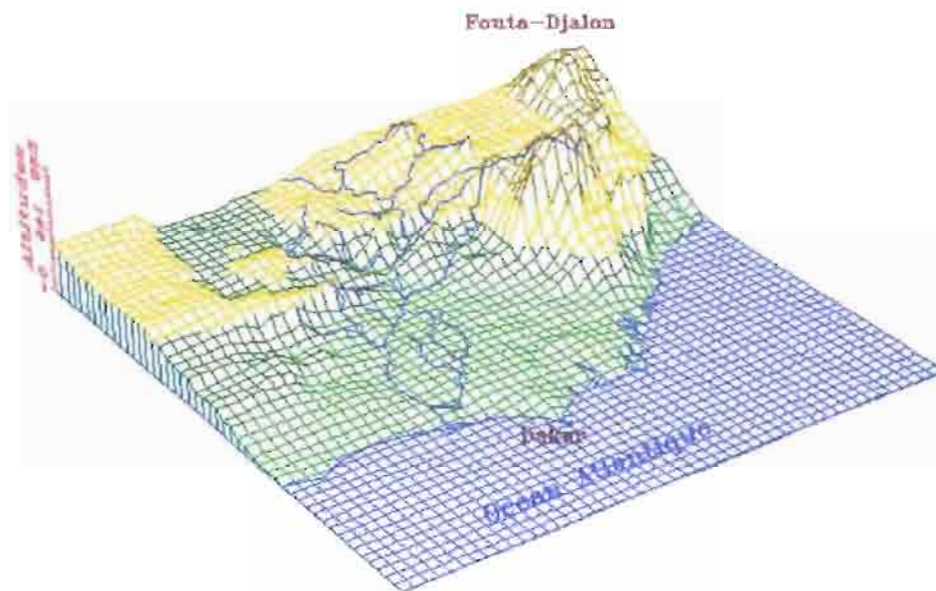
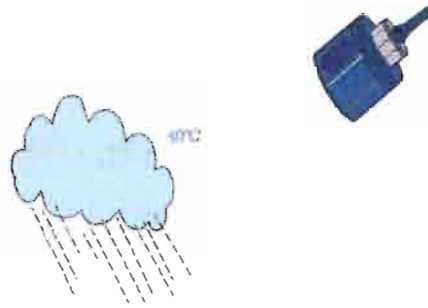


APPORT DE LA TELEDETECTION SATELLITAIRE A LA PLUVIOMETRIE DU BASSIN DU SENEGAL



Michel CARN

1993

INTRODUCTION

Le volet "étude hydrogéochimique" du programme EQUÉSEN (Environnement et Qualité des Eaux du fleuve Sénégal) a pour objectif premier d'approcher le plus précisément possible les différents termes qui interviennent dans l'équation du bilan des entrées/sorties de matières sur le bassin. Une bonne mesure des précipitations sur la zone est donc de ce point de vue essentielle.

Depuis 1986, les équipes et laboratoires associés au sein du projet EPSAT (Estimation des Pluies par Satellite) (CADET - GUILLOT, 1991), ont développé des procédures d'estimation satellitaire de la pluviométrie en Afrique sahélienne, qu'ils souhaitent appliquer dans des projets de développement réalisés sur la région

La convergence de ces deux préoccupations, a abouti à une collaboration entre les 2 programmes EQUÉSEN et EPSAT.

1- ELEMENTS DE CLIMATOLOGIE DU BASSIN DU SENEGAL.

1-1: Le mouvement des masses d'air en Afrique occidentale

Le climat de l'Afrique de l'Ouest résulte à la fois des mouvements à grande échelle et des contrastes thermiques très marqués entre le Sahara et le Golfe de Guinée.

La zone étudiée se situe en domaine tropical de l'hémisphère boréal, caractérisé par l'alternance de deux grandes saisons annuelles: la saison des pluies en été et la saison sèche en hiver.

Ce régime pluviométrique permet de définir l'année climatique. Il est assujéti aux interactions de deux types de circulation aérienne: l'*Harmattan*, chaud et sec en provenance de l'anticyclone saharien, et la *mousson*, chaude et humide issue de l'Atlantique sud.

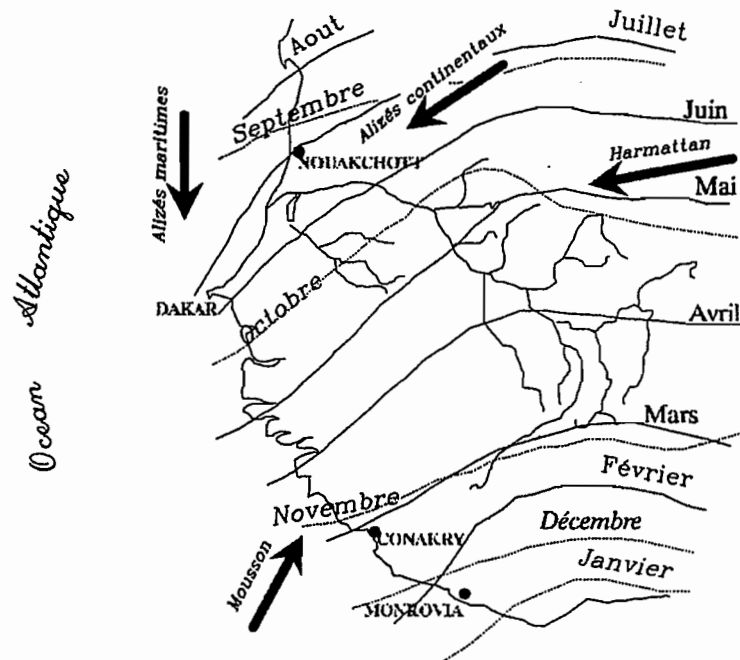


Fig.1 : Les déplacements du Front InterTropical selon les saisons (d'après MICHEL, 1973)

L'interface de ces deux masses d'air est le Front Inter Tropical (FIT); sa trace au sol précise la position de l'équateur météorologique.

Les déplacements du FIT sont déterminés, au cours de l'année par les positions respectives des centres de hautes pressions. Ils évoluent en un mouvement de bascule entre deux extrêmes (Fig.1).

En hiver, l'anticyclone continental boréal centré sur le Sahara et l'anticyclone des Açores sont puissants: l'équateur météorologique se situe vers 4° de latitude Nord; cette position méridionale extrême est généralement atteinte en décembre-janvier. L'anticyclone saharien dirige alors vers les basses latitudes tropicales un flux fort et régulier: l'Harmattan souffle en permanence du NE. Il est localement perturbé par des discontinuités d'alizés maritimes engendrés par l'anticyclone des Açores. Les seules précipitations éventuelles durant cette période, le "Heug" communément appelées "*pluies des mangues*", ont une origine extratropicale. En février, le FIT amorce sa migration vers le nord; il atteint le sud du bassin de la Gambie en mars et franchit le 13^{ème} parallèle (limite septentrionale du Fouta-Djalou) en mai-juin. Les premières pluies à caractère orageux sont alors provoquées par l'arrivée de lignes de grains.

En été, l'anticyclone subtropical de Saint-Hélène se renforce, tandis qu'en cette saison l'hémisphère nord reçoit davantage d'énergie solaire que l'hémisphère sud. Ceci a pour conséquence l'établissement de hautes températures sur le Sahara conduisant à l'installation d'une zone de basses pressions thermiques.

Les masses d'air équatorial tièdes et humides, couvrent alors la quasi-totalité du bassin du Sénégal provoquant les averses de la saison des pluies appelée "*hivernage*". En août, le FIT atteint sa position la plus septentrionale vers 20° de latitude nord. L'ensemble de la région reçoit des pluies non orageuses à caractère continu: la mousson prédomine. A l'arrière du front, de puissants mouvements de convection font naître des cumulonimbus à grands développement vertical et des cumulus bourgeonnants qui donnent d'abondantes chutes de pluies. La mousson frappe alors de plein fouet les reliefs du Fouta-Djalou. Dès le mois de septembre, le mouvement de translation du FIT s'inverse et ce balancement du Nord vers le sud détermine la durée effective de la saison des pluies qui s'achève en octobre-novembre.

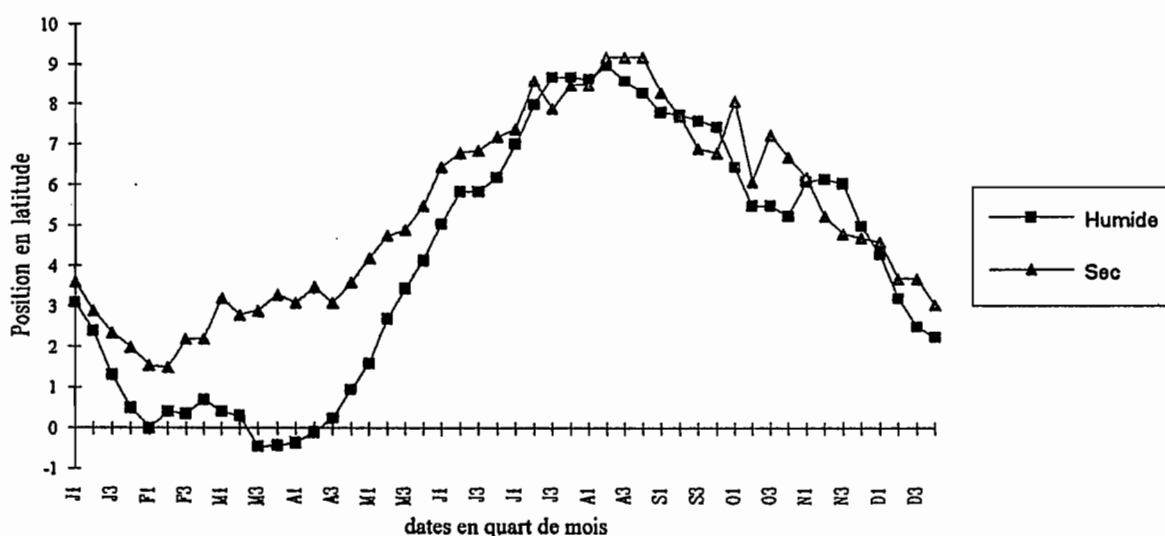


Fig.2- Position de la zone de convergence à 28°W (d'après CITTEAU, 1991)

Le suivi par télédétection satellitaire des oscillations de la Zone InterTropicale de Convergence (ZITC ou ITCZ des anglophones) en domaine océanique, là où la convergence est la mieux marquée puisque non affectée par les effets chorologiques, illustre ce mouvement saisonnier et a permis (J.CITEAU 1991) de caractériser le type de la saison des pluies à venir sur l'Afrique de l'Ouest en fonction de paramètres tels que la date de la remontée du FIT en hémisphère boréal et la vitesse de cette remontée (fig.2)

1-2: Les domaines climatiques du bassin du fleuve Sénégal.

Situé entre les régions tropicales humides et les confins du Sahara (de 9° à 17°30 N) le bassin du fleuve Sénégal présente une grande diversité climatique. Selon LEROUX (1980) quatre domaines caractérisés par la pluviométrie annuelle (P), la température moyenne annuelle (T), le taux annuel d'humidité relative (HR) et la longueur de la saison des pluies se disposent en bandes latitudinales sub-parallèles

Ce sont du sud: au nord:

Le domaine guinéen : $P > 1500$ mm/an, $T > 22-24^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} > 50\%$, et la saison des pluies dure huit mois (d'avril à novembre). Ce domaine se retrouve parfois dans la littérature sous l'appellation de climat "foutanien" pour faire allusion à l'obstacle vigoureux du massif du Fouta-Djalou (OLIVRY, 1983);

Le domaine sud-soudanien : $1500 > P > 1000$ mm/an, $T > 27^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} > 50\%$ et la saison des pluies dure six à huit mois.

Le domaine nord-soudanien : $P < 1000$ mm/an, $T > 27^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} < 50\%$ et la saison des pluies dure quatre à six mois.

Le domaine sahélien : $P < 500$ mm/an, $T > 30^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} < 40\%$ et la saison des pluies dure deux à trois mois.

Les domaines ainsi définis sont délimités géographiquement à partir de la carte des isohyètes établis sur la période 1951-1980. (Annexe B)

1-3: Le régime des vents.

Le régime des vents découle de la circulation générale de l'atmosphère dans la zone intertropicale caractérisée par les deux courants décrits plus haut: l'Harmattan de secteur N-E et le flux de mousson de secteur S-W.

Nous avons sélectionné les valeurs enregistrées aux trois stations synoptiques de Kayes, Kenieba et Labe qui décrivent bien les caractéristiques de régime des vents du bassin supérieur.

Stations	$< 1\text{ms}$	$2 < v < 4$	$5 < v < 6$	$7 < v < 15$	$v > 15\text{ms}$
Kayes	27.8	61.8	8.6	2.3	0.05
Kenieba	54.2	44	1.1	0.7	0
Labe	38.3	43.5	14.1	4.07	0.03

Tableau 1: vitesses des vents aux stations de Kayes, Kenieba et Bakel.

Les vitesses des vents sont mesurées 3 fois par jour (6h00, 12h00 et 18h00). Le tableau 1 donne pour les stations considérées, les fréquences observées pour diverses classes de vitesse et les vitesses moyennes du vent. On remarque la faible fréquence de vents supérieurs à 15 ms. La station qui reçoit les vents les plus violents est bien entendu Labe située à 940 m. d'altitude

2- ARGUMENTS POUR L'UTILISATION DE METHODES SATELLITAIRES EN PLUVIOMETRIE.

La mesure ponctuelle de la pluviométrie, est bien entendu indispensable, pour les statistiques et les analyses de tendances climatiques, comme donnée d'entrée de certains modèles prévisionnels, voire pour alimenter les rubriques climatiques des Atlas géographiques ou de guides touristiques.

Les seules mesures aux stations sont néanmoins souvent insuffisantes pour les programmes de développement qui ont besoin de disposer de données pluviométriques spatialisées, c'est-à-dire de connaître le plus précisément possible les volumes de précipitations qui ont arrosé au cours d'une période donnée, une parcelle agricole, un bassin hydrologique, une zone d'éclosion larvaire, un domaine endémique etc....

Le degré de précision attendu est bien entendu lié à la problématique du projet. Selon que l'on s'intéresse aux suivis agricoles pour l'optimisation des rendus semenciers, à la gestion des cuvettes de barrages, ou au dépistage des pâtûres favorables aux éclosions d'acridiens, on en fixera les limites d'utilisation en terme d'échelle temporelle, spatiale ou les deux à la fois.

2-1: Les mesures pluviométriques actuelles sur le bassin.

2-1-1: Les réseaux de mesures au sol

Les données pluviométriques du bassin proviennent uniquement des stations de mesures au sol (stations synoptiques et climatiques, postes pluviométriques) qui sont implantées sur la zone (fig.3); le seul radar météorologique de la région, celui de Dakar-Yoff, est en effet trop éloigné pour pouvoir fournir des informations quantifiées sur le bassin.

Les stations sont équipées essentiellement de pluviomètres; quelques pluviographes, appareils enregistreurs qui nécessitent une maintenance précise, ne sont opérationnels qu'en de rares stations synoptiques.

Le réseau pluviométrique du bassin du Sénégal est peu dense; on y relève en effet pour l'ensemble, 51 points de mesures possibles sur une zone d'environ 368 000 km², ce qui correspondrait si l'implantation instrumentale était répartie de façon homogène, à une aire de contrôle moyenne de chaque station de l'ordre de 7200 km².

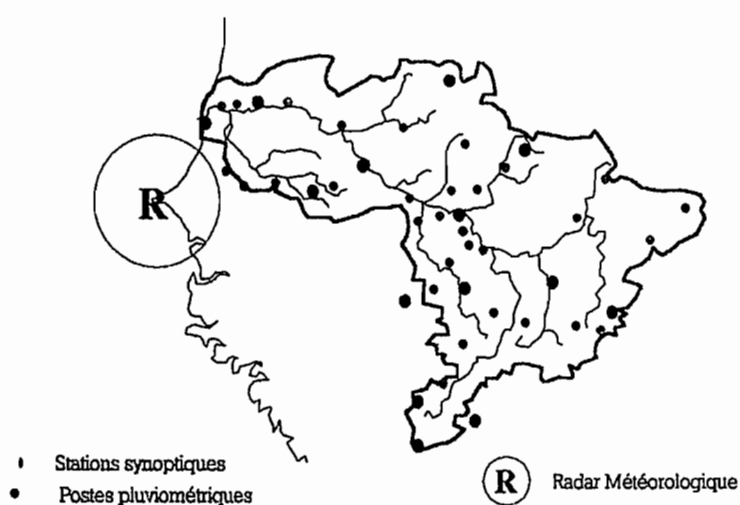


fig.3: l'équipement pluviométrique du bassin du Sénégal.

Ce réseau de mesure au sol dépend en outre de quatre systèmes nationaux de gestion des données - Sénégal, Mali, Mauritanie et Guinée - ce qui dégrade l'homogénéité des résultats, et surtout accroît fortement les difficultés de collecte globale. Enfin on observe depuis quelques années une tendance à la fermeture de certaines stations de mesure, pour des raisons économiques ou politiques; ainsi selon une publication récente de l'OMM, plus de 40% des stations climatologiques du continent qui existaient en 1930 ont disparues en 1988 (SIRCOULON, 1990)

2-1-2: Les études antérieures

L'une des premières cartes d'isohyètes moyennes annuelles du bassin, fut dressée en 1965 à la demande du CIEH (Comité Inter-Africain d'Etudes Hydrauliques), à partir de stations pluviométriques pour lesquelles on possédait au moins 10 années d'observations, soit 42 postes. (ROCHETTE, 1974).

A.A. SOW (1984) dans son étude sur "Les pluies et les écoulements dans le bassin du fleuve Sénégal", a imaginé une méthode originale à partir de données morphométriques du bassin pour calculer les lames d'eau précipitées; les méthodes classiques (méthodes de Thiessen, des isohyètes etc..) s'étant avérées inopérantes à cause de la trop faible disponibilité des mesures.

Dans cette procédure nouvelle, la pluie moyenne est restituée par une régression à variables multiples (tableau 2) entre les précipitations mesurées aux points d'observation d'une part et les latitudes, longitudes et altitudes des points milieux d'un carroyage donné, d'autre part.

Domaines	Pe&Lat	Pe&Lon.	Pe&Alt	Pe&multi.
Sahélien	-0.82	-0.6	0.58	0.9
N-Soudanien	-0.88	-0.13	0.32	0.94
S-Soudanien	-0.07	-0.75	-0.75	0.82
Guinéen	-0.49	0.69	0.73	0.95

Tableau 2: Coefficients de corrélation simples et multiple entre la pluie et les trois variables morphométriques sur le bassin du Sénégal pour la période 1951-1980 (A.A.SOW 1984)

La distribution zonale des isohyètes dans les domaines sahélien et nord-soudanien explique la forte relation qui existe entre la pluviométrie et la latitude, particulièrement dans la partie nord du bassin. Dans la variance totale de la pluviosité, expliquée à 90% par le coefficient de corrélation multiple, 80% sont liés à l'effet de la latitude.

La relation entre pluie et longitude ne paraît significative qu'en domaines sud-soudanien et guinéen, là où l'advection de flux océaniques de secteur sud-ouest est la plus marquée.

Enfin la bonne relation entre la pluie et l'altitude est compréhensible, les hauts reliefs du Fouta Djallon, culminent à 1330 mètres, et favorisent naturellement la convection des masses nuageuses.

L'accès aux mesures pluviométriques du réseau sol est parfois si délicat que S.GEFFARD (1990) dans une étude sur la dynamique des systèmes hydrologiques en Afrique de l'ouest, n'a pu utiliser pour le calcul des lames d'eau sur le bassin de la Falémé à Gourbassy par la méthode de Thiessen ($S=17\ 000\text{ km}^2$), que 4 stations toutes situées hors du bassin soient respectivement, celle de Gourbassi implantée à l'exutoire mais aussi celles de Galougo, Labe et Sagabari distantes respectivement de 50, 97 et 115 kms. du bassin !!

2-2: La variabilité pluviométrique

2-2-1: La variabilité spatio-temporelle des pluies en Afrique de l'Ouest

Une analyse des corrélations inter-postes pluviométriques en composantes principales, pour la période 1948-1978 sur l'Afrique de l'ouest, aux pas de temps mensuels et saisonniers, a démontré l'existence de régions où il existe une bonne cohérence spatiale de la pluviométrie, interannuellement. (JANICOT, 1992).; en d'autres termes, des régions qui présentent des bilans pluviométriques annuels de même signe, par rapport aux valeurs normalisées.

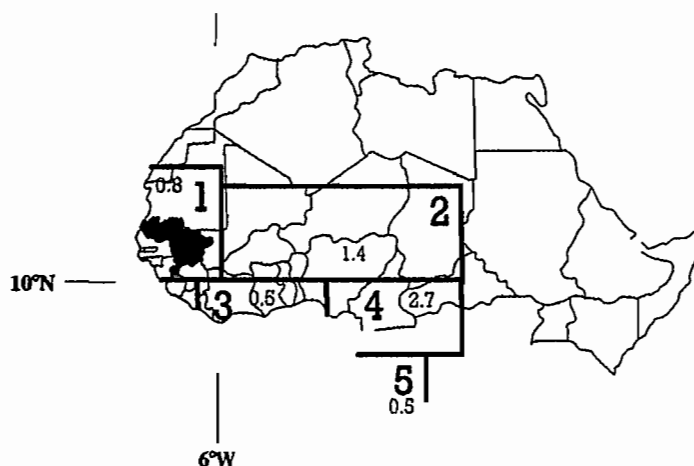


Fig 4: synthèse de la régionalisation annuelle de la pluviométrie selon JANICOT (1992)

Une première régionalisation 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 opposition de comportement entre la façade atlantique et le Sahel "continental"

On observera sur la figure 4, que le bassin du fleuve Sénégal est entièrement inclus dans la zone 1, dont la degré de cohérence interne est relativement fort.

La taille caractéristique des noyaux significatifs, qui peuvent être considérés comme représentant des zones de comportement pluviogénique cohérent en Afrique de l'ouest, est de l'ordre du millier de kilomètres. (CERON, 1990).

Plus récemment MAHE (1993) a étendu de façon optimale les informations complètes disponibles sur un grand nombre de postes, aux stations dont les séries sont incomplètes pour la période 1951-1989 en utilisant la méthode du vecteur régional (M.V.R.). Cette méthode suppose que l'on définisse des unités climatiques contenant des stations dont les variations interannuelles sont cohérentes les unes par rapport aux autres. La qualité de la reconstitution des pluies annuelles manquantes dépend donc essentiellement de la qualité des données existantes bien sûr, mais en grande partie également de la significativité climatique des unités géographiques à l'intérieur desquelles on va procéder à l'homogénéisation entre stations. MAHE, en individualisant 39 unités géomorpho-climatiques pour l'ensemble de l'Afrique intertropicale tributaire de l'océan Atlantique, a notamment pris en compte la variabilité interannuelle due à la proximité de l'océan par l'identification des régions côtières pour lesquelles on aboutit à une meilleure homogénéisation des pluies. Les figures 5 et 6 montrent la répartition de ces différentes unités et les variations interannuelles des précipitations régionales de 1951 à 1989 pour les zones concernant le bassin du fleuve Sénégal. Pour chaque région, on a calculé les valeurs centrées réduites afin d'ôter la variabilité interne au sein de chaque unité.

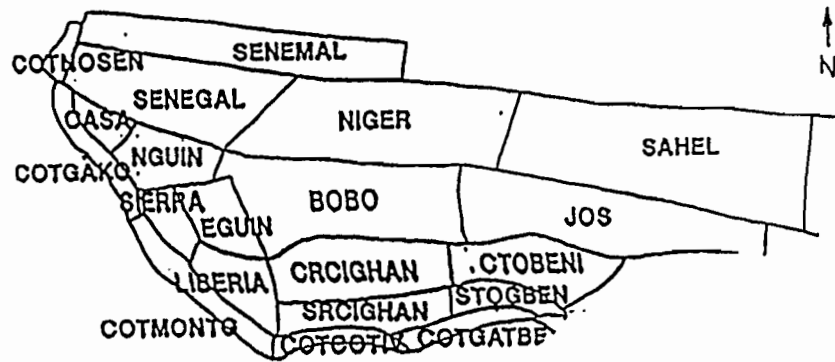


Fig 5: Les unités géomorpho-climatiques utilisées pour l'homogénéisation des pluies par la méthode du vecteur régional dans la zone du bassin du fleuve Sénégal.

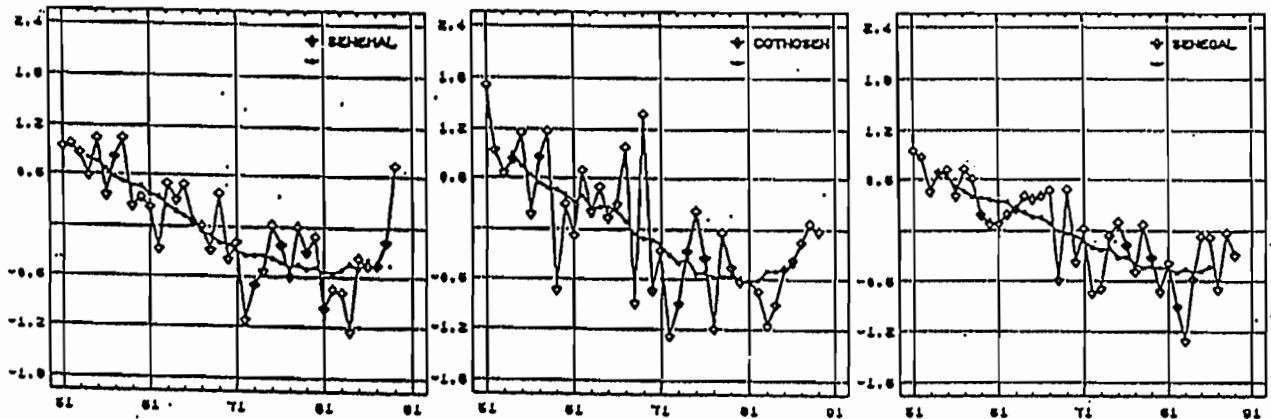


Fig 6: Pluies annuelles par unités climatiques centrées et réduites de 1951 à 1989 pour 3 des unités cartographiées sur la figure précédente: SENEMAL, COTNOSEN et SENEGAL.

2-2-2: La variabilité interannuelle des pluies sur le bassin

D'après S.NICHOLSON (1980), le coefficient de variabilité interannuelle exprimé en pourcentage du rapport de l'écart-type à la normale serait de 30 à 50% sur la zone sahélienne, pour les totaux saisonniers.

On notera sur la figure 7 que ce coefficient augmente avec l'aridité. La zone du bassin du fleuve sénégal est comprise entre les valeurs 50 et 15%.

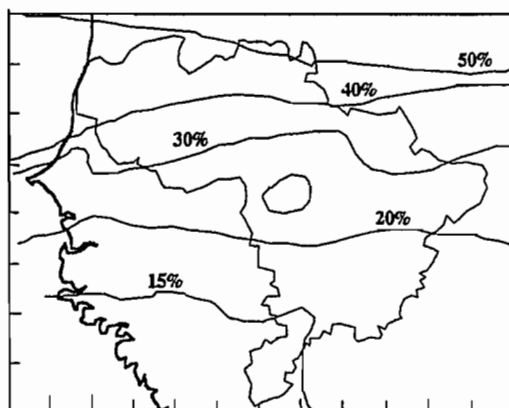


Fig.7- Variation interannuelle de la pluviométrie sur le bassin du fleuve Sénégal. (d'après NICHOLSON)

La plus forte variabilité interannuelle est observée dans la moyenne et la basse vallée du fleuve, et la plus faible sur le bassin supérieur, situé dans les monts du Fouta Djallon.

2-2-3: La variabilité spatiale à petite échelle.

La variabilité spatiale de la pluviosité dans les régions tropicales et équatoriales est également forte aux petites échelles. Ceci tient essentiellement à la nature très convective des systèmes précipitants, dont la taille des cellules de convection notamment dans le cas des lignes de grains serait de l'ordre du kilomètre.

Nous avons pu l'estimer pour la région de Richard Toll, dans la basse vallée du fleuve grâce aux données du laboratoire d'agro-pédologie de la Compagnie Sucrière Sénégalaise (C.S.S.) qui a mesuré pendant 4 ans les pluies journalières en 10 postes pluviométriques répartis de façon homogène sur une superficie de l'ordre de 10 pixels Météosat.

Nous indiquons dans le tableau 3 les principaux termes statistiques qui caractérisent les mesures relevées lors des saisons 1985 à 1988.

	1985	1986	1987	1988
Moyenne	182.9	196.3	131.8	215.8
Variance	364.2	1633.7	665.1	825.1
Ecart-type	19.08	40.42	25.8	28.7
Ecart Max.	35.50%	47.50%	49.50%	35.60%

Tableau 3 - Eléments de statistiques de la pluviométrie des casiers de la C.S.S pour les saisons des pluies 1985 à 1988.

Les écarts pluviométriques saisonniers observés sur le degré carré de Niamey durant l'expérience HAPEX Sahel (Hydrological and Atmospheric Project Experiment) au cours de la saison 1992 sont du même ordre de grandeur (HOEPFFNER, communication personnelle)

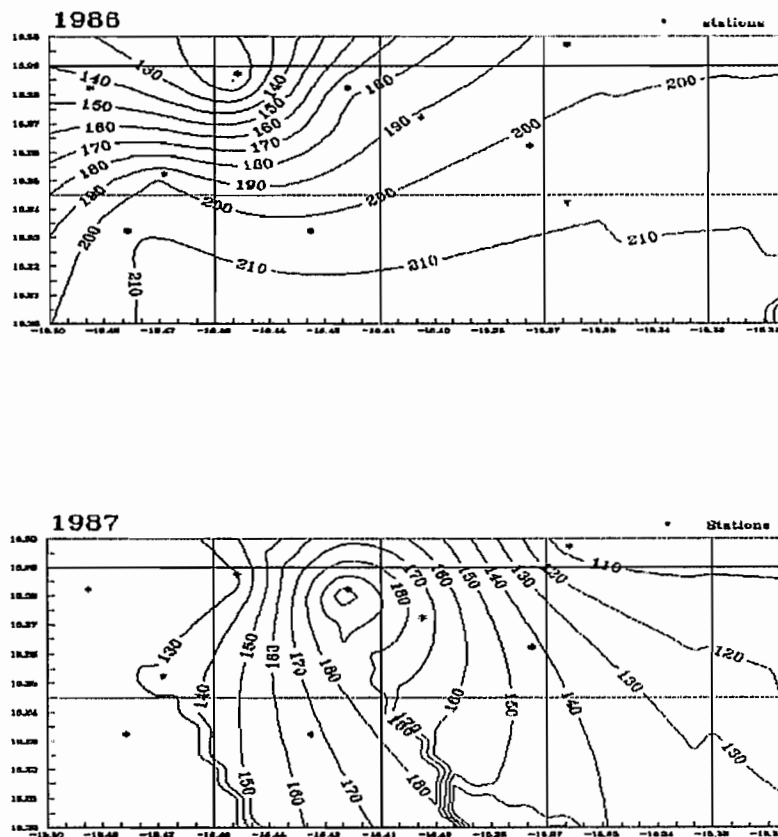


Fig.8- La variabilité spatiale de la pluviométrie sur la zone des casiers de la C.S.S pour les saisons 1986 et 1987.

Les grilles des deux cartes de la figure 8 représentent à l'échelle, la pixelisation Météosat.. On notera que les gradients maximum de pluviométrie saisonnière par pixel pour les années 1986 et 1987 sont respectivement de 90 et 70 mm. pour des pluviométries moyennes de 196 et 132 mm. !!

Il faut cependant noter à l'instar de CARBONNEL et al. (1990) que cette variabilité kilométrique est assortie d'une continuité des champs de mesure à l'échelle décimétrique et au niveau de l'averse. Ceci a conduit ces auteurs à préconiser un minimum de 2 points de mesures pour caractériser la pluie à ces échelles.

2-3: Les applications de l'estimation de la pluviométrie par satellite à l'hydrologie

HARDY (1988) dans une étude menée sur le bassin de Dakka-Saidou (fig.19, page 20), partie supérieure du bassin du Bafing, a montré que l'intégration de champs pluviométriques estimés à partir de l'imagerie Météosat (selon la méthode TAMSAT de l'Université de Reading,) dans le modèle d'estimation des débits de PITMAN (PITMAN 1976), donnait de meilleurs résultats que l'utilisation de lames d'eau précipitée calculées par les méthodes classiques (méthode de Thiessen notamment).

(Le modèle de PITMAN estime le débit d'un fleuve à partir de 12 paramètres physiquement significatifs, dont la lame d'eau précipitée sur le bassin versant).

Par ailleurs et de façon similaire, la pluviométrie estimée par la méthode EPSAT utilisée dans le modèle précipitation/écoulement de WHISHART (SOLOMON 1988) sur 57 petits bassins (de 120 à 810 km²) du nord de la Côte d'Ivoire s'est avérée également plus efficace dans de nombreux cas que la pluviométrie spatialisée conventionnellement.

2-4: Les limites des méthodes d'estimation de la pluviométrie issues de l'imagerie Météosat

Il n'y a pas de relation physique directe entre les précipitations et les différents paramètres mesurés par le satellite. Dès lors les méthodes d'estimation pluviométrique ne peuvent fonctionner que statistiquement. Ceci ne sera donc possible que sur des échantillons temporels longs (10 jours minimum = décade) et/ou de grandes surfaces (supérieures au millier de km²), qui doivent être associées à des réseaux de validation au sol appropriés.

Elles doivent en outre être appliquées à des zones relativement homogènes ceci afin de réduire au maximum les biais statistiques.

Un système de mesures au sol peu instrumenté comme celui du bassin du Sénégal ne peut rendre compte avec suffisamment de précision de la forte variabilité spatiale à petite échelle de la pluviométrie en cette région aux reliefs importants et où les mécanismes des masses d'air soumis aux conflits des flux océaniques et continentaux sont particulièrement complexes. Par conséquent le calcul par les méthodes conventionnelles de "paramètres étendus" (tels que celui des lames d'eau précipitée) ne peut être que très approximatif et justifie l'application de méthodes synoptiques comme la télédétection satellitaire.

3- L'ESTIMATION DES PLUIES PAR SATELLITE.

3-1: L'imagerie satellitaire Météosat: son utilisation en pluviométrie.

3-1-1: Les satellites de la série Météosat

Le satellite géostationnaire européen Météosat, se trouve placé en orbite équatoriale à 35800 km d'altitude environ, niveau d'équilibre qui lui permet d'avoir la même vitesse angulaire que la terre et d'être ainsi fixe par rapport à un sous-point terrestre. Sa position nominale se situe à l'intersection du méridien de Greenwich et de l'Equateur, ce qui en fait un instrument particulièrement adapté à l'étude du continent africain.(Fig.9)

L'ensemble du satellite animé d'un mouvement de spin, tourne à 100 tours/minutes autour de son axe principal qui est orienté parallèlement à l'axe nord-sud de la terre. Cette rotation régulière du vaisseau correspond à la composante x du mouvement d'un radiomètre à balayage qui effectue des mesures de luminance dans 3 canaux:

Canaux	Bandes Spectrales	Pixels
Visible	0.5-0.9 μm	5*5 km
Vapeur d'eau	5.7-7.1 μm	2.5*2.5 km
Infrarouge	10.5-12.5 μm	2.5*2.5 km

Tableau 4: Les 3 canaux du satellite Météosat.

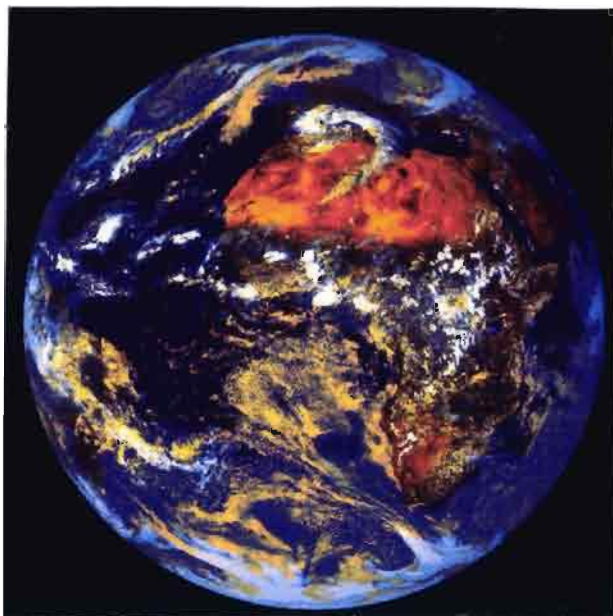


Fig.9: Image Météosat.(Composition Vis/IR)

Le système est conçu pour fournir toutes les 30 minutes une vue globale du disque terrestre. La résolution au sous-point du satellite est de 2.5 km dans le canal Visible et d'environ 5 km pour l'Infrarouge et le canal vapeur d'eau.

Les images sont "naviguées" par rapport à une image de référence de telle façon que deux images successives sont superposables au pixel près.

3-1-2: L'utilisation du canal infrarouge Météosat pour l'estimation des pluies en Afrique sahélienne.

Le canal Visible permet de classer les différents objets de l'image en fonction de leur albedo et notamment de mettre en évidence au sein de la nébulosité, les nuages à fort contenu en eau qui apparaissent très brillant (Cumulo-Nimbus notamment). Néanmoins ce canal n'est, par définition, utilisable que de jour ce qui le rend peu adapté à notre objectif.

L'imagerie Infrarouge fournit à tout moment de la journée une "carte thermique" du globe terrestre et permet notamment de classer les différents corps nuageux en fonction de leur développement en altitude. En effet la plupart des nuages ont une émissivité proche de 1, c'est-à-dire qu'ils sont opaques dans l'infrarouge; le signal reçu par le satellite dépend donc essentiellement de la température du sommet; ainsi les cumulo-nimbus, source de l'essentiel des pluies sur le sahel, correspondent aux phénomènes convectifs paroxismaux et seront identifiés comme étant les plus froids (avec les cirrus, nuages de glace peu épais non précipitants, mais localisés à très haute altitude).

En l'absence de nuages, le canal Infrarouge permet en outre de réaliser la cartographie du champ thermique radiatif de la surface ; et plus particulièrement de repérer la signature thermique des pluies au sol liée à l'humidité instantanée, à l'évaporation et enfin à l'*évapotranspiration* lorsque le couvert végétal se développe ou s'accroît (SEGUIN,1992).

Les scènes Météosat utilisées dans cette étude ont été fournies dans un premier temps par le Centre de Météorologie spatiale de Lannion (pour la période 1986-1989), puis par le laboratoire UTIS de l'ISRA/ORSTOM de Dakar-Thiaroye (à partir de la saison des pluies 1990).

Les mesures pluviométriques au stations synoptiques ont été fournies par les directions des météorologies nationales du Senegal, du Mali et de Guinée, par les bulletins décennaires du Centre AGRHYMET de Niamey, et les télécopies reçues à l'ASECNA de Dakar. Les données concernant certains postes pluviométriques nous ont été proposés par le laboratoire d'agroclimatologie du centre ISRA de Bambey.

3-2: La méthode EPSAT

3-2-1: les paramètres initiaux:

Il existe deux voies possible pour l'élaboration de produits d'estimation des pluies par satellite selon que l'on étudie la source de pluies (les nuages précipitants) ou la cible (la surface du sol), détectable après le passage des nuages.

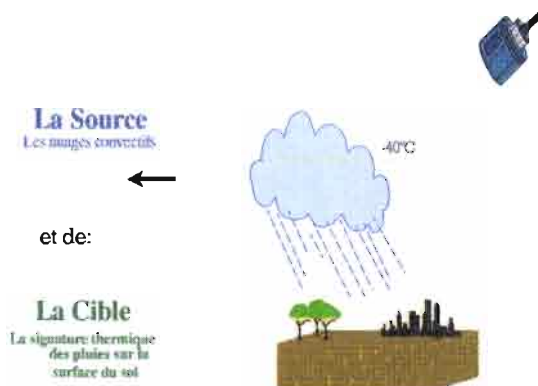


Fig.10: Schéma de principe de la méthodologie EPSAT

La méthodologie utilisée repose sur une approche originale qui combine cette double paramétrisation, des causes et des effets. (CARN, 1989)

3-2-1-1: La paramétrisation de la source de pluie: la fréquence d'occurrences des nuages considérés pluviogènes.

Les précipitations dans cette région proviennent essentiellement de nuages à fort développement convectif (systèmes frontaux, lignes de grain, orages isolés, ...etc). Cette caractéristique a conduit un certain nombre d'équipes de recherche à baser leur méthodologie de suivi de la saison des pluies sur le recensement des nuages précipitants par des techniques de "seuillage thermique" sur les images satellitaires infrarouge acquises à des cadences horaires voire semi-horaires (ARKIN, 1981).

Nous avons choisi un seuil de -40°C (GUILLOT, 1987), et effectuons à partir de cette valeur, image après image, à une cadence d'acquisition semi-horaire, et sur une base de temps de 5 jours, un comptage des pixels indicateurs de la présence de nuages supposés précipitants. Une image de synthèse pentadaire de fréquence d'Occurrences de nuages froids (image FOC, fig.11a) est ainsi créée. Des cumuls sont ensuite calculés pour les périodes plus longues (décades, mois et saisons)

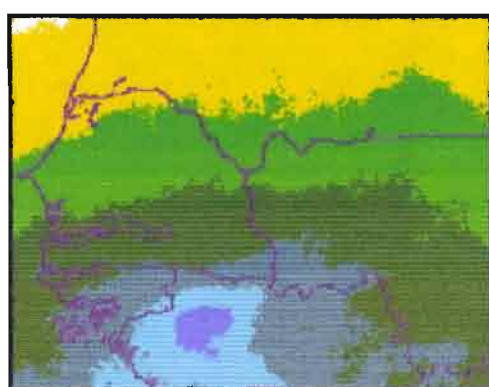


Fig. 11a: Champ d'occurrences de nuages froids pour la saison 1989

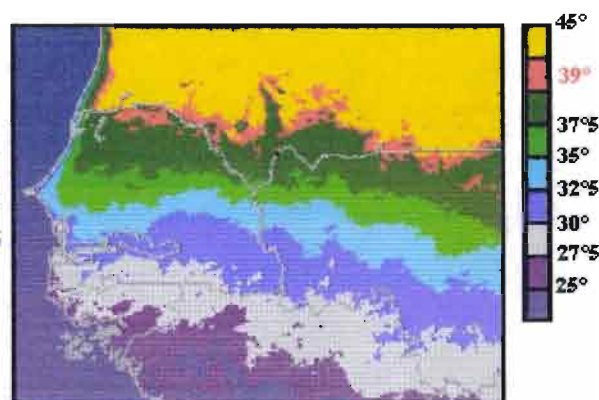


Fig 11b: Champ thermique radiatif maximum de la surface pour la saison 1989

3.2.1.2: La signature thermique des pluies sur la cible: la température maximale de la surface du sol

Deux équipes de chercheurs de l'INRA et de l'IRAT ont montré par ailleurs lors d'une étude sur le Sénégal (ASSAD, 1987), que les hauteurs de pluie cumulées étaient significativement corrélées avec l'évapotranspiration, elle-même corrélée avec les valeurs cumulées des températures radiatives maximales de surface, mesurées par le satellite. NEGRE et al (1988) ont notamment montré sur le Sénégal, que la pluviométrie est très significativement reliée à la température radiative maximale de surface mesurée par le satellite Meteosat, notamment lorsqu'elle est corrigée par la température de l'air à la surface du sol.

Un tri est appliqué, par périodes de 5 jours, aux images infrarouge, acquises à une cadence semi-horaire, de façon à sélectionner pour chaque pixel, image après image, la valeur minimum des comptes numériques, indicatrice de la température la plus élevée (image Tmax, fig. 11b)).

Pour les périodes plus longues (décades, mois, saison) on calcule des moyennes à partir de ce produit pentadaire.

3-2-2: Les procédures de l'estimation

3-2-2-1: le couplage des deux paramètres

Pour des pas de temps décennaires ou plus longs, les pluies mesurées aux stations sont significativement corrélées par régression linéaire multiple avec les deux paramètres de base, FOC et Tmax - pris comme variables indépendantes.

Néanmoins pour les périodes les plus courtes, les décades, les résultats obtenus sont peu satisfaisants à la résolution du pixel (environ 30% de la variance de la pluie expliquée par les deux paramètres choisis) et l'application dans ce cas d'ajustements linéaires n'est acceptable que pour le calcul de lames d'eau sur des surfaces suffisamment importantes (supérieures à 10000 km²).

Il est donc illusoire pour ce type de procédure, de vouloir réaliser à de tels pas de temps une validation au pixel près !

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

- pour les occurrences de nuages froids:

- à la prise en compte dans le recensement, de nuages de glace (cirrus) non précipitants.
- à la non représentation de pluies produites par des nuages moyens ou bas (à sommets plus chauds que -40°C).
- 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) ont montré que dans le cas de mesures pluviométriques au sol, la précision pouvait se dégrader de 10% dans le cas d'un échantillonnage fractionné chaque ½ heure, et de l'ordre de 50% pour un échantillonnage horaire.

- pour le champ thermique maximum de surface:

- à la non correction des effets atmosphériques dans la mesure du bilan radiatif.

Le champ thermique radiatif maximum de surface (Tmax), est notamment fonction de l'état du couvert végétal du moment, qui représente, particulièrement en zone sahélienne, à un instant donné, une "mémoire" de la saison des pluies. Ce paramètre est donc vraisemblablement

peu influencé par un échantillonnage fractionné dans le temps et permet de corriger cet effet qui affecte particulièrement celui des occurrences.

3-2-3-2: les indices pluviométriques:

Les procédures d'estimation de la pluviométrie par régression linéaire ne peuvent être efficaces que pour un domaine spatial d'échelle moyenne que nous estimons de l'ordre de 10000 km². Notre objectif étant d'obtenir une mesure de la pluie, satisfaisante pour des pas de temps de 10 jours à échelle spatiale fine, nous avons développé, lors de ce travail sur le bassin du Sénégal, la méthode dite des *indices pluviométriques* afin d'estimer les lames d'eau précipitées sur la région à la résolution du pixel Meteosat.

Lors d'un premier traitement, les valeurs d'occurrences et de température maximale de la surface sont extraites des pixels correspondant aux stations synoptiques dont on connaît la pluviométrie pour la période considérée.

Les deux indices suivants sont alors calculés pour chaque station:

- indice d'efficacité pluviogénique:

$$PCb_s = \text{Pluie mesurée} / \text{Nombre d'occurrences}$$

- indice de refroidissement:

$$PvT_s = \text{Pluie mesurée} / T_{max}$$

Le PCb représente l'efficacité en pluie d'une occurrence nuageuse enregistrée en un point à un moment donné.

Le PvT rend compte des réactions thermiques de la surface, provoquées par les précipitations en un point à un moment donné. Ces réactions sont liées aux processus d'humidification, d'évaporation, d'évapotranspiration, ...etc; il est évident que cet indice est aussi influencé par certains effets atmosphériques et notamment les refroidissement dûs aux nuages de lithométéores.

Le comportement interannuel de ces deux indices a été étudié pour les années 1986, 1987 et 1989 pour trois fichiers de stations correspondant à des échelles spatiales différentes - la zone des pays du CILSS, le MALI et le degré-carré de Niamey (zone du déroulement des expériences EPSAT-Niger et Hapex Sahel. (LEBEL, 1991) La relation Pluie/température radiative maximum présente dans tous les cas, une meilleure reproductibilité d'une saison à l'autre, que celle concernant la pluie et le cumul des occurrences, qui n'est parfois que très faiblement significative interannuellement. (CARN et al. (1990).

Les figures 12 et 13 confirment que cette analyse est vérifiée sur le bassin du Sénégal, le coefficient de corrélation de la régression linéaire entre pluie et champ thermique de surface. ($r=0.84$) est en effet sensiblement meilleur que celui calculé entre pluie et occurrences ($r=0.74$).

Ces résultats ne sont pas surprenants. D'une part un simple seuil thermique ne permet pas de caractériser avec suffisamment de précision la qualité pluviogénique du nuage repéré, qualité liée à l'intensité de la convection, à la phase d'évolution du moment (croissance ou affaiblissement) etc .. ce qui explique que la variabilité interannuelle du PCb à un endroit donné pour une période donnée puisse être forte. En ce qui concerne les PvT, hormis les effets atmosphériques difficiles à cerner par nos moyens actuels, ceux liés à la nature de la surface (caractéristiques physiques des sols, nature du couvert végétal, gradient thermique lié à l'altitude etc..) sont stables dans le temps. Le couplage de données pertinentes (température de l'air en surface, contenu intégré en vapeur d'eau, etc..) extraites par inversion des mesures du TOVS (Tiros Operational Vertical Sounding) qui équipe les satellites à défilement de la série NOAA pourrait être un bon moyen de corriger partiellement les effets péjorants liés à l'atmosphère. (CARN, 1994)

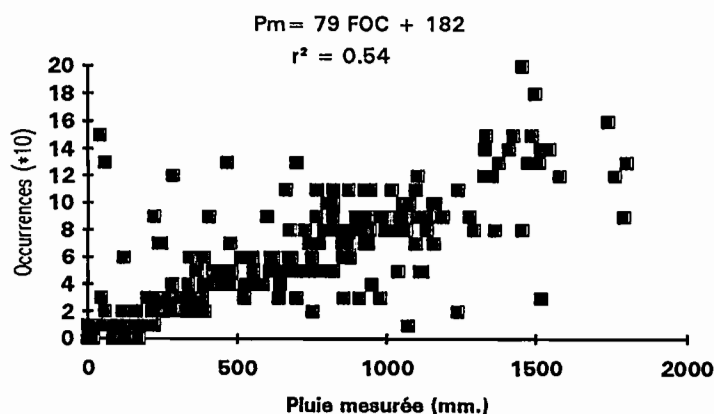


Fig.12: Relation interannuelle Pluie/Occurrences de nuages froids

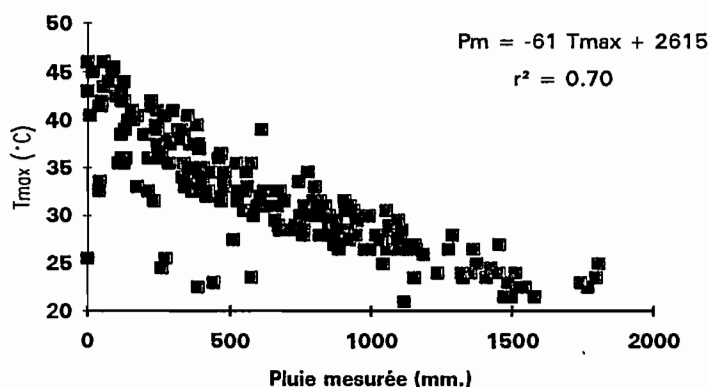


Fig.13: Relation interannuelle pluie/Champ thermique de surface

Il semble donc que la conception d'une méthode d'estimation des pluies en temps réel, s'appuyant sur une référence climatologique et non plus sur des mesures aux stations, devrait être plutôt fondée sur une paramétrisation de l'effet des pluies au sol, que sur une méthode de recensement des nuages froids.

CARN et al. (1987) ont par contre montré lors d'une étude sur le Niger, que la cartographie des champs de PCb permet de différencier à l'échelle saisonnière, les zones à précipitations essentiellement produites par le passage de lignes de grains, de celles où la pluviométrie est plus particulièrement associée au flux de mousson.

La comparaison des cartes proposées par SAGNA (1993) sur la proportion des apports pluviométriques dûs aux lignes de grain en 1989 sur le Sénégal avec celles des champs de PCb correspondants, confirme cette analyse, et on observe sur la figure 14 une bonne relation entre les structures des deux cartes, caractérisées respectivement, suivant un axe NE-SW, par une augmentation de la valeur de l'indice d'efficacité pluviogénique des occurrences recensées selon la procédure EPSAT, et par une diminution concomitante de la proportion des précipitations produites par des perturbations mobiles.

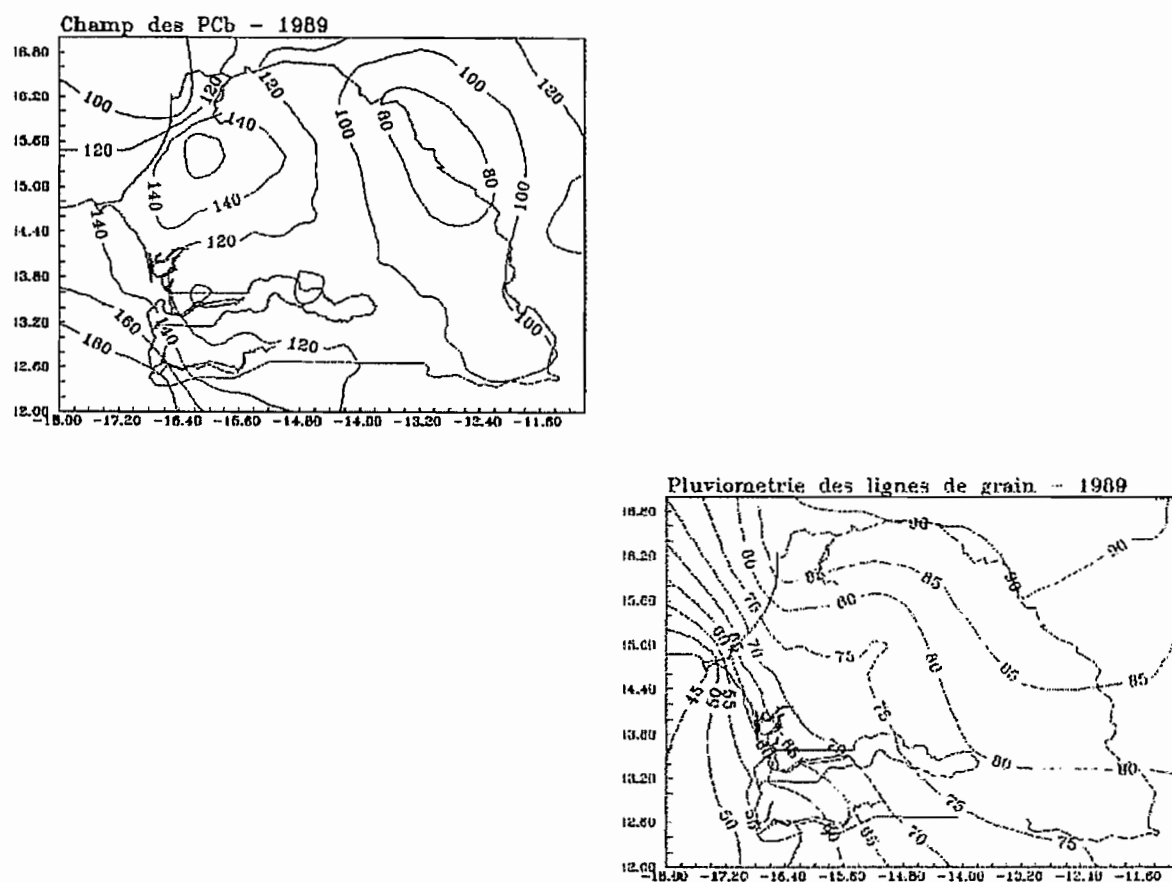


Fig 14: Comparaison entre le champ des PCb (en haut) et les apports pluviométriques dus aux lignes de grain (en %) (selon SAGNA 1993) pour la saison 1989.

Stations	Longitude	Latitude	PCb	% LG
St. Louis 89	-16.45	16.05	0.78	88
Linguère 89	-15.12	15.38	1.44	76
Thiès 89	-16.95	14.80	1.21	68
Dakar 89	-17.50	14.73	1.44	42
Diourbel 89	-16.23	14.65	1.40	73
Kaolack 89	-16.07	14.13	1.11	73
Tambacc. 89	-13.68	13.77	1.06	82
Kolda 89	-14.97	12.88	1.23	71
Matam 89	-13.25	15.63	0.98	90
Kédougou 89	-12.22	12.57	0.92	76
Ziguinchor 89	-16.27	12.55	1.32	54
Podor 89	-14.93	16.63	0.72	99

Tableau 5 PCb et Apports pluviométriques par les lignes de grain (LG%) aux stations synoptiques du Sénégal pour la saison des pluies 1989

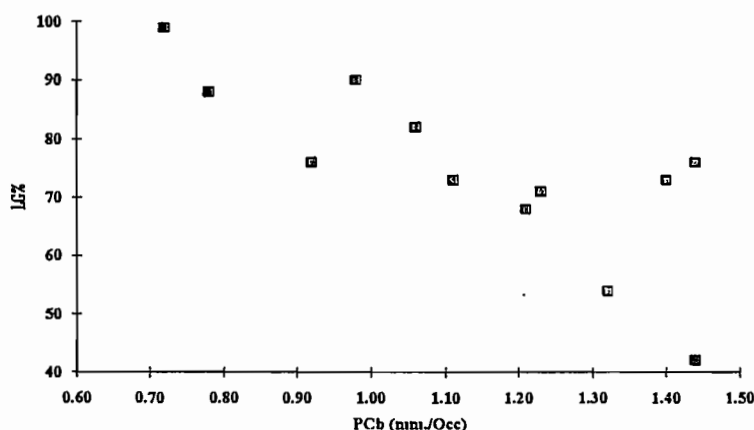


Fig. 15: relation entre les PCb (en mm. de pluie par occurrence de nuage froid) et les apports pluviométriques par les lignes de grain (LG%) sur le Sénégal, au cours de la saison des pluies 1989

La régression linéaire entre les apports pluviométriques dûs aux lignes de grain (LG%) et les valeurs des PCb correspondants, aux stations synoptiques du Sénégal pour la saison des pluies 1989, présente un degré de corrélation tout à fait significatif. ($r=0.64$).

L'indice d'efficacité pluviogénique (PCb) augmente au fur et à mesure que la part des précipitations dues aux lignes de grain décroît. et inversement

La dispersion assez forte des points de la figure 15, peut être expliquée par le fait que les plus fortes valeurs des PCb, qui s'observent lorsque la part des précipitations non associées aux lignes de grain s'accroît, sont dues à deux effets, qui peuvent être conjugués ou non.

- D'une part, la méthode de sélection des nuages précipitants par un seuil à -40°C ne prend pas en compte les nuages de niveau moyen, pourtant pourvoyeurs de précipitations non négligeables dans le cas de flux advecté du SW lors de remontées de la ZITC, ce qui augmente relativement la pluviométrie attribuée aux occurrences comptabilisées.

- D'autre part, certaines perturbations cycloniques produisent bien souvent des précipitations dont les intensités intégrées sur la demi-heure, cadence d'acquisition satellitaire, sont sensiblement plus fortes que celles caractérisant les pluies associées au passage de lignes de grain, aux intensités instantanées certes plus fortes, mais atténuées sur de tels pas de temps du fait de la mobilité (50 km/h en moyenne) de ces perturbations. Ainsi les très fortes averses telles que celles qui s'abattirent sur la Sénégambie les 3 et 4 septembre 1986 (SAGNA, 1988) ou sur l'archipel du Cap-Vert les 27, 28 et 29 septembre 1987 (GUILLOT, 1987) participent par leur ampleur et leur durée au renforcement de cet indice

Cette relation entre l'indice PCb et la nature des précipitations, (qui devra bien entendu être vérifiée sur d'autres séries de mesures: saisonnières, mensuelles, décadaires voire événementielles), est très importante car si elle s'avère pertinente nous pourrions réaliser une régionalisation des champs pluviométriques, reposant non plus sur l'analyse statistique des chroniques de mesures aux stations mais sur une classification typologique des nuages pluviogènes dominants, étape indispensable à la réalisation d'une climatologie de référence qui permettrait ensuite la mise au point de procédures d'estimation pluviométrique satellitaire temps réel.

3-2-3-3: l'algorithme

, Les champs de PCb et de PvT étendus à la zone concernée, soient PCb_{ch} et PvT_{ch} , sont calculés par traitement géostatistique (procédure de krigeage par le logiciel SURFER) à partir des indices aux stations.

Les champs de ces deux indices pluviométriques (PCb et PvT) servent finalement à calibrer les images d'occurrences et du champ thermique de surface, produisant deux champs de pluviométries estimées, qui sont ensuite combinés linéairement selon l'algorithme suivant:

$$P_e = p_1 \cdot [FOC \cdot PCb_{ch}] + p_2 \cdot [T_{max} \cdot PvT_{ch}]$$

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 de calibration avec les fréquences d'occurrences de nuages froids d'une part et avec les températures radiatives maximum du sol d'autre part. Ces deux coefficients ont généralement une valeur proche, pour la saison entière.

La figure 16 présente le schéma d'ensemble des procédures qui réalisent l'estimation finale.

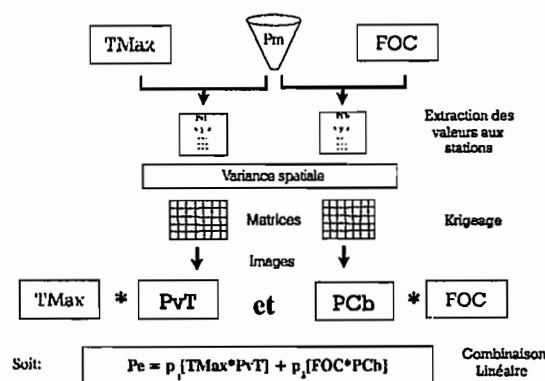


fig.16- Schéma de l'algorithme EPSAT, méthode des indices pluviométriques

3-2-4: la validation de l'estimation.

Les totaux pluviométriques saisonniers estimés ont été validé à la résolution du pixel *Météosat*, par comparaison avec les pluies mesurées à une dizaine de stations de contrôle, indépendantes de celles retenues lors de l'estimation. Nous indiquons dans le tableau 6 les valeurs mesurées aux stations, et celles des pixels correspondants extraits de l'estimation satellitaire, ainsi que les écarts, pour 5 années d'observation.

Stations	1986			1987			1989			1990			1991		
	Pe	Pm	%	Pe	Pm	%	Pe	Pm	%	Pe	Pm	%	Pe	Pm	%
Fatick	456	452	-0.9	536	575	6.8	624	599	-4.2	400	310	-29	400	404	1
Dahra	304	273	-11.4	520	439	-18.5	560	455	-23.1	312	226	-38.1	336	302	-11.3
Goudiry	696	622	-11.9	760	584	-30.1	640	678	5.6	568	436	-30.3	624	534	-16.9
Kaffrine	528	616	14.3	768	591	-29.9	696	567	-25	544	397	-37	456	345	-32.2
Koungueul	768	736	-4.3	704	806	12.7	688	654	-5.2	640	731	12.4	664	606	-9.8
Kidira	648	647	-0.2	616	474	-30	632	822	23.1	504	365	-38.8	624	617	-1.1
Simenti				1160	1195	2.9	928	985	5.8	760	725	-4.8			
Saraya	960	981	2.1	1024	1060	3.4				888	869	-2.2			
N'Diefone													352	308	-14.3

Tableau 6: Comparaison entre pluie mesurée et pluie estimée aux stations de contrôle .

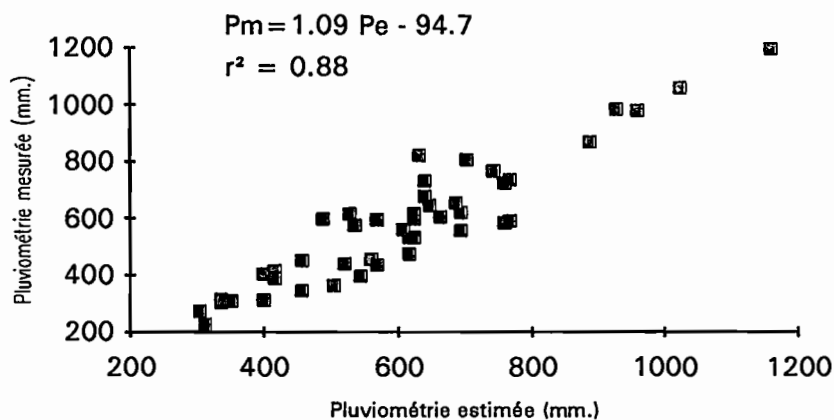


Figure 17: Comparaison entre pluie estimée et pluie mesurée aux stations dédiées à la validation

Une régression linéaire a été calculée pour l'ensemble des valeurs regroupées des 6 années de l'étude; le coefficient de corrélation obtenu ($r^2=0.88$) est tout à fait satisfaisant au niveau saisonnier (fig.17). La figure 18 montre cependant une tendance à la surestimation de la méthode satellitaire par rapport aux relevés des postes pluviométriques.

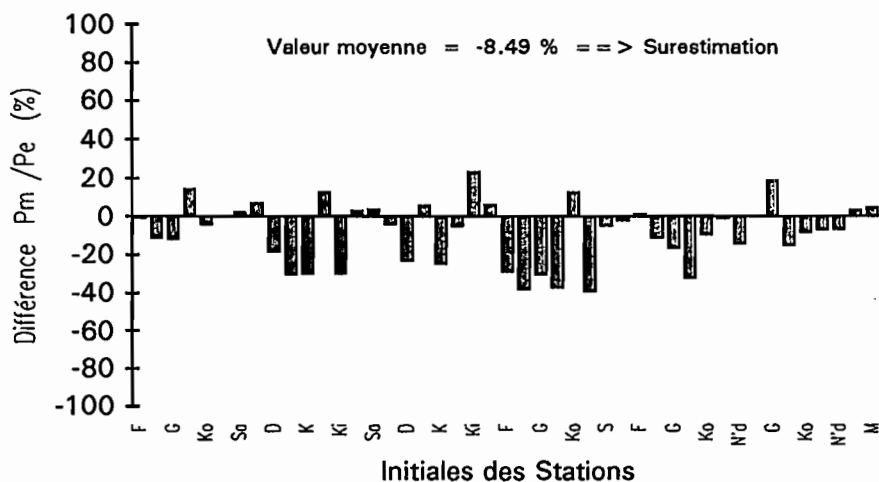


Fig. 18: Résidus centrés entre pluie estimée et pluie mesurée.

Les tableaux de résultats pluviométriques saisonniers présentés en annexe A, donnent les cumuls des lames d'eau décadaires pour le bassin entier et les principaux tributaires, et montrent que dans tous les cas, quelle que soit la taille du bassin, ces cumuls décadaires sont fort peu différents (moins de 10%) des lames d'eau obtenues par traitement réalisé sur les saisons entières. On peut donc considérer que la méthode validée pour les saisons entières est également applicable aux périodes plus courtes et notamment pour des pas de temps de 10 jours. Les différences observées entre pluie estimée et pluie mesurée, peuvent s'expliquer, outre les imperfections de la méthode, par les défauts de représentativité qui existent entre les pluviomètres et les pixels correspondants.

Nous avons montré (fig.8) que dans la région de Richard-Toll, sur un même pixel Meteosat le gradient pluviométrique pour la saison entière, (pour laquelle les hétérogénéités locales sont en partie lissées), pouvait être compris entre 120 et 210 mm, de même FLITCROFT et al. (1987) ont évalué lors d'une expérience réalisée dans la région de Tahoua au Niger, qu'à une distance de 5 kms d'un point de mesure une pluie de 60mm. devait être réduite de 8 mm, soit 13%.

4- LA PLUVIOMETRIE DU BASSIN DE 1986 A 1992

Les résultats des estimations pluviométriques décennales et saisonnières sont donnés dans l'annexe A. Chaque fiche présente outre les hauteurs des lames d'eau par décades et par bassins, les résultats des tests de validation correspondants effectués sur chacune des synthèses saisonnières. Les champs pluviométriques saisonniers sont présentés sur la planche 1, tandis que la planche 2 illustre la progression des champs de pluies décennales au cours de la saison 1989.

Nous ne disposons pour cette étude que des scènes meteosat couvrant les périodes mai à octobre de chaque année; nous n'avons donc pas pris en compte les précipitations du début de saison (mars, avril) et de fin de saison (novembre) qui ne sont bien entendu pas négligeable particulièrement sur la partie septentrionale du bassin.. comme le montre le tableau 7.

La proportion moyenne de la lame d'eau ayant intéressé le bassin entier pour ces deux périodes d'avant et de fin de saison est de l'ordre de 3,5% de la pluviométrie annuelle totale. ce qui nous permet d'admettre que notre étude est représentative des saisons pluvieuses. entières.

Stations	Pluies Nov-Avril (%)
Podor	2.1 %
MATAM	1.3 %
KAYES	0.8 %
KEDOUGOU	2 %
LABE	6.25 %
MAMOU	10.6 %

Tableau 7: Proportion de la pluviométrie hors saison mai-octobre (d'après SOW, 1984)

4-1: Caractéristiques des bassins étudiés

Nous traiterons dans ce chapitre de la pluviométrie de l'ensemble du bassin mais aussi celle des principaux bassins secondaires représentés sur la figure 19, dont les caractéristiques morphométriques sont indiquées dans le tableau 8

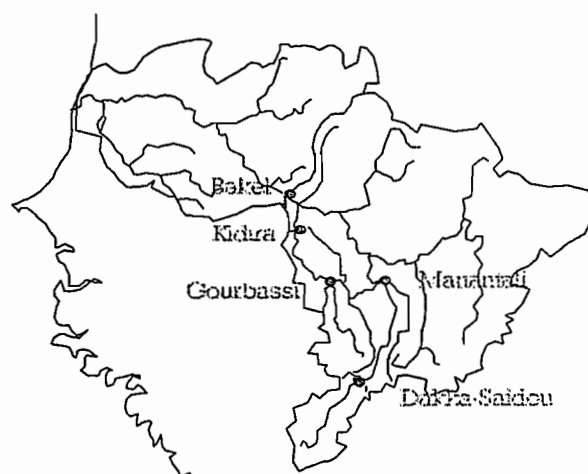


fig.19: carte de présentation des différents bassins étudiés .

Les caractéristiques physiques de forme, surface et relief d'un bassin sont calculées comme suit: (dans ROCHETTE, 1974)

- surface du bassin A - périmètre du bassin P - coefficient de forme $C = 0.28 P/A$

- longueur et largeur du rectangle équivalent: $L = C_A/1.12 [1 \pm 1 - (1.12/C)^2]$

- indice de pente $lp = 1/L_{bi} (ai - ai - 1)$

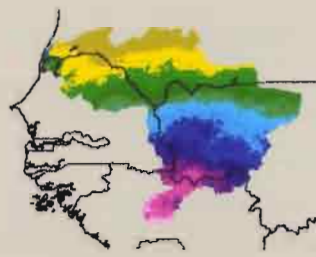
(b_i = fraction de la surface A comprise entre les courbes de niveau cotées a_i et a_{i-1})

- indice général de pente $iG = D/L$

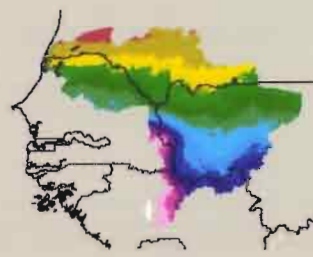
(D = la dénivelée qui sépare les altitudes ayant 5% de la surface du bassin au-dessus et au-dessous d'elles)

Planche 1

Pluviometrie Saisonniere
du bassin du fleuve Senegal



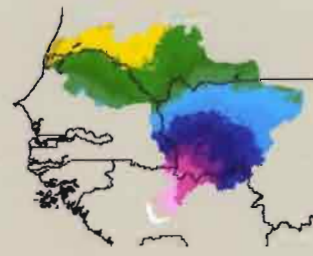
1986



1987



1988



1989



1990



1991



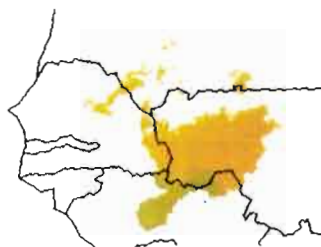
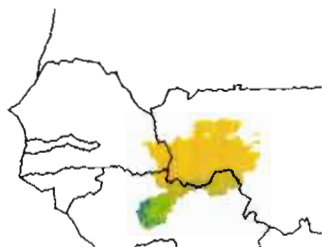
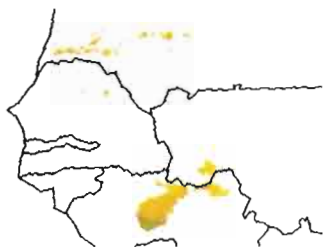
Planche 2

1ere Decade

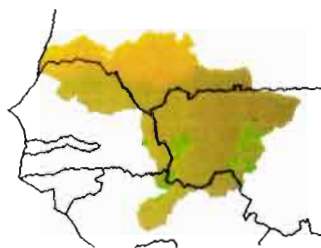
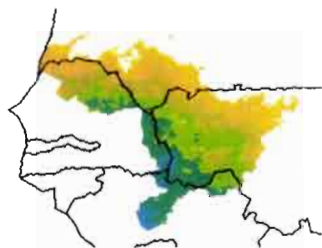
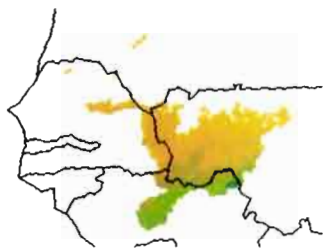
2eme Decade

3eme Decade

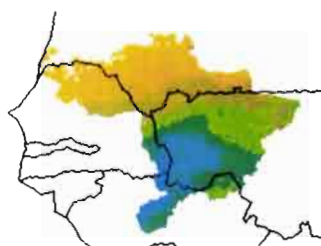
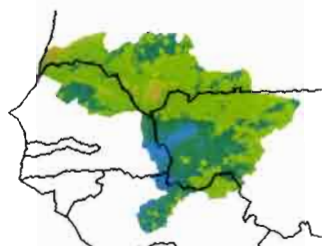
MAI



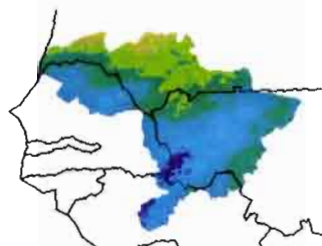
JUIN



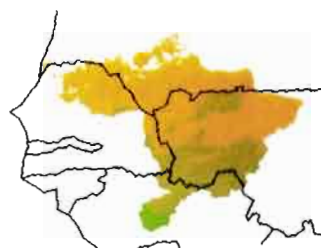
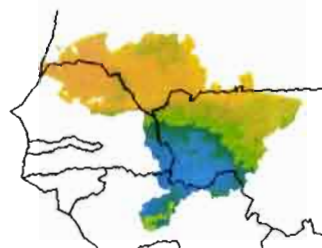
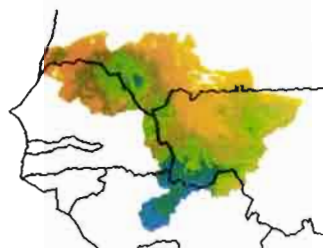
JUILLET



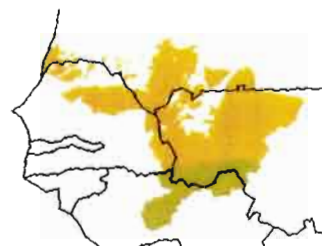
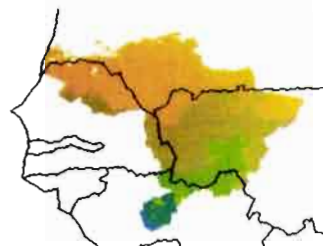
AOUT



SEPTEMBRE



OCTOBRE



Bassins	exhutoires	Superficies	Ip	iG	Alt. Max	Alt.min
Faleme	Gourbassi	17 100 km ²	0.05	2.3	906	79
Faleme	Kidira	28 900 km ²	0.033	1.5	906	19
Bafing	Dakka Saidou	15 700 km ²	0.047	1.59	1330	307
Bafing	Manantali	32 500 km ²	0.038	1.05	1330	140

Tableau 8: caractéristiques des bassins étudiés.

4-2: la climatologie de référence

Le centre Agrhymet de Niamey viens de publier l'"Atlas agroclimatique des pays du CILSS" (MOREL, 1993), qui contient notamment une importante est très actuelle climatologie des précipitations sur le sous continent.

Les moyennes interannuelles ont été classées selon les trois périodes suivantes:

- 1) 1950-1967 : Référence de période humide
- 2) 1951-1980 : Normale intersaisonnière
- 3) 1968-1985 : Référence de période sèche actuelle.

Différents tests de contrôle de qualité des données ont permis à l'auteur d'éliminer les valeurs douteuses, et de proposer ainsi un catalogue de données de référence d'une bonne fiabilité.

La figure 20 représente la distribution moyenne des isohyètes sur le bassin pour la saison des pluies (de mai à octobre) pour les trois périodes considérées.

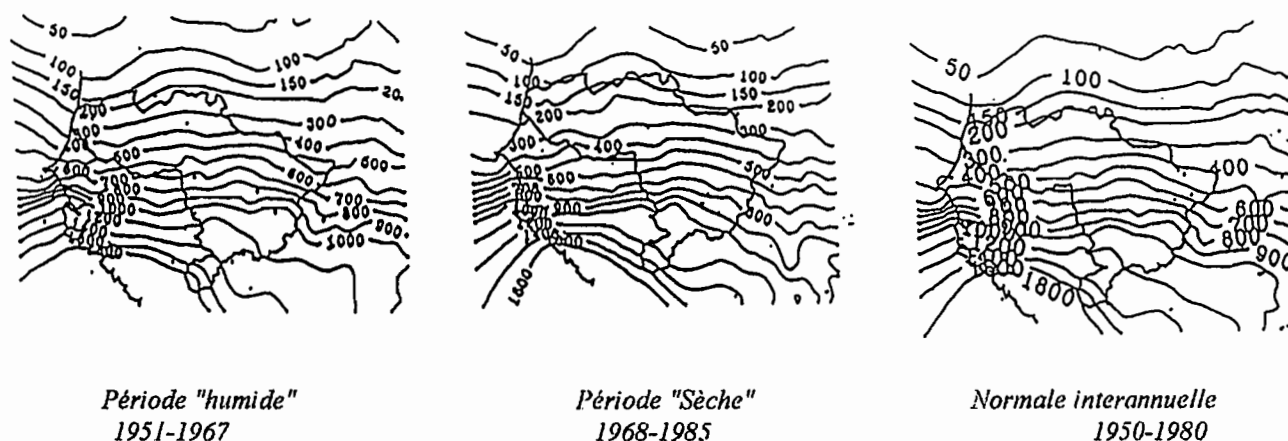


Fig.20: Climatologie des précipitations sur le bassin pour trois périodes de référence.
(d'après l'Atlas Agroclimatique des Pays du CILSS, Agrhymet 1992)

(Les différentes cartes des pluviométries normalisées mensuelles et saisonnières pour les trois périodes citées en référence sont regroupées dans l'annexe B)

Les isocontours ont été tracés par krigeage à l'aide du progiciel *Surfer*. Des images à la projection Météosat ont ensuite été calculées à l'aide du logiciel TRISKEL (DAGORNE, 1988) à partir des fichiers matriciels issus de *Surfer*; sur ces images, des masques des différents bassins étudiés ont été appliqués puis les épaisseurs des lames d'eau mensuelles ont été calculées par le logiciel EPSAT-μ.

Le tableau 9 donne les valeurs mesurées en mm. sur l'ensemble du bassin pour les trois périodes de référence.

	1950-1967	1951-1980	1968-1985
Mai	31	31	27
Juin	83	73	63
Juillet	156	146	129
Aout	225	195	159
Septembre	165	140	109
Octobre	46	36	29
Saison	706	621	516

Tableau 9: Moyennes interannuelles pour 3 types de pluviosité: humide, sèche et normale. (extraites de l'Atlas agro-climatologique des pays du CILSS, AGRHYMET)

4-3: la répartition des pluies dans le temps

Le FIT (Front intertropical) atteint habituellement la limite sud du bassin au cours du mois d'avril, puis progresse vers le nord jusqu'à la fin du mois d'août, après quoi il commence son mouvement de repli méridional; les ultimes pluies de la saison arrosent les hauteurs du Fouta D'jalou fin octobre à début novembre.

La figure 21 qui représente les cumuls décadaires interannuels, illustre ce mouvement et montre que la répartition des pluies dans le temps obéit à une distribution gaussienne à 2 modes. Un premier pic apparaît en 3ème décade de juillet puis suit un léger fléchissement de l'histogramme, avant d'atteindre la 3ème décade du mois d'août, la plus arrosée. La plupart des saisons étudiées présentent cette configuration caractéristique d'une décade très déficitaire au beau milieu de la saison des pluies. (Annexe A).

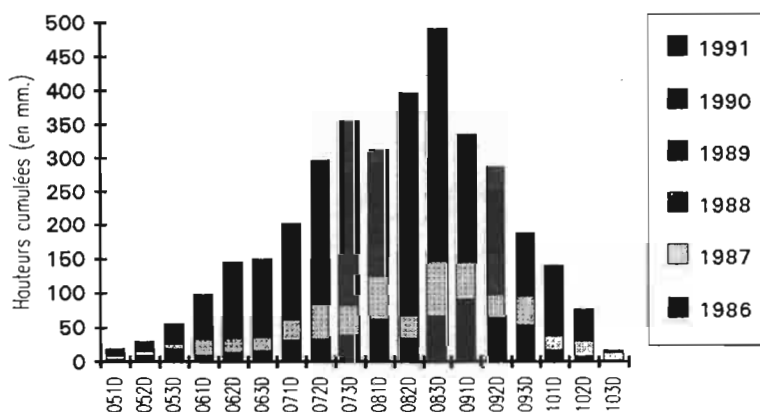


Fig.21: pluviométries décadaires interannuelles cumulées

4-4: les saisons 1986 à 1992

Nous avons représenté sur la figure 22 les hauteurs des lames d'eau sur le bassin entier pour les sept saisons étudiées en y figurant par deux traits horizontaux les valeurs des moyennes interannuelles proposées par le centre AGRHYMET pour les deux périodes de références extrêmes: humide et sèche. (Les champs pluviométriques estimés pour les saisons 1986 à 1991 sont présentés sur la planche 1)

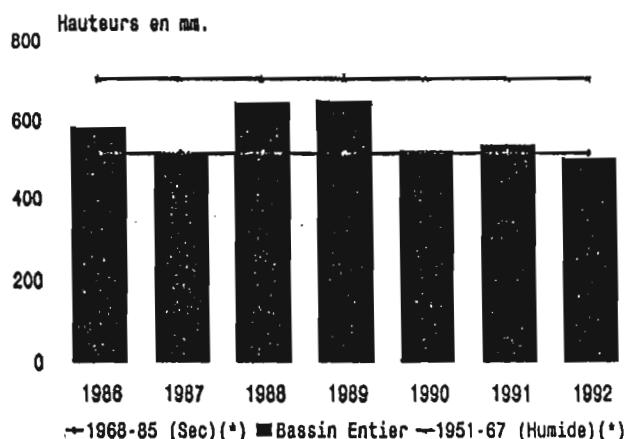


Fig.21: Lames d'eau précipitées sur le bassin au cours des saisons des pluies 1986 à 1992.

Aucune des 7 saisons concernées n'atteint la moyenne de pluviosité de la période "humide" (1950-1965); celles qui s'en rapprochent le plus, les saisons 1988 et 1989, sont par contre dans la normale 1951-1980.

Les cinq autres saisons sont toutes largement déficitaires; la lame d'eau enregistrée sur le bassin en 1992, est même légèrement inférieure à la moyenne de la période "sèche" (1968-1985)

L'analyse des lames précipitées sur les principaux sous-bassins (fig.22) apporte un éclairage sensiblement différent, sur la nature de ces 7 dernières saisons des pluies.

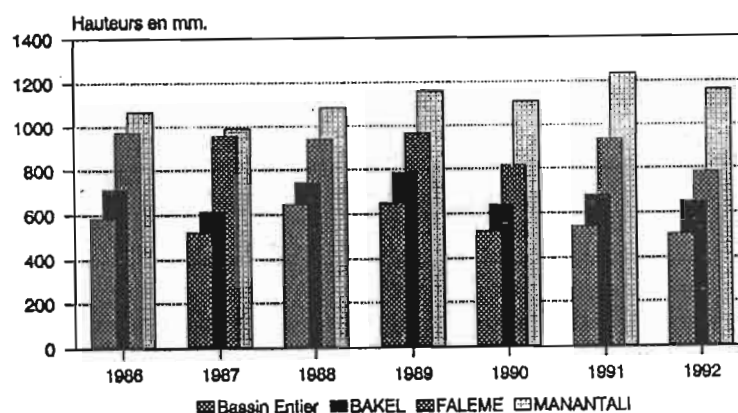


Fig.22: Lames d'eau précipitées au cours des saisons 1986 à 1992 sur les tributaires étudiés.

Le fait le plus marquant réside dans les différences de pluviosités observées sur les deux bassins pourtant contigus de la Faleme à Kidira et du Bafing à Manantali. Les lames d'eau mesurées sur ces deux bassins au cours des deux saisons 1986 et 1987 étaient très voisines. Par la suite la différence, en faveur de la pluviosité du Bafing, a été de plus en plus marquée pour atteindre un maximum en 1992.

Ceci devrait apparaître dans les compositions chimiques des eaux provenant respectivement de ces deux bassins, caractérisées par une géochimie moyenne sensiblement différente, la Falémé étant un plus important pourvoyeur de l'élément Fe notamment. (ORANGE, 1990)

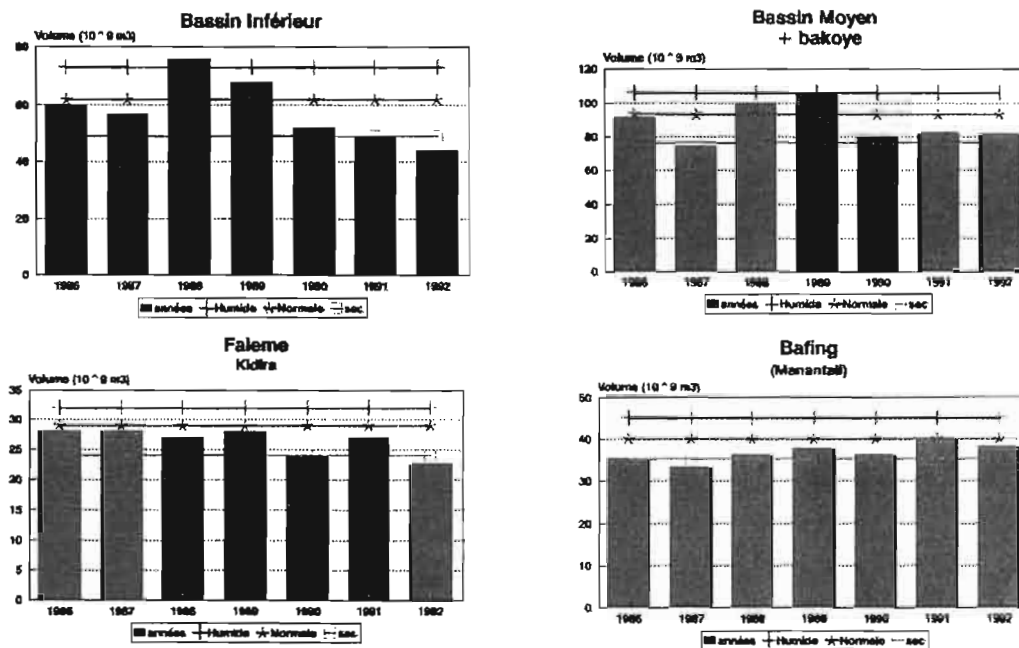


Fig. 24: Hauteurs d'eau saisonnières sur les différents bassins étudiés.. (nous avons porté sur chaque graphe. 3 traits qui représentent de bas en haut, les références 1968/85, 1951/80 et 1951/67)

Cette différence de comportement entre les différents bassins étudiés, remet partiellement en question le schéma de cohérence interne présenté par JANICOT (1992); il semble que le découpage proposé par MAHE (1993) soit mieux adapté aux distributions pluviométriques observées au cours de la période 1986-1992.

L'analyse de la figure 24 montre :que:

- le bassin inférieur (de l'embouchure à Bakel) a connu des saisons très variables allant de pluviosités, quasi normale (1986) à excédentaire (1988) et à très déficitaire (1991 et surtout 1992))
- la Faleme a reçu lors des 4 premières saisons étudiées, une pluviosité assez constante légèrement inférieure à la normale.puis a connu en 1990 et surtout en 1992 deux très mauvaises saisons, entrecoupées par une saison mitigée en 1991
- au contraire, le Bafing, après 5 saisons (1986 à 1990) très déficitaires (particulièrement 1987) a enfin retrouvé des situations pluviométriques plus conformes à la normale au cours des deux dernières saisons.
- enfin le reste du bassin (Bassin moyen + Bakoye) a comme le bassin inférieur vécu des hivernages très hétérogènes avec un maximum en 1989 (niveau de période humide) et un minimum très marqué en 1987 (inférieur à la moyenne 1968/85)

En résumé, la zone nord a connu 2 bonnes saisons des pluies (1988 et 1989) , une saison pratiquement normale (1986) et 4 saisons déficitaires à très déficitaires.(1987,1990,1991 et surtout 1992). Le haut bassin n'a quant à lui pas connu un seul hivernage excédentaire, ni même normal excepté sur le Bafing en 1991.

4-5: Les cartes d'anomalies saisonnières

Les cartes dressées par l'estimation EPSAT sont comparées à celles déduites des champs moyens interannuels proposés par le centre AGRYMET de Niamey, de façon à

cartographier le plus finement possible les anomalies, positives ou négatives, rencontrées pour chaque saison, pour l'ensemble du bassin et aussi pour les différents bassins secondaires.

(Il faut cependant émettre certaines réserves quant à la méthode qui consiste à comparer deux documents de natures différentes; l'un l'imagerie satellitaire, est par définition un produit "raster" constitué de pixels, tandis que l'autre, le champ krigé est au départ un produit vectoriel, rasterisé par la suite puis redressé pour pouvoir être superposable au pixel près avec le produit satellitaire La cartographie des anomalies présentée sur la figure 25 doit donc être appréciée surtout comme un document qualitatif.)

Fig.25: Cartographie des anomalies pluviométriques pour les saisons 1986 à 1991, par comparaison avec les champs AGRHYMET de la normale saisonnière 1951-1980. (Les plages jaunes et rouges correspondent aux zones à pluviométrie déficitaire à très déficitaire., tandis que les plages bleues claires et foncées délimitent les pluviosités excédentaires et très excédentaires)

4-6: Précipitations et écoulements sur le bassin de la Falémé à Gourbassi

La Falémé a connu ces dernières années, des étiages très sévères, dûs à une longue série de saisons des pluies déficitaires ce qui a provoqué un fort tarissement des nappes. Ainsi la station de Gourbassi a-t-elle enregistré des débits nuls pendant plusieurs semaines au cours des saisons 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 km²) avec l'indice de pente moyen le plus fort de l'ensemble du bassin du Sénégal. Puisque le point de départ de l'écoulement saisonnier ainsi que celui de la saison des pluies peuvent être aisément datés, nous avons pu comparer les lames d'eau précipitées cumulées aux débits cumulés, et ceci au pas de temps décadaire. (fig.26)

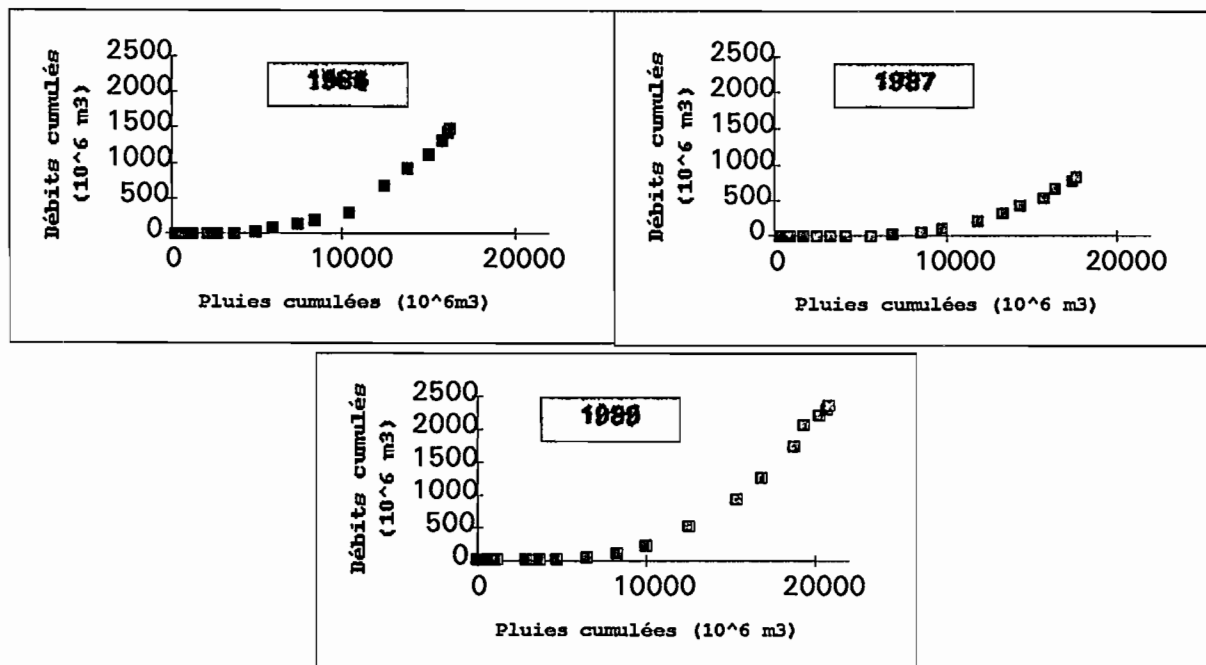


Figure 26: Relations pluviométrie cumulées / débits cumulés dans la Falémé à Gourbassi, pour les 3 saisons 1986 1987 et 1989.

Nous avons regroupés sur la figure 27, les points de mesure obtenus pour les 3 saisons, en faisant coïncider en abscisse les trois points de départ des 3 saisons des pluies concernées.

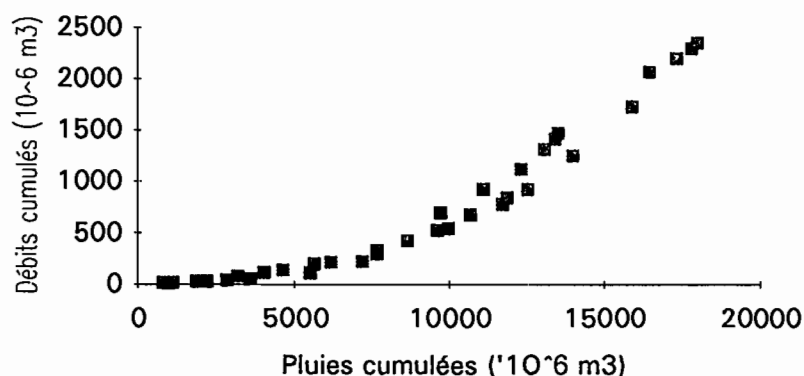


Fig.27: Relation pluviométrie décadaire cumulée et débits cumulés sur le bassin de la Falémé à Gourbassi, pour les saisons 1986, 1987 et 1989.

Le meilleur ajustement a été obtenu par une fonction polynomiale du 2ème 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 obtenu ($r^2=0.97$) montre que ces deux paramètres sont fortement corrélés quelle que soit la saison considérée.

CONCLUSION

L'efficacité de l'utilisation de l'imagerie infrarouge Meteosat pour l'estimation des lames d'eau précipitées sur le bassin du fleuve Sénégal est démontrée, dans cette région où la trop faible densité des points de mesures au sol, ajoutée à la forte variabilité spatiale de la pluie, rendent souvent inopérentes les méthodes de spatialisation conventionnelles.

Outre cette utilisation de la télédétection satellitaire dans des méthodes de quantification volumique de la pluviométrie, les indices pluviométriques définis - PCb et PvT - semblent être de bons outils statistiques pour l'étude qualitative des champs de pluie, et ouvrent deux voies distinctes pour la conception de références de calibration permettant d'envisager la réalisation de produits satellitaires d'estimation quantitative de la pluviométrie en temps réel, dérivés de l'infrarouge Meteosat.

- La bonne relation qui existe notamment entre les champs de PCb et les cartes des apports pluviométriques par les lignes de grain, ouvre une voie prometteuse pour une étude sur la régionalisation des champs de pluie, étape indispensable à l'établissement d'une climatologie des précipitations utilisable dans les types d'algorithmes que nous utilisons.

- La relation [hauteur de pluie/Température radiative] aux stations semble plus pertinente interannuellement que celle se rapportant à la pluie et aux occurrences nuageuses. Pour la rendre plus efficace encore il est impérieux de tenir compte des effets atmosphériques. Le couplage de cet indice PvT avec les données ad hoc obtenues par inversion des mesures du TOVS des satellites NOAA paraît être une bonne voie pour atteindre un tel objectif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARKIN P. - 1981
The relationship between fractional cloud coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. *Mon. Wea. Rev.*, 107, pp.1382-1387.
- ASSAD E. - 1987
Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne. Cas du Sénégal. *Thèse hydrologie - Montpellier*, 260 p.
- CARBONNEL J.P., HUBERT P., WALBADET E., MERMOUD A., BARIAC T. - 1990
Variabilité spatiale des précipitations soudano-sahéliennes à l'échelle décamétrique. *C.R.A.S Paris, t.311, Série II, p.1425-1430.*
- CARN M., LAHUEC J.P. - 1987
Estimation des précipitations au Niger au cours de la saison des pluies 1986 à partir de l'imagerie infrarouge Meteosat. Bilan et critique des méthodes utilisées. *Veille Clim. Sat.*, n°17, Lannion, pp.40-49.
- CARN M., LAHUEC J.P., DAGORNE D., GUILLOT B. - 1989
Rainfall Estimation using TIR Meteosat imagery: Importance of the Soil Surface maximum radiative Temperature in Satellite derived Rainfall assessments over Western Sahel. *Proceeding of the 4th Conference on Satellite Meteorology and Oceanology, San Diego, California; May 1989, pp.126-129*
- CARN M., LAHUEC J.P. - 1990
The maximum radiative temperature: a major satellite derived parameter for estimating rainfall in western Sahel. *Proceedings of the 8th Meteosat Scientific Users Meeting, Norkopping sweden., 28-31 Aout 1990. pp. 221-231 .*
- CARN M., SONKO P.N., GAC J.Y., GUILLOT B. - 1992
EPSAT- μ , Logiciel de traitement d'images pour l'estimation de la pluviométrie à partir de l'imagerie IR-Météosat. *Rapport EQUÉSEN, mars 1992, 42 pages.*
- CARN.M - CITEAU J. - PESIN A. - JARRIGE F. (1994)
Improvement of rainfall estimate in arid areas using Meteosat and TOVS data. 7th. Australasian Remote Sensing Conference. 1-4 March 1994, Melbourne, Australia. (communication acceptée en poster session)
- CERON J.P. - 1990
Influence de la circulation générale à 200 hpa sur la pluie au Sahel. WMO, Tropical Meteorology Research Programme Report Series, 36, 21-28
- CITEAU J., FINAUD L., CAMMAS J.P, DEMARCQ H. - 1989
Questions relatives to ITCZ migrations over the tropical Atlantique ocean, sea surface temperature and Senegal river runoff. *Meteorology and Atmospheric Physics, 41, pp.180-190.*
- CITEAU J., MAHE G., DEMARCQ H., GORYL Ph., - 1991
Some elements for understanding and forecast the west african monsoon using Meteosat and ECMWF data. Abstracts of the XVI Assembly of the European Geophysical Assembly, Weisbaden, 22-26 April 1991.
- DAGORNE D. - 1989
Remote sensing software for meteorological satellite. Proceedings of the 7th Meteosat Scientific Users's Meeting. Madrid 1988, pp.387-391.
- FLITCROFT I.D., DUGDALE G., MILFORD J.R - 1988
Relationship of point measurements and area estimates with particular reference to rainfall. *Proceedings of the 7th Meteosat Scientific user's meeting, Madrid, pp.201-207..*
- GUILLOT B., BELLEC B., LAHUEC J.P. - 1987
Convection intertropicale et pluviométrie - Essai de mise en relation pour l'Afrique de l'ouest du 11 mai au 20 aout 1985. *Adv. Space Res.*, vol 7, n°3, pp.59-66.
- GUILLOT B., CITEAU J., NOYALET A., LAHUEC J.P. - 1987
Déluge au Cap-Vert et sur la côte nord du golfe de Guinée. *Veille Clim. Satellitaire, 20, pp.43-53.*

- CADET D., GUILLOT B. - 1991
EPSAT: Estimation des précipitations par satellite. ORSTOM Editeur, 63 pages
- GEFFARD S. - 1990
Utilisation de séries temporelles de données satellitaires (NOAA-AVHRR) dans l'étude de la dynamique des systèmes hydrologiques en Afrique de l'ouest. *D.E.A National d'hydrologie, Université de Paris XI.*
- HARDY S., DUGDALE G., MILFORD J.R., SUTCLIFFE J.V. - 1988
The use of satellite derived rainfall estimates in water management. *Proceedings of the 7th Meteosat Scientific Users Meeting, Madrid, Sept. 1988, pp. 261-266.*
- HUBERT P., FOUERE P., LEBEL T. - 1991
Influence de l'échantillonnage des intensités pluviométriques sur l'estimation des effets cumulés. *Bull. Veille Clim. Sat., n°38, pp.50-56.*
- JANICOT S. - 1992
Spatiotemporal variability of West African Rainfall. Part 1: Regionalizations and Typings. *Journal of Climate, vol 5, n°5, 489-497.*
- LAHUEC J.P., GUILLOT B., BELLEC B. - 1986
Relationship between deep convection and rainfall in Africa. *Proceedings of the 6th. Meteosat Sci. Use. Meet., Amsterdam, 25-27 nov. 1986, vol. 2.*
- LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPFFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B., HUBERT P. (1991)
Estimation des précipitations au Sahel: l'expérience EPSAT-Niger. *Hydrologie Continentale, vol 6, n°2, pp.133-143.*
- LEROUX M. - 1980
Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse Lettres. Géographie. Univ. Dakar. 1427 p.
- MAHE G. - 1993
Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes extrêmes. *Collection Etudes et Thèses, Ed. ORSTOM, 438 pages*
- MICHEL P. - 1973
Les bassins du Sénégal et de la Gambie: étude géomorphologique. Thèse lettres, Géographie, Univ. de Strasbourg, Mémoire ORSTOM n°63, Paris, 3 tomes, 753 p.
- MOREL R. - 1993
L'Atlas agroclimatologique des pays du CILSS. *Veille Clim. Satellitaire n°45, pp..*
- NEGRE T., IMBERNON J., GUINOT J.P., SEGUIN B., BERGES J.C., GUILLOT B. - 1988
Estimation et suivi de la pluviométrie au Sénégal par satellite Meteosat. *L'Agronomie Tropicale, vol 43, 4, pp.279-288.*
- NICHOLSON S.E. - 1980
The nature of rainfall fluctuations in sub-tropical West Africa. *Monthly Weather Review, 108, 473-487.*
- OLIVRY J.C. - 1983
Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap-Vert, examen de quelques séries de longue durée. *Cahiers ORSTOM, série hydrologie, XX, pp.47-69.*
- ORANGE D. - 1992
Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. *Sciences Géologiques. mémoire n°93, Université Louis Pasteur Strasbourg, 198 pages.*
- PITMAN W.V. - 1976
A mathematical model for generating daily river flows from meteorological data in South Africa. *Report n° 2/76 hydrological research unit, Univ. of the Witwatersrand, South Africa.*
- ROCHETTE C. - 1974
Le bassin du fleuve Sénégal. *Coll. Monographies Hydrologiques ORSTOM, ORSTOM Ed., 440 p.*
- SAGNA P. - 1988
Perturbation cyclonique en Afrique de l'ouest et précipitations enregistrées en Sénégambie. *Veille Clim. Satellitaire, 25, pp.39-46*

- SAGNA P. - 1993
Etude des saisons des pluies 1989 et 1990 au Sénégal. *Veille Clim. Satellitaire*, 44, pp.55-71.
- SEGUIN B. - 1992
Approche de l'évapotranspiration par télédétection: utilisation des satellites Météosat et NOAA en Afrique sahélienne. "L'aridité une contrainte au développement", *Didactiques, ORSTOM Ed.*, 14 p.
- SIRCOULON J. - 1990
Le réseau pluviométrique en Afrique de l'ouest. Journée de réflexion sur "La variabilité climatique en Afrique", *Ministère de la Recherche et de la Technologie*, 10 p.
- SOLOMON S.I., PIETRONIRO A., WISHART W., PIEYNS S., GUILLOT B. CARN M. - 1988
Application de la télédétection à l'évaluation des ressources en eau du Sahel. *Veille Climatique Satellitaire*, n°24, 26-37.
- SOW A.A. - 1984
Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. Contribution à l'hydrologie fluviale en domaine tropical humide africain. *Thèse 3ème cycle, Université de Nancy (France)*, 442 pages.

Annexe A

Tableaux des pluviométries saisonniers

Notes:

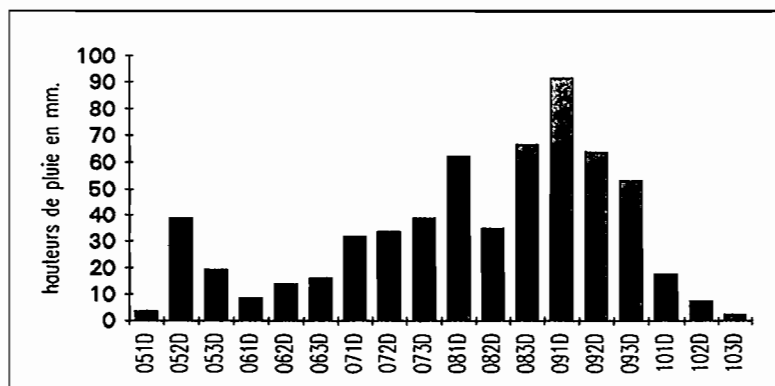
Les valeurs de lames d'eau précipitée sont données en mm

Les valeurs figurant sur la ligne 'Saison (EPSAT)' correspondent aux estimations réalisées à partir des synthèses saisonnières d'occurrences et de champ thermique de surface. Ce sont ces synthèses qui ont été validées.

Les graphes de bas de tableaux correspondent aux lames d'eau décadaires sur le bassin entier.

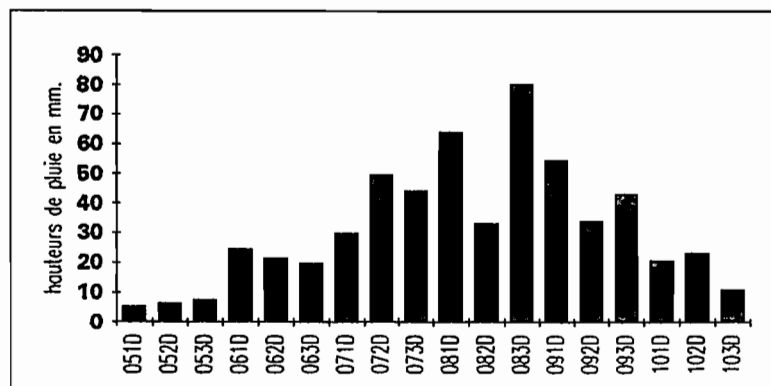
Saison 1986

<i>Surfaces (km²)</i>	Bassin 368000	Bakel 218000	Kidira 28900	Gourbassi 17100	Manantali 32500	Dakka S. 15700
Décades						
051D	3.69	5.32	7.1	10.19	13.89	18.28
052D	39.01	12.11	15.32	22.65	31.67	40.48
053D	19.27	27.92	32.07	40.79	54.68	64.21
061D	8.74	12.59	17.57	21.36	23.98	26.57
062D	13.91	19.12	26.15	31.25	38.27	41.34
063D	16.3	22.96	29.61	33.07	39.57	43.01
071D	31.86	40.64	49.29	59.18	67.44	73.34
072D	33.72	47.59	62.72	70.9	66.23	64.43
073D	38.89	50.45	53.72	57.42	59.98	66.03
081D	62.35	70.94	71.87	84.37	101.69	101.79
082D	34.87	43.23	53.72	58.33	65.25	70.88
083D	66.78	87.91	101.38	117.57	125.23	127.57
091D	91.63	101.44	118.34	122.24	123.19	125.14
092D	63.66	66.25	77.65	79.3	84.61	90.87
093D	53.27	59.18	66.16	71.22	77.63	84.47
101D	17.72	24.01	39.09	44.77	48.12	54.21
102D	7.67	10.76	17.68	20.76	23	27.56
103D	2.54	3.38	6.2	5.91	10.24	15.42
Total Decades	608	708	846	951	1055	1138
Saison (EPSAT)	583	714	975	1067	1068	1162
VALIDATION $r^2 = 0.95$						
Stations	Fatick	Dahra	Goudiry	Koungueul	Kidira	Saraya
Pluie mesurée	452	273	622	736	647	981
Pluie estimée	456	304	696	768	648	960
delta (%)	-0.9	-11.4	-11.9	-4.3	-0.2	2.1



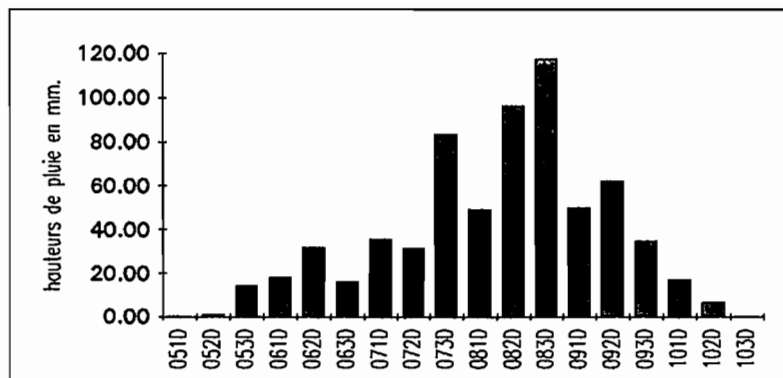
Saison 1987

Surfaces (km ²)	Bassin 368000	Bakel 218000	Kidira 28900	Gourbassei 17100	Manantali 32500	Dakka S. 15700
Décades						
051D	5.2	7.52	10.5	16.64	24.94	35.92
052D	6.4	9.23	12.14	19.7	28.82	38.02
053D	7.47	10.46	11.98	17.09	24.61	32.52
061D	24.62	31.78	36.55	43.41	54.42	65.42
062D	21.57	28.09	41.88	47.19	57.14	66.52
063D	19.77	26.89	36.98	43.06	44.15	46.75
071D	29.82	40.3	52.15	58.58	65.93	63.62
072D	49.74	60.28	77.65	84.86	92.73	98.68
073D	44.14	51.95	60.97	66.82	74.53	82.66
081D	63.93	75.63	98.08	100.78	105.89	113.61
082D	33.16	47.67	57.14	70.12	88	98.46
083D	80.34	96.51	117.94	124.39	124.51	130.96
091D	54.51	61.16	84.16	87.89	88.38	91.77
092D	33.91	39.54	52.18	57.14	62.22	67.68
093D	43.23	46.7	72.59	77.3	79.34	88.96
101D	20.51	25.62	37.72	41.51	39.67	42.06
102D	23.35	29.69	48.64	59.88	65.91	78.13
103D	11.07	14.45	8.79	9.16	18.58	23.68
Total Decades	573	703	916	1026	1140	1265
Saison (EPSAT)	520	616	957	960	991	1157
VALIDATION $r^2 = 0.83$						
Stations	Fatick	Dahra	Goudiry	Koungusul	Kidira	Saraya
Pluie mesurée	575	439	584	806	474	1024
Pluie estimée	536	520	760	704	616	1060
delta (%)	6.8	-18.5	-30.1	12.7	-30.0	-3.5



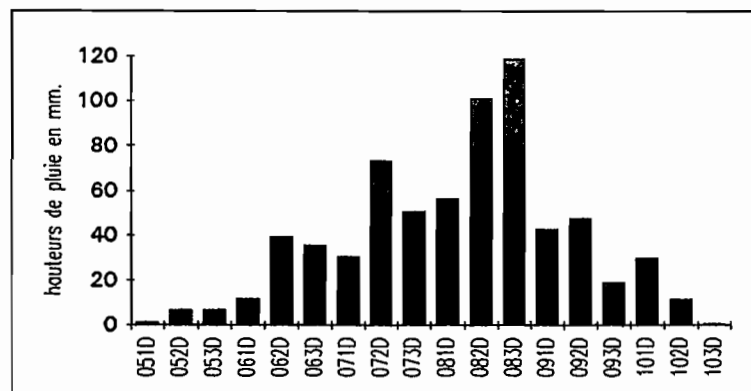
Saison 1988

	Bassin <i>Surfaces (km²)</i> 368000	Bakel 218000	Kidira 28900	Gourbassi 17100	Manantali 32500	Dakka S. 15700
Décades						
051D	0.28	0.39	0.21	0.35	3.23	3.87
052D	1.06	1.40	0.25	0.41	7.81	8.18
053D	14.42	19.65	34.01	39.57	61.10	68.09
061D	18.30	24.71	35.75	48.47	47.10	71.70
062D	31.71	41.99	47.13	48.39	47.49	78.36
063D	16.30	18.08	12.88	6.57	4.27	13.80
071D	35.76	49.27	77.94	93.25	57.21	100.14
072D	31.57	41.90	60.80	68.30	56.38	91.09
073D	83.56	102.22	109.95	112.62	107.50	173.22
081D	49.34	51.13	57.81	60.94	66.08	91.56
082D	96.40	112.87	106.87	112.17	112.25	190.45
083D	117.50	119.53	136.62	147.10	165.09	226.09
091D	50.00	53.60	84.50	90.43	93.59	111.75
092D	62.30	63.12	71.49	83.33	79.32	123.51
093D	34.74	32.44	43.67	51.57	52.59	82.87
101D	16.98	22.53	39.59	39.96	49.18	64.38
102D	6.73	8.81	12.65	18.86	19.74	27.54
103D	0.31	0.19	0.36	0.52	0.80	0.83
Total Decades	667	764	932	1023	1031	1527
Saison (EPSAT)	646	744	938	1040	1089	1489
VALIDATION $r^2 = 0.90$						
Stations	Fatiok	Dahra	Kaffrine	Koungueul	Kidira	Malem Hod.
Pluie mesurée	615	415	706	619	319	682
Pluie estimée	586	435	672	562	355	706
delta (%)	4.7	-4.8	4.8	9.2	-11.3	-3.4



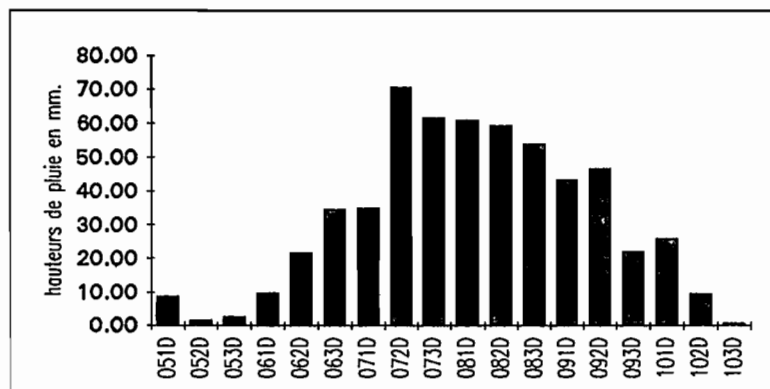
Saison 1989

<i>Surfaces (km²)</i>	Bassein 368000	Bakel 218000	Kidira 28900	Gourbassi 17100	Menentali 32500	Dakka S. 15700
Décades						
051D	1.22	1.71	0.6	1.04	10.61	25.65
052D	6.76	9.82	11.99	19.21	41.59	46.39
053D	6.64	9.52	12.84	20.12	30.12	49.25
061D	11.56	16.53	23.74	29.69	47.29	59.28
062D	39.04	44.85	90.5	95.41	86.17	99.51
063D	35.27	40.8	47.73	49.03	47.27	65.27
071D	30.47	39.12	49.1	62.18	61.45	73.99
072D	73.02	76.48	99.02	100.48	84.88	107.26
073D	50.51	67.68	97.38	111.88	107.28	114.23
081D	56.46	71.36	82.27	96.6	100.45	102.44
082D	100.78	106.44	132.2	144.38	133.86	139.56
083D	118.44	131.88	153.9	170.08	175.25	183.95
091D	42.43	45.16	70.28	85.69	91.82	98.75
092D	47.33	60.16	101.53	110.93	105.37	107.89
093D	18.79	25	28.58	32.68	43.57	50.84
101D	29.86	38.26	42.72	50.59	68.7	73.96
102D	11.14	14.77	21.32	26.29	31.92	49.52
103D	0.6	0.96	1.13	1.26	2.01	3.01
Total Decades	680	801	1067	1208	1270	1451
Saison (EPSAT)	650	785	965	1105	1159	1280
VALIDATION r² = 0.61						
Stations	Fatick	Dahra	Goudiry	Koungueul	Kidira	Malem Hod.
Pluie mesurée	599	455	678	654	822	551
Pluie estimée	624	560	640	688	632	640
delta (%)	-4.2	-23.1	5.6	-5.2	23.1	-16.2



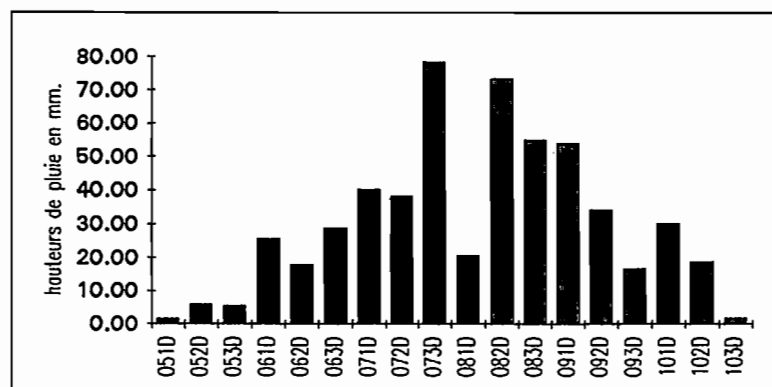
Saison 1990

Surfaces (km ²)	Bassin 368000	Bakel 218000	Kidira 28900	Gourbaesi 17100	Manantali 32500	Dakka S. 15700
Décades						
051D	8.83	12.83	13.14	21.65	33.53	52.27
052D	1.45	2.10	0.01	0.01	10.36	27.53
053D	2.77	4.02	2.65	4.61	22.16	53.67
061D	9.75	14.02	20.30	31.54	36.23	56.81
062D	21.67	30.62	44.52	49.96	59.33	92.12
063D	34.56	45.89	51.95	54.63	60.64	82.63
071D	34.99	49.54	61.22	79.00	83.30	111.13
072D	70.61	96.35	121.54	127.29	130.61	159.56
073D	61.67	74.74	72.76	90.52	104.83	127.53
081D	60.90	69.20	93.62	104.61	106.90	177.24
082D	59.39	69.36	97.61	119.05	120.67	138.02
083D	53.95	62.39	83.33	86.75	80.76	111.18
091D	43.37	52.21	70.20	77.31	72.88	121.40
092D	46.63	50.99	54.39	63.02	62.22	93.13
093D	21.97	28.08	35.20	38.05	42.28	60.91
101D	25.92	30.63	40.54	43.46	48.43	69.84
102D	9.64	11.01	13.02	15.26	21.52	38.17
103D	0.87	0.95	1.32	1.09	1.51	2.30
Total Decades	569	705	877	1008	1098	1575
Saison (EPSAT)	522	642	817	972	1110	1286
VALIDATION $r^2 = 0.86$						
Stations	Fatick	Dahra	Goudiry	Koungueul	Kidira	Saraya
Pluie mesurée	310	226	436	731	363	869
Pluie estimée	400	312	568	640	504	888
delta (%)	-29.0	-38.1	-30.3	12.4	-38.8	-2.2



Saison 1991

Surfaces (km ²)	Bassin 368000	Bakel 218000	Kidira 28900	Gourbassi 17100	Mananteli 32500	Dakka S. 15700
Décades						
051D	1.62	2.27	0.67	1.16	8.05	21.48
052D	5.95	8.64	4.47	7.45	24.00	43.86
053D	5.41	7.71	10.15	15.84	19.96	29.84
061D	25.72	32.78	41.92	48.56	61.17	98.77
062D	17.98	25.90	32.13	40.72	46.85	69.73
063D	28.84	41.75	53.64	70.42	89.13	127.16
071D	40.11	54.63	73.85	84.64	94.13	145.69
072D	38.31	49.23	43.19	47.55	65.28	101.04
073D	78.43	102.23	117.09	130.76	121.89	156.05
081D	20.67	28.56	41.16	41.70	57.54	96.59
082D	73.36	94.43	121.99	126.72	130.48	220.46
083D	54.89	63.57	84.73	101.17	102.06	172.72
091D	53.95	60.75	89.75	100.80	86.65	111.07
092D	34.07	41.17	56.73	63.34	55.38	73.64
093D	16.81	20.46	29.52	33.36	30.08	45.83
101D	30.31	37.34	56.05	62.32	65.57	94.07
102D	18.63	26.37	36.19	50.78	65.52	109.69
103D	1.93	2.77	3.05	5.16	13.87	30.21
Total Décades	547	701	896	1032	1138	1748
Saison (EPSAT)	538	683	932	1097	1233	1458
VALIDATION $r^2 = 0.91$						
Stations	Fatick	Dahra	Goudiry	Koungueul	Kidira	Saraya
Pluie mesurée	404	302	534	605	617	1021
Pluie estimée	400	336	624	664	624	960
delta (%)	1.0	-11.3	-16.9	-9.8	-1.1	6.0



Annexe B

La Pluviométrie de Référence

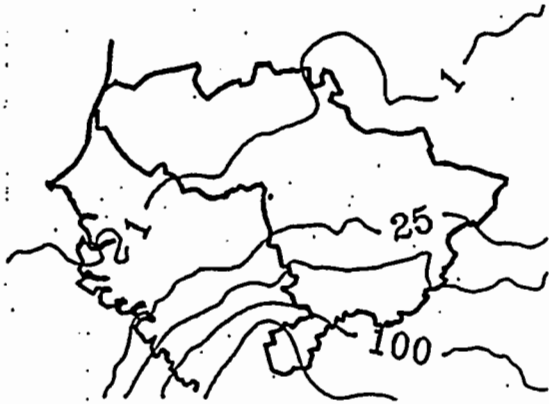
Note:

Les champs pluviométriques présentés sont extraits de l'ATLAS
AGROCLIMATIQUE DES PAYS DU CILSS (AGRHYMET Editeur)

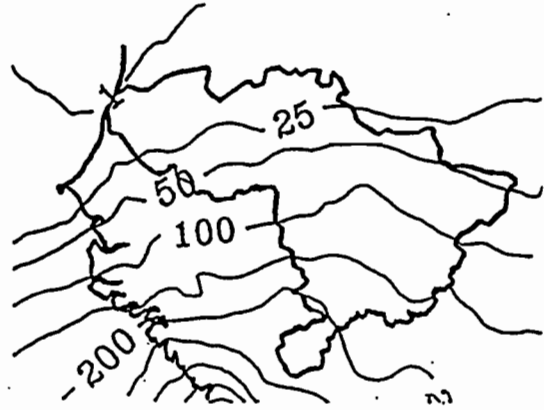
Ils ont été réalisés par krigeage à l'aide du logiciel SURFER (MOREL,1993)

ANNEXE B-1

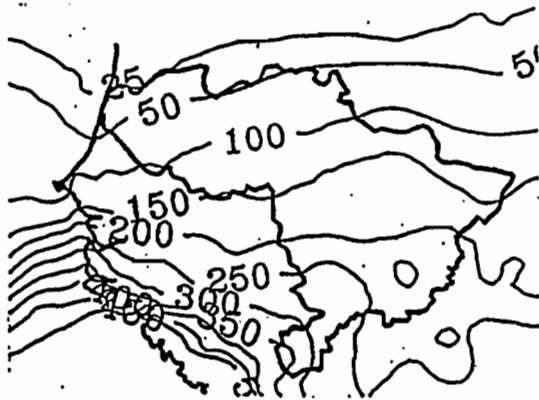
MAI



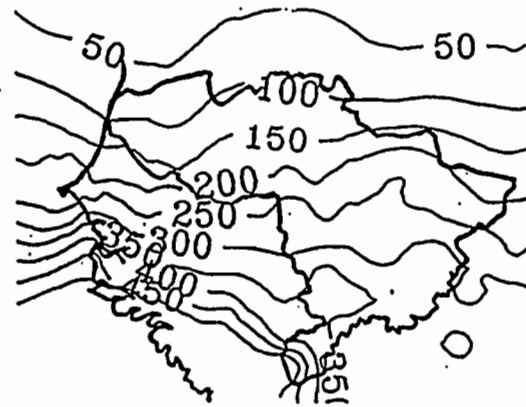
JUIN



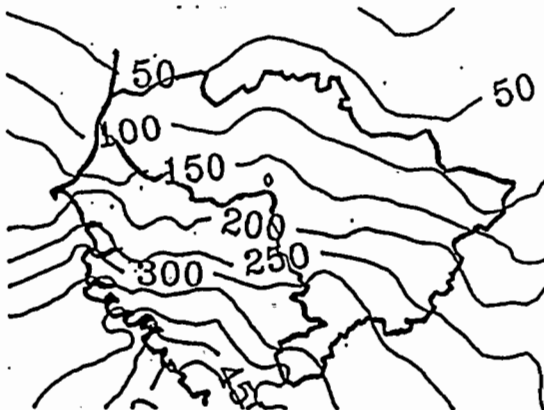
JUILLET



AOUT



SEPTEMBRE



OCTOBRE

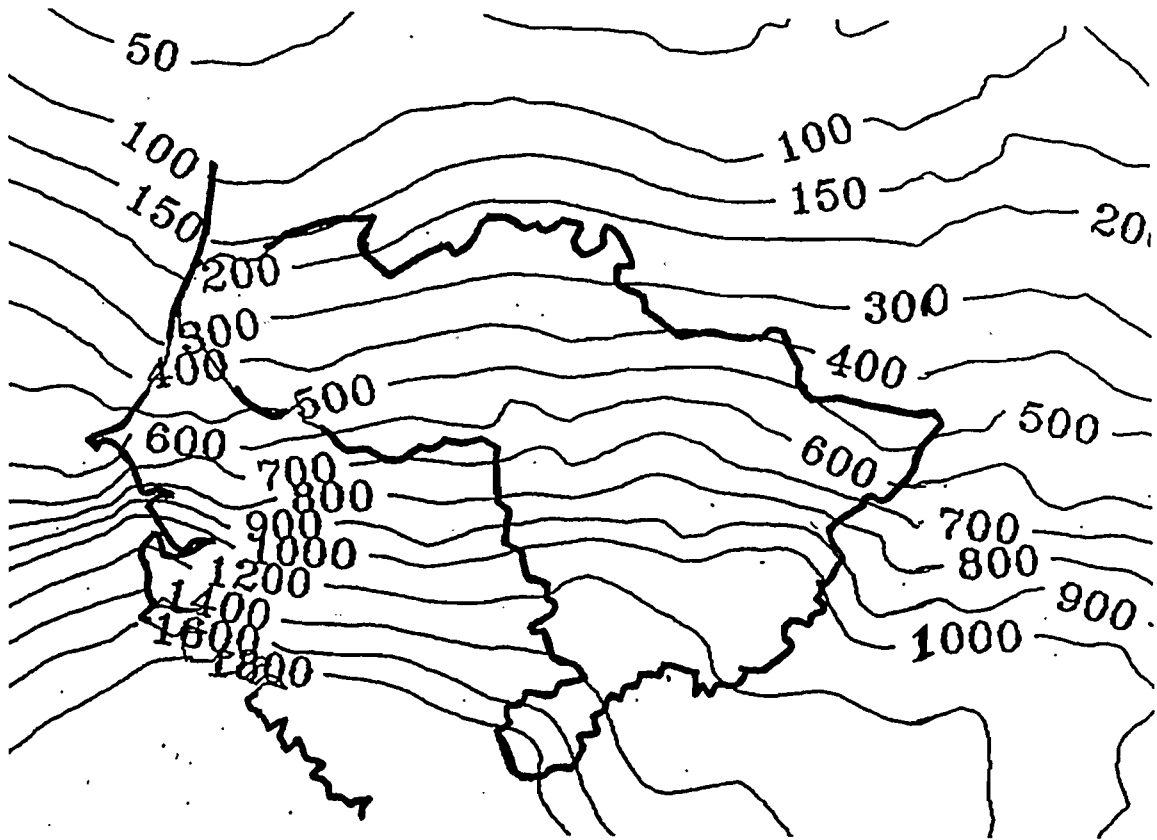


Période "humide"

1950/1967

ANNEXE B-2

SAISON (Mai à Octobre)

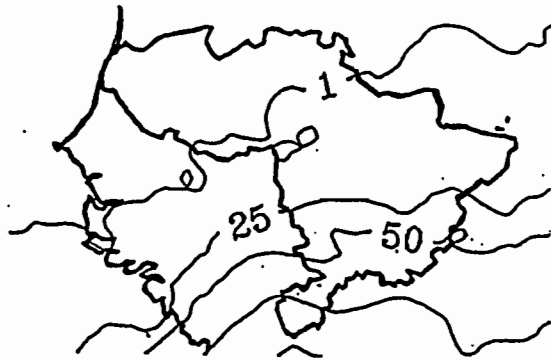


Période "humide"

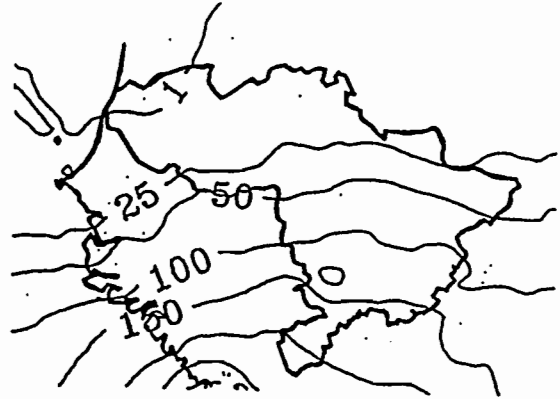
1951-1967

ANNEXE B-3

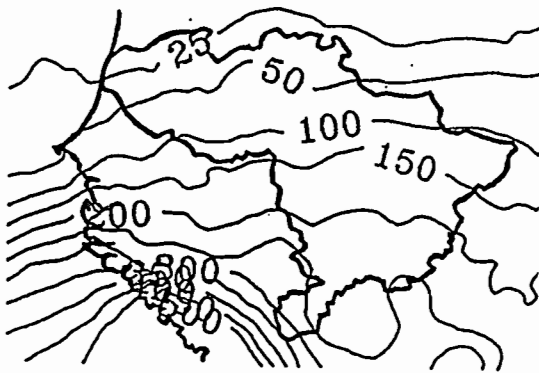
MAI



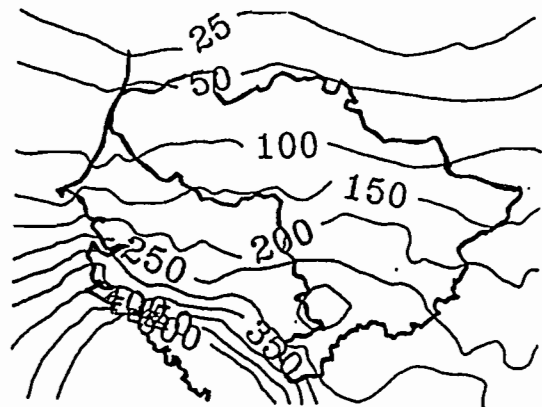
JUIN



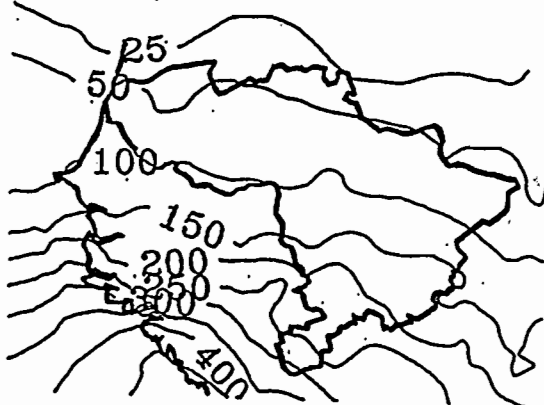
JUILLET



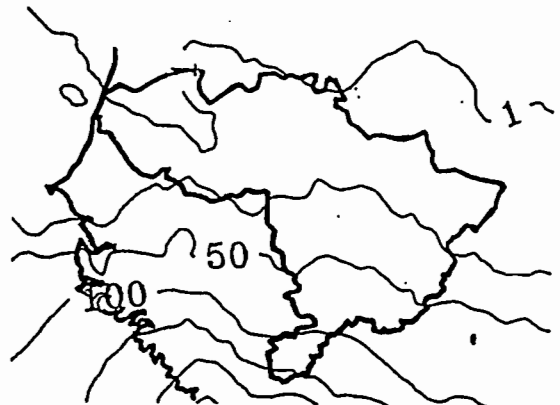
AOUT



SEPTEMBRE



OCTOBRE

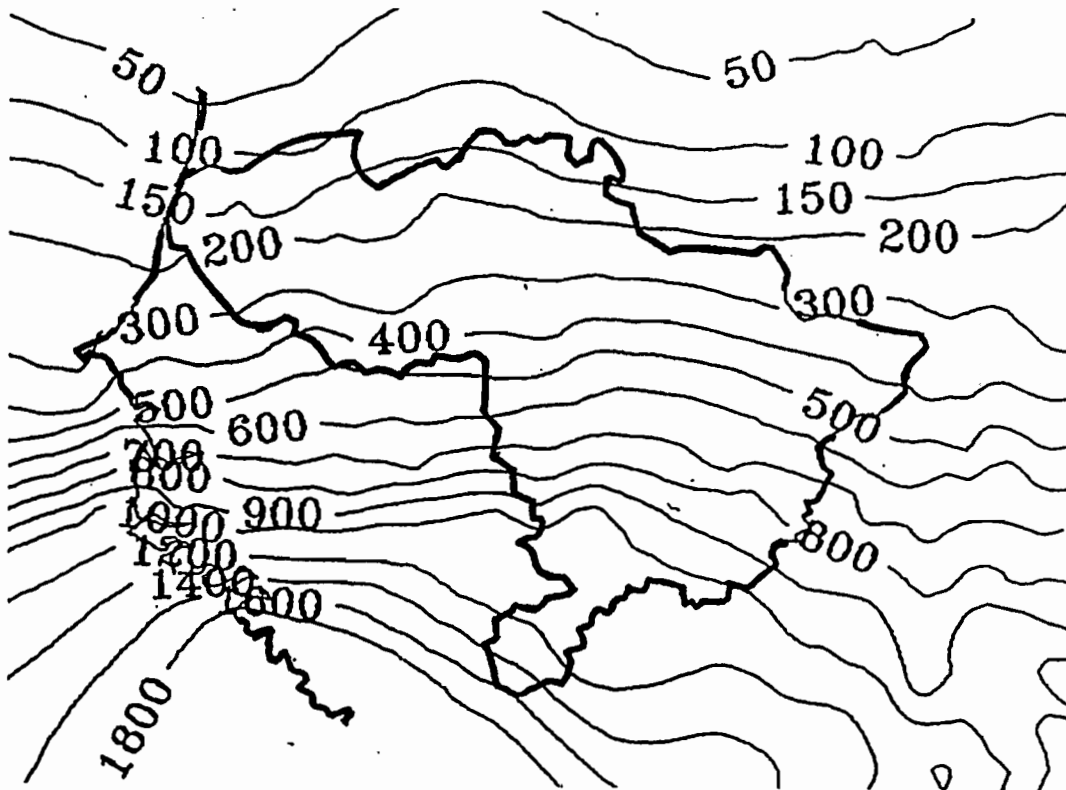


Période "sèche"

1968/1985

ANNEXE B-4

SAISON (Mai à Octobre)

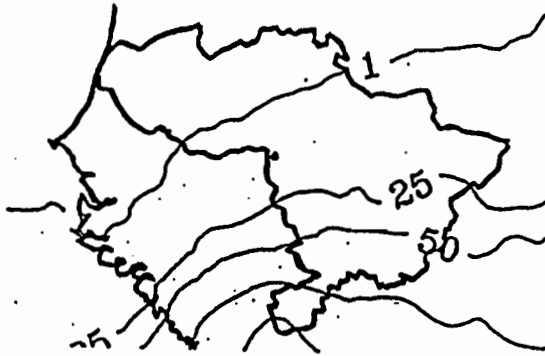


Période "sèche"

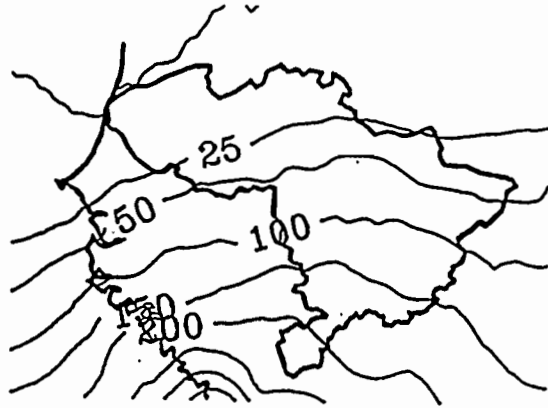
1968-1985

ANNEXE B-5

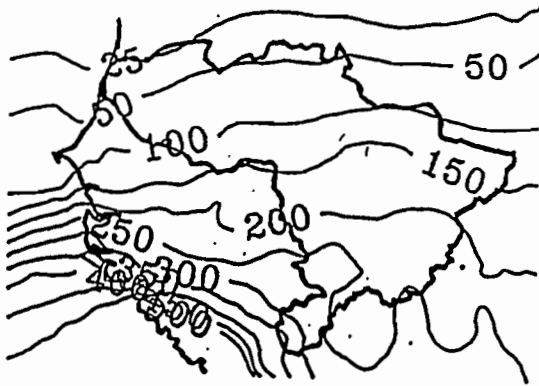
MAI



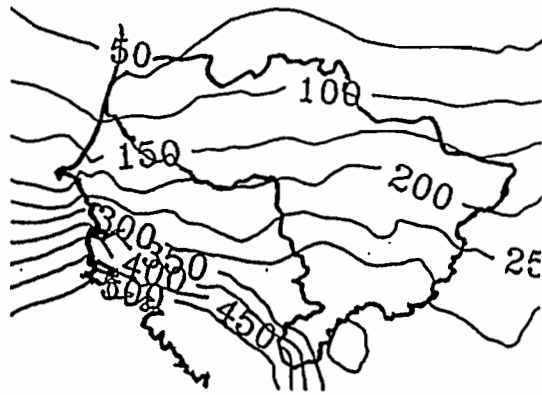
JUIN



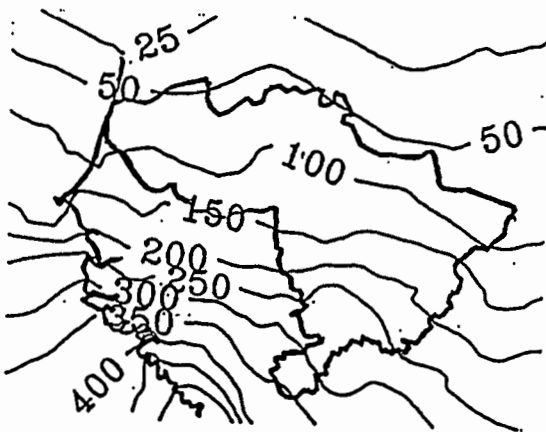
JUILLET



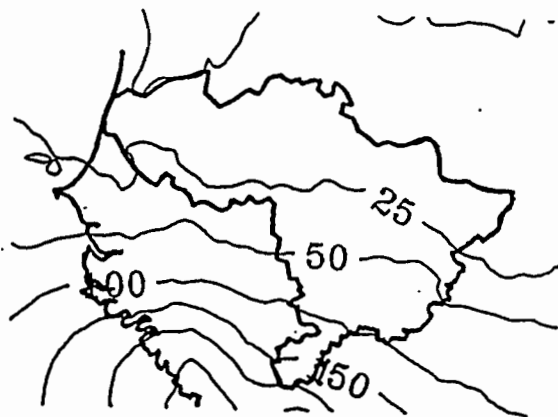
AOÛT



SEPTEMBRE



OCTOBRE

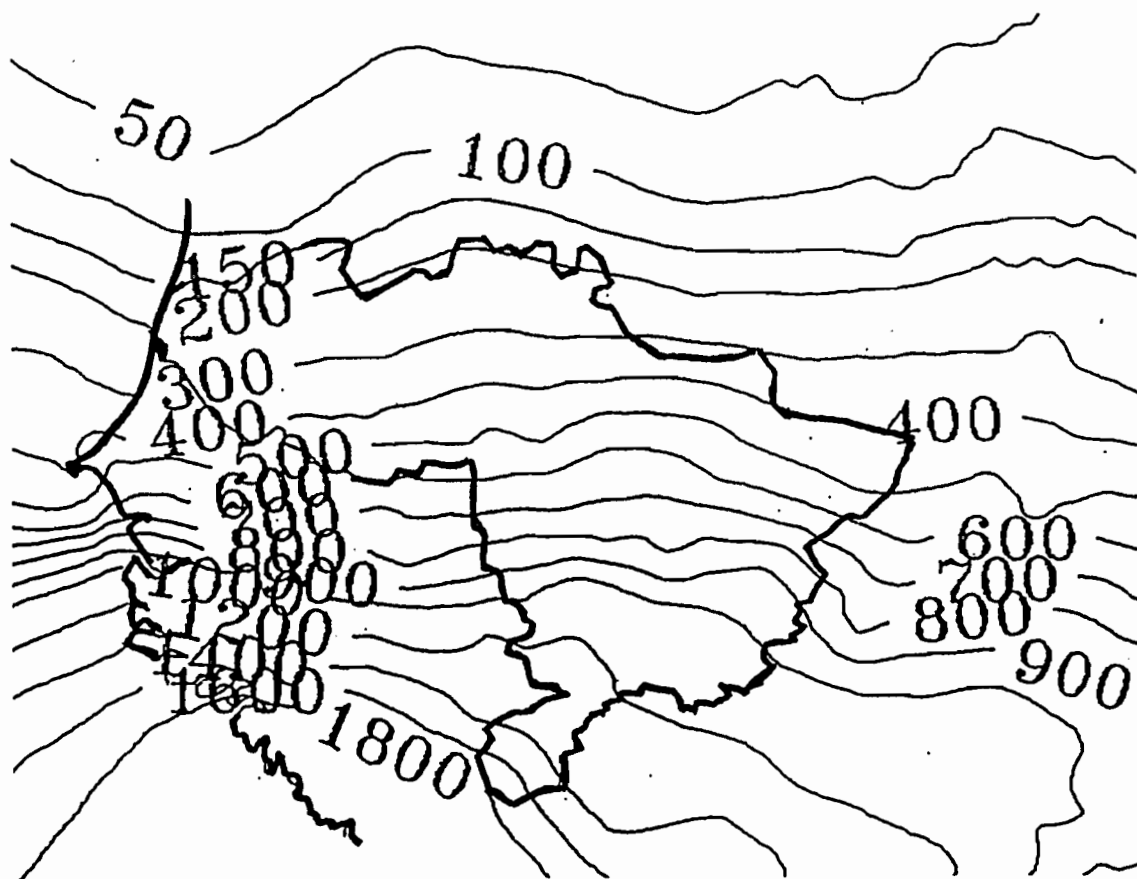


Normale Interannuelle

1951-1980

ANNEXE B-6

SAISON (Mai à Octobre)



Normale Interannuelle

1951-1980

Annexe C

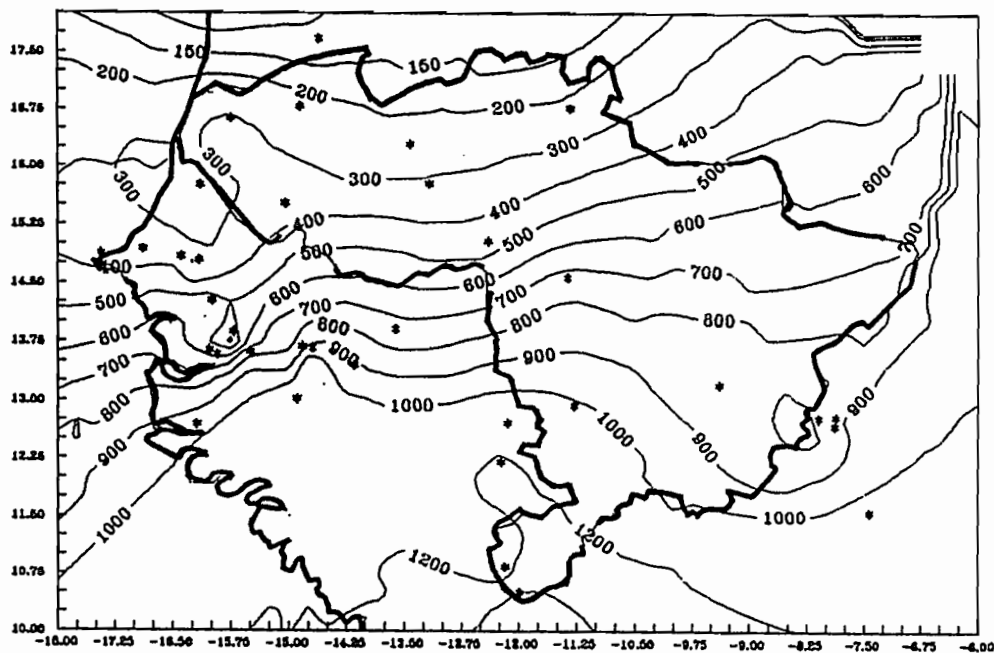
Les Pluviométries Saisonnières obtenues par Krigeage

Note:

Le calcul des champs étendus a été réalisé par krigeage des valeurs aux stations synoptiques par le logiciel Surfer, de façon à présenter un champ de pluie cohérent avec la climatologie présentée en Annexe B, mais aussi pour permettre au lecteur de les comparer aux champs pluviométriques saisonniers issus de la télédétection satellitaire.

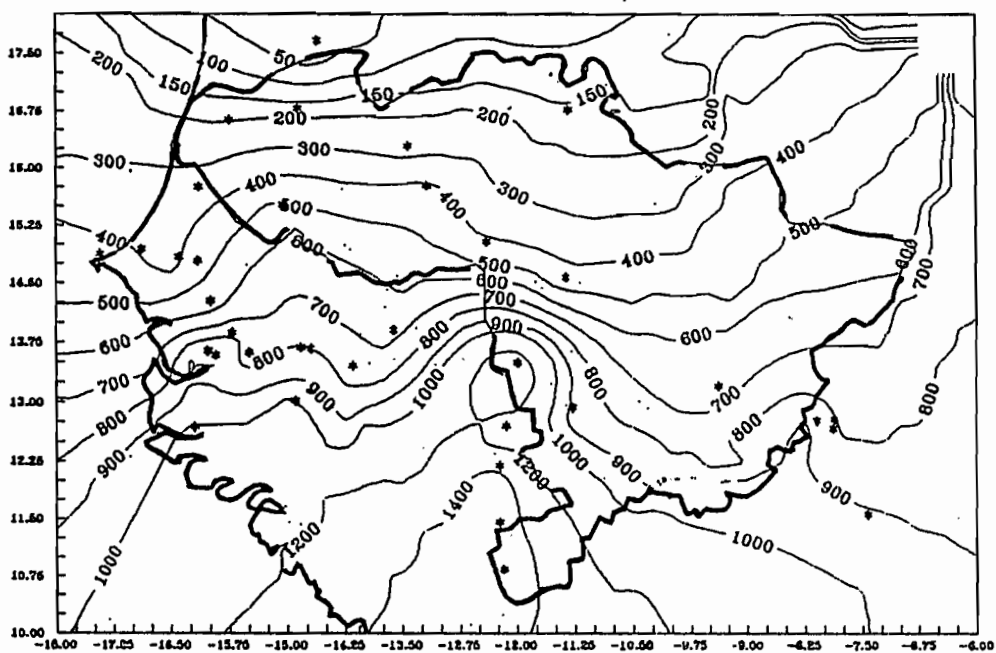
Pluviometrie du Bassin du Senegal - 1986

(* : Stations pluviometriques)



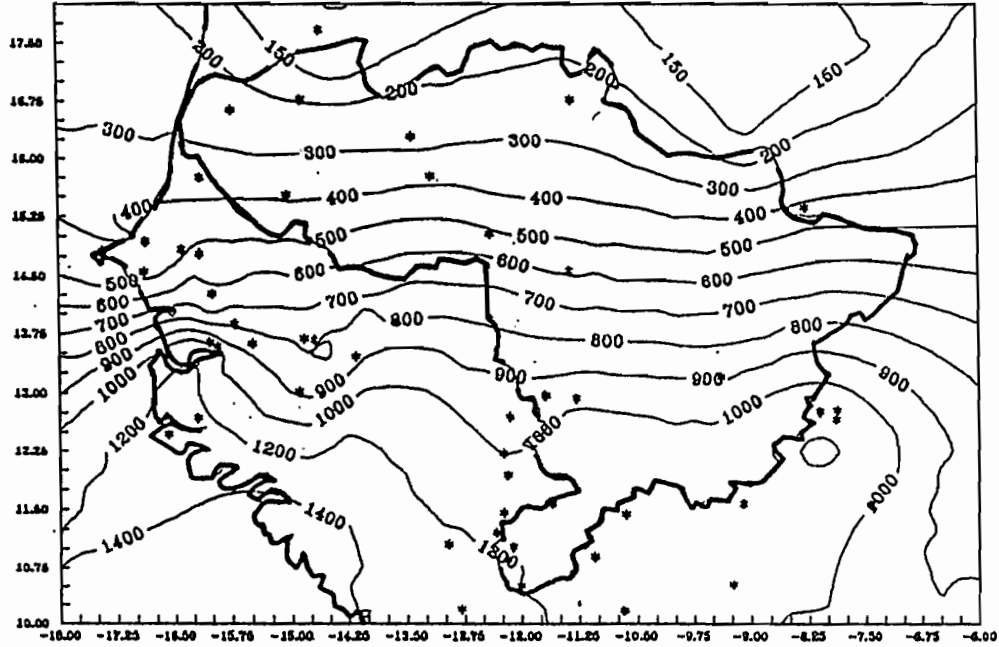
Pluviometrie du Bassin du Senegal - 1987

(* : Stations pluviometriques)



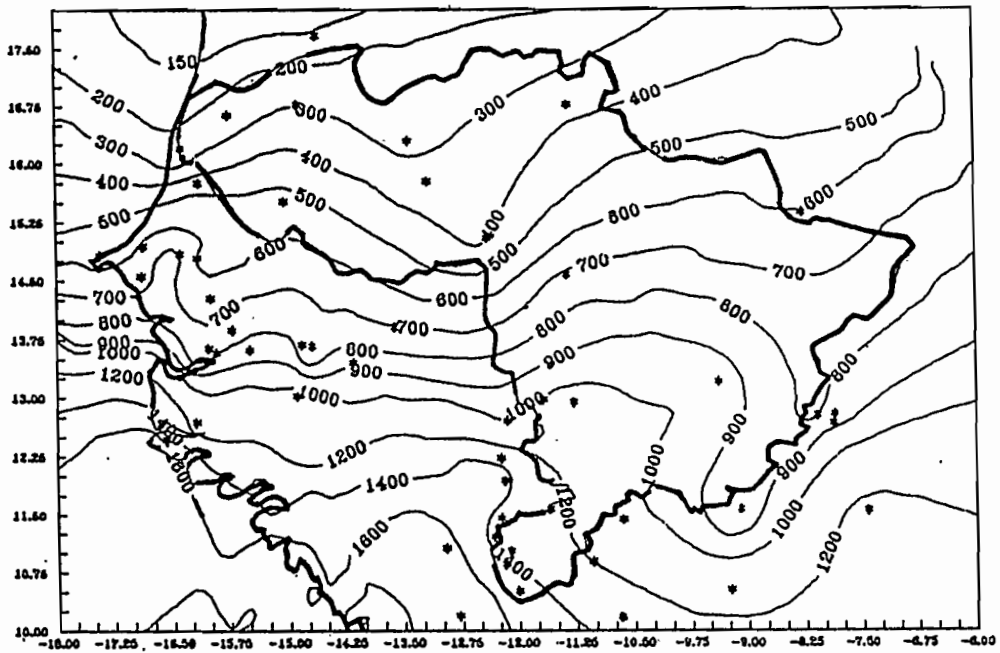
Pluviometrie du Bassin du Senegal - 1988

(* : Stations pluviometriques)



Pluviometrie du Bassin du Senegal - 1989

(* : Stations pluviometriques)



Pluviometrie du Bassin du Senegal - 1991

(* : Stations pluviometriques)

