

# Estimation et suivi de la pluviométrie au Sénégal par satellite Météosat

T. NEGRE, J. IMBERNON (1), J.-P. GUINOT, B. SEGUIN (2), J.-C. BERGES (3), B. GUILLOT (4)

**RÉSUMÉ** — Une étude expérimentale de la relation liant la pluviométrie et la température de surface mesurée avec le canal infrarouge thermique de Météosat est présentée pour les saisons des pluies 1984, 1985 et 1986 au Sénégal. La température de surface moyenne à partir du 1<sup>er</sup> juin, corrigée de la température de l'air, s'avère être un bon indicateur de la pluviométrie cumulée sur la même période. Une approche critique des fondements théoriques de cette relation permet d'étayer ces résultats expérimentaux, sur la base d'expressions simplifiées du bilan énergétique de surface et du bilan hydrique à l'échelle du pixel. Enfin, les premières cartes de pluviométrie cumulée obtenues en 1987 sont présentées et commentées, ainsi que la chaîne de traitement mise au point pour leur élaboration.

**Mots clés** : Télédétection, infrarouge thermique, pluviométrie, Sénégal, bilan hydrique, bilan d'énergie.

Plusieurs équipes de recherche s'intéressent à l'estimation et au suivi de la pluviométrie au Sahel grâce au satellite Météosat (BARRETT *et al.*, 1986 ; GUILLOT *et al.*, 1986 ; HIELKEMA *et al.*, 1986 ; CHADWICK *et al.*, 1986). Tous ces chercheurs utilisent un même « indicateur » de pluviométrie : la présence de nuages à haut développement vertical, dits précipitants, détectés par leurs températures de sommet très basses. De bonnes corrélations ont été trouvées entre fréquence d'occurrence de nuages précipitants et pluviométrie et, depuis peu, un effort de zonage régional est entrepris (GUILLOT *et al.*, 1986).

Une approche différente a été développée dans nos laboratoires (ASSAD *et al.*, 1985 ; SEGUIN *et al.*, 1988). Elle se situe au niveau du sol, puisque l'indicateur retenu est la température de surface, mesurée par le canal infra-

rouge thermique de Météosat. Elle permet d'estimer la pluviométrie par le biais de la chute de température du sol qu'entraînent les précipitations et la forte évapotranspiration qui s'ensuit.

Schématiquement :

Pluie ⇄ Forte évapotranspiration ⇄  
Chute de température de surface du sol

## Approche physique de la relation liant la température de surface du sol ( $T_s$ ) à la pluviométrie (P)

La relation entre  $T_s$  et P s'articule autour de deux bilans :

- l'un, énergétique, lie le flux de chaleur sensible  $\Phi_s$  :

$$\Phi_s = \rho C_p h (T_s - T_a)$$

où  $\rho$  : masse volumique de l'air,

$C_p$  : chaleur sensible de l'air,

$h$  : coefficient d'échange,

$T_a$  : température de l'air,

à l'évapotranspiration ET par la relation algébrique :

$$ET = R_n - \Phi_s - \Phi_c \quad [1]$$

où  $\Phi_c$  = flux de conduction de chaleur dans le sol,

$R_n$  = rayonnement net.

- l'autre, massique, le bilan hydrique lie l'évapotranspiration à la pluie :

$$P = ET + E + \Delta H \quad [2]$$

où E = écoulement (drainage + ruissellement),

$\Delta H$  = variation du stock d'eau dans le sol.

Le bilan d'énergie peut être considéré à l'échelle de 24 heures, le flux de conduction  $\Phi_c$  dans le sol devenant alors négligeable, intervalle de temps qui se rapproche de celui qui caractérise le bilan hydrique (quelques jours).

(1) IRAT, avenue du Val de Montferrand, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex.

(2) INRA, BP 91, 84140 MONTEFAVET, France.

(3) CRODT, BP 2241, Dakar, Sénégal.

(4) ORSTOM/CMS, BP 147, 22302 Lannion.

Mais, dans le contexte de notre étude, c'est un bilan quasiment instantané qui sera considéré, puisque la valeur de  $T_s$  introduite correspond au passage du satellite. Il faudra donc, en premier lieu, envisager le passage de l'échelle instantanée à celle de la journée, et la mesure rigoureuse des termes de ces deux bilans n'est possible que ponctuellement dans l'espace.

L'objet de notre analyse sera de rechercher pour le Sénégal une forme approximative et simple de ces deux bilans, à l'échelle où est envisagé le suivi de la pluviométrie par satellite : c'est-à-dire une maille spatiale de quelques kilomètres carrés (le pixel) et un pas de temps de quelques semaines.

### Estimation simplifiée de l'évapotranspiration à partir des données de température de surface

JACKSON *et al.* (1977), puis SEGUIN *et al.* (1982a, b) ont travaillé sur l'estimation d'une évapotranspiration journalière à grande échelle par l'utilisation de données  $T_s$  d'origine satellitaire. La relation simplifiée proposée est la suivante :

$$ET_j - Rn_j = A + B (T_s - T_a) \quad [3]$$

où  $T_s - T_a$  est la différence entre température de surface (pouvant être mesurée par satellite) et température de l'air à 2 m instantanées, prises en milieu de journée ;

$ET_j$  est l'évapotranspiration journalière ;

$Rn_j$  le rayonnement net journalier.

Par ailleurs, SEGUIN et ITIER (1983) ont mené une discussion théorique sur les facteurs de variation du paramètre B : stratification thermique, vitesse du vent et rugosité de surface.

### Influence de la stratification thermique et de la vitesse du vent

En conditions instables ( $T_s > T_a$ ), ces auteurs proposent une valeur constante de B égale à -0,25 et de A à 1, et l'expression de la relation simplifiée suivante, pour une vitesse de vent moyenne à 2 m de  $3 \text{ ms}^{-1}$  :

$$ET_j - Rn_j = 1 - 0,25 (T_s - T_a) \quad [4]$$

Cette relation n'est valable que sur d'assez longues périodes (2 à 4 semaines au moins), car les variations de vitesse du vent à l'échelle d'une ou plusieurs journées peuvent modifier notablement la valeur de B.

On peut dans ces conditions adopter la notation suivante :

$$\sum_{j=1}^n ET_j - \sum_{j=1}^n Rn_j = n - 0,25 \sum_{j=1}^n (T_s - T_a) \quad [5]$$

$\Sigma$  portant sur les n jours constituant la période considérée.

### Influence de la rugosité de surface

Le poids de la rugosité de surface dans l'expression de la relation simplifiée peut être apprécié grâce à la figure 1 (conditions d'instabilité).

A des fins d'utilisation satellitaires, on pourra se référer à l'échelle de rugosité simplifiée suivante :

- 1 mm : sol lisse ;
- 1 mm à 1 cm : sol nu, herbe, pâturage ;
- 1 cm à 10 cm : cultures hautes (céréales...) ;
- 10 cm à 1 m : vergers, forêts.

De la même façon, les résultats rapportés par SEGUIN *et al.* (1982a) sur le site de la Crau ont montré une certaine « souplesse » de la relation simplifiée vis-à-vis de la rugosité de surface. En effet, les données de la Crau sèche (sol nu et caillouteux recouvert de végétation éparse et rase, rugosité  $z_0$  d'environ 1 mm) et de la Crau irriguée (couvert continu herbacé de prairie de hauteur H évoluant entre 10 et 50 cm,  $z_0 = 0,1 \text{ H}$ ) suivaient la même relation, comme le montre la figure 2.

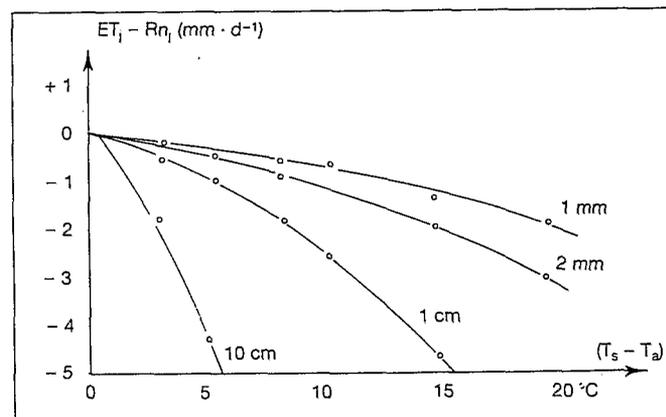


Figure 1 : Comparaison de la relation entre  $ET - R_n$  et  $T_s - T_a$  pour divers types de rugosité et relation simplifiée proposée par Seguin *et al.* (1982). D'après Seguin et Itier (1983).

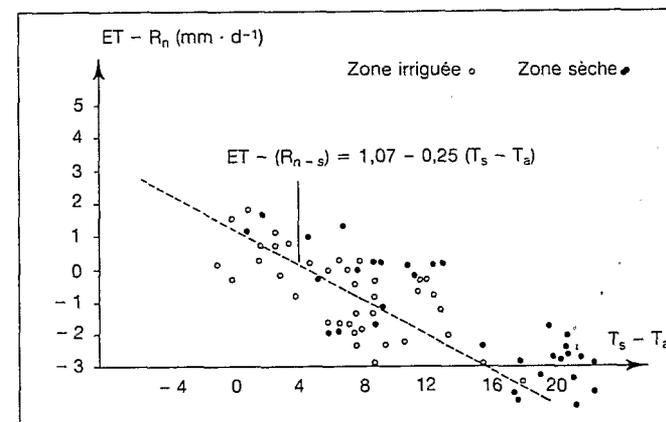


Figure 2 : Relation entre  $ET - R_n$  et  $T_s - T_a$  obtenue à la Crau par Seguin *et al.* (1982a).

## Influence de ces deux paramètres au Sénégal

Par rapport au cas précis du Sénégal, les éléments d'information suivants peuvent être présentés :

### Le vent

Il se manifeste au Sénégal par des brises côtières et des coups de vent accompagnant les lignes de grains venant d'est.

Les premières concernent la bordure maritime, qui est de toute façon en dehors du champ d'application de la mesure de  $T_s$  par satellite (risque de confusion avec la température de la mer, couverture nuageuse importante pendant l'hivernage, forte absorption du signal par la vapeur d'eau).

Les seconds sont des phénomènes locaux et de courte durée.

D'une manière générale, à l'intérieur des terres, le vent est faible et varie peu d'une région à l'autre, comme le montre l'étude du régime des vents au Sénégal faite par J.-P. FRETEAUD en 1984.

### La stratification thermique

À l'intérieur des terres, le fort rayonnement diurne crée en milieu de journée une situation d'instabilité marquée, situation assez classique en zone sèche.

### La rugosité de surface

La rugosité qui retiendra notre attention ici est celle qui caractérise les échanges à microéchelle (au niveau de la végétation), puisque c'est à cette échelle-là que s'exprime le bilan énergétique de surface.

On peut, à cet égard, distinguer au Sénégal deux grandes catégories de paysages : les « paysages ouverts » (savanes, steppes, zones de pâture) et les « paysages fermés » (forêts, taillis). Les premiers prédominent sauf au sud de la Gambie où les formations de forêts ou de taillis peuvent atteindre de grandes extensions.

Dans le cas des « paysages ouverts », la rugosité de surface aura donc deux composantes : celle de la strate herbacée, relativement uniforme, d'une part, et celle des arbres et arbustes, isolés en général, d'autre part. Etant donné la très faible surface occupée, en projection verticale, par ces derniers (de l'ordre de 1 à 6 % environ), on peut considérer que la strate herbacée détermine presque totalement, dans les « paysages ouverts », la rugosité intervenant dans le bilan énergétique de surface. Il est intéressant de rappeler qu'en revanche la présence d'arbres et d'arbustes isolés modifie notablement la rugosité à méso-échelle (celle de la couche limite régionale) et donc conditionne les échanges dans les basses couches de l'atmosphère.

À l'échelle du pixel METEOSAT (25 km<sup>2</sup>), la couverture herbacée est surtout composée : touffes d'herbe et sol nu dans le nord, arachide, mil et jachère en proportions diverses plus au sud, comme le montre la figure 3.

La valeur résultante de rugosité qui intervient dans l'expression du terme B est alors une valeur moyenne dont on peut penser que la gamme de variation est relativement réduite (les bornes 1 cm et 10 cm peuvent être

avancées à titre indicatif, respectivement pour une zone pastorale et une zone de cultures hautes, mil ou sorgho).

Dans le cas des « paysages fermés », on observe des rugosités de surface élevées, du fait de la couverture quasiment totale de formations hautes : forêts et taillis. Une étude microclimatologique fine serait nécessaire pour déterminer les coefficients d'échange liés à ces fortes rugosités.

Des trois facteurs de variation du paramètre B : stratification thermique, vent et rugosité de surface, le dernier apparaît donc prédominant au Sénégal. Il semble cependant que ce paramètre varie assez peu au nord de la Gambie, compte tenu du type de végétation existant.

En outre, les résultats de l'expérimentation menée par l'INRA, l'IRAT et le LERTS sur les hivernages 1984 et 1985 au Sénégal permettent de confirmer notre analyse et de vérifier la cohérence des mesures expérimentales avec la formulation de la relation simplifiée en conditions instables rappelée ci-dessous, ainsi que le montre la figure 4 :

$$\sum_{j=1}^n ET_j - \sum_{j=1}^n Rn_j = n - 0,25 \sum_{j=1}^n (T_s - T_a) \quad [5]$$

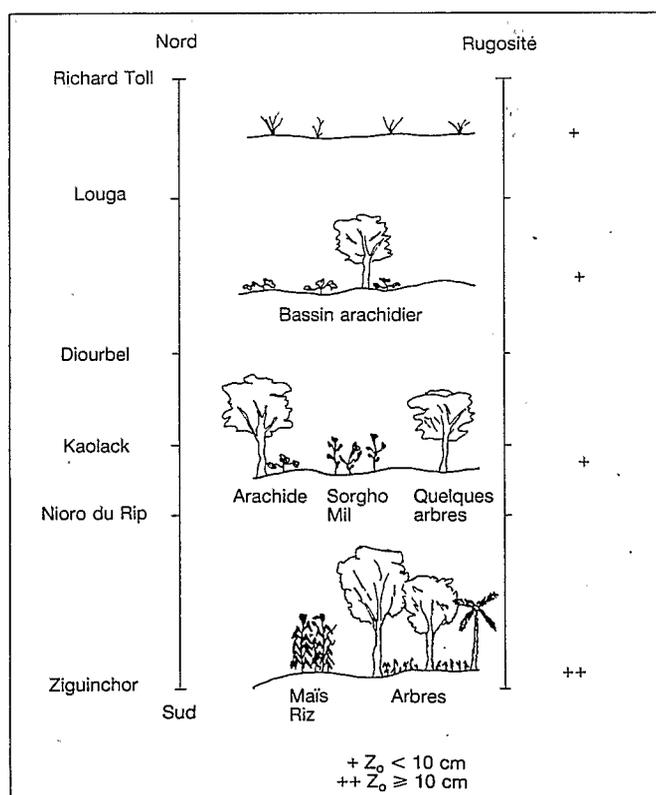


Figure 3 : Evolution qualitative du couvert végétal de surface sur un transect nord-sud, au Sénégal, pendant la saison des pluies.

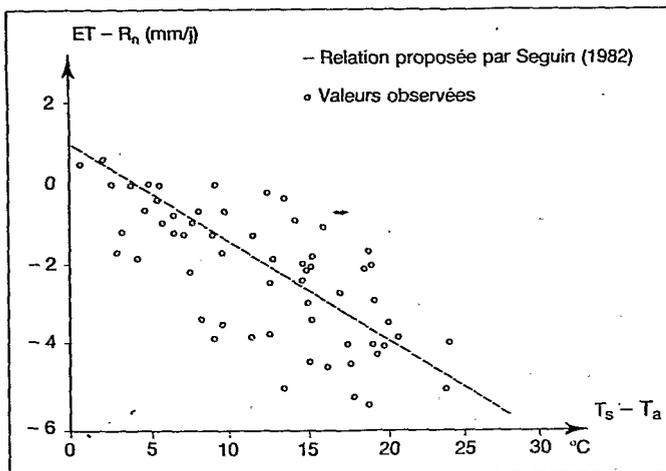


Figure 4 : Relation entre  $ET - R_n$  et  $T_s - T_a$  au Sénégal, année 1985 ( $T_s$  mesurée à 13 h 30 TU), d'après Assad, 1987.

### Approche de l'évapotranspiration à l'échelle du pixel par le bilan hydrique

A l'échelle du pixel (quelques kilomètres carrés) et pour une période de quelques semaines, on peut écrire ainsi le bilan hydrique :

$$\Sigma P_j = \Sigma ET_j + \Sigma E_j + \Sigma \Delta H_j \quad [6]$$

où les grandeurs  $P_j$ ,  $ET_j$ ,  $E_j$ ,  $\Delta H_j$  sont quotidiennes ou à l'échelle de quelques jours :

- P : pluviométrie ;
- ET : évapotranspiration ;
- E : écoulement (drainage + ruissellement) ;
- $\Delta H$  : variation du stock d'eau dans le sol.

### Simulation du bilan hydrique

A l'échelle du champ cultivé, on dispose d'un outil pratique et relativement précis avec le modèle de simulation du bilan hydrique de FRANQUIN et FOREST (1977).

L'utilisation de ce modèle sur 29 stations du Sénégal, sur jachère et cultures (mil, arachide, niébé) ainsi que des statistiques de taux d'occupation du sol au Sénégal élaborées par le PNUD permettent d'approcher la valeur de l'évapotranspiration réelle sur une petite zone comme le pixel Météosat (25 km<sup>2</sup>).

Ces évapotranspirations, cumulées sur la période du 1<sup>er</sup> juin au 10 octobre, et corrigées de la variation du stock d'eau dans le sol, sont mises en relation avec la pluviométrie cumulée sur la même période comme l'illustre la figure 5, pour la culture de mil.

Il est remarquable que deux domaines se distinguent nettement : un domaine de variation linéaire pour  $P < 700$  mm et un domaine de limitation progressive de l'évapotranspiration pour  $P > 700$  mm. La Gambie concrétise donc encore ici une frontière agroclimatique.

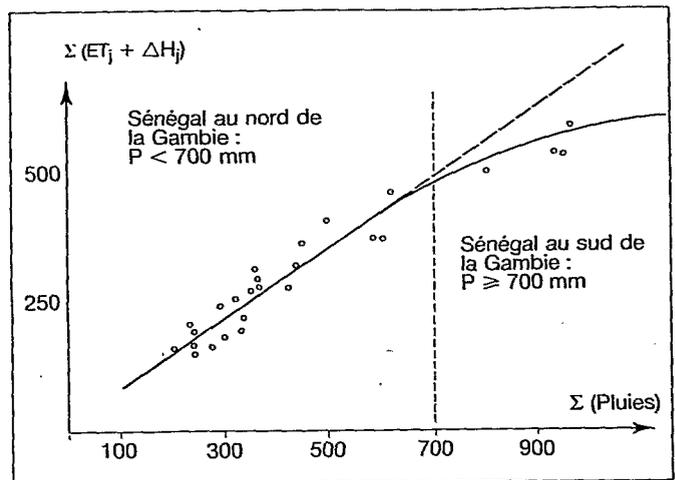


Figure 5 : Courbe  $\Sigma (ET_j + \Delta H_j) = f(\Sigma \text{Pluies})$ . Période du 1<sup>er</sup> juin au 31 octobre.

On retrouve en cela les résultats publiés par TURC en 1954 sur un essai de modélisation de bilan hydrique régional, mené sur 254 bassins fluviaux du monde entier et s'appuyant sur l'équation :

$$P = E + ET \quad [7]$$

où P : précipitation annuelle sur le bassin,

E : écoulement annuel (drainage + ruissellement) mesuré à l'exutoire,

ET : évapotranspiration annuelle sur le bassin.

Les mesures de P ont été faites à partir de pluviomètres et celles de E par jaugeage des cours d'eau.

L'évapotranspiration, calculée par différence, est surestimée puisqu'elle inclut la recharge des aquifères souterrains.

La courbe de TURC, extrapolée à la situation sénégalaise, illustrée par la figure 8, délimite une zone de linéarité entre ET et P pour les faibles pluviométries puis une zone de décroissance du rapport ET/P pour les fortes pluviométries, de la même façon que la courbe de la figure 6. Il est remarquable que la frontière entre les deux zones reste la même : l'isohyète 700 mm.

Ces résultats nous amènent à proposer une expression simplifiée du bilan hydrique, valable à l'échelle du pixel et sur une période de quelques semaines :

- au nord de la Gambie :

$$\Sigma ET_j = \alpha \Sigma P_j + \beta + \Sigma \Delta H_j \quad [8]$$

- au sud de la Gambie (Casamance et Fouladou) :

$$\Sigma ET_j = f(\Sigma P_j) + \Sigma \Delta H_j \quad [9]$$

avec  $f(\Sigma P_j) = \frac{\Sigma P_j}{\sqrt{\gamma + \frac{(\Sigma P_j)^2}{\delta}}}$

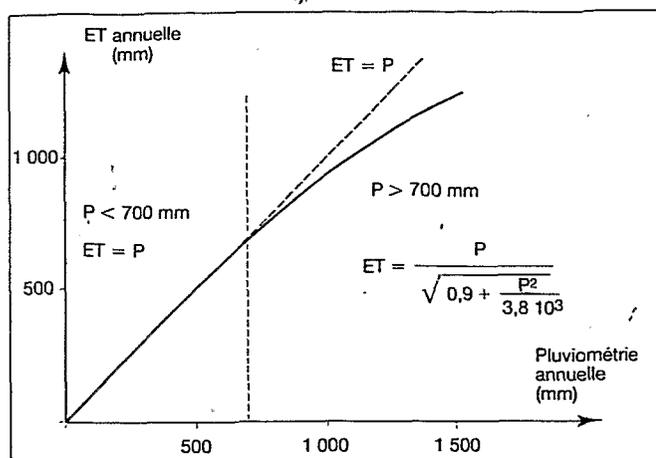


Figure 6 : Relation évapotranspiration annuelle - pluviométrie annuelle en zone intertropicale (d'après Turc, 1954). Application au Sénégal.

Les coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  dépendent de la période considérée ainsi que des conditions climatiques de l'année.

#### Essai de synthèse sur la relation liant la température de surface et la pluviométrie

Nous distinguerons, comme précédemment, deux cas :

- le Sénégal au nord de la Gambie, d'une part,
- la partie sud du pays, d'autre part.

• Au nord, l'équation simplifiée d'estimation de l'évapotranspiration [5] ainsi que l'expression simplifiée du bilan hydrique [8] conduisent à proposer la relation suivante, pour une période supérieure à deux semaines :

$$\Sigma P_j = C(\Sigma(T_s - T_a)) + D(\Sigma R_n) + E(\Sigma \Delta H_j) + F \quad [10]$$

où C, D, E et F sont des constantes.

• Au sud, le phénomène est plus complexe car le poids de la rugosité sur l'équation simplifiée d'estimation de l'évapotranspiration n'est pas connu. Nous ne proposons donc pas d'expression analytique de la relation  $T_s$ ,  $\Sigma P$  dans cette région.

De fait, par cette méthode, la pluviométrie n'est plus reliée à une probabilité d'occurrence de pluie, mais à l'empreinte au sol des précipitations effectivement tombées.

Dans ce cas, la couverture nuageuse devient un obstacle à éliminer et les caractéristiques agropédologiques de l'interface sol-atmosphère autant de facteurs de variation potentiels de la réponse radiométrique.

## Etude expérimentale de la relation liant température moyenne de surface du sol ( $T_s$ ) et pluviométrie ( $\Sigma P$ ) pour les saisons des pluies de 1984 à 1986 au Sénégal

Notre objectif étant de pouvoir suivre par satellite l'évolution de la pluviométrie cumulée le plus tôt possible pendant la saison des pluies, nous nous sommes attachés à étudier la qualité et la conservation des corrélations entre  $T_s$  et  $\Sigma P$  tout au long des trois hivernages 1984, 1985 et 1986.

Ces trois saisons des pluies présentaient l'intérêt d'être fort différenciées : sécheresse en 1984, bonne pluviométrie en 1985, démarrage tardif de l'hivernage en 1986.

Le Sénégal a été retenu pour trois raisons principales : tout d'abord l'existence, du nord au sud, de trois types de climat distincts, sahélien, soudanien et guinéen ; puis la présence d'un réseau d'observation assez dense et bien suivi ; enfin, la possibilité de transférer au Centre de recherches océanographiques de Dakar-Thiaroye (CRODT) la méthodologie mise au point en vue d'effectuer un suivi opérationnel de la pluviométrie dès 1987.

### Les données Météosat

Nous avons utilisé, ici, les synthèses pentadaires élaborées par le centre de météorologie spatiale de Lannion (CMS) sélectionnant les maxima de température sur la base de 6 (ou 12) images par jour.

L'intérêt de ces synthèses est double : en écartant les températures les plus faibles, on filtre la quasi-totalité des nuages en sélectionnant le maximum des températures, on limite l'effet de l'absorption atmosphérique par la vapeur d'eau.

### Correction climatique de la température de surface du sol ( $T_s$ ) par la température de l'air $T_a$ (obtenue à partir du réseau météorologique).

L'examen des valeurs de  $T_s$  sur l'ensemble du Sénégal révèle l'existence d'un gradient sud-nord et ouest-est indépendant de la pluviométrie. Ainsi, on observe, avant les premières pluies une différence de 3 à 8 °C de  $T_s$  entre Kolda (sud du pays) et Podor (fleuve Sénégal) ou entre Dakar (façade maritime) et Bakel (frontière malienne).

C'est pour corriger ce facteur d'origine climatique (rayonnement transmis plus grand dans le nord, gradient de température continental) que nous avons réduit  $T_s$  par  $\Delta T_a = T_a - T_0$  où  $T_0$  est la température de l'air à Dakar (prise comme référence). La prise en compte de la température de l'air  $T_a$  nous rapproche ainsi de la

relation [10]. Mais  $T_a$  est remplacé par  $\Delta T_a$  pour ne pas donner un poids trop important aux erreurs d'estimation de  $T_s$  dans le calcul de  $(T_s - T_a)$ .

### Mise en relation des synthèses Météosat et des données pluviométriques

Des ajustement linéaires ont été testés entre la pluviométrie cumulée à partir de début juin et la moyenne  $(T_s - \Delta T_a)$  pendant la même période.

Ces résultats montrent que :

- pour les trois hivernages étudiés, la variable indiquée  $\Sigma(T_s - \Delta T_a)$  permet d'expliquer plus de 73 % des variations de pluviométrie cumulée à partir de fin juillet. L'évolution de la relation entre  $\Sigma(T_s - \Delta T_a)$  et  $\Sigma P$  pendant l'hivernage 1984 est représentée par la figure 7.

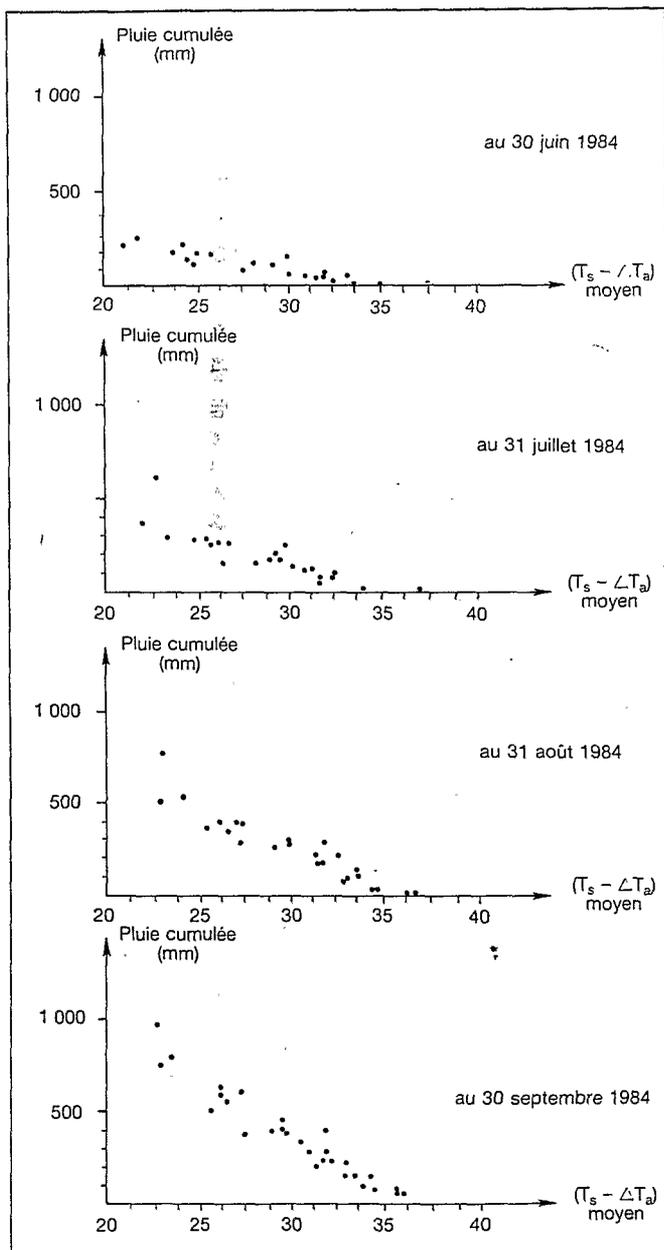


Figure 7 : Relation entre  $(T_s - \Delta T_a)$  et pluie cumulée au cours de l'hivernage 1984 au Sénégal.

- les relations entre  $\Sigma(T_s - \Delta T_a)$  et  $\Sigma P$  semblent se conserver d'une année à l'autre. En effet, malgré de forts contrastes pluviométriques entre les saisons étudiées, il n'y a pas d'écart important par rapport à la relation moyenne, comme l'illustre la figure 8.

### Précision de l'estimation et conclusion partielle

Le tableau I permet de comparer la précision des cartes de pluviométrie cumulée obtenues avec Météosat et des cartes krigées sur les données du réseau sol (42 stations).

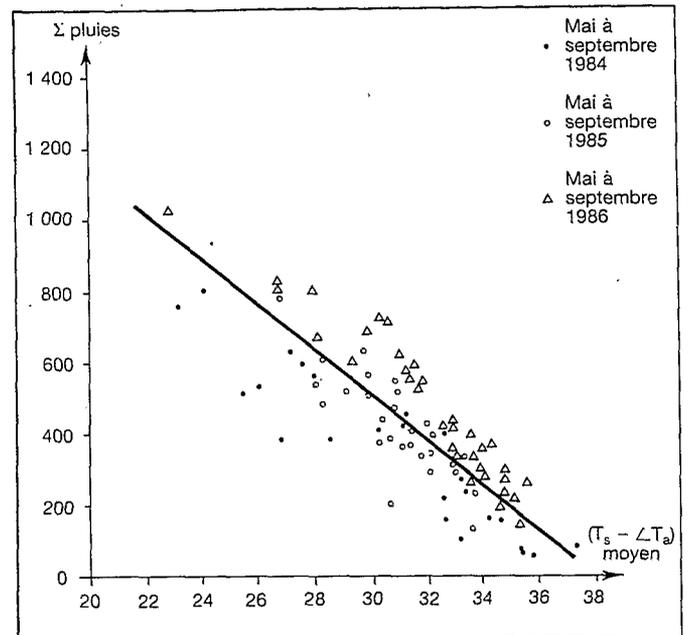


Figure 8 : Relation entre  $(T_s - \Delta T_a)$  et pluies en 1984, 1985 et 1986.

TABLEAU I Précision des cartes  $T_s$  Météosat et des cartes krigées du réseau sol (écarts-type de l'estimation de la pluviométrie, en mm). Année 1986. Sénégal.

Mode de cartographie		Densité des pluviomètres		
		Forte densité (bassin arachidier)	Moyenne densité (Ferlo)	Faible densité (Sénégal oriental)
Krigage	Juillet	0-10	0-20	15-35
	Août	30-60	60-80	60-120
	Septembre	50-80	80-120	140-200
$T_s$ Météosat	Juillet	30-40	30-40	30-40
	Août	60-80	60-80	60-80
	Septembre	80-100	80-100	80-100

La précision des cartes  $T_s$  Météosat apparaît bien supérieure dans les zones à faible densité de pluviomètres (sauf en début de saison) et à peu près équivalente pour les zones à moyenne densité.

Les cartes pluviométriques Météosat apportent donc un supplément d'information :

- pour des régions isolées et mal couvertes par le réseau météorologique, comme le centre-est du Sénégal ;
- pour la description des variations spatiales à l'intérieur des régions.

La convergence observée entre résultats expérimentaux et approche théorique nous a amenés à considérer la température de surface corrigée de la température de l'air comme un bon indicateur de la pluviométrie cumulée. C'est dans ce sens que nous avons développé en 1987, au Centre de recherches océanographiques de Dakar-Thiaroye (CRODT), une chaîne d'élaboration de cartes de pluviométrie cumulée à partir de l'imagerie Météosat.

## Suivi de la pluviométrie au Sénégal en 1987 par Météosat

### La chaîne de traitement informatique

Baptisée « PLUV », elle se compose de trois étapes principales : lecture et redressement des images ; élaboration des cartes de température  $(T_s - \Delta T_a)$  moyenne de début juin à la date considérée ; calage à partir des pluviométries du réseau sol et élaboration de cartes de pluie cumulée. L'organigramme de la chaîne de traitement présenté sur la figure 9 permet de visualiser l'ensemble des opérations effectuées.

### Les premières cartes de pluviométrie cumulée obtenues

Elles concernent le Sénégal et la Gambie, au 31 juillet et au 31 août 1987, et sont présentées en figures 10a et 10b.

Le gradient nord-sud de répartition de la pluviométrie apparaît nettement sur les deux cartes.

Pour la première, des classes de 20 mm ont été choisies de façon à mettre en valeur les faibles variations spatiales de pluviométrie, lors de l'installation de l'hivernage. Des déficits importants sont observables sur les régions de Bambey et Linguère (région centre-est) et

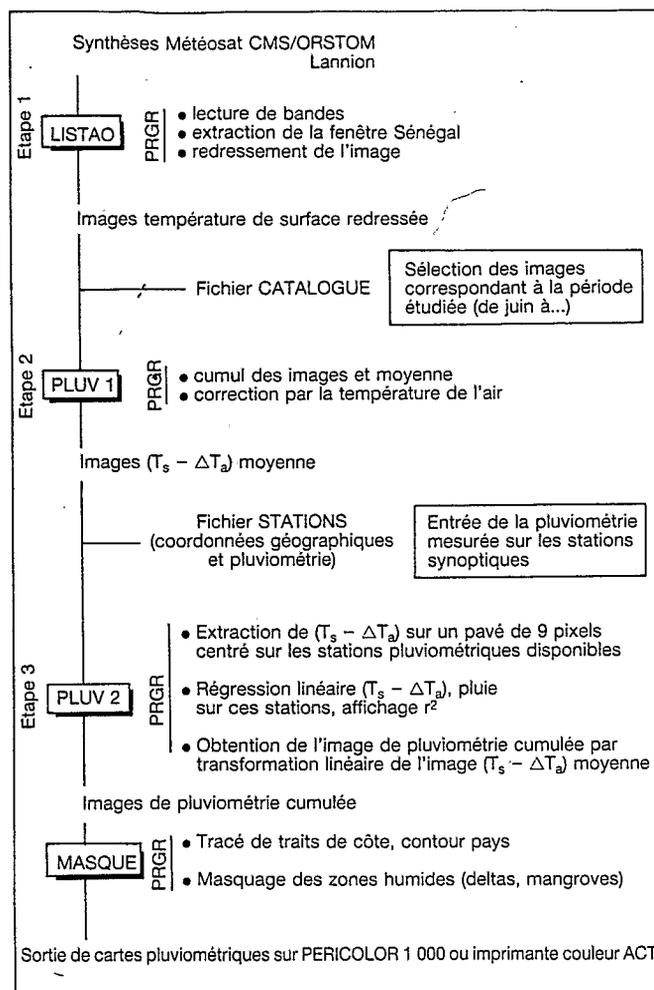


Figure 9 : Chaîne de traitement PLUV pour l'obtention de cartes pluviométriques cumulées à partir de l'I.R. thermique Météosat à l'UTISICRODT de Dakar réalisée par Bergès et Nègre, 1987.

l'irrégularité des pluies sur le Ferlo peut être appréciée (région nord). L'est du pays semble avoir été plus touché par les lignes de grains que la zone ouest.

La carte au 31 août présente la même structure de champ pluviométrique qu'au 31 juillet. Les irrégularités spatiales locales ont tendance à être atténuées par le choix que nous avons fait de classes de 100 mm (pour plus de clarté de la carte). Cependant, le déficit centré sur Bambey apparaît encore ici et semble s'être creusé depuis juillet : fait confirmé par les informations agrométéorologiques du Centre national de recherche agrométéorologique de Bambey.

Les parties hachurées correspondent, sur les cartes, aux zones de non-validité de la méthode : ce sont les régions côtières, les fleuves, les lacs, les deltas, mangroves et zones de rizières où la présence d'une couverture nuageuse quasipermanente ou d'eau libre à la surface du sol conduisent à une surestimation de la pluviométrie. C'est aussi la région de Kédougou à l'extrême sud-est où la présence d'un relief tend au contraire à faire sous-estimer les précipitations.

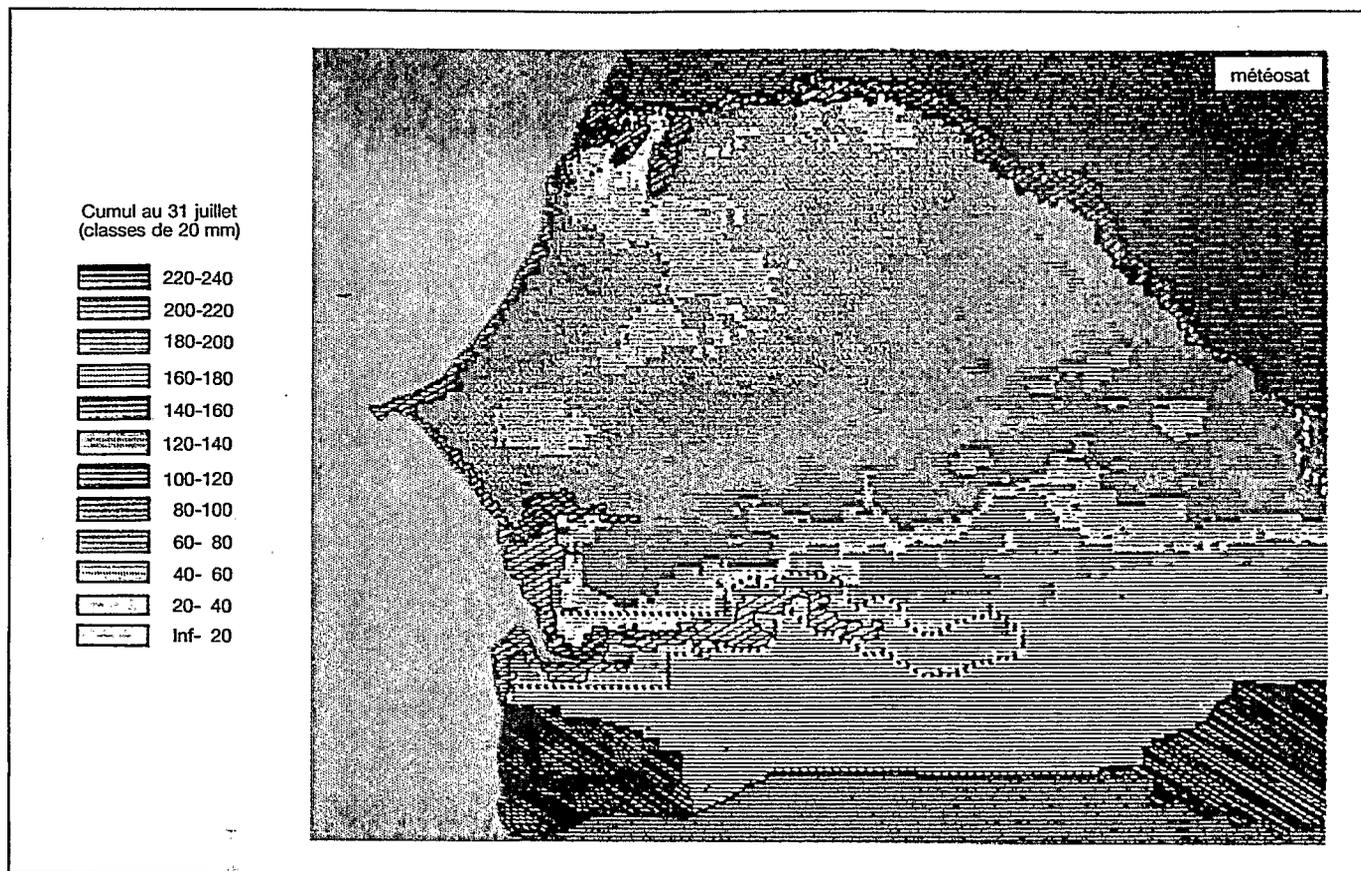


Figure 10b : Pluviométrie 1987 au Sénégal au 31 juillet .

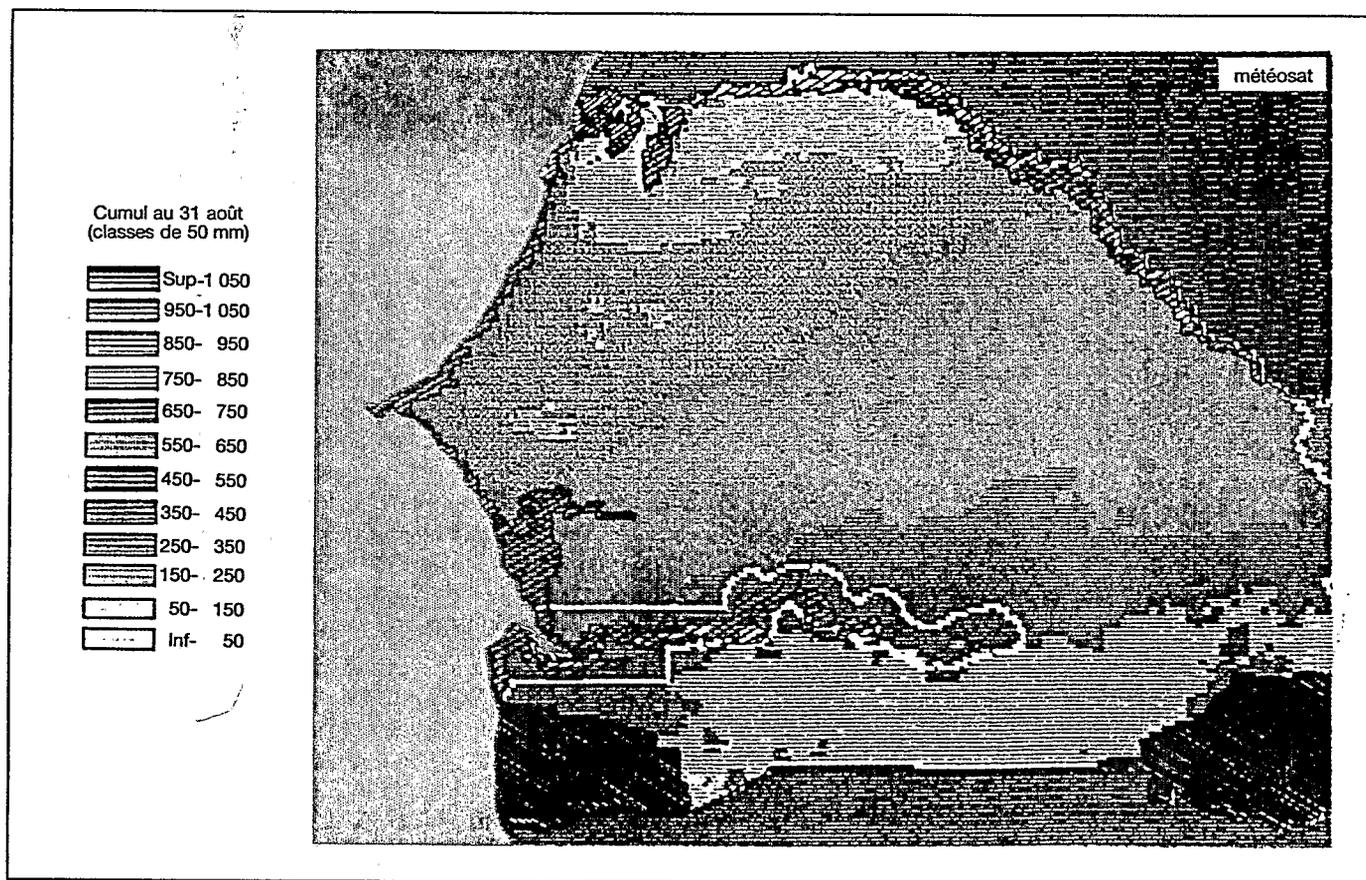


Figure 10a : Pluviométrie 1987 au Sénégal au 31 août .

## Conclusion générale

L'approche expérimentale de la relation entre pluviométrie cumulée et température de surface que nous avons menée, associée à une analyse plus théorique de cette relation, nous a conduit à proposer un nouveau mode de cartographie de la pluviométrie au Sénégal, fondée sur le cumul des images infrarouge thermique de Météosat. Bien qu'encore imparfait, il autorise d'ores et déjà un suivi régulier et synthétique de la pluviométrie et permet de décrire la répartition spatiale de celle-ci avec plus de finesse que les méthodes cartographiques classiques.

La validation de la méthode va se poursuivre au Sénégal en 1988 et son extension à d'autres pays de la bande soudano-sahélienne est tout à fait envisageable.

Mais il reste nécessaire de poursuivre l'effort de recherche. Cela passe à notre avis par un travail à deux échelles spatiales :

– A l'échelle du pixel, il est important d'appréhender la variabilité des données agroclimatiques (ETR, P, T<sub>s</sub>...) sur quelques kilomètres carrés de façon à connaître la représentativité d'une donnée satellite face à des relevés ponctuels de terrain. C'est un des objectifs de l'étude qui sera menée en 1988-1989 par une équipe IRAT-INRA-CNES au Niger.

– A l'échelle de la région, il est essentiel de poursuivre et d'affiner l'étude des relations ETR, T<sub>s</sub> et Pluie à grande échelle en milieu soudano-sahélien, de façon à élaborer des relations semi-empiriques de plus en plus performantes permettant de passer à une cartographie régionale.

Enfin, il est souhaitable de comparer plus avant la méthode proposée à celle des « nuages précipitants » (GUILLOT *et al.* 1986) et à celle des corrélations croisées pluie mesurée - nuages précipitants - température du sol (CARN *et al.*, 1987), en affinant la recherche sur un paramètre correcteur tenant compte des effets atmosphériques — température et humidité relative de l'air — (CARN *et al.*, 1987).

Reçu le 14 mars 1988.  
Accepté le 26 octobre 1988

## Références bibliographiques

ASEM A., DESCHAMPS P.Y., HO D., 1987. Calibration of Meteosat Infrared Radiomet. Using Split Window Channels of NOAA AVHRR. *J. Atmos. Ocean Techn.*, 4(4) : 553-562.

ASSAD E., 1987. Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne. Cas du Sénégal. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, hydrologie, université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 258 p.

ASSAD E., FRETAUD J.P., KERR Y., LAGOUARDE J.P., SEGUIN B., 1985. Utilisation de la thermographie infrarouge dans l'estimation de l'évapotranspiration à l'échelle régionale. Application au Sénégal. *L'Agron. Trop.* 40 (4) : 279-285.

BARRIETT E.C., D'SOUZA G., POWER C.M., 1986. Comparison of two Météosat based satellite rainfall monitoring techniques applied to part of the Western Sahel. *In* : 6<sup>e</sup> symposium des utilisateurs de Météosat, Amsterdam, II, Darmstadt-Eberstadt, RFA, Eumetsat.

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. Satell.*, 20 : 26-30.

CHADWICK A.F., DUGDALE G., TRAORE F.A., MILFORD J.R., 1986. Operational Rainfall Mapping over the Sahel. *In* : 6<sup>e</sup> symposium des utilisateurs de Météosat, Amsterdam, II, Darmstadt-Eberstadt, RFA, Eumetsat.

DESBOIS M., PICON I., KAYIRANGA T., GHAMIEN B., 1986. African Climatology studies using Météosat ISCCP B2 Data. *In* : 6<sup>e</sup> symposium des utilisateurs de Météosat, Amsterdam, II, Darmstadt-Eberstadt, RFA, Eumetsat.

FLITCROFT I.D., DOUGALL M.C., MILFORD V., DUGDALE J.R. et G., 1986. The calibration and interpretation of Meteosat based estimates of Sahelian rainfall. *In* : 6<sup>e</sup> symposium des utilisateurs de Météosat, Amsterdam, II, Darmstadt-Eberstadt, RFA, Eumetsat.

FRANQUIN P., FOREST F., 1977. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.* 32 (1) : 7-11.

FRETAUD J.P., 1984. Etude du régime des vents au Sénégal. *Note int. IRAT*, 37 p.

GUILLOT B., LAHUEC J.P., BELLEC B., 1986. Estimation des précipitations en Afrique de l'Ouest par l'appréciation de l'activité de la convection profonde. *In* : XXVI<sup>e</sup> COSPAR, Toulouse, 30 juin-11 juillet, Symposium n° 10, COSPAR.

HIELKEMA J.O., BARRETT E.C., HARRISON A.R., COLELLA G., PETRICONO A., 1986. Operational Rainfall monitoring in Africa using low resolution Météosat observations. *In* : 6<sup>e</sup> symposium des utilisateurs de Météosat, Amsterdam, II, Darmstadt-Eberstadt, RFA, Eumetsat.

HIERNAUX P.H.Y., JUSTICE C.O., 1986. Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel Malien. *In* : *Int. J. Rem. Sens.*, 7 (11) : 1515-1531.

IMBERNON J., ASSAD E., GUILLOT B., DAGORNE D., 1987. Evaluation de la pluviométrie par cumul des images infrarouges thermiques Météosat (Sénégal), 1986. *Veille Clim. Satell.*, 16 : 49-59.

IMBERNON J., BARON C., 1987. Le krigeage : une méthode d'analyse géostatistique. Exemple d'applications en Agroclimatologie. Document interne IRAT-CIRAD, 14 p.

ITIER D., RIOU Ch., 1982. Une nouvelle méthode de détermination de l'évapotranspiration réelle par thermographie infrarouge. *J. Rech. Atmos.*, 16 (2) : 113-125.

JACKSON R.D., REGINATOR J., IOSO S.B., 1977. Wheat canopy temperature : a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.*, 13 (3) : 651-656.

LAMBERGEON D., DZIETARA S., JANICOT S., 1981. Comportement du champ de vent sur l'Afrique Occidentale. *La Météorologie*, 25 : 69-81.

LEROUX M., 1983. Le climat de l'Afrique Tropicale. Paris, Ed. Champion, 630 p.

NEGRE T., IMBERNON J., GUINOT J.P., CARN M., 1987. Estimation de la pluviométrie au Sénégal en 1984, 1985, 1986 par cumul des synthèses thermiques Météosat. *Veille Clim. Satell.*, 20 : 62-69.

SEGUIN B., 1983. Utilisation de la thermographie infrarouge par satellite pour l'estimation de l'évaporation et le suivi du bilan hydrique. *In* : Applications de la télédétection à l'agriculture. Les colloques de l'INRA, n° 32, Paris 5, 6 et 7 décembre, p. 427-446, INRA.

SEGUIN B., ASSAD E., FRETEAUD J.P., IMBERNON J., KERR Y., LAGOUARDE J.P., 1989. Use of meteorological satellites for water balance monitoring in sahelian regions. *Int. J. Remote Sens.*, 10 (6) : 1101-1117.

SEGUIN B., BAEZ S., MONGET J.M., PETIT V., 1982a. Utilisation de la thermographie infrarouge pour l'estimation de l'évapotranspiration régionale. I - Mise au point méthodologique sur le site de la Crau. *Agronomie*, 2 (1) : 7-16.

SEGUIN B., BAEZ S., MONGET J.M., PETIT V., 1982b. Utilisation de la thermographie infrarouge pour l'estimation de l'évapotranspiration régionale. II - Résultats obtenus à partir des données satellites. *Agronomie*, 2 (2) : 113-118.

SEGUIN B., ITIER B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal I.R. data. *Int. J. Remote Sens.* 4 (2) : 371-383.

TRANCHEFORT J., 1974. La régression. Application à l'agronomie. Paris, ITCF, 178 p.

TURC L., 1954. Calcul du bilan de l'eau. Evaluation en fonction des précipitations et des températures. *In* : Compte rendu de l'Assemblée de Rome, tome III, p. 188-203.

### Summary

NEGRE T., IMBERNON J., GUINOT J.-P., SEGUIN B., BERGES J.-C., GUILLOT B. - Rainfall estimation and monitoring in Senegal by cumulation of the thermal infra-red images of the Meteosat satellite.

An experimental study on the relationship between rainfall and surface temperature measured by the thermal infra-red channel of Meteosat is described for the 1984, 1985 and 1986 rainy seasons in Senegal. The mean surface temperature starting June 1<sup>st</sup>, corrected by air temperature, is a good indicator of cumulative rainfall during the same period. A critical approach of theoretical foundations for this relationship made it possible to support these experimental results on the basis of simplified expressions of surface energy balance and water balance at the point level (or « pixel »). Finally the first cumulative rainfall maps produced in 1987 and the procedure developed to draw them up are described and discussed.

**Key words** : Remote sensing, thermal infra-red, rainfall, Senegal, water balance, energy balance.

### Resumen

NEGRE T., IMBERNON J., GUINOT J.-P., SEGUIN B., BERGES J.-C., GUILLOT B. - Estimación y seguimiento de la pluviometría en Senegal mediante cúmulo de imágenes en infrarrojo térmico del satélite Meteosat.

Se presenta un estudio experimental de la relación que une la pluviometría y la temperatura de superficie tras medirla con el canal infrarrojo térmico de Meteosat durante las estaciones de lluvias de 1984, 1985 y 1986 en Senegal. El promedio de temperatura de superficie a partir del 1° de junio, corregido de la temperatura del aire, resulta ser un buen indicador de la pluviometría acumulada durante el mismo periodo. Un estudio crítico de los fundamentos teóricos de esta relación permite apoyar estos resultados experimentales, sobre la base de expresiones simplificadas del balance energético de superficie y del balance hídrico a escala del pixel. Por último, se presentan y comentan los primeros mapas de pluviometría acumulada obtenidos en 1987, así como la cadena de procesamiento creada para su elaboración.

**Palabras-clave** : Sensores remotos, infrarrojo térmico, pluviometría, Senegal, balance hídrico, balance energético.