

# ÉTUDE DES CUMULS DE PLUIE SAHÉLIENS

**P. HUBERT et C.A. TOMA**

*(École des Mines, 35, rue St Honoré - 77305 FONTAINEBLEAU)*

## 1 - POSITION DU PROBLÈME

La validation des algorithmes d'estimation des précipitations par satellite (BARRETT et MARTIN, 1981 ; CADET et GUILLOT, 1991) exige de comparer les estimations avec une vérité sol. Il n'est pas possible de mesurer une telle vérité sol aux échelles d'espace (résolution de MÉTÉOSAT) et de temps (10 jours) impliquées par la validation des estimations satellitaires de pluie. Cette « vérité sol » doit être élaborée à partir de données ponctuelles au sol (pluviomètres). Il s'agit donc du résultat d'un calcul qu'il faut définir, et dont il conviendra d'évaluer les intervalles de confiance.

L'objectif de notre travail a été d'estimer des valeurs moyennes par maille, au pas de temps décadaire, sur un maillage régulier de côté 1/2 degré (environ 50 km), à partir des seules données ponctuelles. Ces données (présentées au § 2) proviennent de la banque de données d'AGRHYMET (Centre régional de formation et d'application en agrométéorologie et hydrologie opérationnelle, Niamey, NIGER). Les calculs d'interpolation ont été faits pour les 18 décades couvrant la saison des pluies (début mai à fin octobre des années 1989 à 1994). Le krigeage ordinaire a été choisi comme méthode d'interpolation.

Les étapes de l'étude ont été les suivantes :

- analyse des données (§ 3) ;
- choix d'un modèle géostationnaire en utilisant les résultats de l'analyse de données (§ 4) ;
- application du programme de krigeage ;
- mise en forme des fichiers résultats et quelques calculs de validation (§ 5).

Une section finale récapitule les hypothèses et les résultats et présente quelques possibilités d'améliorer le modèle utilisé.

## 2 - PRÉSENTATION DES DONNÉES

Les données utilisées sont des cumuls décadaires de pluie mesurés en un nombre variable de stations (de 400 à 600 environ) pour les années allant de 1989 à 1993.

Il nous paraît utile de distinguer deux périodes différentes selon leur densité :  
1989-1990 : 18 valeurs par station, de la première décade de mai à la dernière décade d'octobre. Le nombre total de pluviomètres est grand (plus de 600) et pratiquement tous sont actifs tout le temps.

1991-1992-1993 : 36 valeurs par station, toute l'année, dont on retiendra environ la moitié (pour le reste les informations sont en nombre réduit et peu intéressantes).

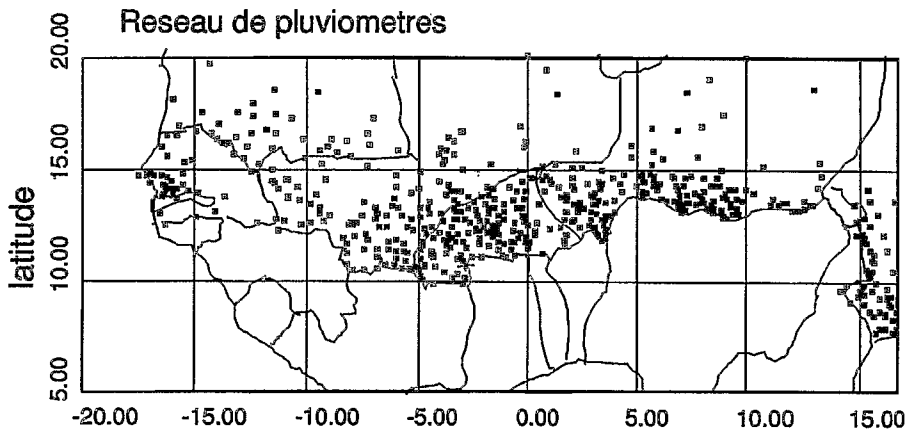


Figure 1 : Localisation des 613 pluviomètres.

Le nombre total de pluviomètres est de l'ordre de 400 et même pendant la saison des pluies 5 à 10 % sont inactifs. Les données retenues pour l'étude concernent les mêmes 18 décades que pour 1989-1990.

Nous présentons sur la figure 1 la localisation des 613 pluviomètres actifs en 1989 (réseau maximal). Le tableau 1 présente, pour chaque année, quelques statistiques des données :

- les décades pour lesquelles on dispose de données ;
- pour chaque décade, le nombre de pluviomètres actifs, le nombre de pluviomètres enregistrant une pluie non nulle et la pluie moyenne (sur les pluviomètres actifs).

On peut considérer, pour 1991-1993, que la période intéressante (pour laquelle on va fournir des estimations) s'étend d'avril à octobre (environ 18 décades, comme pour 1989-1990).

### 3 - ANALYSE DES DONNÉES

Le but de l'analyse de données est le choix d'un modèle géostatistique pour le krigage. Nous avons d'abord étudié le gradient climatologique (§ 3.1) nord-sud, qui est important dans la zone soudano-sahélienne pour les cumuls annuels et pourrait demander l'utilisation d'un modèle non stationnaire (krigeage universel ou dérive externe avec la latitude). Nous avons ensuite calculé les variogrammes bruts des cumuls pour chaque décade (§ 3.2) et choisi un modèle de variogramme climatologique (LEBEL et BASTIN, 1985).

#### 3.1 - Le gradient climatologique

Pour l'étude du gradient climatologique nous avons utilisé les données de 1989 (613 points de mesure) et 1990 (606 points de mesure). Nous avons d'abord recherché ce gradient sur les cumuls annuels, en réalisant une régression entre le cumul de chaque

Tableau 1.

Année 1989

1	2	3	4
Mois	Nombre de pluviomètres actifs (sur un total de 613)	Nombre de pluviomètres enregistrant une pluie non nulle	Pluie moyenne
Juin	613	308	7.82
Juin	612	310	6.23
Juin	613	361	9.63
Juillet	613	426	14.66
Juillet	613	499	23.11
Juillet	613	560	35.66
Août	613	570	48.88
Août	613	584	44.39
Août	613	588	47.77
Septembre	613	596	85.55
Septembre	613	600	70.24
Septembre	613	587	63.95
Octobre	613	582	43.89
Octobre	613	518	31.69
Octobre	613	474	15.75
Novembre	613	492	27.10
Novembre	613	201	4.37
Novembre	612	28	0.38

Année 1990

1	2	3	4
Mois	Nombre de pluviomètres actifs (sur un total de 606)	Nombre de pluviomètres enregistrant une pluie non nulle	Pluie moyenne
Juin	606	362	15.21
Juin	606	377	10.41
Juin	603	404	17.13
Juillet	606	400	11.73
Juillet	606	483	20.13
Juillet	605	551	31.42
Août	605	530	35.26
Août	605	590	60.89
Août	605	598	59.95
Septembre	605	582	57.17
Septembre	605	577	39.25
Septembre	605	576	40.92
Octobre	606	574	36.44
Octobre	606	529	30.26
Octobre	606	434	18.29
Novembre	606	407	11.71
Novembre	606	225	6.43
Novembre	602	135	2.58

Tableau 1 (suite).

Année 1991

1	2	3	4
Mois	Nombre de pluviomètres actifs (sur un total de 399)	Nombre de pluviomètres enregistrant une pluie non nulle	Pluie moyenne
Février	250	0	0.00
Février	250	4	0.19
Février	250	3	0.05
Mars	247	5	0.13
Mars	247	32	1.35
Mars	247	13	0.71
Avril	357	66	1.36
Avril	357	158	7.26
Avril	356	203	9.85
Mai	360	220	12.07
Mai	356	293	36.40
Mai	358	312	42.98
Juin	359	248	11.44
Juin	359	287	23.71
Juin	356	310	31.88
Juillet	359	322	28.92
Juillet	358	330	45.03
Juillet	352	343	56.48
Août	352	329	59.71
Août	349	337	73.89
Août	352	344	57.23
Septembre	330	290	28.36
Septembre	325	259	17.90
Septembre	327	207	12.85
Octobre	360	256	17.51
Octobre	355	184	12.23
Octobre	351	76	2.89
Novembre	183	2	0.09
Novembre	178	0	0.00
Novembre	178	0	0.00

Tableau 1 (suite).

Année 1992

1	2	3	4
Mois	Nombre de pluviomètres actifs (sur un total de 399)	Nombre de pluviomètres enregistrant une pluie non nulle	Pluie moyenne
Février	241	5	0.08
Février	241	7	0.41
Février	241	1	0.04
Mars	334	8	0.18
Mars	334	34	0.94
Mars	334	12	0.12
Avril	450	101	2.46
Avril	450	113	4.11
Avril	450	124	3.78
Mai	444	205	8.63
Mai	447	328	20.73
Mai	445	337	17.73
Juin	447	343	22.94
Juin	447	328	21.90
Juin	447	364	28.44
Juillet	448	394	34.26
Juillet	448	433	49.79
Juillet	447	431	59.90
Août	438	412	46.75
Août	435	412	43.61
Août	434	422	95.07
Septembre	417	390	48.72
Septembre	413	373	40.60
Septembre	411	266	10.79
Octobre	396	184	8.29
Octobre	395	157	5.66
Octobre	394	107	3.31
Novembre	302	51	1.61
Novembre	296	2	0.05
Novembre	286	0	0.00

Tableau 1 (suite).

Année 1993

1	2	3	4
Mois	Nombre de pluviomètres actifs (sur un total de 390)	Nombre de pluviomètres enregistrant une pluie non nulle	Pluie moyenne
Février	84	0	0.00
Février	84	0	0.00
Février	93	2	0.04
Mars	95	7	0.75
Mars	95	8	0.42
Mars	95	6	0.33
Avril	321	40	1.23
Avril	321	79	2.29
Avril	321	131	9.54
Mai	326	115	9.12
Mai	319	145	7.60
Mai	319	242	20.50
Juin	364	280	25.28
Juin	365	260	14.21
Juin	363	311	23.80
Juillet	360	315	33.54
Juillet	357	330	35.20
Juillet	357	342	61.42
Août	362	337	43.29
Août	363	341	57.19
Août	362	345	61.87
Septembre	349	303	31.06
Septembre	349	289	34.24
Septembre	350	249	14.74
Octobre	267	143	11.23
Octobre	214	82	4.41
Octobre	192	97	11.06
Novembre	78	11	0.68
Novembre	73	1	0.06
Novembre	73	1	0.05

pluviomètre et la latitude correspondante. Les figures 2 et 3 présentent le nuage de points et la droite de régression pour 1989 et 1990. Les coefficients de corrélation sont de - 0.754 pour 1989, respectivement - 0.791 pour 1990. Les équations des droites de régression (Pluie = a x latitude + b, b en mm/deg) sont :

$$P = - 92 \times L + 1785 \quad (1989)$$

$$P = - 101 \times L + 1826 \quad (1990)$$

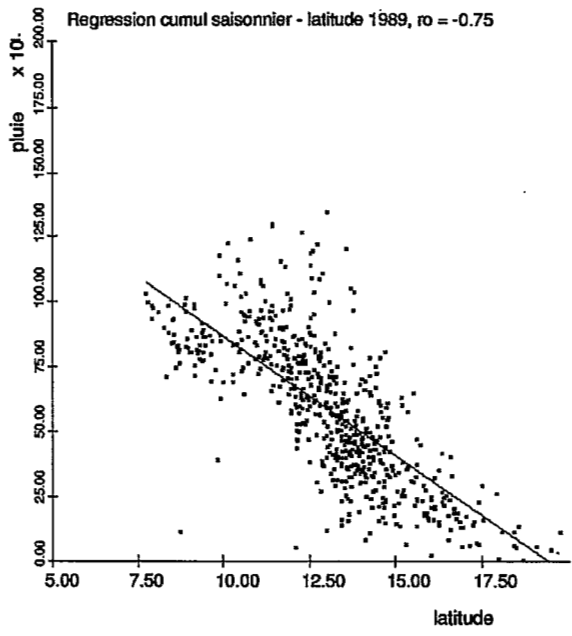


Figure 2 : Régression cumul annuel 1989-latitude.

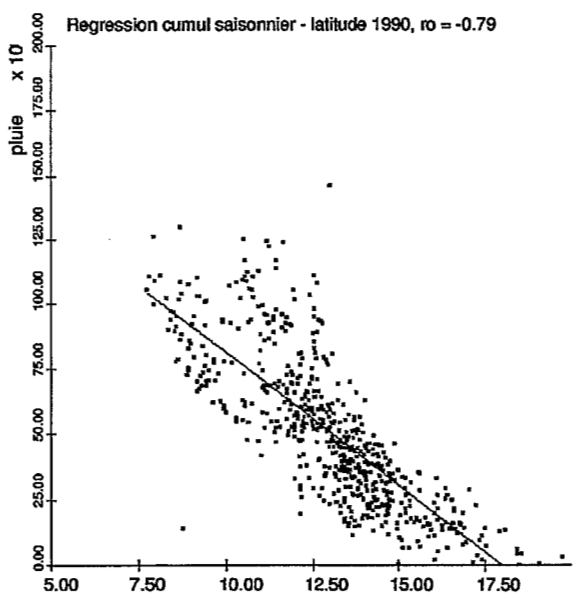


Figure 3 : Régression cumul annuel 1990-latitude.

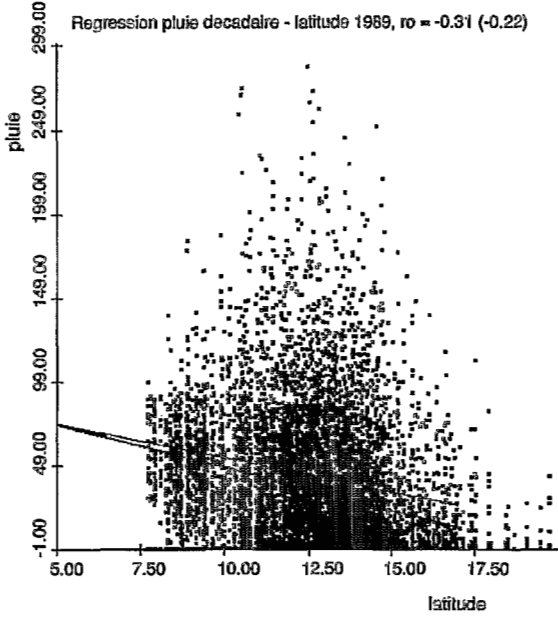


Figure 4 : Régression cumuls décennaires 1989 - latitude.

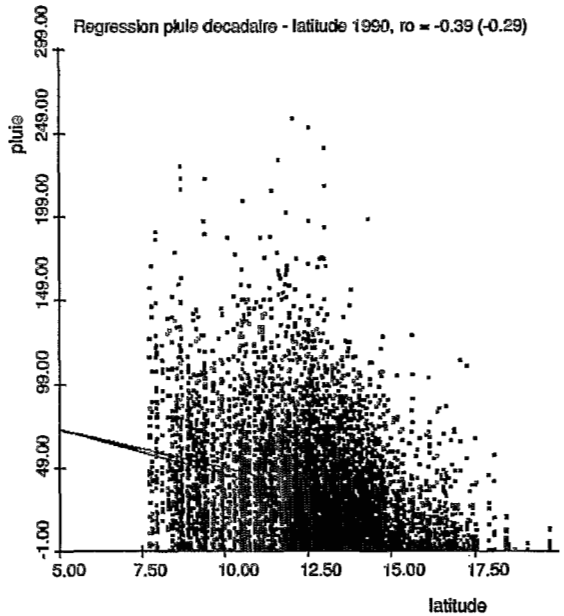


Figure 5 : Régression cumuls décennaires 1990 - latitude.



On constate donc une très forte dépendance entre la pluie et la latitude, avec un gradient annuel assez stable de l'ordre de 1 mm/km.

Si on réalise maintenant le même type de régression entre les cumuls décennaux de pluie (11 891 valeurs en 1989 et 10 891 en 1990) et la latitude, on obtient des coefficients de corrélation nettement moins importants (- 0.31 en 1989, - 0.39 en 1990). De plus, une bonne partie de la liaison est due à une intermittence (présence de valeurs nulles de pluie) variable avec la latitude ; si on élimine les valeurs nulles de pluie (environ 20 %) les coefficients de corrélation sont de - 0.22 pour 1989 et - 0.30 pour 1990. Les nuages de points et les droites de régression sont présentés sur les figures 4 (1989) et 5 (1990). Il n'est pas possible d'estimer un gradient décennal de pluie (analogiquement au gradient annuel), à cause des très nombreuses valeurs nulles.

En conclusion, nous considérons que :

- les cumuls saisonniers sont évidemment non stationnaires. Pour leur estimation (qui n'est pas l'objet de la présente étude), il faudrait utiliser un modèle non stationnaire (krigeage universel ou krigeage des résidus par rapport à la relation climatologique) ;
- pour les cumuls décennaux, il y a deux sources de non-stationnarité : une dépendance (nettement moins forte) de la latitude et l'intermittence spatiale. Nous avons considéré que l'utilisation d'un modèle quasi stationnaire est possible, en faisant attention de ne pas utiliser le krigeage en extrapolation et en utilisant un voisinage glissant pour l'interpolation. Une modélisation plus fine des cumuls décennaux pourrait être faite en utilisant le krigeage d'intermittence (BARRANCOURT *et al.*, 1992), l'intermittence spatiale étant la principale source de non-stationnarité pour les cumuls décennaux.

### 3.2 - Calcul de variogrammes

Nous présentons ici très rapidement la définition du variogramme ; pour une description plus détaillée nous invitons le lecteur à se reporter à la thèse de DELHOMME (1978), qui est une des premières applications de la géostatistique à l'estimation des pluies.

Si  $Z(x)$  est une variable régionalisée,  $x$  étant la coordonnée spatiale, la fonction variogramme est alors définie comme :

$$2\gamma(h) = \text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] = E \{ [Z(x+h) - Z(x)]^2 \} \quad (1)$$

Si le phénomène est isotrope, le variogramme  $\gamma(h)$  est réputé ne dépendre que du module du vecteur  $h$  et non de sa direction.

D'un point de vue pratique, nous disposons de  $n$  mesures  $z_1, z_2, \dots, z_n$  recueillies en des points de coordonnées  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . On regroupe alors tous les couples de valeurs en classes selon la distance séparant les points de mesure correspondants. Pour une classe centrée en  $h$ , d'amplitude  $2E$  (tolérance) comprenant  $n_h$  couples  $(x_i, x_j)$  vérifiant la relation :

$$| |x_i^h - x_j^h| - h | < E$$

On estime  $\gamma(h)$  comme :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{ij} (z_i^h - z_j^h)^2$$

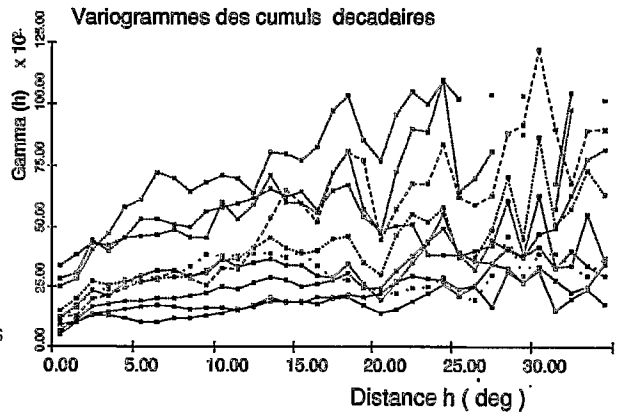


Figure 6 : Variogrammes bruts des cumuls décennaux de pluie sur neuf décades, de juillet à septembre 1989.

Une fois calculé, le variogramme peut servir :

- à caractériser la variabilité spatiale du paramètre mesuré ;
- à mettre en œuvre une méthode d'interpolation linéaire optimale (le krigeage).

**Variogrammes expérimentaux du cumul décennal**

On a représenté les variogrammes bruts (expérimentaux), calculés d'après l'équation (2), sur les cumuls décennaux de juillet à septembre 1989, sur la figure 6.

Les différents types de traits représentent les variogrammes pour les différentes décades (9 au total). On voit que les variogrammes sont de type borné, présentant des paliers différents en fonction de la décade ou du mois. Pour avoir une représentation plus homogène on peut utiliser le modèle dit de variogramme climatologique (BASTIN *et al.*, 1984). Ce variogramme adimensionnel est obtenu en divisant chaque variogramme empirique des événements utilisés par l'écart type empirique correspondant (LEBEL *et al.*, 1987). En suivant cette procédure on obtient les courbes de la figure 7 (variogrammes climatologiques pour les cumuls décennaux). Ces figures ont un comportement similaire, montrant un effet de pépite (variabilité à une échelle inférieure à l'échelle d'observation) et un palier à environ 10 degrés.

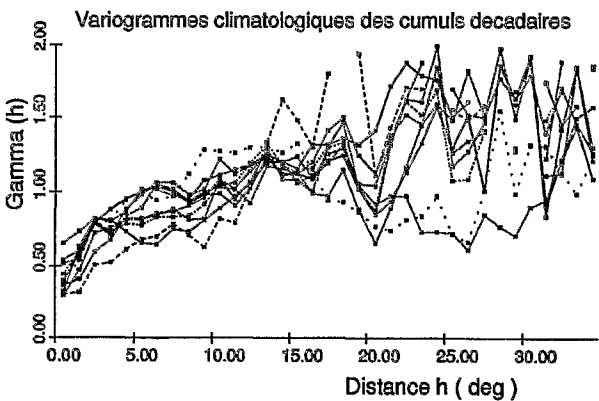


Figure 7 : Variogrammes climatologiques des cumuls décennaux de pluie sur neuf décades, de juillet à septembre 1989.

Compte tenu du fait que tous les variogrammes climatologiques ont un comportement similaire, nous avons décidé d'utiliser pour le krigeage un variogramme climatologique moyen, de type sphérique, ayant un palier égal à 1, un effet de pépite de 0.4 et une portée de 10 degrés.

#### 4 - CHOIX DU MODÈLE GÉOSTATISTIQUE

Pour le calcul par krigeage proprement dit, nous avons utilisé le logiciel GEO-EAS, distribué par US - EPA (ENGLAND et SPARKS, 1988). Ce logiciel produit des valeurs krigées et les écarts types de krigeage correspondants. Outre les valeurs de pluie et les coordonnées, le logiciel nécessite quelques paramètres définissant le modèle géostatistique choisi : variogramme, voisinage glissant, type de krigeage (ponctuel ou par bloc, ordinaire ou simple). Les paramètres utilisés (pour toutes les décades) sont les suivants :

##### *Type de krigeage*

Nous avons utilisé l'option krigeage ordinaire (moyenne inconnue) par bloc (calcule directement la valeur moyenne par maille).

##### *Voisinage glissant*

La taille du voisinage glissant définit le rayon dans lequel on prend en compte les données pour le krigeage de chaque maille. Nous avons utilisé un rayon de 10 degrés et pratiqué le krigeage seulement s'il y avait au moins deux points dans ce voisinage.

Par la suite, pour éviter les effets de bord, nous avons retenu seulement les mailles dont au moins un point de mesure est situé à moins de 1,5 degrés du centre de la maille. Les résultats dont il est question au § 5 contiennent seulement ces « mailles fiables » ; au reste des mailles on attribue une valeur de -1, signifiant que le calcul n'a pas été effectué, la maille étant considérée comme « non fiable ».

##### *Variogrammes*

Pour toutes les décades on a utilisé le variogramme climatologique décrit ci-dessus. En fait, dans l'hypothèse du variogramme climatologique, le variogramme de chaque décade est le variogramme climatologique multiplié par la variance des valeurs mesurées. Ceci n'a aucune influence sur les valeurs krigées, mais pour obtenir les valeurs d'écart-type de krigeage il faut multiplier les résultats fournis par le logiciel par la variance des mesures de chaque décade. Les écarts types de krigeage fournis (§ 5) tiennent compte de cette multiplication.

#### 5 - RÉSULTATS

Comme résultats, nous avons fourni :

- des fichiers contenant les valeurs interpolées de pluie (90 décades + 5 cumuls annuels) et les écarts types de krigeage correspondants (pour les 90 décades). Un exemple de carte réalisé à partir de ces fichiers est présenté sur la figure 8 pour un cumul annuel ;

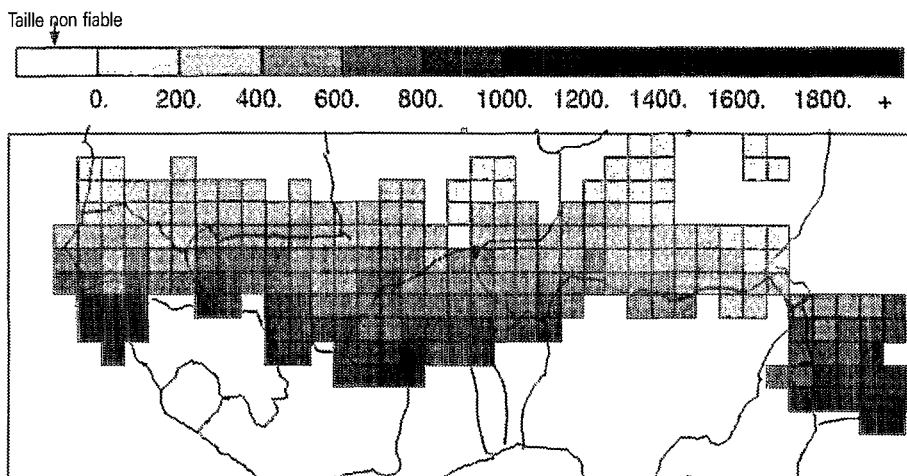


Figure 8 : Exemple de carte des cumuls saisonniers. La représentation est faite seulement pour les mailles dites « fiables », c'est-à-dire les mailles pour lesquelles au moins un pluviographe est situé à moins de 1,5 degrés de leur centre.

- des tableaux de statistiques des données d'entrée et des résultats (valeurs interpolées). Les fichiers fournis contiennent : les valeurs interpolées de pluie et l'écart type de krigeage correspondant, pour une grille allant de 20 degrés longitude ouest à 20 degrés longitude est (80 colonnes) et de 5 degrés à 20 degrés latitude nord (30 lignes), pour chaque décade.

Les tableaux contiennent des moyennes et écarts types des données et des valeurs interpolées pour chaque décade (un exemple est présenté sur le tableau 2). Ces tableaux sont destinés à vérifier la cohérence d'ensemble des résultats.

Tableau 2 - Statistiques (nombre de valeurs - NO, moyenne - MOY, écart type - ECT) pour les données (D) et les résultats des interpolations (R), premières 10 décades de 1991.

1	2	3	4	5	6	7	8
Année	Décade	D	D	D	R	R	R
		NO	MOY	ECT	NO	MOY	ECT
1991	1	360	12.07	17.71	1167	9.43	22.85
1991	2	356	36.40	37.66	1167	27.40	49.88
1991	3	358	42.98	42.20	1167	31.81	51.82
1991	4	359	11.44	14.76	1167	10.16	17.37
1991	5	359	23.71	24.52	1167	20.03	35.53
1991	6	356	31.88	30.45	1167	23.52	37.49
1991	7	359	28.92	27.68	1167	27.62	37.96
1991	8	358	45.03	32.96	1167	40.37	47.53
1991	9	352	56.49	43.90	1167	50.49	55.94
1991	10	352	59.71	42.92	1167	50.18	59.39

## 6 - CONCLUSIONS

L'objectif final de notre travail a été d'estimer des valeurs moyennes par maille, au pas de temps décadaire sur un maillage régulier de côté 1/2 degré (environ 50 km), à partir des seules données ponctuelles. Ces résultats ont été fournis pour les saisons des pluies des années 1989-1993.

Les hypothèses du modèle de krigeage utilisé sont les suivantes :

- le type de krigeage utilisé est le krigeage ordinaire par bloc en voisinage glissant. Ceci implique une hypothèse de quasi-stationnarité ; nous avons expliqué au § 3 le choix de cette hypothèse, qui nous paraît assez réaliste pour les cumuls décadaires ;
- le variogramme utilisé pour toutes les décades est le variogramme climatologique moyen (sphérique, palier de 1, effet de pépité de 0.4 et portée de 10 degrés) ;
- le krigeage n'a été réalisé que pour les mailles pour lesquelles il y a au moins un point de mesure à moins de 1.5 degrés du centre de la maille.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARRANCOURT C., CREUTIN J.D., RIVOIRARD J., 1992 - A method for delineating and estimating rainfall fields, *Water Resources Research*, vol. 28, n° 4, pp. 1133-1144.
- BARRET C., MARTIN D.W., 1981 - The use of Satellite Data in Rainfall Monitoring, Academic Press, 340 p.
- BASTIN G., LORENT B., DUQUÉ C. et GEVERS M., 1984 - Optimal estimates of the average area rainfall and optimal selection of raingauge locations, *Water Res. Research*, 20(4): 463-470.
- CADET D.L., GUILLOT B., 1991 - *EPSAT Estimation des précipitations par satellite ; programme de recherche*, ORSTOM - MÉTÉO-FRANCE, centre de Météorologie spatiale, Lannion, 64 p.
- DELHOMME J.-P., 1976 - *Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*. Thèse de docteur-ingénieur de l'université de Paris 6, 130 p.
- ENGLAND E., SPARKS A., 1988 - *GEO-EAS Geostatistical Environment Assessment Software. User's Guide*, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, EPA 6004-88033a.
- LEBEL T., BASTIN G., 1985 - Variogram identification by the mean-squared interpolation method with application to hydrologic fields. *Journal of Hydrology*, 77, 31-56.
- LEBEL T., BASTIN G., OBLED C., CREUTIN J.D., 1987 - On the accuracy of areal rainfall estimation: a case study. *Water Resources Research*, 23, 2123-2134.
- LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPFFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B. et HUBERT P., 1992 - Rainfall estimation in the Sahel: the EPSAT - Niger experiment. *Journal des Sciences hydrologiques*, 37, 201-215.