

MÉTHODE COMBINÉE IR-MICRO-ONDE POUR LA DÉTERMINATION PAR TÉLÉDÉTECTION DES PLUIES TROPICALES. APPLICATION À L'AFRIQUE ET À DES RÉGIONS OCÉANIQUES

A. MAIA¹, I. JOBARD²

RÉSUMÉ

La méthode proposée combine l'information provenant des instruments *infrarouge thermique* des satellites géostationnaires (Météosat, GMS,...), disponible à un pas de temps fin (la demi-heure ou l'heure), et l'information des instruments micro-ondes de satellites à orbite basse (SSM/I sur DMSP), reliée plus directement aux précipitations, mais disponible moins fréquemment (au mieux une fois toutes les douze heures). Cette méthode, appelée RACC (Rain and Cloud Classification Method), consiste à utiliser les images infrarouges et micro-ondes en coïncidence spatio-temporelle pour identifier des classes de nuages associés à des taux précipitants typiques (appelés facteurs de pluie), puis à se servir de l'information infrarouge seule pour identifier ces classes avec un échantillonnage temporel beaucoup plus fin, permettant une meilleure restitution des pluies cumulées sur des périodes données. La méthode RACC utilise un algorithme de classification automatique.

Plusieurs études et comparaisons avec des pluies mesurées au sol sont présentées pour des régions climatiques différentes : l'Afrique de l'ouest (continent tropical) et l'Archipel du Japon (terres, côtes et mer).

¹Orstom, Laboratoire d'Hydrologie, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1 France.

²LMD-CNRS, École Polytechnique, F-91128 Palaiseau cedex France.

INTRODUCTION

Les précipitations sont caractérisées par une grande variabilité spatio-temporelle, surtout dans les régions tropicales. La bonne couverture spatiale offerte par les satellites et la fréquence d'obtention de ces observations sont très importantes pour l'étude des précipitations cumulées sur des grandes zones. Plusieurs méthodes d'estimation des précipitations à partir des données satellites ont été développées dans les dernières années. La plupart de ces méthodes utilisent des mesures soit dans l'infrarouge thermique (IR), soit dans les micro-ondes (MO) passives.

L'avantage primordial des méthodes qui utilisent l'IR pour l'estimation des précipitations est la très bonne résolution temporelle de ces données. Les images IR sont fournies par les satellites géostationnaires à une fréquence d'une image toutes les heures ou les demi-heures. Ces images ont aussi une bonne résolution spatiale, c'est-à-dire 5 km pour le satellite européen Météosat ainsi que pour le satellite japonais GMS (Geostationary Meteorological Satellite). Néanmoins, les données IR sont des mesures de radiances ou de températures des sommets des nuages et n'ont pas un rapport physique direct avec les précipitations. Les algorithmes IR associent les températures froides des nuages hauts à des systèmes fortement convectifs et donc probablement précipitants. Comme il a été montré dans JOBARD et DESBOIS (1992), une des difficultés de ces algorithmes est le choix du seuil de température à partir duquel un nuage est considéré comme étant *froid*, ce choix étant corrélé à l'échelle spatio-temporelle utilisée et à la nature des systèmes précipitants.

L'avantage des méthodes qui utilisent les micro-ondes est lié au fait que les données MO sont des mesures directes de l'absorption et de l'émission ou de la diffusion du rayonnement par les gouttes d'eau et les cristaux de glace (hydrométéores) à l'intérieur des nuages. Sur la mer, la différence entre les polarisations verticales et horizontales pour certaines fréquences peut aussi indiquer la présence de ces hydrométéores. Ces interactions entre le rayonnement MO et les hydrométéores sont utilisées pour évaluer les taux de pluie. Cependant, la faible résolution temporelle des données MO provenant des satellites à orbite basse, n'est que d'une ou au maximum deux images par jour, ce qui rend difficile l'estimation des précipitations cumulées sur des périodes plus longues. Ces méthodes MO doivent alors utiliser des techniques empiriques d'interpolation à partir des estimations de quantités instantanées, pour le calcul des pluies cumulées dans le temps.

Un autre problème pour l'estimation des précipitations avec des images MO est la résolution spatiale de ces données qui est beaucoup plus faible que celle des images IR. La résolution spatiale des 7 canaux du radiomètre SSM/I (Special

Sensor Microwave/Imager), à bord du satellite polaire DMSP (USA), est donnée dans le tableau 1 (une description détaillée de l'instrument SSM/I peut être trouvée dans HOLLINGER *et al.*, 1987). Compte tenu de la forte variabilité spatiale des pluies, particulièrement dans les tropiques, les pixels MO couvrent généralement une zone qui n'est pas homogène et souvent la couverture du pixel par la pluie n'est que partielle, ce qui rend l'estimation de la pluie difficile, car la relation entre le paramètre MO et le taux de pluie n'est pas linéaire.

Tableau 1
Résolution spatiale des canaux du radiomètre MO SSM/I.
(H et V signifient polarisation horizontale et verticale)

Canal	Résolution spatiale
19 GHz -H,v	70 x 45 km
22 GHz - V	60 x45 km
37 GHz - H,V	38 x 30 km
85 GHz - H,v	16 x 14 km

La méthode utilisée dans cette étude pour l'estimation des précipitations est une méthode qui tente de tirer un avantage des deux approches, en utilisant la bonne résolution spatio-temporelle des images IR et l'information reliée à la pluie contenue dans les données MO. Cette méthode, appelée RACC (Rain And Cloud Classification) est détaillée dans JOBARD et DESBOIS (1994) ; son principe est expliqué dans le chapitre suivant. Les résultats de l'application de la méthode RACC à une région océanique tempérée (Japon et mers environnantes) et à une région continentale tropicale (Afrique de l'ouest), pour différentes échelles spatio-temporelles, sont présentés dans le chapitre : deux exemples de l'application de la méthode RACC. Ces résultats sont comparés avec ceux obtenus par d'autres techniques d'estimation des précipitations.

UNE MÉTHODE D'ESTIMATION DES PRÉCIPITATIONS COMBINANT L'IR ET LE MO

Comme nous l'avons rappelé ci-dessus, la fréquence temporelle et la bonne résolution spatiale au sol des données IR sont très importantes pour l'estimation des précipitations. Néanmoins, les radiances IR sont uniquement corrélées à la température des sommets des nuages, tandis que les données MO sont des mesures directes de la présence des hydrométéores. Une méthode qui combine les données IR et MO peut donc, avoir les avantages des deux techniques.

La méthode RACC que nous présentons ici, utilise une technique de classification automatique développée par DESBOIS *et al.* (1982). Cette technique de classification des *nuées dynamiques* permet de partitionner les données en classes

naturelles en considérant plusieurs paramètres, sans avoir aucune connaissance *a priori* de ces classes. Ceci nous permet de trouver un certain nombre de classes homogènes que l'on associe à différents types de nuages.

Pour trouver ces classes de nuages dans les études présentées ici, nous utilisons deux paramètres spectraux : les images *température de brillance* IR et MO (obtenue à partir d'un canal ou d'une combinaison de canaux MO), et un paramètre spatial, obtenu à partir de la variance locale de chaque pixel dans l'image IR. Ces images *variance-IR* sont importantes pour caractériser la structure spatiale des nuages.

Dans la phase d'apprentissage de la méthode, ces trois paramètres (les images IR, *Variance-IR* et MO) en coïncidence spatio-temporelle sont utilisés dans un processus d'itérations successives pour identifier des classes des nuages associées à des taux précipitants typiques. Ce processus part initialement d'un nombre donné de classes pour lesquelles un ensemble aléatoire de points est choisi. Les centres de gravité et les écarts type de chaque classe sont calculés. Chaque pixel de chaque image est alors attribué à la classe la plus proche, selon la distance euclidienne avec les centres de gravité. Les centres de gravité et les écarts types de ces classes sont recalculés et une nouvelle itération est commencée. Le processus dure jusqu'à ce que la partition des classes soit quasiment constante. Le résultat final de cette phase d'apprentissage est un ensemble de classes pour lequel chaque classe est représentée par les centres de gravité des pixels qui appartiennent à la classe pour chacun des paramètres. Un exemple d'une classification est présenté dans le tableau 2. Dans cet exemple, le troisième paramètre est une combinaison de canaux MO proposée par GRODY (1991) que nous appelons *indice de diffusion ou SI* (Scattering Index). Cette combinaison est décrite au chapitre suivant.

Tableau 2

Exemple de classification des nuages obtenue à partir de trois paramètres : IR, variance-IR et une combinaison de canaux MO appelée SI

Classes	Temp.IR (K)	Variance IR	« SI » (K)
1	265	60	-11
2	263	44	2
3	260	29	-10
4	243	47	-10
5	241	70	-7
6	235	52	24
7	229	45	4
8	225	29	-9
9	219	33	42
10	218	25	10

La deuxième phase de la méthode consiste dans l'application de cette classification à l'ensemble de données dont on dispose. Chaque pixel est associé à la classe la plus proche et nous obtenons ainsi une image classifiée. Comme les images MO ne sont disponibles qu'une ou deux fois par jour, nous conservons, dans cette phase de l'étude, seulement les paramètres IR (images IR et variance-IR) avec les mêmes centres de gravité qui ont été trouvés dans la phase d'apprentissage à trois paramètres. De cette façon, nous pouvons créer des images classifiées avec une bonne résolution spatiale et temporelle. Les centres de gravité du paramètre MO vont servir à définir des taux de précipitation ou facteurs de pluie qui seront associés aux classes de pluie. Les facteurs de pluie sont appliqués aux images classifiées pour l'obtention de la pluie estimée. Un organigramme décrivant la méthode RACC est présenté dans la figure 1.

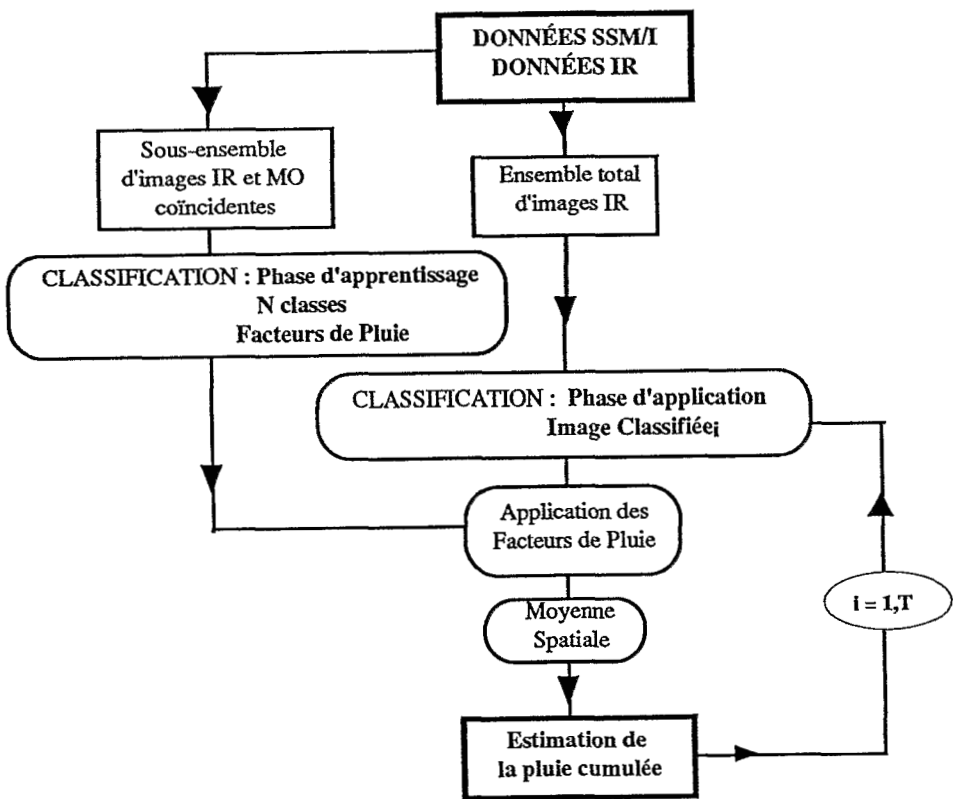


Figure 1 :
Organigramme de la méthode RACC.

DEUX EXEMPLES DE L'APPLICATION DE LA MÉTHODE RACC

LA RÉGION DU JAPON ET LES MERS ENVIRONNANTES

Les données utilisées dans cette étude, ont été réunies pour une expérience d'intercomparaison des méthodes d'estimation des pluies par satellite. Il s'agit du « First Algorithm Intercomparison Project » (AIP-1) organisé dans le cadre du « Global Precipitation Climatology Project » sur la région du Japon et les mers environnantes (23°N - 46°N et 120°E - 147°E) pendant la période du 1 au 30 juin et la période du 15 juillet au 15 août 1989.

Les images visibles et IR proviennent du satellite japonais GMS (Geostationary Meteorological satellite) et sont fournies toutes les heures. Les images MO proviennent de l'instrument SSM/I à bord du satellite DMSP F-8 (Defense Meteorological Satellite Program).

L'ensemble des champs de pluie pour la validation des algorithmes, a été constitué à partir de l'analyse horaire des précipitations, obtenue en composant les données des pluviographes Amedas (Automated Meteorological Data Acquisition System) et les données radar fournies par la « Japanese Meteorological Agency » (JMA) (voir LEE *et al.*, 1991). La zone de validation est représentée sur la figure 2.

La méthode RACC a été appliquée pour estimer la pluie moyenne sur des carrés de 1,25° x 1,25°. Les carrés couvrant l'océan Pacifique, la mer du Japon ou la terre sont repérés sur la figure 2, respectivement par les lettres P, J ou L.

Dans cette étude, nous avons utilisé dans la phase d'apprentissage de la méthode, un algorithme MO (GRODY, 1991) qui estime la diffusion du rayonnement micro-onde causée par les précipitations sur la zone observée à partir d'une combinaison des canaux MO. Cet indice de diffusion (SI) est donné par :

$$SI = F - T_{85H}$$

$$\text{où} \quad F = 32,95 + 0,125 T_{19V} + 0,456 T_{22V} + 0,0011 (T_{22V})^2$$

et $T_{f(V \text{ ou } H)}$ est la température de brillance du canal de fréquence f polarisé horizontalement (H) ou verticalement (V).

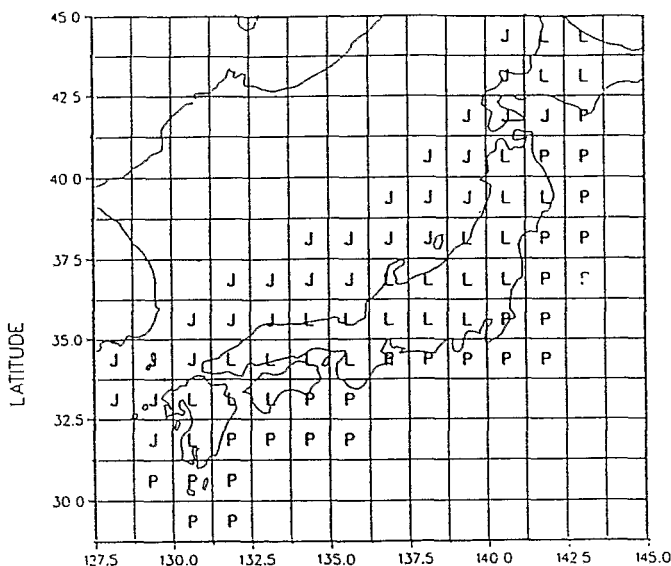


Figure 2 :

La région du Japon et les mers environnantes. Les données de validation ont été fournies pour les 79 carrés de 1,25° x 1,25° qui sont désignés par « P » (océan Pacifique), « J » (mer du Japon) et « L » (terre).

Les valeurs de *SI* à partir de 10 K sont utilisées pour évaluer les précipitations. Pour ces valeurs, le taux de précipitation (ou facteur de pluie) est donné par la relation suivante, applicable aussi bien sur mer que sur terre :

$$TP = -1,65 + 0,289 SI$$

Dans l'exemple de la classification donnée dans le tableau 2, les taux de précipitations pour les classes correspondant à des nuages précipitants ($SI \geq 10$ K) sont :

Classe	SI (K)	Taux de pluie
6	24	5,3
9	42	10,5
10	10	1,2

Ce sont ces facteurs de pluie qui sont appliqués à l'ensemble complet d'images classifiées pour l'estimation des précipitations, et la moyenne spatiale de la pluie estimée est ensuite calculée sur les 500 pixels constituant chaque carré. Nous présentons ici les résultats concernant le cumul mensuel de ces estimations horaires moyennes sur chacun des 79 carrés.

Nous avons comparé nos estimations pour les deux périodes avec les estimations obtenues par une technique IR et les estimations obtenues par une technique utilisant les données MO. L'algorithme IR est le GPI (GOES Precipitation Index - ARKIN, 1979 et ARKIN et MEISNER, 1987). Cet algorithme utilise un seuil égal à 235 K (-38°C) au-dessous duquel le pixel est associé à un taux de précipitation de 3 mm/heure. La technique MO utilise l'indice de diffusion *SI* et estime la pluie mensuelle à partir d'une interpolation des valeurs calculées aux heures de passage de l'instrument SSM/I sur tout ou partie de la zone étudiée.

Les tableaux 3a et 3b montrent les corrélations entre les valeurs estimées et observées de la pluie cumulée pour chacune des périodes (juin et juillet/août). D'autres paramètres comme la pluie moyenne estimée, l'erreur moyenne et l'écart type (RMSE) sont aussi présentés. Les figures 3a et 3b représentent pour chacune des périodes, les valeurs de la pluie cumulée estimées par les trois méthodes pour les 52 carrés mer (P et J dans la figure 2) et les 27 carrés terre (L) en fonction des pluies observées. Pour la période de juin plutôt caractérisée par des pluies frontales, la méthode combinée montre une nette amélioration de la corrélation avec les valeurs de pluie observées par rapport à ce que fournissent les deux autres techniques. Cette amélioration est moins significative pour la période juillet/août. Ce résultat est probablement dû à la difficulté des algorithmes qui ne permettent pas de détecter convenablement les systèmes orographiques présents sur la terre pendant cette période (voir la figure 3b).

Tableau 3a

Statistiques pour le mois de juin : pluie mensuelle moyenne observée : 134,2 mm

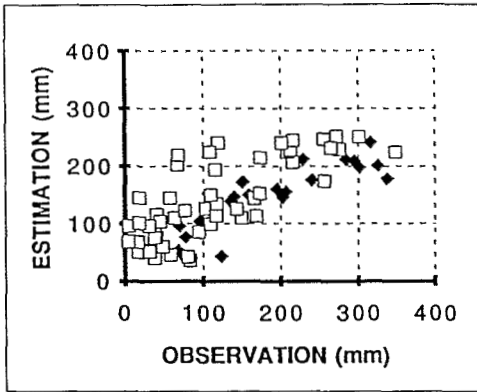
Algorithme	Moyenne (mm)	Erreur moyenne (mm)	« RMSE » (mm)	Corrélation
RACC	139	5	61	0,77
IR	220	86	113	0,64
MO	153	19	120	0,44

Tableau 3b

Statistiques pour la période juillet-août : pluie mensuelle moyenne observée : 121,9 mm

Algorithme	Moyenne (mm)	Erreur moyenne (mm)	« RMSE » (mm)	Corrélation
RACC (IR/MO)	73	-49	92	0,75
IR	81	-41	90	0,73
MO	75	-47	118	0,34

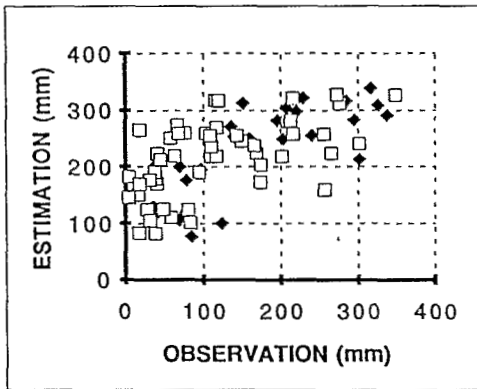
a)



RACC

correlation $r=0,77$
 bias=+5mm
 RMSE=61mm

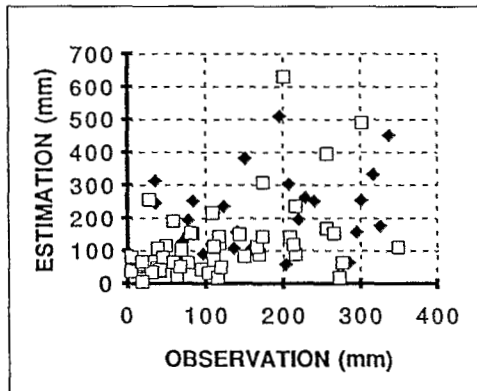
b)



IR

correlation $r=0,64$
 bias=+86mm
 RMSE=113mm

c)

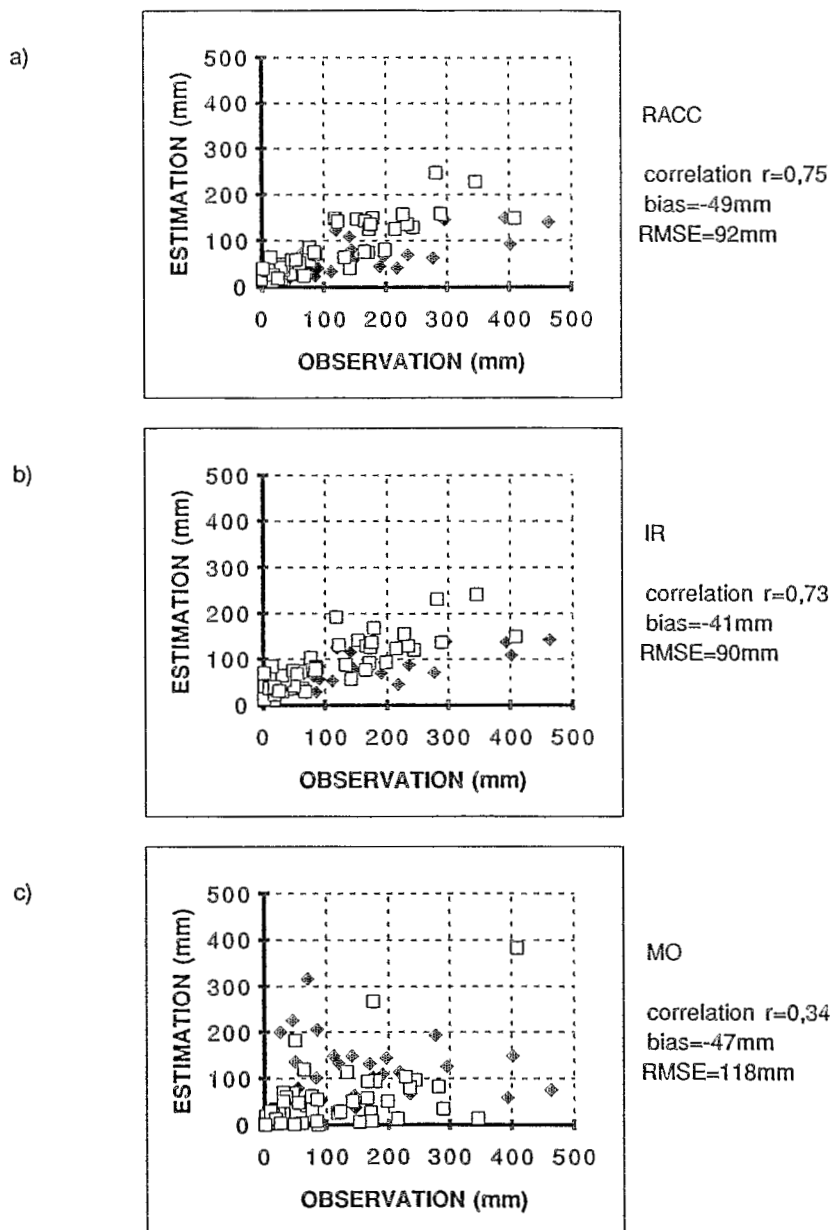


MO

correlation $r=0,44$
 bias=+19mm
 RMSE=120mm

Figure 3a :

Estimations et statistiques pour le mois de juin avec :
 a) la méthode RACC ; b) un algorithme IR (GPI) ;
 c) un algorithme MO pour les 79 carrés de $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$
 où \blacklozenge : Terre \square : Mer.

**Figure 3b :**

Estimations et statistiques pour la période de juillet/août avec :

a) la méthode RACC ; b) un algorithme IR (GPI) ;

c) un algorithme MO pour les 79 carrés de $1,25^\circ \times 1,25^\circ$

où \blacklozenge : Terre \square : Mer.

L'AFRIQUE TROPICALE

La région étudiée est située au Niger. Le site de validation, équipé d'un réseau dense de pluviographes, est une zone comprise entre 2°E-3°E et 13°N-14°N. La période étudiée couvre deux mois de la saison des pluies, du 6 juillet au 6 septembre 1989. Cette étude a été menée dans le cadre du programme Epsat (Estimation des Précipitations par Satellite) qui est décrit dans LEBEL *et al.* (1992).

Dans la phase d'apprentissage de la méthode RACC, nous avons utilisé les images semi-horaires du canal IR du satellite Météosat et les images MO de la température de brillance du canal 85 GHz (polarisation horizontale) du radiomètre SSM/I à bord du satellite DMSP F-8.

Nous avons utilisé un événement pluvieux particulier qui s'est produit pendant la journée du 4 août 1989, pour déterminer les facteurs de pluie en ajustant les taux de précipitations horaires estimés aux valeurs observées. La relation obtenue entre la température de brillance à 85 GHz, T_B , et le taux de pluie TP , s'écrit :

$$T_B = 253 - 7,0 TP + 0,08 TP^2$$

Dans cette application, la région étudiée n'étant un carré que d'environ 1 degré de côté, nous avons dû considérer des échelles spatiales et temporelles plus fines que dans l'étude précédente.

Le tableau 4a montre les valeurs des corrélations entre les valeurs estimées par la méthode RACC et les valeurs observées à différentes échelles spatiales (de 15 x 15 km² à 120 x 120 km²). Les précipitations sont cumulées sur des périodes allant de 1 heure à 12 heures ; sur l'ensemble des deux mois de mesures, il y a 26 journées comportant des événements pluvieux, il n'est donc pas significatif de faire des statistiques sur des périodes plus longues.

Nos résultats sont comparés à ceux obtenus avec une méthode IR à seuil, pour deux valeurs différentes du seuil choisi (-40°C et -60°C) ; les corrélations avec les valeurs observées sont données dans les tableaux 4b et 4c respectivement. La comparaison de ces coefficients de corrélation indique que la méthode RACC présente des meilleures corrélations que la technique IR, pour toutes les échelles spatio-temporelles testées. Toutefois il faut remarquer que l'amélioration est plus importante si l'on compare avec la technique IR utilisant le seuil -40°C qu'avec celle utilisant le seuil -60°C. Mais, comme il a été montré, par exemple dans JOBARD et DESBOIS (1992), le choix du meilleur seuil IR est la difficulté majeure de la technique IR à seuil, il peut aussi dépendre de l'échelle spatio-temporelle utilisée.

Tableau 4

Coefficients de corrélation entre les précipitations observées et estimées avec la méthode RACC (tableau 4a) et avec une méthode IR utilisant deux seuils différents : -40°C (tableau 4b) et -60°C (tableau 4c)

Tableau 4a
RACC

Échelle Temporelle (heure)	Échelle Spatiale (Km ²)			
	15 x 15	30 x 30	60 X 60	120 x 120
1	0,59	0,62	0,69	0,77
3	0,70	0,72	0,75	0,80
6	0,77	0,78	0,80	0,83
12	0,80	0,81	0,84	0,86

Tableau 4b
Seuil = -40°C

Échelle Temporelle (heure)	Échelle Spatiale (Km ²)			
	15 x 15	30 x 30	60 X 60	120 x 120
1	0,38	0,41	0,46	0,56
3	0,50	0,51	0,54	0,61
6	0,60	0,61	0,63	0,67
12	0,69	0,71	0,73	0,76

Tableau 4c
Seuil = -60°C

Échelle Temporelle (heure)	Échelle Spatiale (Km ²)			
	15 x 15	30 x 30	60 X 60	120 x 120
1	0,48	0,51	0,58	0,69
3	0,62	0,64	0,68	0,76
6	0,73	0,74	0,77	0,81
12	0,76	0,78	0,80	0,84

CONCLUSION

La méthode RACC d'estimation des précipitations par satellite, basée sur une technique de classification automatique des nuages, a été présentée. Cette méthode combine les images IR à haute résolution et des images MO à plus faibles résolutions spatiale et temporelle. Elle a été testée pour deux régions climatiques très différentes : une région océanique tempérée autour du Japon (terre et mer) et une région continentale tropicale de l'Afrique de l'ouest. Les estimations ont été faites pour les précipitations moyennées sur différentes surfaces et cumulées sur des périodes de durées différentes. Dans ces deux études, la méthode RACC a été mieux corrélée aux données de validation que les techniques utilisant séparément l'IR ou bien les MO. Ces résultats sont encourageants et indiquent que l'estimation des pluies par satellite peut certainement être améliorée en utilisant ensemble toutes les données satellite disponibles, parce qu'elles sont complémentaires. D'autres applications de la méthode RACC doivent encore être menées pour tester cette méthode sur d'autres régions climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ARKIN P. A., 1979. The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during Gate over the B-Scale array; *Mon. Weather Rev.*, 107, 1382-1387.
- ARKIN P. A., MEISNER B. N., 1987. The relationship between large scale convective rainfall and cold cloud over the western hemisphere during 1982-1984, *Mon. Weather Rev.*, 115, 51-74.
- DESBOIS M., SÈZE G., SZEJWACH G., 1982. Automatic classification of clouds on Meteosat imagery : application to high-level clouds, *J. Appl. Meteorol.*, 21, 401-412.
- GRODY N. C., 1991. Classification of snow cover and precipitation using the special sensor microwave imager, *J. Geophys. Res.*, 96, N°D4, 7423-7435.
- HOLLINGER J., LO R., POE G., SAVAGE R., PEIRCE J., 1987. Special sensor microwave/imager user's guide, Naval Research Laboratory, Washington D. C., 120 p.
- JOBARD I., DESBOIS M., 1992. Remote sensing of rainfall over the tropical Africa using Meteosat IR imagery : sensitivity to time and space averaging, *International Journal of Remote Sensing*, 13, N°14, 2683-2700.
- JOBARD I., DESBOIS M., 1994. Satellite estimation of the tropical precipitation using the Meteosat and SSM/I data, *Atmospheric Research*, 34, 285-298.
- LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPPFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B., HUBERT P., 1992 : Rainfall estimation in the Sahel : the Epsat-Niger experiment, *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*, 37, N°3, 201-215.
- LEE T.H., JANOWIAK J.E., ARKIN P.A., 1991. Atlas of products from the algorithm intercomparison project 1 : Japan and surrounding oceanic regions, June-August 1989, University Corporation for the Atmospheric Research, available from Climate Analysis Center, NOAA, Washington, 131 p.