

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE À LA PLUVIOMÉTRIE DU BASSIN D'UN FLEUVE SAHÉLIEN : LE SÉNÉGAL

M. CARN

(ORSTOM DAKAR, BP 1386 SÉNÉGAL)

RÉSUMÉ

L'imagerie infrarouge MÉTÉOSAT est utilisée pour calculer les lames d'eau précipitées sur le bassin du fleuve Sénégal au pas de temps décadaire, les méthodes conventionnelles s'étant avérées inopérantes du fait de la rareté des points de mesures au sol et de la très forte variabilité spatiale de la pluie aux petites échelles.

Pour réaliser une telle estimation de la pluviométrie à la résolution du pixel, nous avons développé une méthode originale, qui repose sur la combinaison de deux indices pluviométriques issus de l'image MÉTÉOSAT, qui paramétrisent respectivement la source de pluie et la cible. La validation de ces estimations par comparaison avec des mesures aux stations indépendantes de celles utilisées pour l'estimation atteste de la très bonne efficacité de la méthode aux échelles spatio-temporelles choisies.

La cartographie des indices pluviométriques apporte en outre une information très cohérente avec la nature des nuages pluvio-gènes et permet de discriminer les précipitations associées aux lignes de grain de celles produites par la remontée de l'ITCZ. Une régionalisation saisonnière des champs de pluie est ainsi proposée. La pluviométrie des saisons étudiées est commentée et comparée avec les références proposées par le centre AGRHYMET de Niamey.

Une analyse entre les précipitations et les écoulements enregistrés sur un bassin de référence est enfin présentée.

INTRODUCTION

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.

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.

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

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* : $P > 1\,500$ mm/an, $T + 22-24$ °C, $HR > 50$ %, et la saison des pluies dure huit mois (d'avril à novembre) ;
- le *domaine sud-soudanien* : $1\,500 > P > 1\,000$ mm/an, $T > 27$ °C, $HR > 50$ % et la saison des pluies dure six à huit mois ;
- le *domaine nord-soudanien* : $P < 1\,000$ mm/an, $T > 27$ °C, $HR < 50$ % et la saison des pluies dure quatre à six mois ;
- le *domaine sahélien* : $P < 500$ mm/an, $T > 30$ °C, $HR < 40$ % et la saison des pluies dure deux à trois mois.

ARGUMENTS POUR L'UTILISATION DE MÉTHODES SATELLITAIRES EN PLUVIOMÉTRIE

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.

1 - Les réseaux de mesures au sol

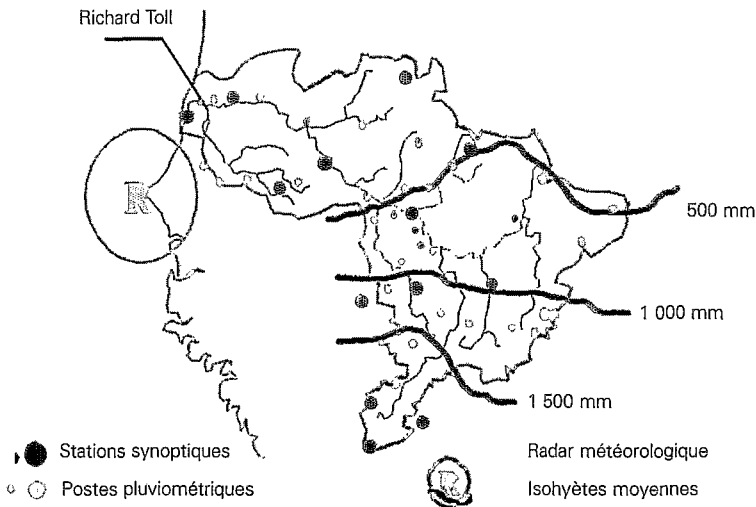


Figure 1 : Situation et équipement pluviométrique du bassin du fleuve Sénégal.

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. 1) ; 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.

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 7 200 km² !

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 disparu en 1988 (SIRCOULON, 1990).

2 - 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.

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 2, que le bassin du fleuve Sénégal est entièrement inclus dans la zone 1, dont le degré de cohérence interne est relativement fort.

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 (cf. fig. 1), dans la basse vallée du fleuve grâce aux données du laboratoire d'agro-pédologie de la Compagnie sucrière sénégalaise (CSS) qui a mesuré pendant 4 ans les pluies journalières en dix postes pluviométriques répartis de façon homogène sur une superficie de l'ordre de dix pixels MÉTÉOSAT.

La grille de la figure 3 représente à l'échelle, la pixelisation MÉTÉOSAT. On notera que le gradient maximum de pluviométrie saisonnière par pixel en 1986 était de 90 mm pour une pluviométrie moyenne de 196 mm !!

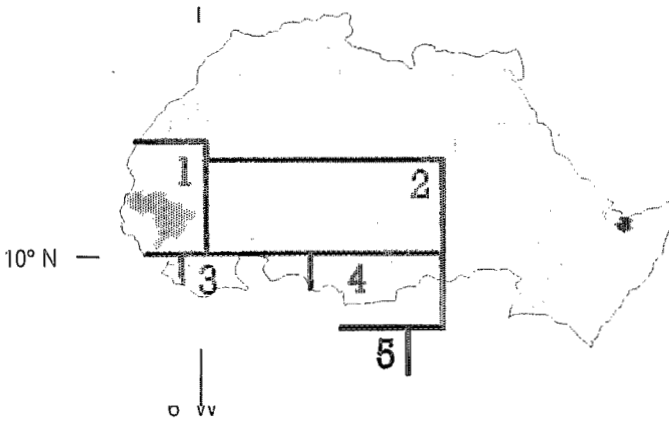


Figure 2 : Synthèse de la régionalisation annuelle de la pluviométrie selon JANICOT (1992).

4 - Les applications de l'estimation de la pluviométrie par satellite à l'hydrologie

La pluviométrie estimée par la méthode EPSAT et utilisée comme donnée d'entrée 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 plus efficace dans de nombreux cas que la pluviométrie spatialisée conventionnellement.

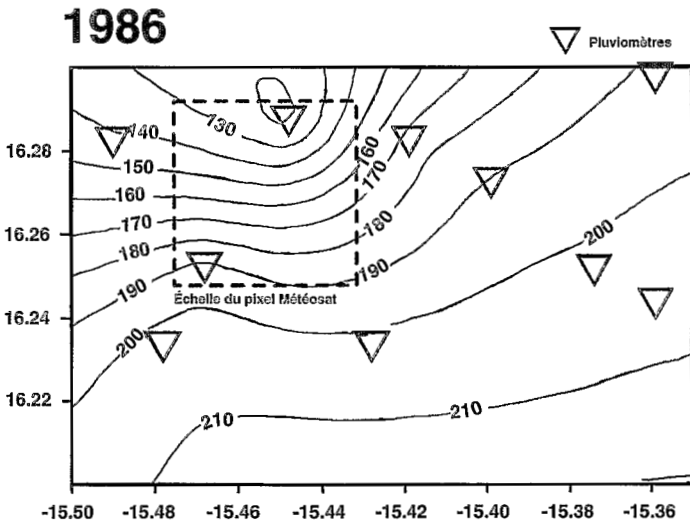


Figure 3 : La variabilité spatiale de la pluviométrie sur la zone des casiers de la CSS pour la saison 1986. (taille du pixel MÉTÉOSAT : 5km*5km environ).

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.

L'ESTIMATION DES PLUIES PAR SATELLITE

1 - L'imagerie satellitaire MÉTÉOSAT : son utilisation en pluviométrie

Le satellite géostationnaire européen MÉTÉOSAT, se trouve placé en orbite équatoriale à 35 800 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'Équateur, ce qui en fait un instrument particulièrement adapté à l'étude du continent africain.

L'imagerie Infrarouge MÉTÉOSAT 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 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).

2 - La méthode EPSAT

Il existe deux voies possibles 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.

La méthodologie utilisée repose sur une approche originale qui combine cette double paramétrisation, des causes et des effets (CARN, 1987).

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** (= fréquence d'occurrences des nuages froids comptabilisés par une méthode de seuillage à - 40 °C) et **Tmax** (= champ thermique radiatif maximum de la surface) 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 10 000 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 dus 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 1/2 heure, et de l'ordre de 50 % pour un échantillonnage horaire.

- pour le champ thermique maximum de surface :

- à la non-corrrection 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.

1 - Les indices pluviométriques

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 MÉTÉOSAT.

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 :

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

- indice de refroidissement :

$$\text{PvT}_s = \text{Pluie mesurée} / \text{Tmax}$$

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 refroidissements dus aux nuages de lithométéores.

Le comportement interannuel de ces deux indices a été étudié (CARN, 1990) 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,

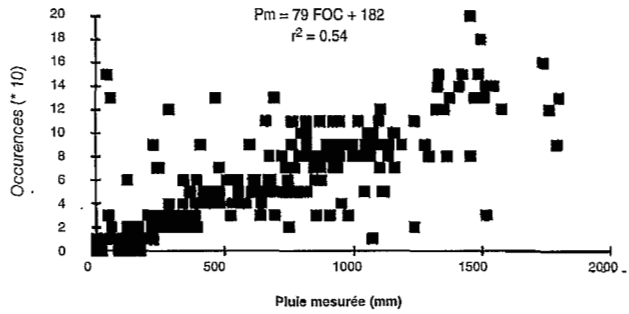


Figure 4a : Relation interannuelle Pluie/Occurrences de nuages froids.

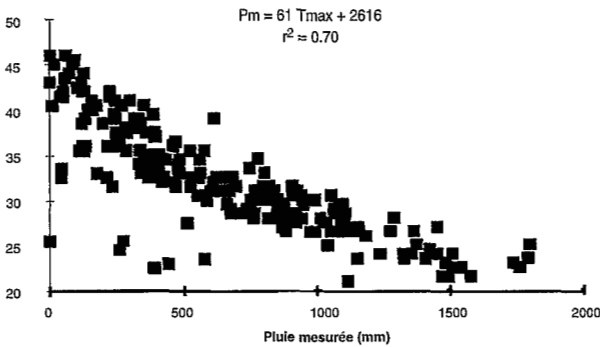


Figure 4b : Relation interannuelle Pluie/Champ thermique de surface.

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. Cette observation s'est également avérée sur le bassin du fleuve Sénégal pour la période considérée (fig. 4a et 4b).

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.

2 - 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.

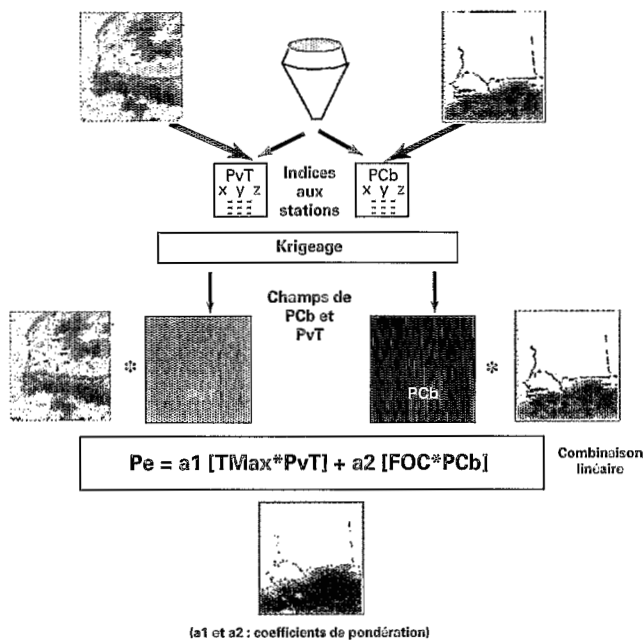


Figure 5 : Schéma de l'algorithme EPSAT, méthode des indices pluviométriques.

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 :

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

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 5 présente le schéma d'ensemble des procédures qui réalisent l'estimation finale.

3 - La validation de l'estimation

Les totaux pluviométriques saisonniers estimés 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 lors de l'estimation. Nous indiquons dans le tableau 1 les valeurs mesurées aux stations et celles des pixels correspondants extraits de l'estimation satellitaire, ainsi que les écarts, pour cinq années d'observation.

Une régression linéaire a été calculée pour l'ensemble des valeurs regroupées des six années de l'étude ; le coefficient de corrélation obtenu ($r^2 = 0.88$) est tout à fait satisfaisant.

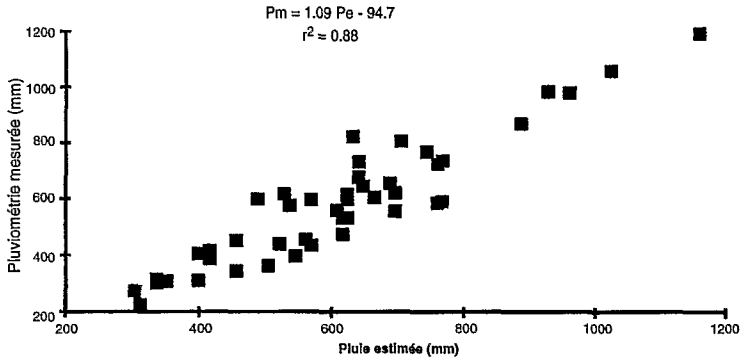


Figure 6 : Comparaison entre pluie estimée et pluie mesurée aux stations dédiées à la validation.

faisant au niveau saisonnier (fig. 6). On observe cependant une tendance à la surestimation de la méthode satellitaire par rapport aux relevés des postes pluviométriques.

Tableau 1 - Comparaison entre pluie mesurée et pluie estimée aux stations de contrôle.

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

LA PLUVIOMÉTRIE DU BASSIN DE 1986 À 1992

Nous ne disposons pour cette étude que des scènes MÉTÉOSAT 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 négligeables, particulièrement sur la partie septentrionale du bassin.

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.

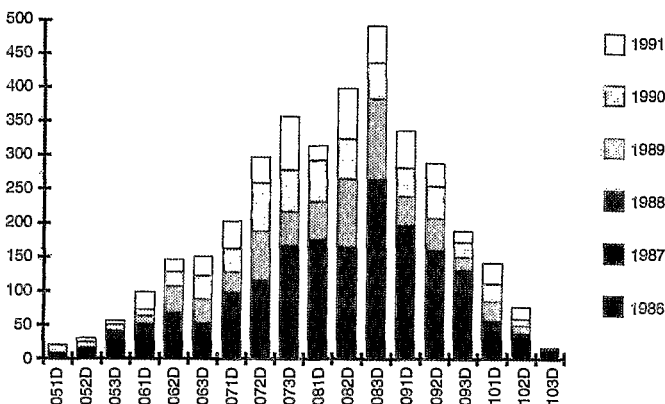


Figure 7 : Pluviométries décadaires interannuelles cumulées.

1 - 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'jalon fin octobre à début novembre.

La figure 7 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 3^e décade de juillet puis suit un léger fléchissement de l'histogramme, avant d'atteindre la 3^e 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, ceci coïncide généralement avec l'amorce du retrait du FIT vers le sud.

2 - Les saisons 1986 à 1992

Nous avons représenté sur la figure 8 les hauteurs des lames d'eau sur le bassin entier pour les sept saisons étudiées en y figurant par trois traits horizontaux les valeurs des moyennes interannuelles proposées par le centre AGRYMET pour les deux périodes de références extrêmes : humide et sèche, ainsi que pour la normale 1951-1980 (MOREL, 1993).

Aucune des sept 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).

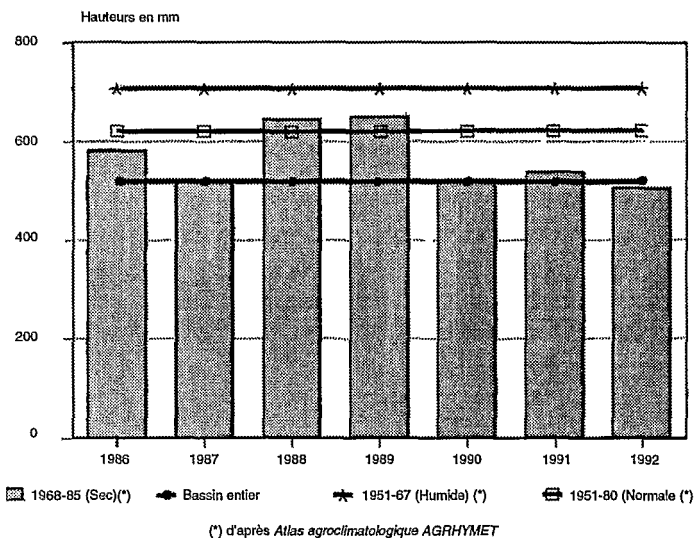


Figure 8 : Lames d'eau précipitées sur le bassin au cours des saisons des pluies 1986 à 1992.

3 - 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.

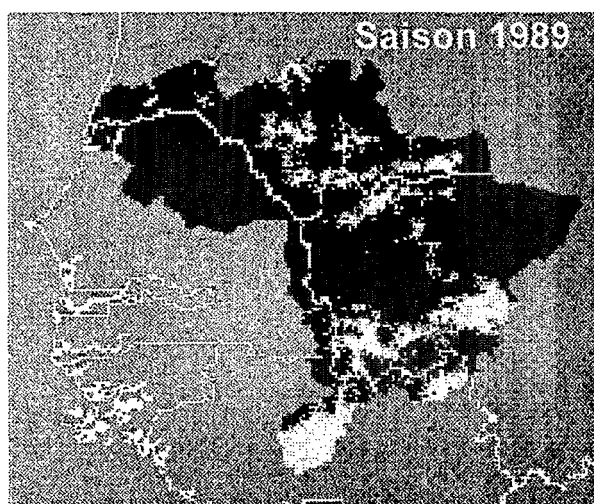


Figure 9 : Cartographie des anomalies pluviométriques pour la saison 1989 par comparaison avec les champs AGRHYMET de la normale saisonnière 1951-1980 (les plages gris clair correspondent aux zones à pluviométrie déficitaire, tandis que les plages gris foncé délimitent les pluviosités excédentaires).

(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 planche 3 doit donc être appréciée surtout comme un document qualitatif.)

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, 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. 10).

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 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 MÉTÉOSAT 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.

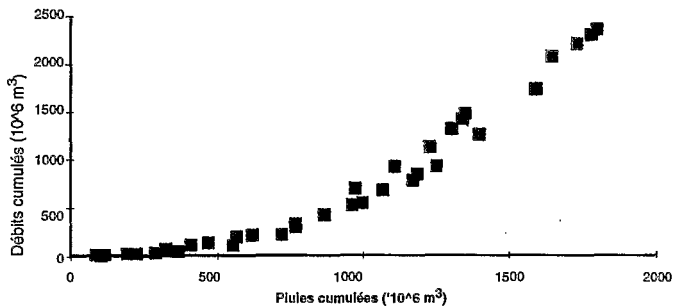


Figure 10 :
Relation pluviométrique
décadaire cumulée
et débits cumulés
sur le bassin de la
Falémé à Gourbassi,
pour les saisons
1986, 1987 et 1989.

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 MÉTÉOSAT, encore que la relation [hauteur de pluie/température radiative] aux stations semble plus pertinente interannuellement que celle se rapportant à la pluie et aux occurrences nuageuses.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CADET D., GUILLOT B., 1991 - *EPSAT : Estimation des précipitations par satellite*. ORSTOM éditeur, 63 pages.
- CARN M., DAGORNE D., GUILLOT B., LAHUEC J.-P., 1987 - Estimation des précipitations par satellite au Sahel pour la période mai à septembre 1987. *Veille Clim. Sat.*, n° 20, Lannion, pp. 26-30.
- CARN M., DAGORNE D., GUILLOT B., LAHUEC J.-P., 1989 - Estimation des pluies par satellite en temps réel en Afrique sahélo-soudanienne : essai d'utilisation d'une calibration issue du champ de température maximum de surface. *Veille Clim. Sat.*, n° 28, Lannion, pp. 47-54.
- HUBERT P., FOUÈRE 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 - Spatio-temporal 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.
- MOREL R., 1993 - L'Atlas agroclimatologique des pays du CILSS. *Veille Clim. Satellitaire* n° 45.
- 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 Éd., 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 Climatologique Satellitaire*, n° 24, 26-37.