

VALIDATION D'ESTIMATIONS DE PRÉCIPITATION PAR SATELLITE AVEC LE RÉSEAU DENSE D'EPSAT-NIGER

Y. ARNAUD¹, J. D. TAUPIN¹, H. LAURENT²

RÉSUMÉ

Deux méthodes opérationnelles d'estimation des précipitations (Epsat-Lannion simplifiée et Tamsat-Reading) utilisant les données du satellite Météosat ont été validées sur le degré carré de Niamey. Cette région de 100 x 100 km² qui est la zone des expériences Epsat-Niger et Hapex-Sahel est équipée d'un réseau dense de pluviographes.

Les estimations de pluie par satellite sont calculées à partir du canal infrarouge (10-12µm) de Météosat pour des périodes de 10 jours. L'algorithme Epsat-Lannion se calibre à partir des données opérationnelles du réseau pluviométrique de la région sahélienne. L'algorithme Tamsat, calibré sur les années antérieures, ne nécessite pas de donnée de calibration opérationnelle. Les pluies moyennes sur des surfaces de 5 x 5 km² (correspondant à la résolution du satellite) ont été calculées par krigeage à partir du réseau dense de pluviographes. Cette vérité-sol est utilisée pour valider les estimations de pluie par satellite à trois échelles différentes : 5 x 5 km², 50 x 50 km², 100 x 100 km², pour les années 1990, 1992, 1993. À petite échelle, les corrélations entre les estimations satellitales et les données de validation au sol sont très faibles. Ceci montre les limites d'une estimation de la pluie à l'échelle du pixel Météosat même sur des périodes de 10 jours. En revanche, la qualité des estimations augmente avec la surface d'estimation. À l'échelle du degré carré, c'est-à-dire à l'échelle de la maille des

¹Orstom, Télédétection et groupe PRAO, BP 11416 Niamey, Niger.

²Orstom, groupe PRAO, BP 5045, 34032 Montpellier, France.

modèles de circulation générale atmosphérique, les estimations satellitales de la pluie semblent en mesure d'apporter une information quantitative sur des périodes de 10 jours.

OBJECTIFS

En Afrique Sahélienne, où les besoins en eau sont cruciaux, les réseaux de mesure pluviométrique nationaux sont peu denses. Le satellite Météosat, de par sa situation géographique et grâce à sa grande répétitivité, nous offre un bon échantillonnage des phénomènes atmosphériques et de surface. Depuis plusieurs années différentes méthodes d'estimation des précipitations par satellite ont vu le jour (pour une revue, cf BARRETT and MARTIN, 1981). Ces méthodes sont difficiles à valider. La pluie avec sa grande variabilité à petite échelle est un phénomène difficile à mesurer ; les mesures pluviométriques ponctuelles ne sont généralement pas assez denses pour fournir une estimation spatiale de qualité pouvant servir à la validation des estimations satellitales. Nous nous proposons ici de valider deux méthodes d'estimation des précipitations par satellite avec un jeu indépendant de données mesurées sur le degré carré de Niamey par le réseau dense de pluviographes de l'expérience Epsat-Niger (LEBEL *et al.*, 1992, TAUPIN et LEBEL, 1993). Ces deux méthodes (Epsat-Lannion simplifiée et Tamsat-Reading) sont utilisées en opérationnel sur le continent ouest-Africain. Trois échelles spatiales d'analyses sont considérées pour des estimations décadaires, afin d'étudier l'influence de l'augmentation de la surface d'estimation sur la qualité des estimations satellitales.

PRÉSENTATION DU JEU DE DONNÉES ET DES MÉTHODES

Dans ce travail les saisons des pluies 1990, 1992 et 1993 sont analysées par périodes de 10 jours. Les périodes d'études s'étendent de la troisième décade de juin à la première décade de septembre 1990, de la troisième décade de juin à la première décade de septembre 1992 et de la première décade de juin à la troisième décade de septembre 1993.

— Réseau sol de calibration :

Les données des stations du réseau synoptique et les données des réseaux des DMN (Direction de Météorologie Nationale) de certains pays du CILSS sont utilisées pour la calibration des méthodes satellitales. En effet, dans le souci de travailler dans une zone climatologique homogène, les pays côtiers soudanais comme la Gambie, la Guinée Bissau, le Cap-vert n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Dans le cas d'une

calibration en temps réel, la méthode Epsat est tributaire de la réception des données, ce qui limite parfois le nombre de stations disponibles par rapport au potentiel réel des pays (DROUET, 1993).

— Réseau sol de validation :

Il s'agit du réseau dense de pluviographes de l'expérience Epsat-Niger (100 stations sur 16 000 km²). La méthode utilisée, le krigeage, est un outil statistique d'interpolation spatiale qui prend en compte la totalité des informations disponibles sur le réseau. Elle est basée sur le calcul d'une fonction spatiale de structure permettant de connaître, d'une part la répartition en tout point ou sur toute surface de la pluie ainsi que de son écart type d'estimation, et d'autre part la distance maximale de corrélation entre les stations. Pour notre étude les calculs de lames d'eau ont été effectués sur des mailles de 1 pixel Météosat (5 x 5 km² de surface), 10 x 10 pixels (2 500 km²) et 20 x 20 pixels (10 000 km²).

— Données satellitales :

Les différentes images nécessaires au calcul des indices ont été fournies par le centre Agrhymet pour 1993, par l'Orstom Dakar pour 1992, ou achetées à l'Esoc pour 1990. Les indices suivants : OCC35, OCC40, OCC50, OCC60, TMAX ont été calculés conformément à la méthodologie décrite par TALL (1993). Les deux méthodes satellitales fournissent des estimations à l'échelle du pixel Météosat sur des périodes de 10 jours.

La méthode Epsat (CARN *et al.*, 1989) : il s'agit de la méthode simplifiée qui est utilisée en opérationnel à l'Agrhymet et qui ne tient pas compte, notamment, de la température de l'air comme terme correcteur climatologique. Dans notre cas, elle a été calibrée sur 218 stations en 1990, sur plus de 400 stations en 1992 et sur 134 stations en 1993 réparties sur l'ensemble des pays du CILLS.

Le modèle proposé est le suivant :

$$\text{Epsat} : P = a \text{ OCC40} + b \text{ TMAX} + c \text{ LAT} + d$$

avec $P = 0$ si $\text{OCC40} = 0$

OCC40 : occurrence à -40°C , TMAX : température radiative maximale,

LAT : Latitude

Le tableau 1 résume les principaux paramètres des régressions linéaires utilisées pour les trois années étudiées.

Remarque : pour l'année 1992, les coefficients associés à TMAX sont positifs alors que ceux des années 1990 et 1993 sont négatifs, car pour ces images les comptes numériques ont été inversés.

— La méthode Tamsat (MILFORD and DUGDALE, 1989) : les estimations ont été effectuées à partir des coefficients 1992 fournis par le groupe Tamsat de Reading.

Le modèle utilisé est le suivant :

$$\text{Tamsat} : P = a \text{ OCC} + b$$

avec $P = 0$ si $\text{OCC} = 0$

OCC peut prendre les valeurs OCC40, OCC50 ou OCC60, suivant 6 différentes zones géographiques.

Tableau 1

Coefficients de corrélation (r), coefficients des régressions linéaires (a,b,c,d) correspondant à (OCC40, TMAX, LAT, Cte) pour les décades des saisons des pluies 1990, 1992 et 1993

	DÉCADES	r	c (LAT)	a (OCC40)	b (TMAX)	d (Cte)
1990	6-3.	0.52	-0.48	1.13	-1.47	72.18
	7-1.	0.52	3.49	1.20	-1.65	21.27
	7-2.	0.57	2.24	1.48	-2.65	72.92
	7-3.	0.64	-8.80	0.73	-1.20	196.02
	8-1.	0.55	-0.23	0.50	-3.30	151.37
	8-2.	0.63	3.08	1.18	-2.16	46.33
	8-3.	0.58	-0.32	1.20	-1.29	70.82
	9-1.	0.68	-1.05	0.59	-2.18	120.38
	1992	6-3.	0.70	0.12	1.08	0.95
7-1.		0.68	-2.27	1.38	0.46	19.57
7-2.		0.52	-2.42	1.54	0.52	26.62
7-3.		0.54	0.15	1.02	1.58	-51.02
8-1.		0.59	-4.02	1.51	0.02	64.00
8-2.		0.59	5.60	1.11	1.98	-159.41
8-3.		0.64	2.77	2.25	2.24	-138.99
9-1.		0.69	-2.19	1.70	0.80	6.44
1993		6-1.	0.55	3.27	1.42	-0.47
	6-2.	0.63	2.18	1.76	-0.19	-0.41
	6-3.	0.55	2.14	0.90	-0.59	74.71
	7-1.	0.60	-3.63	0.37	-0.37	126.34
	7-2.	0.62	-4.50	1.07	0.03	68.75
	7-3.	0.50	4.24	1.18	-1.04	99.75
	8-1.	0.53	3.56	1.60	-0.79	67.37
	8-2.	0.69	4.63	1.31	-1.50	142.71
	8-3.	0.57	-5.40	0.11	-0.66	205.45
	9-1.	0.63	-4.30	0.98	-0.32	109.34
	9-2.	0.61	0.37	0.71	-0.70	110.77
	9-3.	0.62	-0.40	1.53	-0.11	21.04

En principe la méthode Tamsat est calibrée sur les années antérieures, ce qui n'a pas été le cas pour 1990 et 1993. Pour l'année 1990 nous avons utilisé les coefficients 1992 établis sur les années antérieures, dont l'année 1990 elle-même. Ceci privilégie la méthode puisque les données 1990 sont prises en compte pour le calcul des paramètres de la relation pluie/occurrence des nuages. En revanche les coefficients 1992 ont été utilisés pour l'année 1993, ce qui pénalise alors la méthode puisque les données acquises pendant l'hivernage 1992 n'ont pas été prises en compte.

RÉSULTATS

COEFFICIENTS DE CORRÉLATION PAR DÉCADE POUR LES TROIS ANNÉES ÉTUDIÉES

— Échelle d'analyse du pixel Météosat (25 km²) :

Le tableau 2 montre les coefficients de corrélation linéaire, d'une part entre les estimations Epsat et Tamsat, et, d'autre part entre les méthodes satellitales et la pluie au sol pour les décades de 1990, 1992 et 1993. On peut observer qu'à cette échelle spatiale, pour certaines décades, il n'existe pas de relation entre la pluie estimée et la pluie observée (coefficients négatifs ou proches de 0). Les coefficients de corrélation entre les deux méthodes satellitales sont généralement bons, excepté pour certaines décades particulières (8 décades ≤ 0.5).

COEFFICIENTS DE CORRÉLATION POUR L'ENSEMBLE DES ANNÉES ÉTUDIÉES

— Échelle d'analyse du pixel Météosat (25 km²) :

Les coefficients de corrélation s'améliorent quand on considère l'ensemble des trois années regroupées. Cependant la dispersion des points reste importante et l'augmentation des coefficients de corrélation est due essentiellement à l'augmentation de la dynamique des valeurs sur les deux axes.

Tableau 2

Coefficients de corrélation linéaire entre Epsat et Tamsat, entre Epsat et la donnée sol, entre Tamsat et la donnée sol à l'échelle du pixel Météosat (25 km²) pour les décades des saisons des pluies 1990, 1992 et 1993

	DÉCADES	EPSAT/TAMSAT	EPSAT/SOL	TAMSAT/SOL	
1990	6-3.	0.38	0.20	-0.32	
	7-1.	0.56	0.34	0.51	
	7-2.	0.70	0.00	-0.01	
	7-3.	0.83	0.43	0.50	
	8-1.	0.25	-0.17	0.52	
	8-2.	0.85	-0.36	-0.39	
	8-3.	0.43	0.56	0.02	
	9-1.	0.77	0.48	0.25	
	TOTAL 1990		0.90	0.60	0.53
1992	6-3.	0.48	0.33	0.77	
	7-1.	0.60	0.82	0.49	
	7-2.	0.43	0.31	0.70	
	7-3.	0.50	-0.70	-0.33	
	8-1.	0.97	0.19	0.15	
	8-2.	0.92	0.45	0.46	
	8-3.	0.93	-0.04	-0.09	
	9-1.	0.53	-0.23	0.10	
	TOTAL 1992		0.91	0.82	0.79
1993	6-1.	0.65	0.64	0.26	
	6-2.	0.93	0.19	0.03	
	6-3.	0.92	0.80	0.72	
	7-1.	0.58	0.55	0.78	
	7-2.	0.86	0.10	0.11	
	7-3.	0.75	0.65	0.53	
	8-1.	0.68	0.26	0.25	
	8-2.	0.43	0.20	0.07	
	8-3.	0.74	0.35	0.19	
	9-1.	0.72	-0.62	-0.64	
	9-2.	0.46	-0.05	-0.50	
	9-3.	0.62	0.27	0.13	
	TOTAL 1993		0.80	0.74	0.68
	TOTAL GÉNÉRAL		0.87	0.74	0.67

Tableau 3

Coefficients de corrélation entre les méthodes satellitaires (Epsat et Tamsat) et la pluie mesurée au sol en fonction de l'échelle spatiale considérée pour les années 1990, 1992 et 1993

	pixel	10 x 10 pixels	20 x 20 pixels
Epsat/sol	0.74	0.87	0.92
Tamsat/sol	0.67	0.80	0.84
Epsat/Tamsat	0.87	0.84	0.85

- Échelle d'analyse de 10 x 10 pixels Météosat (2 500 km²) :
À cette échelle les relations s'améliorent comme le montrent les coefficients de corrélation (tableau 3) et l'allure générale des nuages de points de la figure 1.

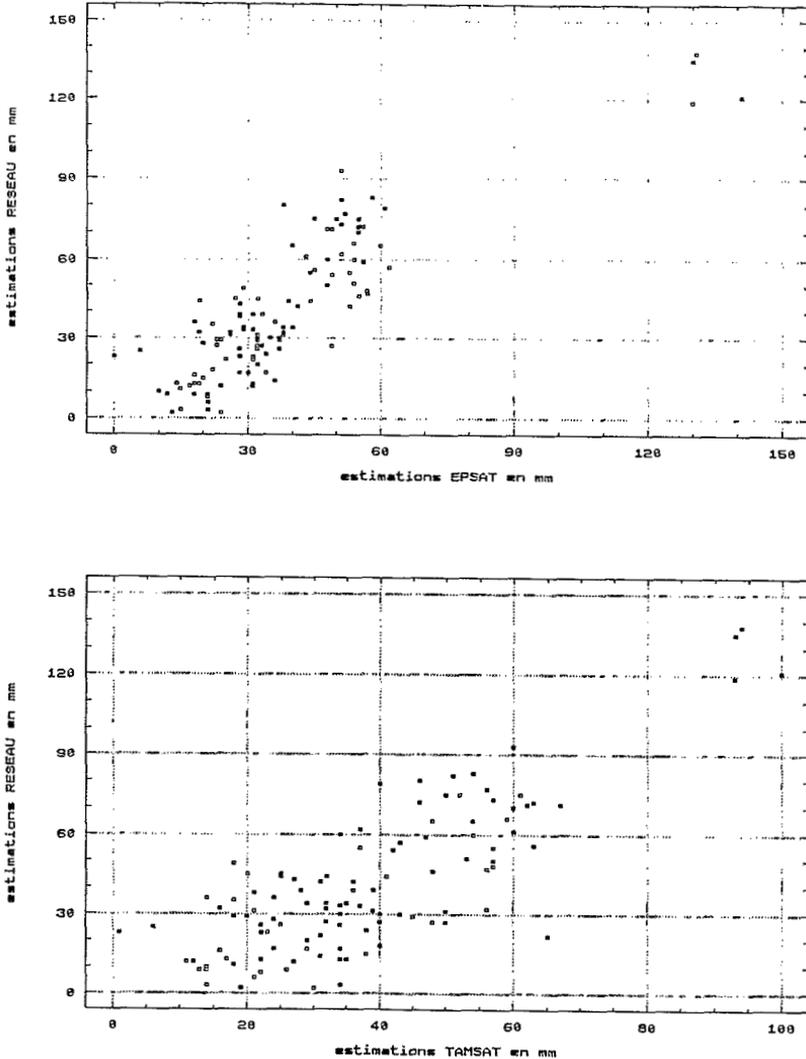


Figure 1 :

Pluies décadaires estimées (mm) par les méthodes Epsat et Tamsat en fonction de la pluie calculée au sol (mm) sur une surface de 2 500 km² pour les saisons des pluies 1990, 1992 et 1993.

- Échelle d'analyse de 20 x 20 pixels Météosat (10 000 km²) :
 Cette échelle de 1 x 1 degré correspond à la taille de la maille des modèles de circulation générale atmosphérique. Pour les deux méthodes satellitales, on observe encore une amélioration des résultats par rapport aux deux échelles d'analyses précédentes (figure 2 et tableau 3).

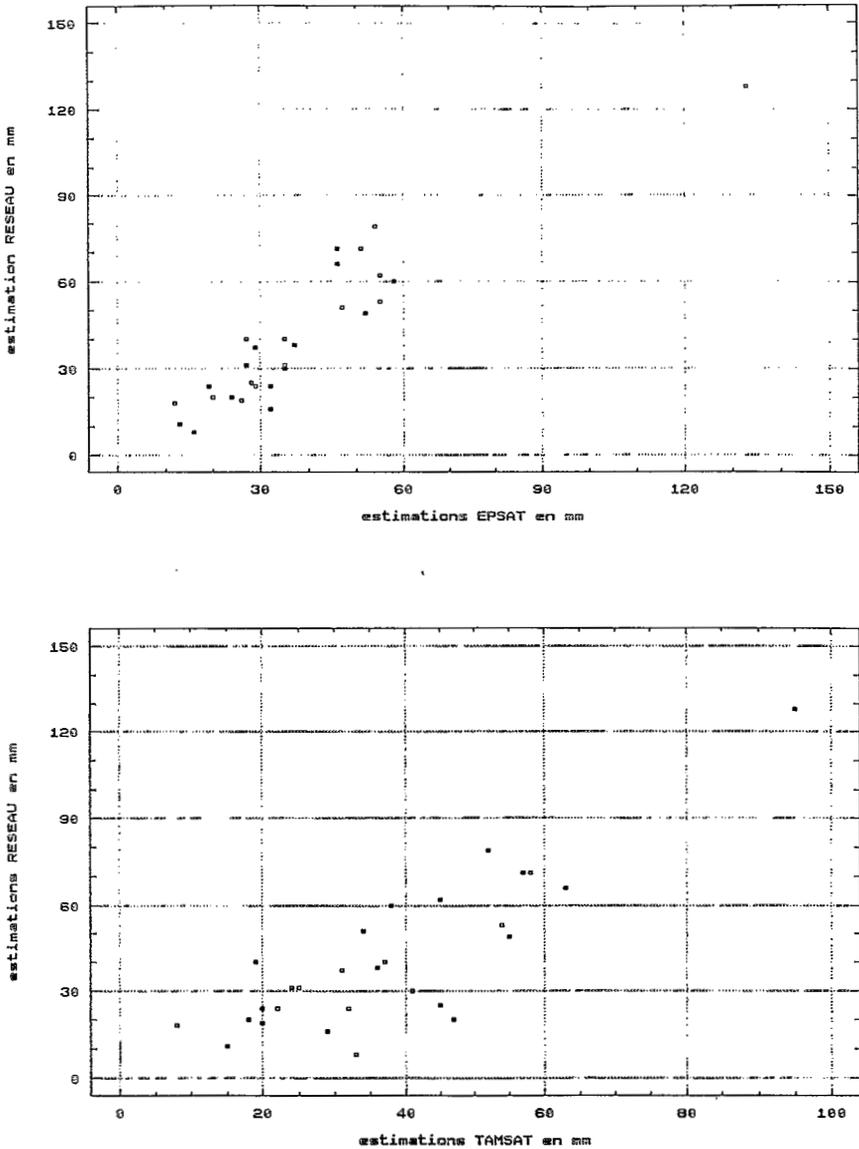


Figure 2 :

Pluies décadaires estimées (mm) par les méthodes Epsat et Tamsat en fonction de la pluie calculée au sol (mm) sur une surface de 10 000 km² pour les saisons des pluies 1990, 1992 et 1993.

COEFFICIENTS DE CORRÉLATION PAR ANNÉE

Le tableau 4a représente les différents coefficients de corrélation entre les méthodes satellitales et la pluie observée au sol aux trois échelles spatiales étudiées pour les années 1990, 1992 et 1993.

Tableau 4a

Coefficients de corrélation entre Epsat, Tamsat, et la pluie au sol pour les saisons des pluies 1990, 1992 et 1993

1990	pixel	10 x 10 pixels	20 x 20 pixels
Epsat/sol	0.60	0.66	0.76
Tamsat/sol	0.53	0.61	0.65
Epsat/Tamsat	0.90	0.76	0.81
1992	pixel	10 x 10 pixels	20 x 20 pixels
Epsat/sol	0.82	0.92	0.95
Tamsat/sol	0.72	0.89	0.9
Epsat/Tamsat	0.91	0.91	0.91
1993	pixel	10 x 10 pixels	20 x 20 pixels
Epsat/sol	0.74	0.83	0.94
Tamsat/sol	0.68	0.80	0.89
Epsat/tamsat	0.80	0.83	0.82

Pour chaque année on observe une augmentation systématique des coefficients de corrélation quand la surface d'estimation augmente. Les meilleurs résultats sont systématiquement obtenus, avec les deux méthodes, aux trois échelles spatiales, sur les années 1992 et 1993. Ceci pourrait être lié à la meilleure qualité des données sol de 1992 et 1993 par rapport à 1990. L'étude des saisons des pluies 1991 et 1994 nous donnera d'autres éléments pour juger de l'impact de la qualité des données sol de validation sur les coefficients de corrélation.

ERREURS MOYENNES D'ESTIMATION

Une autre manière d'apprécier l'amélioration induite par l'augmentation de la surface d'estimation est de calculer une erreur moyenne d'estimation. Le tableau 4b présente les erreurs moyennes d'estimation qui ont été calculées comme suit :

$$ERR = 1/n \sum (|Estimation - Pluie|) ;$$

ERR : erreur moyenne d'estimation ;

n : nombre d'observations ;

Estimation : pluie estimée par satellite ;

Pluie : pluie estimée au sol (mesures pluviographiques sur le degré carré).

Tableau 4b

Erreurs moyennes d'estimation de la pluie en mm pour Epsat, Tamsat pour les saisons des pluies 1990, 1992 et 1993 et pour les trois années réunies

	pixel	10 x 10 pixels	20 x 20 pixels
1990			
Epsat/sol	13.3	12.6	11.9
Tamsat/sol	15.2	12.7	9.4
1992			
Epsat/sol	13.7	12.7	9.2
Tamsat/sol	15.8	17.0	15
1993			
Epsat/sol	18.7	9.7	5.7
Tamsat/sol	22.0	12.7	9.2
1990, 1992, 1993			
Epsat/sol	15.0	11.2	7.8
Tamsat/sol	17.4	13.8	11.6

Le tableau 4b montre que pour chaque année étudiée les erreurs moyennes d'estimation diminuent quand la surface d'estimation augmente. À l'échelle du pixel, elles sont comprises entre 15 et 22 mm, à l'échelle de 10 x 10 pixels, elles sont comprises entre 9 et 17 mm, et à l'échelle de 20 x 20 pixels, elles sont comprises entre 5 et 15 mm.

DISCUSSION

Les résultats montrent que les estimations des précipitations obtenues à partir des méthodes satellitales précédentes ne sont pas satisfaisantes à l'échelle du pixel Météosat (25 km²) (voir les coefficients de corrélation du tableau 1). En revanche, comme le montrent les tableaux 3 et 4, l'augmentation de la surface d'estimation entraîne une augmentation systématique des coefficients de corrélation entre les estimations satellitales et la pluie au sol déduite du réseau de pluviographes. Les changements induits sur les coefficients de corrélation des méthodes satellitales entre elles ne vont pas toujours dans le sens d'une amélioration (ces derniers passent de 0.87 à l'échelle du pixel, à 0.84 à l'échelle de 10 x 10 pixels et à 0.85 pour une surface de 20 x 20 pixels). Ceci montre que l'augmentation des coefficients de corrélation n'est pas uniquement due au lissage induit par l'augmentation de la surface d'estimation mais bel et bien à une amélioration de la qualité des estimations satellitales et pluviométriques. À l'échelle du pixel, pour l'ensemble des années, les coefficients de corrélations entre Epsat et les données sol passent de 0.74 à 0.87 à l'échelle de 10 x 10 pixels puis à 0.92 pour une surface

de 20 x 20 pixels. Pour la méthode Tamsat les coefficients de corrélation passent de 0.67 pour l'échelle du pixel à 0.80 pour une surface d'estimation de 10 x 10 pixels puis à 0.84 pour une surface de 20 x 20 pixels.

Dans notre étude la validation sol est effectuée avec un jeu indépendant de données critiquées, acquis sur une zone relativement réduite (degré carré de Niamey) comparée à la zone d'étude correspondant aux pays du CILSS sur lesquels ont été calibrées les méthodes satellitales. Ainsi les résultats qui suivent seront difficilement applicables à une autre sous-région sans étude préalable. En effet l'étude menée ici concerne le milieu sahélien, donc une climatologie particulière ne rendant pas compte de la climatologie de chaque région du CILSS. Il serait intéressant d'effectuer ce type d'étude sur une zone climatique différente et ayant un réseau assez dense pour permettre l'interpolation des données sol. Le Burkina Faso semble approprié et constituerait une étude intermédiaire entre le degré carré et l'Afrique de l'ouest.

Le travail sur des données spatialisées, calculées à partir d'un réseau dense de mesures, est nécessaire pour pouvoir comparer des grandeurs de même nature. Comparer une mesure satellite intégrée sur 25 km² avec la donnée pluviographique qui lui correspond, est une source d'erreur supplémentaire. En effet, on peut se poser la question de la représentativité d'une mesure ponctuelle unique par rapport à une valeur moyenne sur 25 km² (FLITCROFT *et al.*, 1989). Toutefois le nombre de stations présentes sur la zone d'étude nous autorise à considérer que les valeurs spatiales interpolées à partir du réseau sol, au pas de la décade, restent relativement proches de la réalité ou, du moins en sont la meilleure représentation. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'on travaille à l'échelle du degré carré.

CONCLUSIONS

Les deux méthodes Epsat et Tamsat ne peuvent vraisemblablement pas donner une information quantitative réaliste de la pluie à l'échelle du pixel Météosat pour des périodes de 10 jours. Aux échelles de 10 x 10 pixels et de 20 x 20 pixels, toujours pour des périodes de 10 jours, les estimations satellitales sont pertinentes. Les deux méthodes sont sensiblement équivalentes avec cependant de meilleurs coefficients de corrélation pour celle d'Epsat-Lannion par rapport à Tamsat-Reading. Compte tenu des difficultés rencontrées dans la collecte des données pluviométriques et de leur fiabilité (DROUET, 1993), il serait préférable, dans un cadre opérationnel, de diriger les recherches vers des méthodes ne nécessitant pas une calibration en temps réel.

Ce type de travail (validation avec un réseau dense indépendant) devrait être étendu à d'autres années disponibles (en particulier 1991 et 1994), à d'autres zones climatiques de validation et également à d'autres méthodes d'estimation.

BIBLIOGRAPHIE

- BARRET, E. C., D. N. MARTIN ; 1981 : The use of satellite data in rainfall monitoring, Academic Press, 340 p.
- CARN M., DAGORNE D., GUILLOT B., LAHUEC J.P., 1989 : Estimation des pluies par satellite en temps réel en Afrique sahélo-soudanienne. Veille climatique satellitaire, Orstom/ Coopération, N°28, 47-55.
- DROUET J.L., 1993 : La collecte des données pluviométriques pendant la campagne pluviale 1993 et leur fiabilité. Actes de l'atelier estimation des pluies, Agrhymet, 2-4 décembre 1993, Niamey.
- FLITCROFT J. D., MILFORD J.R., DUGDALE G., 1989 : Relating point to area average rainfall in semiarid west Africa and the implications for rainfall estimates derived from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, Vol 28, 252-266.
- 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.
- MILFORD J.R., DUGDALE G., 1989 : In application of remote sensing in agriculture. Proceedings of 48th easter school in agricultural science, university of Nottingham, July 1989, Butterworth, London, 16 p.
- TALL F., 1993 : Description de la base de données utilisée pour la validation des méthodes d'estimation des pluies. Actes de l'atelier estimation des pluies, Agrhymet, 2-4 décembre 1993, Niamey.
- TAUPIN J.D., LEBEL T., 1993 : Estimation des précipitations en zone sahélienne : l'expérience Epsat-Niger, une vérité sol adaptée. Atelier estimation des pluies, Agrhymet, 2-4 décembre 1993, Niamey.