

# VERS UNE MEILLEURE COMPREHENSION DES FLUCTUATIONS PLUVIOMETRIQUES AU SAHEL : L'EXPERIENCE EPSAT-NIGER

Thierry LEBEL, Jean LECOCQ, Frédéric CAZENAVE

ORSTOM- Groupe PRAO- LTHE, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9

Jean Denis TAUPIN, Michel GRÉARD

ORSTOM- Groupe PRAO- BP 11416, Niamey, Niger

Luc LE BARBE

ORSTOM- Groupe PRAO- BP 5045, 34032 Montpellier Cedex

Au cours de quatre campagnes successives (1990-1993), l'expérience EPSAT-Niger a permis d'acquérir un ensemble de données pluviographiques et radar sans équivalent à ce jour sur l'Afrique de l'Ouest. Un panorama rapide des données acquises et des conditions climatiques qui ont prévalu durant ces 4 années d'expérience est donné ici, permettant de dégager quelques éléments dominants de la climatologie des précipitations au Sahel. Il est suivi d'une description des travaux menés en vue d'obtenir des estimations de lames d'eau au sol plus fiables sur des surfaces dont la taille peut varier selon les besoins des hydrologues et des modélisateurs du climat. Une analyse des champs pluviométriques associés aux systèmes convectifs de méso-échelle est ensuite présentée, montrant qu'ils sont constitués de structures emboîtées dont la trace se retrouve jusque dans les cartes de cumuls saisonniers. Néanmoins la possibilité de calculer des statistiques pertinentes pour ces structures est limitée par la nature intégrée des données fournies aussi bien par le radar que par les pluviographes. Un effort majeur reste donc à accomplir pour prendre en compte la distorsion introduite par ces effets d'intégration et développer des procédures d'estimation des paramètres de modèles de champs pluviométriques sahéliens.

Made of four years (1990-1993) of intensive field campaigns, the EPSAT-Niger experiment allowed to collect a set of weather radar and recording rain gauges data which is unique in West Africa. A broad overview of the data collected and of the climatic conditions that prevailed during those four years of experiment are given here. Some key statistics of the Sahelian rainfields are derived. The data processing used to obtain the relevant informations for hydrologists and climate modellers, that is areal rain depths, is then described. The analysis of the seasonal rain fields structure leads to identify nested structures that are related to the convective nature of the Sahelian rainfall. However the possibility of computing relevant statistics for the parameters characterising these structure is impeded by the integration carried out by radar and rain gauge measurements. A major effort has thus to be undertaken to understand how the space or time integrations distort our visions of the convective structures and to derive estimation procedures for the calibration of space-time models of Sahelian rain fields.

## 1. INTRODUCTION

La pluie moyenne interannuelle sur l'Afrique de l'Ouest présente une organisation très régulière de ses isohyètes, orientées Est-Ouest. Sur la zone sahélienne en particulier, le gradient pluviométrique Nord-Sud est pratiquement constant, de l'ordre de 1 mm/km [Lebel *et al.*, 1992]. Cette organisation est associée au mouvement saisonnier de la Zone InterTropicale de Convergence (ZITC), elle-même liée à la migration alternée de l'équateur météorologique du sud vers le nord entre les mois de février et de juillet, puis du nord vers le sud entre les mois de septembre et de décembre. Si les grands traits de la circulation générale qui commande le régime des précipitations en Afrique de l'Ouest sont assez bien connus, et depuis longtemps, très peu de travaux ont, en revanche, été consacrés soit au développement d'une climatologie précise des précipitations dans ces régions, soit à la modélisation des champs pluviométriques qui conditionnent le bilan hydrique régional. Or le bilan hydrique des zones tropicales influence largement le climat planétaire par le biais des échanges de chaleur latente associés aux systèmes convectifs qui génèrent l'essentiel des précipitations de la bande intertropicale. Une bonne connaissance de la répartition spatiale des précipitations à différentes échelles de temps est également essentielle pour évaluer et prévoir l'évolution des ressources en eau, dont la pénurie menace en permanence les régions telles que le Sahel.

Une raison fondamentale de notre manque de connaissance sur la dynamique et la variabilité des champs pluviométriques sahéliens est l'absence de mesures réalisées à des résolutions compatibles avec les échelles de variabilité des systèmes convectifs. Un premier effort pour remédier à cette lacune a été accompli au milieu des années 80 avec la mise en place d'un réseau dense de pluviomètres sur le degré carré de Ouagadougou [Hubert et Carbonnel, 1988]. L'expérience EPSAT-Niger visait à prolonger ces études préliminaires en mettant sur pied un dispositif donnant accès à l'étude des variabilités se développant aux échelles de l'ordre du kilomètre et de la minute, grâce à l'emploi de pluviographes et d'un radar bande C numérisé. Outre qu'il permet une étude fine de l'organisation et de la variabilité des champs pluviométriques dans une optique de modélisation, le dispositif EPSAT-Niger a également été conçu pour servir de validation aux estimations de pluie par satellite, qu'elles soient basées sur les données infra-rouges ou micro-ondes actuellement disponibles ou sur celles des futures missions TRMM [Simpson *et al.*, 1988] et TROPQUES [Desbois, 1994]. Enfin, le dispositif EPSAT-Niger a également servi de support à l'expérience HAPEX-Sahel, dont l'objectif était d'améliorer la paramétrisation des échanges sol-atmosphère dans les modèles de circulation générale atmosphérique [Goutorbe *et al.*, 1994].

Un an après la fin de l'expérience cet article vise à fournir une synthèse de ses premiers acquis. Il passe en revue les données acquises (section 2) et les conditions climatiques rencontrées et

fournit quelques statistiques caractéristiques sur la distribution des cumuls pluviométriques et des intensités (section 3). L'apport des données d'EPSTAT-Niger concernant l'estimation de lames d'eau est ensuite présenté, ainsi que les algorithmes de correction qu'il faut appliquer aux données radar pour cela (section 4). Enfin sont évoquées les perspectives de modélisation des champs pluviométriques à différentes échelles de temps, en se basant sur la possibilité d'identifier la trace hydrologique des cellules convectives à partir des données radar et de celles du réseau sol de 1993, conçu à cet effet (section 5).

## 2. DISPOSITIF DE MESURE

### 2.1. Zone et période d'étude

Le dispositif de mesure a été implanté dans la région de Niamey (Niger), où la pluie moyenne interannuelle sur la période 1905-1989 a été de 560 mm. Les quarante dernières années ont été caractérisées par la succession d'une séquence humide (moyenne interannuelle de 655 mm entre 1950 et 1967) et d'une séquence sèche (moyenne interannuelle de 495 mm entre 1968 et 1989). La zone couverte par le réseau de pluviographes représente 16.000 km<sup>2</sup> (Figure 1) et est délimitée par les latitudes 13° et 14°N, d'une part, par les longitudes 1,40° et 3°E, d'autre part. Le radar est situé dans la partie ouest de la zone d'étude, ce qui permet d'éviter les effets d'atténuation sur site (les pluies viennent systématiquement de l'est) et d'assurer que toutes les

stations sol soient incluses à l'intérieur du cercle de rayon 120 km au delà duquel la mesure quantitative par radar n'est plus possible.

Deux années d'étude préliminaire, 1988 et 1989, ont permis de tester et fiabiliser le dispositif. A partir de 1990, on a disposé d'une centaine de pluviographes à acquisition numérique (109 en 1992 et 1993) qui ont été maintenus jusqu'en 1993. A compter de 1994 le dispositif a été réduit à une trentaine d'appareils. Il sera maintenu tel quel en 1995 et, dans la mesure du possible, au delà, ceci pour obtenir une climatologie d'au moins 10 ans sur cette région et pour servir de validation éventuelle aux missions satellitaires TRMM et TROPQUES.

### 2.2. Résolution et période d'échantillonnage

Le radar utilisé fonctionne en bande C ( $\lambda = 5,4$  cm). L'ouverture du faisceau principal est de 1,5° et la durée d'impulsion de 2  $\mu$ s. En mode standard l'acquisition du signal rétrodiffusé s'effectue sur des portes de 500 m [Savageot et Despau, 1990]. La résolution spatiale de la donnée radar varie en conséquence linéairement de 500 m x 500 m pour une distance de 20 km de l'émetteur à 500 m x 1500 m pour une distance de 60 km. La mesure est aussi intégrée verticalement, de telle sorte que les précipitations contenues dans le volume d'intégration vont arriver au sol en s'étalant sur une durée de quelques minutes (entre 1 et 5 minutes selon la vitesse de chute et la distance au radar).

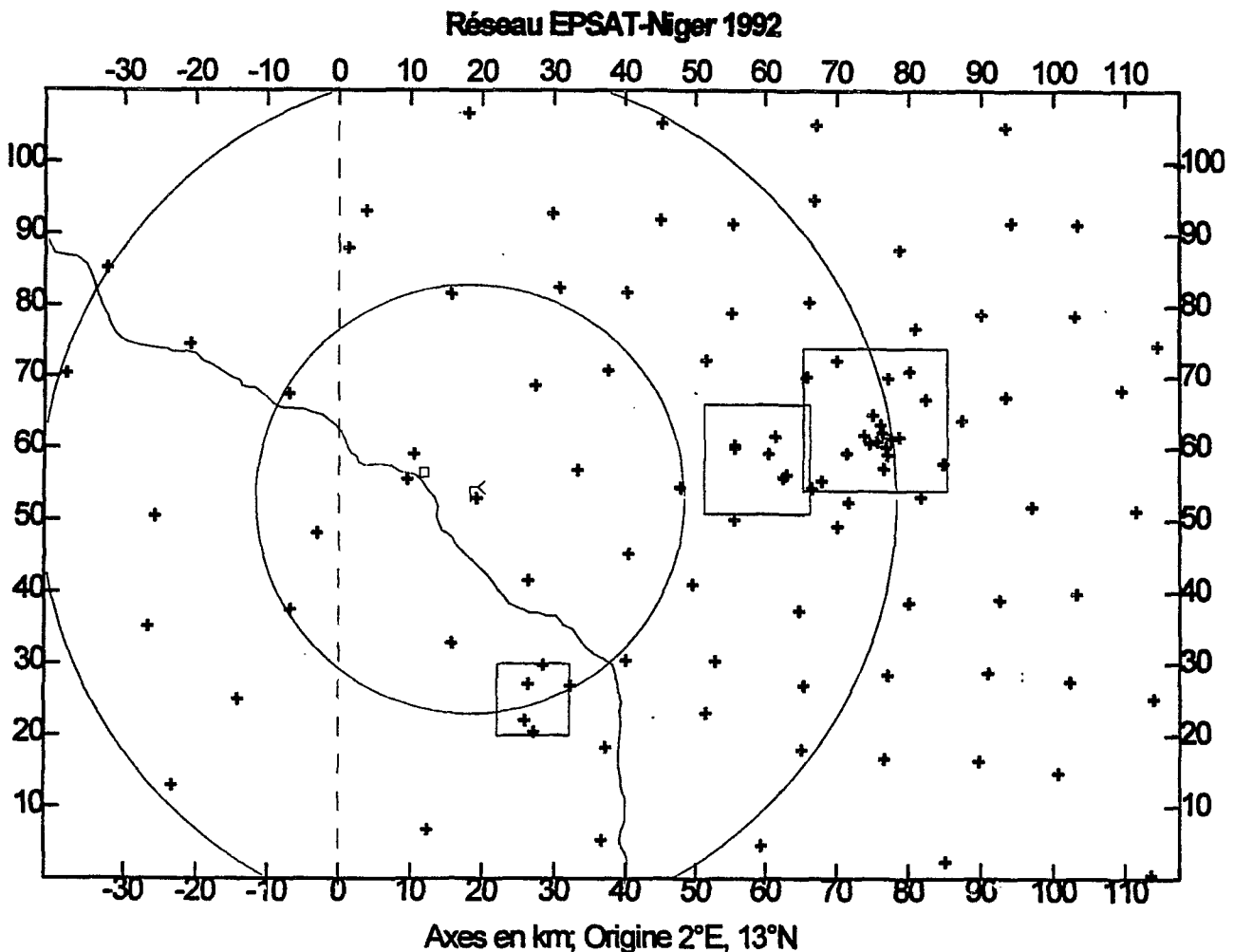


Figure 1. Le réseau de pluviographes EPSTAT-Niger en 1992.

Les données sol, quant à elles, résultent d'une intégration spatiale sur  $400 \text{ cm}^2$ , que l'on pourra assimiler à une mesure ponctuelle, et d'une intégration temporelle sur une durée qui varie avec l'intensité de la pluie. En effet la donnée acquise est le temps, mesuré à la seconde près, séparant deux basculements consécutifs d'un auget (0,5 mm de pluie). La période d'intégration varie ainsi de 30 minutes pour une intensité de 1 mm/h à 5 minutes pour une intensité de 30 mm/h et 15 secondes pour une intensité de 120 mm/h.

La période d'échantillonnage du signal radar (c'est à dire l'acquisition d'un tour d'antenne durant environ 1 minute) varie de 15 minutes lorsque le système précipitant est hors de la zone de pluviographes à 5 minutes lorsque le système précipitant couvre l'aire cible pointée en figure 1. La couverture spatiale est continue.

A l'inverse, les pluviographes fournissent une mesure continue dans le temps (les cumuls sont donc connus exactement) mais discontinue dans l'espace, l'échantillonnage spatial étant réalisé par un réseau de base dont la maille est de 12,5 km environ, descendant jusqu'à 1 km sur les aires cibles (Figure 1).

### 3. LES DONNEES ACQUISES

#### 3.1. Qualité des mesures

Quatre saisons des pluies (10 avril - 10 octobre) ont été suivies lors de la période intensive (1990-1993). Au cours de ces quatre saisons, 172 événements pluvieux ont été enregistrés, représentant plus de 99% de la pluie annuelle. Le taux de fonctionnement moyen des pluviographes s'établit à un peu moins de 95%. Les comparaisons effectuées sur deux sites entre pluie au sol et pluie à 1,50 m (hauteur standard des pluviographes d'EPSAT-Niger) ne révèlent aucune différence significative [Taupin et al., 1993b]. Conformément à ce qui est le plus souvent observé, et malgré un réglage régulier de tous les appareils, le cumul de la mesure par augets surestime systématiquement, bien que dans des proportions variables d'un appareil et d'une saison à l'autre, le cumul pluviométrique recueilli dans les seaux situés à la sortie du tuyau de vidange des appareils. Cette surestimation est en moyenne de l'ordre de 5%. Pour les pas de temps supérieurs à 24 h., les données augets sont donc corrigées par les valeurs de contrôle au seau.

Sur cette même période de 4 ans, 112 événements ont été suivis par radar, dont 83 appartiennent à l'ensemble des 172 événements enregistrés à l'aide du réseau sol. Malheureusement, des problèmes répétés d'alimentation électrique ont altéré la qualité des acquisitions de 1990 et, pour partie, de 1991. L'exploitation de ces données à des fins quantitatives est difficilement envisageable, sauf peut-être de façon très globale. A compter du mois d'août 1991 le radar a très bien fonctionné, permettant une bonne couverture de la Période d'Observation Intensive d'HAPEX-Sahel [Goutorbe et al., 1994] et l'acquisition de données sur une quinzaine de lignes de grains (on se reportera à Lebel et al. [1995a], et Taupin et al. [1993b], pour des commentaires plus détaillés sur le fonctionnement du radar).

#### 3.2. Aperçu sur la climatologie

Les tableaux 1 et 2 donnent un aperçu de la pluviométrie enregistrée au cours des années 1990 à 1993. La moyenne annuelle sur le degré carré de Niamey ( $P_{dc}$ ) s'établit à 472 mm sur les quatre années, chiffre inférieur à la moyenne de la période 1968-1989 à la station Niamey-Aéroport. La sécheresse des décennies 1970 et 1980, analysée par Nicholson [1981], Lamb [1983] et Hubert et Carbonnel [1987], entre autres, s'est donc prolongée au début de la décennie actuelle. La variabilité spatiale

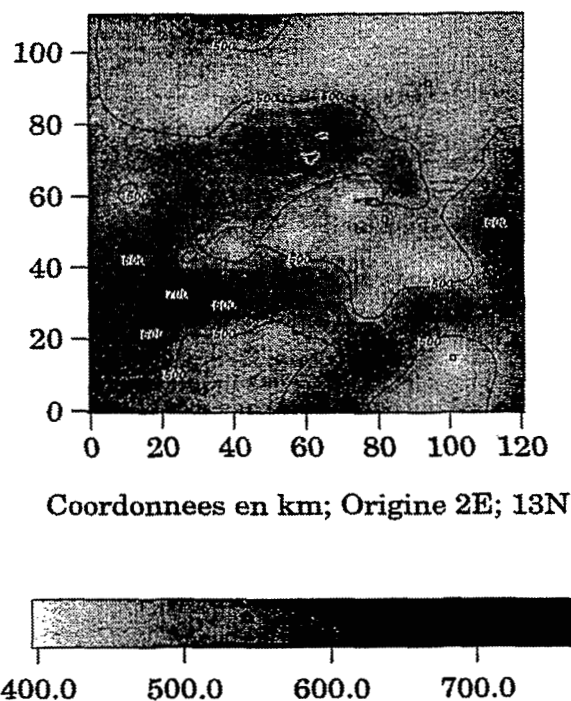


Figure 2. Carte des isohyètes de la saison 1992 d'après Taupin et al. [1993b].

des cumuls saisonniers apparaît extrêmement importante, puisque la plus forte valeur enregistrée par le réseau a été chaque année deux fois supérieure à la plus faible. La carte des cumuls 1992 (Figure 2) illustre également cette très forte variabilité qui reste un des résultats préliminaires les plus marquants d'EPSAT-Niger. Par contraste, la pluviosité moyenne associée à un événement pluvieux apparaît très stable d'une année à l'autre, comme le montre le tableau 2. Au Sahel, un Système Convectif de Mésos-échelle (SCM) produit en moyenne 10 mm de pluie sur un degré carré ( $12.000 \text{ km}^2$ ). L'analyse plus détaillée menée par Lebel et Le Barbé [1995] et Lebel et al. [1995b], montre que la distribution du cumul pluviométrique en un point et pour un événement pluvieux est exponentielle, la moyenne et l'écart-type étant de l'ordre de 15 mm pour le coeur de la saison des pluies. Ces valeurs ont été calculées à partir d'échantillons de pluies non nulles (la moyenne de 15 mm est donc une moyenne conditionnelle au fait qu'une pluie de 1 mm au moins ait été enregistrée à la station concernée). Si on fait l'hypothèse, raisonnable sur une telle surface d'où tout relief marqué est absent, que le processus pluviométrique est stationnaire, la différence entre la moyenne du cumul pluviométrique calculée pour un point, d'une part, et sur un degré carré, d'autre part, peut être attribuée au fait que la pluie ne touche pas toutes les stations du degré carré à chaque fois. Dans la mesure où nous disposons d'un réseau régulier et dense le rapport de la moyenne "degré carré" à la moyenne conditionnelle en un point peut être assimilée à la probabilité qu'un point donné soit touché par la pluie au cours d'un événement. Cette probabilité serait donc de l'ordre de 65 à 70%. Lebel et al. [1995a] ont calculé par ailleurs qu'un peu plus de 90% de la pluie annuelle tombe au cours de ces événements de mésos-échelle. Même si la définition de ces événements de mésos-échelle repose jusqu'à présent uniquement sur des critères numériques déduits du réseau EPSAT-Niger, ce

| Echantillon | Moyenne ( $\mu_p$ ) | Ec.Type (s) | mini m | Maxi (M) | C.V.(%) ( $s/\mu_p$ ) | (M-m)/ $\mu_p$ (%) | Lame d'eau degré carré | Niamey Aero / ORST. |
|-------------|---------------------|-------------|--------|----------|-----------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| EPSAT 1990  | 396                 | 63          | 292    | 659      | 16,0                  | 93                 | 396 ± 2                | 474 / 399           |
| EPSAT 1991  | 523                 | 95          | 341    | 725      | 18.2                  | 74                 | 522 ± 4                | 434 / 541           |
| EPSAT 1992  | 513                 | 71          | 389    | 782      | 13,9                  | 77                 | 511 ± 3                | 607 / 488           |
| EPSAT 1993  | 459                 | 83.9        | 315    | 622      | 18,6                  | 65                 | 460 ± 5                | 399 / 447           |
| N.A. 50-89  | 566                 | 123         | 294    | 980      | 22                    | 114                |                        |                     |
| N.A. 50-67  | 654                 | 145         | 454    | 940      | 22                    | 74                 |                        |                     |
| N.A. 68-89  | 495                 | 108         | 294    | 689      | 22                    | 80                 |                        |                     |

Tableau 1. Statistiques (en mm) des mesures enregistrées par le réseau de base EPSAT-Niger (espacement des stations de 12,5 km environ) sur la période 10/04 - 10/10, comparées aux statistiques de la série temporelle de Niamey-Aéroport (N.A.). Les deux dernières colonnes donnent le cumul saisonnier sur le degré carré (13-14°N; 2-3°E), avec son écart-type d'estimation par krigeage, et aux deux stations de Niamey-Aéroport et Niamey-ORSTOM.

qui est un obstacle à leur généralisation à d'autres circonstances, la notion d'événement pluvieux, entité bien repérable et aux propriétés statistiques stables, semble devoir constituer la pierre angulaire de toute climatologie des pluies au Sahel.

Une autre constatation importante résultant de l'analyse des données d'EPSAT-Niger est la relative stabilité des intensités pluviométriques enregistrées d'une année sur l'autre. Bien qu'un travail méthodologique approfondi reste à accomplir pour étudier les effets du mode d'échantillonnage réalisé par les pluviographes (intégration temporelle à pas variable, dont la période dépend de l'intensité de la pluie), les calculs préliminaires de *Lebel et al.* [1995b] indiquent que 50% environ du total pluviométrique annuel tombe avec des intensités dépassant 35 mm/h, et 35% avec des intensités dépassant 50 mm/h. Ces chiffres illustrent que la pluie au Sahel est tout aussi intermittente dans le temps que dans l'espace : 50% de la pluie annuelle en une station tombe en moins de 5 heures.

#### 4. ESTIMATION DES PRECIPITATIONS

Un des premiers objectifs d'EPSAT-Niger était d'évaluer la précision des estimations de lames d'eau qui pouvaient être obtenues à l'aide de différentes combinaisons de capteurs. Une première série de réponses a été donnée à cette question en utilisant les seules données sol. L'apport des données radar n'a pu encore être évalué précisément du fait du temps nécessaire à l'étalonnage a posteriori du capteur, mais on entrevoit déjà les possibilités dans ce domaine. Enfin, quelques algorithmes satellitaires ont pu être testés sur de petites surfaces grâce aux vérités sol fournies sur le degré carré de Niamey.

##### 4.1. Utilisation du seul réseau sol

La transformation d'un semis de valeurs ponctuelles en séries de lames d'eau sur des surfaces plus ou moins étendues est

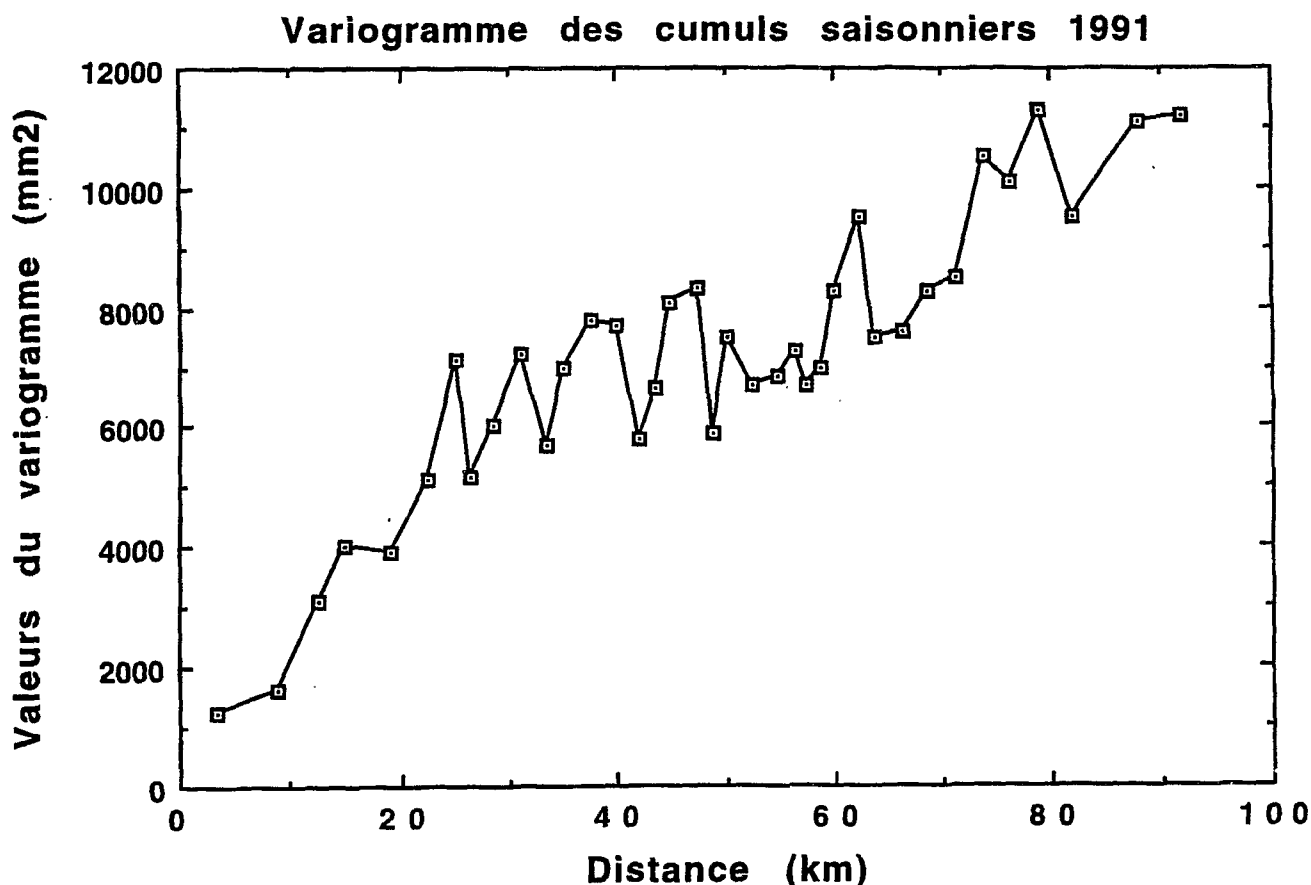


Figure 3. Variogramme des cumuls saisonniers pour la saison des pluies 1991, d'après *Lebel et al.* [1995].

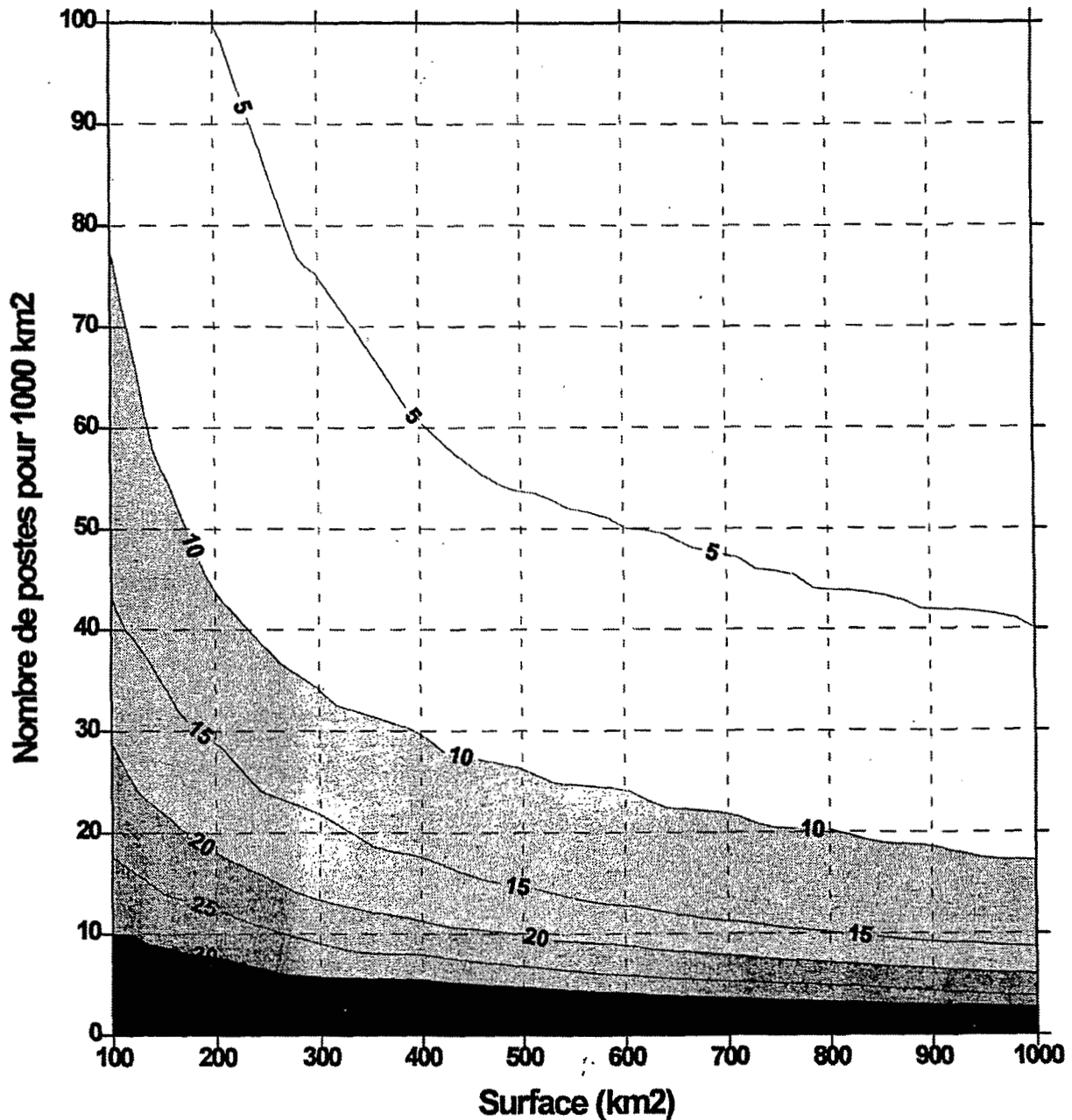


Figure 4. Erreurs standards d'estimation par krigeage, calculées à l'aide d'un modèle de variogramme exponentiel de paramètre de forme  $\beta=10$  km.

nécessaire pour la validation des données radar et satellite, d'une part, pour les calculs de bilan hydrique effectués par les équipes d'HAPEX-Sahel, d'autre part. Les surfaces concernées vont de  $1 \times 1 \text{ km}^2$  (pixels radar et NOAA, modèles de réponse de végétation) à  $100 \times 100 \text{ km}^2$  (bilan hydrique à l'échelle du degré carré, recharge des aquifères, validation des sorties de MCG).

Ce travail a d'abord été entrepris, par une approche géostatistique, à de grandes échelles de temps, de l'événement (quelques heures) à la saison. Thauvin [1992], puis Taupin *et al.* [1993a] ont mis en évidence des distances de décorrélation étonnamment faibles (de l'ordre de 30 km) sur les cumuls saisonniers. Thauvin [1992] a calculé une série d'abaques fournissant les erreurs types d'estimation de lame d'eau sur des carrés compris entre  $1 \times 1 \text{ km}^2$  et  $100 \times 100 \text{ km}^2$ . Une analyse plus

attentive du variogramme saisonnier montre qu'il est en fait constitué d'un emboîtement de structures et que le palier de corrélation observé par Thauvin n'est pas unique : il correspond simplement à la structure la plus facile à mettre en évidence du fait des échelles de mesure du réseau. On détecte ainsi pour la saison 1991 (Figure 3) une succession de tronçons où le variogramme passe par des phases de croissance et de plateau. Les calculs menés par Lebel *et al.* [1995b] permettent de faire correspondre des structures fondamentales à chacune de ces zones (voir en section 5). Néanmoins, pour des distances d'interpolation comprises entre 1 et 60 km, des modèles de variogramme à palier unique, avec une portée  $r$  de l'ordre de 30 km, constituent une bonne approximation de la structure réelle des champs de pluie par événement aussi bien que des champs de

|      | Nombre<br>(n) | Moyenne sur le<br>degré carré | Minimum sur le<br>degré carré | Maximum sur le<br>degré carré | Maximum en un<br>point | Durée<br>Minimale | Durée<br>Maximale |
|------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| 1990 | 39            | 9.6 ± 7.4                     | 0.9                           | 27.2                          | 103                    | 2:50              | 11:10             |
| 1991 | 47            | 10.5 ± 8.4                    | 0.5                           | 36.4                          | 162                    | 2:10              | 16:40             |
| 1992 | 48            | 10.0 ± 9.5                    | 0.5                           | 43.4                          | 92                     | 1:35              | 11:45             |
| 1993 | 38            | 10.5 ± 8.5                    | 0.2                           | 37.3                          | 96                     | 0:30              | 9:05              |

Tableau 2. Statistiques des événements pluvieux ayant touché plus de 30% des stations du réseau EPSAT-Niger (pluie en mm; durées en heures:minutes). La moyenne sur le degré carré est celle de la série des  $n$  lames d'eau estimées par krigeage des valeurs ponctuelles pour chaque événement de la saison. Elle est accompagnée de l'écart-type de la série

pluie saisonnier (on se reportera à *Lebel et al.* [1995b], pour une explication de ce fait apparemment paradoxal). L'abaque de la figure 4 a été calculé en utilisant un variogramme exponentiel de paramètres de forme  $a$  égal à  $r/3$  (10 km), ce qui signifie que, dans le cas strictement stationnaire, le coefficient de corrélation entre 2 points séparés de 30 km est de l'ordre de 20% ( $r^2 = 0,05$ ).

Le paramètre cartographié est un écart-type d'estimation unitaire,  $\sigma_u$ , qui doit être multiplié par l'écart-type (en mm),  $\sigma_p(k)$ , du champ pluviométrique  $k$  considéré pour obtenir un écart-type d'estimation,  $\sigma_e(k)$ , en mm [*Lebel et al.*, 1987] :

$$\sigma_e(k) = \sigma_p(k) \cdot \sigma_u \quad (1)$$

Cette formulation, qui résulte directement des hypothèses de stationnarité et d'ergodicité liées à la mise en oeuvre du krigeage climatologique, présente une difficulté de mise en oeuvre liée au calcul de  $\sigma_p(k)$ . On sait qu'il est en effet difficile d'estimer correctement un écart-type pour des populations à distribution très dissymétrique, comme c'est le cas pour les champs pluviométriques, lorsqu'on dispose de moins d'une trentaine de réalisations de la variable aléatoire. En ce qui concerne EPSTAT-Niger ce n'est pas réellement un problème puisqu'on a au minimum une soixantaine de stations disponibles sur un domaine suffisamment homogène pour que les hypothèses de stationnarité tiennent. Par contre, l'application de l'abaque de la figure 4 pour une situation non expérimentale nécessite des adaptations si la répartition des stations n'est pas homogène et leur nombre insuffisant pour estimer  $\sigma_p(k)$  de manière fiable. Une étude des estimateurs de  $\sigma_p(k)$ , fonction notamment du réseau d'observation et de la moyenne calculée sur ce réseau pour un champ donné doit donc être réalisée. En attendant un ordre de grandeur peut-être obtenu en utilisant les résultats de *Lebel et al.* [1995b], mentionnés en section 3.2, montrant que l'écart-type climatologique de la distribution des cumuls par événement (conditionnellement au fait qu'il pleuve effectivement au point considéré) était égal à 15 mm environ et à 13,5 mm en incluant les valeurs nulles. On peut adopter comme estimateur climatologique de  $\sigma_z(k)$  une valeur constante  $\sigma_z^* = 15$  mm. On pourra objecter, à juste titre, qu'il s'agit là d'une approche grossière. Néanmoins, faute d'une étude détaillée, qui reste à réaliser, de la stationnarité de  $\sigma_z(k)$  et des effets de l'intermittence des champs pluviométriques sur son estimation (prise en compte ou non des valeurs nulles, stationnarité de la probabilité d'apparition des valeurs non nulles), l'utilisation conjointe de l'abaque de la figure 4 (où  $\sigma_u$  est cartographié sous forme d'isolignes) et de l'équation (1) modifiée :

$$\sigma_e = 15 \sigma_u \cdot \sigma_e \text{ en mm,} \quad (2)$$

permet de calculer des écarts-types ( $\sigma_e$ ) assez fiables et plutôt majorés pour la plupart des situations courantes.

Bien qu'une série d'abaques plus complète ait été calculée, les valeurs obtenues pour des surfaces comprises entre 100 et 1000 km<sup>2</sup> sont les plus significatives. Sur l'abaque de la figure 4, la densité du réseau EPSTAT-Niger correspond à peu près à la droite horizontale d'ordonnée égale à 10. Pour les surfaces au delà de 1000 km<sup>2</sup>, l'erreur d'estimation standard est inférieure à 15%. Elle croît de 15 à 30% lorsque la surface décroît de 1000 à 100 km<sup>2</sup>.

On aura remarqué que l'erreur d'estimation standard ne dépend pas de la lame d'eau enregistrée sur la surface d'estimation, mais de la pluviosité d'ensemble de l'épisode  $k$  considéré, par le biais du paramètre  $\sigma_p(k)$ . On réalise donc une erreur relative plus grande sur une faible lame d'eau (inférieure sur la surface d'estimation à la lame d'eau produite sur l'ensemble de la surface concernée par l'épisode) que sur une forte lame d'eau (supérieure sur la surface d'estimation à la lame d'eau produite sur l'ensemble de la surface concernée par l'épisode). Le cas des précipitations extrêmes du type de celle enregistrée le 4 août 1989 [*Thauvin*, 1992] échappe peut-être à ce schéma, mais il est impossible de se prononcer sur ce point avant qu'une climatologie complète des données EPSTAT-Niger ait été réalisée.

#### 4.2. Etapes préalables à une quantification basée sur les données radar

Bien que la forte densité du réseau de pluviographes EPSTAT-Niger permette de calculer des lames d'eau avec une précision correcte pour la plupart des applications hydrologiques, la donnée radar peut fournir une information complémentaire précieuse pour les petites surfaces (inférieures à 50 km<sup>2</sup>). En dehors des questions d'estimation des précipitations au sens strict le radar a également un potentiel en matière de modélisation spatio-temporelle des précipitations, comme cela sera évoqué plus loin. Dans tous les cas, l'utilisation de ces données nécessitent néanmoins un étalonnage soigné au préalable.

Le site de Niamey est a priori très favorable à la mesure des précipitations par radar, du fait de l'absence de bande brillante aux altitudes de mesure et d'un relief très peu marqué. Malgré ces conditions favorables, deux sources d'erreur majeures demeurent: i) l'instabilité de la chaîne de réception qui entraîne des variations d'étalonnage d'une acquisition à l'autre; ii) l'atténuation du signal, non négligeable du fait de la longueur d'onde utilisée (5,4 cm) et de l'intensité des précipitations observées. La difficulté réside dans le fait que ces deux sources d'erreurs interagissent comme l'ont confirmé nos études.

Tout d'abord, un recalage de la chaîne de réception a été effectué en se basant sur les échos de sol, renvoyés essentiellement par les lobes secondaires du faisceau radar et bien visibles sur les images de la figure 8, à l'intérieur de la couronne de 20 km. Cette procédure a confirmé la bonne qualité des données acquises en 1992 et 1993, le niveau des échos de sol variant peu d'un événement à l'autre, par contraste avec celles de 1990 et



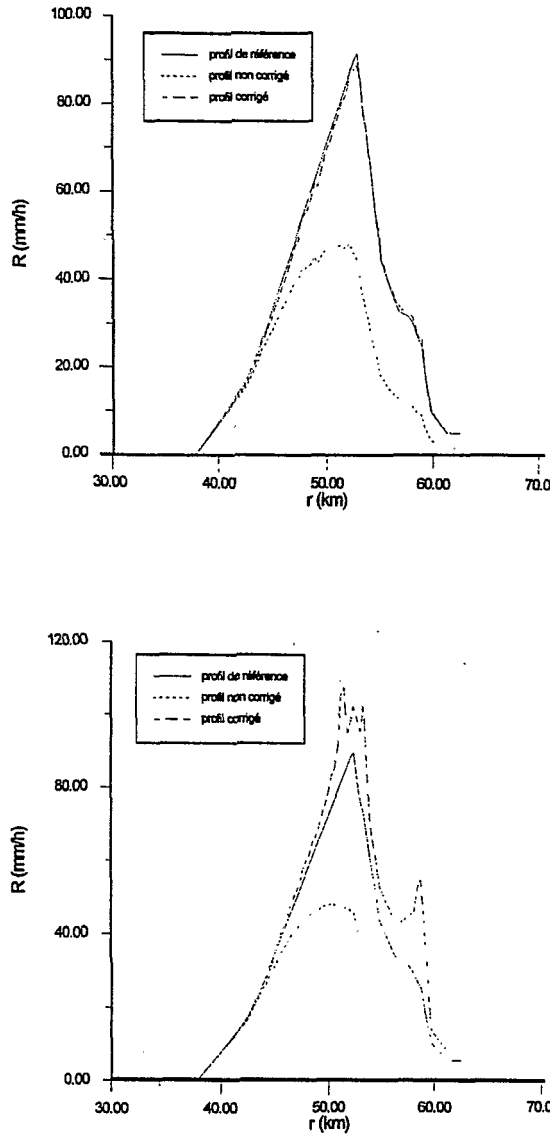


Figure 5. Simulation de l'atténuation du signal d'un radar bande C à travers un hétéogramme caractéristique d'une ligne de grains sahélienne. En partant d'un hétéogramme connu a priori, on simule le hétéogramme vu par le radar, auquel on applique ensuite un algorithme de correction récursif de type Hitschfeld-Bordan. Dans le premier cas l'algorithme converge, la correction est possible et le hétéogramme corrigé est assez proche du hétéogramme vrai. Dans le second cas il diverge et crée des déformations importantes par rapport à la réalité.

1991, pour lesquelles les échos de sol sont d'un niveau moyen de 24 db inférieur et varient fortement [Taupin et al., 1993b; Lecocq, 1994]. Si l'étude des échos de sol permet d'analyser la qualité des données et de recalculer toutes les acquisitions à un niveau comparable, elle ne constitue en aucune manière un étalonnage du radar, faute de référence à une grandeur de réflectivité connue a priori. Après avoir montré que les méthodes traditionnelles d'étalonnage par comparaison directe des valeurs radar et des valeurs sol étaient très influencées par le choix de l'algorithme d'interpolation des données pluviométriques ponctuelles, et imprécises du fait de la non correction d'atténuation, Lecocq et al. [1994] proposent une méthode qui permet d'identifier séparément la constante d'étalonnage, d'une part, et la correction d'atténuation d'autre part. En s'appuyant sur

l'expression de l'atténuation totale  $L^2(r)$  sur le trajet radar-cible de l'onde :

$$L^2(r) = \exp\left(-0,46 \int_0^r K(r) dr\right) \quad (3)$$

où  $K(r)$  est le taux d'atténuation et  $r$  la distance au radar, on montre que le logarithme du rapport entre la précipitation vraie ( $P_v$ ) et la précipitation déduite du signal radar atténué ( $P_a$ ) est une fonction linéaire de la distance au radar :

$$\log \frac{Z_v(r)}{Z_a(r)} = b \cdot \log \frac{P_v(r)}{P_a(r)} = K_1 r + K_2 \quad (4)$$

$Z_v$  et  $Z_a$  étant les réflectivités vraie et apparente. Pour  $r = 0$ , il n'y a pas d'atténuation et la constante  $K_2$  peut donc être traitée comme une constante d'étalonnage. Les données étant acquises en dbZ ( $z = 10 \cdot \log Z$ ), on exprime la constante d'étalonnage comme le nombre de dbZ à ajouter ou enlever pour passer du signal mesuré au signal étalonné, soit :

$$c = z_v - z_a = 10K_2 = 10 \left( b \cdot \log \frac{P_v}{P_a} (r=0) \right) \quad (5)$$

Pour être mise en oeuvre cette méthode requiert un alignement de pluviographes suffisamment rapprochés les uns des autres et dans l'axe d'une radiale radar. Le dispositif ARCOL offrant une telle configuration, Lecocq et al. [1994] ont appliqué la méthode à 6 SCM de 1993, ce qui a permis de montrer que l'étalonnage de la chaîne de réception surestimait le signal reçu d'une valeur de 1 à 3 dbZ selon les événements considérés, et de corriger les données en conséquence.

Une fois le signal de retour ainsi réajusté, on peut procéder à une étude de l'atténuation. Comme le souligne Sauvageot [1982], "les erreurs dues à l'atténuation pour une mesure de précipitation par rétrodiffusion...entraînent des incertitudes excessives sur les mesures". Ceci est particulièrement vrai en bande X (3 cm), alors qu'en bande S (10 cm) l'atténuation ne constitue plus un problème majeur. La bande C est une configuration intermédiaire pour laquelle une analyse soignée doit être réalisée au cas par cas. En ce qui concerne EPSAT-Niger, un simulateur développé au LTHE [Delrieu et al., 1992] a permis de montrer que pour un profil type de précipitation au travers d'une ligne de grains, l'algorithme récursif d'Hitschfeld et Bordan [1954] était utilisable sous certaines conditions (Figure 5). En se basant sur le résultat de ces simulations, l'algorithme de HB a été mis en oeuvre pour corriger les effets d'atténuation sur les veilles radar de 1993 [Benichou et al., 1995]. L'exemple de la figure 6 montre l'intérêt du travail préliminaire d'étalonnage. En effet, en l'absence d'étalonnage il est impossible de corriger l'image brute car, rapidement, l'algorithme de HB diverge (zones blanches sur l'image non calibrée et corrigée là où il y a des échos sur l'image brute). En effectuant une remise à niveau de -2.8 dbZ, calculée par la méthode décrite précédemment, on obtient une image étalonnée et corrigée des effets d'atténuation globalement semblable à l'image brute, mais avec une différence sensible sur les lames d'eau estimées (5,2 mm/h pour l'image brute contre 4,2 mm/h pour l'image calibrée et corrigée sur tout le degré carré, soit des valeurs de respectivement 25 et 20 mm/h environ si on se limite à la zone pluvieuse).

S'il apparaît que l'essentiel des images radar des campagnes 1992 et 1993 peuvent être corrigées des effets d'atténuation, deux

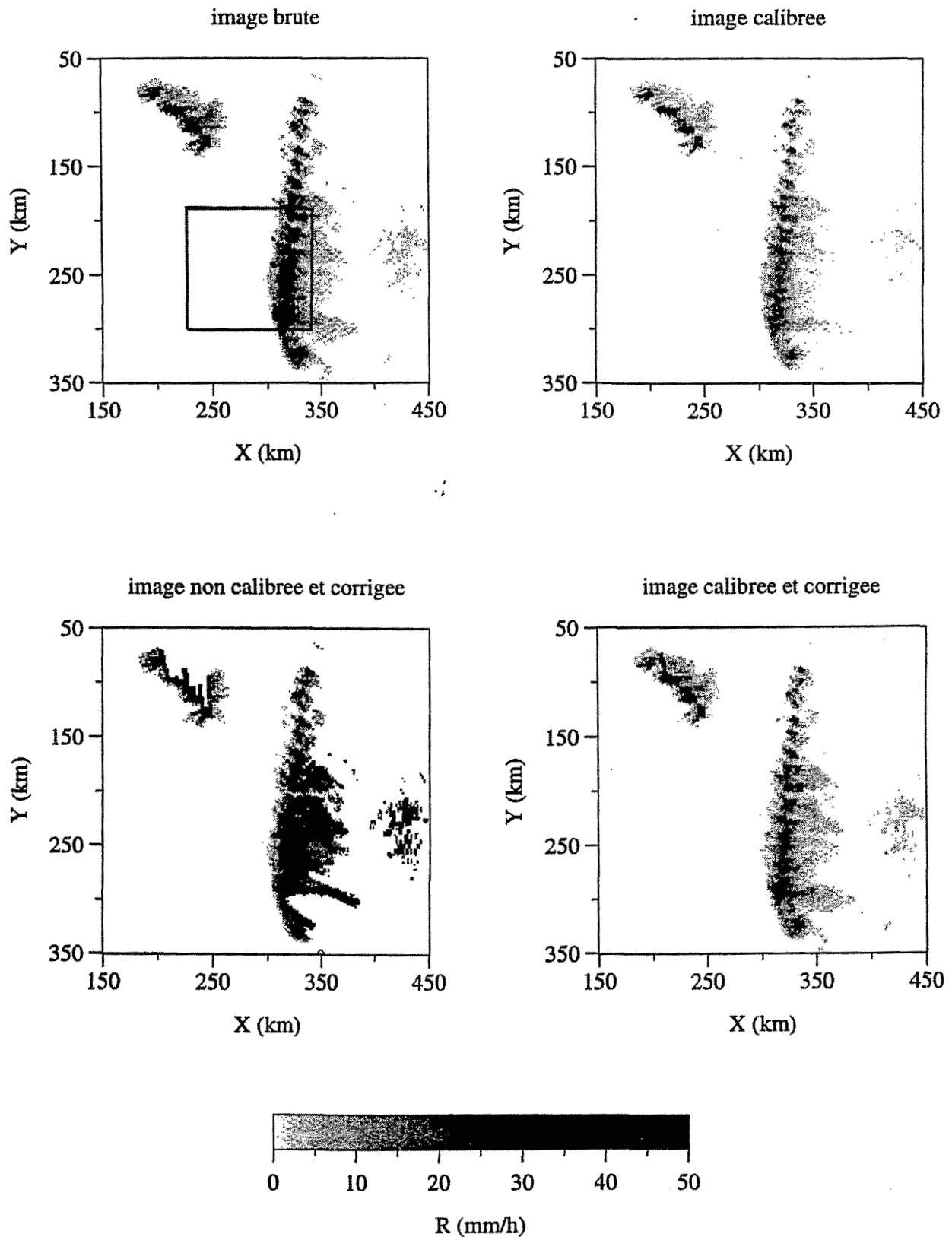


Figure 6. Image radar de la ligne de grains du 17 août 1993 à 21:10 UTC. Le degré carré de Niamey est figuré sur la première image. La calibration est de  $-2,8$  dbz ("image calibrée"). La correction d'atténuation sans calibration ("image non calibrée et corrigée") se traduit par des divergences de l'algorithme de correction qui produisent des zones dépourvues d'échos (correction impossible à effectuer), alors qu'après calibration la correction d'atténuation est possible. Valeurs moyennes estimées sur le degré carré : image brute =  $5,2$  mm/h; image calibrée et atténuée =  $3,1$  mm/h; image non calibrée et corrigée =  $11,2$  mm/h; image calibrée et corrigée =  $4,2$  mm/h. Correction d'atténuation par la relation  $K = 2 \times 10^{-3} R^{1,15}$ , et transformation en taux de pluie par la relation  $Z = 411 R^{0,33}$ .

points doivent néanmoins être soulignés : 1) on se situe à la limite de la divergence des algorithmes récursifs de type Hirschfeld-Bordan et toute erreur, même minime, sur

l'étalonnage peut déboucher sur une incapacité à corriger l'atténuation; 2) il existe des situations où un radar bande C effectuant des mesures dans l'axe de déplacement d'une ligne de



## 08/08/1993 Site ARCOL

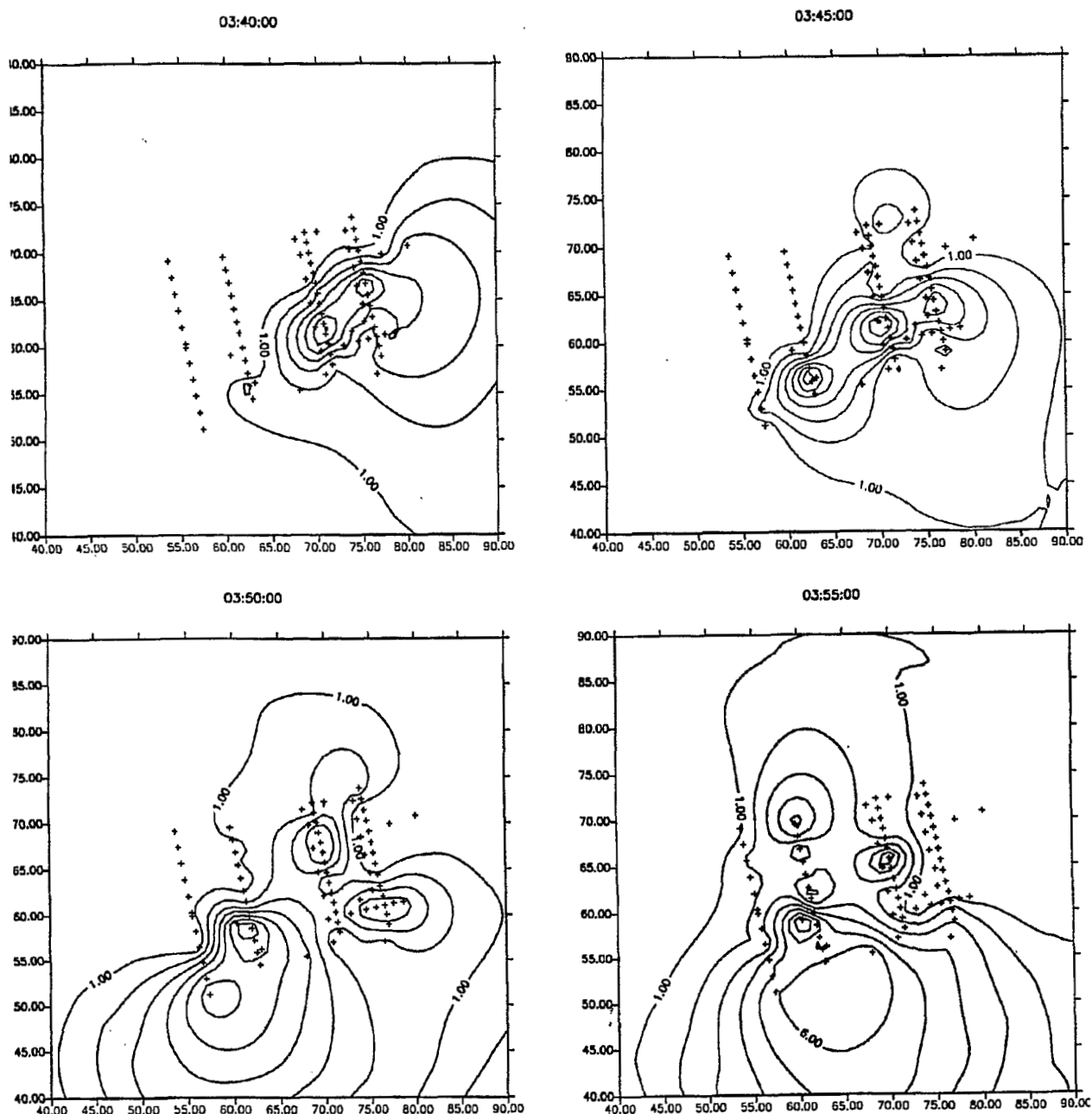


Figure 7. Structure interne d'un système convectif, vue par le réseau spécifiquement mis en place pour 1993. Malgré le cumul sur 5 minutes, les cellules sont bien visibles là où existent des alignements de stations parallèles au front convectif. On remarquera que partout où le réseau de pluviographes est moins dense, et bien qu'il existe des stations de bordure qui n'apparaissent pas ici, l'algorithme d'interpolation crée des dômes d'une étendue irréaliste par comparaison avec ce qui est observé dans la zone d'instrumentation dense. Espacement des isohyètes : 1 mm.

grains et en avant de celle-ci est trop fortement atténué au travers du front convectif pour que les données obtenues puissent ensuite être corrigées de l'atténuation par un algorithme récursif classique. Ceci constitue une limite à l'utilisation des radars bande C pour étudier les précipitations tropicales, ou du moins impose des précautions lors du traitement des données.

#### 4.3. Validation d'algorithmes satellitaires

Les données EPSAT-Niger permettent de calculer des vérités sol sur de petites surfaces avec une erreur d'estimation inférieure

à 5%. Arnaud *et al.* [1994] ont pu ainsi tester des méthodes d'estimation de pluie par satellite sur des surfaces allant du pixel METEOSAT ( $5 \times 5 \text{ km}^2$ ) au degré carré, opération impossible avec les données des réseaux météorologiques nationaux. Jobard *et Desbois* [1992] ont également tiré parti de la résolution des données de Niamey pour étudier la sensibilité des algorithmes satellitaires aux effets d'intégration spatiale et temporelle. Les données EPSAT-Niger ont par ailleurs été utilisées par Arnaud *et al.* [1992] pour mettre au point une méthode de suivi automatique et de caractérisation du cycle de vie des systèmes convectifs sahéliens.

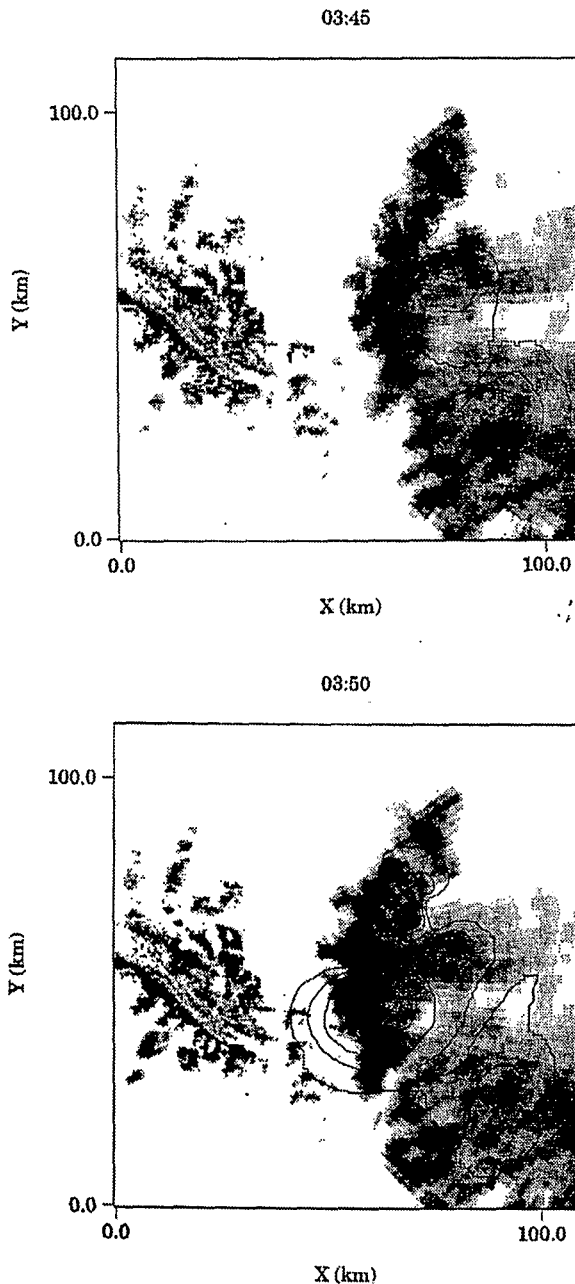


Figure 8. Superposition des images radar et des isohyètes calculées à partir du réseau sol pour deux images de la ligne de grains du 8 août 1993. On remarque une bonne concordance générale entre images sol et radar dans la zone d'instrumentation intensive. Ailleurs (partie Sud de l'image) le réseau sol n'a détecté aucune des cellules vues par le radar. La donnée radar est instantanée, alors que la donnée sol est intégrée sur 5 minutes. Espacement des isohyètes : 1 mm sur 5 minutes, soit 12 mm/h.

##### 5. IMPACT HYDROLOGIQUE DES STRUCTURES CONVECTIVES

On a vu qu'il est possible d'identifier sur le variogramme des cumuls saisonniers de la figure 3 la trace de structures correspondant à la variabilité interne aux événements pluvieux, et ce alors que 47 événements ont été observés en 1991. Ce fait est assez remarquable. Il traduit une certaine persistance des structures spatiales au travers des changements d'échelle

temporels et amène à s'interroger sur le meilleur moyen d'en rendre compte. Les données d'EPSAT-Niger permettent d'espérer compléter le schéma de fonctionnement des lignes de grains d'Afrique de l'Ouest tel que proposé par *Chong et al.* [1987] à la suite de COPT-81, par une étude consistante de l'impact hydrologique des structures convectives qui les composent. On a mentionné plus haut certaines propriétés statistiques établies pour le degré carré de Niamey : stabilité des distributions d'intensité entre années sèches et années plus humides, et stabilité également de la distribution des cumuls sur les événements pluvieux. Ces résultats d'ordre climatologique doivent maintenant être complétés par une modélisation des champs pluviométriques.

Depuis les travaux précurseurs d'*Amorochio et Brandstelter* [1967], puis *Austin et Houze* [1972], identifiant le haut degré de hiérarchisation et d'agrégation des structures précipitantes au sein des systèmes convectifs, de nombreux modèles, dont on trouvera une revue très complète dans *Foufoula-Georgiou et Georgakakos* [1991], ont été proposés pour représenter les champs pluviométriques associés aux Systèmes Convectifs de Mésos-échelle. Ces modèles reposent sur les concepts de cellules convectives, amas et bandes, dont les évolutions spatio-temporelles sont explicitées d'une manière plus ou moins complexe. Deux choses sont à noter : d'une part, les procédures d'ajustement des paramètres, permettant de caler les modèles sur des champs observés, n'existent souvent pas, les auteurs se contentant de prendre des valeurs moyennes proposées dans la littérature pour la taille et la durée de vie des cellules par exemple. D'autre part, jusqu'à une époque récente, les seules données adaptées à une analyse fine de la structure des champs pluviométriques associés aux SCM de la zone tropicale étaient celles de GATE, qui concernaient l'océan. Sur le continent africain, les données du réseau dense de pluviomètres de Ouagadougou ont permis à *Hubert et Carbonnel* [1989] de tester l'approche fractale pour modéliser l'occurrence de pluie, mais l'absence de données à petit pas de temps (pluviographes ou radar) limite les résultats obtenus.

Les données EPSAT-Niger comblent une grande partie des lacunes de GATE et du réseau de Ouagadougou : elles concernent une région continentale, elles associent données sol et données radar, elles s'étalent sur 4 ans, ce qui devrait permettre d'obtenir des climatologies significatives sur les structures convectives.

En fait, une des principales difficultés à résoudre pour caler les modèles conceptuels de précipitation est l'identification sur les systèmes précipitants observés des structures qui constituent ces modèles. A l'expérience, il s'est avéré que les données sol du réseau à maille régulière implanté entre 1990 et 1992 ne permettait pas, par exemple, de détecter les cellules pluvieuses. Parallèlement, l'examen des données radar et les problèmes pressentis pour les étalonner, incitaient à mettre au point pour 1993 un dispositif sol visant à fournir une validation quantitative aux structures éventuellement détectées par radar. L'efficacité de ce dispositif est illustrée par la figure 7 sur laquelle on voit pour 4 pas de temps successifs de 5 minutes le déplacement des structures pluvieuses associées à la ligne de grains du 8 août 1993, telles qu'observées par le réseau sol. La comparaison avec les images radar (Figure 8) montre que les données sol et radar sont en bon accord uniquement là où le réseau est très dense et organisé en transects parallèles à l'axe du front convectif. Un obstacle de taille pour la comparaison des images radar et sol et le calcul de climatologies susceptibles de servir au calage des modèles, vient de ce que la mesure radar est un "instantané" intégré sur un volume, alors que le pluviographe fournit une mesure ponctuelle intégrée dans le temps (cf. section 2.2). Un effort d'analyse doit donc être fait pour préciser ce qu'est une

cellule convective en terme de précipitation et comment les mesures intégrées réalisées par les différents capteurs permettent d'en calculer les caractéristiques, ne serait-ce que sous une forme statistique.

Un autre concept qui mérite d'être précisé est celui d'événement pluvieux. Hormis quelques cas simples (la ligne de grains parfaitement formée en est un), il y a souvent ambiguïté entre l'identification qui peut être faite depuis le sol (les capteurs, y compris le radar n'ont qu'une fenêtre de vision limitée) et depuis l'espace (le satellite opère une couverture globale mais il voit les nuages et non les structures précipitantes qui intéressent l'hydrologue). Or, la mise en oeuvre des modèles mentionnés plus haut dans un mode d'analyse, voire d'estimation, présuppose que l'on soit capable de distinguer entre l'intermittence interne aux systèmes pluvieux et la séparation entre deux systèmes. Cette nécessité s'applique également à la mise en oeuvre des méthodes d'estimation par seuils, très en vogue actuellement dans une optique satellitaire (des applications de la méthode des seuils à partir des données d'EPSAT-Niger ont été proposées par Braud *et al.* [1994] pour les champs de pluie horaire et par Sauvageot *et al.* [1995], pour les taux de pluie instantanés). Des critères liés au réseau sol d'EPSAT-Niger ont été proposés par Thauvin [1992] et repris par Lebel *et al.* [1995] pour identifier des événements pluvieux sur des bases d'extension spatiale et non pas seulement en fonction de la forme du hétérogramme à une station donnée. Ces critères sont : 30 % des stations du réseau de base en activité doivent avoir enregistré de la pluie (au moins 2,5 mm), sans qu'il y ait d'arrêt complet des précipitations sur l'ensemble de la zone pour une durée de plus de 30 minutes. Cette définition présente l'avantage d'être objective et facile à mettre en oeuvre. Elle est à l'origine des statistiques présentées dans le tableau 2. Son gros inconvénient est d'être dépendante des moyens et de la fenêtre d'observation. Aussi, paraît-il important de mettre au point une méthode permettant d'identifier tous les événements pluvieux (et pas seulement les mieux structurés qui représentent environ 60 % du total pluviométrique annuel, d'après Lebel *et al.* [1995a]), en se basant sur des critères plus universels que ceux adoptés jusqu'à présent. Il est à noter qu'un travail à paraître montre que l'on peut différencier les systèmes précipitants sahéliens en fonction de la distribution des aires pluvieuses internes, et que cette classification a un impact sur les paramètres des modèles à seuil, ce qui renforce l'intérêt d'une identification fiable et reproductible des événements pluvieux.

## 6. BILAN ET PERSPECTIVES

L'expérience EPSAT-Niger a permis de réunir un jeu de données unique en son genre sur les systèmes précipitants sahéliens, associant les données d'un radar bande C et d'un réseau dense d'une centaine de pluviographes couvrant une superficie de plus de 10.000 km<sup>2</sup> pendant une durée de quatre ans. Avec une maille de 12,5 km de côté environ, le réseau de pluviographes permet de calculer des cumuls pluviométriques sur la durée d'un événement, avec une erreur d'estimation moyenne inférieure à 15% pour les surfaces allant de 1000 à 10.000 km<sup>2</sup>. Cette erreur croît jusqu'à 30 % pour des surfaces de l'ordre de 100 km<sup>2</sup>. Un résultat important dans cette première étape d'exploitation des données, est que l'erreur commise sur des cumuls décennaux, mensuels, voire annuels, est du même ordre que celle concernant les cumuls par événement. Les données pluviographiques permettent également des études de distribution spatio-temporelle pour des échelles de temps égales ou inférieures à celles de l'événement pluvieux, fournissant ainsi des informations d'ordre climatologique sur le nombre d'événements observés au cours d'une saison des pluies et, surtout, sur l'apport

pluviométrique moyen de tels événements. La distribution du cumul sur l'événement en un point semble être pratiquement exponentielle, très stable d'une saison à l'autre, avec une moyenne et un écart-type de l'ordre de 15 mm. La distribution spatio-temporelle est, elle, très intermittente. Plus de la moitié du cumul saisonnier en un point tombe en moins de 5 heures, et des écarts de 100% entre des points séparés d'une dizaine de km ont été observés. De tels écarts, admis jusqu'à présent à l'échelle de l'événement, n'avaient jamais été mesurés pour des pluies annuelles. Ils se comprennent assez bien lorsqu'on sait que 50% environ de ce total annuel tombe avec des intensités dépassant 35 mm/h, et 35% avec des intensités dépassant 50 mm/h.

Cette forte variabilité spatiale, caractéristique à toutes les échelles de temps, implique de prendre en compte les structures convectives constitutives des systèmes précipitants sahéliens pour modéliser les champs pluviométriques, même lorsqu'on cumule plusieurs événements. Les données radar peuvent aider à cela, à condition d'avoir été au préalable correctement étalonnées. Un important travail méthodologique a donc été entrepris dans cette direction. On a pu montrer en particulier qu'en bande C, l'atténuation du signal radar à travers les lignes de grains était très significative et devait être soigneusement corrigée pour pouvoir utiliser quantitativement les données d'EPSAT-Niger.

Les efforts des équipes qui exploitent les données d'EPSAT-Niger à des fins hydrologiques vont maintenant porter sur le développement d'un modèle de champs pluviométriques prenant en compte la dynamique propre aux systèmes convectifs de méso-échelle sahéliens. Pour ce faire, une climatologie plus exhaustive que celle disponible jusqu'à présent sera réalisée à partir des données sol et les données radar seront utilisées, ce qui était impossible pour ce type d'application avant leur étalonnage. Parallèlement, on cherchera à préciser les implications de l'intermittence des champs de pluie pour la mesure satellitaire, associée ou non à une vérité sol (pluviographes et/ou radar). Les données d'EPSAT-Niger pourraient notamment servir à simuler les conséquences de l'échantillonnage réalisé par les missions spatiales TRMM et TROPQUES et à la validation des algorithmes d'estimation qu'il est prévu d'implanter dans ce cadre.

## REFERENCES

- Amorcho J. and A. Brandstetter, The representation of storm precipitation fields near ground level, *J. Geophys. Res.*, 72, 1145-1164, 1967
- Arnaud Y., M. Desbois, J. Maizi, Automatic tracking and characterization of African convective systems on Meteosat pictures, *J. of Appl. Meteor.*, 31, 443-453, 1992
- Arnaud, Y., J.D. Taupin et H. Laurent, Validation d'estimations de précipitation par satellite avec le réseau dense d'EPSAT-Niger, In Hoepffner, M., T. Lebel, B. Monteny (Editeurs), *Interactions Surface Continentale/ Atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel*, (Actes des 10<sup>ème</sup> journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, septembre 1994), ORSTOM, Paris, 1994.
- Austin P.M. and R.A. Houze, Analysis of the structure of precipitation patterns in New England, *J. of Appl. Meteor.*, 11, 926-935, 1972
- Braud I., P. Crochet P., J.D. Creutin, A method for estimating mean areal rainfall using moving trend functions of the intensities, *J. of Appl. Meteor.*, 33(12), 1551-1561, 1994.
- Benichou, H., J. Lecocq and G. Delrieu, Rainfall climatology in tropical Africa using a C-band Weather radar: (1) the attenuation problem, *accepté pour présentation à la 3<sup>ème</sup> conférence "Hydrological applications of weather radar", Sao Paulo, Brazil, August 20-23, 1995.*
- Chong M., P. Amayenc, G. Scialom, J. Testud, A tropical squall line observed during the COPT 81 experiment in west Africa. Part I: Kinematic structure inferred from dual-doppler radar data, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 670-694, 1987.
- Delrieu G., J.D. Creutin and H. Andrieu, Analysis of various algorithms for correcting attenuation effects, *Paper L1, Actes de la 2<sup>ème</sup> conférence "Hydrological applications of weather radar",*

- Hanovre, 7-10 septembre, 1992.
- Desbois M., TROPIQUES, a small satellite for the study of the variability of water and energy cycles in the intertropical band, *Paper 2317-14, Proceedings of the European Symposium on Satellite Remote Sensing, Rome, 26-30 September 1994, SPIE-EUROPTO series*, 1994.
- Foufoula-Georgiou E. and K. P. Georgakakos, Hydrologic advances in space-time precipitation modeling and forecasting, in D.S. Bowles and P.E. O'Connell (Eds.), *Recent advances in the modeling of hydrologic systems, Kluwer Academic Publishers*, 47-65, 1991.
- Goutorbe, J.P., T. Lebel, A. Tinga, P. Bessemoulin, J. Brouwer, H. Dolman, E.T. Engman, J.H.C. Gash, M. Hoepffner, P. Kabat, Y.H. Kerr, B. Monteny, S. Prince, F. Saïd, P. Sellers, J. Wallace, HAPEX-SAHEL: a large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics, *Annales Geophysicae*, 12, 53-64, 1994.
- Hitschfeld W. and J. Bordan, Errors inherent in radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths, *J. Meteor.*, 11, 58-67, 1954.
- Hubert P. et J.P. Carbonnel, Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, 95, 165-183, 1987.
- Hubert P. et J.P. Carbonnel, Caractérisation fractale de la variabilité et de l'anisotropie des précipitations intertropicales, *C. R. Acad. Sci., Paris*, 307, série II, 31-36, 1988.
- Hubert P. et J.P. Carbonnel, Dimensions fractales de l'occurrence de pluie en climat soudano-sahélien, *Hydrol. Continent.*, 4, 3-10, 1989.
- Jobard I., Desbois M., Remote sensing of rainfall over tropical Africa using Meteosat infrared imagery: sensitivity to time and space averaging, *Int. J. Remote sensing*, 13, (14), 2683-2700, 1992.
- Lamb P.J., Subsaharan rainfall update for 1982, Continued drought, *J. Clim.*, 3, 419-422, 1983.
- Lebel T., G. Bastin, C. Obled and D. Creutin, On the accuracy of areal rainfall estimation: a case study, *Water Resources Research*, 23(11), 2123-2138, 1987.
- Lebel T., H. Sauvageot, M. Hoepffner, M. Desbois, B. Guillot and P. Hubert, Rainfall estimation in the Sahel: the EPSAT-NIGER experiment, *Hydrol. Sci. J.* 37(3), 201-215, 1992.
- Lebel T., J.D. Taupin and M. Gréard, Rainfall monitoring: The EPSAT-Niger set-up and its use for Hapex-Sahel, In : Lebel, T. (Editor), "Hydrologie et Météorologie de Mésos-Echelle dans HAPEX-Sahel : Dispositif de Mesures au Sol et Premiers Résultats", 43-82, ORSTOM Ed., 1995a.
- Lebel T., J.D. Taupin and L. Le Barbé, Space-time fluctuations of rainfall during HAPEX-Sahel, *Soumis à J. Hydrol.*, 1995b.
- Lebel, T. and L. Le Barbé, Rainfall climatology of the Central Sahel during the years 1950-1990, *Soumis à J. Hydrol.*, 1995.
- Lecocq J., N. D'Amato, F. Cazenave et T. Lebel, Résultats préliminaires de la campagne EPSAT-Niger pour la calibration d'un radar bande C, In Hoepffner, M., T. Lebel, B. Monteny (Editeurs), *Interactions Surface Continentale/ Atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel, Actes des 10<sup>ème</sup> journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, septembre 1994, ORSTOM Ed., Paris*, 1995.
- Nicholson S.E., Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 2191-2208, 1981.
- Sauvageot H., Radarmétéorologie, *Eyrolles*, 296 p, 1982
- Sauvageot H. et G. Despaux, SANAGA, Un système d'acquisition numérique et de visualisation de données radar pour la validation des estimations satellitaires de précipitation, *Veille climatique satellitaire*, 31, 51-55, 1990.
- Sauvageot, H., S. Ramos-Buarque, L. Bourrel, P. Bationo, M.S. Diop, R.S. Tenorio, L'estimation des précipitations par radar et infrarouge satellitaire à partir d'intégrales d'aires, In Hoepffner, M., T. Lebel, B. Monteny (Editeurs), *Interactions Surface Continentale/ Atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel. (Actes des 10<sup>ème</sup> journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, septembre 1994)*. ORSTOM, Paris, 1995.
- Simpson, J., R.F. Adler and G.R. North, A proposed Tropical Measuring Mission (TRMM) satellite, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 69, 278-295, 1988.
- Taupin, J.D., A. Amani and T. Lebel, 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, IAHS Publ. N° 212*, pp 593 - 602, 1993a.
- Taupin J.D., Lebel T., Cazenave F., Greard M., Kong J., Lecocq J., Adamson M., D'Amato N., Ben Mohamed A., EPSAT-NIGER, campagne 1992, *Rapport ORSTOM-DMN*, 98 p, 1993b.
- Thauvin V., 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 de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier*, 229 p, 1992.
- Valero T., BADINAGE, Banque de Données Intégrée pour l'Analyse des Grains et Evénements pluvieux; *Manuel de l'utilisateur, ORSTOM*. 15 p, 1992.

7/29 Bondy 2

COMITÉ NATIONAL FRANÇAIS DE GÉODÉSIE ET DE GÉOPHYSIQUE

# RAPPORT QUADRIENNAL 1991-1994

*XXIème Assemblée Générale  
de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale  
Boulder (Colorado) 2-14 juillet 1995*

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 43127

Cote : B ex 1

Publié avec le concours de l'Académie des Sciences de Paris

