

VALIDATION DES ESTIMATIONS DE PRÉCIPITATION À GRANDE ÉCHELLE

H. LAURENT

(ORSTOM, Groupe PRAO, MONTPELLIER, FRANCE)

RÉSUMÉ

Trois méthodes d'estimation de la pluie par satellite et une estimation climatologique sont validées par rapport aux données de surface. On étudie ici l'importance de la donnée-sol de validation, qui peut être l'observation ponctuelle relevée aux stations pluviométriques ou bien la valeur moyenne sur une surface, calculée par krigeage. L'estimation de pluie par satellite ne donne accès qu'à des valeurs moyennes sur des surfaces assez grandes : une surface de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ apparaît réaliste. Les observations ponctuelles présentent une variabilité importante par rapport aux valeurs surfaciques, expliquant en partie les écarts entre estimations satellitaires et observations ponctuelles.

1 - INTRODUCTION

L'estimation quantitative de la pluie est un problème de première importance. À l'échelle du globe et en particulier dans la bande tropicale, les précipitations jouent un rôle primordial dans le bilan énergétique et la circulation générale de l'atmosphère. À une échelle régionale, la pluie est cruciale pour l'économie de nombreux pays et la gestion des ressources en eau. La densité de pluviomètres étant très faible dans les tropiques, des efforts ont été accomplis depuis plusieurs années pour essayer d'estimer la pluie à partir des données satellites. S'appuyant sur les recommandations de GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment), plusieurs programmes internationaux s'intéressent aux estimations globales de la pluie par satellite, comme GPCP (Global Precipitation Climate Project, WILKERSON, 1988) ou TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, SIMPSON *et al.*, 1988). Au niveau français, le programme EPSAT (Estimation des Précipitations par Satellite, CADET et GUILLOT, 1991) s'est donné pour objectif d'étudier les estimations de pluie par satellite sur les pays d'Afrique de l'Ouest, où la pluie est un paramètre crucial. L'expérience EPSAT-Niger (LEBEL *et al.*, 1992) a collecté une somme rarement atteinte de données pluviographiques sur un degré carré autour de Niamey, grâce à un réseau de 100 pluviographes à haute résolution temporelle et un radar bande C, de 1990 à 1993. Outre l'aspect site de validation pour les estimations par satellite, ces données ont permis l'étude détaillée de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations sahéliennes (JOBARD and DESBOIS, 1992, LEBEL and LE BARBÉ, 1995, LEBEL *et al.*, 1995).

Il existe de nombreux algorithmes pour estimer la pluie à partir des données satellitaires (pour une revue, cf. BARRETT and MARTIN, 1981). Parmi ces algorithmes, nous en avons choisi trois très simples, qui peuvent être utilisés facilement de manière opéra-

tionnelle : la méthode GPI (GOES Precipitation Index, ARKIN, 1979), la méthode du groupe TAMSAT de l'université de Reading (DUGDALE *et al.*, 1990), et la méthode développée par l'équipe ORSTOM de Lannion (CARN *et al.*, 1989). Ces trois méthodes fournissent des estimations décennales de la pluie en utilisant les images du canal infrarouge thermique (IR) d'un satellite géostationnaire. Elles ont été développées pour les régions sahélienne et soudano-sahélienne dans lesquelles la pluie est apportée par d'importants systèmes convectifs tels que les lignes de grains. Le principe de base est le suivant : on peut estimer la pluie à partir des images IR avec l'hypothèse que les précipitations sont liées à l'activité convective, et que l'activité convective d'un nuage est elle-même liée à l'altitude (ou encore la température) du sommet du nuage.

Le problème qui est abordé ici est le suivant : comment valider ces estimations de pluie par satellite ? Les seules données de validation dont on dispose à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest sont celles du réseau pluviométrique des pays sahéliens ; la première idée est de valider directement les estimations satellitaires avec ces observations au sol (LAURENT and ARNAUD, 1993a,b), mais on est alors confronté à la difficulté de comparer des estimations satellitaires qui intègrent des surfaces importantes aux observations au sol qui sont ponctuelles (FLITCROFT *and al.*, 1989). La résolution spatiale des images IR est de l'ordre de 5 km, mais les estimations de pluie, basées sur une relation statistique entre les surfaces couvertes par les nuages à sommet froid et les précipitations, ne sont valables que pour des cumuls dans le temps (typiquement un mois) et dans l'espace (typiquement une surface de un degré de côté). Les recommandations de l'atelier sur l'estimation des pluies par satellite, tenu à Niamey du 2 au 4 décembre 1993, préconisaient la validation des estimations satellitaires sur une grille de 0.5 par 0.5 degrés, qui apparaît être la taille minimum pour que de telles estimations aient un sens. Une procédure d'interpolation a été définie afin de construire l'estimation de la pluie au sol sur ce maillage, sur des périodes de dix jours, à partir des stations pluviométriques (HUBERT et TOMA, 1993, TOMA, 1995). Les estimations de pluie par satellite sont définies dans la partie 2. Dans la partie 3, elles sont comparées d'une part aux valeurs ponctuelles, et d'autre part aux valeurs spatialisées. Dans cette étude l'accent n'est pas mis sur l'intercomparaison des méthodes, mais sur leur validation avec les données au sol.

2 - DONNÉES ET MÉTHODES

La méthode GPI proposée par ARKIN (1979) estime la pluie intégrée sous la surface des systèmes pluvieux, définie comme la surface plus froide que le seuil de 235 K (- 38 °C). La pluie est proportionnelle à la fraction de nuages froids :

$$R = a F$$

où R est le taux de pluie moyen, $a = 3$ mm/h est la constante de proportionnalité, et F est le rapport [nombre de pixels plus froids que - 38 °C]/(nombre de pixels total)], pour une surface donnée (ici $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) et pour une période donnée (ici dix jours).

Cette méthode a été calibrée avec les données de l'expérience GATE, c'est-à-dire sur l'océan au large de l'Afrique de l'Ouest. La question de savoir l'amélioration qu'apporterait une calibration différente selon les régions n'est pas abordée ici.

La méthodologie utilisée dans les estimations de pluie TAMSAT (DUGDALE *et al.*, 1990) s'appuie sur la durée, en chaque pixel MÉTÉOSAT, de présence de nuage froid pendant la période de dix jours considérée. Le choix du seuil permettant de séparer les nuages pluvio-gènes des nuages non pluvio-gènes est bien sûr un point important. La valeur du seuil utilisé dans la méthode TAMSAT varie spatialement et temporellement : l'Afrique boréale est divisée en neuf zones supposées être homogènes du point de vue de la climatologie de la pluie ; dans chaque zone le seuil est constant durant un mois.

À partir de plusieurs années de données, pour chaque zone et chaque mois un seuil à - 40, - 50 ou - 60 °C est sélectionné et une régression avec les observations permet d'obtenir une calibration de la forme :

$$R = a \text{ OCC} + b, \quad R = 0 \text{ si OCC} = 0$$

où R est la pluie en mm et OCC est l'occurrence de sommets froids en heures.

La méthode LANNION (CARN *et al.*, 1989) estime également la pluie décadaire en chaque pixel, avec la formule :

$$R = a \text{ OCC} + b \text{ Ts} + c \text{ Lat} + d, \quad R = 0 \text{ si OCC} = 0$$

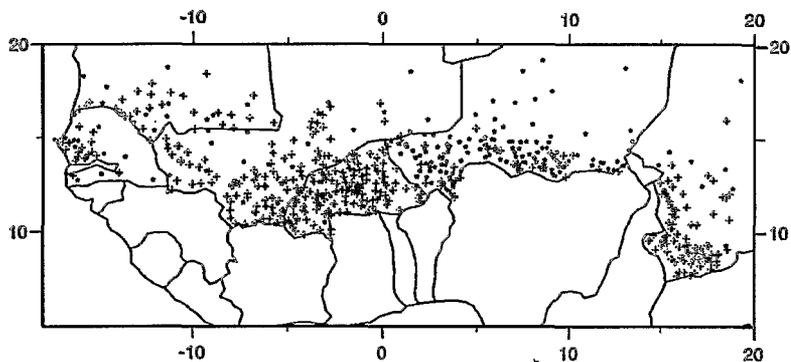
où R est la pluie, OCC l'occurrence de sommets froids pour un seuil de - 40 °C, Lat la latitude, Ts la moyenne des deux températures maximales de brillance IR pendant les deux pentades de la décade. Ts vise à représenter la relation entre la pluie et la température de surface. Une différence essentielle de cette méthode avec les deux méthodes précédentes est qu'elle est calibrée à chaque décade, en utilisant les observations sol disponibles à la fin de la décade.

Pour évaluer la qualité d'une estimation de pluie, on peut tout d'abord comparer ses performances avec celles d'une prévision simple. La plus simple est la prévision climatologique, qui consiste à prédire que la pluie pour une décade sera égale à la pluie moyenne relevée sur cette décade. On a ainsi calculé l'estimation CLIM, valeur moyenne sur les vingt dernières années (1970-1990, période considérée comme étant sensiblement homogène), par krigeage sur une grille de 0.5° x 0.5° (L. LE BARBÉ, communication personnelle).

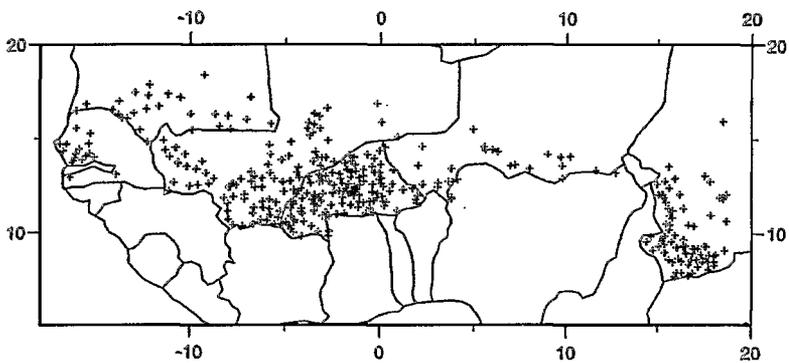
Les images IR MÉTÉOSAT de la saison des pluies 1989 au Sahel ont été traitées avec les algorithmes TAMSAT et LANNION au centre AGRHYMET à Niamey. Ces images couvrent la bande sahélienne avec la pleine résolution temporelle et spatiale MÉTÉOSAT : 30 mn et 5 km x 5 km. La période de l'étude est de 8 décades, du 21 juin au 10 septembre 1989. Les mesures de précipitation des stations synoptiques et des réseaux secondaires des pays sahéliens ont été collectées et contrôlées par le centre AGRHYMET. La figure 1 montre la distribution spatiale des stations pluviométriques utilisées. Sur un total de 579 stations, 209 ont été archivées dans un délai assez court : elles sont utilisées pour la calibration des estimations LANNION. Les 370 restantes furent archivées plus tard : elles sont utilisées pour la validation ponctuelle des estimations.

Les mesures des 579 stations ont été utilisées pour calculer par interpolation optimale (krigeage) la pluie décadaire moyenne sur une maille de 0.5° x 0.5°, en tout point de grille où le nombre de poste était suffisant (TOMA, 1995). Dans les validations spatialisées présentées ici, on ne prend en compte que les points de grille contenant les stations de validation ponctuelle.

579 OBSERVATIONS (TOTAL)



370 OBSERVATIONS (VALIDATION)



209 OBSERVATIONS (CALIBRATION)

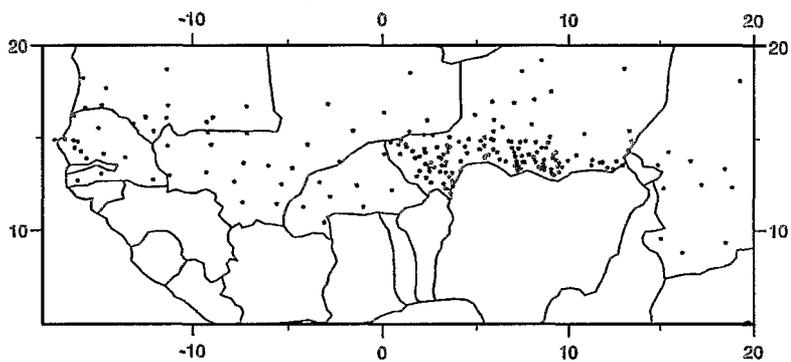


Figure 1 : Stations pluviométriques.

Bas : stations reçues rapidement, utilisées pour la calibration de l'estimation LANNION ;
milieu : stations reçues en temps différé, utilisées pour la validation ;
haut : ensemble des stations, utilisées pour les moyennes de référence, sur une maille de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

3 - RÉSULTATS

La figure 2 présente la validation obtenue par rapport aux valeurs ponctuelles. Il s'agit des diagrammes de dispersion des quatre estimateurs pour les 370 stations de validation et pour les 8 décades. On a également porté le coefficient de corrélation linéaire, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le biais (erreur moyenne : estimation moins observation). Les nuages de points montrent qu'aucune estimation ponctuelle de pluie à l'échelle décadaire n'est très satisfaisante. Les défauts communs à toutes les méthodes sont : une dispersion importante, une sous-estimation des précipitations importantes, et une surestimation des précipitations faibles ou nulles. Les écarts entre estimations et observations sont en partie dus aux erreurs des estimations, mais ils sont également en partie dus à la forte variabilité de la pluie à petite échelle. C'est ce que nous allons essayer de préciser ici, en étudiant l'effet du passage d'une valeur ponctuelle à une valeur moyenne sur une surface de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

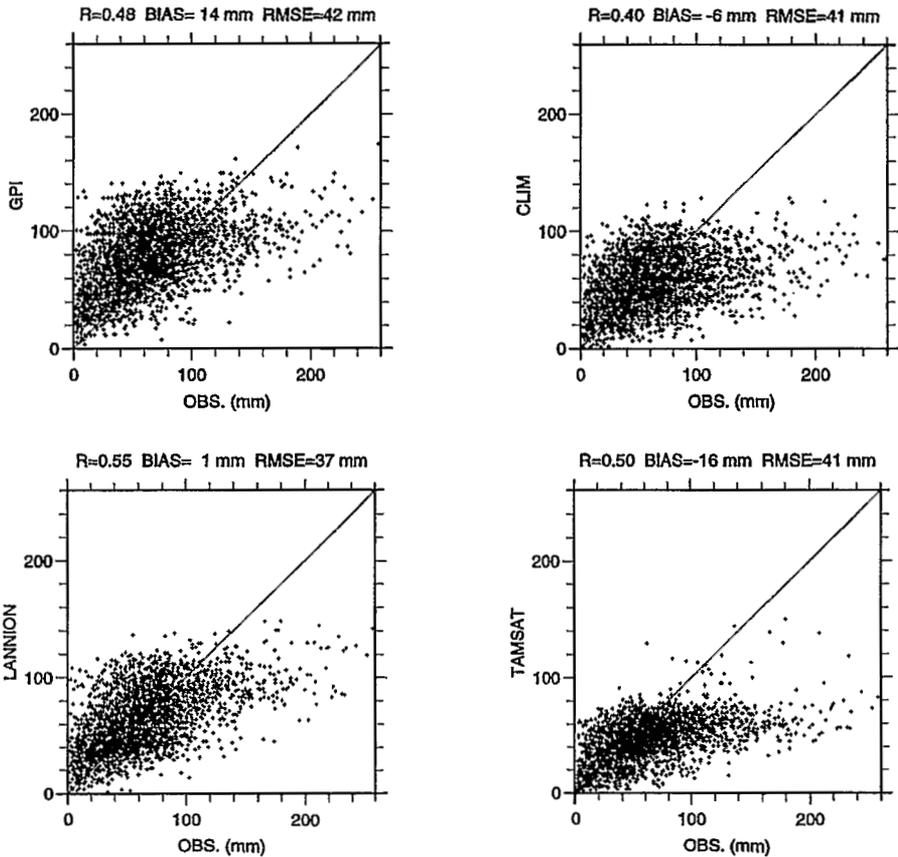


Figure 2 : Valeurs de précipitation estimées par les quatre méthodes (cf. texte) en fonction des observations ponctuelles pluviométriques. Toutes décades et stations confondues.

3.1 - Effet du changement de surface pour l'estimation satellitaire

La figure 3 montre l'estimation LANNION moyennée sur des carrés de 0.5° de côté (soit environ 10×10 pixels), en fonction de l'estimation LANNION obtenue par pixel, pour les pixels correspondant aux stations de validation. Il apparaît clairement que les estimations sont très proches pour ces deux surfaces. Ceci est cohérent avec les bases physiques des méthodes IR, c'est-à-dire une relation nuage/pluie. La zone balayée par les nuages est plus étendue que la surface où la pluie est effectivement tombée. De plus, la relation nuage/pluie n'étant valable que statistiquement, elle nécessite une intégration qui se traduit par un lissage spatial autant que temporel (JOBARD and DESBOIS, 1992). Le lissage spatial est très important pour les occurrences de nuages froids sur des périodes de dix jours, ce qui explique la très forte corrélation entre estimation par pixel et estimation par surface de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

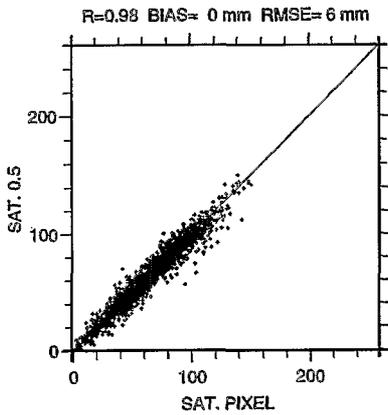


Figure 3 : Comparaison des estimations de pluie par pixel avec les estimations moyennes sur les surfaces de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ contenant ces pixels (estimation par satellite LANNION, moyenne arithmétique simple).

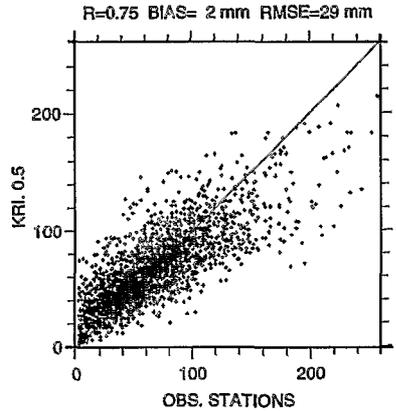


Figure 4 : Comparaison des observations ponctuelles de pluie avec les valeurs moyennes sur des surfaces de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (moyenne calculée par krigeage).

3.2 - Effet du changement de surface pour les données-sol

L'un des premiers résultats de l'expérience EPSAT-Niger a été de mettre en évidence la très forte variabilité des précipitations en région sahélienne (THAUVIN and LEBEL, 1991), même pour des cumuls annuels. *A fortiori*, à l'échelle décadaire, il existe de très grandes différences pour des cumuls entre deux points même voisins de quelques kilomètres. Les cumuls ponctuels fluctuent par conséquent de manière importante autour de toute valeur moyenne. Ceci est illustré par la figure 4 qui montre la valeur moyenne (obtenue par krigeage sur des carrés de 0.5° de côté) en fonction

des valeurs relevées aux stations correspondantes. Le passage des valeurs ponctuelles aux valeurs moyennes surfaciques entraîne un changement de la distribution (réduction de la variance, centrage des valeurs) qui se traduit par une inclinaison du nuage de points par rapport à la bissectrice. On observe également une dispersion importante, s'expliquant par la forte variabilité des valeurs ponctuelles autour des valeurs moyennes.

3.3 - Conséquence pour la validation des estimations par satellite

La figure 5 présente les diagrammes de dispersion obtenus pour la méthode LANNION, selon que l'on prend une estimation satellitaire par pixel ou par surface $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, en fonction d'observations aux stations ou d'observations moyennes sur les surfaces

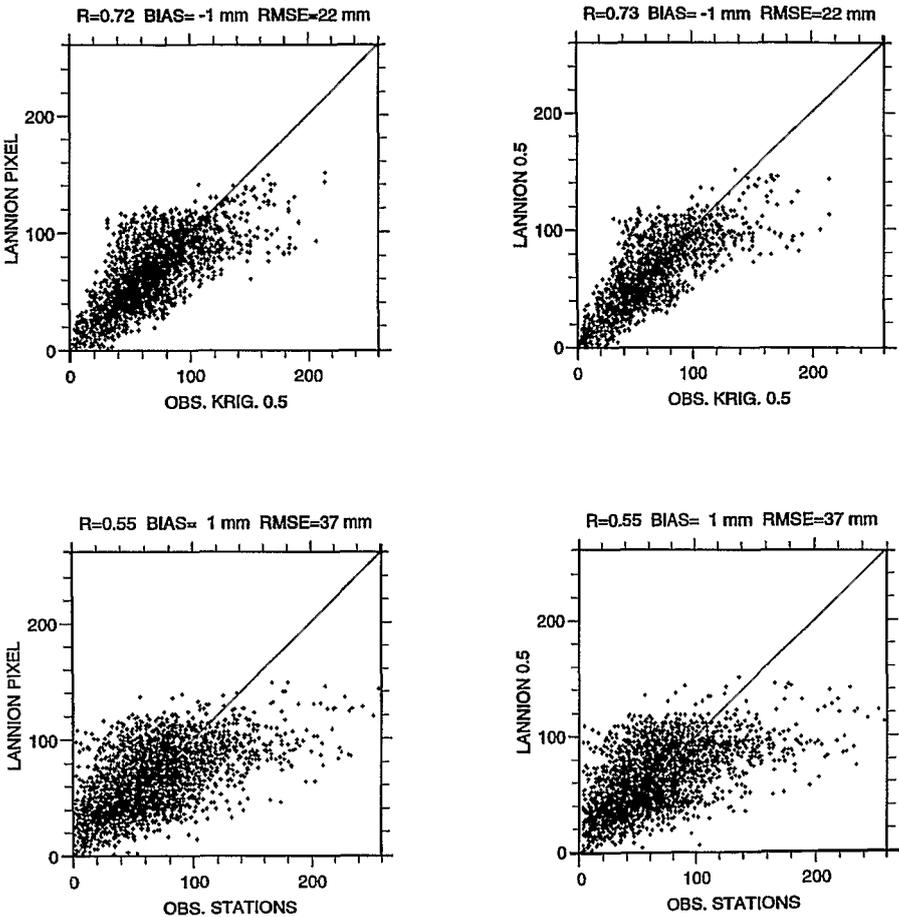


Figure 5 : Valeurs de précipitation estimées par satellite (LANNION) en fonction des valeurs au sol. Valeurs satellitaires par pixel (gauche) ou moyennées sur des surfaces de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (droite) ; valeurs au sol ponctuelles (bas) ou valeurs moyennes sur des surfaces de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (haut).

0.5° x 0.5°. En accord avec le paragraphe 3.1, les résultats de la validation sont identiques, que les estimations satellitaires soient prises par pixel ou sur des surfaces 0.5° x 0.5°. En revanche, les résultats de validation sur les valeurs surfaciques moyennes sont sensiblement meilleurs que ceux obtenus sur les observations ponctuelles. Ceci montre qu'une part des écarts entre les estimations satellitaires et les observations au sol est effectivement due à la variabilité naturelle de petite échelle de la pluie.

La figure 6 montre la validation des quatre estimateurs par rapport aux valeurs moyennes 0.5° x 0.5°. Elle est à comparer avec la figure 2. On obtient une amélioration globale des résultats de validation pour les quatre méthodes, avec en particulier une réduction de la dispersion et une sous-estimation moins prononcée des fortes précipitations. Ces tendances demeurent toutefois.

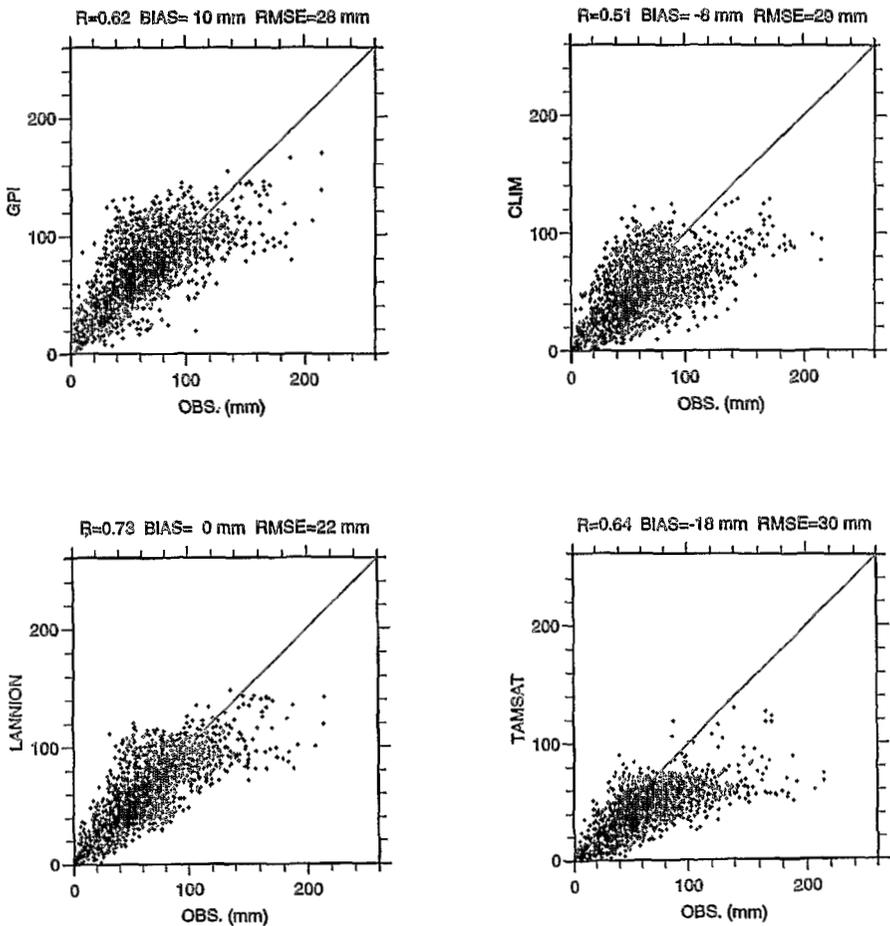


Figure 6 : Valeurs de précipitation estimées par les quatre méthodes (cf. texte) en fonction des observations au sol, tout étant calculé pour des surfaces de 0.5° x 0.5°. Toutes décades et stations confondues.

Ainsi validées sur des surfaces et non sur des valeurs ponctuelles, les estimations de pluie décadaire par satellite semblent relativement bien corrélées avec les observations de surface. Pour l'exemple de l'année 1989, l'estimation LANNION apparaît un peu meilleure que les autres, et les trois méthodes satellitaires semblent meilleures que l'estimation climatologique.

4 - CONCLUSION

- Cette étude a permis de mettre expérimentalement en évidence les points suivants :
- les estimations de pluie à partir des images IR des satellites géostationnaires sont représentatives de la pluie sur des surfaces. Pour des estimations sur des périodes de dix jours, prendre les valeurs par pixel ou prendre les valeurs moyennes sur $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ conduit sensiblement au même résultat ;
 - la variabilité des précipitations est très importante à petite échelle spatiale, par conséquent les observations ponctuelles présentent une dispersion importante avec les observations moyennes sur des surfaces de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$;
 - une part des écarts entre estimations satellitaires et observations pluviométriques est expliquée par la variabilité des précipitations à petite échelle : les estimations donnent de meilleurs résultats quand on les valide à l'aide de données-sol surfaciques ;
 - les écarts entre estimations satellitaires et observations de surface, sur une grille de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, demeurent néanmoins importants.

Cette étude devra être étendue à plusieurs années de données avant de pouvoir apporter des réponses objectives quant à l'intercomparaison des différentes méthodes d'estimation de précipitation par satellite, et à leur supériorité sur une estimation climatologique. On peut néanmoins d'ores et déjà se poser la question suivante : si la méthode LANNION produisait de meilleures estimations que les deux autres méthodes satellitaires, serait-ce parce qu'elle utilise une calibration avec des observations au sol, ou bien serait-ce parce qu'elle tient compte de l'information température maximale apparente ?

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARKIN P. A., 1979 - The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1382-1387.
- BARRETT E.C. and MARTIN D.N., 1981 - *The use of satellite data in rainfall monitoring*, Academic Press, 340 p.
- CADET D. and GUILLOT B., 1991 - EPSAT. *Estimation des précipitations par satellite*. 63 p. [available at: ORSTOM-CMS, BP 147, F-22302 Lannion, France]
- CARN M., LAHUEC J.-P., DAGORNE D. and GUILLOT B., 1989 - Rainfall estimation using TIR METEOSAT imagery over the Western Sahel. 4th conf. on satellite meteorology and oceanography, San Diego, CA, *Amer. Meteor. Soc.*, 126-129.

- DUGDALE G., McDOUGALL V.D. and MILFORD J.R., 1990 - Potential and limitations of rainfall estimates for Africa derived from cold cloud statistics. 8th METEOSAT scientific users' meeting, Norköpping, Sweden. Eumetsat Publ. EUM P08, 211-220.
- FLITCROFT J.D., MILFORD J.R. and DUGDALE G., 1989 - Relating point to area average rainfall in semiarid West Africa and the implications for rainfall estimates derived from satellite data. *J. Applied Meteor.*, 28, 252-266.
- HUBERT P. et TOMA A., 1993 - Étude préliminaire des cumuls de pluie sahéliens. *Atelier sur l'estimation de la pluie par satellite*, AGRHYMET, Niamey, 2-4 décembre 1993. Publ. AGRHYMET, 175-191.
- JOBARD I. and DESBOIS M., 1992 - Remote sensing of rainfall over tropical Africa using Meteosat infrared imagery: sensitivity to time and space averaging. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 13, n° 14, 2683-2700.
- LAURENT H. and ARNAUD Y., 1993a - Evaluation of satellite rain estimates over Africa. *International symposium on precipitation and evaporation*, Bratislava, 20-24 September 1993.
- LAURENT H. et ARNAUD Y., 1993b - Évaluation d'estimations de pluie par satellite sur l'Afrique de l'Ouest. *Atelier sur l'estimation de la pluie par satellite*, AGRHYMET, Niamey, 2-4 décembre 1993. Publ. AGRHYMET, 140-146.
- LEBEL T. and LE BARBÉ L., 1995 - Rainfall climatology of the Central Sahel during the years 1950-1990. Soumis à *J. Hydrol.*
- LEBEL T., TAUPIN J.-D. and LE BARBÉ L., 1995 - Space-time fluctuations of rainfall during HAPEX-Sahel. Soumis à *J. Hydrol.*
- LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPPFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B. and HUBERT P., 1992 - Rainfall estimation in the Sahel: the EPSAT-NIGER experiment. *Journal of Hydrological Sciences*, 37, 201-215.
- SIMPSON J., ADLER R.F. and NORTH G.R., 1988 - A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite. *Bull. American Meteor. Soc.*, 68, 278-295.
- THAUVIN V. and LEBEL T., 1991 - EPSAT-Niger: study of rainfall over the Sahel at small time steps using a dense network of recording raingauges. *Hydrological processes*, vol. 5, 251-260.
- TOMA A., 1995 - Calcul des cumuls de pluie sahéliens. *Atelier sur l'estimation de la pluie par satellite*, AGRHYMET, Niamey, 1-3 décembre 1994.
- WILKERSON J.C. (editor), 1988 - Report of the international workshop on the validation of satellite precipitation measurements for the global precipitation climatology project (GPCP). WMO/TD-NO.203- WCRP-1, Geneva.