

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 pluviogènes 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

ET LES MÉTHODES GAZEL LITTÉRAIRES EN PLUVIOMÉTRIE

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 spatiale temporelle des pluies en Afrique de l'Ouest

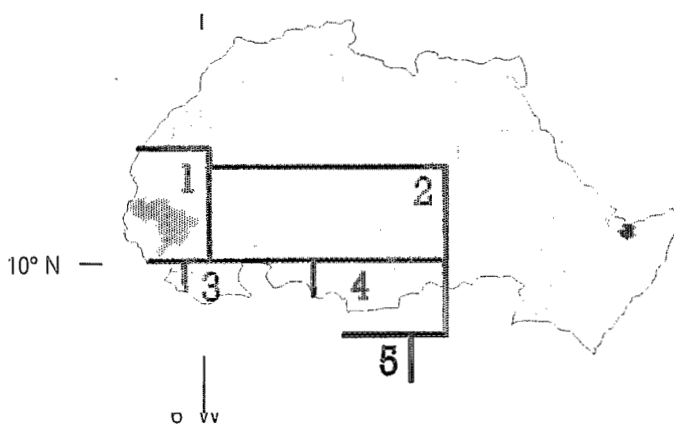


Figure 2 : Synthèse de la régionalisation annuelle de la pluviométrie selon JANICOT (1992).

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.

1986

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 décennaux ou plus longs, les pluies mesurées aux stations sont significativement corrélées par régression linéaire multiple avec les deux paramètres de base EOC (fréquence d'apparition des nuages froids compensés par

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 :

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

- indice de refroidissement :

$$PvT_s = \text{Pluie mesurée} / Tmax$$

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 refroidissement 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,

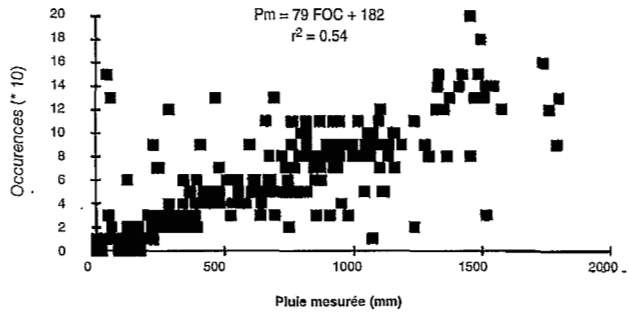


Figure 4a : Relation interannuelle Pluie/Occurrences de nuages froids.

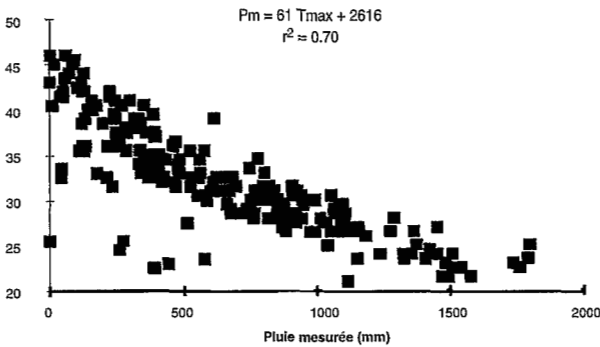


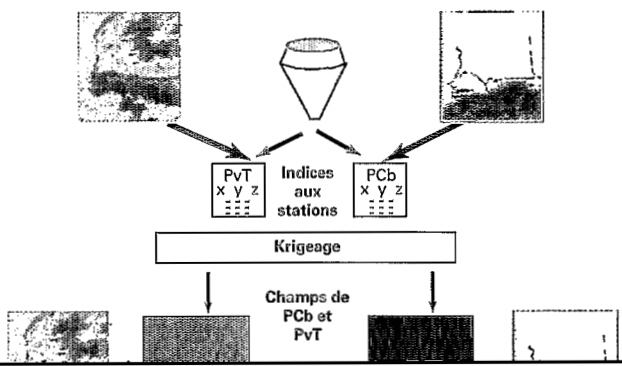
Figure 4b : Relation interannuelle Pluie/Champ thermique de surface.

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.



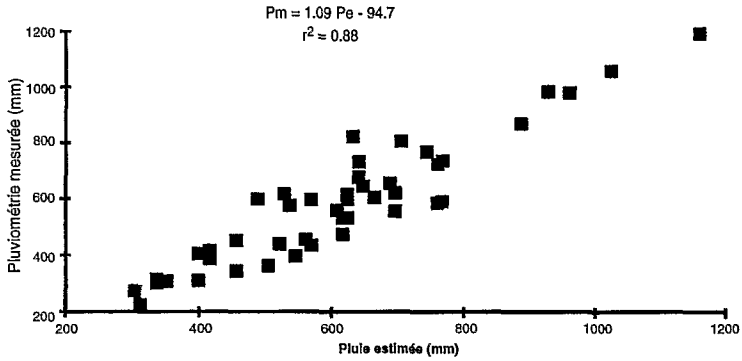


Figure 6 : Comparaison entre pluie estimée et pluie mesurée aux stations dédiées à la validation.

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.

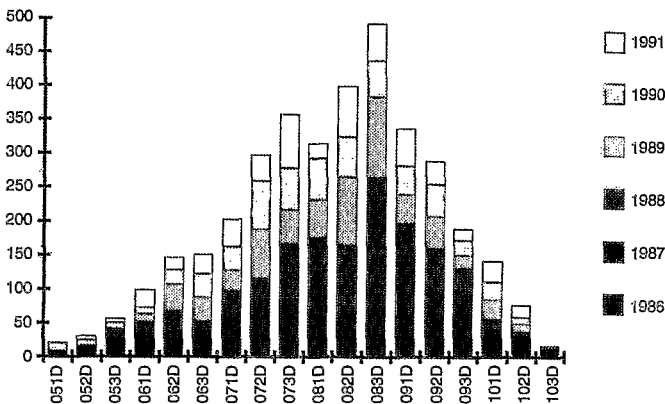


Figure 7 : Pluviométries décadaires interannuelles cumulées.

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.

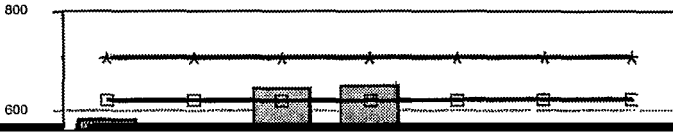
2 - Les saisons 1986 à 1992

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).

Hauteurs en mm



(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

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.