

**ERREUR D'ESTIMATION  
DE LA PLUIE À L'ÉCHELLE DÉCADAIRE  
SUR DES SURFACES DE 25 À 10 000 KM<sup>2</sup>  
EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU RÉSEAU SOL  
EN MILIEU SAHÉLIEN :  
IMPLICATION DANS L'INTERCOMPARAISON  
DONNÉES SOLS-DONNÉES SATELLITAIRES**

**J.-D. TAUPIN, E. BONEF**  
(ORSTOM, BP 11416 - NIAMEY, NIGER)

## RÉSUMÉ

L'expérience EPSAT-Niger (Estimation des Précipitations par SATEllite au NIGER) basée sur la mesure pluviographique d'un réseau dense (une centaine de pluviographes) est destinée à améliorer la connaissance des systèmes précipitants de l'Afrique soudano-sahélienne. Le réseau de pluviographes est disposé sur une surface d'environ 16 000 km<sup>2</sup> autour de Niamey, les pluviographes étant répartis selon un maillage régulier de 12,5 km de côté. Pour estimer correctement la pluie à l'aide des données infrarouges satellitaires on a, avant tout, besoin de données sol de bonne qualité, pour la calibration et la validation. Cela nécessite une densité de postes qui doit concorder avec la taille de la maille sur laquelle on veut estimer la pluie. Ceci est d'autant plus vrai en région sahélienne où la répartition des pluies n'obéit pas à des lois simples et où la distance de corrélation entre les stations est relativement faible, ne permettant pas ainsi l'utilisation des méthodes d'extrapolation avec suffisamment de précautions. Le but de cette étude est de regarder la variation de l'erreur d'estimation sur la lame d'eau décadaire en fonction de la densité du réseau et de la taille de la maille. On a choisi une sous-zone, d'environ 10 000 km<sup>2</sup>, de la zone d'étude de l'expérience EPSAT-Niger (13°-14° N en latitude et 2°-3° E en longitude) où la densité pluviographique est régulière (une soixantaine de postes). L'étude a porté sur quatre années 1990-1993. On a fait varier la taille de la maille (5 x 5 km<sup>2</sup> à 100 x 100 km<sup>2</sup>) et la densité du réseau (58 à 4 appareils sur 100 x 100 km<sup>2</sup>). Les résultats montrent que l'erreur croît avec la diminution de la densité de postes ou avec la diminution de la taille de la maille. L'erreur reste toujours importante pour les petites mailles même avec une forte densité de postes. La répartition de la pluie sur la zone joue aussi un rôle important dans l'erreur d'estimation.

## INTRODUCTION

Le problème principal dans la validation des algorithmes d'estimation des précipitations par satellite réside dans la comparaison avec les données sol. En effet, comparer directement un indice satellitaire qui représente une moyenne spatiale (5 x 5 km<sup>2</sup>) avec une donnée ponctuelle risque d'engendrer une erreur importante sur la qualité de la donnée sol considérée ici comme équivalente à une moyenne spatiale. Ceci est d'autant plus vrai en zone sahélienne où la variation spatiale des précipitations est très importante et cela à toutes les échelles de temps (TAUPIN *et al.*, 1993). Pour contour-

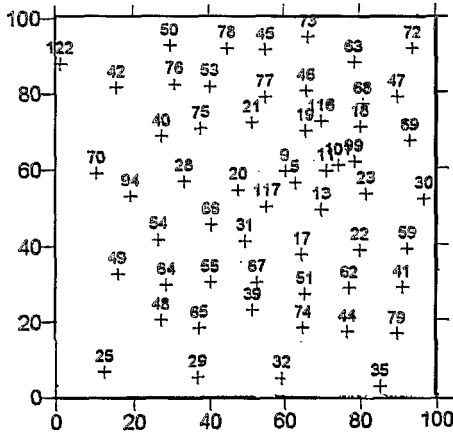
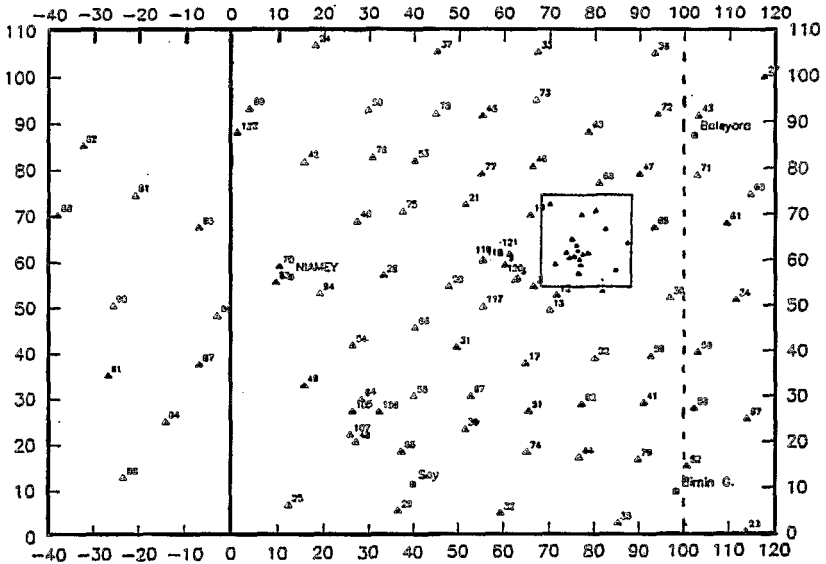
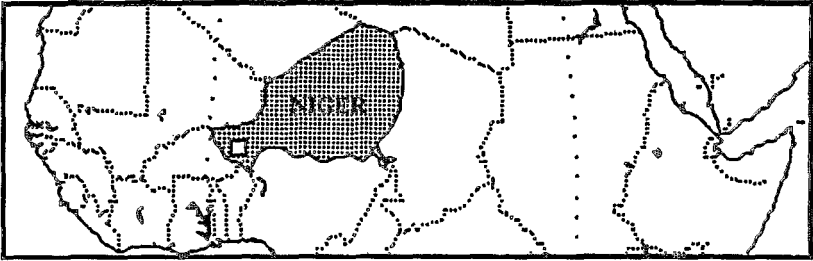


Figure 1 : Emplacement de la zone d'étude, réseau de l'expérience EPSAT en 1992 et réseau de référence de l'étude.

ner ce problème, des méthodes géostatistiques peuvent être utilisées pour obtenir une interpolation spatiale à partir des données ponctuelles de la zone. Néanmoins, un certain nombre d'erreurs sont liées intrinsèquement à ces méthodes, ce qui ne permet pas toujours de reconstituer un champ pluviométrique fiable, ceci en raison des hypothèses statistiques sur le phénomène pluie qui ne sont pas toujours remplies et de la distribution des points d'échantillonnage utilisés. Pour cette étude préliminaire, on a utilisé la méthode du krigeage comme interpolateur spatial et on a regardé la variation relative de l'erreur en fonction de deux critères principaux: la densité du réseau et la taille de la maille sur laquelle on veut calculer une moyenne spatiale. Ceci devant permettre de déterminer une erreur minimale sur la valeur sol moyennée en fonction de ces deux paramètres et ainsi, de comparer de la façon la plus fiable possible les données satellitaires et les données sols.

## MÉTHODOLOGIE

### Données utilisées

Pour réaliser cette étude, on a utilisé les données du réseau dense de pluviographes de l'expérience EPSAT-Niger située en zone sahélienne au Niger (LEBEL *et al.*, 1992). Ces pluviographes, environ une centaine, sont disposés sur une surface de 16 000 km<sup>2</sup>, (figure 1) comprenant une zone de référence de 10 000 km<sup>2</sup> (le degré carré, 13°-14° N et 2°-3° E) et une zone d'extension moins dense à l'ouest d'environ 6 000 km<sup>2</sup>. Sur la zone de référence, le réseau a la forme d'une grille à peu près régulière avec une maille de base de 12,5 x 12,5 km<sup>2</sup> (densité du réseau égal à 1 appareil pour 156 km<sup>2</sup>) avec une cible de 20 par 20 km<sup>2</sup> où l'interdistance entre les postes décroît jusqu'à 1 km (densité du réseau égale à 1 appareil pour 9 km<sup>2</sup>). Pour garder la meilleure homogénéité possible dans les résultats, seule la zone de référence a été retenue, et à l'intérieur de cette zone, un réseau régulier de densité 1 appareil pour 172 km<sup>2</sup> ce qui représente environ 58 appareils sur une zone de 10 000 km<sup>2</sup>.

### Méthode d'interpolation choisie (quelques rappels)

Il existe évidemment de nombreuses méthodes d'interpolation, statistiques ou déterministes, mais les comparaisons effectuées montrent que les méthodes statistiques, qui tiennent compte de la structure spatiale des champs de pluie, tel que le krigeage (méthode d'interpolation linéaire optimale), donnent de meilleurs résultats que les méthodes déterministes (CREUTIN et OBLED, 1982).

Pour le krigeage (DELHOMME, 1978), le champ de pluie est considéré comme un processus aléatoire, représenté par une fonction aléatoire (FA), Z, prenant ses valeurs dans un espace à 2 dimensions, avec t(x,y) un point de l'espace. Cette fonction aléatoire doit être stationnaire d'ordre 2, c'est-à-dire que les deux premiers moments de sa loi de probabilité sont invariants par translation ((krigeage simple) :

$$E[Z(t)] = m \quad \text{et} \quad E[(Z(t) - m), (Z(t+h) - m)] = C(h) \quad C(h) = \text{fonction de covariance}$$

Appliquée aux accroissements, on obtient :

$$E[Z(t+h) - Z(t)] = 0 \quad \text{et} \quad \text{var}[Z(t+h) - Z(t)] = 2\gamma(h) \quad \gamma(h) = \text{fonction variogramme}$$

Pratiquement, la fonction variogramme est estimée pour une classe d'interdistance donnée par :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1, n(h)} [Z(t_i + h) - Z(t_i)]^2$$

avec  $n(h)$  le nombre de points dans la classe  $h$ .

Le variogramme ainsi établi permet de caractériser la variabilité spatiale du paramètre mesuré (distance maximum de corrélation) et la variance de l'échantillon dans le cas où l'on atteint un palier. Le variogramme peut ensuite être représenté par un modèle théorique (gaussien, exponentiel, sphérique...) qui permet l'interpolation spatiale en tous points (figure 2).

## Application

À l'aide du krigeage, on a essayé de reconstituer à l'échelle décadaire des moyennes spatiales sur des mailles de différentes tailles en dégradant un réseau de référence.

Pour les années 1990 à 1992, le réseau de référence retenu est d'environ 58 stations. Pour l'année 1993, le dispositif ayant été diminué, le réseau de référence ne représente plus que 34 stations.

Pour chaque décade, on a modélisé une fonction de structure à partir du réseau de référence qui a permis de calculer sur le degré carré ( $100 \times 100 \text{ km}^2$ ) des valeurs surfaciques dites de référence selon une taille de maille variant de  $10\,000 \text{ km}^2$  à  $25 \text{ km}^2$  (10 000, 2 500, 1 600, 900, 625, 400, 225, 100, 25).

Le réseau a ensuite été dégradé 4 fois de façon régulière et chaque fois d'un facteur deux :

- réseau demi = 28 stations,
- réseau quart = 14 stations,

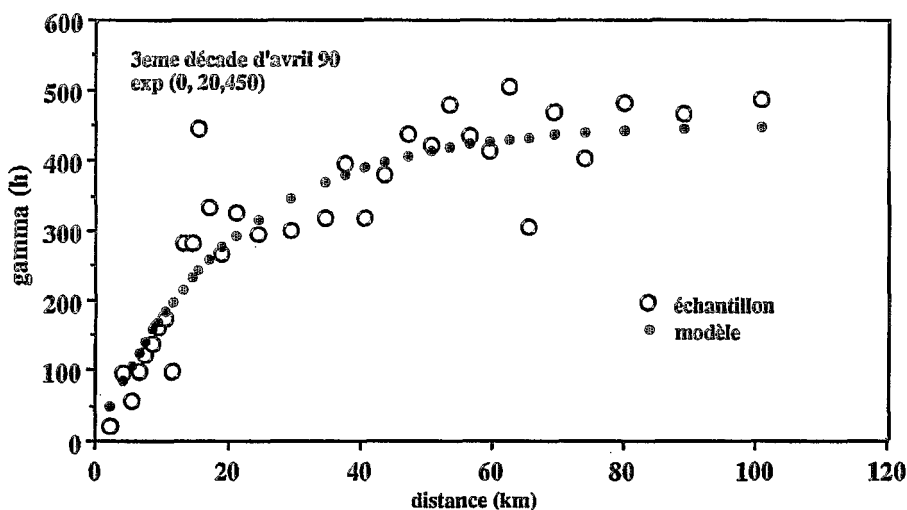


Figure 2 : Exemple de variogramme obtenu sur la zone au pas de temps décadaire.

réseau huit = 8 stations,  
réseau quatre = 4 stations.

Un réseau intermédiaire de cinq stations a aussi été conçu pour estimer l'amélioration que l'on peut obtenir par rapport au réseau de quatre stations en ajoutant une valeur centrale au réseau.

Pour chaque type de réseau dégradé (demi, quart, huit...) plusieurs sous-réseaux ont été déterminés afin d'estimer l'erreur d'interpolation due à la disposition du réseau. Pour le réseau demi, on obtient 2 sous-réseaux, pour le réseau quart et huit, on a 4 sous-réseaux et pour le réseau cinq et quatre on a déterminé 7 sous-réseaux.

Pour chaque réseau dégradé, on a calculé par krigeages des moyennes pluviométriques surfaciques (25 à 10 000 km<sup>2</sup>) afin de les comparer avec les valeurs surfaciques de références.

Plusieurs critères d'estimation de l'erreur peuvent être utilisés. L'interpolation par krigeage permet de donner un écart-type d'estimation, ECTE, associé au calcul de la moyenne surfacique. Cet ECTE ne rend compte que de l'incertitude de l'estimation et non pas de l'estimation de l'erreur absolue sur la valeur de la moyenne surfacique. C'est pourquoi, on a choisi d'utiliser un critère de comparaison beaucoup plus simple, qui rend mieux compte de la variation de l'erreur due à la diminution de la densité du réseau et de la taille de la maille :

$$E_{\text{moy}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left( \frac{X_{\text{ref}i} - X_i}{X_{\text{ref}i}} \right)^2}$$

$X_{\text{ref}i}$ ,  $X_i$  = moyenne krigée sur la maille  $i$  pour le réseau de référence, pour le réseau dégradé  $N$  = nombre de mailles.

Ce critère  $E_{\text{moy}}$  représente l'écart relatif moyen à la référence par maille calculée.

Il est évident que cet écart relatif moyen ne représente pas une valeur réelle de l'écart qui existerait entre la moyenne surfacique vraie et la moyenne surfacique obtenue pour un réseau dégradé, car le calcul sur les surfaces de références sont eux-mêmes entachés d'une erreur issue de la méthode d'interpolation :

- erreur due à l'interprétation du variogramme, en effet il est quelques fois très difficile de caler un modèle de variogramme,
- erreur due au réseau de référence, en effet si on peut présumer que l'erreur sera minimale quand on calcule la moyenne sur de grandes surfaces, l'erreur d'estimation tend à devenir importante quand le calcul se fait sur les plus petites mailles car la densité du réseau de référence ne couvre plus ces surfaces (un appareil pour 172 km<sup>2</sup> soit un appareil pour 7 mailles de 25 km<sup>2</sup> ou un appareil pour 2 mailles de 100 km<sup>2</sup>).

## RÉSULTATS

Le traitement des données a concerné quatre années, de 1990 à 1993, représentatives de saisons bien différentes. 1990 et 1993 sont des années nettement déficitaires sur la zone d'étude et 1991 et 1992 des années moyennement pluvieuses (tableau 1).

Tableau 1 - Pluviométrie décadaire sur le degré carré 1990-1992.

Décade	1990	1991	1992	1993		1990	1991	1992	1993
1-5	7,4		0,3			0,02	0,00	0,00	0,00
2-5	4,3	6,8	10,1			0,03	0,01	0,02	0,00
3-5	30,2	91,5	12,8	6,5		0,10	0,19	0,05	0,01
1-6	13,4	20,3	29,7	30,4		0,13	0,23	0,10	0,08
2-6	13,7	27,6	16,2	31,4		0,16	0,29	0,14	0,15
3-6	41,2	35,5	23,5	16,6		0,26	0,36	0,18	0,18
1-7	23,5	22,9	6,8	40,0		0,32	0,40	0,20	0,27
2-7	37,6	47,2	48,6	29,7		0,41	0,50	0,29	0,33
3-7	72,2	23,4	82,4	50,2		0,58	0,54	0,45	0,44
1-8	51,3	75,2	61,1	66,0		0,70	0,69	0,57	0,58
2-8	18,7	67,2	23,8	68,8		0,75	0,82	0,62	0,73
3-8	18,6	44,2	130,6	55,6		0,79	0,91	0,88	0,85
1-9	46,1	11,6	23,0	21,5		0,90	0,93	0,92	0,89
2-9	36,7	3,6	37,2	36,8		0,99	0,94	0,99	0,97
3-9	4,8	0,5	1,9	10,1		1,00	0,94	1,00	0,99
1-10	0,1	30,2	0,5	3,4		1,00	1,00	1,00	1,00
	419,9	507,8	508,5	467,1					

L'analyse détaillée s'est faite plus précisément sur l'année 1992. L'étude a été faite sur les 16 décades de la saison, de la première décade de mai à la première décade d'octobre (tableau 2).

Tableau 2 - Décades de la saison 1992.

	Moy. arith.	Nb. stat. P ≥ 0,5	Valeur min.	Valeur max.	Moy. krigée	ECT
1-5	0,3	9	0,0	8,9	0,3	1,2
2-5	10,1	50	0,0	48,4	10,8	12,8
3-5	12,8	53	0,0	50,6	12,8	14,5
1-6	29,7	57	1,5	61,2	29,4	16,7
2-6	16,2	57	0,5	56,7	20,0	14,9
3-6	23,5	56	0,0	64,0	23,8	16,6
1-7	6,8	56	0,0	23,1	7,8	7,1
2-7	48,6	57	7,4	99,2	47,7	22,4
3-7	82,4	57	31,5	141,1	81,0	28,1
1-8	61,1	57	19,2	164,3	65,4	30,8
2-8	23,8	57	2,8	80,9	25,0	15,5
3-8	130,6	57	81,3	198,5	127,0	29,7
1-9	23,0	57	0,5	43,8	22,9	11,4
2-9	37,2	57	3,7	108,7	35,2	18,6
3-9	1,9	16	0,0	23,9	2,5	4,4
1-10	0,5	16	0,0	3,4	0,5	1,0

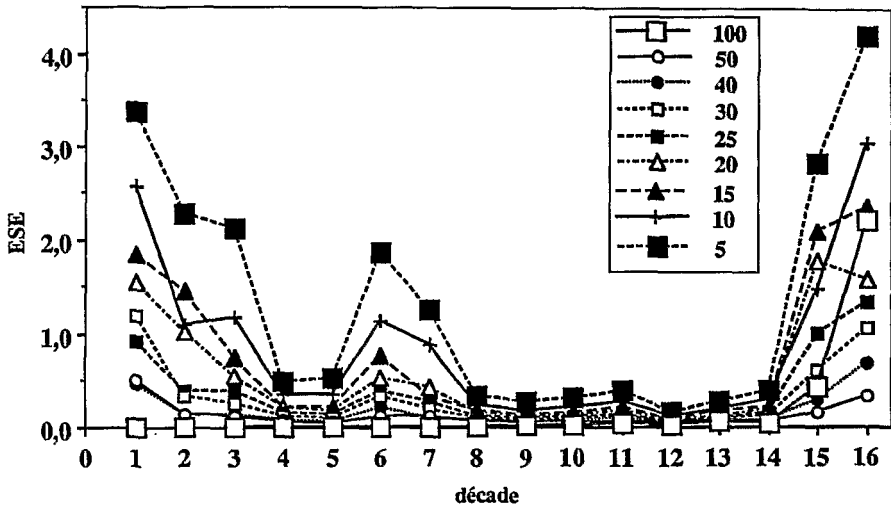


Figure 3 : Calcul de ESE moyen par maille de 5 à 100 km de côté pour le réseau de référence, saison 1992.

### Variation de Emoy en fonction du type de champ pluviométrique

En première approche, sur la figure 2 qui représente la variation de l'Erreur Standardisée d'Estimation (ESE) moyenne par maille ( $1/N \sum (ECTE / \text{moyenne surfacique})_i$ ) pour le réseau de référence, on peut voir que la qualité de l'interpolation va dépendre de la structure du champ pluviométrique.

Si pour la maille de 10 000 km<sup>2</sup> l'ESE est proche de 0 pour toutes les décades, quand la maille de calcul diminue l'ESE augmente et va diverger particulièrement pour sept décades. L'interpolation par krigeage va être en effet limitée dans la reconstitution des champs pluviométriques qui présentent une structure non continue et/ou de faibles hauteurs d'eau sur la zone d'étude. C'est le plus souvent le cas des décades de début et de fin de saison des pluies. En comparant les champs pluviométriques décennaux de 1992 reconstitués par krigeage (fig. 4), on constate que la première décade et les deux dernières décades ont donné les plus faibles hauteurs d'eau, et qu'elles présentent des ESE qui augmentent fortement pour les petites tailles de mailles. C'est aussi le cas pour la première décade de juillet. Pour la deuxième et troisième décade de mai, et la troisième décade de juin où la hauteur d'eau moyenne sur le degré carré est un peu plus conséquente, l'accroissement important de l'ESE sur les petites mailles est dû à une structure du champ pluvieux présentant des discontinuités dans le champ pluviométrique. Il est à noter cependant, qu'en termes de bilan hydrologique, les sept décades, où la méthode d'interpolation atteint ses limites, ne représentent qu'environ 10 % de la pluviométrie de la saison.

### Variation de Emoy en fonction de la disposition du réseau

Les réseaux choisis sont tous plus ou moins réguliers, ce qui leur permet *a priori* de rendre le mieux compte de la structure du champ pluviométrique contrairement à un

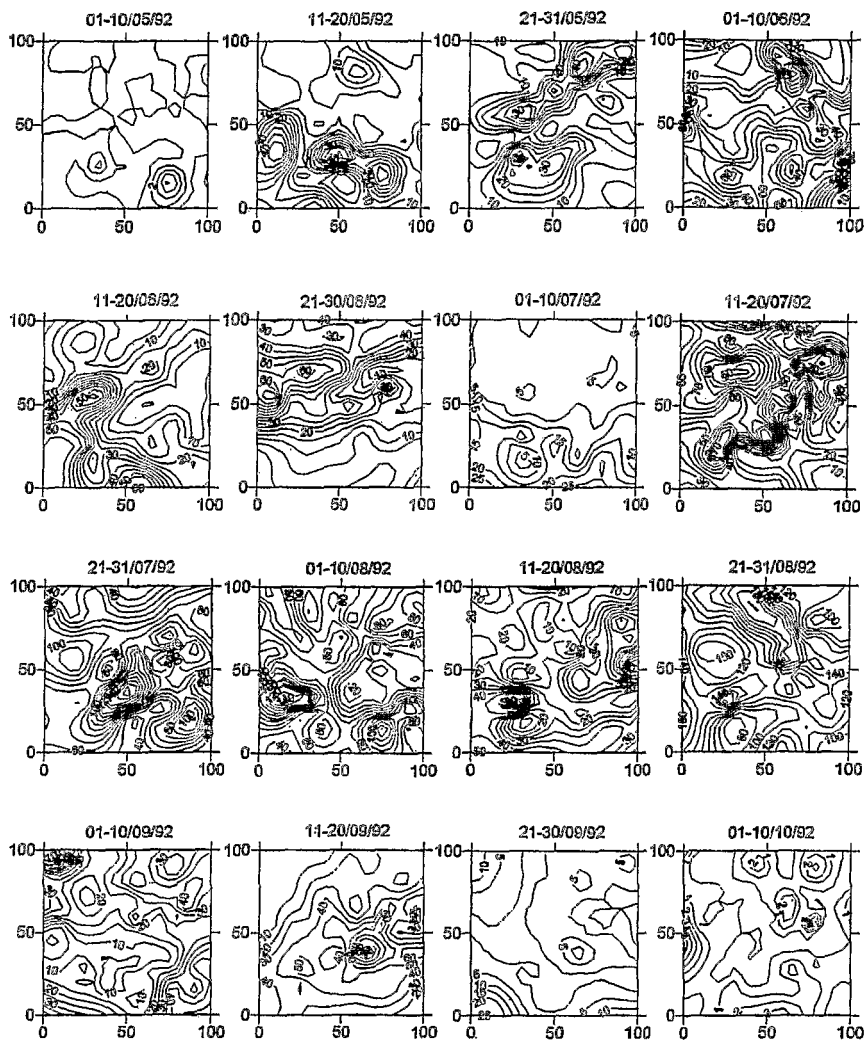


Figure 4 : Interpolation par krigeage des champs pluviométriques décadaires, saison 1992.

réseau hétérogène. En dégradant le réseau, pour un même nombre de stations, on peut créer plusieurs réseaux réguliers différents et, on peut s'interroger sur le choix d'un réseau par rapport à un autre.

Pour l'année 1992, on a regardé le comportement de Emoy pour chaque configuration de réseau. Il en ressort pour les deux réseaux demi (fig. 5, tableau 3), qu'il n'y a pas de différence sensible dans le calcul de la moyenne sur la surface de 10 000 km<sup>2</sup>. Pour la plus petite surface 25 km<sup>2</sup>, on ne note pas non plus de variation importante de Emoy pour la plupart des décades, sauf pour les cinq décades de début et de fin de saison des pluies, déjà définies précédemment, qui présentent de fortes discontinuités et de faibles hauteurs de pluie.



Tableau 3 - Valeur min et max de Emoy  
sur l'ensemble des sous-réseaux de n stations pour la maille de 100 et la maille de 5.

	Demi (2)		Quart (4)		Huit (4)		Cinq (7)		Quatre (7)	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Maille 100 x 100 km										
1-5	0,33	0,33	0,67	0,33	0,67	0,33	5,00	0,00	6,33	0,00
2-5	0,04	0,02	0,41	0,05	0,68	0,27	0,70	0,01	0,76	0,07
3-5	0,05	0,03	0,29	0,02	0,48	0,04	1,16	0,01	1,35	0,20
1-6	0,07	0,06	0,10	0,03	0,19	0,07	0,24	0,00	0,43	0,03
2-6	0,03	0,01	0,13	0,01	0,30	0,01	0,24	0,08	0,30	0,06
3-6	0,04	0,02	0,11	0,01	0,16	0,04	0,43	0,02	0,39	0,03
1-7	0,06	0,01	0,28	0,06	0,35	0,00	0,44	0,03	0,45	0,10
2-7	0,06	0,02	0,08	0,03	0,14	0,05	0,31	0,03	0,41	0,05
3-7	0,03	0,00	0,07	0,00	0,14	0,02	0,20	0,02	0,26	0,01
1-8	0,04	0,04	0,12	0,01	0,19	0,07	0,35	0,08	0,37	0,06
2-8	0,05	0,00	0,18	0,06	0,15	0,06	0,44	0,00	0,52	0,06
3-8	0,02	0,00	0,06	0,01	0,03	0,01	0,17	0,02	0,17	0,02
1-9	0,04	0,03	0,14	0,03	0,14	0,03	0,31	0,02	0,61	0,01
2-9	0,09	0,03	0,17	0,01	0,22	0,04	0,61	0,00	0,59	0,03
3-9	0,20	0,16	1,16	0,44	1,76	0,80	3,76	0,36	4,76	0,32
1-10	0,00	0,00	1,00	0,00	0,80	0,00	1,60	0,20	2,20	0,40
Maille 5 x 5 km										
1-5	0,80	0,76	1,36	0,97	1,12	0,89	9,46	0,86	10,17	0,84
2-5	1,14	1,03	2,92	1,39	6,48	2,17	4,78	1,47	5,55	1,23
3-5	1,46	0,95	2,67	1,70	4,42	2,42	6,47	1,46	7,62	1,67
1-6	0,17	0,16	0,68	0,38	0,75	0,26	0,74	0,41	0,73	0,39
2-6	0,41	0,23	0,65	0,47	1,39	0,62	1,30	0,51	1,40	0,74
3-6	0,22	0,20	0,38	0,23	1,16	0,74	3,25	0,90	3,08	0,91
1-7	0,51	0,23	0,93	0,47	1,21	0,43	2,59	0,76	2,23	0,83
2-7	0,14	0,12	0,19	0,16	0,31	0,18	0,57	0,26	0,62	0,27
3-7	0,08	0,07	0,13	0,10	0,18	0,14	0,25	0,15	0,25	0,15
1-8	0,13	0,12	0,24	0,20	0,27	0,19	0,59	0,27	0,61	0,27
2-8	0,23	0,18	0,44	0,38	0,33	0,25	0,77	0,29	0,89	0,29
3-8	0,05	0,04	0,14	0,10	0,13	0,10	0,23	0,12	0,24	0,12
1-9	0,16	0,12	0,24	0,17	0,41	0,25	0,63	0,31	1,08	0,32
2-9	0,18	0,15	0,35	0,31	0,48	0,28	1,03	0,33	1,00	0,31
3-9	1,90	1,17	6,94	3,86	11,24	1,17	25,42	1,32	31,14	1,00
1-10	0,90	0,74	2,61	0,80	2,11	0,80	4,42	0,74	6,01	0,73

Pour les réseaux encore plus dégradés (quart, huit, cinq et quatre), les différences sur Emoy, dues à la disposition du réseau, deviennent plus significatives. Le réseau n'étant plus suffisant pour décrire les variations de petite échelle, l'influence zonale d'un poste donné n'est plus que partiellement compensée par les postes voisins. Pour la maille de 10 000 km<sup>2</sup>, la variation de Emoy d'un réseau à l'autre peut être importante en valeur relative mais reste quand même faible en valeur absolue pour les décades à champs bien structurés. Le choix d'un réseau particulier reste toutefois difficile

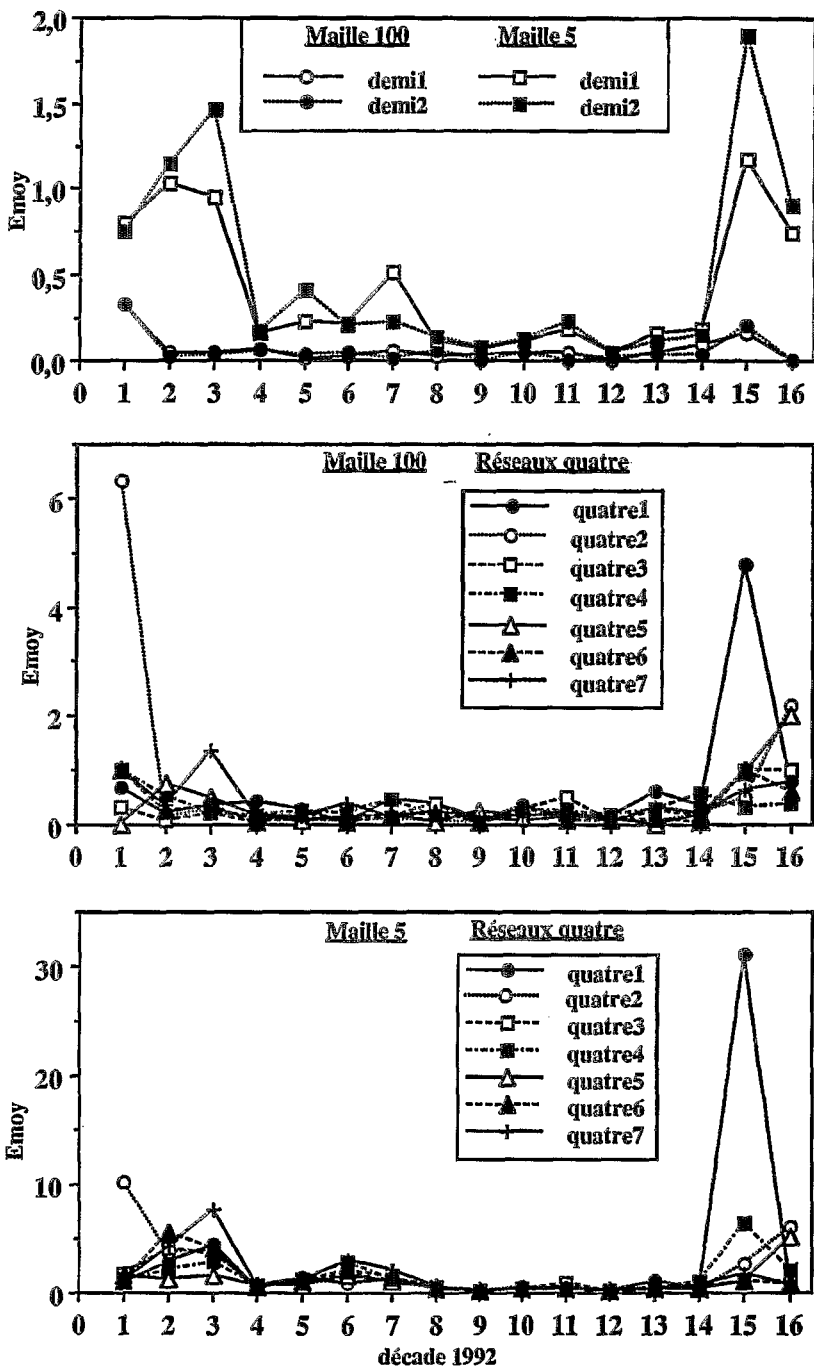


Figure 5 : Variabilité de Emoy pour différents réseaux demi et quatre pour les mailles de 100 et 5 km de côté.

à définir car d'une décade à l'autre le champ est plus ou moins bien reconstitué selon le réseau. Les variations les plus importantes liées aux fortes valeurs de Emoy, observées sur les cinq décades de début et de fin de saison montrent que quels que soient la disposition du réseau et le nombre de stations, le calcul de la moyenne surfacique pour ce type de décade reste entaché d'une très forte erreur d'estimation.

### **Variation de Emoy en fonction de la dégradation de la densité du réseau et de la diminution de la taille de la maille (tableau 4)**

Pour une taille de maille fixée, la dégradation du réseau entraîne intuitivement une perte d'information en relation directe avec le nombre de postes sur la maille. Il en est de même, pour un réseau fixé, quand on calcule la moyenne surfacique sur des mailles de plus en plus petites. Mais cette perte d'information donne des résultats plus ou moins sensibles selon les paramètres taille et maille choisis.

Pour la maille de 10 000 km<sup>2</sup>, si l'on retire les trois décades de début de saison et les deux décades de fin de saison, la dégradation de moitié du réseau n'entraîne pratiquement pas d'écart sur le calcul de la moyenne surfacique par rapport à la valeur de référence (6 % d'écart au maximum). En dégradant le réseau, les valeurs de Emoy augmentent, mais restent à un niveau relativement faible, pour le réseau minimal (quatre stations), Emoy varie entre 10 et 25 %. On peut aussi remarquer que le réseau de cinq stations apporte une amélioration de Emoy, quelle que soit la décade, par rapport au réseau de quatre stations (figure 6).

Pour les mailles de taille inférieure, Emoy augmente beaucoup plus fortement, quand on dégrade le réseau ou quand on diminue la taille de la maille (figures 6 et 7). Néanmoins pour les décades situées entre mi-juillet et mi-septembre, qui représentent 80 % de la pluie, les écarts restent dans la même gamme de valeur que ceux calculés sur la maille de 10 000 km<sup>2</sup> (figure 6). Par exemple, pour la troisième décade d'août (figure 8), qui est la plus pluvieuse (130 mm de pluie sur la zone), Emoy par maille de 25 km<sup>2</sup> et pour le réseau de quatre stations est égal à 16 % alors que Emoy pour la maille de 10 000 km<sup>2</sup> est de 9,6 %. Il est vrai que la valeur de Emoy sur les petites mailles correspond à la moyenne des écarts sur la totalité des mailles recouvrant la zone d'étude de 10 000 km<sup>2</sup>, d'où un effet de lissage qui reste quand même faible (pour le réseau quatre stations et pour la maille de 25 km<sup>2</sup>, l'écart à la référence sur les 400 mailles varie de 0 à 65 %).

### **Aspect climatologique de la variation de Emoy**

Dans la première partie on a montré que la structure du champ pluviométrique pouvait limiter l'utilisation de la méthode d'interpolation par krigeage. En effet, en zone sahélienne les précipitations et leur structure sont directement liées à la montée du flux de mousson vers le nord. Ceci implique qu'en début de saison et en fin de saison les conditions pluviogènes ne sont pas toutes réunies, le nombre d'événements/jour est alors minimal, les événements sont de faibles hauteurs de pluie et leurs extensions sont faibles, ce qui engendre à l'échelle de notre zone d'étude des champs discontinus de faibles hauteurs de pluie d'où des variogrammes de faibles portées qui sont en général inférieurs à la distance interposte. Ceci rend l'interpolation spatiale hasardeuse

puisque d'après le variogramme il n'y a aucune corrélation entre les postes. Par contre, en milieu de saison des pluies, toutes les conditions sont réunies pour avoir des événements de grande extension spatiale couvrant des zones nettement supérieures à 10 000 km<sup>2</sup>, avec de fortes précipitations et un nombre d'événements/jour maximal. Il en résulte à l'échelle de la décade, un lissage du signal pluie entraînant des portées de variogrammes plus importantes et donc une meilleure interpolation des champs même en dégradant fortement le réseau.

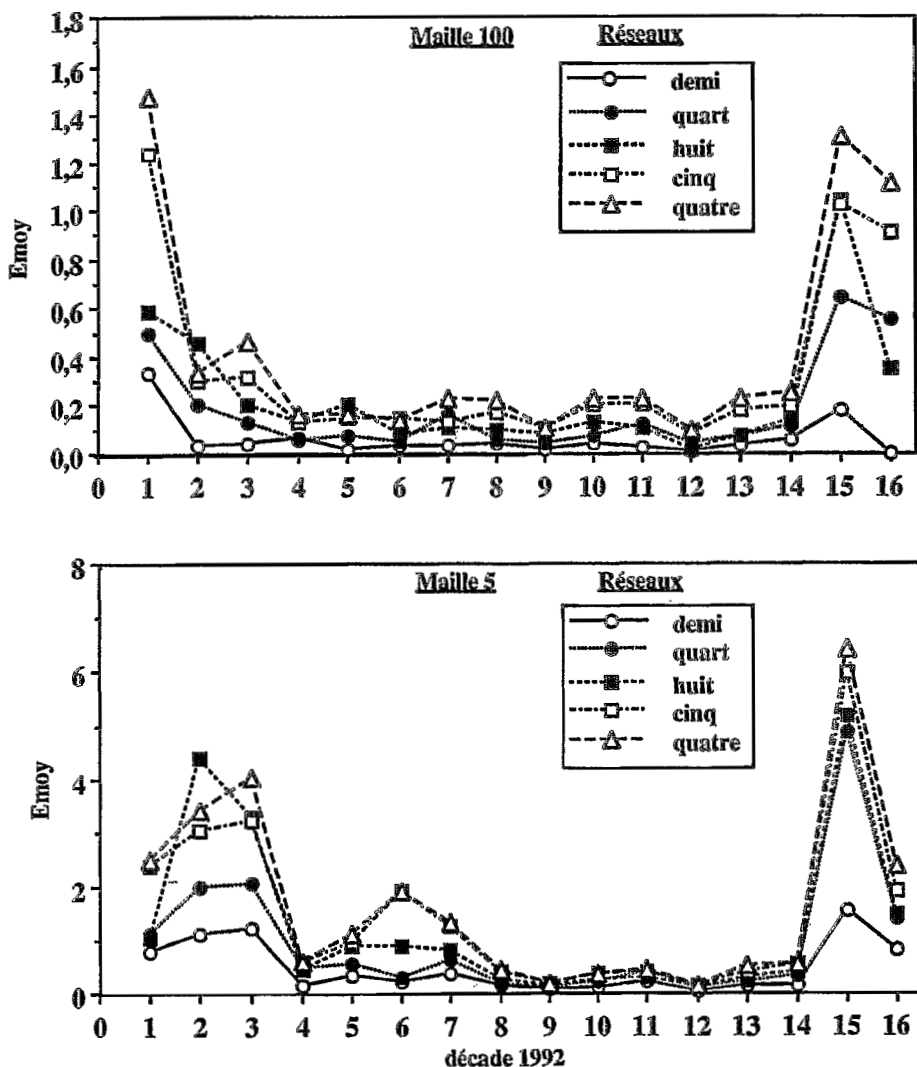


Figure 6 : Variabilité de Emoy en fonction des différents réseaux dégradés pour une taille de maille de 100 et 5 km de côté.

Tableau 4 - Calcul de Emoy pour les décades de 1992.

	100	50	40	30	25	20	15	10	5	100	50	40	30	25	20	15	10	5
	Réseau demi									Réseau cinq								
1-5	0,330	0,545	0,375	0,410	0,560	0,705	0,545	0,775	0,780	1,239	1,379	1,027	1,457	1,424	2,137	2,001	2,421	2,376
2-5	0,030	0,155	0,180	0,260	0,295	0,570	0,720	0,830	1,085	0,299	0,641	0,436	0,941	1,000	2,273	2,473	2,521	3,059
3-5	0,040	0,150	0,145	0,255	0,275	0,380	0,455	0,710	1,205	0,321	0,466	0,360	0,649	1,161	1,291	1,423	2,184	3,221
1-6	0,065	0,070	0,055	0,080	0,110	0,130	0,100	0,155	0,165	0,134	0,249	0,137	0,216	0,406	0,473	0,354	0,547	0,600
2-6	0,020	0,075	0,095	0,110	0,130	0,175	0,230	0,265	0,320	0,149	0,401	0,326	0,454	0,616	0,679	0,669	0,847	0,936
3-6	0,030	0,050	0,075	0,105	0,110	0,125	0,155	0,180	0,210	0,144	0,421	0,580	0,773	0,836	0,991	1,266	1,514	1,917
1-7	0,035	0,105	0,105	0,115	0,150	0,200	0,165	0,270	0,370	0,130	0,391	0,297	0,419	0,633	0,784	0,520	1,150	1,251
2-7	0,040	0,055	0,050	0,090	0,095	0,105	0,100	0,130	0,130	0,170	0,273	0,216	0,293	0,327	0,354	0,340	0,389	0,406
3-7	0,015	0,030	0,040	0,045	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075	0,104	0,107	0,101	0,127	0,154	0,156	0,159	0,177	0,186
1-8	0,040	0,065	0,070	0,085	0,100	0,105	0,105	0,115	0,125	0,200	0,230	0,256	0,294	0,291	0,316	0,337	0,341	0,353
2-8	0,025	0,090	0,105	0,090	0,150	0,165	0,155	0,190	0,205	0,201	0,234	0,254	0,271	0,291	0,324	0,340	0,366	0,389
3-8	0,010	0,015	0,030	0,030	0,035	0,035	0,040	0,040	0,045	0,079	0,093	0,107	0,114	0,136	0,139	0,144	0,151	0,154
1-9	0,035	0,040	0,045	0,090	0,090	0,100	0,115	0,120	0,140	0,181	0,246	0,264	0,313	0,316	0,331	0,396	0,374	0,404
2-9	0,060	0,065	0,090	0,100	0,105	0,130	0,130	0,150	0,165	0,199	0,344	0,221	0,399	0,466	0,483	0,469	0,540	0,566
3-9	0,180	0,210	0,175	0,405	0,620	0,860	1,250	1,115	1,535	1,029	1,089	1,300	2,160	3,733	4,643	6,223	4,373	5,971
1-10	0,000	0,255	0,200	0,355	0,455	0,380	0,500	0,755	0,820	0,914	0,876	1,091	1,243	1,513	1,450	1,680	1,897	1,910
	Réseau quart									Réseau quatre								
1-5	0,500	0,578	0,705	0,868	0,830	0,905	0,895	1,068	1,095	1,476	1,379	1,000	1,856	1,511	2,146	2,114	2,593	2,499
2-5	0,208	0,450	0,385	0,670	0,610	1,235	1,875	1,845	1,983	0,330	0,737	0,527	0,987	1,097	2,456	2,783	2,714	3,423
3-5	0,133	0,243	0,245	0,393	0,558	0,693	0,853	1,223	2,065	0,463	0,571	0,439	0,757	1,337	1,544	1,706	2,580	4,029
1-6	0,060	0,203	0,153	0,203	0,325	0,378	0,313	0,435	0,478	0,164	0,247	0,166	0,220	0,409	0,476	0,357	0,544	0,594
2-6	0,073	0,223	0,225	0,230	0,313	0,368	0,430	0,490	0,555	0,159	0,423	0,373	0,526	0,681	0,769	0,781	0,974	1,084
3-6	0,050	0,058	0,100	0,133	0,150	0,170	0,208	0,238	0,283	0,139	0,411	0,570	0,761	0,826	0,984	1,254	1,501	1,900
1-7	0,163	0,243	0,225	0,303	0,368	0,445	0,370	0,573	0,623	0,230	0,549	0,513	0,541	0,733	0,904	0,683	1,227	1,317
2-7	0,055	0,090	0,108	0,110	0,130	0,150	0,155	0,168	0,173	0,219	0,303	0,267	0,327	0,359	0,384	0,370	0,413	0,429
3-7	0,040	0,048	0,060	0,073	0,090	0,098	0,103	0,115	0,118	0,108	0,113	0,109	0,134	0,159	0,163	0,164	0,180	0,189
1-8	0,073	0,118	0,120	0,170	0,173	0,185	0,195	0,205	0,213	0,230	0,256	0,291	0,310	0,310	0,329	0,349	0,353	0,360
2-8	0,125	0,240	0,280	0,283	0,308	0,330	0,360	0,378	0,403	0,224	0,253	0,311	0,303	0,331	0,366	0,389	0,407	0,430
3-8	0,038	0,065	0,083	0,080	0,098	0,098	0,113	0,110	0,115	0,096	0,104	0,114	0,124	0,144	0,143	0,150	0,157	0,161
1-9	0,070	0,108	0,128	0,135	0,150	0,170	0,183	0,193	0,208	0,224	0,296	0,350	0,409	0,400	0,420	0,509	0,469	0,509
2-9	0,113	0,188	0,128	0,213	0,255	0,280	0,265	0,315	0,335	0,250	0,333	0,273	0,409	0,456	0,470	0,466	0,514	0,540
3-9	0,640	0,648	0,980	1,725	2,920	3,353	4,630	3,488	4,895	1,314	1,380	1,750	2,616	4,220	5,159	6,756	4,820	6,424
1-10	0,550	0,580	0,723	0,930	1,010	0,908	1,178	1,325	1,395	1,114	1,064	1,367	1,630	1,933	1,814	2,123	2,330	2,387
	Réseau huit																	
1-5	0,585	1,176	0,715	0,760	0,783	0,913	0,845	1,020	1,025									
2-5	0,460	0,770	0,605	1,200	1,213	2,948	4,003	3,608	4,393									
3-5	0,200	0,308	0,315	0,545	0,888	1,123	1,310	1,943	3,308									
1-6	0,133	0,160	0,108	0,163	0,308	0,360	0,273	0,410	0,450									
2-6	0,200	0,295	0,308	0,410	0,520	0,598	0,675	0,785	0,898									
3-6	0,083	0,213	0,280	0,385	0,420	0,493	0,610	0,725	0,898									
1-7	0,103	0,338	0,350	0,345	0,440	0,543	0,470	0,693	0,805									
2-7	0,095	0,170	0,160	0,200	0,208	0,228	0,240	0,250	0,263									
3-7	0,080	0,083	0,088	0,100	0,125	0,133	0,135	0,153	0,160									
1-8	0,130	0,170	0,203	0,220	0,208	0,218	0,243	0,238	0,243									
2-8	0,103	0,153	0,170	0,173	0,223	0,243	0,235	0,283	0,305									
3-8	0,018	0,060	0,075	0,080	0,098	0,100	0,108	0,110	0,120									
1-9	0,075	0,165	0,158	0,208	0,223	0,240	0,278	0,275	0,305									
2-9	0,135	0,243	0,223	0,303	0,323	0,343	0,348	0,375	0,393									
3-9	1,040	1,060	1,343	2,203	3,318	4,065	5,500	3,865	5,188									
1-10	0,350	0,375	0,643	0,873	1,053	0,985	1,203	1,373	1,468									

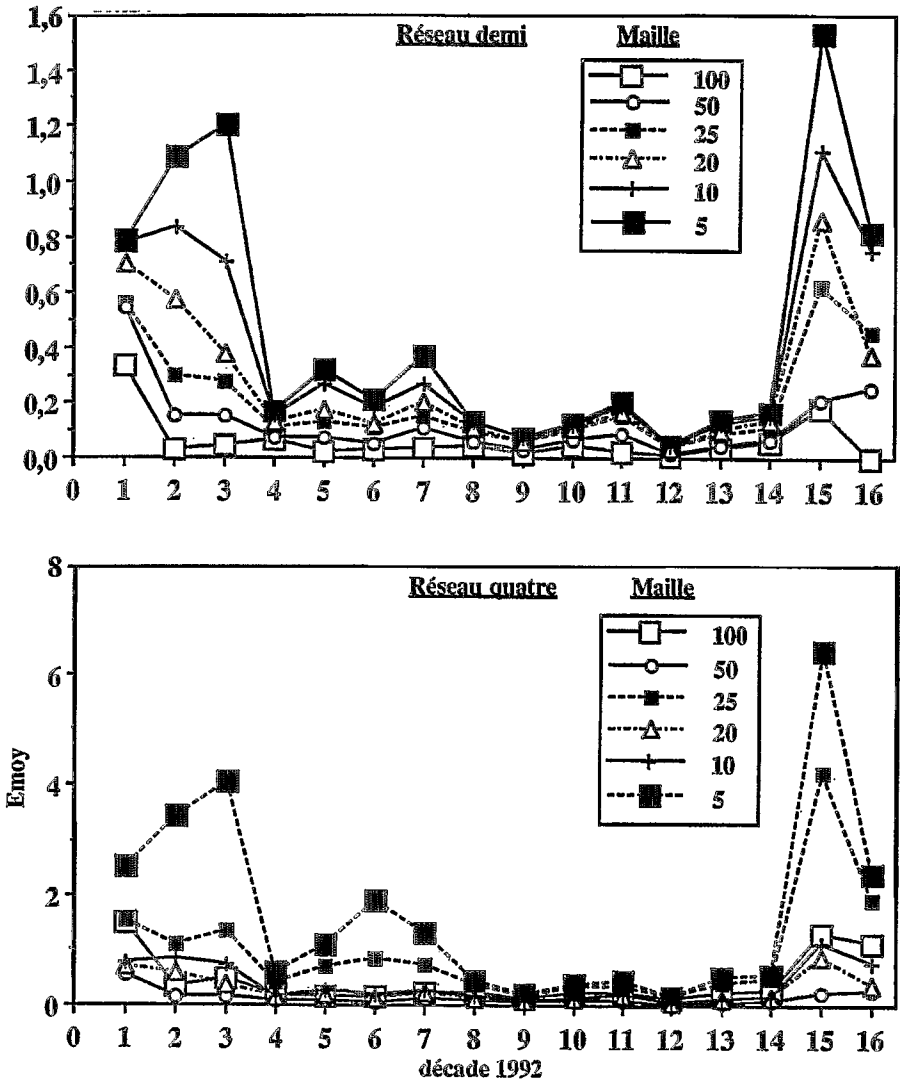


Figure 7 : Variabilité de Emoy sur différentes tailles de mailles pour les réseaux demi et quatre.

On peut donc supposer que plus la pluviométrie sur la zone est élevée, plus l'interpolation sera meilleure. En 1992, pour les décades de milieu de saison des pluies, ayant un comportement climatique identique, on a testé cette hypothèse. En effet, on constate que la hauteur de pluie est positivement corrélée à Emoy quel que soit le réseau ou la taille de la maille (figure 9).

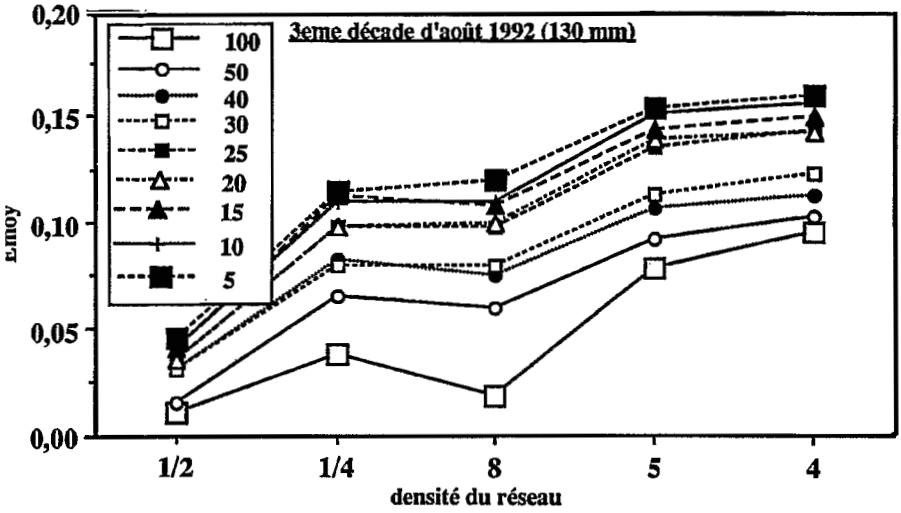


Figure 8 : Variation de Emoy en fonction de la densité du réseau et de la taille de la maille pour la 3<sup>e</sup> décade d'août 1992.

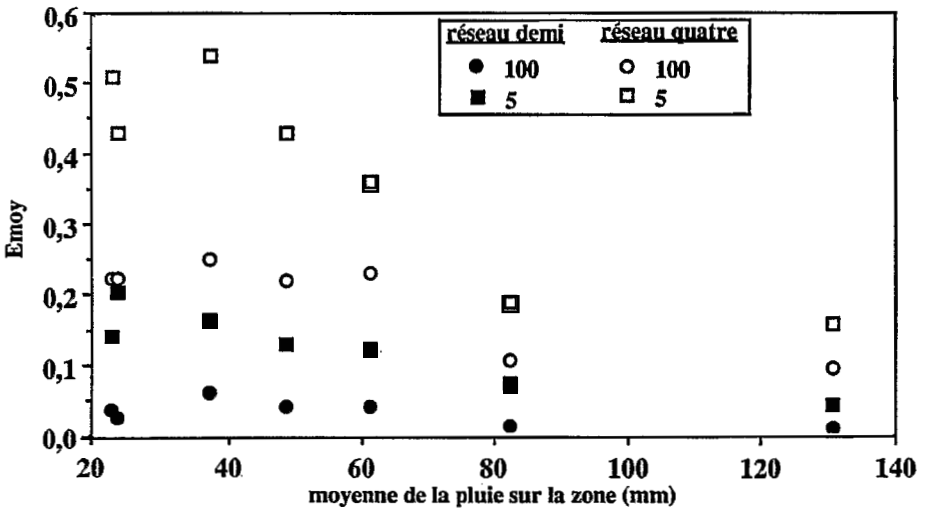


Figure 9 : Variation de Emoy en fonction de la hauteur de pluie de la décade.

Tableau 5 - Densité minimum du réseau au seuil égal ou supérieur à 20 %.

1990										
dec	Pmoy	100	50	40	30	25	20	15	10	5
3-7	72,2	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts
1-8	51,3	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 5sts	res 5sts	res 5sts	res 8sts	res 8sts
1-9	46,1	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
3-6	41,2	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
2-7	37,6	res 4sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2
2-9	36,7	res 5sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2
3-5	30,2	res 5sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
1-7	23,5	res 8sts	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	entier
2-8	18,7	res 8sts	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
3-8	18,6	res 5sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
2-6	13,7	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	entier	entier	entier
1-6	13,4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/2	res 1/2
1-5	7,4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	entier	entier	entier	entier	entier
3-9	4,8	res 8sts	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier
2-5	4,3	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	entier	entier	entier	entier
1991										
dec	Pmoy	100	50	40	30	25	20	15	10	5
2-5	91,5	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 1/2	res 1/2	res 1/2
1-8	75,2	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4
2-8	67,2	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts
2-7	47,2	res 4sts	res 8sts	res 8sts	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
3-8	44,2	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4
3-6	35,5	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4
1-10	30,2	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts
2-6	27,6	res 4sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
3-7	23,4	res 8sts	res 5sts	res 5sts	res 8sts	res 8sts	res 5sts	res 5sts	res 8sts	res 1/4
1-7	22,9	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	entier
1-6	20,3	res 4sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 5sts	res 5sts	res 5sts
1-9	11,6	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	entier
2-5	6,8	res 4sts	res 8sts	res 1/2	res 1/2	res 1/8	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
2-9	3,6	res 1/2	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier
3-9	0,5	res 1/2	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier
1992										
dec	Pmoy	100	50	40	30	25	20	15	10	5
3-8	130,6	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts
3-7	82,4	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts
1-8	61,1	res 5sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/2	res 1/2
2-7	48,6	res 5sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4
2-9	37,2	res 5sts	res 1/4	res 1/4	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
1-6	29,7	res 4sts	res 8sts	res 4sts	res 8sts	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2
2-8	23,8	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier
3-6	23,5	res 4sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/2	res 1/2	entier
1-9	23,0	res 5sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/2
2-6	16,2	res 4sts	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	entier	entier
3-5	12,8	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	entier	entier	entier	entier	entier
2-5	10,1	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	entier	entier	entier	entier	entier
1-7	6,8	res 5sts	res 1/2	res 1/2	res 1/2	res 1/2	entier	res 1/2	entier	entier
3-9	1,9	res 1/2	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier
1-10	0,5	res 1/2	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier
1-5	0,3	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier	entier



Tableau 5 - Densité minimum du réseau au seuil égal ou supérieur à 20 % (suite).

1993										
dec	Pmoy	100	50	40	30	25	20	15	10	5
2-8	68,8	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts
1-8	66,0	res 4sts	res 4sts	res 5sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts
3-8	55,6	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4
3-7	50,2	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts
1-7	40,0	res 4sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4
2-9	36,8	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts	res 4sts
2-6	31,4	res 5sts	res 5sts	res 5sts	res 5sts	res 5sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4
1-6	30,4	res 4sts	res 5sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4
2-7	29,7	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts	res 8sts
1-9	21,5	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4
3-6	16,6	res 8sts	res 1/4	res 1/4	entier	entier	entier	entier	entier	entier
3-9	10,1	res 8sts	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4
3-5	6,5	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	res 1/4	entier	entier	entier
1-10	3,4	entier	res 1/4	res 1/4	entier	entier	entier	entier	entier	entier
3-4	2,6	res 1/4	res 1/4	res 1/4	entier	entier	entier	entier	entier	entier

### Comparaison avec les autres années

Les résultats sur les trois autres saisons confirment en partie les résultats de 1992 :

- difficulté d'interpoler les champs de début et de fin de saison, sauf en 1991 où les conditions climatologiques ont favorisé une montée plus rapide du flux de mousson dès la deuxième décennie d'avril,
- relative stabilisation de Emoy pour les décades les plus pluvieuses,
- décroissance de Emoy plus le réseau est dense et plus la taille de la maille est grande,
- tendance à l'amélioration de Emoy pour les décades les plus pluvieuses mais pas aussi nette qu'en 1992.

### Implication dans l'intercomparaison données sols-données satellitaires

En ce qui concerne l'intercomparaison de la donnée satellitaire avec la donnée sol en zone sahélienne, le facteur limitant à l'interpolation spatiale de la donnée sol se situe essentiellement au niveau de la densité du réseau. En effet, la densité du réseau sahélien est de l'ordre de 5 à 10 postes pour 10 000 km<sup>2</sup> dans le meilleur des cas. Au regard des résultats obtenus avec le réseau EPSAT, on constate tout de suite que les données satellitaires décadaires (résolution du satellite infrarouge 25 km<sup>2</sup>) ne peuvent pas être directement comparées avec des données sols spatialisées à la même résolution. Si l'on veut avoir une estimation correcte de la lame d'eau, il faut donc augmenter la surface de calcul. Cette surface de calcul, puisque l'on connaît la densité du réseau, va dépendre exclusivement du niveau de confiance du critère d'estimation que l'on se fixe.

Appliqué au degré carré, si l'on décide que le critère d'estimation relatif Emoy ne doit pas dépasser 20 % (ce qui semble une estimation correcte), on peut déduire pour chaque décennie et chaque taille de maille le réseau minimum nécessaire pour calculer la moyenne pluviométrique.

Sur l'ensemble des quatre saisons (tableau 5), pour reconstituer 90 % des pluies des décades tel que Emoy soit sous le seuil de 20 %, il est nécessaire de calculer la moyenne surfacique sur une maille d'au moins 10 000 km<sup>2</sup> et d'avoir un réseau d'au moins 5 à 8 stations, selon les années. Appliqué au Sahel, la faible densité du réseau implique donc qu'à ce seuil de 20 %, on ne peut utiliser le krigeage que sur des surfaces égales ou supérieures à 10 000 km<sup>2</sup>. La comparaison avec des données satellitaires ne peut se faire de manière fiable qu'à cette échelle, ce qui va donc entraîner une perte importante de l'information satellitaire. Rappelons toutefois que d'après la démarche de l'étude, le critère Emoy est un critère relatif et ne peut pas être considéré comme l'erreur d'estimation absolue que l'on ferait sur la moyenne pluviométrique de la maille.

## CONCLUSION

Ce travail préliminaire sur les erreurs d'estimation surfaciques que l'on peut faire à partir d'un réseau dense, à l'échelle décadaire, en zone sahélienne montre que l'utilisation du krigeage doit se faire avec un minimum de précautions. Le choix de la taille de la maille à interpoler doit être fonction de la densité du réseau local. L'application directe des résultats de cette étude implique que la taille minimale de la maille, nécessaire à l'intercomparaison données sols-données satellitaires à l'échelle de la décade en zone sahélienne, ne devrait pas être inférieure à 10 000 km<sup>2</sup> pour minimiser dans tous les types de décades l'erreur d'estimation.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CREUTIN J.D. and OBLED C., 1983 - Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water Resources. Research*, vol. 18, n° 2, p. 413-431.
- DELHOMME J.-P., 1978 - Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. *Bull. BRGM*, III, 4, p. 341-375.
- LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPEFFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B. et HUBERT P., 1992 - Rainfall estimation in the Sahel: The EPSAT-Niger experiment. *Hydrological Sciences*, 37(3): 201-215.
- TAUPIN J.-D., AMANI A. and LEBEL T., 1993 - Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel. In: BOLLE H.- J., FEDDES, R.A. and KALMA, J. (Editors). Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales (Proceedings of the Yokohama. Symposium, July 1993). *IAHS Publ.* n° 212, p. 563-602.