

Estimation des précipitations en zone Sahélienne : L'expérience EPSAT-NIGER, une vérité sol adaptée

J. D Taupin et T. Lebel
Orstom, mission au Niger, BP 11416, Niamey, Niger

Résumé. EPSAT-NIGER (Estimation des Précipitations par SATellite au NIGER) dont la phase opérationnelle s'est déroulée entre 1988 et 1993, est une expérience destinée à améliorer la connaissance des systèmes précipitants de l'Afrique soudano-sahélienne, dont le but est de mettre au point des algorithmes opérationnels d'estimation des pluies sur cette région. Cette expérience s'appuie conjointement sur un réseau de pluviographes à mémoire statique "oedipe" et d'un radar météorologique bande C. Le réseau est disposé sur une surface d'environ 16000 km² autour de Niamey, réparti selon un maillage régulier de 12,5 km de côté, et doté d'une cible où la distance interposte descend jusqu'à 1 km. Les premiers résultats obtenus ont montré que la variabilité locale des cumuls à différents pas de temps, de l'averse à la saison, peut être extrêmement importante et cela sur de faibles distances. L'exploitation conjointe des données sol et radar a conduit à mettre en évidence certaines particularités des lignes de grains et s'avère prometteuse pour construire une vérité sol adaptée à la validation des données satellitaires. Le calcul de la lame d'eau sur de petites surfaces (environ 9 pixels météo-sat) en fonction de la densité du réseau a montré que l'on pouvait faire d'importantes erreurs d'estimation par diminution du réseau et sa dispersion. Ceci met en évidence la difficulté d'avoir à l'échelle du Sahel une calibration et une validation satellitaire satisfaisante par les données sol, sur de petites surfaces.

INTRODUCTION

La zone soudano-sahélienne enregistre depuis plusieurs années un déficit pluviométrique annuel important. Les ressources en eau régissent l'équilibre alimentaire et humain, une baisse de la pluviométrie sur quelques années entraîne donc des conséquences sur la production végétale d'une part et d'autre part sur la réalimentation de la nappe superficielle qui reste la principale ressource pendant les sept mois de la saison sèche. Le nombre et la répartition au cours de la saison des pluies des événements pluvieux vont aussi jouer un rôle important dans le développement des cultures.

Sur le plan climatologique, Le climat sahélien est principalement caractérisé par la répartition latitudinale des isohyètes annuels qui décroissent du sud au nord suivant un gradient moyen de 1 mm par km (figure 1). La distribution des pluies dans cette zone est conditionnée par la position de l'équateur météorologique et de ses deux structures associées, le front intertropical (FIT) et la zone intertropicale de convergence (ZITC). Au sahel les précipitations dépendent presque exclusivement de la position du FIT et de sa structure, qui est caractérisée par une discontinuité verticale des champs de vent et d'humidité. Cette structure explique aussi qu'au Sahel près de 80% des pluies ont une origine convective que ce soit sous forme de cumulonimbus isolés ou d'amas nuageux organisés qui se déplacent d'est en ouest. Les systèmes importants pouvant évoluer en une structure particulière (ligne de grains) dont la vitesse de déplacement peut atteindre 60 km /h.

L'EXPERIENCE EPSAT-NIGER

La connaissance des quantités de pluie tombées est une nécessité pour les modélisateurs qui étudient le cycle de l'eau, que cela soit à l'échelle de l'hectare pour les agronomes, à l'échelle du km^2 ou de la centaine de km^2 pour l'étude d'un bassin versant, à l'échelle d'un degré carré ($10\,000\text{ km}^2$) pour la paramétrisation de modèle climatologique de grande échelle.

En zone sahélienne la pauvreté du réseau pluviométrique (1 pour $10\,000\text{ km}^2$) ne permet pas de faire des estimations correctes pour les différents pas de temps et d'espace dont les modélisateurs ont besoin. Avec l'arrivée des satellites géostationnaires qui allient bonne résolution temporelle (30 mn) et spatiale ($5 \times 5\text{ km}$) on a pensé pouvoir remédier à ce manque d'information au sol. Mais, il s'est rapidement avéré que les mesures des algorithmes d'estimation utilisant comme indicateur pluviométrique soit la température du sommet des nuages froids soit la température de surface du sol ne correspondaient pas avec ce que l'on observait effectivement au sol de façon ponctuelle. Il est tout aussi vrai que la comparaison entre la valeur d'un pixel satellitaire et la valeur obtenue sur le pluviomètre correspondant engendre une erreur d'estimation inhérente aux surface de réception des deux capteurs. Il est de même indiscutable que l'estimation d'une pluie moyenne à partir de données ponctuelles comporte une part d'erreur que l'on tend à minimiser en renforçant le réseau pluviométrique.

La mise en place d'un réseau dense de pluviographes en zone sahélienne s'est donc révélée nécessaire pour:

- 1- caractériser ce qu'est une vérité terrain,
- 2- étudier l'influence de la qualité de cette vérité terrain sur l'étalonnage et la validation des données satellitaires,
- 3- comparer les estimations qui peuvent être obtenues à l'aide des données sol et à l'aide des données satellitaires,
- 4- étendre la gamme d'échelle de travail vers les résolutions fines, impossible à atteindre avec les réseaux pluviométriques classiques,
- 5- déduire des différents points précédents, la combinaison optimale de capteurs pour étalonner des données satellitaires en fonction du degré de précision recherché et des aires élémentaires d'estimation,
- 6- améliorer les algorithmes actuels ou en développer de nouveaux, utilisant d'autres types de données ou d'autres protocoles d'étalonnage.

La zone de Niamey a été retenue car la région présente un relief uniforme, ce qui permet de minimiser les influences topographiques locales sur la dynamique des systèmes précipitants. De plus l'existence d'un radar météorologique permettait d'agrandir notre zone d'action pour l'analyse des systèmes de méso-échelles et en même temps nous donnait la possibilité de tester dans les conditions tropicales un autre capteur intermédiaire entre le pluviographe et le satellite.

Le réseau de pluviographes (figure 2) occupe une zone de $16\,000\text{ km}^2$ environ comprenant une zone de référence de $10\,000\text{ km}^2$ (le degré carré, $13^\circ\text{-}14^\circ\text{N}$ et $2^\circ\text{-}3^\circ\text{E}$) et une zone d'extension à l'ouest d'environ $6\,000\text{ km}^2$. Sur la zone de référence, le réseau à la forme d'une grille à peu près régulière avec une maille de base de $12,5 \times 12,5\text{ km}^2$ (densité du réseau égal à 1 appareil pour 156 km^2) avec une cible de $20 \times 20\text{ km}^2$ où l'interdistance entre les postes décroît jusqu'à 1 km (densité du réseau égale à 1 appareil pour 9 km^2). La couverture radar complémentaire du réseau permet de fournir une information jusqu'à une distance de 350 km autour de Niamey. En collaboration avec le laboratoire d'Aérodologie de Toulouse, le radar de $5,4\text{ cm}$ de longueur d'onde et de $1,5^\circ$ d'ouverture de faisceau, situé à l'aéroport de Niamey, a été doté pour les besoins de l'expérience d'une chaîne de numérisation, de visualisation couleur et d'archivage (Sauvageot et Despaux, 1990).

En 1993, le dispositif du réseau a été modifié pour étudier spécifiquement le déplacement et le cycle de vie des cellules de "bases" qui forment la ligne de grain. Ces cellules occupent de petites surfaces de quelques km^2 et ont une durée de vie de l'ordre de 30 minutes. Pour mettre en évidence ce phénomène, on a regroupé 78 pluviographes sur la cible disposés en quatre lignes de direction nord-ouest sud-est correspondant à la direction préférentielle de circulation des lignes de grains (choix de la direction faite à partir de l'étude statistique du déplacement des systèmes entre 1990 et 1992). On a de plus diminué le nombre de pluviographes sur la superficie restante du degré carré, la zone passant à une densité de poste de 1 pour 625 km^2 (maille de base 25×25) (figure 3).

PREMIERS RESULTATS

DONNEES SOL

Du point de vue qualitatif, la disposition du réseau a permis aux petites échelles de temps, de suivre très finement le déplacement des systèmes convectifs, la banque de données sol générant des fichiers au pas de temps de 5 minutes, ce qui correspond à la limite inférieure raisonnable pour l'étude du phénomène (figure 4 et 5). Une étude à l'échelle de l'événement, sur les différents systèmes convectifs, à partir de l'analyse statistique des hyétogrammes, et des structures spatiales des événements est actuellement en cours et devrait permettre de déboucher sur une classification à partir de paramètres "objectifs" (Amani et al., 1993).

L'étude à l'échelle de la saison pour les saisons 1990 à 1993 (figure 6) a montré une variabilité interannuelle très importante, ce qui est une caractéristique de la zone (le coefficient de variation de la pluie annuelle à la station de Niamey est égal à 0,26). Le gradient pluviométrique nord-sud très marqué à grande échelle n'apparaît plus aussi nettement à l'échelle du degré carré. On a mis surtout en évidence une variabilité spatiale très importante à l'échelle de l'année puisque l'on trouve des écarts de plus du double sur des distances inférieures à 30 km (figure 7).

En utilisant les outils statistiques propres à l'analyse des champs aléatoires (krigeage par exemple), on a pu, grâce au réseau dense de pluviographes, modéliser la corrélation moyenne entre les pluies mesurées en deux points séparés d'une distance d quelconque. La fonction de structure modélisant les intercorrélations moyennes du champ aléatoire au pas de la saison montre des variations importantes d'une année sur l'autre (figure 8). Le réseau par son étendue limitée ne permet pas de mettre en évidence la structure de corrélation à grande échelle qui correspond à la décroissance nord-sud des isohyètes, mais cette structure à grande échelle se superpose en partie à la structure de corrélation de petite échelle et il est donc nécessaire de corriger le variogramme brut en soustrayant la dérive climatologique, on obtient ainsi le variogramme des résidus. Les années au cumul déficitaires montrent une distance de corrélation beaucoup plus faible (1990: 10 km, 1993: 15 km) par rapport aux années normales ou excédentaires (1989: 50 km, 1991 et 1992 30 km). Une relation a été mise en évidence entre le pourcentage d'événements de grandes extensions spatiales pour une saison donnée et la distance de corrélation. En effet la structure de grande échelle induit une distance de corrélation très grande alors que les événements isolés montrent une corrélation très locale. En 1990, année déficitaire, les systèmes de grande extension représentaient en nombre 50% d'événements alors qu'en 1991, année normale, ils égalaient 80%.

Une étude sur la représentativité de l'interpolation de la valeur moyenne à partir de valeurs ponctuelles a aussi été initiée à l'échelle de la saison. Ces résultats devront aussi être traités sur des échelles d'espace et de temps différents entre autre à la décade (échelle de temps la plus utilisée pour l'estimation satellitaire), pour déterminer l'erreur que l'on obtient en fonction de la densité du réseau et de la taille de la maille sur laquelle on veut faire l'estimation. L'exemple suivant porte sur l'estimation de la lame d'eau sur des pavés de $15 \times 13 \text{ km}^2$ pour une densité de réseau passant de 1 poste pour 200 km^2 à 1 poste pour $1\ 600 \text{ km}^2$. On a poursuivi l'étude en comparant une distribution régulière pour une densité de poste de 1 pour 200 km^2 avec une distribution irrégulière ne comprenant plus que la moitié des postes (figure 9).

Pour la distribution régulière la diminution du réseau entraîne une dégradation de l'information avec un lissage et une perte de contraste, mais néanmoins la répartition reste grossièrement identique même quand on divise par 8 le nombre de stations. La différence maximale enregistrée sur une maille entre les termes les plus extrêmes est égale à 50% (610 mm avec 67 stations et 405 mm avec 8 stations). Par comparaison avec le réseau irrégulier où la plupart des stations se situent dans la partie ouest, on note un lissage uniforme et une sous-estimation systématique par un facteur 2 sur les mailles n'ayant pas de poste pluviographique (partie est). De plus on observe sur la partie ouest des écarts d'estimation de plus de 100% sur certaines mailles, alors que le nombre de poste reste important.

On peut conclure donc que la densité de pluviographes et la disposition régulière des postes vont être les facteurs principaux dans l'estimation la plus correcte possible de la lame moyenne sur une surface déterminée. Il est à remarquer qu'avec 1 poste pour $1\ 600 \text{ km}^2$, la dégradation de l'estimation peut être importante (jusqu'à 50%) pour des mailles représentant 9

pixels météosat. Par comparaison au réseau météorologique de l'Afrique de l'Ouest (1 poste pour 10 000 voire 20 000 km²), on peut effectivement se poser la question de la représentativité de la donnée sol quand on la moyenne sur des surfaces de petites dimensions pour la comparer aux images satellitaires.

DONNEES RADAR

En ce qui concerne les données radar, de gros problèmes d'étalonnage et de mise à niveau ont grévé la qualité des images les deux premières années, mauvaise qualité due essentiellement à des coupures électrique lors de l'acquisition des images. Le protocole de suivi par radar a concerné tous les phénomènes locaux et de grande échelle susceptibles de passer au dessus du degré carré, ce qui représente 25 à 35 événements suivis par année. L'acquisition d'une image radar correspond à un tour complet de l'antenne du radar ce qui correspond à un balayage d'1minute, vu la vitesse de déplacement des systèmes l'image peut être considérée comme instantannée. Sur une veille on enregistre le phénomène à partir de son apparition au radar (350 km) et ce jusqu'à sa disparition de l'écran ou sa dislocation. Sur le degré carré un tour d'antenne est enregistré toutes les 10 minutes. De plus, on double les coupes horizontales du système précipitant (PPI) par des coupes verticales (RHI) pour étudier plus finement la structure dans les deux directions.

Le principe de la mesure consiste à interpréter le facteur de réflectivité radar Z en terme d'intensité de précipitation R selon une relation de type puissance:

$$Z = a \cdot R^b \quad \text{avec } a \text{ et } b \text{ constantes à déterminer}$$

Les premiers essais de calibration du radar ont été effectués en 1988 (Hoepffner et al., 1989) à partir d'un disdromètre, appareil qui permet de mesurer au pas de temps de la minute les distributions dimensionnelles des gouttes de pluie. Si N(D) est le nombre de gouttes de diamètre D et V(D) la vitesse de chute des gouttes, on obtient la relation suivante:

$$Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^6 dD \quad \text{et} \quad R = \frac{\pi}{6} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^3 V(D) dD$$

Les premiers résultats sur 17 événements pluvieux de type ligne de grain de l'année 1988, ont montré l'existence d'une relation parfaitement corrélée pour chaque phase du hyétogramme type (figure 10). Néanmoins bien qu'encourageant les essais de calibration directement liés au réseau sol n'ont pas par contre donné de résultats satisfaisants, un travail sur le signal devant être auparavant effectué pour valider la méthode (remise à niveau des images, mise au point d'algorithme de correction d'atténuation ...).

Des essais qualitatifs de superposition entre cumul en 5 minutes de la pluie au sol et l'image radar correspondante ont donné aussi des résultats encourageants, les zones de front et de traîne sont bien visibles et les maximums de pluie au sol correspondent assez bien au réflectivité maximales (figure 11), mais la superposition n'est pas toujours exacte et des anomalies demeurent. Un travail de validation doit être effectué sur les données radar de bonne qualité, ce qui correspond encore à un nombre d'images important. Cela permettra ensuite d'avoir un outil opérationnel pour la prévision d'estimation de pluie à court terme pour les météorologies locales et d'avoir en plus un outil supplémentaire pour la calibration satellitaire.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le traitement des données de l'expérience EPSAT-NIGER devraient apporter une contribution importante pour une meilleur connaissance de la climatologie des régions tropicales. De plus, L'expérience HAPEX-SAHEL (Hydrological and Atmospheric Project EXperiment in the SAHEL), expérience internationale visant à l'étude de l'interface sol-atmosphère, a pu déjà directement bénéficier d'une couverture pluviographique qui permettra de calibrer les différents modèles avec des données pluviométriques fiables. A moyen terme, il est prévu de laisser un dispositif de veille d'une quarantaine d'appareils sur le degré carré (maille de 25x25 km), qui servirait alors de zone de validation pour la future mission TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission).

En marge de l'expérience EPSAT-NIGER, on a aussi prélevé des échantillons de pluie pour analyse isotopique (^{18}O et ^2H) au cours des 3 dernières années. L'échantillonnage s'est effectué au pas de l'averse et à des pas inférieurs. On espère que cela permettra une classification des systèmes pluvieux (ligne de grain, orage local ...) et une meilleure compréhension de certains processus physiques internes aux systèmes. Il est à noter que pour la saison 1989, dans le cadre d'EPSAT-NIGER, un suivi isotopique des pluies avait été effectué à l'échelle du Sahel suivant des directions privilégiées, axe est-ouest (zone d'évolution des lignes de grains) et axe sud-nord (direction de propagation de la mousson) sur plusieurs transects (N'Guimi-Niamey, Cotonou-Niamey, Lome-Niamey). Ces échantillons sont actuellement en train d'être analysés, et les résultats pourraient permettre de mieux définir l'origine des masses de vapeur d'eau alimentant les grands systèmes convectifs au cours de leur déplacement au-dessus du Sahel.

Equipes partenaires

DMN (Direction de la Météorologie du Niger),
Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse,
Institut de mécanique des fluides de Grenoble,
Laboratoire de Météorologie Dynamique de Grenoble.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE SUR L'EXPERIENCE ET SES RESULTATS

A. Amani, J. Rousselle, T. Lebel and J.D. Taupin (1993): Hyetogram analysis for sahelian mesoscale convective systems. *Precipitation Variability and Climate Change*. B. Sevruck and M. Lapin (eds.), Proc. of Symp. on Precipitation and Evaporation, Vol. 2, Bratislava, Slovakia, 20-24 september 1993, p.23-28.

M. Hoepffner, T. Lebel and H. Sauvageot (1989): EPSAT-Niger: A pilot experiment for rainfall estimation over west Africa. *Int. workshop on Precipitation Measurement*. St Moritz, 1989: 251-258.

T. Lebel, H. Sauvageot, M. Hoepffner, M. Desbois, B. Guillot, P. Hubert (1991): Estimation des précipitations au Sahel: l'expérience EPSAT-Niger. *Hydrol. continent.*, vol. 6, n°2, 1991: 133-143.

T. Lebel, F. Cazenave, R. Gathelier, M. Gréard, R. Gualde, J. Kong, T. Valero (1991): EPSAT-NIGER, Rapport de campagne 1990, ORSTOM-DMN, 66p.

T. Lebel, J.D. Taupin, M. Gréard (1994): Rainfall Monitoring: The EPSAT-NIGER setup and its use for HAPEX-SAHEL. in "Le programme d'observation à l'échelle du degré carré durant les périodes d'Observation Intensive et de suivi à long terme de HAPEX-SAHEL", ORSTOM ed, en cours.

C. Roux (1990): EPSAT-NIGER, Rapport de campagne 1989, ORSTOM-DMN, 38p.

H. Sauvageot et G. Despau (1990): SANAGA, un système d'acquisition numérique et de visualisation des données radar pour la validation des estimations satellitaires de précipitations. *Veille clim. satel.*, 30: 51-55.

J.D. Taupin, T. Lebel, F. Cazenave, F. Chiron, R. Gathelier, M. Gréard, R. Gualde, J. Kong, T. Valero (1992): EPSAT-NIGER, Rapport de campagne 1991, ORSTOM-DMN, 82p.

J.D. Taupin, T. Lebel, F. Cazenave, M. Gréard, J. Kong, J. Lecocq, M. Adamson, N. d'Amato, A. Ben Mohamed (1993): EPSAT-NIGER, Rapport de campagne 1992, ORSTOM-DMN, 91p.

J.D. Taupin, A. Amani, T. Lebel (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.

Taupin J.D. and Lebel T (1994): Dispositif expérimental de la mesure de la pluie sur le site central et premiers résultats ("Campagne de mesures sur le supersite central"), ORSTOM ed, en cours.

V. Thauvin and I. Lebel (1991): EPSAT-NIGER: Study of rainfall over the Sahel at small time steps using a dense network of recording raingauges. Hydrol. Processes 5, 251-260.

V. Thauvin (1992): Etude de la répartition spatiale des précipitations en milieu sahélien à l'aide du réseau dense de pluviographes de l'expérience EPSAT-NIGER - Application à la détermination de la précision des moyennes surfaciques au pas de temps de l'événement pluvieux. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.

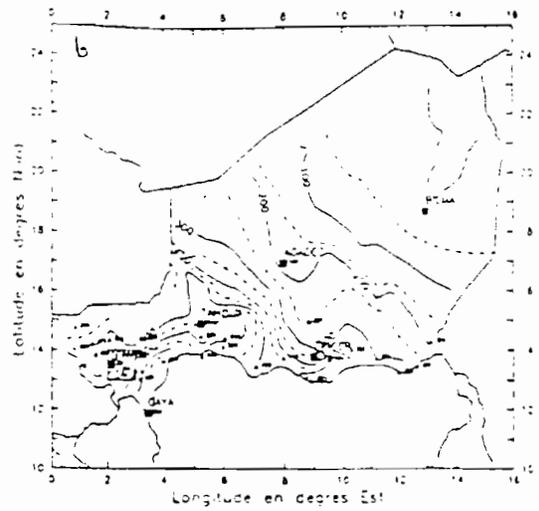
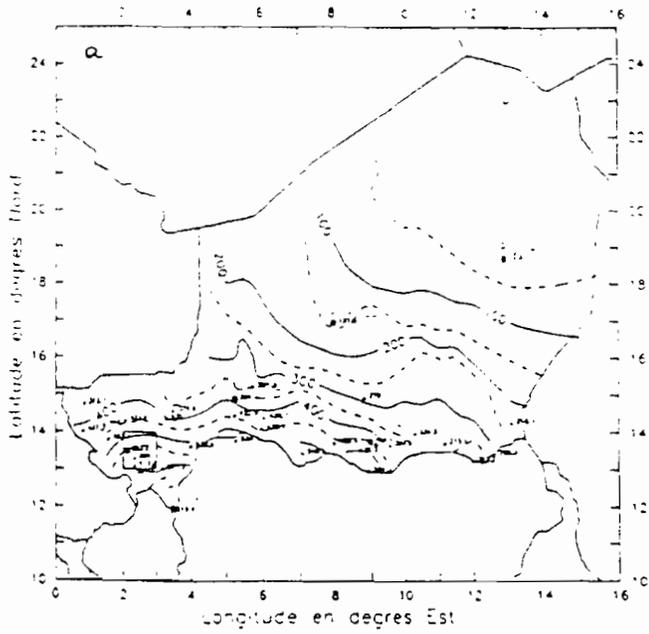


Figure 1: Isohyètes annuelles sur le Niger: a: Période 1950-1989 ; b: 1991

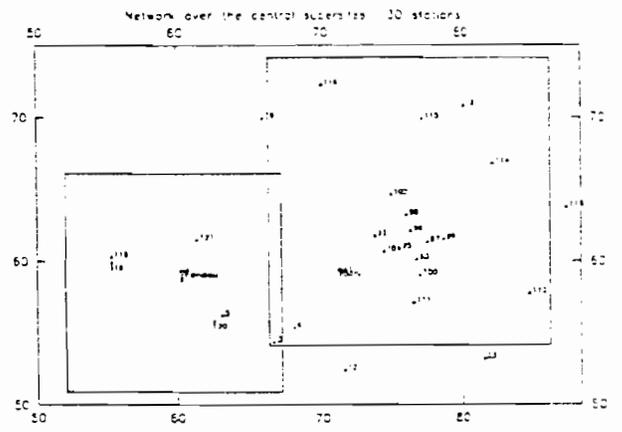
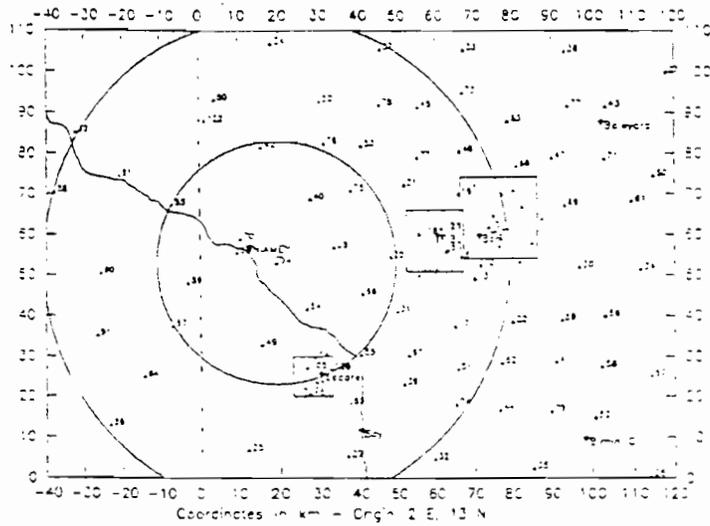


Figure 2: Dispositif année 1992 degré carré et cible

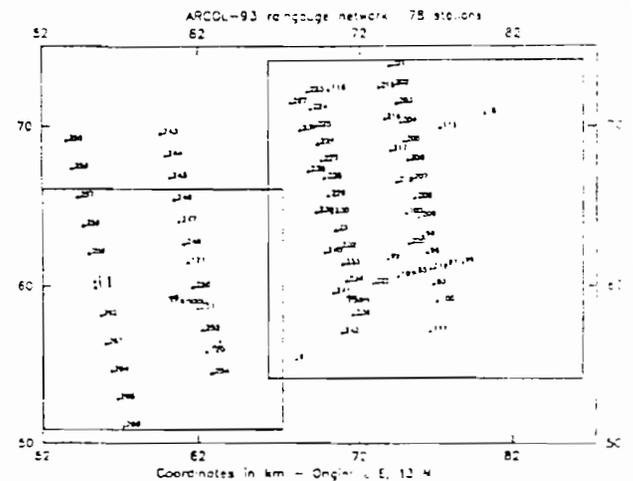
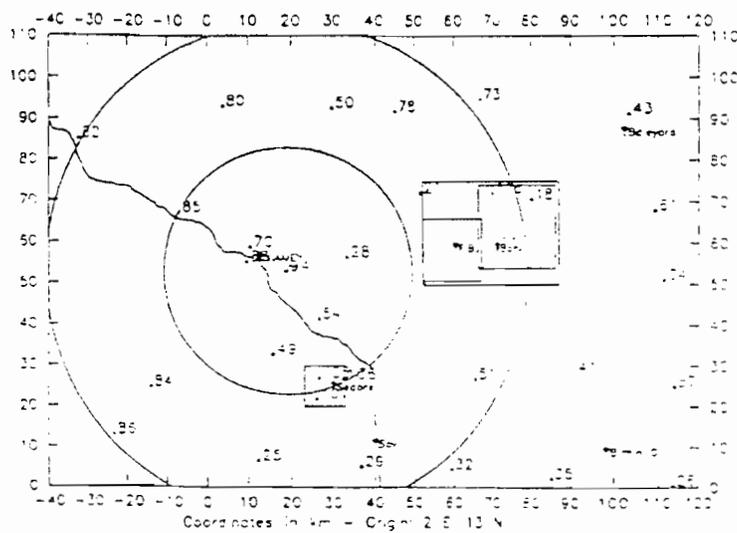


Figure 3: Dispositif année 1993 degré carré et cible

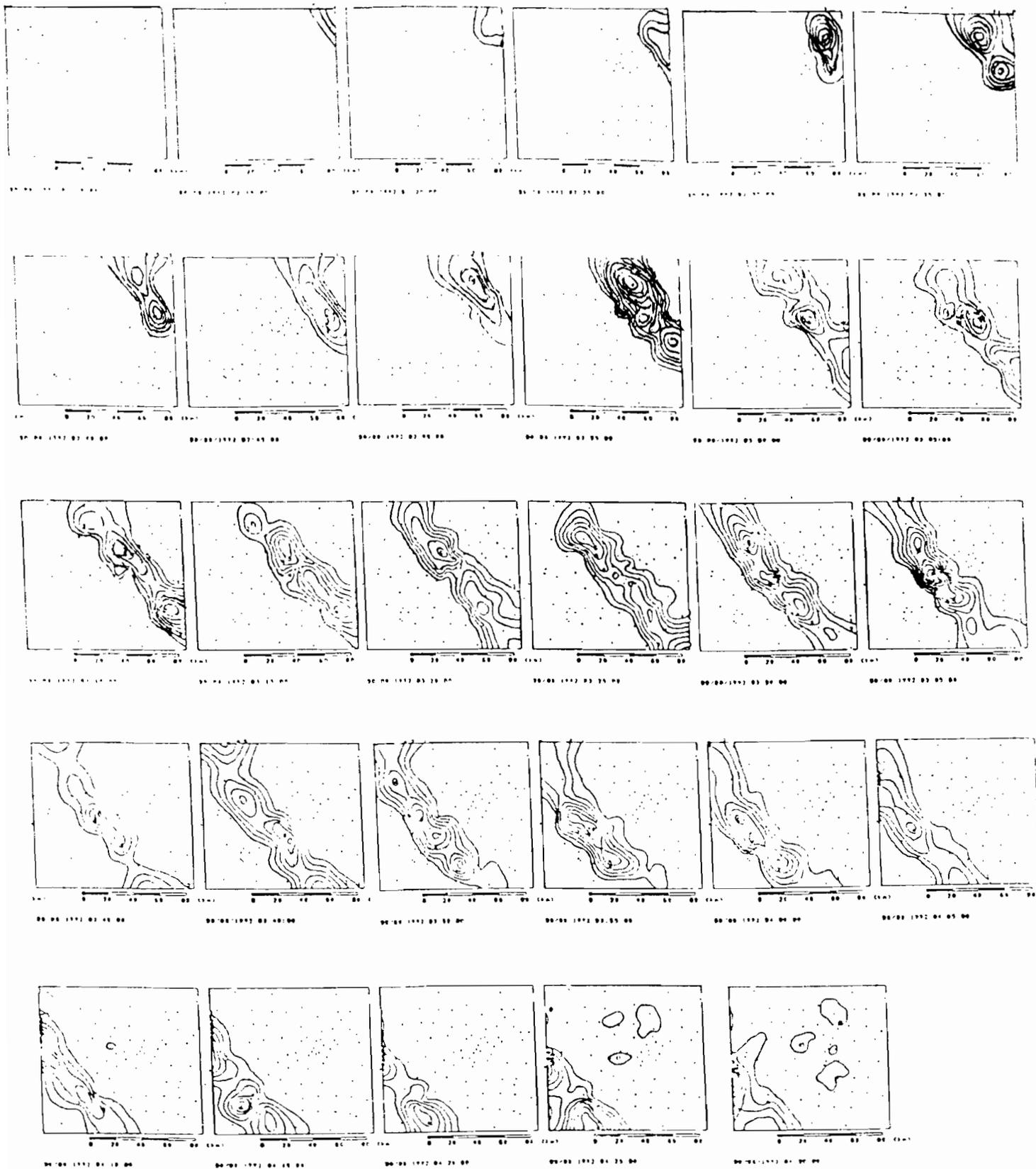


Figure 4: Isohyètes au pas de temps de 5 minutes de la ligne de grain du 30 août 1992

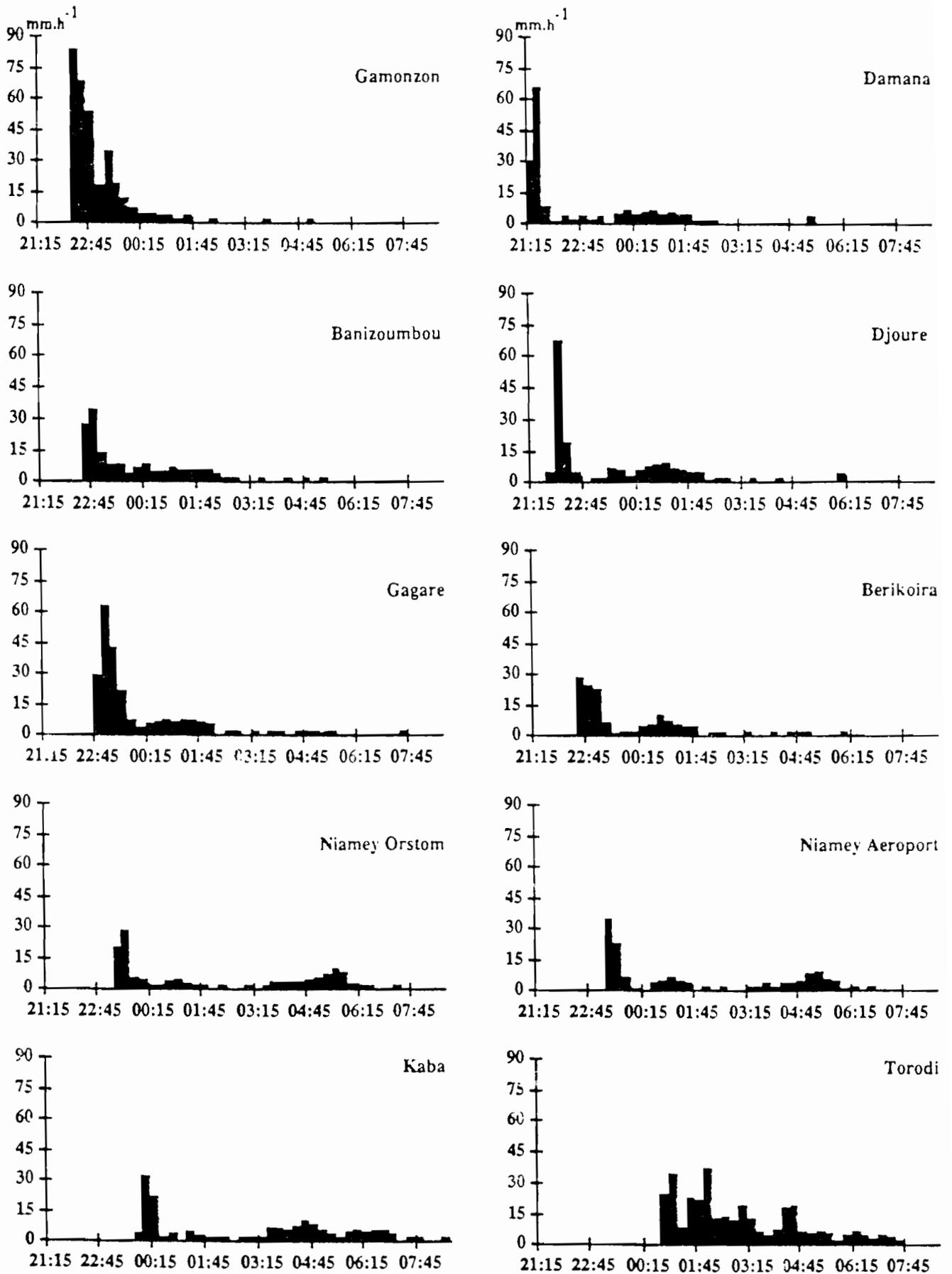
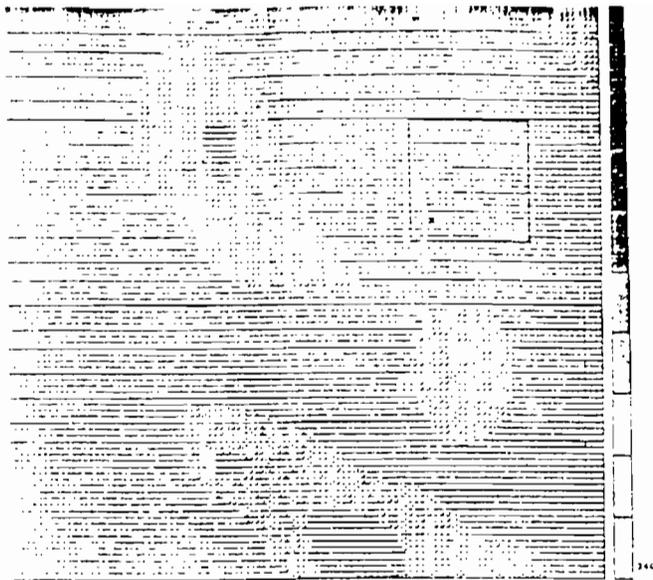
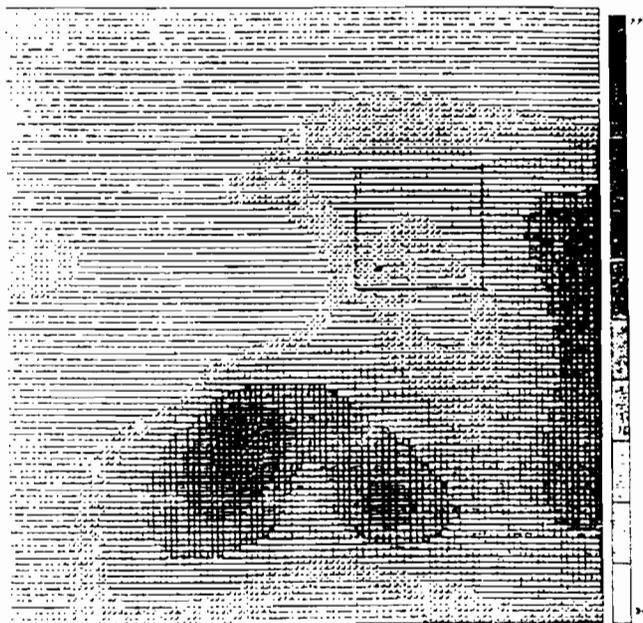


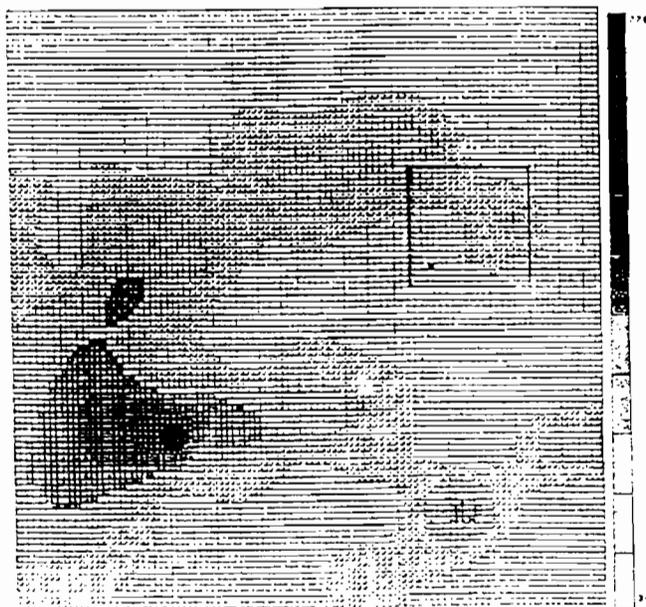
Figure 5: Hyétogrammes sur deux transects est-ouest du degré carré pour l'événement du 21 août 1992, montrant l'évolution spatiale du système et sa déformation au cours de son déplacement



SAISON 1990
 MAX. PONCTUEL= 623 mm
 MIN. PONCTUEL= 270 mm
 MOYENNE KRIGEE = 419 mm



SAISON 1991
 MAX. PONCTUEL= 745 mm
 MIN. PONCTUEL= 341 mm
 MOYENNE KRIGEE = 522 mm



SAISON 1992
 MAX. PONCTUEL= 777 mm
 MIN. PONCTUEL= 366 mm
 MOYENNE KRIGEE = 513 mm

Figure 6: Calcul de la moyenne annuelle pour les saisons 90-92 par krigeage sur des pavés de 1x1 km²

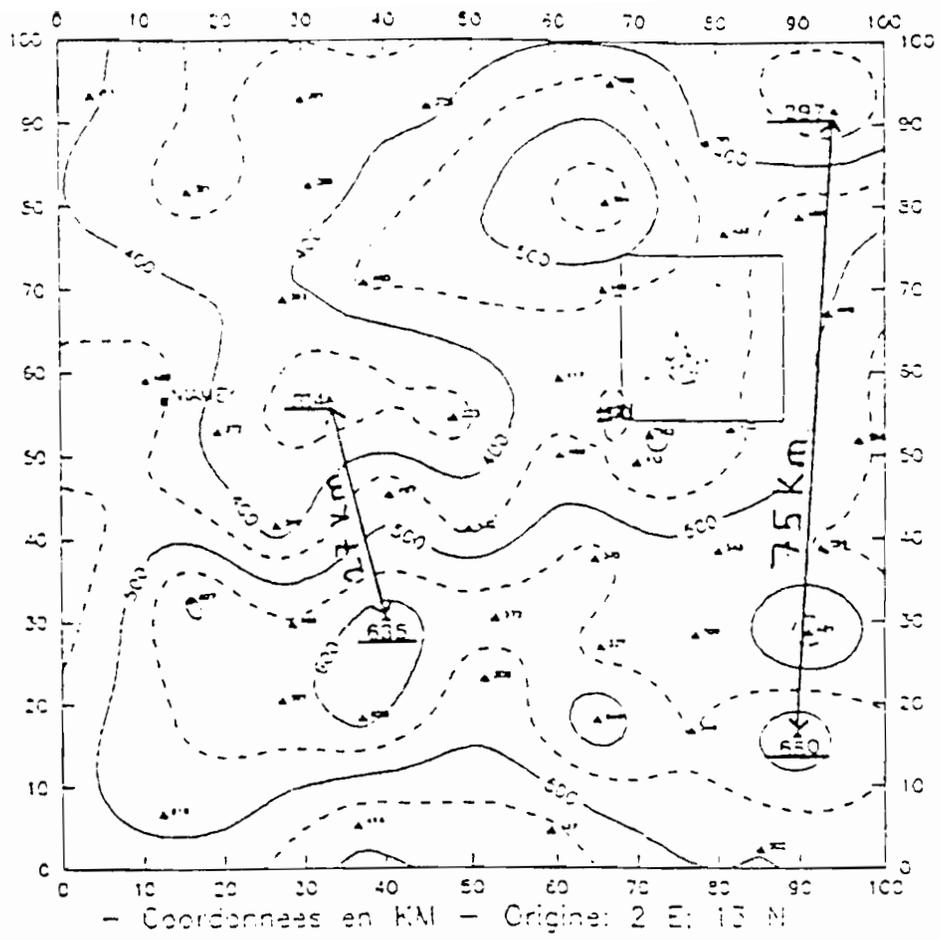


Figure 7: Variabilité à petite échelle pour la saison 1991

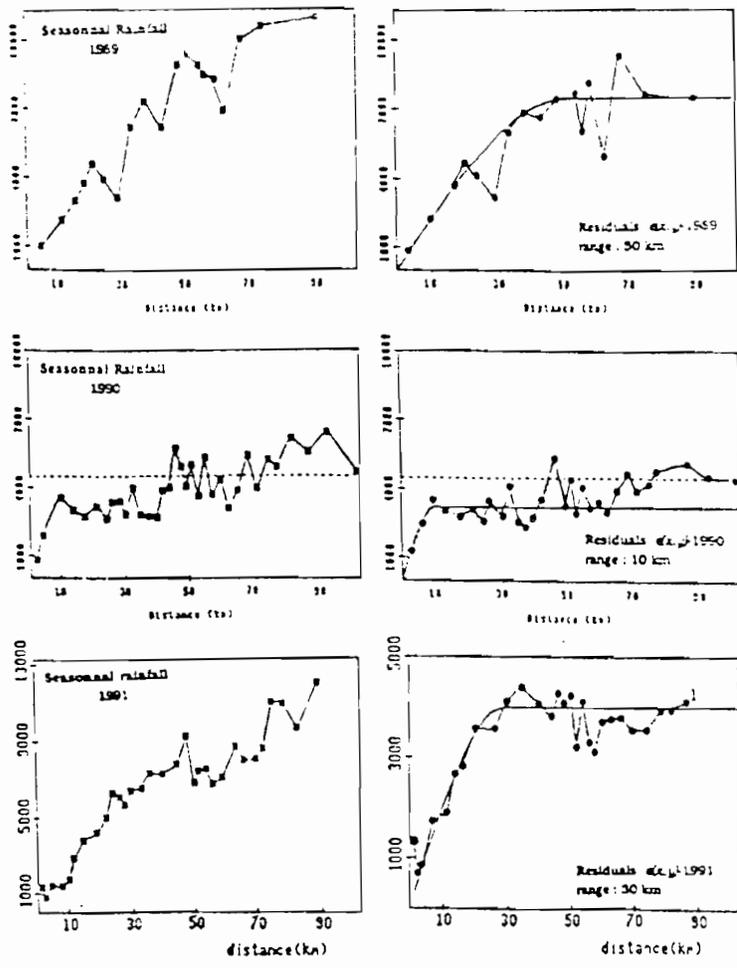


Figure 8: Variogrammes saisonniers (1989-91) bruts et corrigés de la dérive climatologique

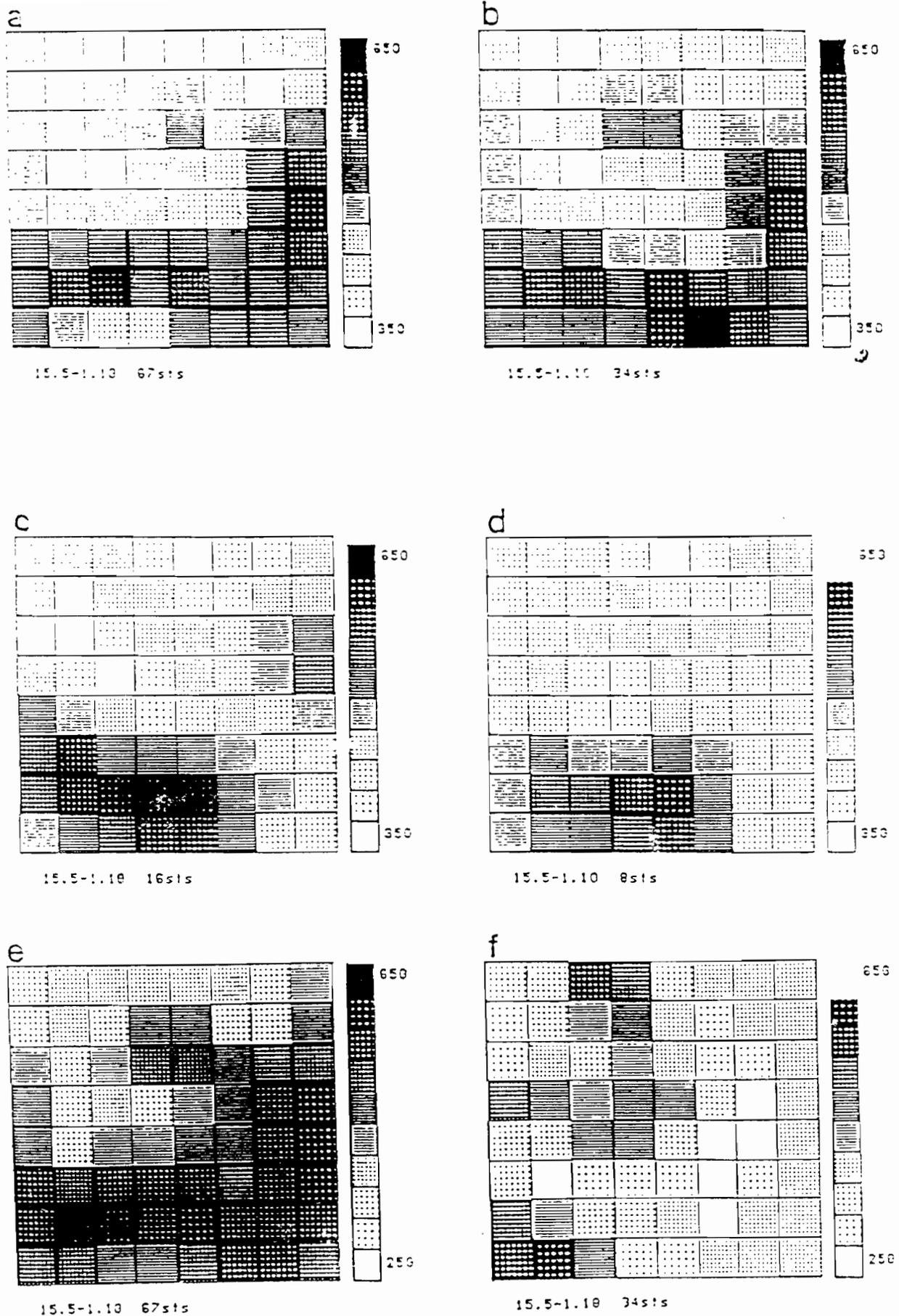


Figure 9: Estimation de la moyenne sur des mailles de 15x13 km² en fonction de la densité du réseau (a, b, c, d) et de sa régularité (e, f)

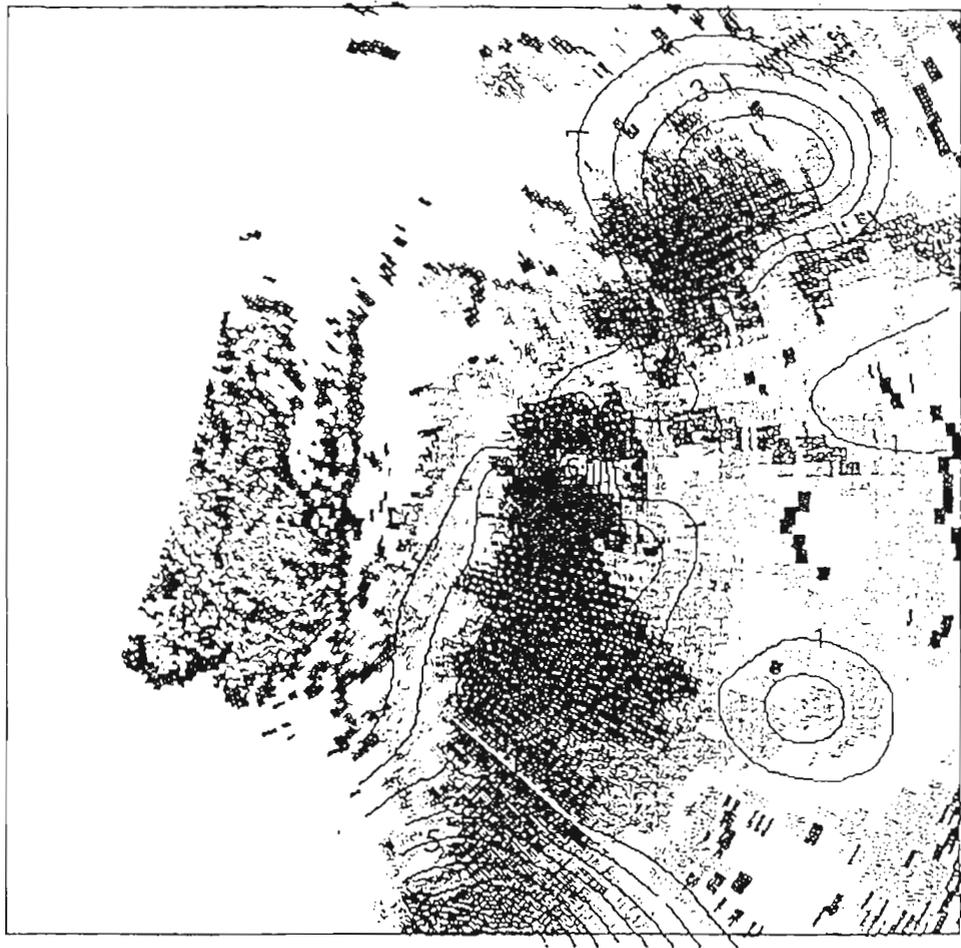


Figure 11: Superposition à une image radar (27 juillet 1991) des isohyètes en 5 mn, obtenues à partir du réseau de pluviographes, le maximum de réflectivité correspond au niveau du front aux zones les plus foncées

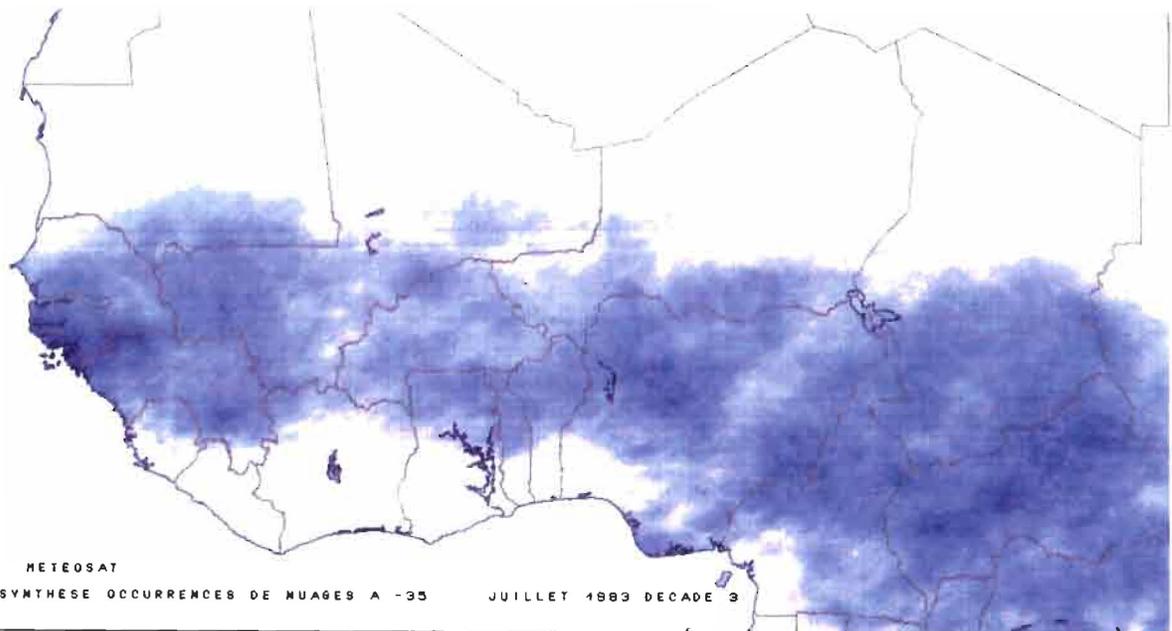


CILSS

PROGRAMME AGRHYMET

**ATELIER
ESTIMATION DES PLUIES PAR SATELLITE**

NIAMEY DU 02 AU 04 DECEMBRE 1993



CENTRE AGRHYMET : B.P. 11011 NIAMEY, NIGER
TEL: (227) 73. 31. 16. / 73. 24. 36.
FAX: (227) 73. 24. 35.

TABLE DES MATIERES

	Pages
- Programme de l'atelier	4
- Liste des participants	6
- Allocution d'ouverture du Directeur Général du Centre AGRHYMET	9
- Synthèse et conclusions	11
- Communications :	
. Bref exposé sur le phénomène "pluie" <i>A. BIZIMANA</i>	14
. Estimation des précipitations en zone sahélienne : l'expérience EPSAT - NIGER, une vérité sol adaptée <i>J.D. TAUPIN et T. LEBEL F 41246</i>	18
. La collecte des données pluviométriques pendant la campagne pluviale 1993 (1er mai - 31 octobre) et leur fiabilité <i>J.-L. DROUET</i>	32
. Evolution du DHC pour l'intégration des champs pluviométriques : sensibilité des termes du bilan hydrique des cultures simulé au pas de temps de calcul <i>X. GIRARD et S. BALLU</i>	47
. Le système Météosat <i>F. TALL</i>	55
. La chaîne de traitement AGRHYMET <i>J.-C. BERGES</i>	59
. Interface des stations Météosat/PDUS acquises par l'ASECNA <i>T. ROY</i>	63
. Description de la base de données utilisée pour la validation des algorithmes d'estimation des pluies <i>F. TALL</i>	67
. Estimateurs satellitaires de la pluviométrie enregistrée au Sahel <i>T. ROY</i>	74
. Climatologie des pluies et régionalisation <i>J.-C. BERGES</i>	87

. Méthode de filtrage des amas nuageux <i>L. CUNIN</i>	95
. Suivi de l'hivernage 1993 à l'aide des indicateurs occurrences de nuages à sommet froid et minima de températures radiatives <i>J.-L. DROUET</i>	101
. Over view of the FAO - ARTEMIS estimation activities <i>G. L. VAN HERWAARDEN</i>	118
. Estimation des pluies au Sénégal par la méthodologie TAMSAT : bilan provisoire des résultats de quatre années d'applications <i>A. TOURE, H. GEORGE, N. D. NDIAYE</i>	127
. Validation comparée des méthodes d'estimation de pluie EPSAT (Lannion) et TAMSAT (Reading) durant les décades de l'hivernage 1989 <i>F. TIMOUK</i> F 41247	135
. Evaluation d'estimations de pluie par satellite sur l'Afrique de l'Ouest <i>H. LAURENT et Y. ARNAUD</i> F 41248	140
. Comparaison des méthodes d'estimation des pluies AGRHYMET, EPSAT, TAMSAT au cours de la saison 1993 <i>J.-L. DROUET et L. CUNIN</i>	147
✓ . Validation des algorithmes d'estimation des précipitations par satellite (EPSAT et TAMSAT) sur le degré carré de Niamey pour les saisons des pluies 1990 et 1993 <i>Y. ARNAUD et J. D. TAUPIN</i> F 41248 bis	162
. Principes, limitations et perspectives des méthodes d'estimation des pluies par satellite <i>M. DESBOIS</i>	168
. Etude préliminaire des cumuls de pluie sahéliens <i>P. HUBERT et C. A. TOMA</i>	175