

# UTILISATION DE MÉTÉOSAT ET DE MÉTHODES STATISTIQUES POUR LE CONTRÔLE DES DONNÉES DE RAYONNEMENT GLOBAL

F. HUARD

INRA – AgroClim, Domaine Saint Paul - Site Agroparc, 84914 AVIGNON Cedex 9  
huard@avignon.inra.fr

## Résumé

Le contrôle des mesures de rayonnement global est une opération délicate en raison de la structure des différents réseaux en France (maillages irréguliers, faible nombre de points d'observation au sol...), et de la forte variabilité spatiale et temporelle de l'irradiation solaire. Il n'existe pas de procédures de contrôle, de validation ou de correction satisfaisantes qui puissent être utilisées en routine au pas de temps quotidien. L'objectif de ce travail est de développer une approche méthodologique permettant l'analyse de la variabilité spatio-temporelle du rayonnement global et la mise au point de procédures de contrôle en "temps réel" des mesures issues du réseau agro-météorologique de l'INRA.

L'extrapolation spatiale du rayonnement, largement utilisée dans le cadre de la gestion de réseaux, ne semble pas en effet, au vu des résultats dans trois régions testées en France (Sud-Est, Sud-Ouest et Bretagne), être une méthode satisfaisante compte tenu de la distance inter-postes moyenne relativement importante (observation d'ailleurs valable pour l'ensemble de la France). L'utilisation directe des données quotidiennes d'irradiation issues du satellite MétéoSat et à partir de la méthode Heliosat 2 peut être un moyen efficace de contrôle des données au sol sous certaines conditions. En effet, si la précision moyenne est de l'ordre 17%, les résultats varient selon les régions et les saisons (7% l'été dans le Sud-Est contre 25% l'hiver dans le Sud-Ouest par exemple). Le krigeage, permet par contre d'améliorer la précision des reconstitutions, elle est de 14% en moyenne mais le gain peut atteindre 8% dans le Sud-Ouest en moyenne l'hiver. L'utilisation du krigeage en routine est par contre freinée par sa lourdeur.

Enfin, l'hypothèse selon laquelle la structure spatiale des champs de rayonnement issus de MétéoSat pourrait être utilisée en la combinant à un point de mesure pour estimer une valeur en n'importe quel site a été testée mais n'a pas abouti à des résultats satisfaisants.

Le bilan de cette étude a permis d'estimer les distances inter-postes critiques au delà desquelles les différentes méthodes de reconstitution trouvent leurs limites. Ainsi, il semble que pour toute estimation pour un point distant de plus d'une vingtaine de kilomètre d'un site de mesure, l'estimation utilisant les données de MétéoSat est préférable à toute autre méthode en dehors de l'interpolation par krigeage.

**Mots-clés :** rayonnement global, MétéoSat, extrapolation, interpolation, distance critique.

## Abstract

### Using MeteoSat and statistical methods for the control of global radiation data

The monitoring of solar radiation data is very difficult because of the poor number of measurements and an irregular spaced network. There is no satisfactory daily routine method for monitoring, validation or correction. The goal of this study is to develop a methodological approach to analyze the time-space variability of daily solar radiation and to finalize a control procedure for data in real time for the INRA agro-meteorological network.

Extrapolation don't seem be, in the light of results in three areas in France (South-East, South-West and Bretagne), a good method considering the great inter-station distance. The use of MeteoSat satellite data can be the solution in some situations to substitute missing daily data in the databases. In effect, the precision of the MeteoSat data is around 17%, but results varies according the area and/or the season (precision about 7% the summer in the South-East and about 25% during the winter in the South-West for example). Kriging is a geostatistical method of interpolation and can be used to improve the quality of the estimation of solar radiation in stations without measurements : the precision is on average about 14% but the gain can reach 8% in relative for example during the winter in the South-West. But use of kriging in a daily routine is limited because of his heaviness.

Lastly, we suggest the possibility that, even if the MeteoSat data are biased, the space organisation of the MeteoSat solar radiation fields is coherent. The estimations, using one station with his measurement and applying the daily MeteoSat solar radiation field, are not very good by comparison with the measurements in the other stations.

The objective of this study was also to determine a critical distance beyond that the relationship between sites become uncertain and methods are not available. For the estimation of daily solar radiation to one site more than 20 km away, the use of the MeteoSat data is on average the best solution if it's not possible to interpolate data with kriging.

## Introduction

L'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) gère sur l'ensemble du territoire français un réseau agrométéorologique composé d'une soixantaine de stations équipées de pyranomètres pour la mesure du rayonnement global. Les capteurs font l'objet d'un étalonnage annuel et les mesures sont validées avant d'alimenter une Base de Données. Cependant, compte tenu de la structure spatiale du réseau qui n'a pas de vocation synoptique, mais aussi en raison du nombre restreint d'autres réseaux, les procédures de contrôle et de correction ne répondent pas totalement aux besoins d'une gestion optimale. La reconstitution de valeurs journalières manquantes ou erronées reste un problème aigu pour lequel l'utilisation de méthodes statistiques spatiales n'est pas toujours possible. Une étude a donc été initiée afin d'évaluer, d'une part, les estimations de rayonnement global issues du satellite MétéoSat et, d'autre part, plusieurs techniques statistiques et géostatistiques de reconstitution.

## 1. Données

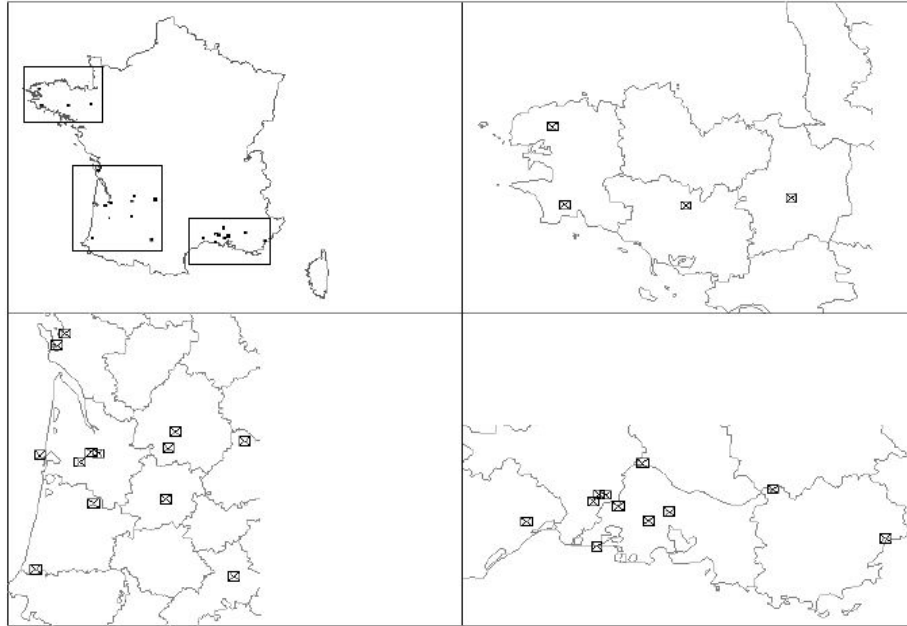
### 1.1 Données au sol

Trois régions expérimentales à climat et densité de points de mesures différents ont été considérées à l'intérieur desquelles des pyranomètres mesurent le rayonnement global dans le cadre du réseau agrométéorologique de l'INRA (figure 1) :

le Sud-Ouest (13 stations) ;

le Sud-Est (11) ;

la Bretagne (4).



**Figure 1:** Localisation des trois régions d'étude. *Locations of the 3 study areas.*

Les mesures sont réalisées par des stations automatiques équipées d'un capteur classe 1 ou 2 OMM (pyranomètres Kipp&Zonnen CM6B et Cimel CE180, à thermopile avec une étendue de mesure des longueurs d'onde de 0,3 à 3  $\mu\text{m}$ ). Les appareils présentent une précision de 5% et sont étalonnés chaque année par un service spécialisé de l'INRA. Les dérives observées sont toujours inférieures à 2%.

### 1.2 Données MétéoSat-Soda

Les données MétéoSat sont extraites du serveur SoDa (Solar radiation Database for environment, [www.soda-is.com](http://www.soda-is.com)) mis en place par l'Ecole Nationale Supérieure des Mines.

Le traitement des images est effectué à partir de la méthode Héliosat 2, également développée par l'ENSM (Wald et al. 2002, Wald 2000, Rigollier 2000, Cros 2004).

Le serveur SoDa permet l'accès aux données à une résolution spatiale de 5 à 250 km (pixels de 5 km de côté pour la France) et à pas de temps horaire minimum. Les données quotidiennes sont associées à un code de disponibilité (ou de fiabilité) qui varie de 0 à 5 et correspond au taux d'images utilisées pour l'estimation quotidienne. Les valeurs de rayonnement estimées à partir de moins de 40% d'images ne sont pas délivrées (indices inférieurs à 2).

La précision, en terme de RMSE relatif calculé sur 60 sites européens et 30 sites africains de juillet 1994 à juin 1995, est de 24% pour les données horaires, 18% pour les quotidiennes, 13% pour les décadaires et 12% pour les mensuelles (Wald 2000).

## 2. Méthodes

### 2.1 Evaluation des données MétéoSat

Dans un premier temps, les estimations MétéoSat ont été directement comparées aux mesures pyranométriques au cours de la période 2000-2003 sur l'ensemble des sites, en considérant les mesures au sol comme références. Ce premier point pose le problème de la signification spatiale des comparaisons, car cela revient à comparer la valeur d'une zone moyennement spatialisée à une valeur ponctuelle. Or la taille de la surface moyennée a une forte influence sur la différence (Pinker et Laszlo, 1991).

### 2.2 Extrapolations

Les extrapolations sont obtenues en utilisant des couples de points de mesures au sol. Pour la région test du Sud-Est, on compte ainsi un jeu de 55 couplets (11 stations), 78 dans le Sud-Ouest (13 stations) et 6 en Bretagne (4 stations). Les équations de régression sont calculées sur la période 2000-2002 puis appliquées sur les données de l'année 2003. Les résultats ainsi obtenus sont ensuite comparés aux mesures.

### 2.3 Interpolations

Plusieurs techniques d'interpolation peuvent être utilisées. La plus simple s'appuie sur l'inverse du carré de la distance inter-poste. Cependant, pour être efficace, cette méthode doit s'appuyer sur un réseau de points répartis régulièrement dans l'espace, ce qui n'est pas le cas ici. De fait, le krigeage universel a été préféré et testé malgré la relative lourdeur de sa mise en œuvre. Pour valider les reconstitutions, la valeur de chaque point a été estimée à partir des (n-1) points restants puis comparée à sa valeur mesurée.

### 2.4. Structure spatiale de MétéoSat

Il s'agit de reconstituer des séries de rayonnement global à partir d'un point de mesure et d'appliquer la variabilité spatiale des champs observés à partir des images MétéoSat :

$$*R_{g_j} = R_{g_i} \cdot [MS_i/MS_j]$$

avec  $*R_{g_j}$  le rayonnement global estimé en un point  $j$  quelconque,  $R_{g_i}$  le rayonnement mesuré au point de référence  $i$ ,  $MS_i$  et  $MS_j$  les estimations MétéoSat des rayonnements au point de référence  $i$  et aux points quelconques  $j$ .

## 3. Résultats

### 3.1. Evaluation des données MétéoSat

Les résultats indiquent un RMSE moyen (Root Mean-Square Error : racine carrée de l'écart quadratique moyen) de 17% pour l'ensemble des sites, confirmant ainsi les estimations trouvées dans la littérature. Toutefois, on note une variabilité importante, tant géographique que temporelle. Ainsi, les résultats s'avèrent meilleurs dans le réseau Sud-Est, moins bons dans le Sud-Ouest et décevants en Bretagne (tableau 1) :

RMSE %	Sud-Est	Sud-Ouest	Bretagne
Moyen	12	18	21
Indice 2	17	25	29
Indice 3	14	18	23
Indice 4	7	16	19

**Tableau 1 :** Evaluation de la qualité des estimations MétéoSat en fonction de l'indice de disponibilité des mesures. *Evaluation of the quality of MeteoSat estimations according to the data availability index.*

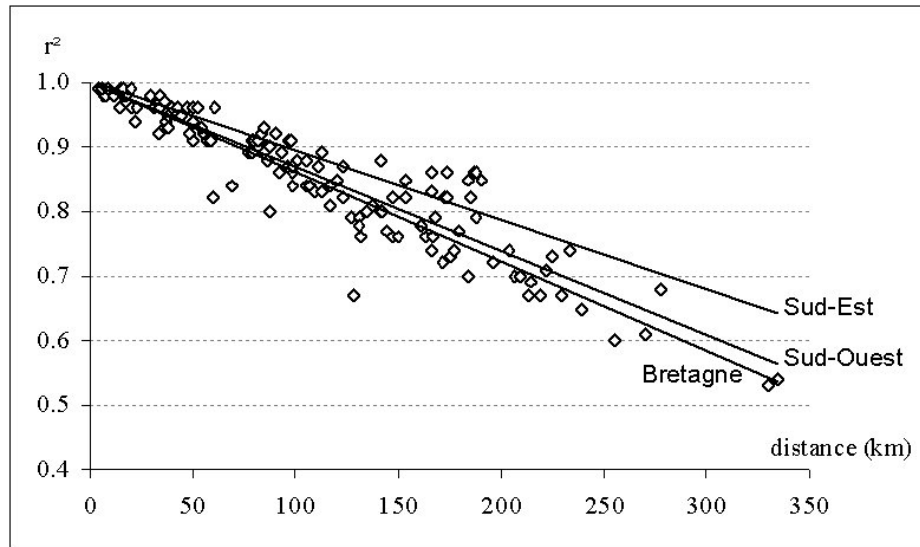
Les estimations MétéoSat sont également liées à l'indice de disponibilité. Une relation étroite existe entre les indices de disponibilité et les types de temps. Ainsi, un indice de type 2 traduit plutôt une situation météorologique perturbée avec un ensoleillement limité (inférieur à 1000 joules/cm<sup>2</sup>/jour) ; à l'inverse un indice au moins égal à 4 est associé à la période estivale et de fortes valeurs de rayonnement, supérieure généralement à 2000 joules/cm<sup>2</sup>/jour (tableau 2). Les gisements solaires contrastés selon les régions expliquent de fait les disparités régionales des résultats.

Rg (joules/cm <sup>2</sup> /jour)	Sud-Est	Sud-Ouest	Bretagne
Moyen	1842	1480	1447
Indice 2	855	639	615
Indice 3	1610	1364	1292
Indice 4	2678	2064	1961

**Tableau 2 :** Valeurs moyennes du rayonnement sur les régions d'étude associées à l'indice de disponibilité. *Average values of radiation on study areas according to the data availability index.*

### 3.2. Extrapolations

Les coefficients de corrélation calculés pour les trois régions sont hautement significatifs (supérieurs à 0,90) lorsque la distance est inférieure à 50 km. Toutefois, ils décroissent rapidement après cette distance (figure 2).

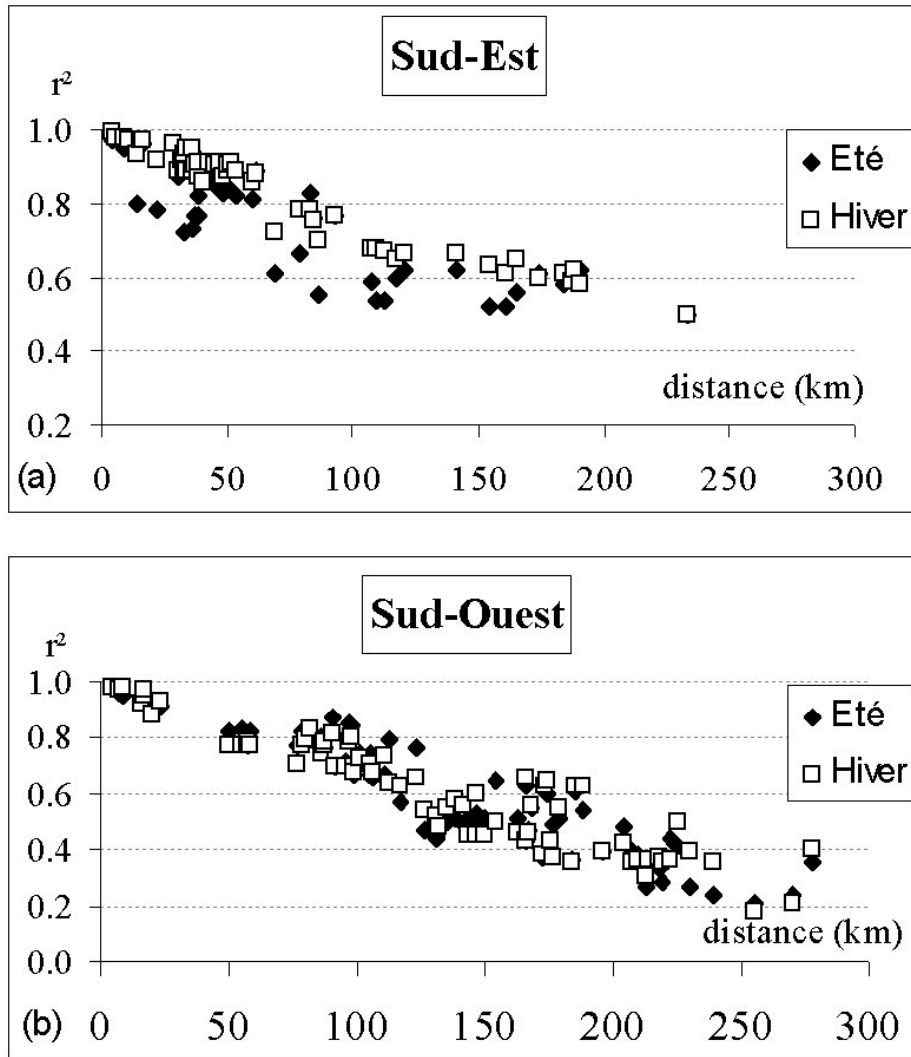


**Figure 2 :** Coefficients de corrélation des valeurs de rayonnement global entre deux points de mesures en fonction de leur distance. *Radiation correlation coefficients between 2 stations as a function of the distance.*

Aucune distinction géographique ne semble se dessiner, si ce n'est un meilleur score pour le Sud-Est dans les distances supérieures à 100 km. Une caractérisation saisonnière basée sur deux périodes, l'une estivale (juin à août) et l'autre hivernale (décembre à février) pour les régions du Sud-Est et du Sud-Ouest montre un comportement temporel différentiel (meilleurs scores en hiver) dans le Sud-Est, mais n'est pas perceptible dans le Sud-Ouest (figure 3).

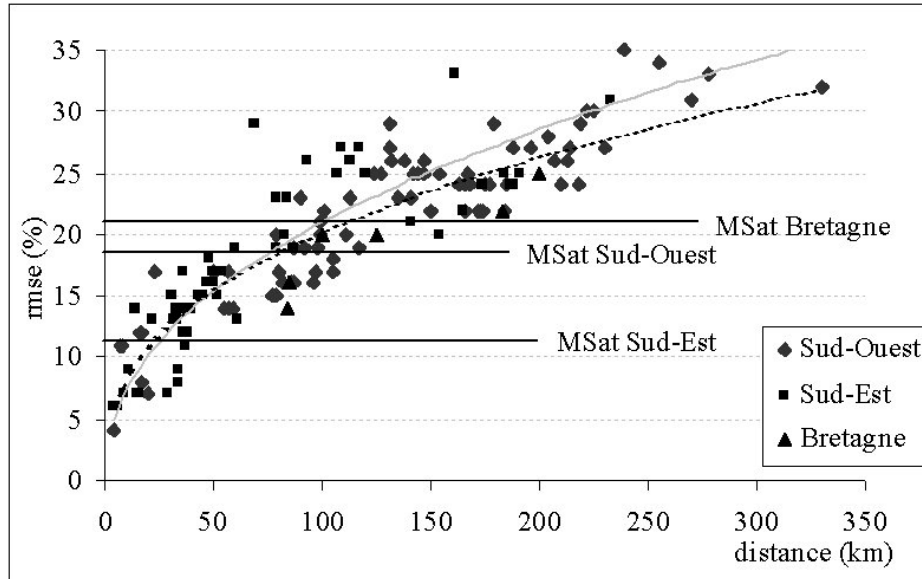
La précision des estimations par extrapolation varie selon la distance en suivant une fonction puissance (figure 4). En moyenne, au delà de 60 km dans le Sud-Est et 20 km dans le Sud-Ouest, les reconstitutions sont moins précises

que les estimations MétéoSat. Le seuil de 130 km environ observé en Bretagne n'est pas significatif en raison du faible nombre de couplets (6) et des distances inter-postes toujours supérieures à 80 km.



**Figure 3 :** Régionalisation et effet saisonnier des corrélations dans le Sud-Est (a) et le Sud-Ouest (b). *Regionalization and seasonal effect of the correlations in South-East (a) and South-West (b).*

Pour chacune des situations observées, l'accroissement du RMSE est très rapide dès les premiers kilomètres : il atteint en moyenne 10% à 20 km et 15 % dès 45 km. Un effet de pépité (offset à l'origine) de 5% est mis en évidence et indique le biais systématique minimum associé à cette méthode. Il peut être également relié à la précision instrumentale.



**Figure 4 :** Extrapolation du rayonnement global et distance critique. *Extrapolation of global radiation and critical distance.*

Ces résultats sont globalement en accord avec les observations réalisées par Perez *et al.* (1997) montrant que l'utilisation du satellite s'avérait meilleure au delà d'une distance de 50 km sur la base d'un réseau spatialement bien distribué. On est toutefois éloigné de la distance critique de 15 km avancée par Struzik (2001).

L'analyse saisonnière montre des résultats toujours contrastés selon des types de temps et les sites mais confirme les premiers résultats à savoir que l'extrapolation est significativement meilleure l'été : le seuil de 15% de RMSE relatif n'est dépassé qu'à partir de 90 km dans le Sud-Ouest et quasiment 300 km dans le Sud-Est. Durant cette période de beau temps, l'extrapolation est donc généralement préférable à l'utilisation des données MétéoSat, surtout dans le Sud-Ouest. La situation est différente durant l'hiver, 15% de RMSE étant atteint dès une vingtaine de kilomètres et 20% à partir de 50 km.

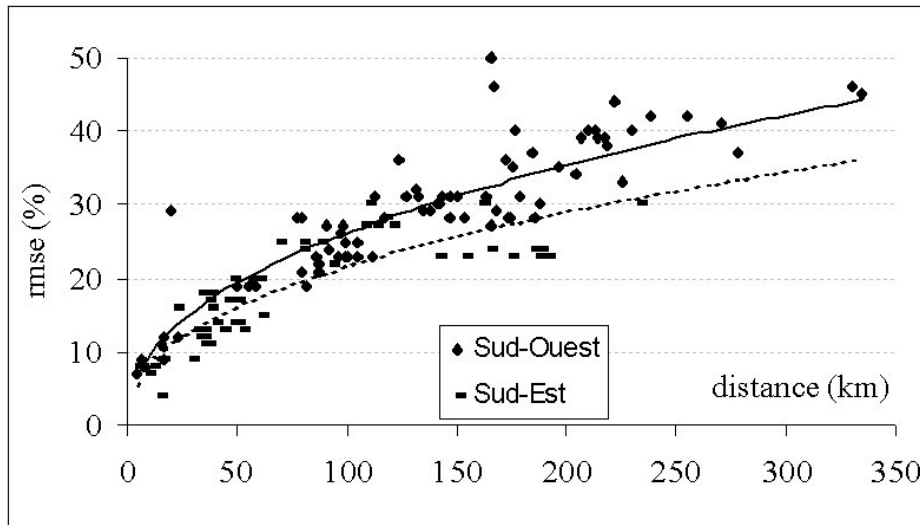
Pour obtenir une estimation moyenne de la qualité des extrapolations vis-à-vis des estimations MétéoSat dans le cadre des deux sous-réseaux Sud-Est et Sud-Ouest, on a sélectionné pour chacun des postes les meilleures extrapolations. On s'aperçoit que globalement, compte tenu de la configuration des sous-réseaux et plus précisément de la distance inter-poste, les résultats sont comparables (tableau 3).



RMSE %	Sud-Est	Sud-Ouest
Moyen	13	18
Eté	7	13
Hiver	19	24

**Tableau 3 :** Synthèse des extrapolations réalisées dan le Sud-Est et le Sud-Ouest. *Synthesis of extrapolations performed in the South-east and South-west areas.*

Pour compléter cette analyse et mettre en évidence l'extrême variabilité spatiale du rayonnement, des traitements similaires ont été entrepris en remplaçant directement les postes entre eux - méthode du "copier-coller" (figure 5). En effet, si cette méthode apparaît simpliste, elle n'en est pas moins largement utilisée par de nombreux gestionnaires de réseaux et sous certaines configurations pour reconstituer certaines valeurs manquantes.



**Figure 5 :** Performance de la reconstitution du rayonnement par substitution des postes entre eux. *Results of the reconstitution of the global radiation by substitution of stations.*

On constate dans un premier temps un effet de pépité systématique équivalent à celui observé pour l'extrapolation. Ensuite le nuage se disperse très rapidement, signe d'une variabilité spatiale très importante. Au vu des premiers résultats précédents, il est évident que cette méthode de reconstitution doit être prohibée même pour des stations distantes de quelques kilomètres.

### 3.3. Interpolations

Les interpolations sont effectuées par krigeage universel et les résultats sont performants (tableau 4).

RMSE %	Sud-Est	Sud-Ouest	Bretagne
Moyen	9	14	21
Eté	6	11	18
Hiver	14	17	25

**Tableau 4 :** Résultats des interpolations par krigeage.  
*Results of kriging interpolations.*

Les résultats contrastés entre l'été et l'hiver sont de nouveau mis en évidence. Les valeurs observées sont comparables, voire meilleures, que celles issues des études de Zelenka (1999) en Suisse, indiquant un RMSE moyen de 19%.

En dehors de la région Bretagne, qu'il faut peut être mettre de côté compte tenu de la faiblesse numérique de l'échantillon, les résultats sont meilleurs, par comparaison à ceux issus de l'analyse des données de MétéoSat, avec un RMSE relatif moyen qui est abaissé de 3 à 5% mais dont la diminution peut atteindre 8% en moyenne l'hiver dans le Sud-Ouest.

### 3.4. Structure spatiale de MétéoSat

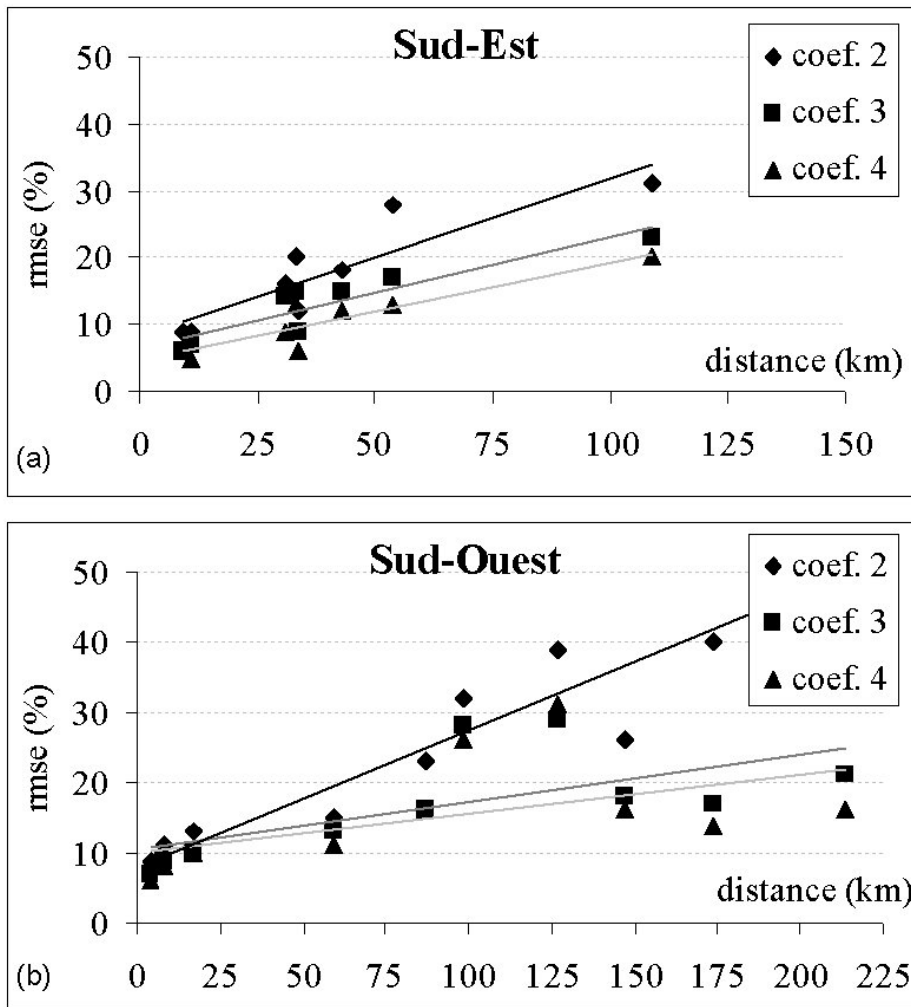
L'hypothèse est de considérer que la structure spatiale des champs MétéoSat traduit fidèlement la variabilité du rayonnement global même si les valeurs ponctuelles sont entachées d'une certaine imprécision. On va donc s'appuyer sur cette distribution spatiale et l'appliquer aux mesures au sol. Un point de référence central est déterminé dans chacune des trois régions d'étude puis les différences relatives avec les autres postes sont calculées uniquement à partir des données MétéoSat. Ces valeurs correspondent alors à des coefficients qui sont ensuite affectés aux données mesurées par le pyranomètre de cette station référence afin de reconstituer celles des postes voisins. Pour s'affranchir de tout problème de mesure sur les stations de référence ayant pu altérer les résultats, ces calculs ont été de nouveau réalisés à partir d'une référence différente et ont abouti globalement aux mêmes observations.

Les résultats sont dans l'ensemble proches de ceux observés lors de l'évaluation de MétéoSat et de l'extrapolation (tableau 5).

RMSE %	Sud-Est	Sud-Ouest	Bretagne
Moyen	13	18	28
Indice 2	19	26	28
Indice 3	14	17	16
Indice 4	10	15	25

**Tableau 5 :** Reconstitution en utilisant la variabilité spatiale des estimations MétéoSat dans les 3 régions en fonction de l'indice de disponibilité. *Reconstruction using the spatial variability of MeteoSat estimations according to the data availability index.*

L'importance du type de temps, à travers le coefficient de validité, associé à la distance du point de référence est de nouveau mise en évidence (figure 6).



**Figure 6.** Reconstitution par utilisation de la structure spatiale de MétéoSat (a : Sud-Est, b : Sud-Ouest) en fonction des indices de disponibilité. *Reconstitution of global radiation using spatial structure of MeteoSat (a: South-East, b : South-West) according to the reliability coefficients.*

#### 4. Application à la gestion des données du réseau

Au regard des résultats obtenus, il n'est pas possible de traiter des pas de temps inférieurs au quotidien. Du reste, les travaux de Perez *et al.* (1997) sur des données horaires, ont montré que l'extrapolation générerait une erreur de

l'ordre de 15% en terme de RMSE relatif dès une distance de 4 km avec un effet de pépité (offset) de 10%.

Si les résultats obtenus dans le cadre de cette étude peuvent paraître décevants vis-à-vis d'une problématique de gestion et de reconstitution de données manquantes, il en résulte toutefois un certain nombre d'informations pouvant directement aider au développement de procédures :

- à partir des méthodes utilisées, le "rayon d'influence" d'une mesure de rayonnement quotidien est de l'ordre de la vingtaine de kilomètres en moyenne ;
- il n'est pas possible de reconstituer des données avec une précision inférieure à 5% dans le meilleur des cas ;
- l'interpolation par krigeage est préférable à l'extrapolation quand elle peut être mise en place (sous réserve d'une densité suffisante). Si ce n'est pas possible, l'extrapolation ne peut être utilisée pour la correction ou reconstitution qu'en utilisant un poste voisin distant d'une trentaine de kilomètres au maximum l'été et une dizaine de kilomètres les autres saisons, même s'il faut différencier également les régions. Sinon, on utilisera données MétéoSat afin de minimiser l'erreur ;
- la méthode du copier/coller est à bannir, même pour des postes distants de quelques kilomètres.

Pour une mise en pratique, il est nécessaire d'établir des sous-réseaux (à l'image du Sud-Ouest et Sud-Est et plus conséquents qu'en Bretagne) dans lesquels l'interpolation par krigeage est possible. Pour les stations extérieures à ces sous-réseaux :

- trouver au moins une station distante de moins de 20 km (éventuellement rechercher dans d'autres réseaux) ;
- calculer pour chacun des couplets des équations de régression saisonnières et ce, pour des données quotidiennes, sur une période d'au minimum deux années ;
- reconstituer et corriger les données quotidiennes à partir de ces résultats et des données MétéoSat ;
- proposer en moyenne les estimations MétéoSat pour les stations n'ayant pas de mesures de rayonnement à moins de 30 km et ne faisant pas partie d'un sous-réseau au sein duquel l'interpolation par krigeage est possible, en annonçant la précision de l'estimation.

## Conclusion

L'étude a permis de hiérarchiser les différentes méthodes et stratégies utilisées pour le contrôle et la validation des données de rayonnement mais la mise en évidence d'une variabilité spatiale et temporelle rend la problématique encore plus complexe. L'interpolation par krigeage s'avère la solution offrant les meilleures performances mais reste sujette à la densité des postes de mesures. Elle s'avère délicate à mettre en œuvre dans le cadre de procédures en routine automatique et quotidienne. En outre, il ne faut pas s'attendre dans le meilleur des cas à une précision inférieure à 10-15% en terme de RMSE relatif, ce qui montre l'intérêt des données de MétéoSat dont la précision actuelle est légèrement inférieure.

La bibliographie indique cependant que le cokrigeage, qui n'a pas été testé dans le cadre de cette étude, serait plus performant mais son utilisation, encore plus lourde que le krigeage universel, n'est pas adaptée dans le cadre d'un traitement opérationnel de contrôle et de validation. Les perspectives sont toutefois encourageantes, avec les nouveaux algorithmes de traitement des images MétéoSat Seconde Génération (MSG), notamment la méthode Heliosat 3, et l'exploitation de nouveaux canaux qui permettront d'obtenir des estimations avec une précision prévue inférieure à 10%.

## Bibliographie

- CROS S., 2004 : *Création d'une climatologie du rayonnement solaire incident en ondes courtes à l'aide d'images satellitales*, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 113 p.
- PEREZ R., SEALS R., ZELENKA A., 1997: Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data, *Solar Energy*, **60**, 89-96.
- PINKER R.T., LASZLO I., 1991: Effects of spatial sampling of satellite data on derived surface solar irradiance, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **8**, 96-107.
- RIGOLLIER C., 2000 : *Vers un accès à une climatologie du rayonnement solaire : estimation de l'irradiation globale à partir d'images satellitales*, Thèse de Doctorat, Université de Nice, 214 p.
- STRUZIK P., 2001: *Spatialisation of solar radiation. Draft report on possibilities and limitations*, Cost action 718 Meteorological application for agriculture. 3-rd management committee and working group meeting, Budapest 27-28 september 2001, 11p.
- WALD L., 2000: SoDa; integration and exploitation of networked solar radiation databases, *European Geophysical Society Meeting, XXV General Assembly*, Nice, France, 25-29 April 2000.

WALD L., ALBUISSON M., BEST C., DELAMARE C., DUMORTIER D., GABOARDI E., HAMMER A., HEINEMANN D., KIFT R., KUNZ S., LEFEVRE M., LEROY S., MARTINOLI M., MENARD L., PAGE J., PRAGER T., RATTO C., REISE C., REMUND J., RIMOCZI-PAAL A., VAN DER GOOT E., VANROY F., and WEBB A., 2002: SoDa; a project for the integration and exploitation of networked solar radiation databases. In: *Environmental Communication in the Information Society*, W. Pillmann, K. Tochtermann Eds, Part 2, pp. 713-720. Published by the International Society for Environmental Protection, Vienna, Austria.