

IV.6 – APPORT DE LA TELEDETECTION A LA CONNAISSANCE DE LA PLUVIOMETRIE DU BASSIN D'UN FLEUVE SAHELien : LE SENEGAL

IV.6 – CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING TO PLUVIOMETRY IN A SAHELIAN RIVER CATCHMENT : THE SENEGAL

Par M. CARN

INTRODUCTION

L'étude et les cartes présentées ci-dessous relèvent d'une double problématique. Depuis 1985 les équipes et laboratoires associés au sein du réseau EPSAT (Estimation des Précipitations par SATellite) (Cadet, Guillot, 1991), ont développé des procédures d'estimation par satellite des précipitations en Afrique sahélienne, pour des besoins agrométéorologiques. De son côté, le volet « étude hydrogéochemique » du programme EQUESEN (Environnement et QUalité des Eaux du fleuve SENégal) a de son côté pour objectif d'approcher le plus précisément possible les différents termes qui interviennent dans l'équation du bilan des entrées/sorties de matières sur le bassin. Pour cela, une bonne mesure des précipitations est essentielle.

Situé entre les régions tropicales humides et les confins du Sahara (de 9 à 17°30 N), le bassin du Sénégal présente une grande diversité climatique. Selon Leroux (1980) quatre domaines caractérisés par la pluviométrie annuelle, la température moyenne annuelle, le taux d'humidité relative et la longueur de la saison des pluies se disposent en bandes latitudinales sub-parallèles (fig. 1).

1. LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES PRÉCIPITATIONS EN AFRIQUE DE L'OUEST

Les données satellitaires semblent d'autant plus nécessaires que le nombre de postes pluviométriques est faible au regard de la variabilité spatio-temporelle des précipitations. Une analyse des corrélations inter-postes, pour la période 1948-1978, a montré l'existence de régions où il existe une bonne cohérence spatiale (Janicot, 1992) ou, en d'autres termes, de régions qui présentent des bilans pluviométriques de même signe, par rapport aux valeurs normalisées (fig. 2).

Une première coupure apparaît de part et d'autre du parallèle 10°N, mais on constate également l'existence d'une structure particulière à l'ouest de 6°W qui correspond à une différence de comportement entre la façade atlantique et le Sahel « continental ». On notera que le bassin du Sénégal est inclus dans la zone 1, dont le degré de cohérence interne est relativement fort.

La variabilité spatiale de la pluviosité est également forte aux échelles locales. Nous avons pu l'estimer pour la région de Richard Toll, dans la basse vallée du fleuve, grâce aux données de la Compagnie Sucrerie Sénégalaise (CSS), qui a mesuré pendant quatre ans les pluies journalières en dix postes pluviométriques répartis de façon homogène sur une superficie de l'ordre de 10 pixels Météosat. La grille incluse dans la figure 3 représente ces pixels. On notera que le gradient maximum de pluviométrie saisonnière entre pixels était en 1986 de 90 mm pour une pluviométrie moyenne de 196 mm.

INTRODUCTION

This study and the charts shown below indicate a double problematic. Since 1985, the teams and laboratories working together at the heart of the EPSAT project (Estimation of the precipitations by satellite) (L.D. CADET, B. GUILLOT, 1991), have developed satellite procedures to estimate rainfall in Sahelian Africa, for agrometeorological requirements. The principal objective of the « hydro-geochemical study » phase of the EQUESEN (Environnement et QUalité des Eaux du fleuve SENégal) programme is to estimate, as precisely as possible, the different terms which intervene in the budget of the entries/outputs of materials in the catchment. In order to achieve this, rainfall must be accurately measured.

The river Senegal catchment is situated between the wet tropical regions and the Sahara (from 9° to 17°30 N). Great climatic diversity occurs here. According to LEROUX (1980), four domains, defined by their annual pluviometry, their annual average temperature, their relative annual humidity rate and the length of their rainy season, are laid out in almost parallel latitudinal belts (fig. 1).

1. THE SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF RAINFALL IN WEST AFRICA

Satellite data appears to become all the more necessary as the density of pluviometric posts lessens, as far as the spatiotemporal variability of rainfall is concerned. Analysis of pluviometric correlations between posts, for the 1948-1978 period, has shown that there are regions which have good spatial coherence (Janicot, 1992) or in other words, these regions present annual pluviometric budgets of the same sign, in relation to standardized values (fig. 2).

A first cut appeared on either side of the 10°N parallel, but there was also an unusual structure, west of 6°W, which corresponds to a difference in behaviour between the Atlantic front and the « continental » Sahel. It can also be noted that the river Senegal catchment is entirely within zone 1, which has a relatively high degree of internal coherence.

The spatial variability of rainfall is also high on small scales. We were able to estimate the spatial variability for the Richard Toll region, in the lower river valley, thanks to the Compagnie Sucrerie Sénégalaise (C.S.S.), which measured daily rainfall over a 4 year period at 10 rainfall posts, evenly spread over an area of about 10 Meteosat pixels. The grid shown in figure 3 represents these pixels. It can be noted that maximum gradient of seasonal rainfall between pixels was 90 mm in 1986, for an average pluviometry of 196 mm.

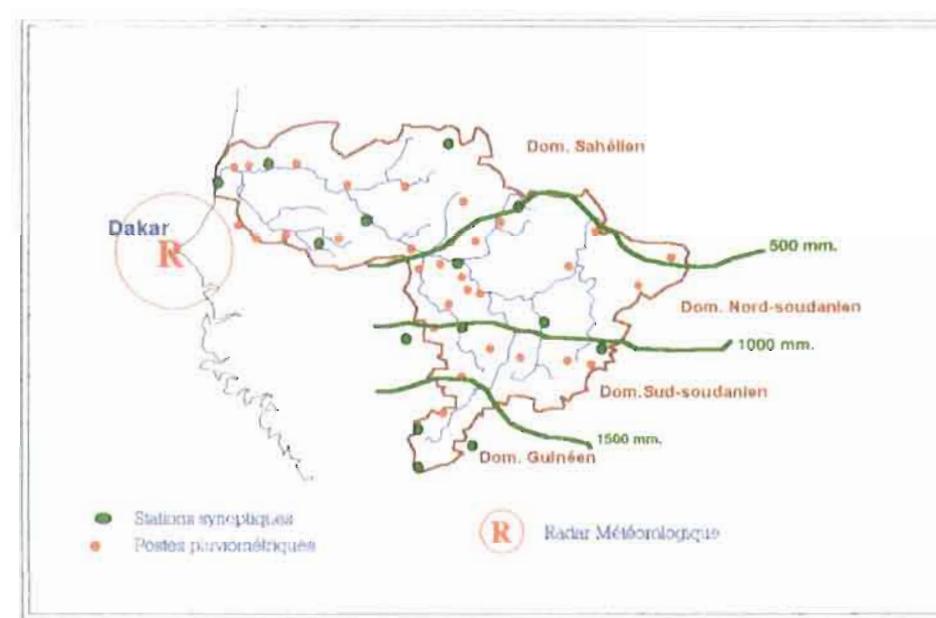


Figure 1. – SITUATION ET ÉQUIPEMENT PLUVIOMÉTRIQUE DU BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL.
SITUATION AND PLUVIOMETRIC EQUIPMENT OF THE R. SENEGAL CATCHMENT.

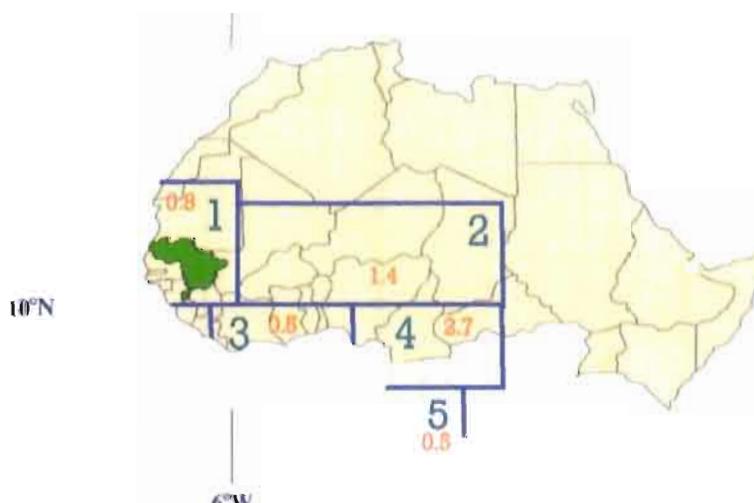


Figure 2. – SYNTHÈSE DE LA RÉGIONALISATION ANNUELLE DE LA PLUVIOMÉTRIE SELON JANICOT (1992).
SYNTHESIS OF THE ANNUAL REGIONALISATION OF THE PLUVIOMETRY ACCORDING TO JANICOT (1992).

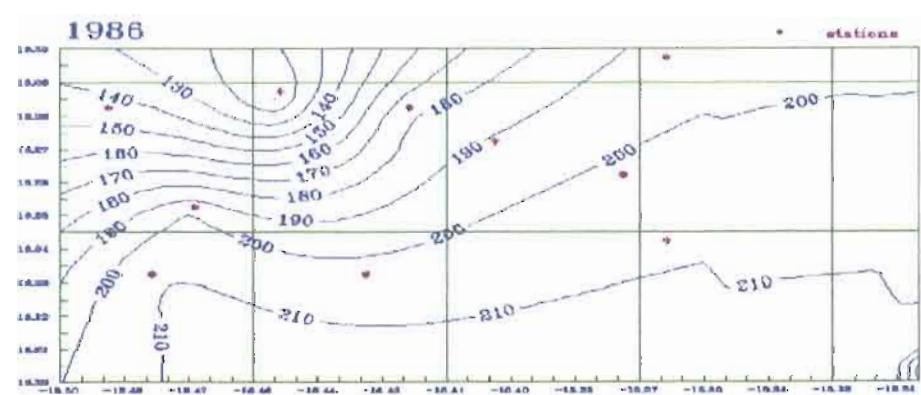


Figure 3. – LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PLUVIOMÉTRIE SUR LA ZONE DES CASIERS DE LA C.S.S. POUR LA SAISON 1986.
THE SPATIAL VARIABILITY OF PLUVIOMETRY OVER THE C.S.S. ZONE OF AGRICULTURAL PARCELS FOR THE 1986 SEASON.

2. L'ESTIMATION DES PLUIES PAR SATELLITE

L'imagerie infrarouge thermique Météosat fournit à tout moment de la journée une information sur le globe terrestre et permet notamment de classer les différents corps nuageux en fonction de leur développement en altitude. En l'absence de nuages, elle permet en outre de réaliser la cartographie du champ thermique radiatif de la surface et plus particulièrement de repérer la signature en température des pluies au sol, liée à l'humidité instantanée, à l'évaporation et à l'évapotranspiration lors du développement du couvert végétal (Seguin, 1992).

2.1. La méthode EPSAT

Il existe deux voies possibles pour l'estimation des pluies par satellite, selon que l'on étudie la source des pluies (les nuages précipitants, ou nuages froids, distingués par un seuil de température à -40°C) ou la cible (la surface du sol), détectable après le passage des nuages. La méthode EPSAT repose sur une approche originale qui combine cette double paramétrisation des causes et des effets (Carn et al., 1987).

Le couplage de ces deux paramètres permet de compenser, du moins partiellement, les insuffisances et défauts de chacun d'entre eux vis-à-vis de la pluviométrie, qui sont essentiellement dus :

- pour les occurrences de nuages froids à la prise en compte de nuages de glace (cirrus) non précipitants, à la non représentation de pluies produites par des nuages moyens ou bas (plus chauds que -40°C), et à l'inadéquation entre un estimateur échantillonné chaque 30 minutes et une averse qui correspond à un phénomène continu dans le temps (Hubert et al., 1991) ;

- pour le champ thermique de la surface du sol à la non correction des effets atmosphériques.

La température du sol, qui est notamment fonction de l'état du couvert végétal, représente, particulièrement en zone sahélienne, une « mémoire » de la saison des pluies. Ce paramètre est donc vraisemblablement peu influencé par un échantillonnage fragmenté dans le temps et permet de corriger cet effet, qui affecte particulièrement la mesure par les nuages.

2.2. Les indices pluviométriques et l'algorithme.

Notre objectif étant d'obtenir une mesure satisfaisante de la pluie pour des pas de temps de 10 jours à une échelle spatiale fine, nous avons développé la méthode dite des indices pluviométriques afin d'estimer les lames d'eau précipitées sur la région à la résolution du pixel Météosat.

Lors d'un premier traitement, les fréquences d'occurrences de nuages froids (Foc) et la température maximale du sol (Tmax) sont extraites des pixels correspondant aux stations synoptiques dont on connaît la pluviométrie pour la période considérée. On calcule ensuite pour chaque station les indices suivants :

- Indice d'efficacité pluviogénique (PCb) = pluie mesurée/nombre d'occurrences (Cb pour cumulonimbus) ;

- Indice de refroidissement (PvT) = pluie mesurée/Tmax.

L'indice PCb représente l'efficacité en pluie d'une occurrence nuageuse enregistrée en un point à un moment donné (fig. 4a). L'indice PvT rend compte des réactions thermiques de la surface provoquées par les précipitations en un point donné à un moment donné (fig. 4b).

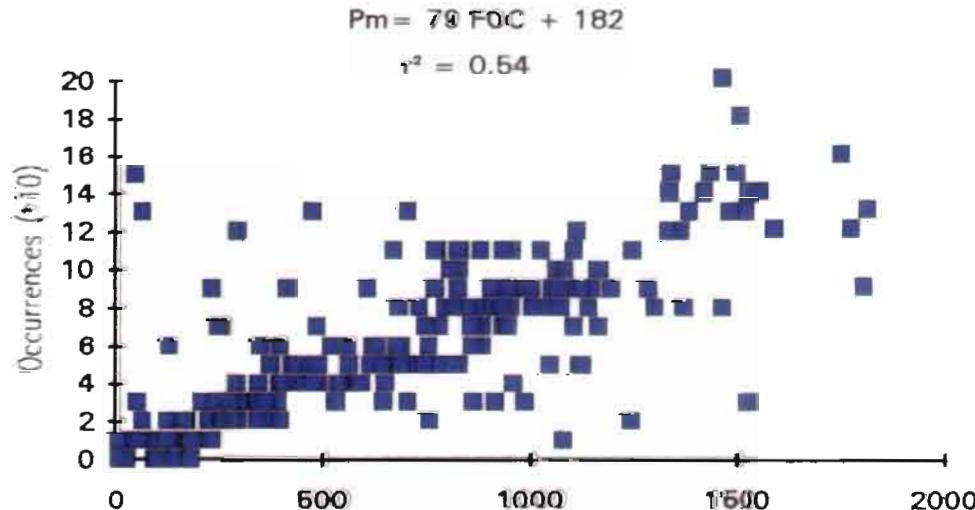


Figure 4a. – RELATION INTERANNUELLE PLUIE/OCCURRENCES DE NUAGES FROIDS (1986-1991).
INTERANNUAL RELATION : RAINFALL/COLD TOP CLOUD OCCURRENCES (1986-1991).

Les champs de PCb et de PvT étendus à la zone concernée, soit PCb_{ch} et PvT_{ch} , sont calculés par traitement géostatistique à partir des indices aux stations. Ils servent à calibrer les images d'occurrences de nuages froids et de température de surface, pour produire deux champs de pluviométrie estimée p_1 et p_2 , qui sont ensuite combinés linéairement selon l'algorithme suivant :

$$Pe = p_1 \cdot (\text{Foc} \cdot \text{PCb}_{\text{ch}}) + p_2 \cdot (\text{Tmax} \cdot \text{PvT}_{\text{ch}})$$

Les coefficients de pondération p_1 et p_2 sont fonction des valeurs des coefficients de corrélation qui relient respectivement la pluie mesurée aux stations synoptiques avec les fréquences d'occurrences de nuages froids et avec les températures radiatives maximales de surface du sol, pour la période considérée.

2. ESTIMATION OF RAINFALL BY SATELLITE

Meteosat Thermal Infra-Red imagery provides at any moment of the day a « thermal chart » of the Earth's globe and enables different cloud formations to be classified as a function of their development level. When no clouds are present, the infra-red channel enables the radiative surface thermal field to be mapped and more particularly, to recognise the thermal signature of ground rainfall linked to instantaneous humidity, evaporation and evapotranspiration when plant cover is developing (Seguin, 1992).

2.1. The EPSAT method

There are two possible ways to estimate rainfall using satellite, according to whether the source of rainfall (precipitating clouds, or cold clouds, characterized by a temperature threshold of -40°C), or the target (ground surface), detectable after the passage of clouds, is studied. The EPSAT method is based on an original approach to the problem, which combines this double parameterization of causes and effects (M. Carn and Al., 1987).

The coupling of both these parameters in the same algorithm enables the inadequacies and lack of relevancy of each parameter with respect to the pluviometry to be at least partially corrected. These are mainly due :

- to non-precipitating cirrus clouds being taken into account in cold cloud estimations, the non-representation of rainfall produced by middle or low level clouds warmer than -40°C , and the inadequation between an estimator sampled every 30 minutes and a shower which corresponds to a phenomenon continuous in time (Hubert and al., 1991) ;

- the problem of the non-correction of atmospheric effects on the ground surface thermal field.

The ground temperature, which is notably a function of the state of plant cover represents, especially in the Sahelian zone, a « memory » of the rainy season. This parameter is therefore likely not to be influenced very much by a sampling procedure which is fractionated in time and enables this effect to be corrected, which particularly has an effect upon the measurement by clouds.

2.2. Pluviometric indexes and the algorithm

Since our objective was to obtain a satisfactory measurement of rainfall on 10-day time intervals, on a detailed spatial scale, we have developed the « pluviometric index » method to estimate precipitated sheets of water over the region at Meteosat pixel resolution.

During preliminary processing, the frequencies of occurrences of cold clouds (Foc) and maximum ground temperature (Tmax) were extracted from the pixels which corresponded to the synoptic stations whose pluviometry was known for the given period. The two following indexes were then computed for each station :

- pluviogenic efficiency index (PCb) = Measured rainfall/Number of occurrences (Cb for cumulonimbus) ;

- cooling index (PvT) = Measured rainfall/Tmax .

The PCb index represents the efficiency in rainfall of a cloudy occurrence, recorded at a point at a given time (fig. 4a). The PvT index takes into account the surface thermal reactions, caused by the precipitations at a point at a given time (fig. 4b).

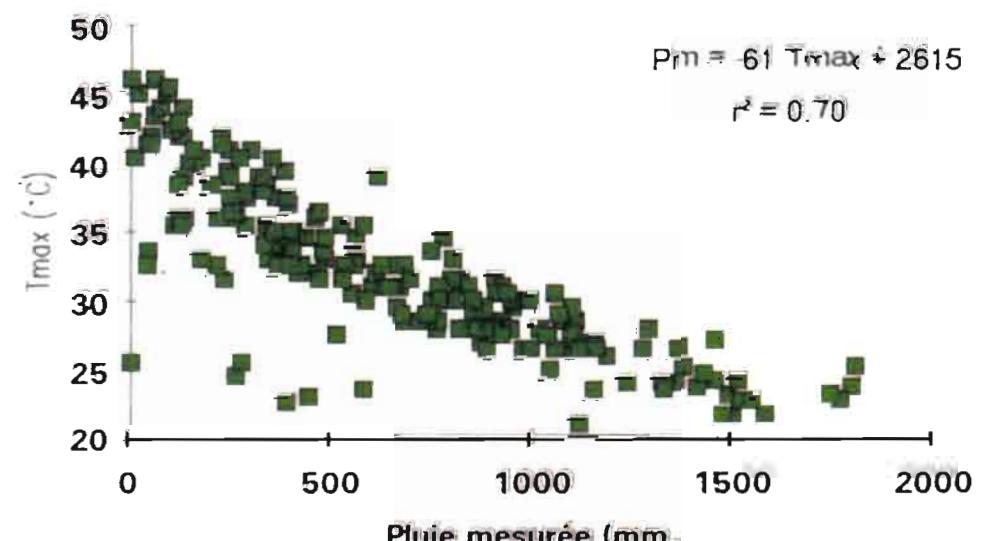


Figure 4b. – RELATION INTERANNUELLE PLUIE/CHAMP THERMIQUE DE SURFACE (1986-1991).
INTERANNUAL RELATION : RAINFALL/SURFACE THERMAL FIELD (1986-1991).

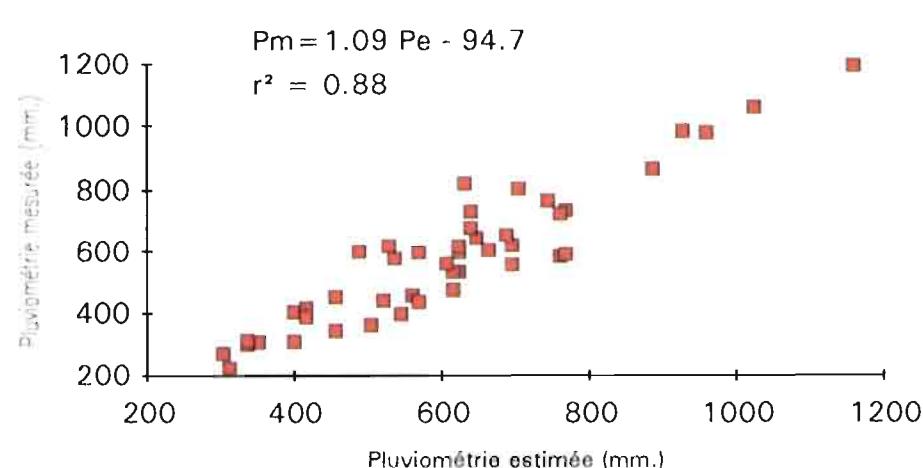
The PCb and PvT fields, interpolated to the whole area, that is PCb_{ch} and PvT_{ch} , were computed by geostatistical processing from the station indexes. They were used to calibrate the cold cloud occurrence images and surface temperature, to produce two estimated pluviometry fields p_1 and p_2 , which were then linearly combined according to the following algorithm :

$$Pe = p_1 \cdot (\text{Foc} \cdot \text{PCb}_{\text{ch}}) + p_2 \cdot (\text{Tmax} \cdot \text{PvT}_{\text{ch}})$$

The weighting coefficients p_1 and p_2 are a function of the correlation coefficient values, which respectively link the measured rainfall at the synoptic stations to the cold cloud occurrence frequencies and with the maximum radiative temperatures of the ground surface.

2.3. Validation de l'estimation

Les totaux pluviométriques saisonniers ont été validés à la résolution du pixel Météosat, par comparaison avec les pluies mesurées à une dizaine de stations de contrôle, indépendantes de celles retenues pour l'estimation. Une régression linéaire a été calculée pour l'ensemble des valeurs regroupées des cinq années de l'étude. Le coefficient de corrélation obtenu ($r^2 = 0,88$) est satisfaisant. On observe cependant (fig. 5) une tendance de la méthode satellitaire à la surestimation, par rapport aux relevés des postes pluviométriques.



3. LA PLUVIOMÉTRIE DU BASSIN DE 1986 À 1991 ET LES CARTES D'ANOMALIES SAISONNIÈRES

Les champs pluviométriques saisonniers de 1986 à 1991 sont présentés sur la figure 6. La figure 7 montre la progression des champs de pluie décadaires au cours de la saison 1989.

La cartographie des anomalies pluviométriques pour les saisons 1986 à 1991, par comparaison avec les champs AGRHYMET de la normale saisonnière 1951-1980 (Morel, 1993), est présentée sur la figure 8. (Les plages jaunes et rouges correspondent aux zones à pluviométrie déficiente à très déficiente, tandis que les plages bleues claires et foncées délimitent les pluviosités excédentaires et très excédentaires).

4. PRÉCIPITATIONS ET ÉCOULEMENTS SUR LE BASSIN DE LA FALÉMÉ À GOURBASSI

La Falémé, affluent situé en zone ouest du bassin supérieur, a connu ces dernières années des étiages très sévères, dus à une longue série de saisons des pluies déficitaires à l'origine d'un fort tarissement des nappes. Ainsi la station de Gourbassi a enregistré des débits nuls pendant plusieurs semaines en 1986, 1987 et 1989.

Cette situation extrême nous a permis de comparer de façon synchrone les écoulements et les précipitations, sur ce bassin de taille moyenne ($17\ 000\ km^2$) doté du plus fort indice de pente de l'ensemble du bassin du Sénégal. Puisque le point de départ de l'écoulement saisonnier et celui de la saison des pluies peuvent être aisément datés, nous avons pu comparer les lames d'eau précipitées cumulées aux débits cumulés, au pas de temps décadaire (fig. 9). Le meilleur ajustement a été obtenu par une fonction polynomiale du 2^e ordre, de la forme :

$$Q = 0,75 \cdot 10^{-5} p^2 - 0,028 p - 25,70.$$

La valeur du carré du coefficient de corrélation ($r^2 = 0,97$) montre que ces deux paramètres sont fortement corrélés, quelle que soit la saison considérée.

Figure 5. – COMPARAISON ENTRE PLUIE ESTIMÉE ET PLUIE MESURÉE AUX STATIONS DÉDIÉES À LA VALIDATION.
COMPARISON BETWEEN ESTIMATED AND MEASURED RAINFALL AT STATIONS DEDICATED TO VALIDATION.

The mapping of pluviometric anomalies for the 1986-1991 seasons, in comparison to the AGRHYMET fields of the 1951-1980 seasonal normal (Morel, 1993), is shown on figure 8. (The yellow and red areas correspond to the zones with shortages to great shortages of rainfall, whereas the light and dark blue areas correspond to excess and very excess rainfall).

4. RAINFALL AND RUN-OFF IN THE FALEME CATCHMENT AT GOURBASSI

The Falémé, an affluent situated in the western zone of the upper catchment, has experienced, during the last few years, very severe low water levels, due to a long series of seasons with insufficient rainfall, which has caused a severe drying up of the phreatic water. So, the Gourbassi station recorded zero flow during several weeks in the 1986, 1987 and 1989 seasons.

This extreme situation has enabled us to compare, in a synchronous manner, the run-offs and rainfall over this average-sized catchment ($17\ 000\ km^2$) with the highest average gradient slope index of the whole of the Senegal catchment. Since the seasonal run-off starting point as well as the beginning of the rainy season could easily be dated, we were able to compare the cumulated sheets of precipitated water with the cumulated flows, and this on a 10-day time scale (fig. 9). The best adjustment was obtained using a second order polynomial function, in the form :

$$Q = 0,75 \cdot 10^{-5} p^2 - 0,028 p - 25,70.$$

The value of the square correlation coefficient ($r^2 = 0,97$) demonstrated that both these parameters were highly correlated, whatever the season in question.

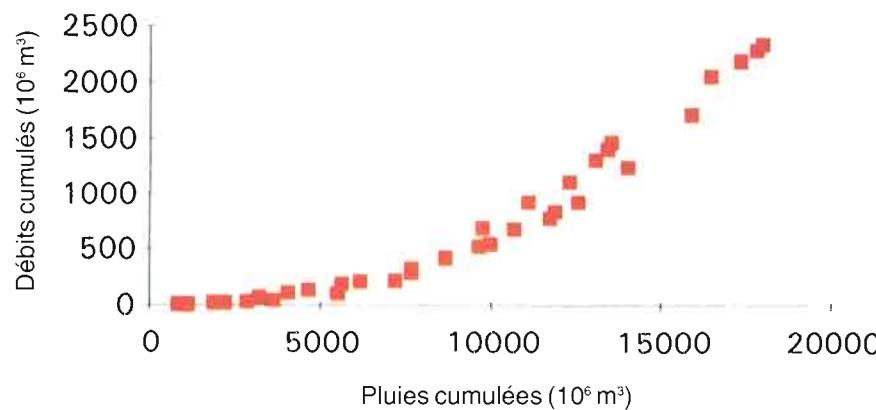


Figure 9. – RELATION PLUVIOMÉTRIE DÉCADAIRES CUMULÉE ET DÉBITS CUMULÉS SUR LE BASSIN DE LA FALEME À GOURBASSI, POUR LES SAISONS 1986, 1987 ET 1989.
RELATION CUMULATED 10-DAY PLUVIOMETRY AND CUMULATED RUN-OFFS FOR THE FALEME CATCHMENT AT GOURBASSI, FOR THE 1986, 1987 AND 1989 SEASONS.

REFERENCES

- CADET D., GUILLOT B., 1991. – EPSAT : Estimation des précipitations par satellite. ORSTOM, Ministère de la Coopération, 63 pages
- CARN M., DAGORNE D., GUILLOT B., LAHUEC J.P., 1987. – Estimation des précipitations par satellite au Sahel pour la période de mai à septembre 1987. Veille Clim. Sat., n° 20, Lannion, pp. 26-30
- JANICOT S., 1992. – Spatiotemporal variability of West African Rainfall. Part. 1 : Regionalizations and typings. Journal of Climate, vol.5, n° 5, 489-497
- LEROUX M., 1980. – Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse Lettres. Géographie. Univ. Dakar. 1427 p.
- MOREL R., 1993. – L'Atlas agroclimatologique des pays du CILSS. Veille Clim. Sat., n° 45, pp. 37-45
- SEGUIN B., 1992. – Approche de l'évaporation par télédétection : utilisation des satellites Météosat et NOAA en Afrique sahélienne. « L'aridité, une contrainte au développement », Didactiques, ORSTOM Ed., 14 p.

2.3. Validation of the estimation.

The seasonal pluviometric totals were validated at the Meteosat pixel resolution, by comparing them to the rainfall measured at ten or so control weather stations, independent of the ones used in the estimation. A linear regression was computed for all the aggregated values for the 5 years of study. The correlation coefficient which was obtained ($r^2 = 0,88$) was satisfactory. One can however observe (fig. 5) that the satellite method has a tendency to overestimate, in relation to the pluviometric post recordings.

3. THE CATCHMENT PLUVIOMETRY FROM 1986-1992 AND SEASONAL ANOMALY CHARTS

The seasonal pluviometric fields from 1986 to 1991 are shown figure 6 ; figure 7 illustrates the progression of ten-day rainfall fields during the 1989 season.

The mapping of pluviometric anomalies for the 1986-1991 seasons, in comparison to the AGRHYMET fields of the 1951-1980 seasonal normal (Morel, 1993), is shown on figure 8. (The yellow and red areas correspond to the zones with shortages to great shortages of rainfall, whereas the light and dark blue areas correspond to excess and very excess rainfall).

4. RAINFALL AND RUN-OFF IN THE FALEME CATCHMENT AT GOURBASSI

The Falémé, an affluent situated in the western zone of the upper catchment, has experienced, during the last few years, very severe low water levels, due to a long series of seasons with insufficient rainfall, which has caused a severe drying up of the phreatic water. So, the Gourbassi station recorded zero flow during several weeks in the 1986, 1987 and 1989 seasons.

This extreme situation has enabled us to compare, in a synchronous manner, the run-offs and rainfall over this average-sized catchment ($17\ 000\ km^2$) with the highest average gradient slope index of the whole of the Senegal catchment. Since the seasonal run-off starting point as well as the beginning of the rainy season could easily be dated, we were able to compare the cumulated sheets of precipitated water with the cumulated flows, and this on a 10-day time scale (fig. 9). The best adjustment was obtained using a second order polynomial function, in the form :

$$Q = 0,75 \cdot 10^{-5} p^2 - 0,028 p - 25,70.$$

The value of the square correlation coefficient ($r^2 = 0,97$) demonstrated that both these parameters were highly correlated, whatever the season in question.

SAISON DES PLUIES 1989

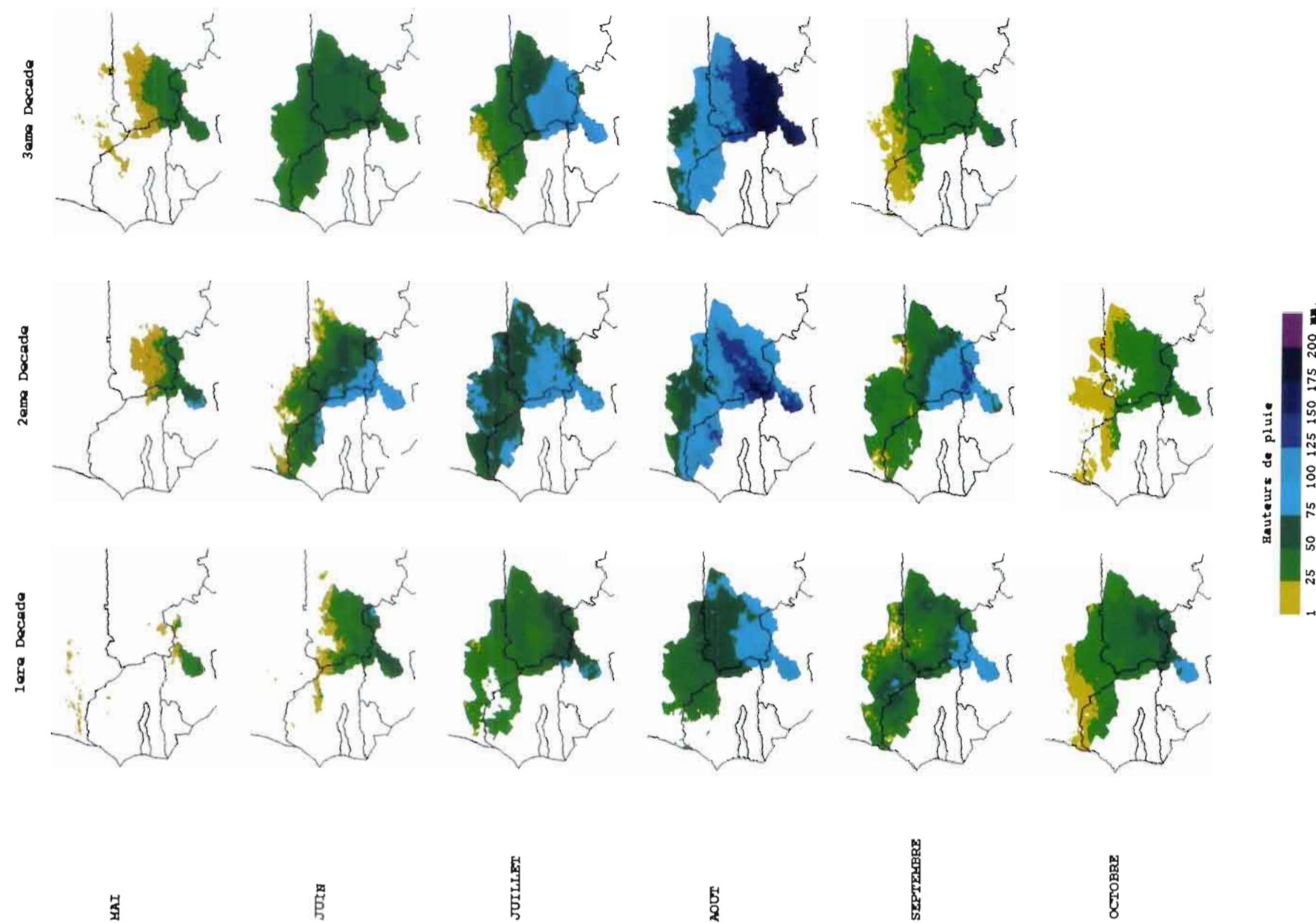


Figure 7. – PLUIES ESTIMÉES, PAR PÉRIODES DÉCADAIRES, EN 1989.
ESTIMATED RAINFALL, PER 10-DAY PERIOD, IN 1989.

Pluviométrie Saisonnière
du bassin du fleuve Sénégal

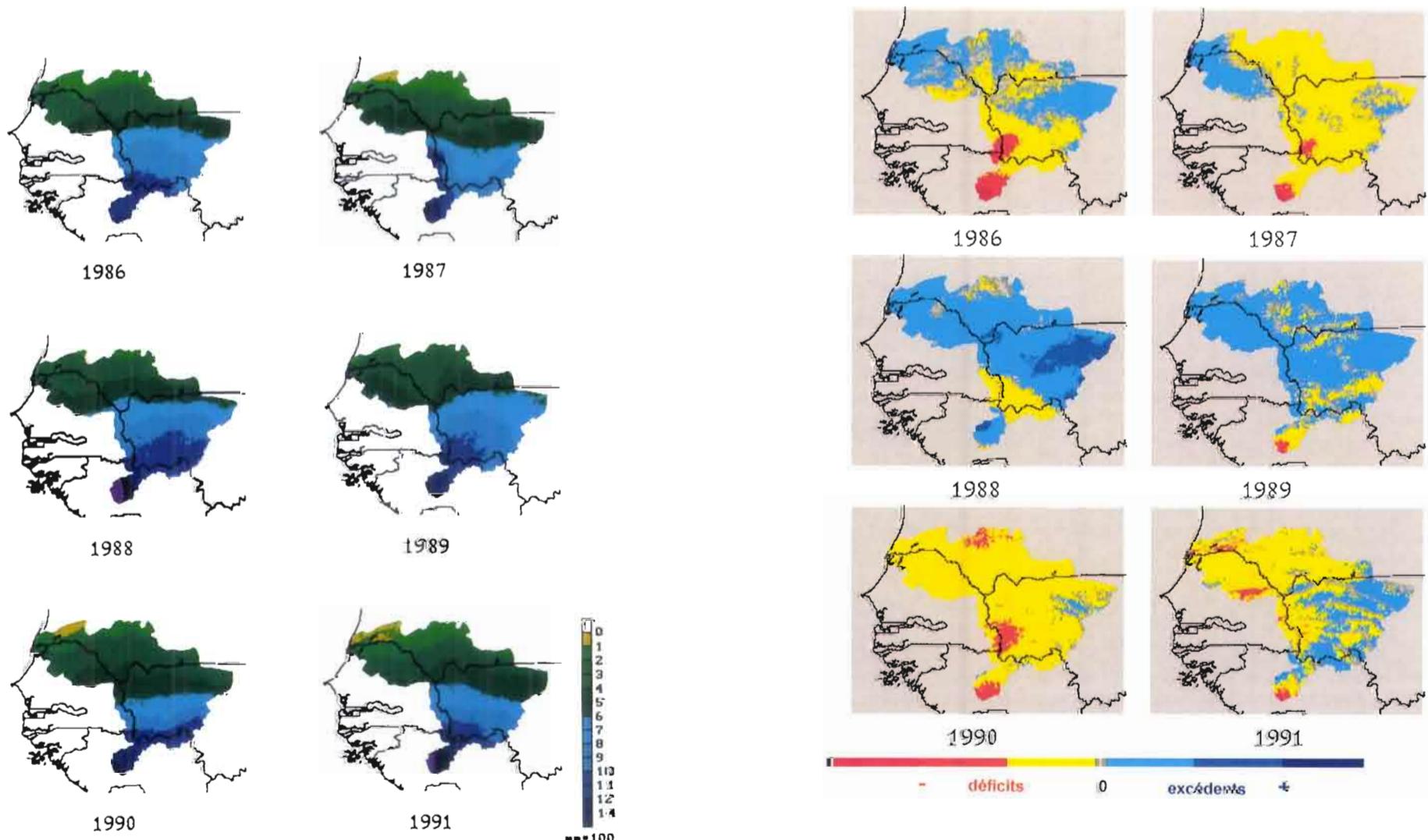


Figure 6. – PLUVIOMÉTRIE SAISONNIÈRE DU BASSIN DU FLEUVE
SÉNÉGAL (MM X 100).
SEASONAL PLUVIOMETRY IN THE R. SENEGAL CATCHMENT.

Figure 8. – ANOMALIES PLUVIOMÉTRIQUES, DE 1986 A 1991.
PLUVIOMETRIC ANOMALIES, FROM 1986 TO 1991.

Carn Michel.

Apport de la télédétection à la connaissance de la pluviométrie du bassin d'un fleuve sahélien : le Sénégal
= Contribution of remote sensing to pluviometry in a sahelian river catchment : the Senegal.

In : Lahuec Jean-Paul (dir.), Guillot Bernard (dir.).
Satellite et surveillance du climat : atlas de veille climatique, 1986-1994 (Afrique et Atlantique intertropical) = Satellite monitoring of the climate : climatic monitoring atlas, 1986-1994 (Africa and intertropical Atlantic).

Paris : ORSTOM, 1994, p. 70-73.

ISBN 2-7099-1238-4