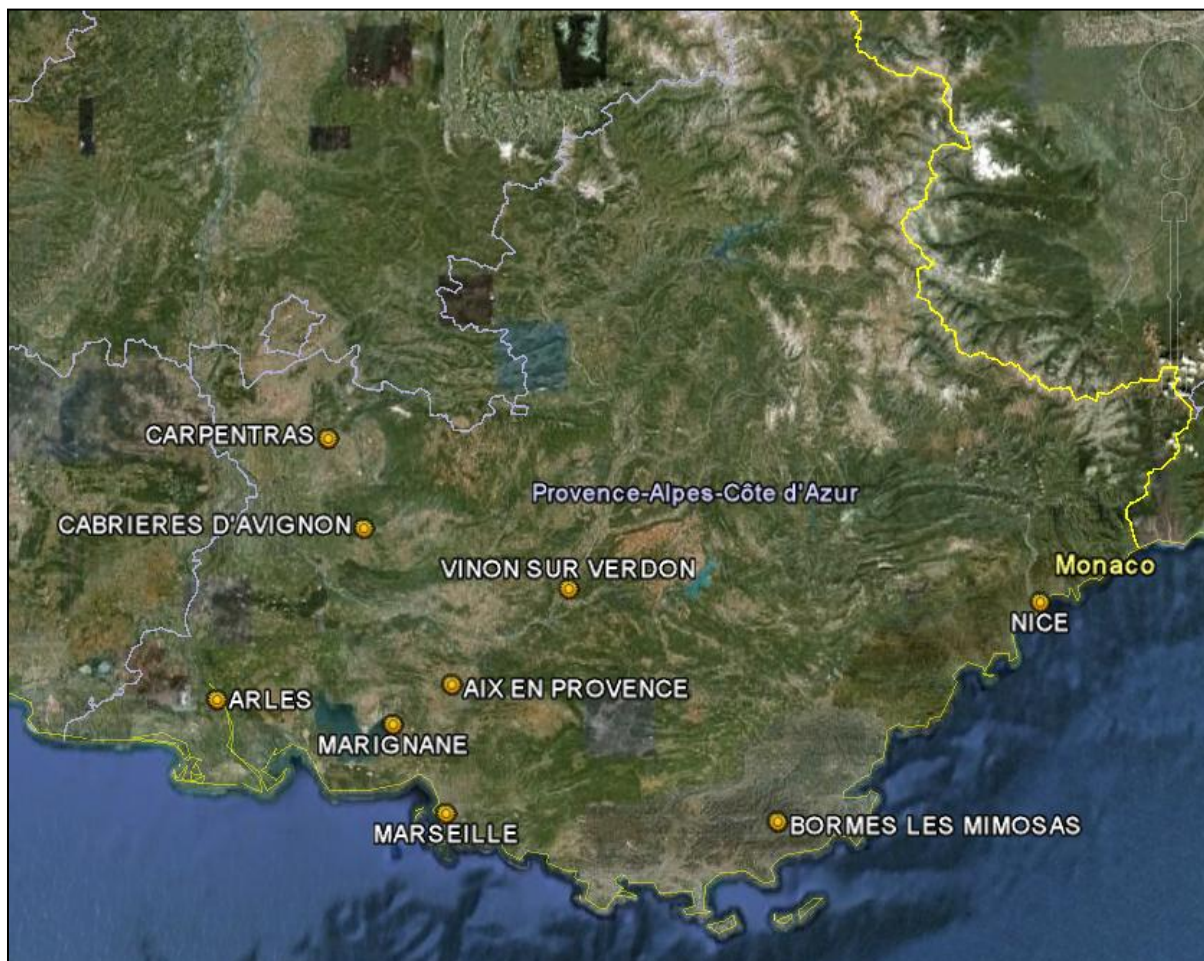


Figure 13 : Localisation des 9 stations MF en zone non montagneuse sélectionnées pour la Région PACA.

	Période concomitante	Nombre de données journalières	Longitude [° Est]	Latitude [° Nord]	Altitude [m]
AIX	1 ^{er} février 2004 au 31 juillet 2010	2354	5.4233	43.5283	173
ARLES		2350	4.6933	43.51	1
BORMES		2337	6.3783	43.195	88
CABRIERES		2356	5.1633	43.8833	142
CARPENTRAS		2357	5.0583	44.0817	99
MARIGNANE		2357	5.2267	43.4417	5
MARSEILLE		2345	5.38	43.255	5
NICE		2334	7.2083	43.6483	2
VINON	24 mars 2005 au 31 mars 2010	1808	5.7817	43.7333	271

Tableau 6 : Caractéristiques des 9 stations MF de la Région PACA en zone non montagneuse.

Pour chacun des 9 sites, les estimations journalières de l'irradiation fournies par HC3 sont confrontées aux mesures concomitantes effectuées par la station MF correspondante, en utilisant le protocole standard d'estimation des erreurs entre deux séries temporelles, décrit au chapitre 7.

Station MF	Données journalières					Données mensuelles				
	NDATA	MBE	STDEV	RMSE	CC	NDATA	MBE	STDEV	RMSE	CC
AIX	2354	4.0	9.9	10.7	0.9836	78	4.0	5.6	6.9	0.9977
ARLES	2350	3.8	10.4	11.1	0.9824	78	3.8	6.7	7.7	0.9965
BORMES	2337	6.2	11.0	12.6	0.9812	78	6.2	5.5	8.3	0.9978
CABRIERES	2356	3.4	10.7	11.2	0.9811	78	3.4	5.4	6.4	0.9973
CARPENTRAS	2357	1.8	10	10.2	0.9836	78	1.8	5.0	5.3	0.9975
MARIGNANE	2357	3.9	9.6	10.4	0.9844	78	3.9	5.7	6.9	0.9971
MARSEILLE	2345	2.4	9.6	9.9	0.9839	78	2.4	5.2	5.7	0.9973
NICE	2334	3.3	9.4	10.0	0.9853	78	3.3	4.9	5.9	0.9988
VINON	1808	1.8	10.7	10.8	0.9807	61	1.8	5.1	5.4	0.9975

Tableau 7 : Performances journalières et mensuelles des stations MF de la Région PACA en zone non montagneuse.

Il en ressort que les estimations journalières présentent un biais moyen compris entre 1.8 et 6.2 % alors que l'écart-type est compris entre 9.4 et 11 %. Le signe positif du biais observé sur chaque station indique que la base de données HC3 surestime systématiquement l'irradiation.

Le lissage de l'erreur à travers la concaténation des données journalières en données mensuelles présente le double intérêt de réduire l'écart-type, entre 4.9 et 6.7 %, et d'améliorer une corrélation déjà excellente. Le MBE reste intrinsèquement identique.

Gardons en tête que ces résultats dépendent fortement de la qualité de la mesure garantie par un entretien et une calibration efficace.

Ces performances corroborent les conclusions dressées au chapitre 5 : pour un site donné où les mesures locales de l'irradiation ne sont pas disponibles, son estimation est un exercice délicat qui n'aboutit pas systématiquement à des résultats satisfaisants pour des projets PV de forte puissance (e.g. MBE=6.2 % pour le site de BORMES). Il convient donc d'acquérir la spécificité locale du site pour enfin corriger les estimations satellitaires. Le chapitre suivant présente les travaux d'étalonnage à partir de campagnes de mesures.

A titre d'indication, le Tableau 8 présente les performances mensuelles de 6 stations MF de PACA situées en zone montagneuse.

Données mensuelles					
Station MF	NDA	MBE	STDEV	RMSE	CC
EMBRUN	78	7.0	9.9	12.1	0.9946
GAP	77	5.3	10.4	11.7	0.9924
LARAGNE	78	3.5	4.8	5.9	0.9970
ST JEAN ST NICOLAS	78	4.8	14.4	15.2	0.9775
PEONE	78	11.6	15.9	19.7	0.9766
COMPS ENTERRON	78	8.8	9.2	12.7	0.9946

Tableau 8 : Performances mensuelles des stations MF de la Région PACA en zone montagneuse.

Le MBE s'étale entre 3.5 % pour la meilleure estimation (LARAGNE) et 11.6 % pour la moins bonne (PEONE) alors que le RMSE est compris entre 5.9 et 19.7 %. Ces moins bonnes performances sont imputables aux masques lointains (*i.e.* l'ombre occasionnée par les reliefs lointains) que HC3 a du mal à prendre en compte.

9. CARACTERISATION DE L'ESTIMATION DE L'INDICE DE CLARTE

Les travaux réalisés sur l'Atlas Solaire PACA [BIBLIO9] mettent en avant l'indice de clarté défini comme le rapport entre l'irradiation horizontale globale au sol (GHI) et l'irradiation horizontale au sommet de l'atmosphère, Top Of Atmosphere (TOA) :

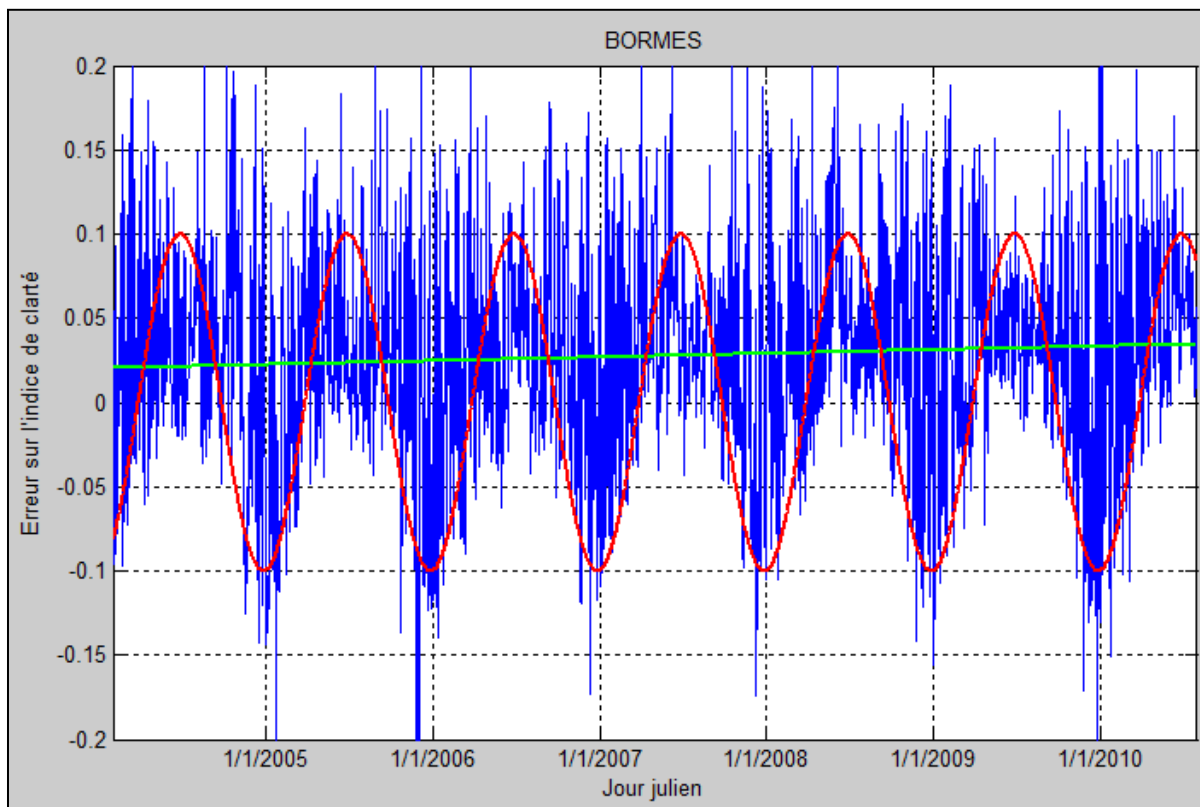
$$\text{Équation 4 : } \quad KT = \frac{GHI}{TOA}$$

TOA est une valeur déterministe, fonction uniquement du jour de l'année et de la latitude considérée. Travailler sur le KT revient ainsi à travailler sur le GHI, et vice-versa.

9.1. REPONSE SPECTRALE

La Figure 14 présente l'évolution temporelle, pour la durée maximale de concomitance, de l'erreur faite sur l'indice de clarté entre l'estimation HC3 et la mesure pour les stations MF de BORMES et VINON, soit :

$$\text{Équation 5 : } \quad \text{erreur} = (KT_{HC3} - KT_{MF})$$



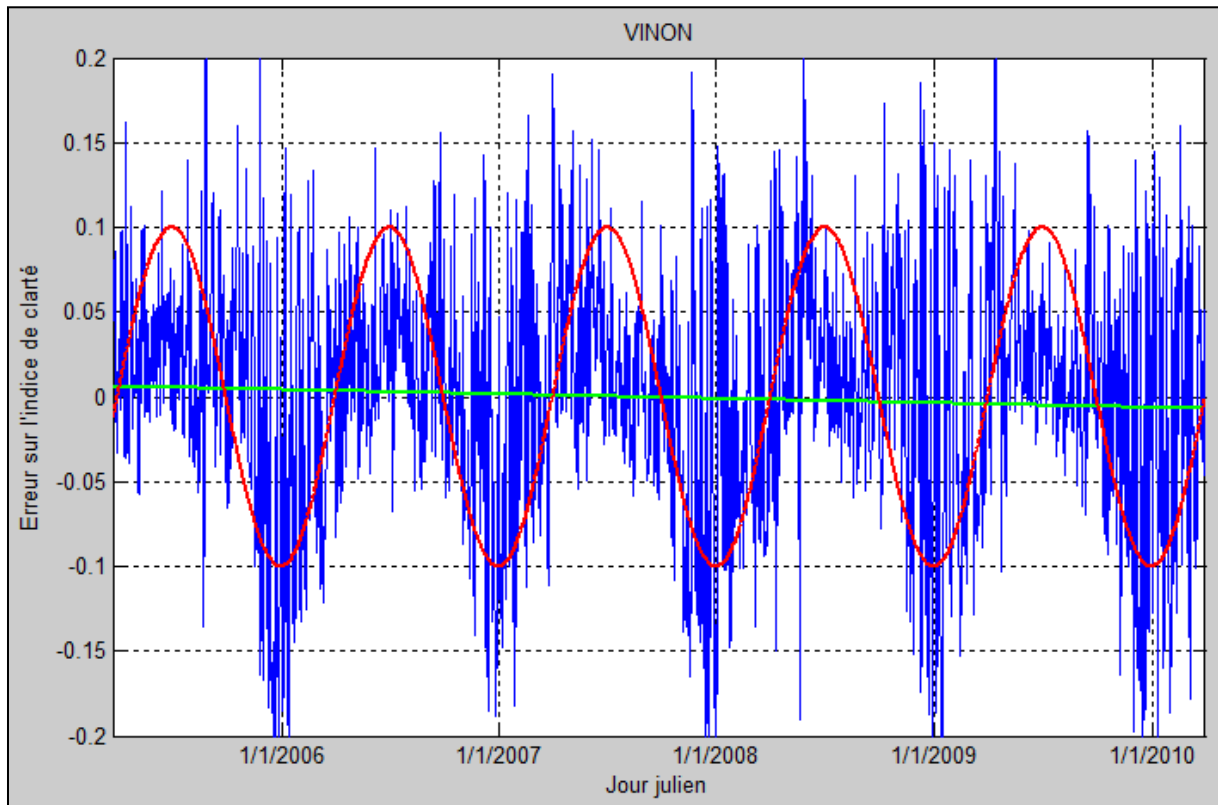


Figure 14 : Evolution temporelle de l'erreur faite sur l'indice de clarté pour la station de BORMES et VINON. En rouge figure une allure sinusoïdale ; en cyan figure la régression linéaire.

La régression linéaire de l'erreur, représentée en cyan sur la figure, montre que l'erreur dérive au fil des années, et ce de manière différente pour BORMES et VINON. Pour la première, la dérive est positive ; pour la seconde, elle est négative. Cette dérive est constatée pour l'ensemble des 9 stations MF. La fluctuation du signe ne permet pas de dresser de quelconque conclusion sur cette dérive.

Par ailleurs, nous constatons la répétition d'un motif faisant penser à une sinusoïde. La transformée de Fourier de cette erreur confirme la présence pour chacune des 9 stations MF d'une fréquence prédominante, comme le montre la Figure 15 ci-dessous.

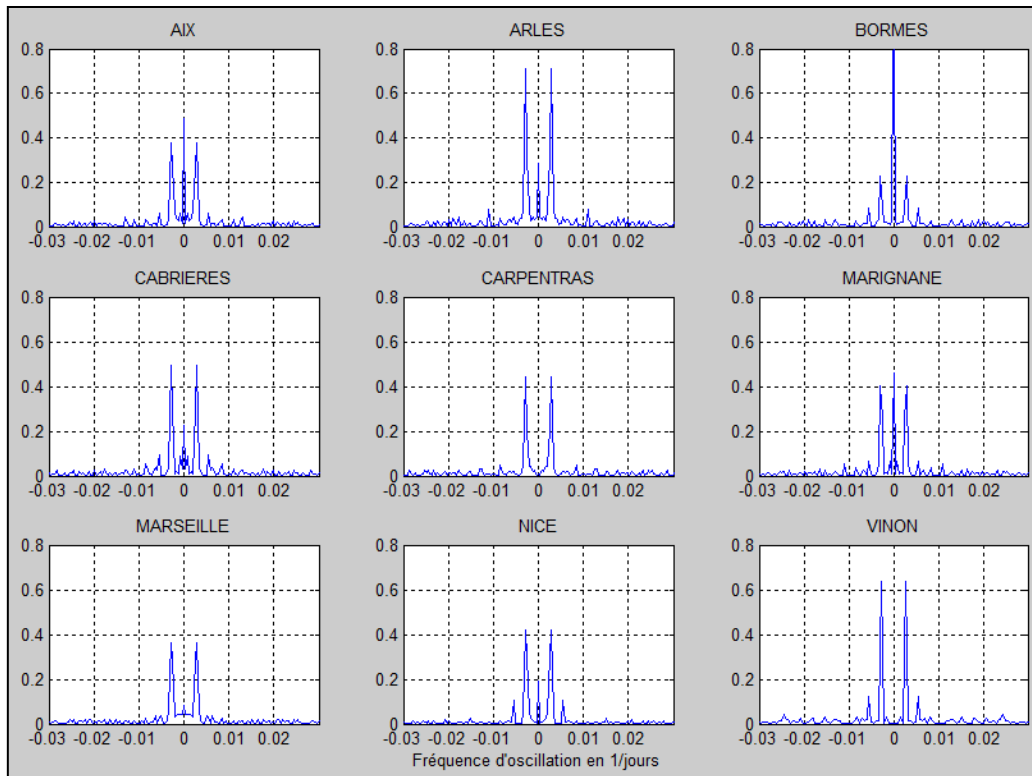


Figure 15 : Transformée de Fourier de l'erreur faite sur l'indice de clarté, sans traitement de la dérive.

Le pic central, lorsque présent, correspond à la dérive temporelle de l'erreur mentionnée précédemment et assimilée à une sinusoïde de période infinie (et donc de fréquence nulle). Cela est confirmé par la transformée de Fourier de l'erreur à laquelle a été supprimée la dérive, comme illustré sur la Figure 16.

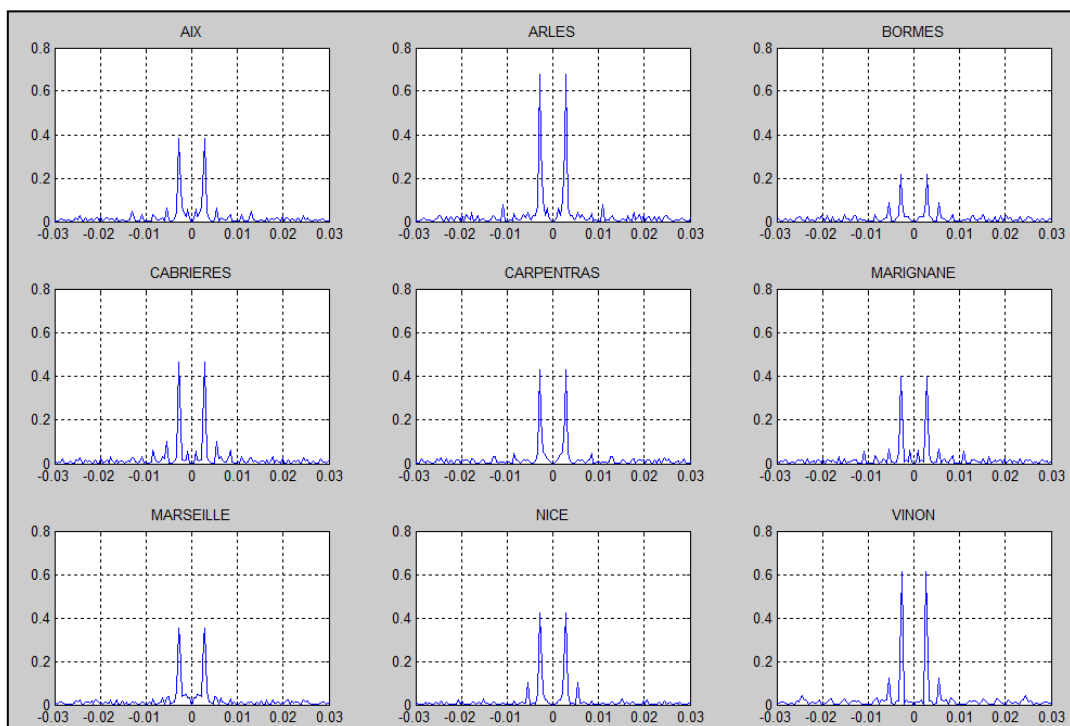


Figure 16 : Transformée de Fourier de l'erreur faite sur l'indice de clarté, une fois la dérive supprimée.

Cette dernière figure montre que toutes les stations MF présentent une fréquence principale égale à $0.002951 \text{ jours}^{-1}$, soit environ 339 jours, exception faite de VINON dont le pic principal correspond à une sinusoïde de période 367 jours. Ces résultats sont à mettre en regard de la durée des échantillons : entre 2334 et 2357 mesures journalières exception faite de VINON qui ne possède que 1808 données journalières concomitantes.

La représentativité des résultats des transformées de Fourier dépend ainsi fortement du nombre d'échantillons étudiés, comme le confirme la Figure 17 ci-après.

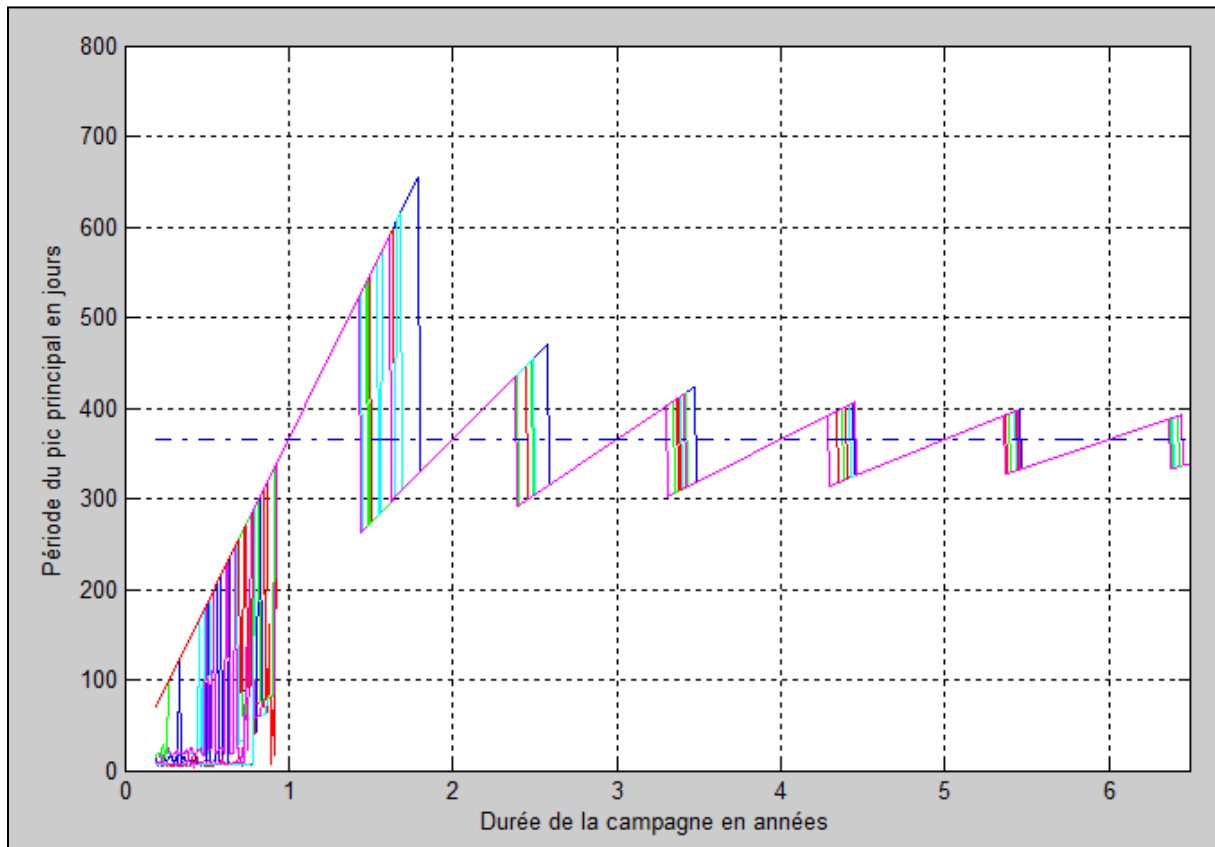


Figure 17 : Evolution de la période correspondant au pic principal pour chacune des 9 stations MF en fonction de la durée des échantillons (une couleur par station).

Cette figure permet d'affirmer que quelle que soit la station MF considérée, la période principale d'oscillation de l'erreur sur l'indice de clarté n'est pas constante et converge doucement vers la période annuelle (exactement 365.2422 jours) abusivement appelée F_0 pour faciliter la lecture. Il est aisé de concevoir qu'il faille plusieurs années afin de déterminer précisément un symptôme saisonnier. Il est néanmoins difficile d'expliquer les ruptures de pentes constatées.

La Figure 16 montre par ailleurs que certaines stations MF présentent des pics secondaires correspondant à une fréquence de $0.005481 \text{ jours}^{-1}$, soit une période égale à 182 jours (la moitié de l'année). L'impossibilité de généraliser cette observation à l'ensemble des 9 stations MF et la toute relative importance du pic secondaire nous amène à ne pas aller plus en avant dans l'étude de cette fréquence secondaire.

Nous proposons alors d'exprimer l'erreur sur l'indice de clarté à l'aide d'un terme constant, d'une dérive temporelle et d'un unique terme sinusoïdal de fréquence F_0 :

Équation 6 : $KT_{HC3} - KT_{MF} = \gamma_1 + \gamma_2j + \gamma_3 \cos(2\pi F_0j + \varphi)$

avec :

- j : date en jour julien
- φ : phasage de la sinusoïde pour le site considéré
- $F_0 = 1/365.2422$ en jours⁻¹

soit encore, sans connaissance *a priori* du phasage :

Équation 7 : $KT_{HC3} - KT_{MF} = \gamma_1 + \gamma_2j + \gamma_3 \sin(2\pi F_0j) + \gamma_4 \cos(2\pi F_0j)$

9.2. PHASAGE DE LA SINUSOÏDE

La détermination des termes γ_i pour chacune des 9 stations MF, et ce sur l'ensemble des 7 années de données concomitantes MF et HC3, permet de comparer le phasage de chaque sinusoïde comme le montre la Figure 18.

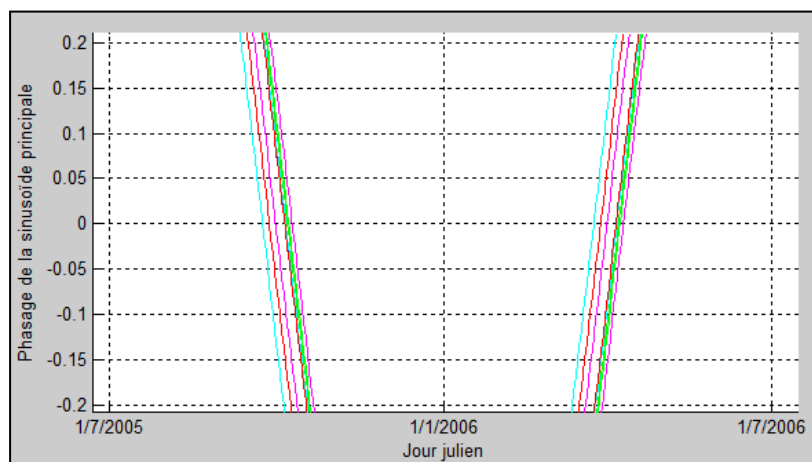
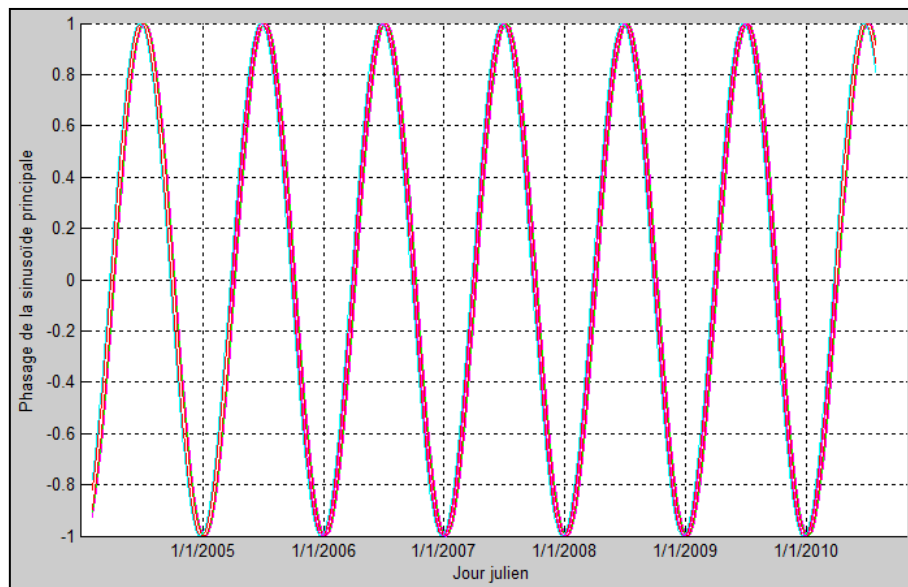


Figure 18 : Phasage de l'erreur pour la fréquence F_0

Les résultats supplémentaires du Tableau 9 montrent que les 9 stations MF présentent à quelques jours près le même phasage, avec un minimum aux alentours du 31 décembre de chaque année.

Station MF	Minimum de la sinusoïde en hiver 2005-2006
AIX	5 janvier 2006
ARLES	5 janvier 2006
BORMES	25 décembre 2005
CABRIERES	4 janvier 2006
CARPENTRAS	8 janvier 2006
MARIGNANE	5 janvier 2006
MARSEILLE	4 janvier 2006
NICE	23 décembre 2005
VINON	30 décembre 2005

Tableau 9 : Phasage à l'hiver 2005-2006 pour chaque station MF du minimum de la sinusoïde de fréquence principale.

Rappelons que ce phasage correspond à celui de la sinusoïde de fréquence F_0 déterminée par étalonnage de N données HC3. Il est par conséquent fonction de ce nombre de données traitées, comme le montre la Figure 19 ci-dessous pour laquelle :

- L'axe des abscisses correspond à la durée de la campagne en mois ;
- L'axe des ordonnées correspond à l'écart entre le 31 décembre 2005 et le phasage du minimum de la sinusoïde relativement pour l'hiver 2005.

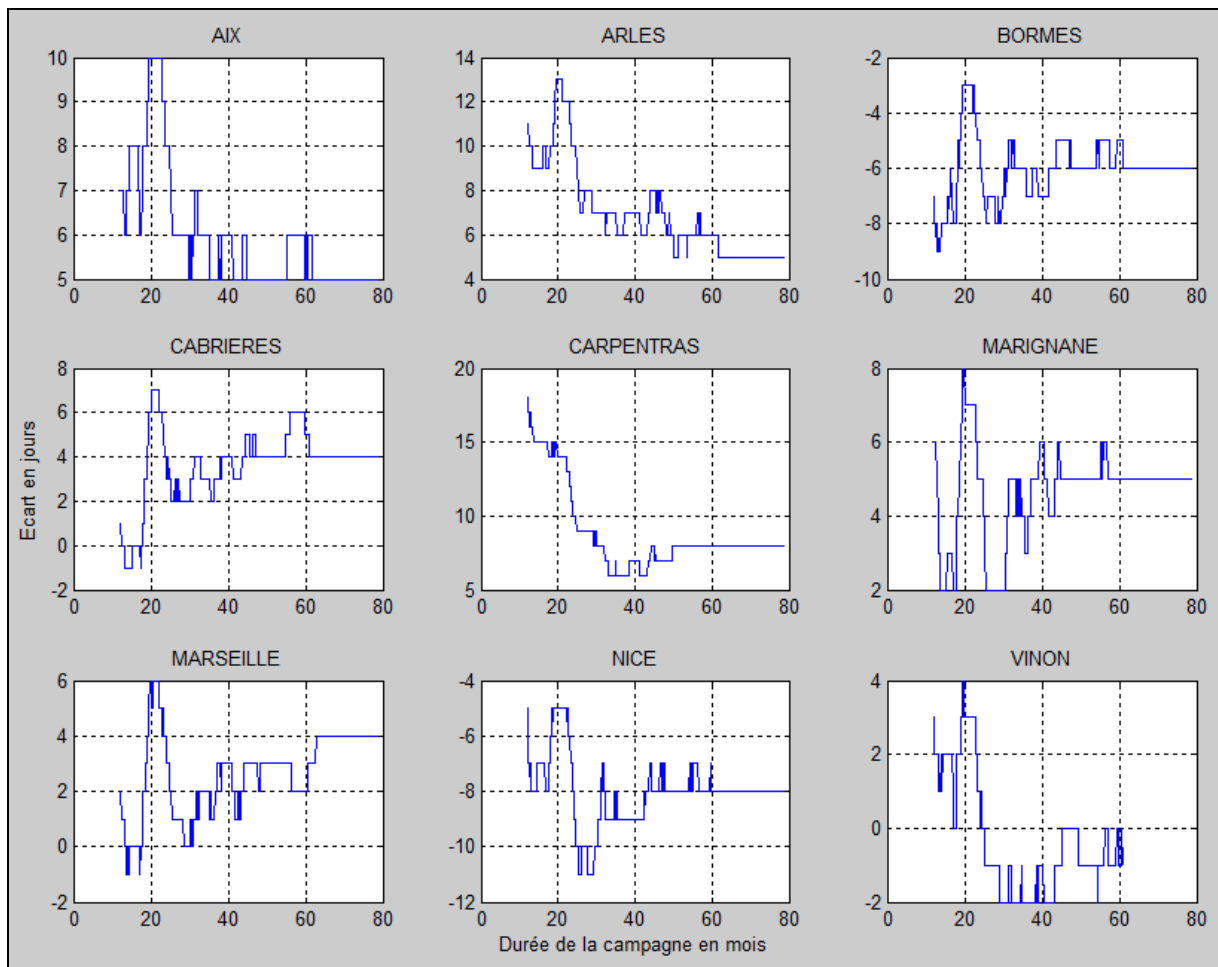


Figure 19 : Evolution du phasage de la sinusoïde relativement au 31 décembre 2005 en fonction du nombre de données traitées par l'algorithme d'étalonnage.

A partir d'environ 30 mois de données, le phasage de la sinusoïde fluctue à ± 1 jour autour de la valeur donnée dans le Tableau 9. Le corolaire est que plus la campagne de mesures est courte, plus il est difficile de déterminer avec précision le phasage de la sinusoïde.

L'erreur faite par HC3 sur l'estimation de l'indice de clarté étant désormais caractérisée, le chapitre suivant s'intéresse à l'étalonnage de la base de données HC3.

10. ETALONNAGE DES ZONES NON MONTAGNEUSES DE PACA

10.1. PRINCIPE D'ETALONNAGE

De manière générale, l'étalonnage consiste à corriger l'estimation X_{EST} d'une grandeur physique X par les mesures X_{MES} de cette même grandeur physique. Les conventions de nom sont les suivantes :

X_{EST}	Estimation de la grandeur physique X
X_{MES}	Mesure de la grandeur physique X
X_{EST}^*	Estimation corrigée de la grandeur physique X en sortie de l'étalonnage

L'algorithme d'étalonnage proposé dans ces travaux a pour objectif d'effectuer une régression linéaire permettant de diminuer l'erreur faite par l'estimation ; cela revient à identifier les N coefficients d'étalonnage $\gamma = \{\gamma_1 \dots \gamma_N\}$ permettant la meilleure régression linéaire au sens des moindres carrés, comme présenté dans l'équation suivante :

Équation 8 : Déterminer $\{\gamma_1 \dots \gamma_N\}$ tels que $\|X_{EST}^* - X_{MES}\|^2$ minimum
 avec $X_{EST}^* = \gamma_1 + \gamma_2 X_{EST} + \sum_{i=3}^N \gamma_i V_i$

où V_i est un ensemble de $N-2$ variables externes permettant d'affiner l'étalonnage.

L'application de ce principe d'étalonnage aux données satellitaires est présentée à la Figure 20 : une station sol locale effectue une courte campagne de N_{ST} mesures journalières X_{ST} lesquelles permettent de déterminer les N coefficients d'étalonnage à appliquer à l'estimation X_{HC3} . Le résultat de cette correction (X_{HC3}^*) prend alors en compte la spécificité locale du site étudié.

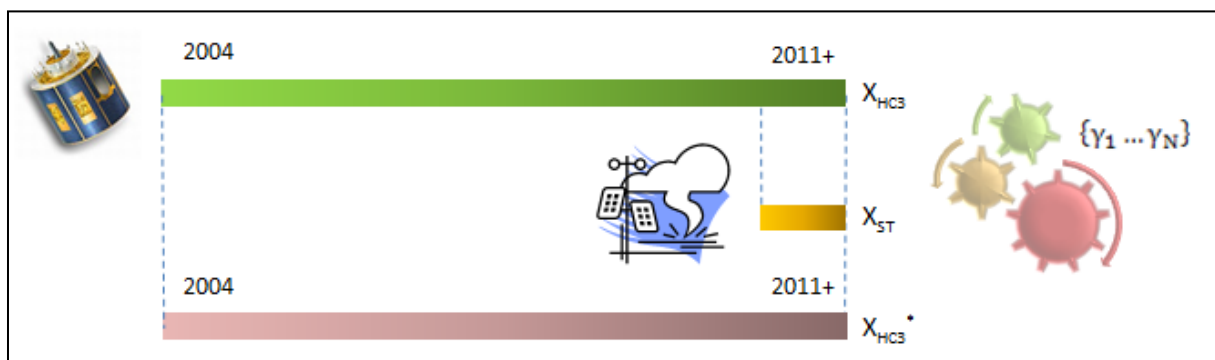


Figure 20 : Principe d'étalonnage des 7 années de données HC3.

Les performances de l'étalonnage reposent principalement sur :

- Le compromis entre un nombre suffisamment élevé de mesures N_{ST} permettant d'assurer un niveau de confiance dans les coefficients d'étalonnage et une durée de campagne suffisamment courte pour rester compatible avec le phasage du projet.
- La viabilité des variables externes qui doivent être représentatives sur le long terme de l'erreur faite sur l'estimation initiale de la grandeur physique.

Le principe d'étalonnage appliqué à l'indice de clarté se décline dans nos travaux de la manière suivante :

$X_{EST} = K_{T_{HC3}}$	Estimation de l'indice de clarté issu de la base de données HC3 ; vecteur colonne de dimension $N_{EST} = N_{HC3} \geq 7 * 365$ jours
$X_{MES} = K_{T_{ST}}$	Mesure de l'indice de clarté par la station locale ; vecteur colonne de dimension $N_{MES} = N_{ST}$
$X_{EST}^* = K_{T_{HC3}}^*$	Estimation corrigée de l'indice de clarté.

Une première partie des travaux a consisté à répondre aux questions centrales de ce problème d'étalonnage appliqué aux zones non montagneuses :

- quelles variables V_i vaut-il mieux utiliser pour l'étalonnage ?
- combien de jours de mesure N_{ST} sont nécessaires à l'étalonnage des N_{EST} estimations ?

Pour ce faire, nous nous sommes concentrés sur la Région PACA pour laquelle sont disponibles les mesures des 9 stations MF en zone non montagneuse (présentées au chapitre 8.2). La Figure 21 illustre la génération de campagnes de mesures « simulées » à partir des données MF.

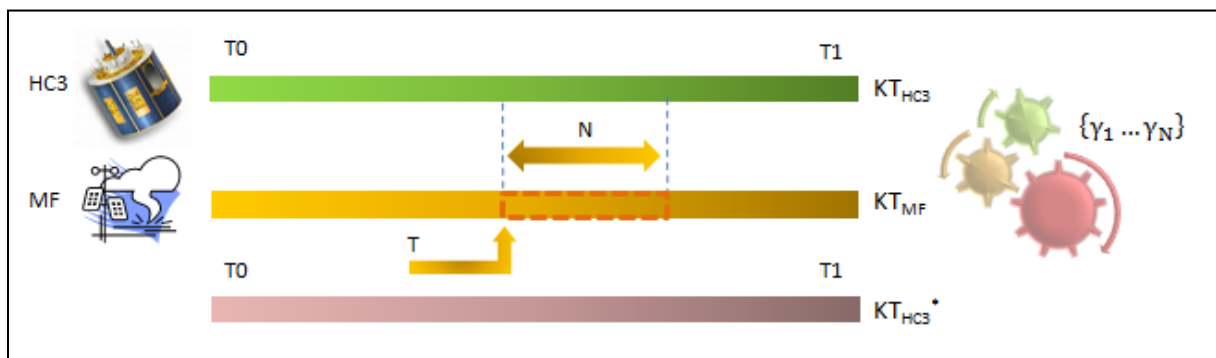


Figure 21 : Principe de simulation de campagnes de mesures à partir de données concomitantes MF et HC3.

La génération de campagnes simulées consiste à utiliser les données MF concomitantes aux estimations HC3 et à en extraire un ensemble de N mesures débutant à un instant T de la période de concomitance. Les multiples combinaisons possibles entre début et durée permettent de générer un nombre important de campagnes, et ce pour les 9 stations MF.

10.2. DETAIL DES ETALONNAGES CONSIDERES

L'expression ci-après de l'erreur sur l'indice de clarté est issue de la caractérisation présentée au chapitre 9 :

$$\text{Équation 9 : } \quad K_{T_{HC3}} - K_{T_{MF}} = \gamma_1 + \gamma_2 j + \gamma_3 \sin(2\pi F_0 j) + \gamma_4 \cos(2\pi F_0 j)$$

Il est délicat de vouloir capturer une dérive temporelle portant sur plus de 7 années à partir d'une courte campagne de mesures, inférieure à 12 mois. Par conséquent, cette dérive est arbitrairement enlevée de l'étalonnage et nous sommes tentés d'affirmer qu'il faille exprimer l'erreur à l'aide du phasage propre à la campagne, appelée dans la suite du document régression « sinus+cosinus » :

$$\text{Équation 10 : } \quad K_{T_{HC3}} - K_{T_{MF}} = \gamma_1 + \gamma_2 \sin(2\pi F_0 j) + \gamma_3 \cos(2\pi F_0 j)$$

Il en résulte 2 variables externes $V_1 = \sin(2\pi F_0 j)$ et $V_2 = \cos(2\pi F_0 j)$.

Toutefois, les performances du principe d'étalonnage présenté au chapitre précédent sont d'autant meilleures que :

- Les variables externes sont représentatives de la grandeur physique étudiée ;
- Le nombre de variables (et donc de coefficients) reste raisonnable.

Le chapitre 9.2 a montré que le phasage était à peu près identique quel que soit le site étudié, avec un minimum aux alentours du 31 décembre de chaque année. En posant j_0 le jour julien associé au 31 décembre 2007, nous pouvons donc essayer de nous affranchir de la connaissance *a priori* du phasage de la sinusoïde pour approcher la forme simplifiée suivante, appelée dans la suite du document régression « sinus » :

$$\text{Équation 11 : } \quad K_{T_{HC3}} - K_{T_{MF}} = \gamma_1 + \gamma_2 \cos(2\pi F_0 (j - j_0))$$

Il en résulte une unique variable externe $V = \cos(2\pi F_0 (j - j_0))$ offrant une formulation très simple de l'étalonnage.

Le chapitre 10.10 confirme la faible plus-value de la régression « sinus+cosinus » qui est ainsi écartée dans la suite des travaux.

Finalement, deux étalonnages sont seulement considérés dont l'objectif commun est de minimiser l'erreur d'estimation $\|K_{T_{HC3}}^* - K_{T_{MF}}\|^2$:

- La régression « basique » et ses 2 coefficients $\{\gamma_1, \gamma_2\}$ tels que :

$$\text{Équation 12 : } \quad K_{T_{HC3}}^* = \gamma_1 + \gamma_2 K_{T_{HC3}}$$

- La régression « sinus » et ses 3 coefficients $\{\gamma_1 \dots \gamma_3\}$ tels que :

$$\text{Équation 13 : } \quad K_{T_{HC3}}^* = \gamma_1 + \gamma_2 K_{T_{HC3}} + \gamma_3 \cos(2\pi F_0 (j - j_0))$$

avec :

- j_0 : jour julien correspondant au 31 décembre 2007.
- $F_0 = 1/365.2422$ en jours⁻¹.

10.3. RESULTATS DE L'ETALONNAGE SUR LES 9 STATIONS MF

Nous avons appliqué les étalonnages « basique » et « sinus » pour chacune des 9 stations MF de la Région PACA en zone non montagneuse, et ce sur la durée complète de concomitance des mesures MF et données HC3 (plus de 2300 données journalières exception faite de VINON – 1808 données).

Les résultats des étalonnages sont présentés dans les Tableau 10 et Tableau 11 et sont comparés aux performances brutes d'HelioClim-3.

JOURNALIER		Aucun étalonnage			Etalonnage « basique »			Etalonnage « sinus »		
Station MF	NDATA	MBE	RMSE	CC	MBE	RMSE	CC	MBE	RMSE	CC
AIX	2354	4.0	10.7	0.9836	1.4	9.2	0.9880	-0.2	7.2	0.9909
ARLES	2350	3.8	11.1	0.9824	1.7	9.9	0.9864	-0.1	7.0	0.9913
BORMES	2337	6.2	12.6	0.9812	1.5	9.4	0.9880	0.1	7.4	0.9913
CABRIERES	2356	3.4	11.2	0.9811	1.4	9.7	0.9865	-0.1	7.5	0.9905
CARPENTRAS	2357	1.8	10.2	0.9836	1.6	9.5	0.9879	-0.1	7.2	0.9914
MARIGNANE	2357	3.9	10.4	0.9844	1.6	9.1	0.9881	0.1	7.0	0.9914
MARSEILLE	2345	2.4	9.9	0.9839	1.3	9.2	0.9872	-0.1	7.1	0.9908
NICE	2334	3.3	10.0	0.9853	1.5	8.9	0.9888	0.1	7.2	0.9909
VINON	1808	1.8	10.8	0.9807	1.3	9.8	0.9871	-0.2	7.9	0.9896

Tableau 10 : Performances journalières des étalonnages « basique » et « sinus » pour les 9 stations MF de la zone non montagneuse.

MENSUEL		Aucun étalonnage			Etalonnage « basique »			Etalonnage « sinus »		
Station MF	NDATA	MBE	RMSE	CC	MBE	RMSE	CC	MBE	RMSE	CC
AIX	78	4.0	6.9	0.9977	1.4	6.1	0.9978	-0.2	3.0	0.9980
ARLES	78	3.8	7.7	0.9965	1.7	7.1	0.9964	-0.1	3.6	0.9971
BORMES	78	6.2	8.3	0.9978	1.5	5.7	0.9986	0.1	2.5	0.9987
CABRIERES	78	3.4	6.4	0.9973	1.4	6.3	0.9976	-0.1	3.0	0.9980
CARPENTRAS	78	1.8	5.3	0.9975	1.6	6.6	0.9974	-0.1	3.2	0.9978
MARIGNANE	78	3.9	6.9	0.9971	1.6	6.3	0.9971	0.1	3.5	0.9972
MARSEILLE	78	2.4	5.7	0.9973	1.3	6.1	0.9973	-0.1	3.0	0.9980
NICE	78	3.3	5.9	0.9988	1.5	5.5	0.9991	0.1	2.8	0.9984
VINON	61	1.8	5.4	0.9975	1.3	6.6	0.9981	-0.2	2.6	0.9986

Tableau 11 : Performances mensuelles des étalonnages « basique » et « sinus » pour les 9 stations MF de la zone non montagneuse.

Pour chacune des stations MF, la régression « basique » est un intermédiaire entre l'absence d'étalonnage et la régression « sinus », cette dernière permettant d'annuler systématiquement le biais (MBE inférieur en valeur absolue à 0.2 % à l'issue des 5 à 7 années de mesures concomitantes). Le RMSE mensuel (par nature toujours meilleur que le RMSE journalier) est quant à lui considérablement diminué pour descendre aux environs des 3 %. Enfin, la légère amélioration du coefficient de corrélation est à considérer à l'aune d'une corrélation initiale déjà excellente.

10.4. CARACTERISTIQUES DE L'ETALONNAGE « SINUS »

Ces premiers résultats encourageants doivent toutefois être nuancés dans la mesure où il est irréaliste voire même absurde d'envisager une campagne de mesures de plus de 7 années. Il est ainsi important de se concentrer sur l'évolution de la performance de l'étalonnage en fonction de la durée de la campagne. Ceci est illustré par la Figure 22 qui présente l'évolution du MBE obtenu après étalonnage des données HC3 par des séries de campagnes de mesures débutées en janvier 2005 (courbes en vert) et janvier 2006 (courbes en rouge), et de durée inférieures à 48 mois.

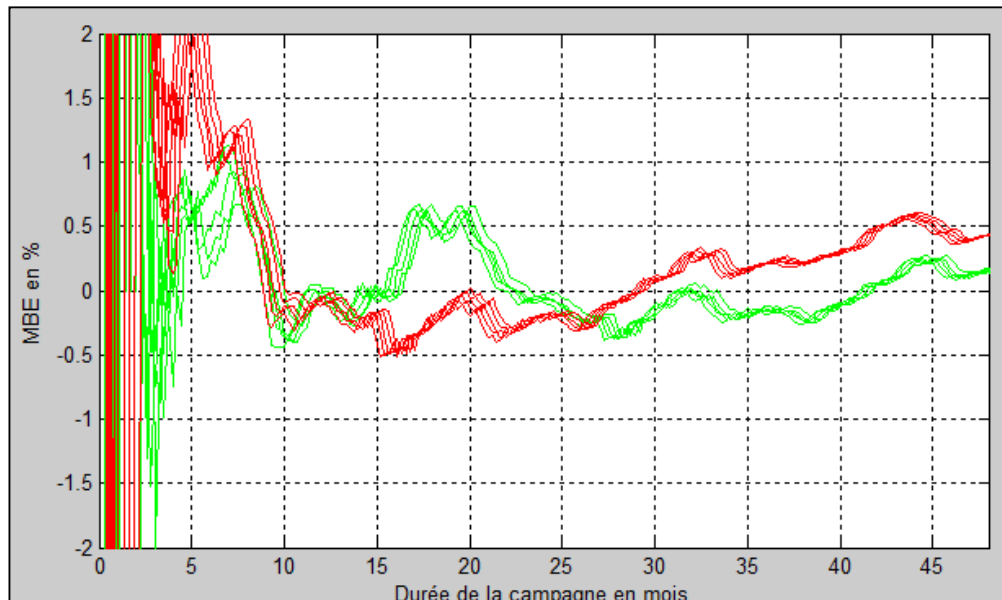
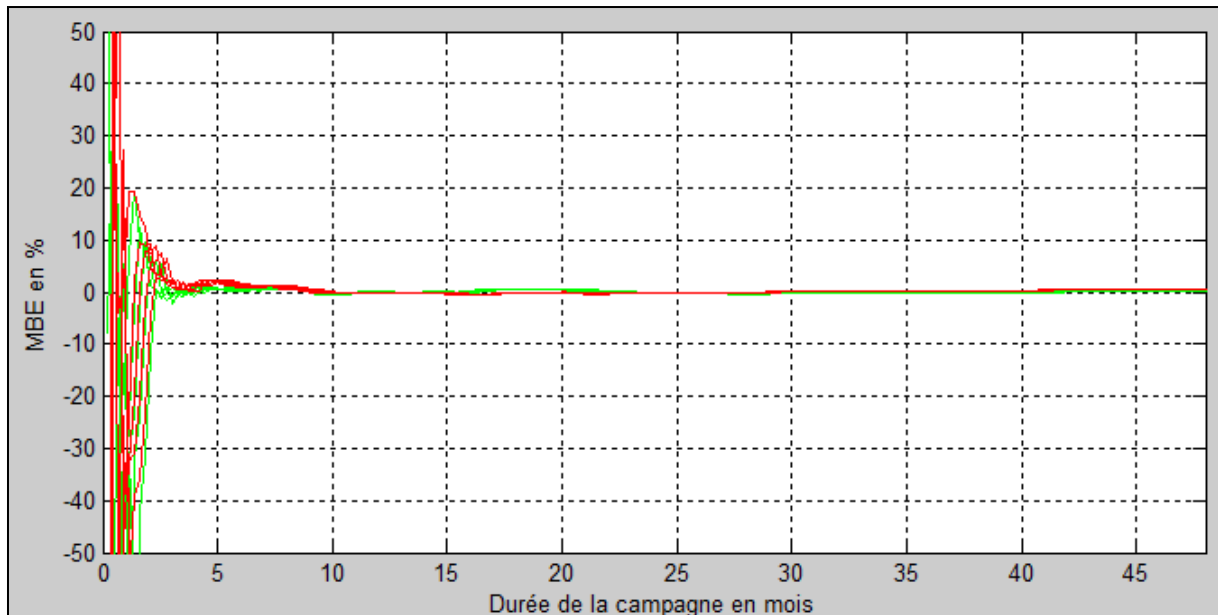


Figure 22 : Evolution des performances de l'étalonnage « sinus », en termes de MBE, pour des campagnes de mesures effectuées à AIX, débutées en janvier 2005 (vert) et janvier 2006 (rouge).

Cette figure donne, à travers l'évolution du MBE, une indication sur la convergence de l'étalonnage « sinus » :

- Les premiers mois de mesures présentent de forts biais pouvant aller au-delà de 50 %. En effet, indépendamment de la qualité de la mesure, il est nécessaire d'avoir suffisamment de données afin que l'algorithme parvienne à déterminer les composantes proportionnelle, constante et sinus.
- Une fois le biais fortement réduit, des mesures supplémentaires n'apportent pas nécessairement de plus-value. Nous observons d'ailleurs, dans le cas de la station AIX, une oscillation du MBE autour de 0 %.

Il n'existe par ailleurs aucun lien direct entre la rapidité de la convergence de l'étalonnage et la performance initiale des estimations HC3. Sur la Figure 23 ci-dessous, nous constatons que le MBE de la station BORMES (en rouge) converge plus rapidement que celui de la station CARPENTRAS (en bleu) alors que les estimations brutes de HC3 sont moins bonnes (1.8 % pour CARPENTRAS contre 6.2 % pour BORMES).

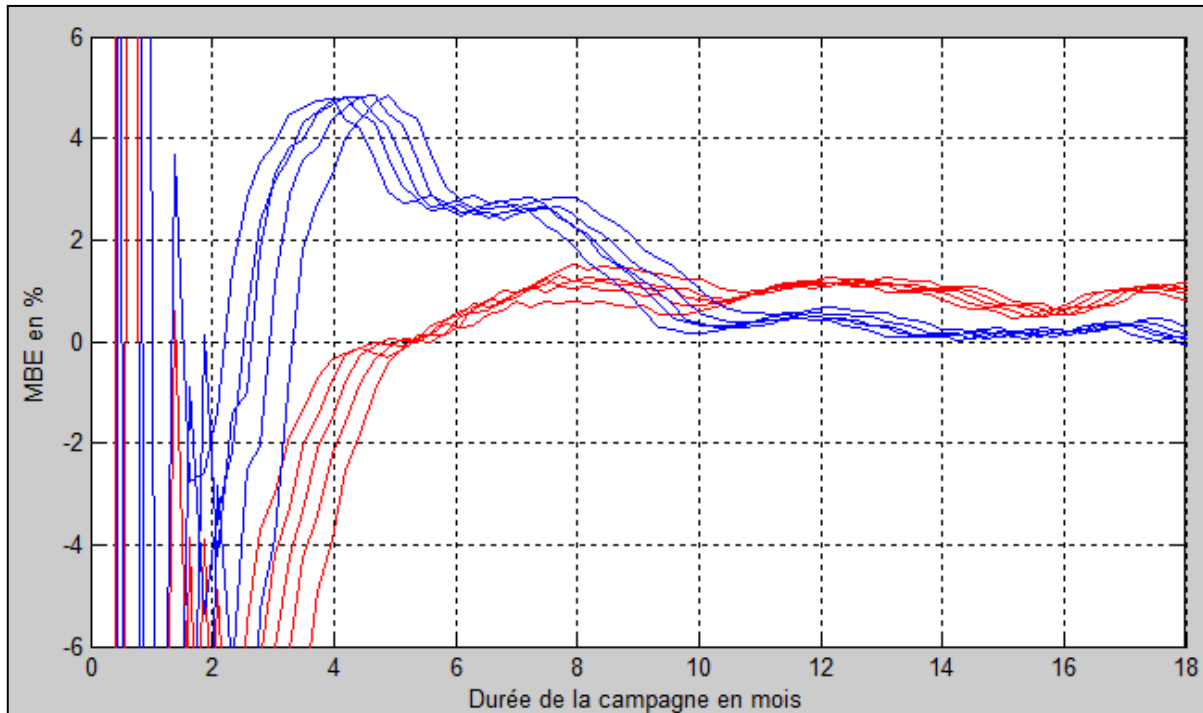


Figure 23 : Evolution des performances de l'étalonnage « sinus », en termes de MBE, pour des campagnes de mesures débutées en janvier 2004 à BORMES (en rouge) et à CARPENTRAS (en bleu).

Enfin, on sent bien que rien n'est plus difficile à différencier que les composantes sinus et constante lorsque les mesures sont effectuées aux alentours des sommets de la sinusoïde. Plus prosaïquement, il semblerait plus « logique » de réaliser des campagnes de mesure par ciel dégagé.

L'ensemble de ces premiers résultats confirme le besoin de caractériser la campagne de mesures, sous différents angles :

- La station étudiée ;
- La durée de la campagne ;
- La période du début de la campagne.

Le chapitre suivant présente les résultats de cette caractérisation.

10.5. CARACTERISATION DE LA CAMPAGNE DE MESURES

La Figure 24 illustre les résultats obtenus à l'aide des étalonnages « basique », « sinus+cosinus » et « sinus » pour la station CARPENTRAS. Les résultats individuels pour chacune des 9 stations non montagneuses sont disponibles en annexe.

Cette représentation multidimensionnelle s'interprète de la manière suivante :

- L'axe des abscisses indique un début de campagne de mesures entre les années 2004 et 2009 (une ligne verticale le 1^{er} de chaque mois, la ligne correspondant au 1^{er} janvier étant continue) ;
- l'axe des ordonnées indique la durée de la campagne en mois (12 mois maximum) ;
- la couleur indique la valeur de $|MBE|$, valeur absolue du biais de l'estimation du GHI journalier après étalonnage des 7 années de données HC3. $|MBE|=0\%$ en bleu ; $|MBE|=5\%$ en rouge ;
- les campagnes donnant des résultats supérieurs à 5 % ne sont pas affichées.

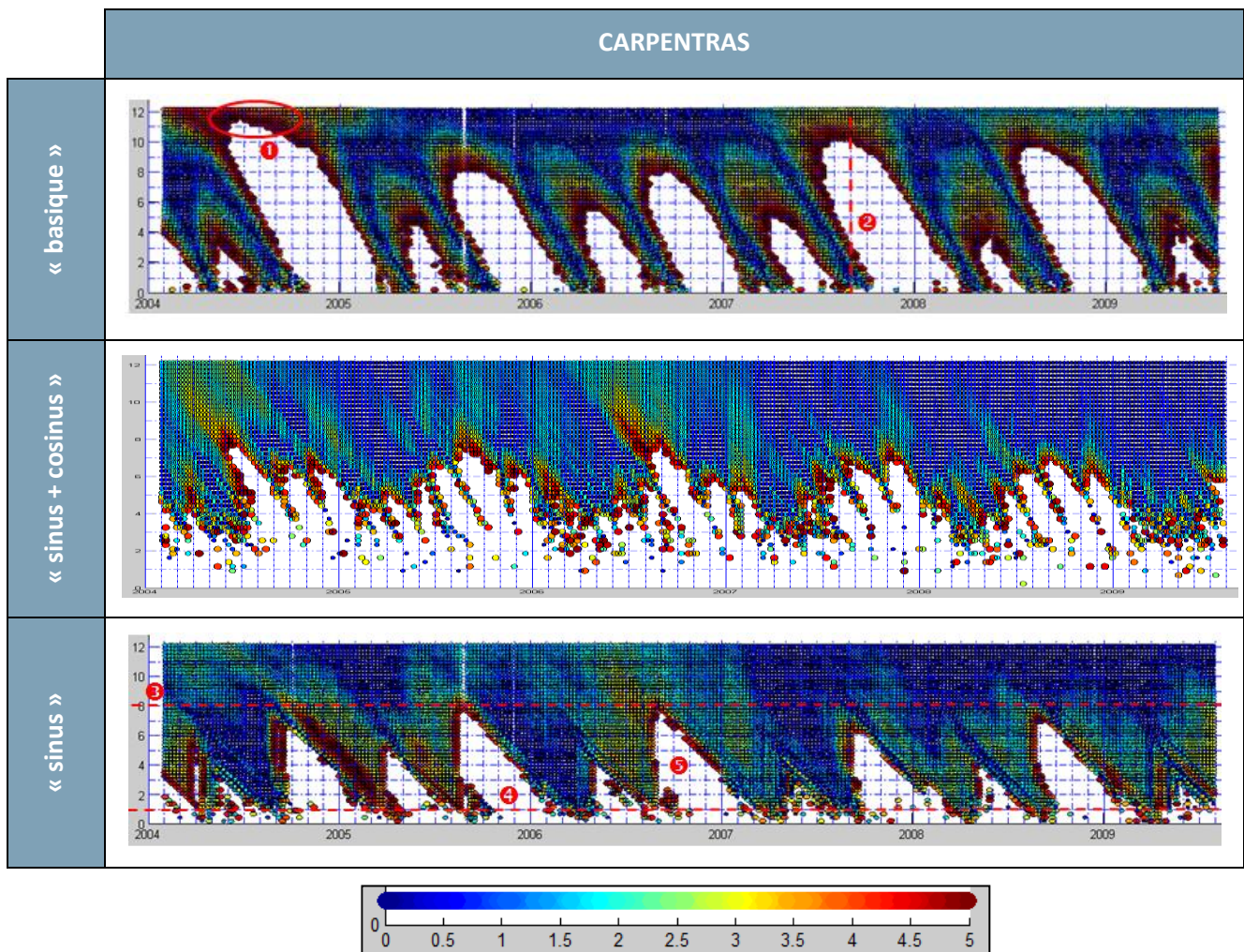


Figure 24 : Performance des régressions « basique », « sinus » et « sinus+cosinus » pour la station CARPENTRAS.

Il est possible de dresser plusieurs tendances à partir de ces premières courbes (cf. les indications sur cette même figure) :

1. La régression « basique » converge lentement si bien que le seuil des 5 % peut ne pas être atteint à la suite d'une année de mesures.
2. Par ailleurs, cette régression a l'inconvénient de présenter des résultats instables en fonction de la durée de la campagne.

Nous recommandons de ne pas utiliser la régression « basique » dans le cadre de notre campagne de mesures, de même que la régression « sinus+cosinus » qui est très longue à converger sous le seuil des 5 %.

3. La régression « sinus » est nettement meilleure et permet d'être systématiquement en dessous du seuil de 5 % après 8 mois de mesures, quel que soit le démarrage de la campagne.
4. Cette même régression « sinus » est toutefois moins adaptée pour les très petites campagnes de mesures de moins d'un mois.
5. La répétition périodique des « arches » indique que certains mois de l'année sont plus propices que d'autres au démarrage des campagnes et laisse à penser qu'une analyse saisonnière doit être réalisée.

Une telle interprétation visuelle ainsi que des résultats appliqués à une unique station de mesure ne permettent pas de conclure de manière rigoureuse quant à la caractérisation de la campagne de mesures. L'analyse suivante présentée à la Figure 25 répond à cette problématique de par :

- l'exploitation simultanée des résultats des 9 stations MF PACA de la zone non montagneuse ;
- leur ventilation en fonction du mois au cours duquel la campagne a débuté ;
- un fort échantillonnage des campagnes (pas de 3 jours pour le début et la durée) ;
- une nouvelle représentation graphique des résultats.

Cette dernière s'interprète de la manière suivante :

- chaque cadran représente le mois de l'année (correspondant au début de la campagne) pour lequel sont disponibles en moyenne 442 séries de données (soit une cinquantaine de séries par stations MF) ;
- l'axe des abscisses indique la durée de la campagne en mois (18 mois maximum) ;
- l'axe des ordonnées indique la valeur du MBE (et non le |MBE| comme précédemment) de l'estimation du GHI journalier après étalonnage des 7 années de données HC3 ;
- sont représentées les valeurs *min*, *max*, *moyenne* et *P95* (percentile 95, *i.e.* l'intervalle dans lequel figurent 95 % des MBE).

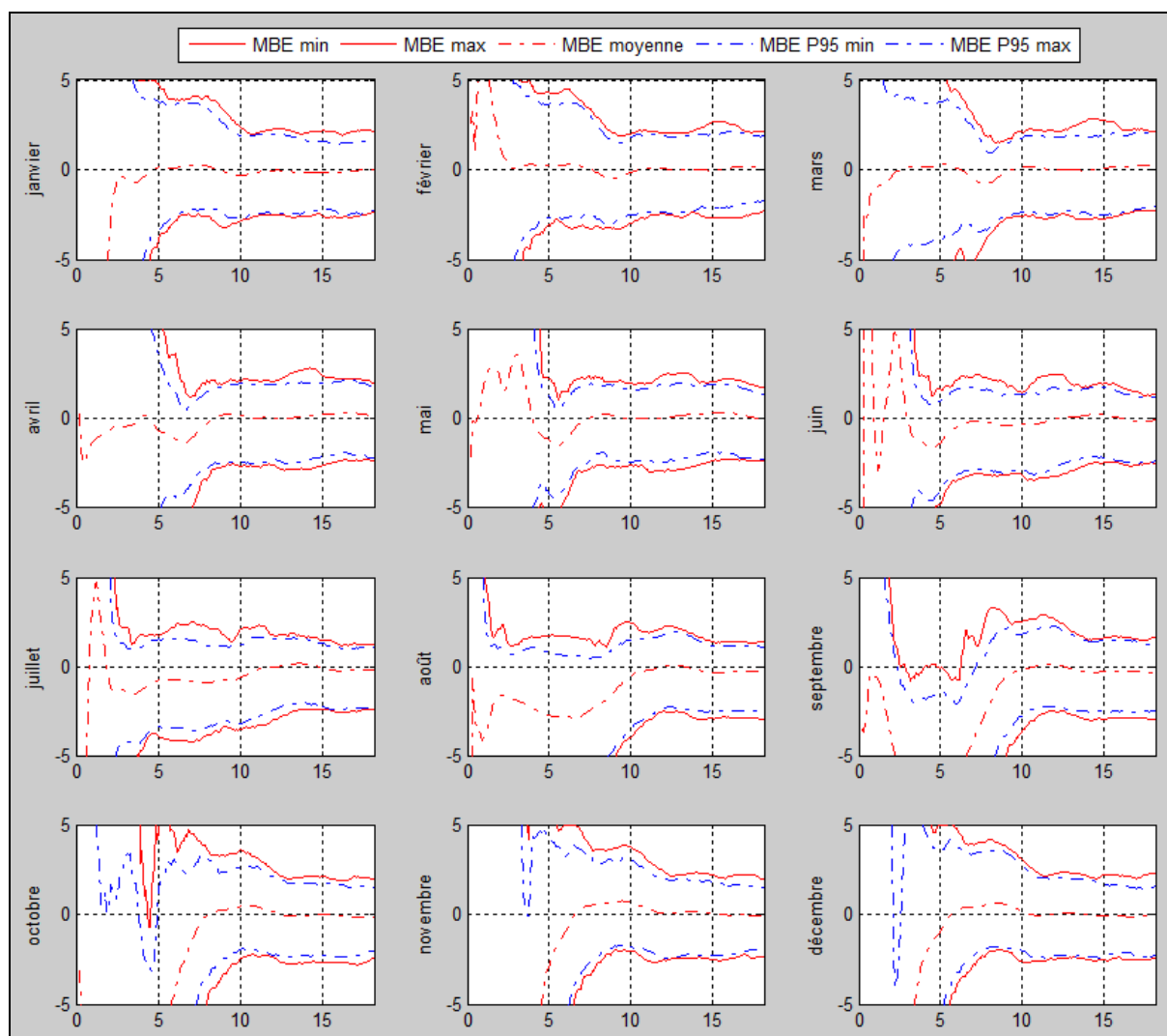


Figure 25 : Performance saisonnière du MBE pour la régression « sinus » et pour l'ensemble des 9 stations MF de la zone non montagneuse.

Les résultats individuels pour chacune des 9 stations non montagneuses sont disponibles en annexe.

La moyenne des MBE (en pointillés rouges) obtenus après une même durée de campagne peut rapidement devenir nulle ; néanmoins, cela n'est pas représentatif de la performance de l'étalonnage, comme le laisse deviner la Figure 26 : 4 à 18 mois de campagnes débutées en février 2004 sur le site d'AIX ne permettent pas d'annuler le MBE, celui-ci évoluant entre -4 et -1 %.

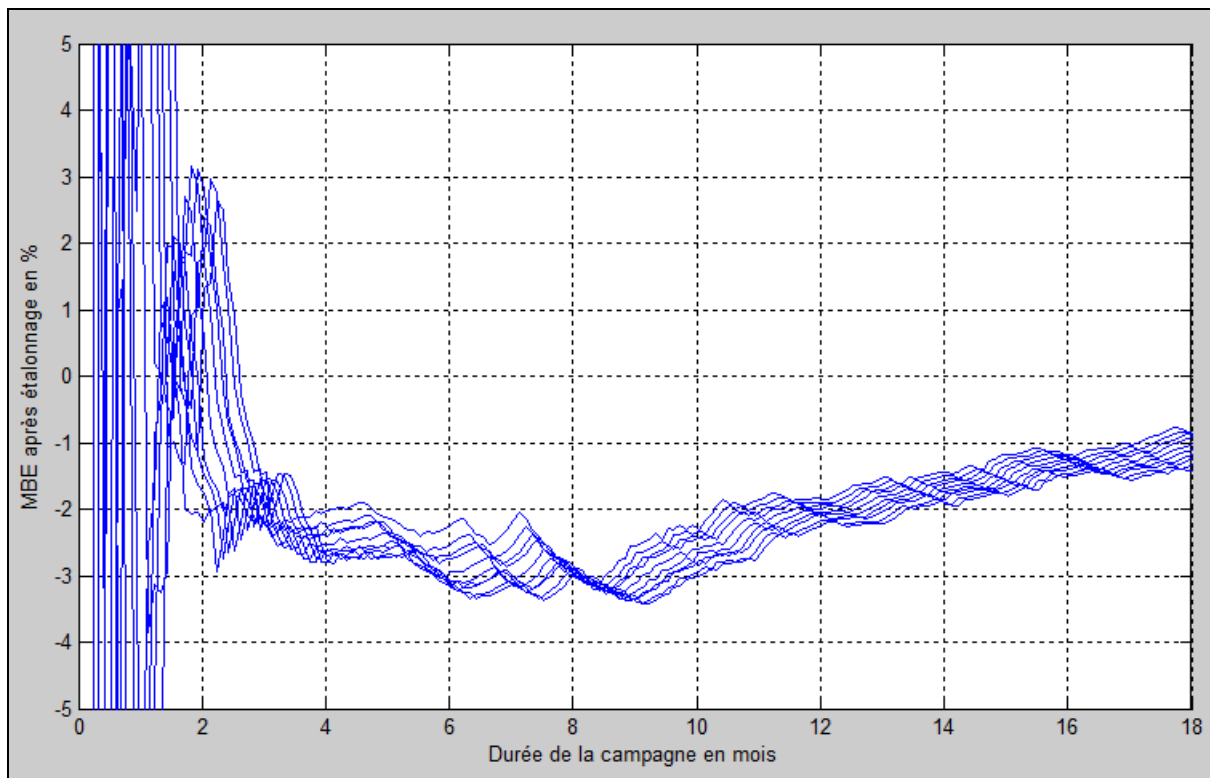


Figure 26 : Evolution du MBE obtenu pour des campagnes de mesures débutant en février 2004 pour la station MF AIX.

Plutôt que regarder la valeur moyenne, il est intéressant de se focaliser sur l'intervalle percentile 95 % (P95), *i.e.* l'intervalle qui regroupe 95 % des échantillons – en tirets bleus sur la Figure 25 – afin de dresser les conclusions suivantes, applicables à un nombre représentatif de campagnes.

Les mois d'août à décembre ne sont pas propices pour démarrer une campagne de mesures.

95 % des MBE sont compris entre ± 5 % avec 5 mois de mesures débutées entre janvier et juillet.

95 % des MBE sont compris entre ± 4 % avec 7 mois de mesures débutées entre janvier et juillet.

95 % des MBE sont compris entre ± 3 % avec 9 mois de mesures débutées entre janvier et mai.

Les mois de janvier à mai sont les plus propices pour atteindre une forte précision.

Il n'est pas possible pour le MBE d'atteindre la précision de ± 2 % avec 18 mois de mesures.

Le même exercice peut être réalisé sur l'erreur quadratique moyenne (RMSE) qui traduit l'impact global du biais (MBE) et de l'écart-type (STDE) dont l'indépendance mutuelle impose de considérer une somme des carrés, comme défini ci-après :

$$\text{Équation 14 : } RMSE^2 = MBE^2 + STDE^2$$

Notons que le signe positif du RMSE implique la perte d'information quant à la surestimation ou sous-estimation de l'estimation, cette information étant préalablement disponible avec l'utilisation du MBE.

L'écart-type diminuant lorsque les données journalières sont concaténées en mois alors que le biais reste identique (cf. Tableau 10 et Tableau 11), nous nous concentrons sur le RMSE mensuel. Ceci est d'autant plus pertinent que les études de gisement solaire réalisées dans le cadre d'études photovoltaïques sont basées principalement sur les données mensuelles.

La représentation saisonnière du RMSE de la Figure 27 s'interprète de la même manière que pour le MBE, exception faite du P95 qui représente la valeur en dessous de laquelle 95 % des échantillons se situent.

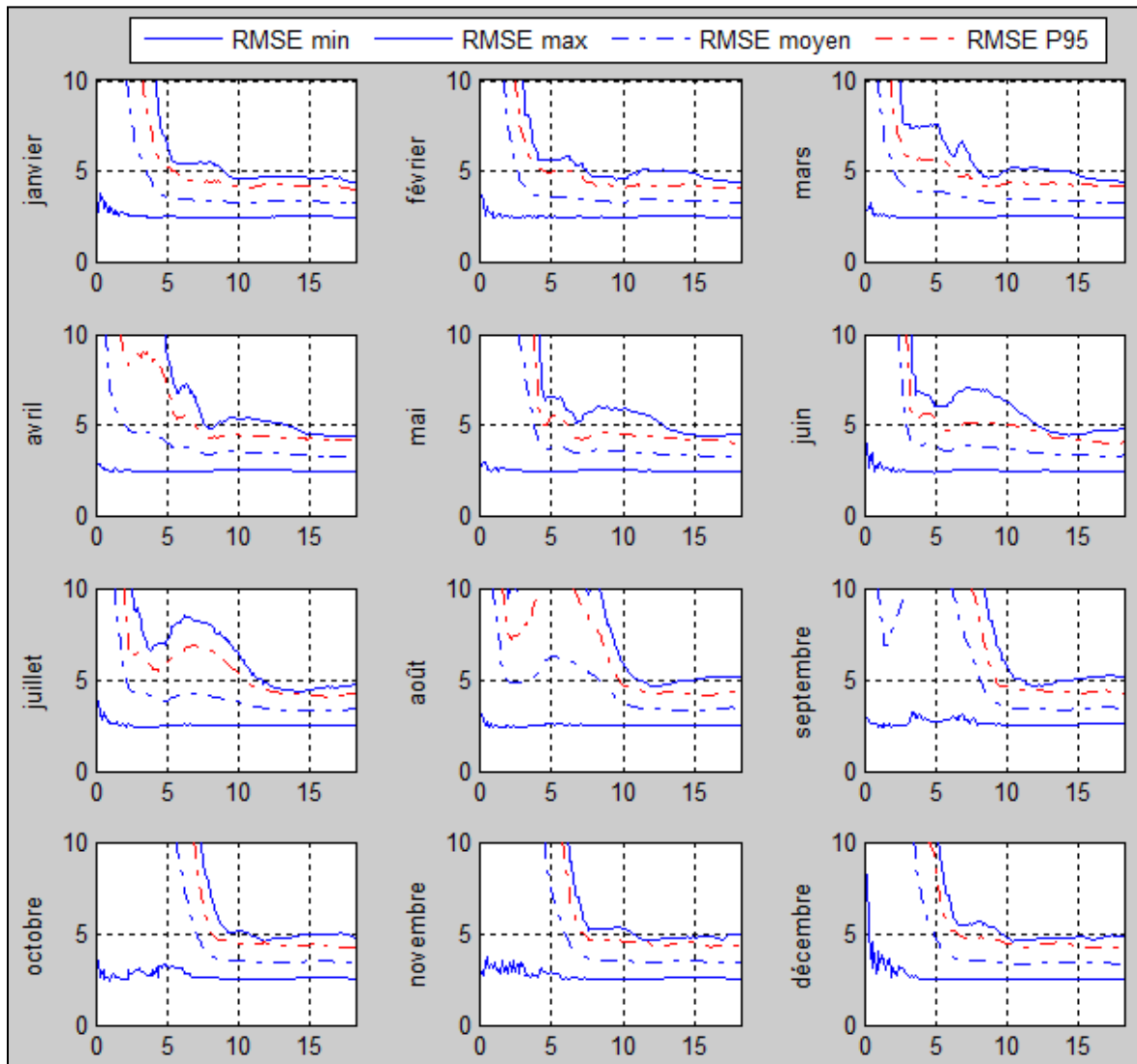


Figure 27 : Performance saisonnière du RMSE mensuel pour la régression « sinus » et pour l'ensemble des 9 stations MF de la zone non montagneuse.

De la même manière que pour le MBE, il est possible à partir de la Figure 27 de dresser les conclusions suivantes applicables à un nombre représentatif de campagnes.

Les mois d'août à décembre restent peu propices pour démarrer une campagne de mesures.

95 % des RMSE sont inférieurs à 7 % avec 5 mois de mesures débutées entre janvier et juillet.

95 % des RMSE sont inférieurs à 5 % avec 7 mois de mesures débutées entre janvier et mai.

Les mois de janvier à mai restent les plus propices pour atteindre une forte précision.

Il n'est pas possible pour le RMSE d'atteindre la précision de 4 % avec 18 mois de mesures.

10.6. SAISONNALITE DES PERFORMANCES

La saisonnalité des performances de l'étalonnage peut s'expliquer à travers l'analyse de la distribution des mesures de l'irradiation globale, comme expliqué ci-après.

Etant donnée une campagne de mesures de durée N mois, il est possible de caractériser l'irradiation sur cette période à partir de la distribution de l'indice de clarté K_T comme présenté sur la Figure 28.

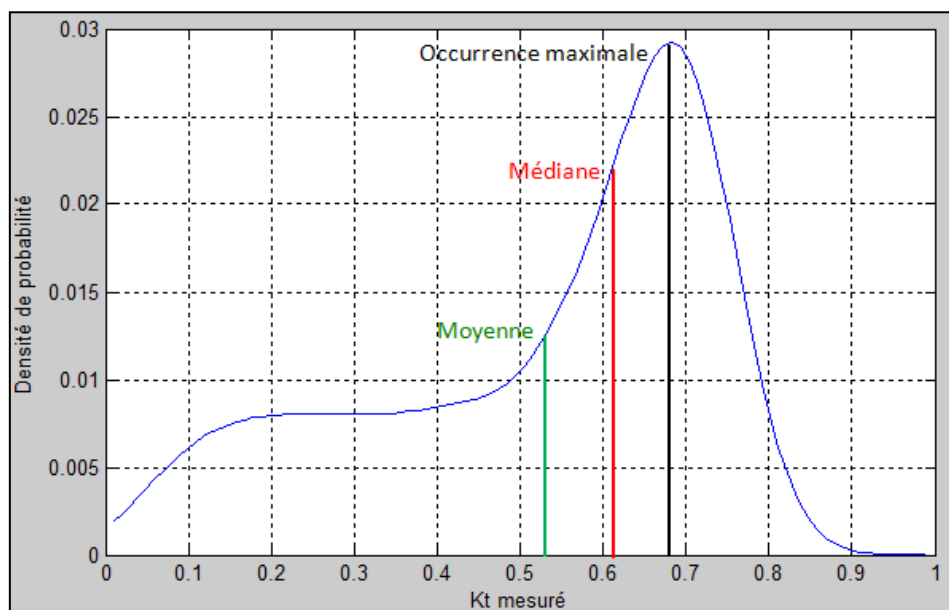


Figure 28 : Exemple d'une distribution de mesures de l'indice de clarté sur une campagne de mesures de 6 mois.

Trois paramètres ressortent de cette distribution :

- La valeur du K_T présentant la probabilité d'occurrence la plus élevée ;
- La valeur médiane permettant de partager la série de mesures en deux parties de même nombre d'éléments ;
- La valeur moyenne du K_T .

Sur la Figure 29 ci-dessous, nous mettons en parallèle d'une part la distribution de l'indice de clarté (via les 3 paramètres précédemment cités) et d'autre part les performances de la régression « sinus »

(via la valeur de $|MBE|$), et ce pour une campagne de mesures de 4 mois débutant entre 2006 et 2009 pour le site de CARPENTRAS (en abscisse est indiqué le début de la campagne).

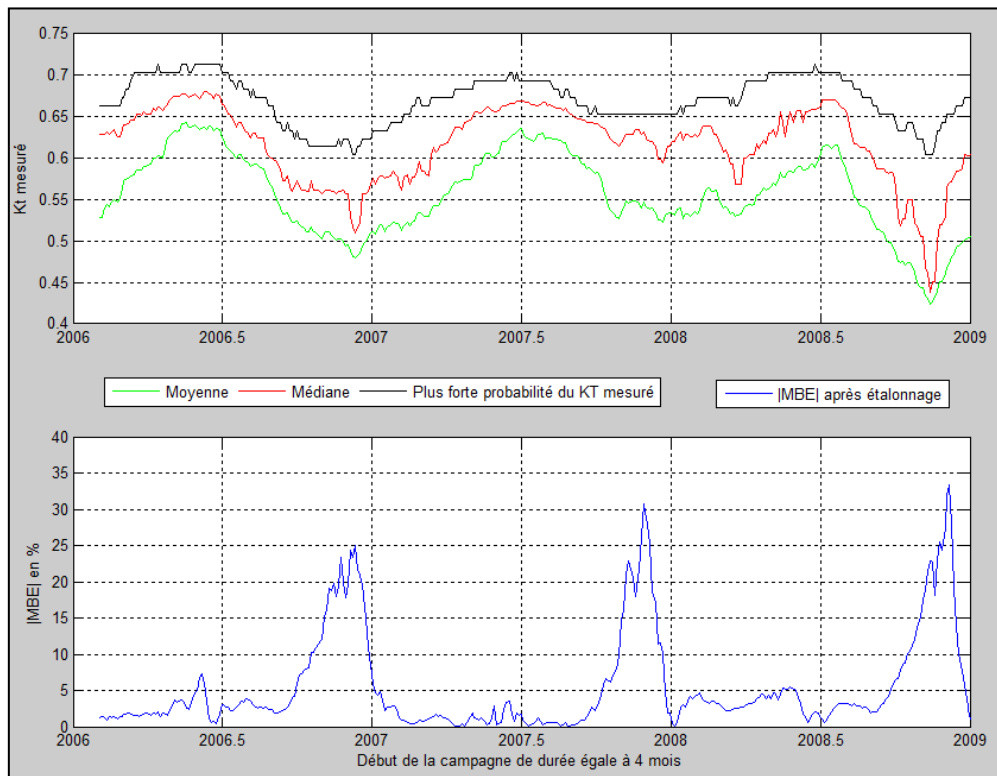


Figure 29 : Corrélation pour le site de CARPENTRAS entre la distribution des mesures de l'indice de clarté et les performances de la régression « sinus » pour une campagne de mesures de durée égale à 4 mois.

Nous confirmons que les courtes campagnes (4 mois) démarrées en automne ne présentent pas de bons résultats en termes de MBE. Chose plus intéressante, nous constatons que ces mauvaises performances surviennent lorsque la distribution de l'indice de clarté est « centrée » vers de faibles valeurs, *i.e.* lorsque la météo est relativement peu clémente. Cette corrélation est flagrante pour les automnes 2006 et 2008, un peu moins pour 2007.

La conclusion de cette analyse est que les performances de la régression « sinus » sont fortement dépendantes des conditions météorologiques, ce qui explique en grande partie leur saisonnalité. Une bonne campagne de mesures consiste donc à trouver la bonne combinaison entre quantité (durée de la campagne) et qualité (début de la campagne) des mesures.

10.7. CARACTERISATION DE LA CONVERGENCE DE L'ÉTALONNAGE

Il est aisé de connaître *a posteriori* la plus-value de l'algorithme d'étalonnage pour une station MF pour laquelle sont disponibles des mesures concomitantes avec les données satellitaires ; le MBE qui résulte de l'étalonnage est en effet factuel. Il en est différemment des sites à étudier pour lesquels seule une courte campagne de mesures est disponible.

Pour ces sites étudiés, les mesures permettent uniquement d'étalonner les données satellitaires. Seule la connaissance de la durée et du début de la campagne permet de prédire les MBE et RMSE à partir des résultats des stations MF présentés dans les chapitres précédents.

Un caractère factuel de l’algorithme réside dans l’information de convergence des coefficients d’étalonnage γ_i à travers l’écart-type (en %) de l’estimation de ces coefficients ; cette information est une sortie de l’algorithme et permet de constater, au fil des jours, du potentiel de confiance et de convergence de l’étalonnage pour le site étudié.

Plutôt que de travailler directement sur l’écart-type pour lequel il n’est pas pertinent de comparer les valeurs en tant que telles, nous comparons les dérivées de chacun de ces 3 écarts-types afin d’obtenir une information sur la convergence des coefficients. La Figure 30 présente à cet effet la distribution en 3 dimensions de la dérivée des 3 écarts-types en ventilant les résultats du 1^{er} au 16^{ème} mois de mesure (toutes campagnes confondues, indépendamment de la saison et de la station).

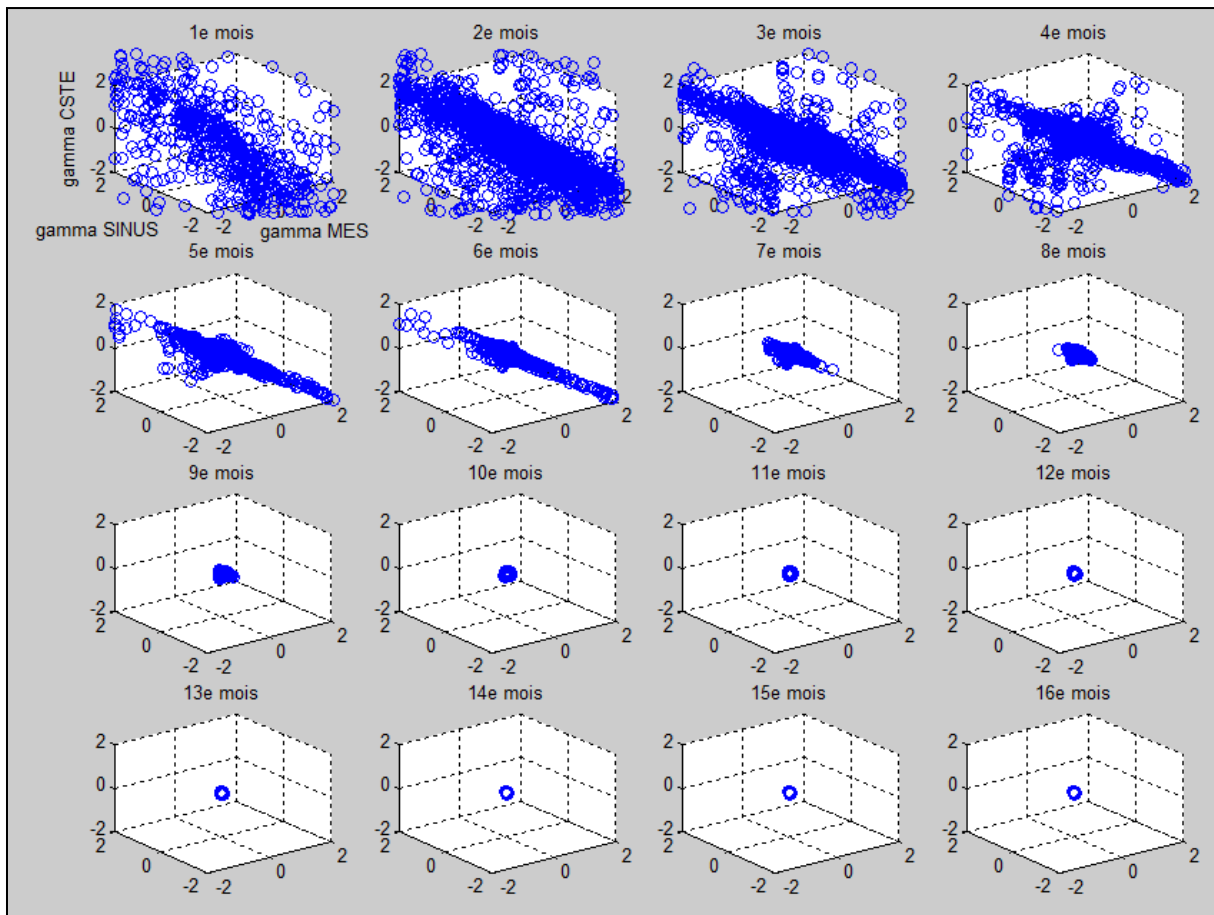


Figure 30 : Distribution de la dérivée de l’écart-type des trois coefficients γ (constante, proportionnel et sinus).

La convergence de l’étalonnage s’observe au jour le jour à travers l’annulation progressive de la dérivée de l’écart-type de chacun des 3 coefficients. Nous observons une plus longue convergence pour le coefficient γ_{SINUS} pour lequel au moins une année de mesures est nécessaire afin d’atteindre le même niveau que les 2 autres coefficients. Cela s’explique naturellement par la période de la sinusoïde, égale à une année, qu’il faut parvenir à capturer.

Nous pouvons ainsi affirmer que le coefficient γ_{SINUS} est le facteur limitant de la convergence de l’algorithme d’étalonnage. Il est intéressant de regarder la distribution entre l’évolution de l’écart-type du coefficient γ_{SINUS} et l’évolution du MBE obtenu après étalonnage des données HC3.

La Figure 31 présente la distribution de chacune de ces 2 dérivées (en valeur absolue) ainsi que le P95 associé (courbe bleue).

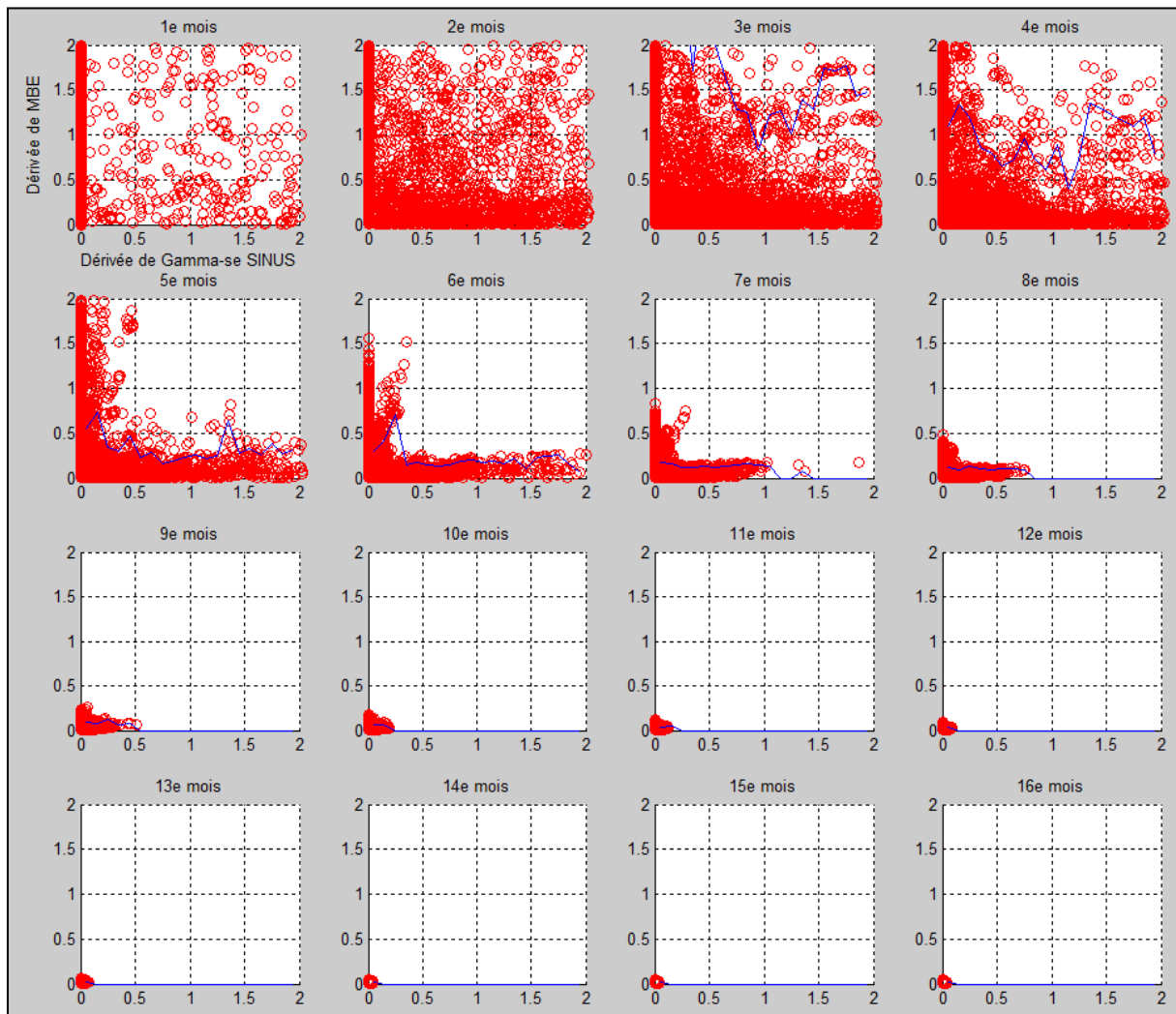


Figure 31 : Distribution de la dérivée de l'écart-type du coefficient γ_{SINUS} et de la dérivée du MBE (en valeur absolue), exprimées en % par jour de mesure supplémentaire.

De manière générale, il est confirmé que les 4 premiers mois de mesures ne permettent pas de faire converger l'algorithme, la distribution étant trop dispersée. A partir du 4^{ème} mois de mesures, cette figure montre le maximum du gain en % que nous pouvons espérer obtenir pour chaque jour de mesure supplémentaire.

10.8. SENSIBILITE DE L'ETALONNAGE AU SITE ETUDIE

Les figures Figure 48 à Figure 56 en annexe présentent les résultats de la régression « sinus » de chacune des 9 stations MF de PACA en zone non montagneuse. Leur analyse montre que les performances de l'étalonnage sont relativement identiques pour un objectif de 4 et 5 %, quelle que soit la station MF étudiée, avec néanmoins une dégradation lorsque le seuil diminue.

Le cas spécifique de la station de BORMES dont le MBE initial sans étalonnage est le plus élevé (6.2 %) révèle que les performances de convergence de l'étalonnage ne sont pas liées au biais initial.

10.9. SENSIBILITE AUX CONDITIONS DE CIEL CLAIR

Le chapitre 10.6 a montré que les performances de l'étalonnage sont meilleures lorsque la distribution de l'indice de clarté est centrée vers des valeurs élevées, *i.e.* lorsque les mesures sont réalisées par temps dégagé. L'étude de sensibilité décrite ci-après conclut pourtant qu'il n'est pas intéressant de filtrer les mesures.

Trois zones sont définies afin de caractériser le type de ciel [BIBLIO5] :

Ciel clair	$0.65 < KT \leq 1$
Intermédiaire	$0.3 < KT \leq 0.65$
Couverture nuageuse	$0 < KT \leq 0.3$

Tableau 12 : Définition des 3 zones de caractérisation du type de ciel.

Une première élimination des mesures ne correspondant pas au seul critère « ciel clair » mène à de très mauvais résultats, l'algorithme n'ayant pas suffisamment de mesures en entrée. Une seconde tentative visant à ne garder que les mesures correspondant au critère « ciel clair » ou « intermédiaire », *i.e.* $KT > 0.3$, mène cette fois-ci à des résultats similaires, voire légèrement moindres.

Par conséquent, quel que soit l'objectif à atteindre (5, 4 ou 3 %), il est préférable de garder toutes les mesures disponibles, quelle que soit la valeur de l'indice de clarté, afin d'avoir le plus grand nombre de données et ainsi faire converger l'algorithme d'étalonnage le plus rapidement possible.

10.10. SENSIBILITE A LA CONNAISSANCE DU PHASAGE DE LA SINUSOÏDE

Comme présenté au chapitre 9.2, il est possible de considérer l'aspect sinusoïdal de l'erreur sur l'indice de clarté de deux manières mathématiquement identiques :

$$\text{Équation 15 : } \begin{cases} KT_{HC3} - KT_{MF} = \gamma_1 + \gamma_2 \cos(2\pi F_0 j + \varphi) \\ KT_{HC3} - KT_{MF} = \gamma_1 + \gamma_2 \sin(2\pi F_0 j) + \gamma_3 \cos(2\pi F_0 j) \end{cases}$$

Dans le cadre de « vraies » campagnes de mesures pour lesquelles le phasage ne peut pas être connu *a priori*, il est possible de simplifier cette régression linéaire tout en conservant cette linéarité :

$$\text{Équation 16 : } KT_{HC3} - KT_{MF} = \gamma_1 + \gamma_2 \cos(2\pi F_0 (j - j_0))$$

avec :

- j_0 le jour julien correspondant au 31 décembre 2007.
- $F_0 = 1/365.2422$ en jours⁻¹.

Les 2 algorithmes d'étalonnage suivants sont considérés :

- La régression « sinus », étudiée dans les chapitres précédents, et ses 3 coefficients $\{\gamma_1 \dots \gamma_3\}$ permettant de limiter le nombre de coefficients à déterminer :

$$\text{Équation 17 : } KT_{HC3}^* = \gamma_1 + \gamma_2 KT_{HC3} + \gamma_3 \cos(2\pi F_0(j - j_0))$$

- La régression « sinus+cosinus » et ses 4 coefficients $\{\gamma_1 \dots \gamma_4\}$ permettant de chercher la meilleure estimation du phasage de la sinusoïde :

$$\text{Équation 18 : } KT_{HC3}^* = \gamma_1 + \gamma_2 KT_{HC3} + \gamma_3 \cos(2\pi F_0 j) + \gamma_4 \sin(2\pi F_0 j)$$

La figure suivante présente les performances saisonnières en termes de MBE de l'ensemble des 9 stations MF pour la régression « sinus+cosinus » (cf. la Figure 25 pour la régression « sinus »).

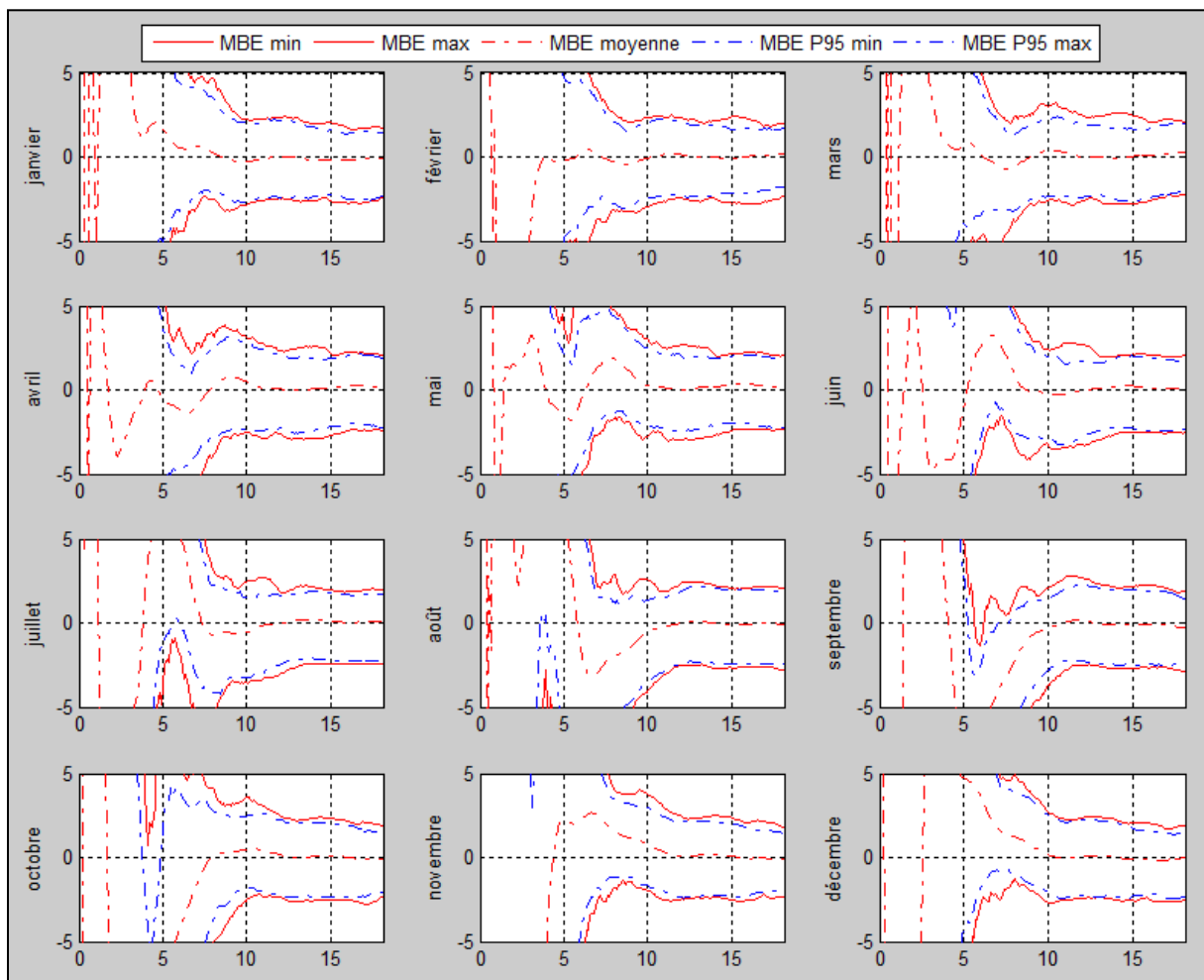


Figure 32 : Performance saisonnière du MBE pour la régression « sinus+cosinus » et pour l'ensemble des 9 stations MF de la zone non montagneuse.

Quel que soit l'objectif à atteindre (5, 4 ou 3 %), une analyse détaillée montre que la régression « sinus » offre de meilleurs résultats que la régression « sinus+cosinus ». il est ainsi préférable d'utiliser cette régression qui approxime le phasage plutôt que de chercher à caler la sinusoïde au prix (fort) de la détermination d'un coefficient supplémentaire.

10.11. SENSIBILITE AU MASQUE LOINTAIN

Les résultats présentés dans ce document ont été obtenus à partir des 9 stations MF de la Région PACA en zone non montagneuse. Ce chapitre montre que ces algorithmes d'étalonnage ne sont pas applicables aux stations en zone montagneuse, la différence entre les estimations du GHI par HC3 et les mesures de ces stations étant principalement dues à l'orographie très marquée.

La Figure 33 présente l'horizon lointain de chacune des 9 stations MF de la zone non montagneuse ainsi que celui de la station LARAGNE (en rouge) située en zone montagneuse.

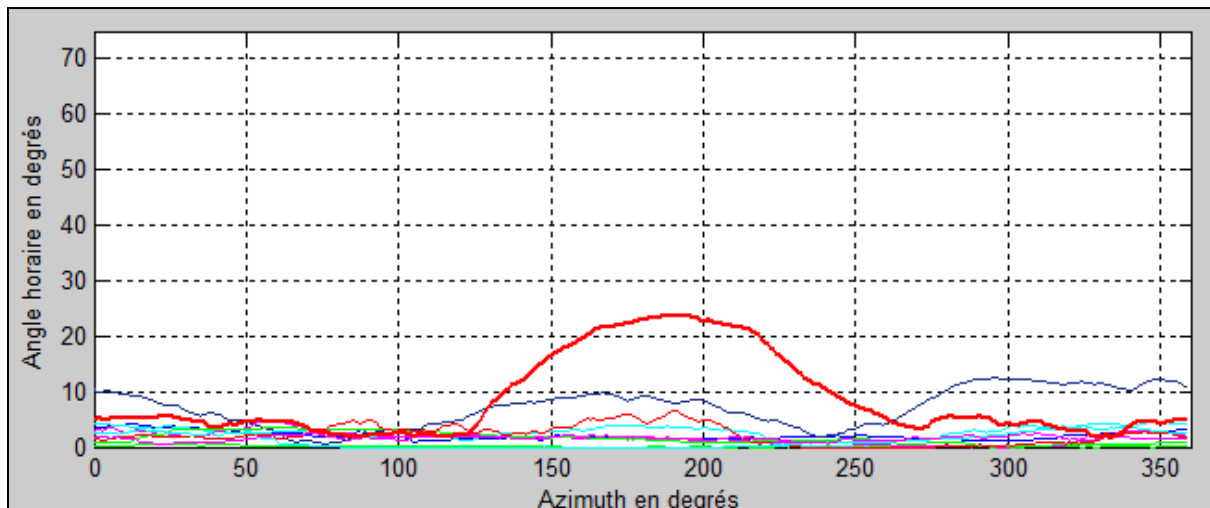


Figure 33 : Horizon lointain pour les 9 stations MF en zone non montagneuse ainsi que la station LARAGNE en zone montagneuse (rouge).

La confrontation de l'horizon lointain de LARAGNE et de la course du soleil pour cette même localisation (Figure 34) montre que les jours proches du solstice d'hiver sont fortement impactés par le masque lointain. A titre d'illustration, la journée du 21 décembre, le soleil est masqué à partir de 13h15.

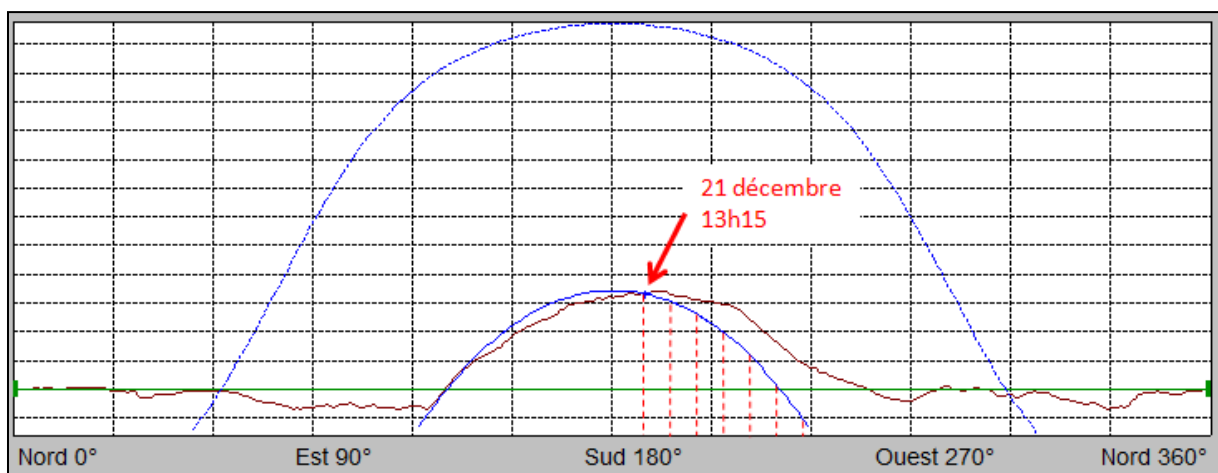


Figure 34 : Masque lointain (en rouge) et course du soleil (en bleu) pour la station LARAGNE.

Cet impact n'est pas pris en compte par la base de données HC3 si bien que l'utilisation des données d'irradiation hivernale de HC3 dégrade fortement les performances de l'étalonnage, comme l'illustre

la Figure 35 où est présentée l'évolution saisonnière de la norme de l'écart-type de l'estimation des coefficients γ , traduisant la confiance sur ces coefficients.

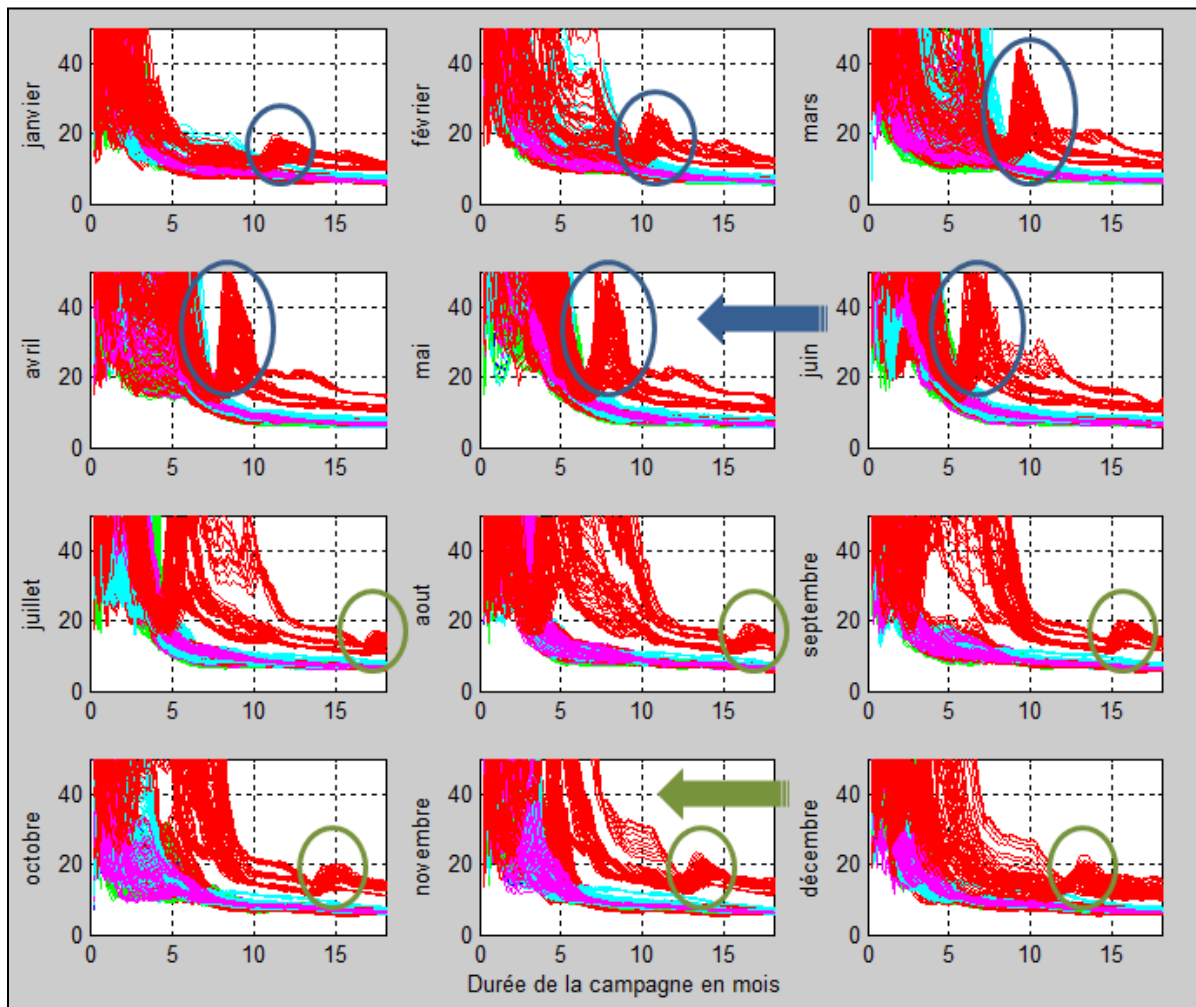


Figure 35 : Evolution saisonnière de la norme de l'écart-type des coefficients γ pour les 9 stations MF en zone non montagneuse ainsi que la station LARAGNE en zone montagneuse (rouge).

Une campagne débutée en janvier n'est pas nécessairement impactée par les toutes premières mesures d'irradiation (impactée par le masque lointain) car nous avons vu au chapitre 10.3 que la confiance obtenue après les tous premiers mois d'étalonnage est systématiquement mauvaise. Toutefois, nous observons une forte dégradation lorsque, une fois la convergence atteinte, l'algorithme est alimenté de ces mesures hivernales (cercles bleu et vert).

Il n'est donc pas recommandé d'utiliser cet algorithme d'étalonnage pour les sites en zone montagneuse. D'autres travaux seront réalisés à cet effet.

10.12. SENSIBILITE A UN BIAIS INITIAL ELEVE

Il est intéressant de s'intéresser à la robustesse de l'algorithme d'étalonnage pour des sites dont l'estimation initiale de HC3 est fortement biaisée, par exemple la station MF de HYERES-PLAGE qui présente un biais initial de 13.1 % (cf. le Tableau 13 ci-dessous) et ne présentant aucun masque lointain.

Station MF	Données journalières					Données mensuelles				
	NDATA	MBE	STDEV	RMSE	CC	NDATA	MBE	STDEV	RMSE	CC
HYERES-PLAGE	1791	13.1	10.2	16.6	0.9882	60	13.1	8.1	15.4	0.9982

Tableau 13 : Performances initiales journalières et mensuelles de la station MF HYERES-PLAGE.

La localisation côtière de ce site peut engendrer une saturation du signal reçu par le satellite à cause de la réflexion sur la mer et donc expliquer un biais aussi important. Le coefficient de corrélation est quant à lui très bon.

L'algorithme d'étalonnage permet de ramener très rapidement un biais initial égal à 13.1 % en dessous de 5 % comme le montre la Figure 36 ci-dessous. Par ailleurs, chose plus intéressante, les performances de ce site restent compatibles aux 9 sites de référence.

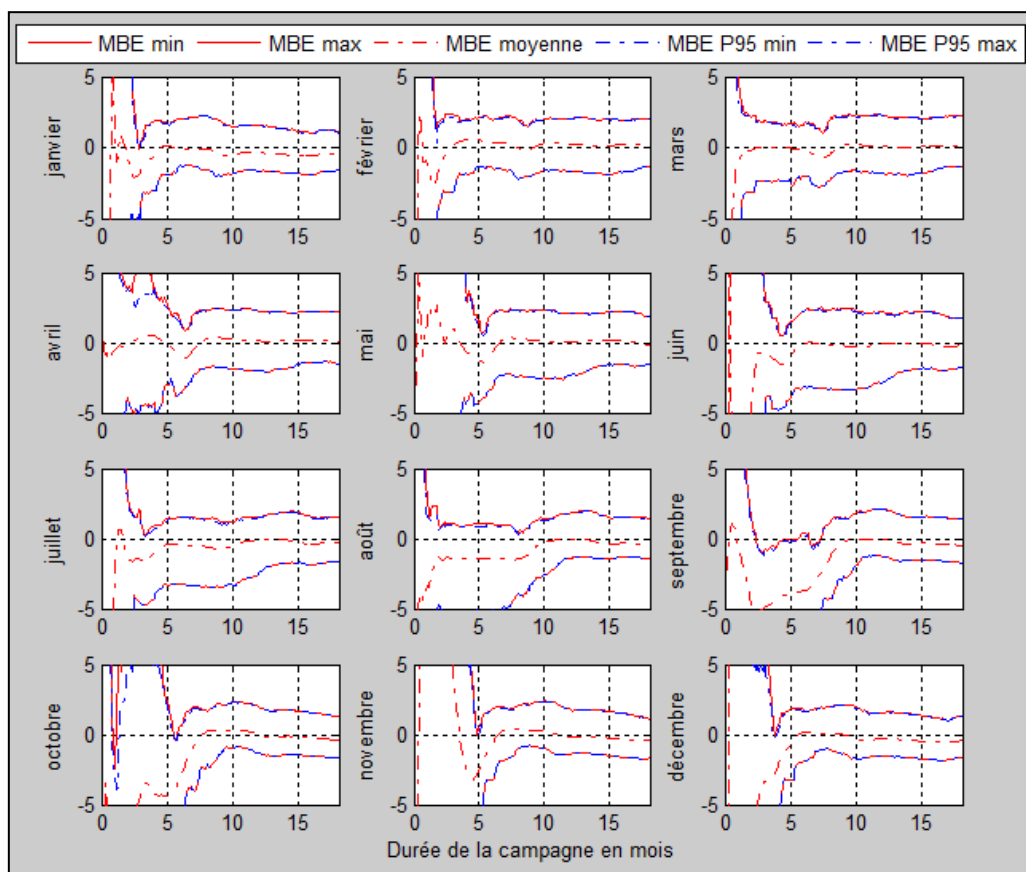


Figure 36 : Performance saisonnière du MBE pour la régression « sinus » de la station HYERES-PLAGE présentant un biais initial de 13.1 %.

Il est intéressant de conclure que les performances de l'étalonnage « sinus » sont indépendantes du biais initial pour le site considéré.

10.13. SENSIBILITE A LA REGION

Les résultats de l'étalonnage présentés dans les chapitres précédents sont relatifs aux 9 stations MF de la Région PACA, situées en zone non montagneuse. Le chapitre 10.13 présente la sensibilité des résultats au masque lointain et donc à la spécificité montagneuse du site. Ce chapitre présente à son tour la sensibilité de l'étalonnage pour le site de LA ROCHE SUR YON, en Vendée, dont les caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 14 et ne présentant pas de masque lointain.

Nombre de données journalières	MBE initial [%]	Longitude [° Est]	Latitude [° Nord]	Altitude [m]
2378	1.8	-1.3833	46.7	86

Tableau 14 : Caractéristiques de la station de LA ROCHE SUR YON, en dehors de la Région PACA.

Les figures suivantes présentent les résultats de l'analyse temporelle et fréquentielle faite pour ce site sur l'erreur sur l'indice de clarté :

- En bleu, l'évolution temporelle de l'erreur sur l'indice de clarté avec l'allure sinusoïdale ;
- En vert, la transformée de Fourier sur cette erreur ;
- En rouge, l'évolution de la période principale d'oscillation.

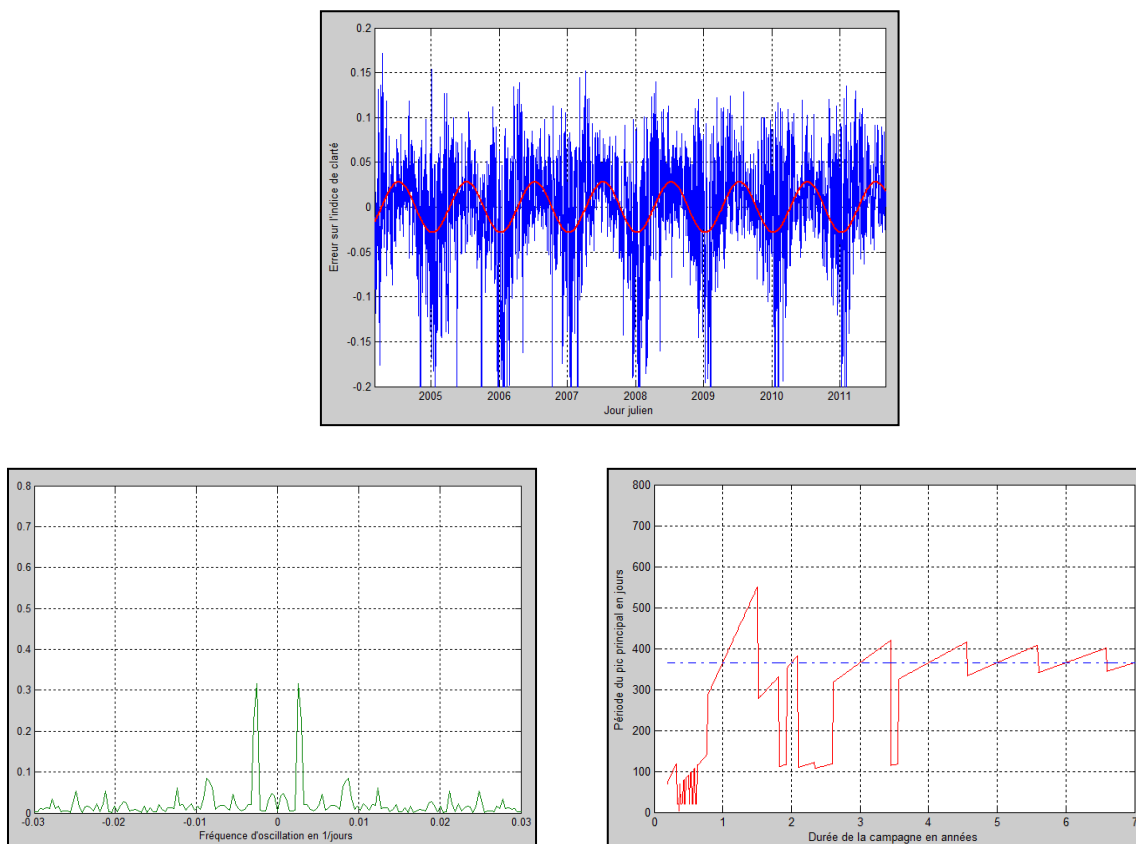


Figure 37 : Analyse temporelle et fréquentielle de l'erreur sur l'indice de clarté pour le site de LA ROCHE SUR YON.

Tout comme pour l'ensemble des 9 stations de la Région PACA, l'erreur sur l'indice de clarté pour le site vendéen de LA ROCHE SUR YON présente le même comportement sinusoïdal avec une période principale oscillant autour de 365 jours. La régression « sinus » présentée dans les chapitres précédents est ainsi applicable à ce site comme le confirme la Figure 38 sur laquelle l'objectif de 3, 4 ou 5 % est atteint de la même manière que pour les sites de la Région PACA.

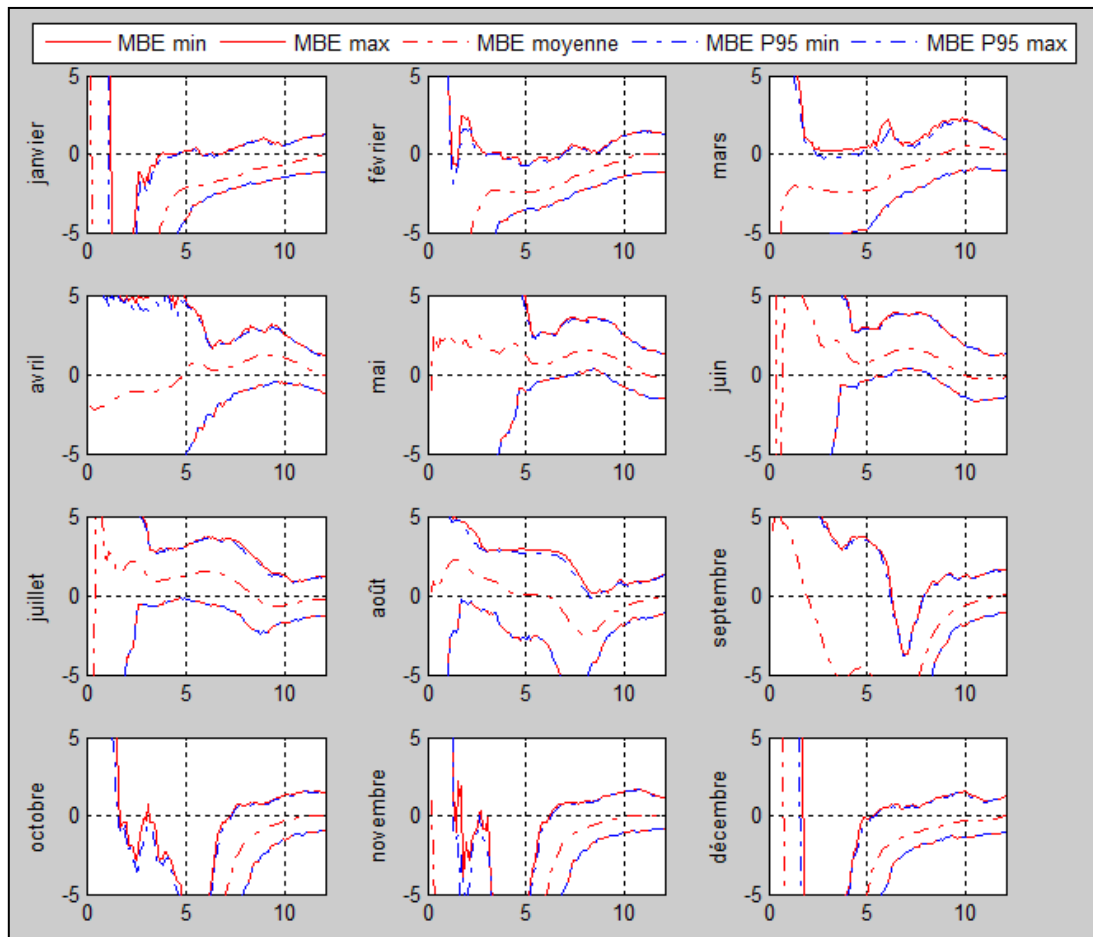


Figure 38 : Performance saisonnière du MBE pour la régression « sinus » du site LA ROCHE SUR YON.

Ces résultats laissent à penser que la caractérisation de l'erreur faite sur l'indice de clarté ainsi que les performances de la régression « sinus » proposée dans ce document sont applicables à des sites métropolitain situés sous des latitudes plus septentrionales.

11. CONCLUSIONS

11.1. RESULTATS

Les travaux réalisés au cours de cette thèse professionnelle ont permis de caractériser l'erreur faite par HelioClim-3 sur l'estimation de l'indice de clarté, pour 9 sites de la Région PACA en zone non montagneuse, et pour lesquels des mesures journalières du GHI sont disponibles. Il s'avère que l'erreur est composée d'une dérive ainsi que d'une sinusoïde prépondérante dont la période d'oscillation fluctue autour de 365 jours et dont le phasage est similaire quel que soit le site étudié. Cette caractérisation a permis de définir un algorithme d'étalonnage qui annule systématiquement le MBE et abaisse le RMSE à 3 % lorsque l'ensemble de la période concomitante des mesures est considérée (entre 5 et 6.5 années pour les 9 sites considérés).

Les mesures disponibles pour ces 9 stations MF ont permis de simuler un large éventail de campagnes de mesures, de durée inférieure à 18 mois et démarrant tout au long de l'année. Suite à l'analyse macroscopique des performances, il s'avère que les mois de Janvier à Mai sont les plus propices pour démarrer la campagne et obtenir de bons résultats, avec $|MBE|$ inférieur à 3 % (respectivement 5 %) après 9 mois de campagne (resp. 5 mois). De la même manière, le RMSE reste inférieur à 5 % (resp. 7%) après une campagne de 7 mois (resp. 5 mois).

Les performances de l'algorithme de calibration sont relativement stables quel que soit le site étudié et sont indépendantes des performances brutes de HC3 (*i.e.* sans étalonnage), à commencer par la station BORMES (MBE brut de 6.2 %) qui, à titre d'exemple, passe sous la barre des 3 % pour des campagnes de 3 mois débutant en février.

Les performances de l'étalonnage ayant été évaluées à l'aide de 9 stations de la Région PACA dont le MBE initial est compris entre 1.8 % et 6.2 %, il a été vérifié que la caractérisation des campagnes de mesures est également applicable pour un site présentant un biais initial plus élevé (HYERES-PLAGE dont le biais initial est de 13.1 %) ainsi que pour un site situé sous d'autres latitudes (LA ROCHE SUR YON en Vendée).

11.2. LIMITATIONS DES TRAVAUX

Les éléments précédents semblent indiquer une relative robustesse et efficacité de l'algorithme d'étalonnage. Il faut néanmoins nuancer ces propos pour les raisons suivantes :

- Seules 9 stations MF en zone non montagneuse ont été considérées pour la Région PACA ; il est toutefois difficile d'augmenter cet échantillon dans la mesure où les rares stations MF mesurant le GHI présentent de fortes disparités quant à la disponibilité de la mesure.
- L'algorithme d'étalonnage doit également être testé en Métropole sous de plus nombreuses latitudes (seul le site de LA ROCHE SUR YON a été testé) mais également dans d'autres pays dans lesquels le développement du PV est propice (Sud de l'Europe, Maghreb).
- Les résultats dépendent fortement de la qualité de la mesure et donc de l'entretien et de la calibration des instruments de mesure ; il faut donc constamment garder en tête que la référence utilisée n'est pas l'irradiation effective mais sa mesure !
- L'analyse du P95 n'est pas rigoureusement statistique dans la mesure où deux campagnes de mesures décalées dans le temps de quelques jours ne peuvent pas être parfaitement décorrélées.

11.3. NOW WHAT ?

Comme indiqué au chapitre 5.3 et malgré les limitations précédentes, les résultats obtenus au cours de cette thèse professionnelle constituent la base du premier volet de Recherche scientifique que porte SOLAÏS quant au diagnostic de la ressource solaire locale.

Outre l'application de cet algorithme à de vraies campagnes de mesures effectuées sur site, les travaux à venir sont de diverses natures, parmi lesquelles :

- L'étalonnage de l'irradiation diffuse horizontale (DHI) ainsi que l'irradiation dans le plan des modules à l'aide de ces mêmes campagnes de mesure ;
- La prise en compte des mesures des stations MF proches du site étudié (inférieur à 10 km) ;
- L'amélioration de l'algorithme sur le GHI à travers une meilleure estimation du Trouble de Linke (TL) traduisant l'opacité de l'atmosphère.

12. BIBLIOGRAPHIE

BIBLIO1	Ch. Budig, J. Orozaliev, Kl. Vajen. Comparison of Different Sources of Meteorological Data for Central Asia and Russia. <i>Conférence EUROSUN, Graz, Autriche, 2010.</i>
BIBLIO2	G.H. Lemieux, R. Bégin, D. Bégin, A. Arsenault, R. Perez. Cartographie par satellite de la ressource énergétique solaire au Québec. <i>23^{ème} symposium canadien sur la télédétection. Université Laval, Québec. Août 2001.</i>
BIBLIO3	A. Zelenka, R. Perez, R. Seals, D. Renne. Effective Accuracy of Satellite-Derived Hourly irradiance. <i>Theoretical and Applied Climatology 1999, 62, 199-207.</i>
BIBLIO4	M. Lefevre, J. Remund, M. Albuissou, L. Wald. Study of effective distances for interpolation schemes in Meteorology. <i>Geophysical Research Abstracts, vol. 4, Avril 2002.</i>
BIBLIO5	P. Ineichen. Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations. <i>Février 2011.</i>
BIBLIO6	H.G. Beyer, 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. <i>Project EU FP6 (CA – Contract No. 038665). 160 pp.</i>
BIBLIO7	D. Cano, J. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas, L. Wald. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. <i>Solar Energy, 1986, 37, 31-39.</i>
BIBLIO8	Ph. Blanc, B. Gschwind, M. Lefevre, L. Wald. The HelioClim Project: Surface Solar Irradiance Data for Climate Applications. <i>Remote Sensing 2011, 3, 343-361.</i>
BIBLIO9	Ph. Blanc. Atlas du potentiel solaire photovoltaïque et thermodynamique en Région PACA. <i>18 janvier 2011.</i>

13. ACRONYMES

CC	Coefficient de Corrélacion
CEP	Centre Energétique et Procédés
DHI	Diffuse Horizontal Irradiation
GHI	Global Horizontal Irradiation
HC3	HelioClim-3
MAE	Mean Absolute Error
MBE	Mean Bias Error
MF	Météo France
MFG	Meteosat First Generation
MSG	Meteosat Second Generation
PACA	Provence Alpes Côte d'Azur
PV	PhotoVoltaïque
RMSE	Root Mean Square Error
STDE	STandard Deviation Error
TL	Trouble de Linke
TOA	Top Of Atmosphere
TRI	Taux de Rentabilité Interne

14. ANNEXES

14.1. RESULTATS DE L'ETALONNAGE « SINUS » EN ZONE NON MONTAGNEUSE

Les figures suivantes présentent les résultats de l'étalonnage « sinus » pour les 9 stations de la zone non montagneuse.

Cette représentation multidimensionnelle s'interprète de la manière suivante :

- L'axe des abscisses indique un début de campagne de mesures entre les années 2004 et 2009 (une ligne verticale le 1^{er} de chaque mois, la ligne correspondant au 1^{er} janvier étant continue) ;
- l'axe des ordonnées indique la durée de la campagne en mois (12 mois maximum) ;
- la couleur indique la valeur de $|MBE|$, valeur absolue du biais de l'estimation du GHI journalier après étalonnage des 7 années de données HC3. $|MBE|=0\%$ en bleu ; $|MBE|=5\%$ en rouge ;
- les campagnes donnant des résultats supérieurs à 5 % ne sont pas affichées.

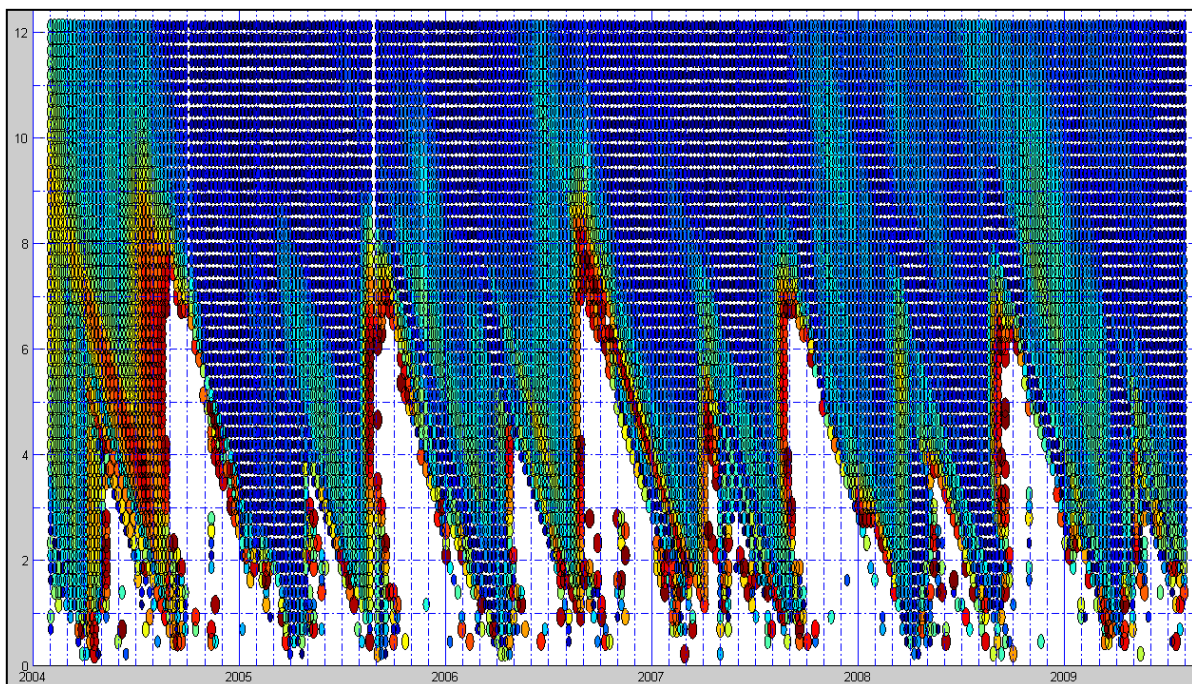
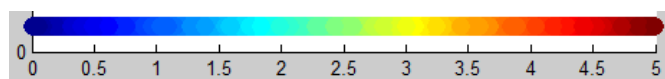


Figure 39 : $|MBE|$ après étalonnage « sinus » - AIX

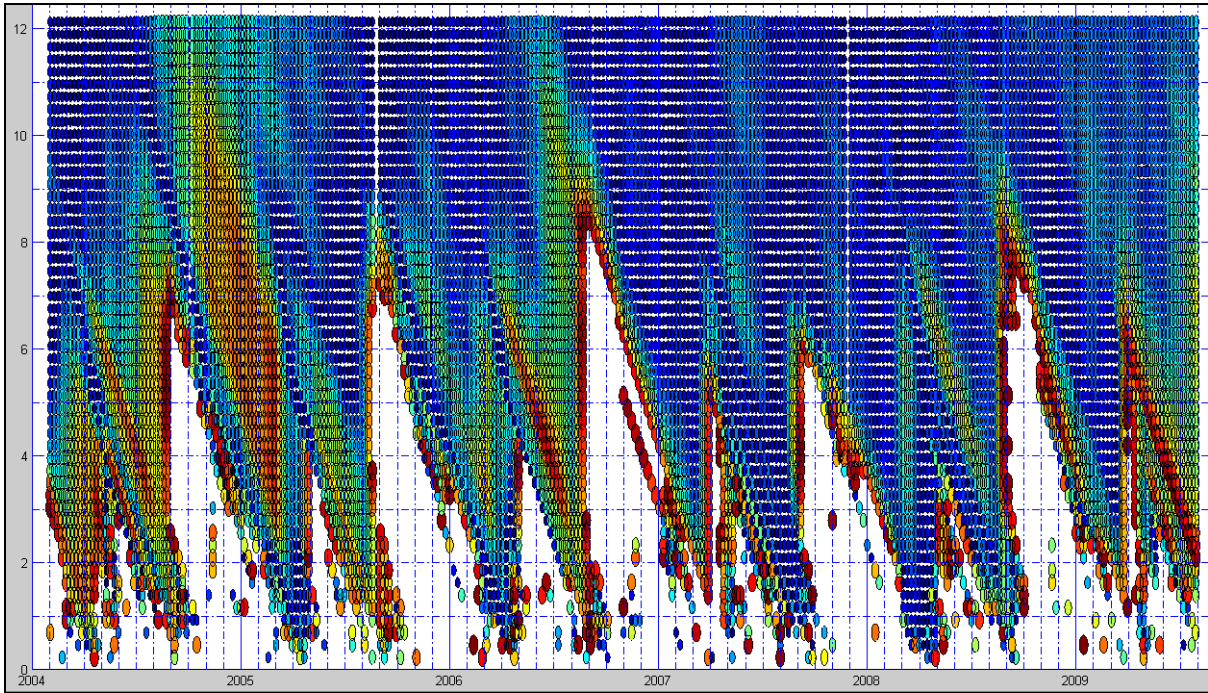


Figure 40 : $|MBE|$ après étalonnage « sinus » - ARLES.

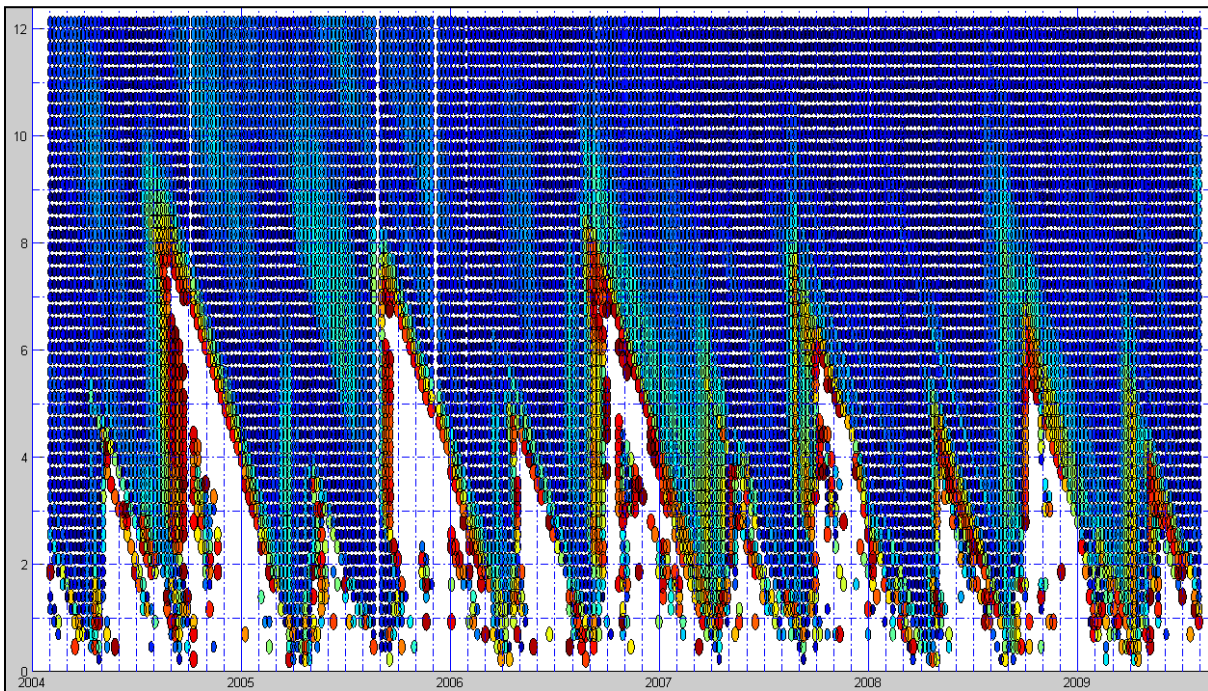


Figure 41 : $|MBE|$ après étalonnage « sinus » - BORMES.

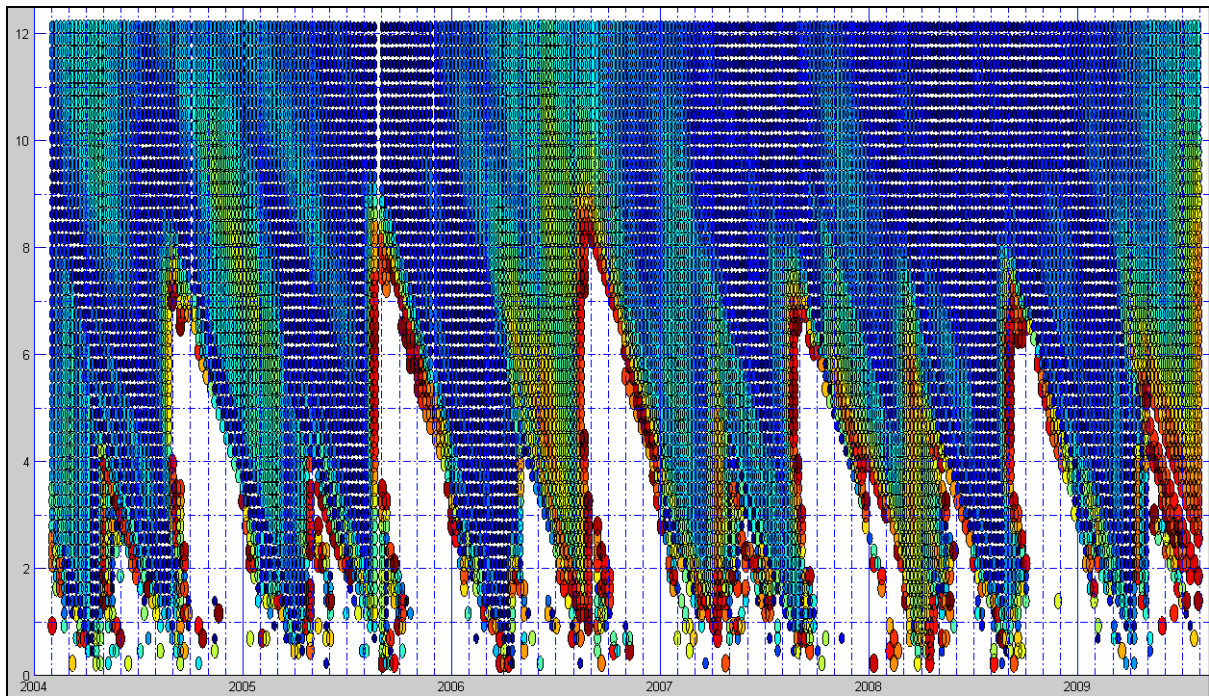


Figure 42 : |MBE| après étalonnage « sinus » - CABRIERES.

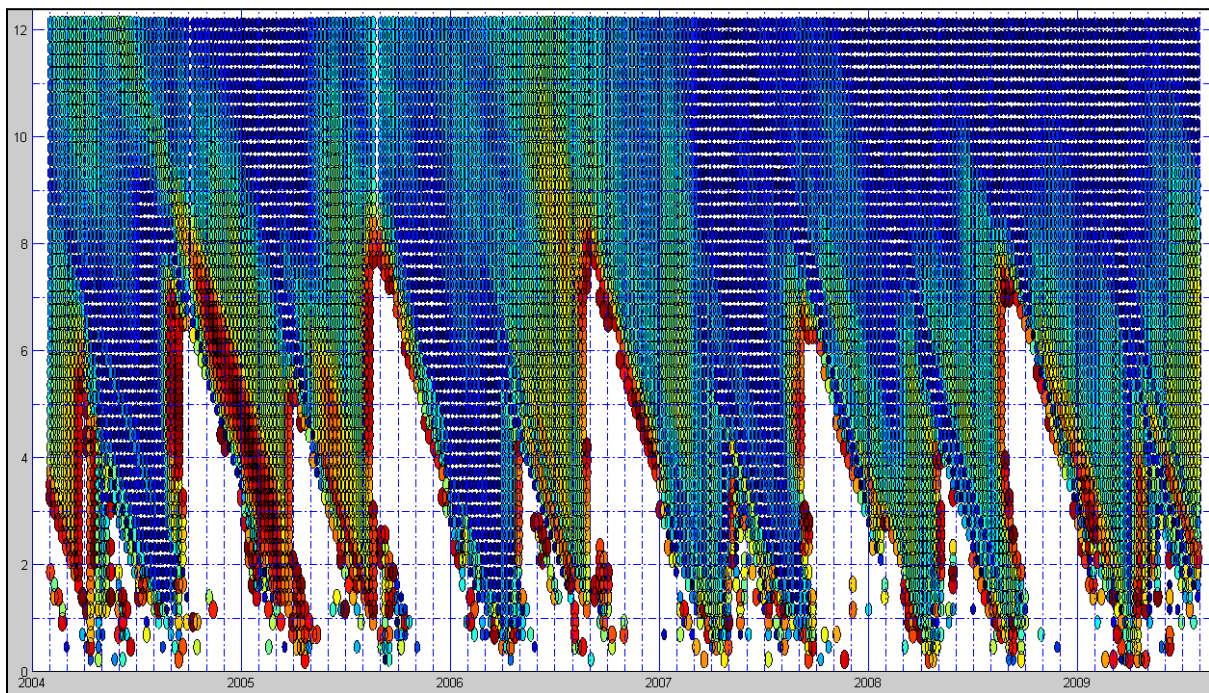


Figure 43 : |MBE| après étalonnage « sinus » - CARPENTRAS.

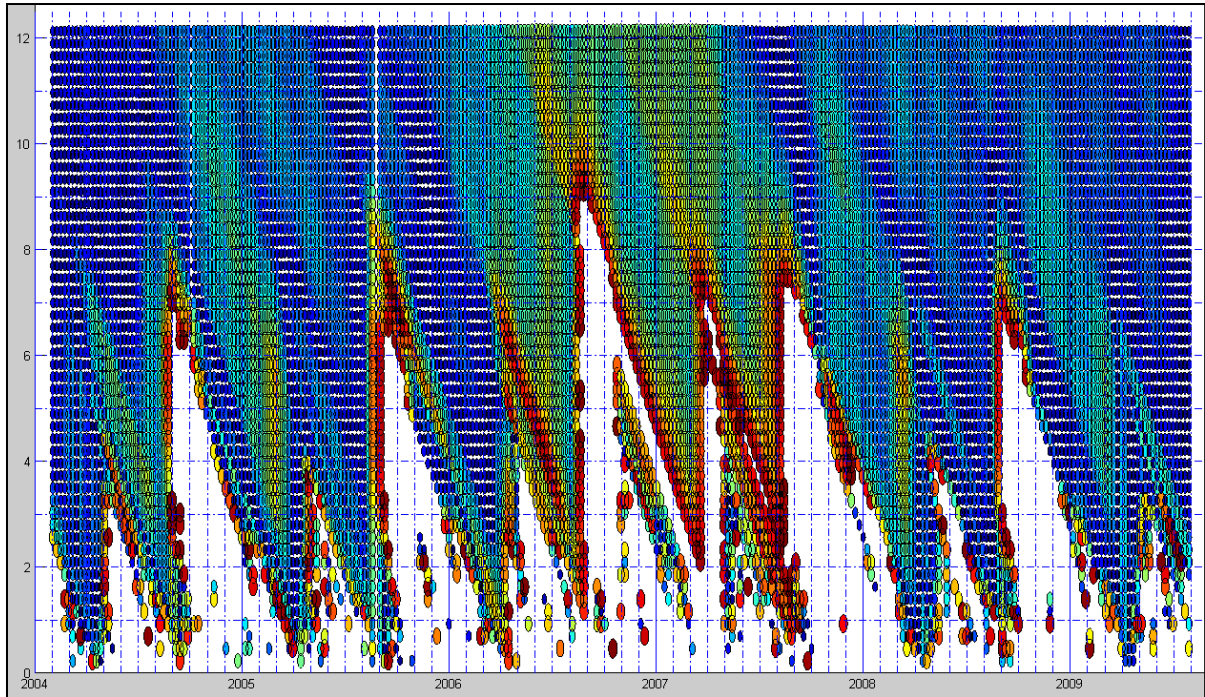


Figure 44 : $|MBE|$ après étalonnage « sinus » - MARGNANE.

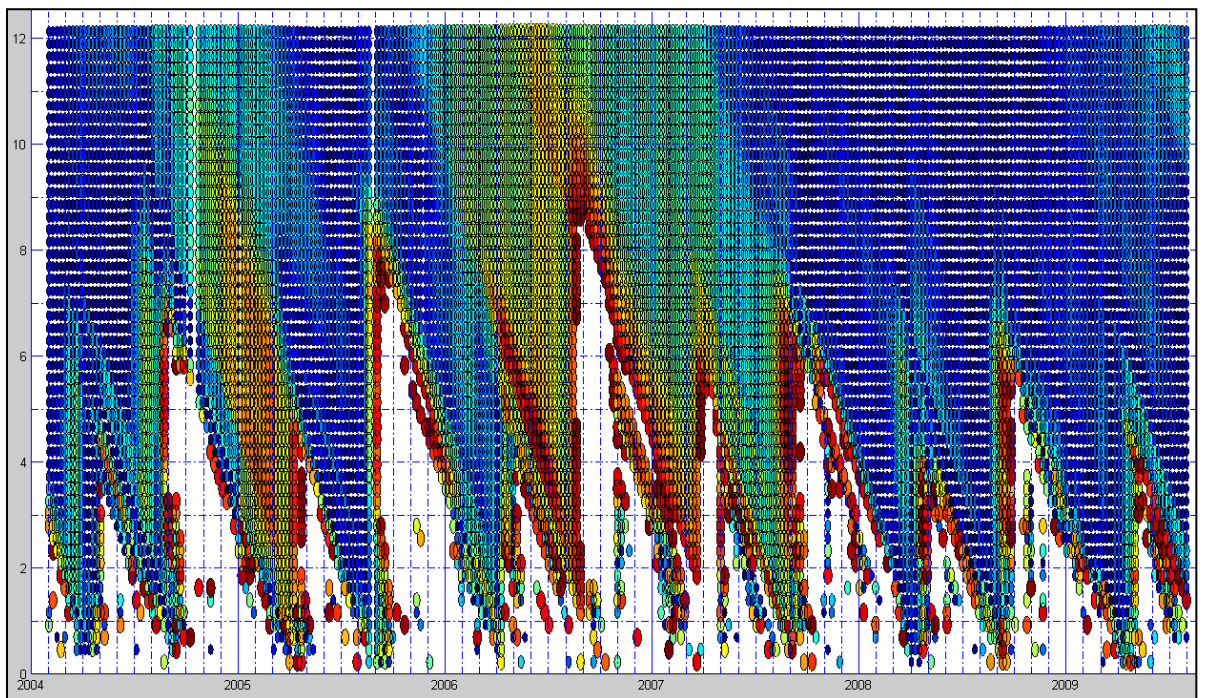


Figure 45 : $|MBE|$ après étalonnage « sinus » - MARSEILLE.

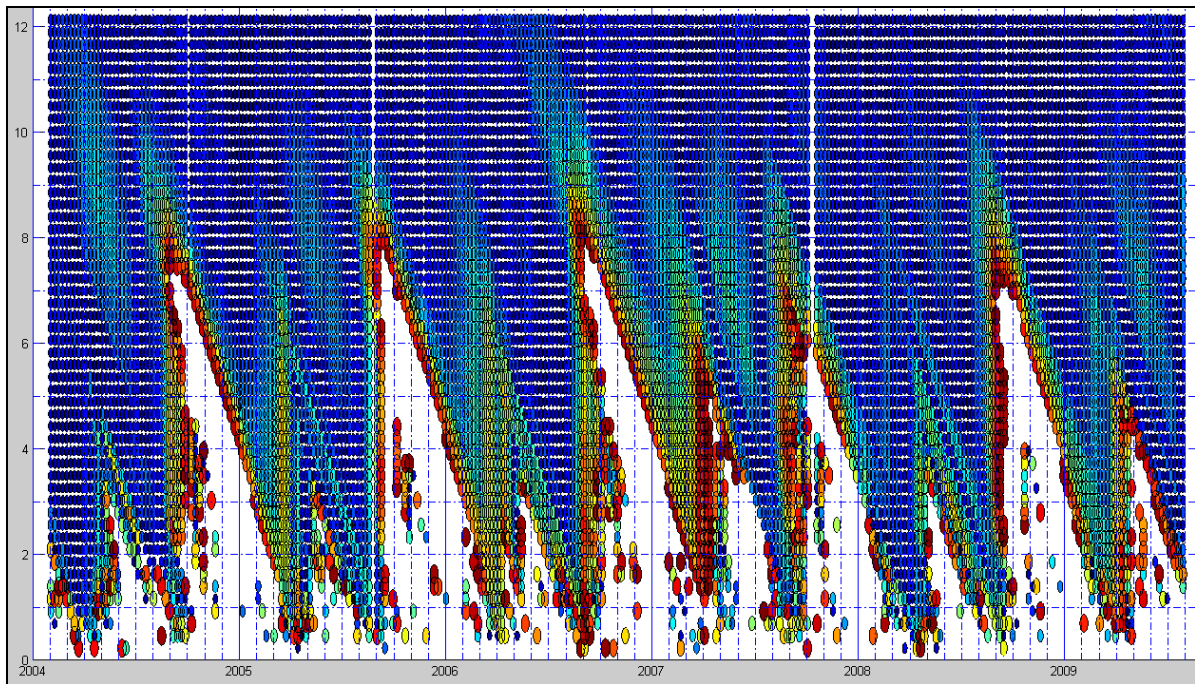


Figure 46 : $|MBE|$ après étalonnage « sinus » - NICE.

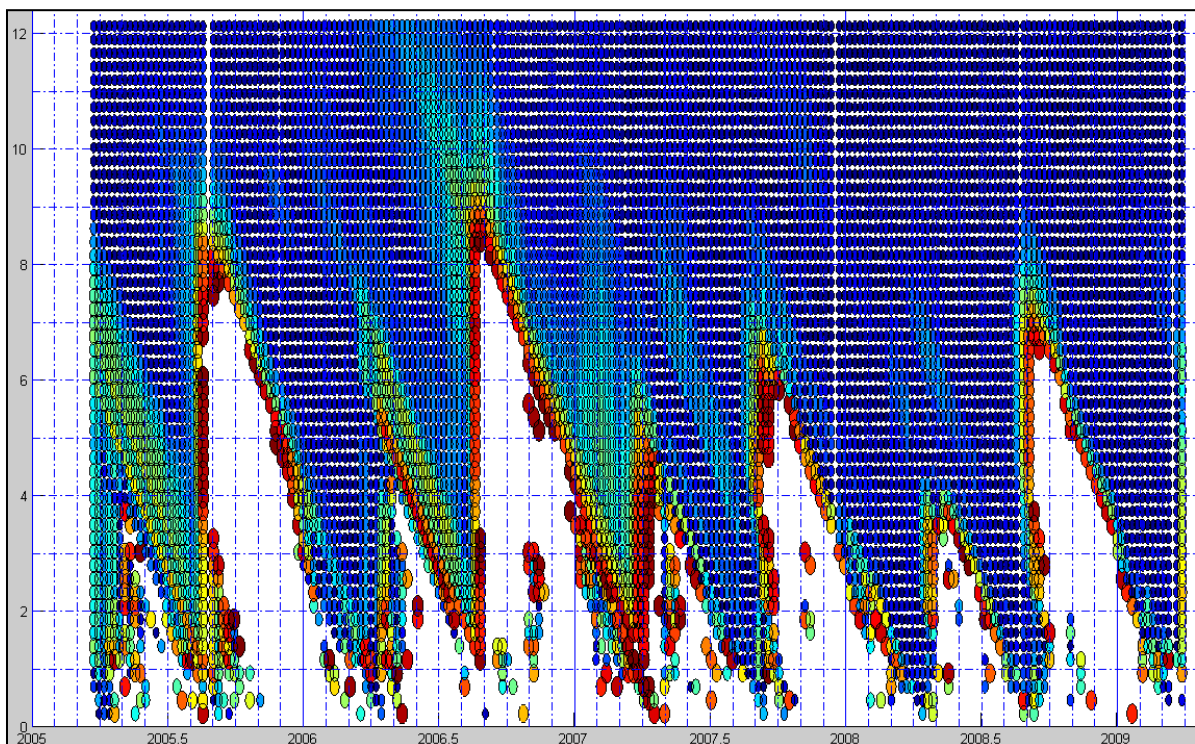


Figure 47 : $|MBE|$ après étalonnage « sinus » - VINON.

Une autre représentation permettant de connaître plus précisément les valeurs des MBE est disponible ci-après ; elle s'interprète de la manière suivante :

- chaque cadran représente le mois de l'année (correspondant au début de la campagne) pour lequel sont disponibles en moyenne 442 séries de données (soit une cinquantaine de séries par stations MF) ;
- l'axe des abscisses indique la durée de la campagne en mois (18 mois maximum) ;

- l'axe des ordonnées indique la valeur du MBE (et non le |MBE| comme précédemment) de l'estimation du GHI journalier après étalonnage des 7 années de données HC3 ;
- sont représentées les valeurs *min*, *max*, *moyenne* et *P95* (percentile 95, *i.e.* l'intervalle dans lequel figurent 95 % des MBE).

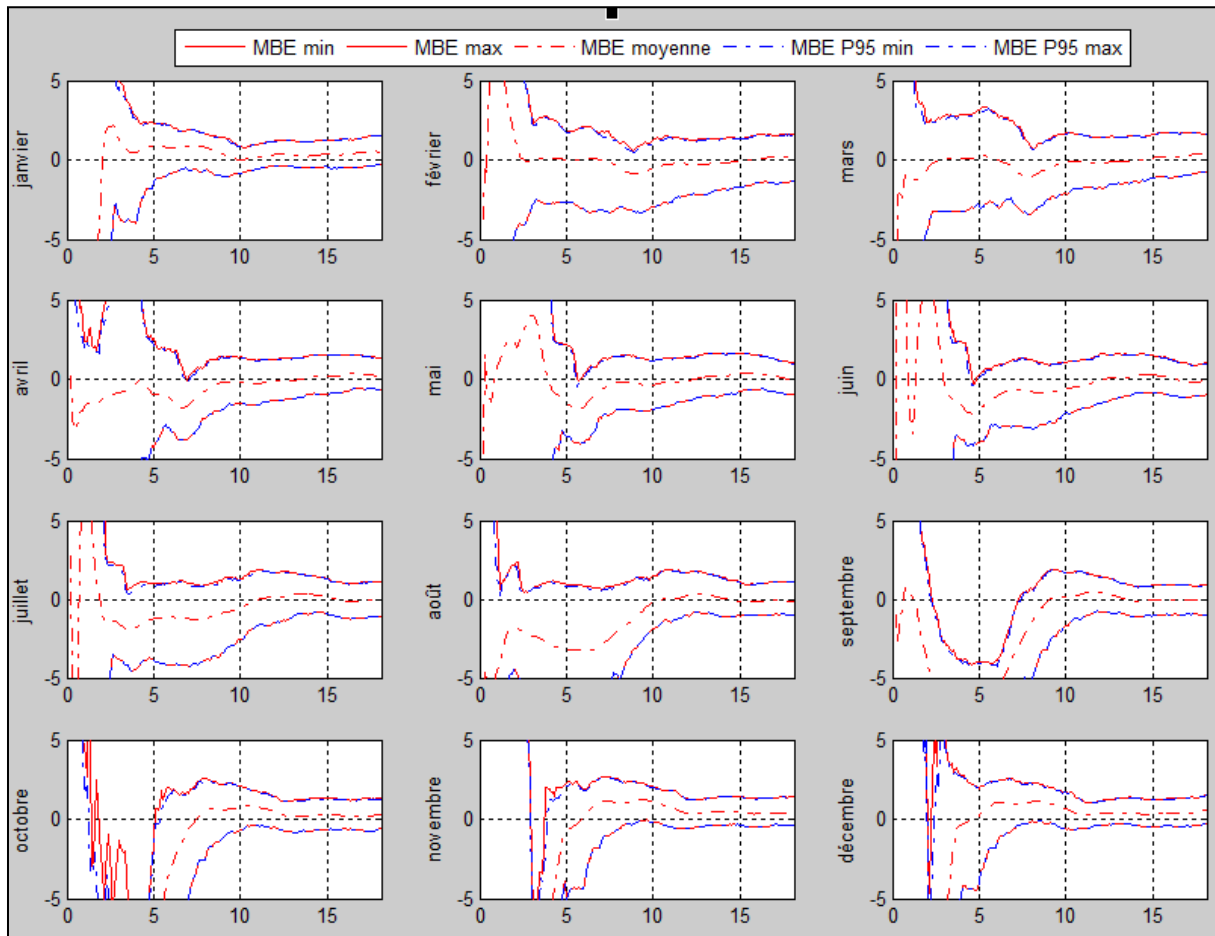


Figure 48 : MBE après étalonnage « sinus » - AIX.

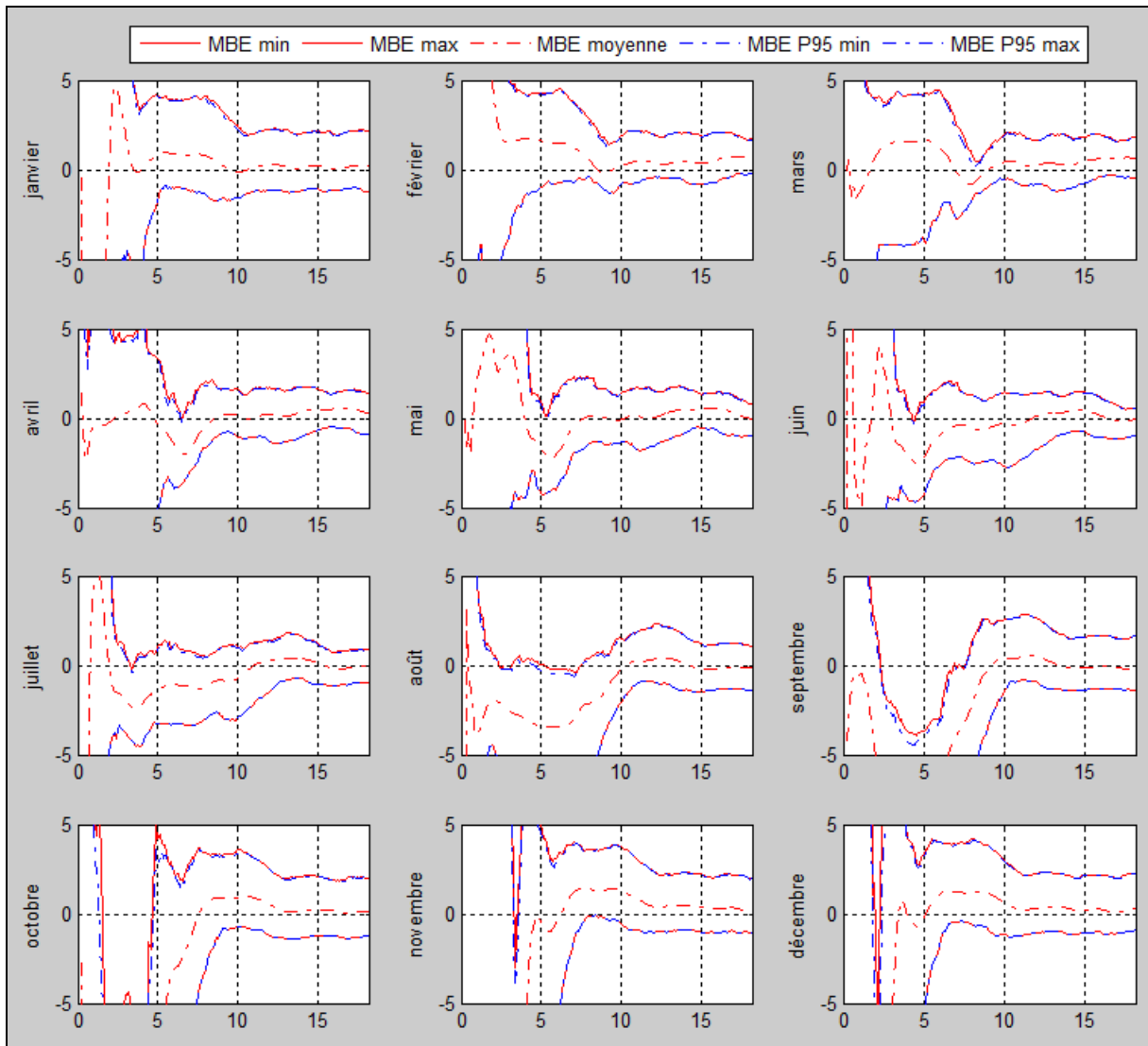


Figure 49 : MBE après étalonnage « sinus » - ARLES.

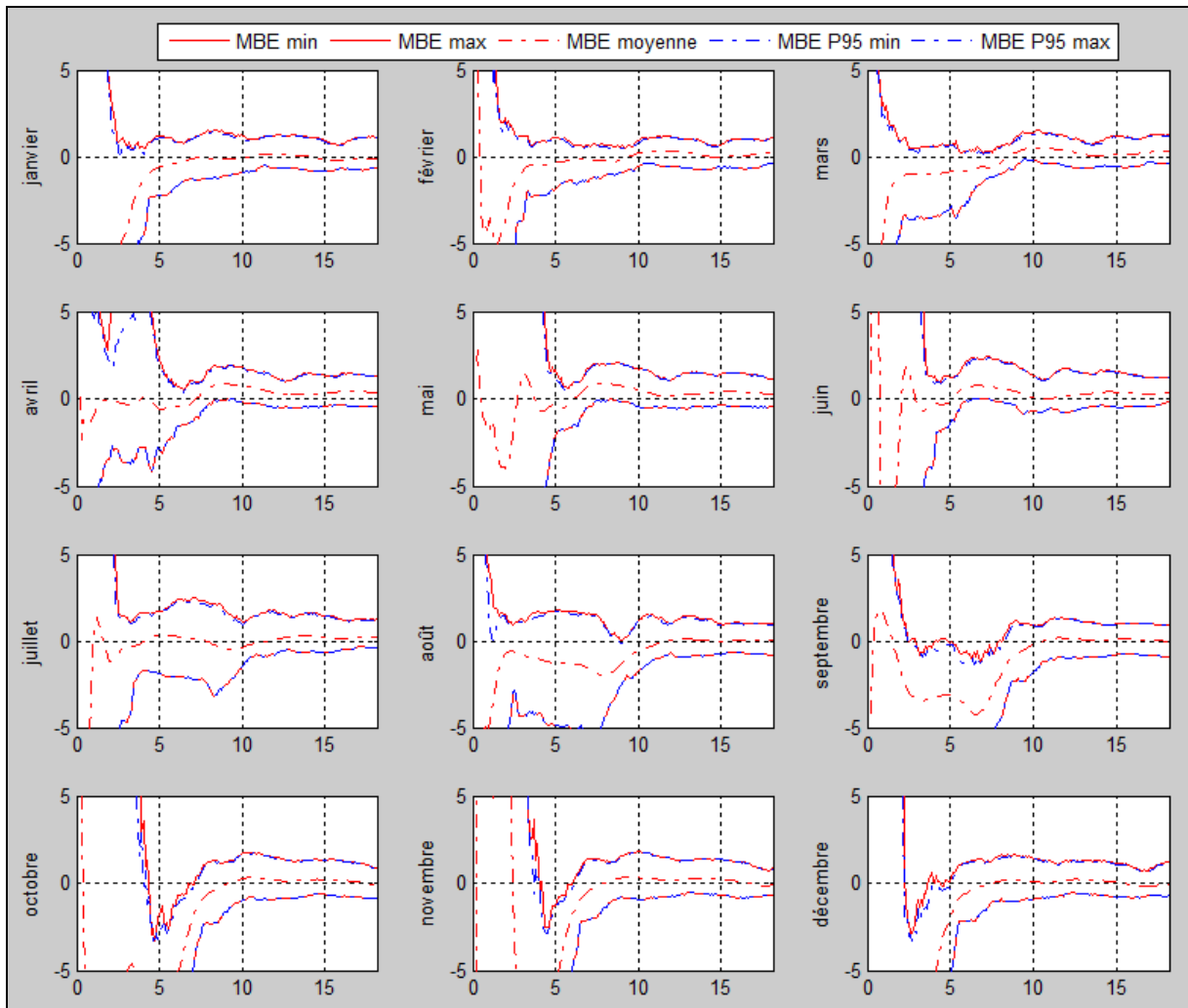


Figure 50 : MBE après étalonnage « sinus » - BORMES.

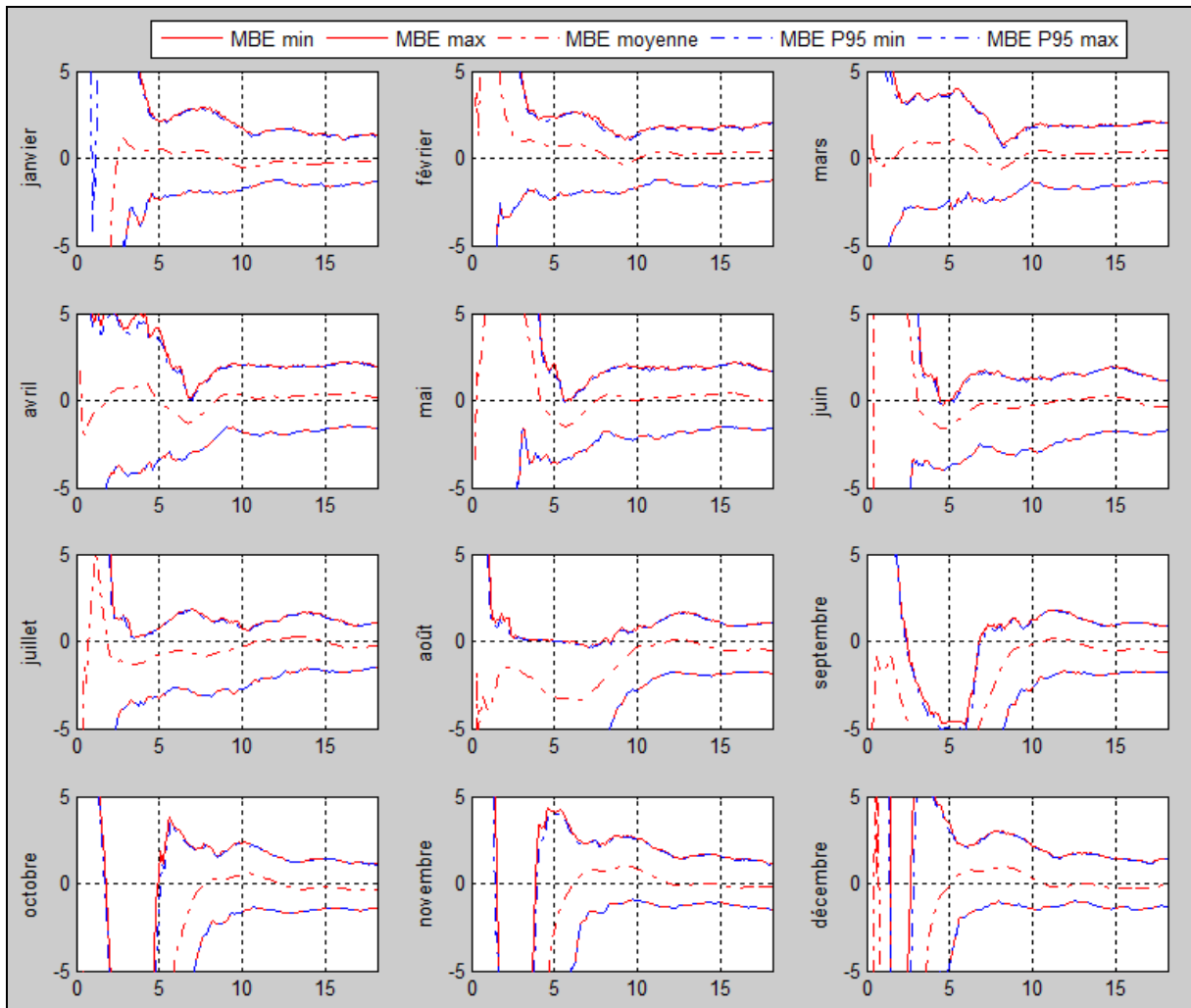


Figure 51 : MBE après étalonnage « sinus » - CABRIERES.

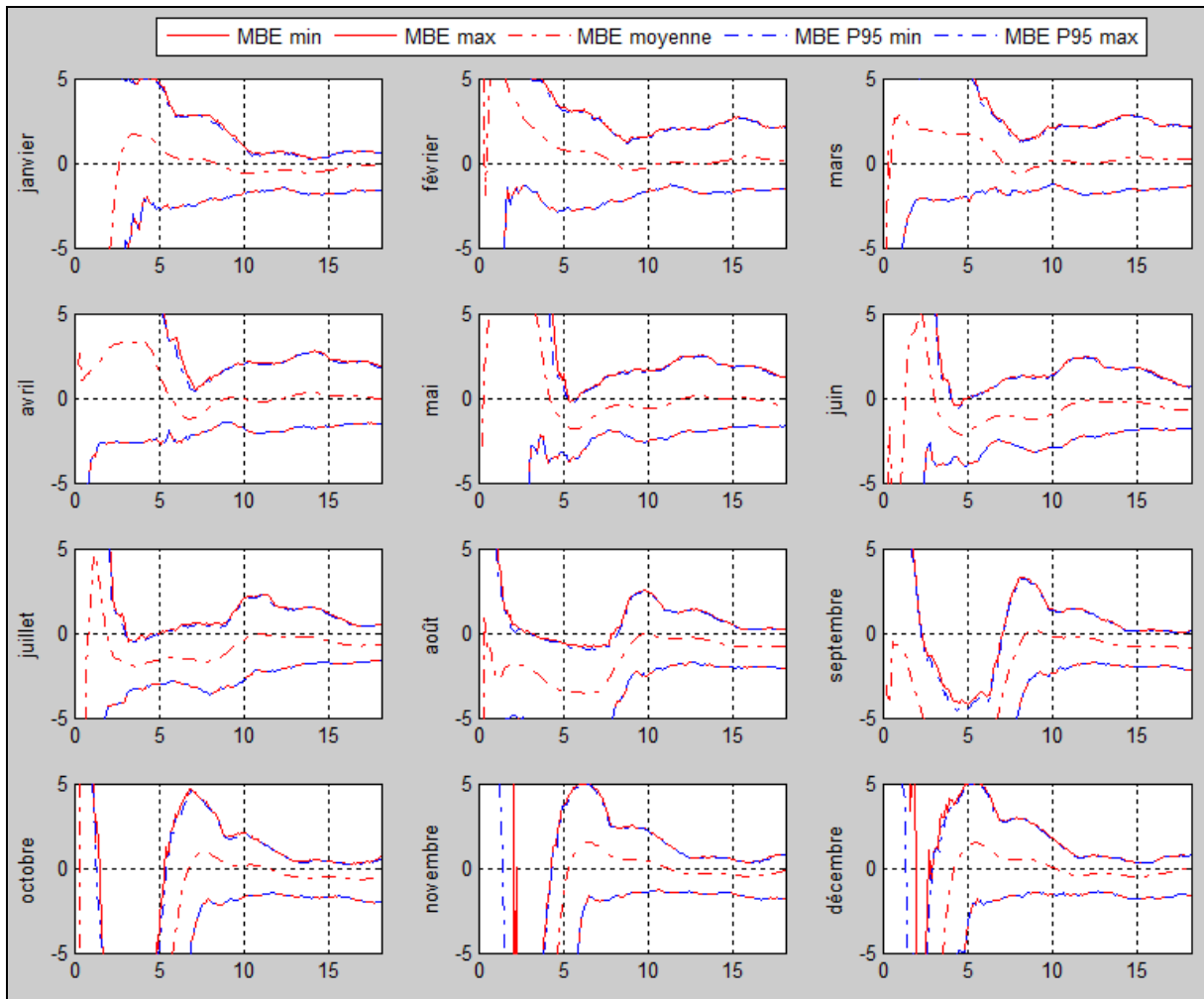


Figure 52 : MBE après étalonnage « sinus » - CARPENTRAS.

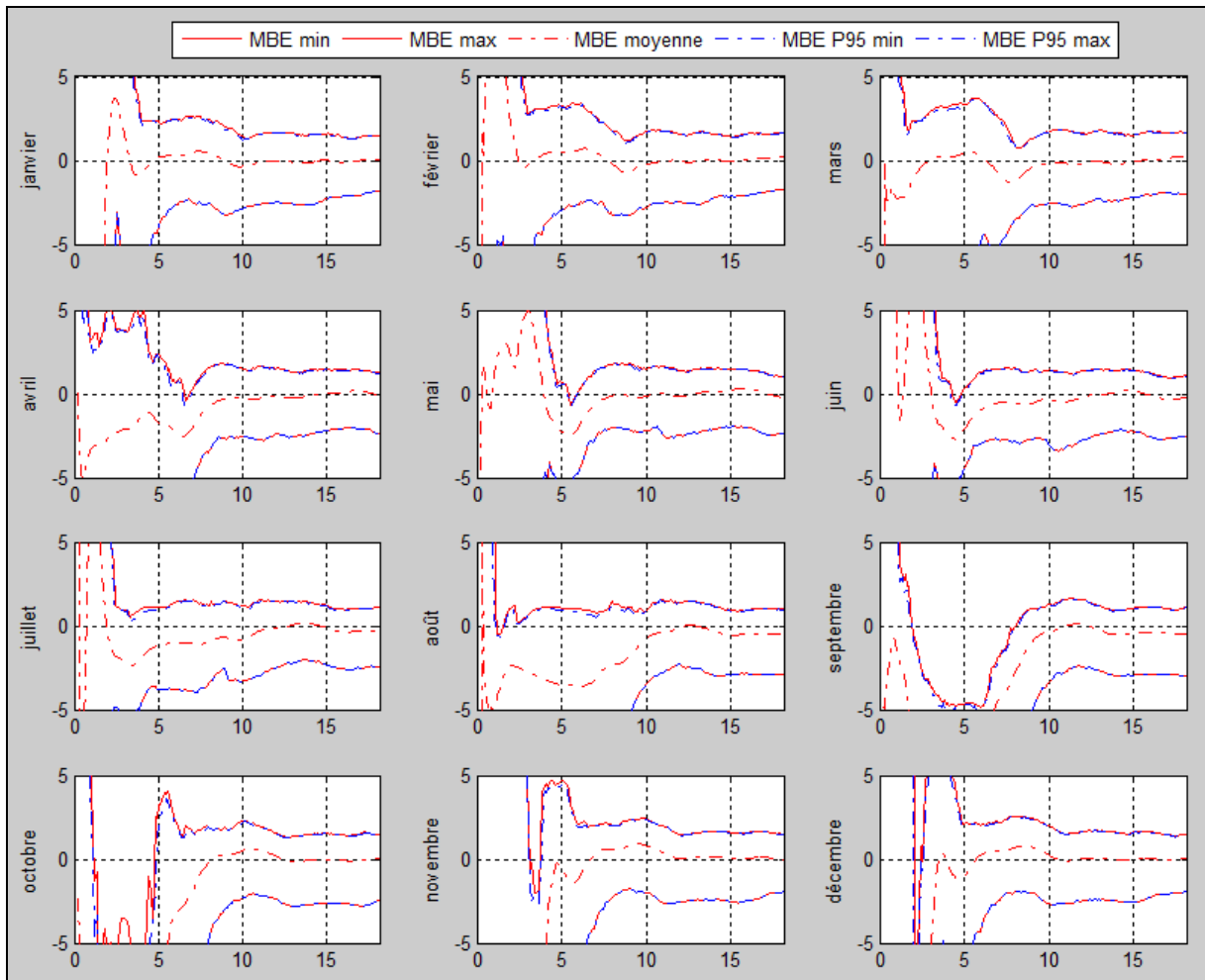


Figure 53 : MBE après étalonnage « sinus » - MARIGNANE.

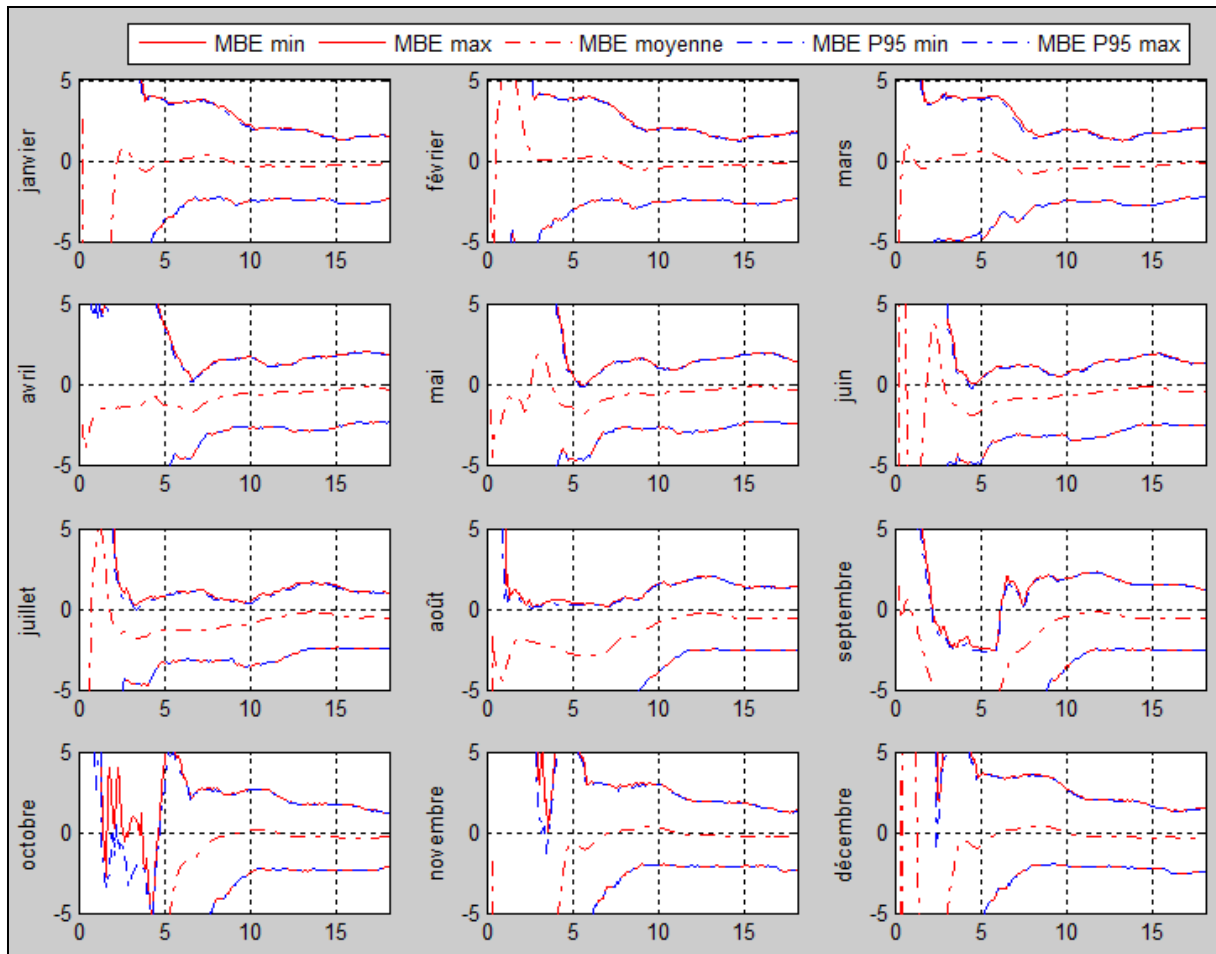


Figure 54 : MBE après étalonnage « sinus » - MARSEILLE.

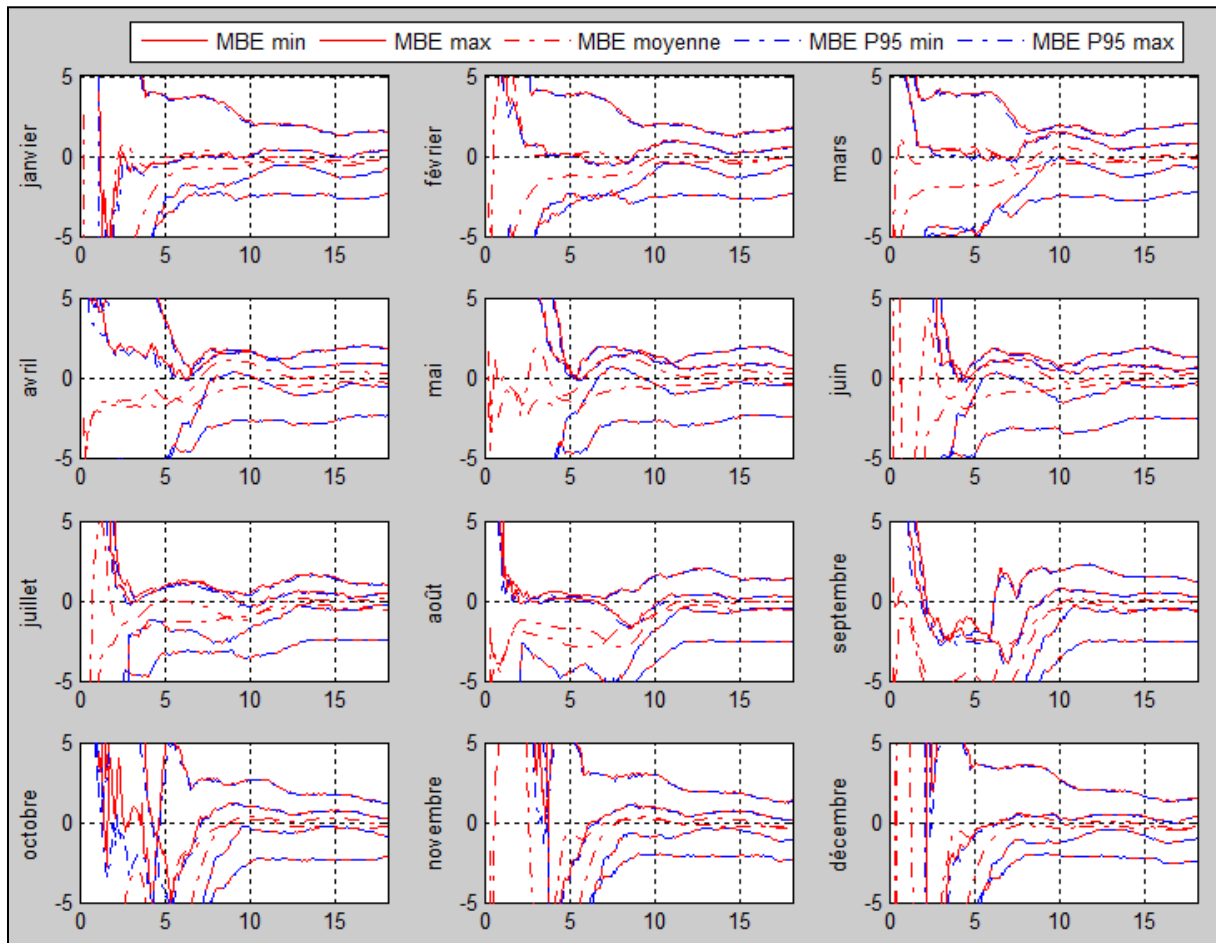


Figure 55 : MBE après étalonnage « sinus » - NICE.

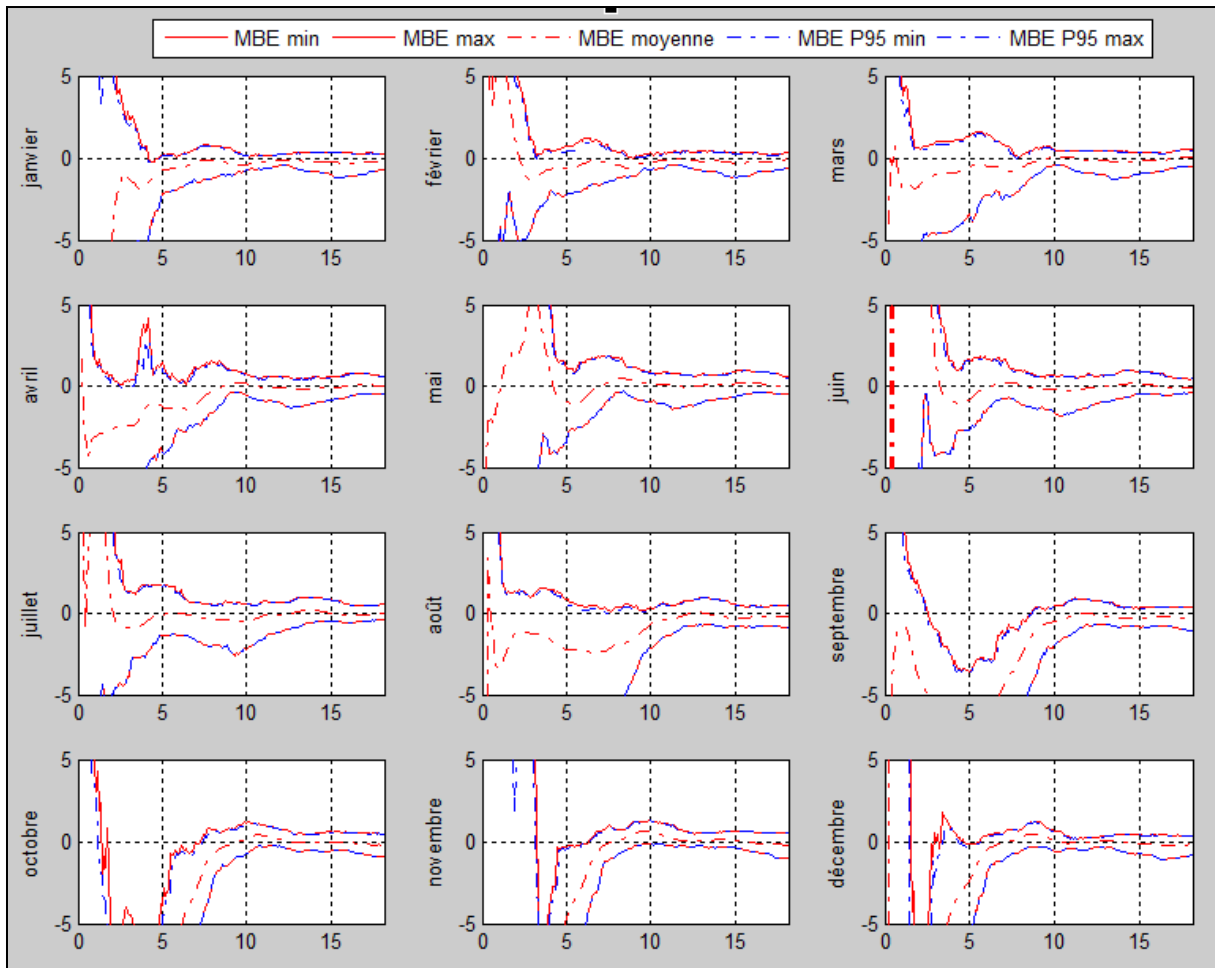


Figure 56 : MBE après étalonnage « sinus » - VINON.