

*Approche  
de l'évapotranspiration  
par télédétection :*

utilisation des satellites  
météorologiques Meteosat et  
Noaa en Afrique sahélienne

## INTRODUCTION

En zone aride, l'importance du phénomène d'évapotranspiration est encore accrue par l'effet prépondérant de la disponibilité de l'eau sur la production végétale.

C'est naturellement le cas pour l'Afrique sahélienne, où les travaux d'agroclimatologie, développés depuis une vingtaine d'années, ont mis l'accent surtout sur la quantification du bilan hydrique des cultures.

En ce qui concerne l'évapotranspiration, cette dernière nécessite :

- d'une part la mesure ou, plus généralement, l'estimation de la référence climatique fournie par l'évapotranspiration potentielle (ETP) ;
- d'autre part la mesure ou le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) des cultures considérées.

## L'ÉVAPOTRANSPIRATION EN ZONE SAHÉLIENNE

L'étude de COCHEMÉ et FRANQUIN (1967) a permis une première approche globale des variations spatio-temporelles d'ETP de la zone sahélienne. La thèse de RIOU (1972), qui s'appuie sur des mesures effectuées en Afrique centrale, présente une analyse exhaustive du déterminisme de cette ETP en relation avec les paramètres climatiques et les caractéristiques de milieu de la parcelle de mesure ; par ailleurs, les travaux de DANCETTE (1976, 1983) ont conduit à une connaissance approfondie de ses variations spatiales, dans le cas particulier du Sénégal. La thèse de POUYAUD (1985), sur l'évaporation des surfaces d'eau libre, vint compléter ces travaux. À l'heure actuelle et à travers cet ensemble, il est permis d'estimer - à condition évidemment de disposer des données climatiques adéquates - que la connaissance de l'ETP est suffisamment précise (de l'ordre de 10 %) pour la caractérisation du bilan hydrique des cultures.

En ce qui concerne l'ETR, le constat (SEGUIN *et al.*, 1982) est un peu différent bien qu'il ne soit pas spécifique à l'Afrique sahélienne. Peu de mesures sont disponibles à partir des dispositifs micrométéorologiques ; ce sont essentiellement les suivis de bilan hydrique, à partir de mesures neutroniques (DANCETTE, 1983), qui ont permis de quantifier l'ETR de différentes cultures en parcelles d'expérimentation. Depuis quelques années, les modèles de bilan hydrique, en particulier celui de FRANQUIN et FOREST (1977) développé ensuite à l'Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (Irat) par FOREST, fournissent des estimations d'ETR par périodes de cinq

à dix jours, à partir d'hypothèses sur les réserves utiles des types de sols considérés. Les calages effectués permettent d'obtenir le plus souvent une bonne concordance entre mesures et estimations d'ETR ; en général, les écarts se situent dans la fourchette  $\pm 20\%$  pour des valeurs décennales. Ces estimations, qu'on peut juger satisfaisantes dans l'état actuel des choses, permettent d'effectuer un suivi agroclimatique de l'année en cours, de porter des diagnostics sur les évolutions climatiques à long terme (FOREST, 1982) et de comparer des stratégies d'utilisation de l'eau dans l'optique de son optimisation. Un des problèmes soulevés par la plus large utilisation de ces modèles vient de ce qu'ils caractérisent essentiellement une situation « locale », conditionnée par les données météorologiques et par les caractéristiques du sol adopté ; ils ne peuvent donc traduire la forte variabilité des situations effectives, en particulier des épisodes pluvieux.

## APPORTS POSSIBLES DE LA TÉLÉDÉTECTION

À ce niveau, le seul moyen d'introduire une description spatiale des échanges hydriques réside dans l'utilisation de la télédétection. Si certaines possibilités apparaissent au niveau des micro-ondes, passives ou actives (radar), les systèmes satellitaires demeurent encore peu, ou insuffisamment, opérationnels dans ces domaines de longueur d'onde. Disponible à partir des satellites météorologiques Meteosat ou NOAA-AVHRR, l'infrarouge thermique, en revanche, permet d'accéder à l'estimation de l'ETR, par l'intermédiaire de la mesure de la température de surface, et surtout à sa cartographie (avec une résolution de 5 km pour Meteosat, et de 1 km pour NOAA).

Les travaux développés dans notre laboratoire sur ce sujet (SEGUIN *et al.*, 1982 ; SEGUIN, 1984) sont apparus comme porteurs d'éventuelles applications intéressantes au niveau de l'Afrique sahélienne ; ils ont suscité un programme d'étude sur le suivi du bilan hydrique par télédétection au Sahel. Celui-ci, parallèlement aux données d'IR thermique, a utilisé les indices de végétation déduits des canaux du visible et du proche infrarouge des satellites NOAA, lesquels se sont révélés très complémentaires des températures de surface pour la caractérisation de l'évapotranspiration.

Dans sa première phase (1984-1987), ce programme a rassemblé :

- l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) d'Avignon (bioclimatologie), l'IrAT de Montpellier et le LERTS de Toulouse, au niveau français ;

- l'Institut sénégalais de recherches agricoles (ISRA) et la Météorologie nationale, au Sénégal, avec l'appui d'Agrhymet pour l'extension à la zone sahélienne.

Il a bénéficié d'un financement conjoint du CCR, à Ispra, de la CEE-DGXII, dans le cadre du projet *Caractérisation par les techniques de télédétection de la dynamique de la désertification à la périphérie du Sahara*, et du ministère des Relations extérieures (MRE), en France.

Les travaux ont mis en évidence l'apport essentiel de l'imagerie satellitaire pour la cartographie spatiale du facteur hydrique ; en particulier, ils ont établi la possibilité de quantifier la répartition spatiale des pluviométries (par le biais de l'évapotranspiration et de son influence sur la température de surface) sur une échelle mensuelle, à partir des sommes de température de surface obtenues par Meteosat. Cette approche se révèle très complémentaire de celle élaborée au Centre de météorologie spatiale (CMS) de Lannion qui s'appuie sur le suivi des épisodes nuageux à sommet froid (CARN *et al.*, 1987). Elle laisse espérer, à partir d'un approfondissement des bases théoriques des relations obtenues (essentiellement empiriques, dans les 2 cas, à l'heure actuelle), la possibilité d'améliorer, dans un proche avenir, la connaissance de la répartition spatiale des épisodes pluvieux.

L'ensemble des résultats obtenus a fait l'objet d'un certain nombre de publications (ASSAD, 1984 ; ASSAD *et al.*, 1986 ; ASSAD, 1987 ; IMBERNON *et al.*, 1987 ; KERR *et al.*, 1987 ; NÈGRE *et al.*, 1987 ; SEGUIN *et al.*, 1987 ; SEGUIN *et al.*, 1989 ; KERR *et al.*, 1989) qu'il n'est pas dans notre propos de reproduire ici. En revanche, il nous a paru intéressant de reprendre les principales conclusions de ces études dans l'optique spécifique de l'évapotranspiration, en montrant comment ce facteur peut être quantifié, surtout dans ses variations spatiales, à partir de mesures satellitaires, par une double approche : estimation à partir de la température de surface d'une part, mise en relation avec l'indice de végétation normalisé d'autre part.

## Estimation de l'évapotranspiration à partir de l'IR thermique

Le principe de base de cette estimation repose sur l'analyse du bilan d'énergie au niveau de l'interface sol-atmosphère, et s'exprime par l'équation instantanée en conditions diurnes :

$$R_n = S + H + LE \quad (1)$$

où l'énergie admise sous forme de rayonnement net  $R_n$  se répartit entre flux de chaleur par conduction dans le sol  $S$ , flux de chaleur sensible dans l'air  $H$  et flux de chaleur latente  $LE$  (flux de vapeur d'eau  $E$  qui correspond à l'ETR convertie en énergie par le biais de la chaleur latente de vaporisation  $L$ ).

Les lois des échanges turbulents au niveau de l'interface permettent d'écrire :

$$H = \rho C_p h (T_s - T_a) \quad (2)$$

en exprimant  $H$  en fonction de l'écart  $T_s - T_a$  de température entre la surface et l'air par le biais du coefficient d'échange  $h$ , les constantes  $\rho$  et  $C_p$  étant la masse spécifique et la chaleur spécifique de l'air. Il s'ensuit que la relation déduite de (1) et (2) :

$$LE = R_n - S - \rho C_p h (T_s - T_a) \quad (3)$$

établit la liaison entre le niveau instantané de l'évapotranspiration  $LE$  et l'écart  $T_s - T_a$ , qui est la base des différentes méthodes utilisables pour passer de  $T_s$  à  $LE$ .

Nous renvoyons à un article de synthèse récent (SEGUIN, 1984) pour l'analyse détaillée de celles-ci. Depuis quelques années, à partir de cette équation, nous avons développé pour notre part une approche simplifiée qui permet de passer de la mesure thermographique en milieu de journée à l'estimation de l'évapotranspiration journalière (ETR<sub>j</sub>) en s'appuyant sur l'adoption d'une valeur moyenne calculée pour le coefficient d'échange (SEGUIN et TIER, 1983). L'application de cette relation simplifiée, combinée à l'utilisation d'un modèle agrométéorologique, permet d'effectuer, à partir des données de Meteosat (SEGUIN *et al.*, 1986) et de NOAA (VIDAL *et al.*, 1986) une cartographie de l'ETR<sub>j</sub> qui constitue une première approche satisfaisante du problème, en particulier lorsque sont considérées des périodes de temps d'au moins quelques jours ; la figure 1 a été obtenue d'après des paramètres de sortie du modèle agrométéorologique Earth (CHOISNEL, 1985) à partir des données météorologiques d'Avignon.

Cette approche permet donc d'établir :

$$ETR_j = R_{nj} + a - b (T_s - T_a) \quad (4)$$

où les coefficients  $a$  et  $b$  dépendent essentiellement de la rugosité de la surface considérée.

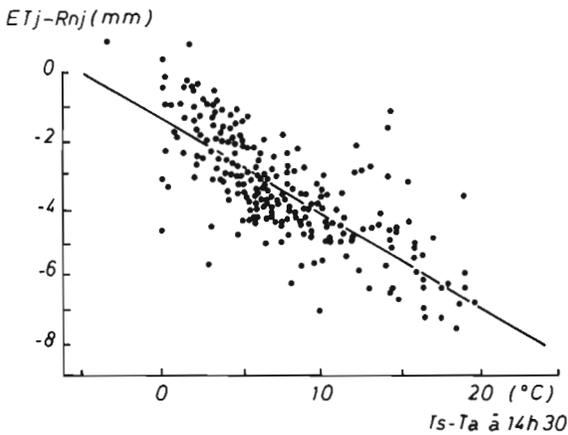


FIGURE.1 - Relation entre  $ET-R_n$  journalière (en mm) et  $T_s - T_a$  à 14h 30 TU obtenue à partir du modèle Earth pour les données climatiques d'Avignon.

$$\sum ETR = \sum R_n + na + b \sum (T_s - T_a) \tag{5}$$

où l'on retrouve le concept de «stress-degree day»  $[\sum (T_s - T_a)]$  introduit par JACKSON *et al.* (1977).

### L'évapotranspiration et la production de biomasse : relation avec l'indice de végétation normalisé

La production de biomasse correspond à la quantité de matière sèche (MS) élaborée par l'assimilation nette ( $A_n$  : différence entre photosynthèse et respiration) à l'échelle de temps élémentaire (dt) :

$$(dMS)/(dt) = A_n = Phot. - Resp. \tag{6}$$

elle devient, pour une période donnée :

$$MS = \sum A_n \tag{7}$$

Les mécanismes de photosynthèse (et de respiration) comme ceux de transpiration sont la résultante d'un flux de diffusion entre la cavité stomatique (à l'intérieur de la feuille) et les composants de l'air : gaz carbonique dans le premier cas, eau dans le second. Cette analogie, qui existe à l'échelle fine, entre les 2 mécanismes a conduit depuis très longtemps, à les considérer comme fortement liés entre eux.

Si le «coefficient de transpiration» ( $A_n/ETR$ ) (de l'ordre de 1/360 ; БУДЬКО, 1974) peut varier très largement, suivant le type de couvert végétal et les conditions climatiques considérées, à grande échelle, la production de biomasse (MS) est bien reliée à l'évapotranspiration réelle cumulée sur la période considérée par des relations de type linéaire :

$$MS = c \sum ETR \tag{8}$$

Or, des travaux récents, qui utilisent essentiellement Noaa-AVHRR et l'indice normalisé NDVI =  $(C2 - C1)/(C2 + C1)$  calculé à partir de la luminance C1 et C2 dans les

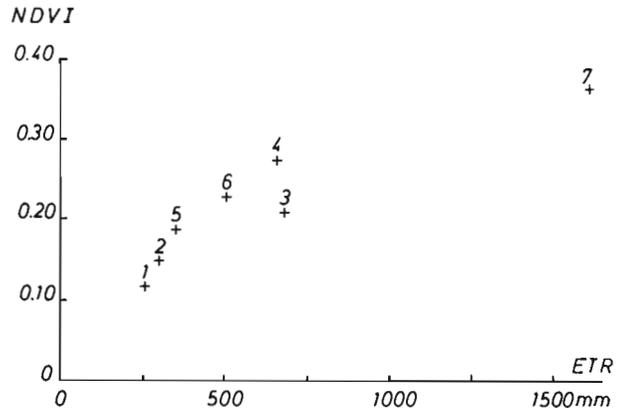


FIGURE.2 - Relation entre l'indice annuel intégré NDVI et le cumul d'ETR annuelle pour 7 stations d'Asie (1. Quetta, 2. Kaboul, 3. Delhi, 4. Darjeeling, 5. Chang Chun, 6. Lahore, 7. Pontaniak) à partir des données publiées par JUSTICE et al. (1985).

canaux 1 et 2 (rouge et proche infrarouge), ont mis en évidence certaines relations entre la valeur moyenne intégrée de cet indice NDVI au cours de la saison de végétation et la production de biomasse correspondante.

En effet, si les recherches effectuées à l'échelle de la parcelle ont surtout mis en évidence les relations qui existent entre NDVI et biomasse sur pied à un instant donné (notamment : AASE et SIDDOWAY, 1981 ; KIMES *et al.*, 1981 ; TUCKER *et al.*, 1981 ; KOLLENKARK *et al.*, 1982), l'analyse de l'évolution temporelle du NDVI à partir de la base des données *Global Vegetation Index* du satellite Noaa (échelle hebdomadaire et résolution de l'ordre de 20 km x 20 km) a permis de mettre en évidence, au moins qualitativement, une relation à grande échelle entre l'indice intégré annuel et la production primaire annuelle de matière sèche (sur l'Afrique : TUCKER *et al.*, 1985 ; sur l'ensemble du globe : JUSTICE *et al.*, 1985).

Dans ce dernier article, la publication de l'analyse de résultats sur 7 sites d'Asie nous a permis, à partir des données climatiques jointes (SEGUIN, 1986), d'établir une relation quantitative satisfaisante avec l'ETR annuelle calculée par la formule hydrologique de TURC (1954) (fig. 2).

La correspondance entre cette relation et celle qui existe entre productivité globale annuelle et ET (LIETH, 1975) permet d'établir une correspondance approchée :

$$MS = d \text{ NDVI} \quad (9)$$

(avec  $d \approx 40$  pour MS exprimé en  $t \cdot ha^{-1}$ ).

Comme suggéré par TUCKER *et al.* (1985), cette relation entre indice intégré et biomasse produite peut s'expliquer par l'analyse du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) absorbé par la végétation suivant le formalisme défini par MONTEITH (1977) et repris par KUMAR et MONTEITH (1982), HATFIELD *et al.* (1984), WIEGAND et RICHARDSON (1984), GOSSE *et al.* (1986), etc. :

$$MS = \sum IPAR \cdot E_b \sum dt \quad (10)$$

où le PAR intercepté (IPAR) est converti en matière sèche avec un coefficient  $E_b$  relativement constant pour une culture donnée.

En écrivant  $IPAR = E_i \cdot PAR$ ,  $E_i$  étant l'efficacité d'interception du PAR, et en sachant que le rapport du PAR au rayonnement solaire global ( $R_g$ ),  $(PAR)/(R_g) = E_c$ , est de l'ordre de 0,5, on peut obtenir :

$$MS = Eb \cdot Ec \sum Rg \cdot Ei dt \quad (11)$$

Or, des travaux comme ceux de ASRAR *et al.* (1984) montrent une relation quasiment linéaire, dans certaines limites, entre  $Ei$  et l'indice NDVI :

$$NDVI \approx n Ei$$

$n$  étant un coefficient dépendant du type de couvert végétal.

Il s'ensuit :

$$MS = (Eb \cdot Ec / n) \sum Rg \cdot NDVI dt \quad (12)$$

ce qui justifie, de façon approximative, la relation entre MS et NDVI - en bon accord avec l'analyse détaillée de SELLERS (1985) qui repose sur la modélisation des réflectances spectrales du couvert végétal et qui montre une telle relation à l'échelle instantanée.

Il apparaît donc, tant à partir de l'IR thermique que de l'indice de végétation normalisé, la possibilité d'approcher l'ETR sur des périodes de quelques jours, et donc celle de la cartographier en utilisant l'information sur les variations spatiales contenues dans les données de télédétection.

### APPLICATION À L'AFRIQUE SAHÉLIENNE : COMPLÉMENTARITÉ ENTRE ÉVAPOTRANSPIRATION, IR THERMIQUE ET INDICES DE VÉGÉTATION

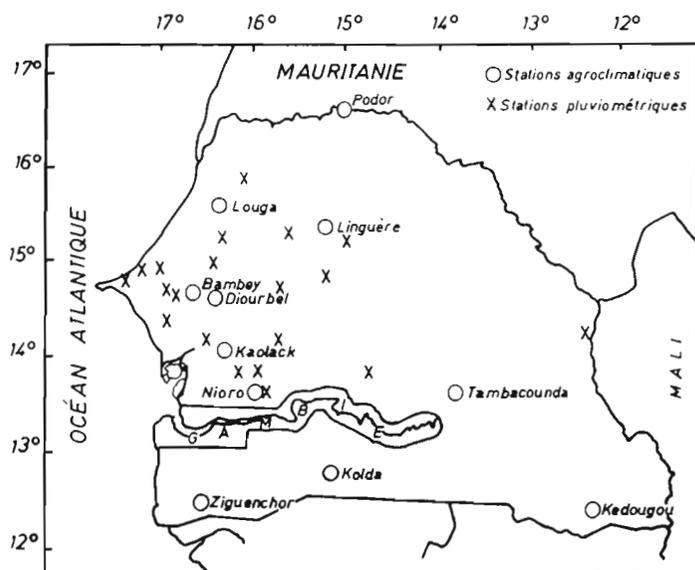


FIGURE. 3 - Le réseau agrométéorologique du Sénégal utilisé pour l'étude.

Cette possibilité a été testée dans le cadre du programme *supra*, principalement au Sénégal, en utilisant d'une part :

- le réseau agrométéorologique de la Météorologie nationale et de l'Isra (fig. 3) ;
- le modèle\* de bilan hydrique de l'Irat ;

et d'autre part :

- les données de l'IR thermique de Meteosat, reçues à Darmstadt et traitées au LERTS de Toulouse\*\* ;
- les données d'indice normalisé NDVI mesurées par Noaa-AVHRR\*\*\*.

## Estimation de l'ETR à partir de l'IR thermique

En dépit de l'incertitude notable (de l'ordre de 1 à 5 °C) sur la température de surface déduite de Meteosat, l'analyse des relations simplifiées entre ETRj - Rnj, à l'échelle journalière, et Ts - Ta (Ts : Meteosat à 13 h 30 min TU, et Ta : température maximale sous abri) se révèle globalement satisfaisante, comme le montre la figure 4.

L'utilisation de la relation :

$$\text{ETRj} - \text{Rnj} = 1,0 - 0,25 (\text{Ts} - \text{Ta})$$

obtenue dans le Sud-Est de la France permet d'estimer l'ETRj avec une précision de l'ordre de  $\pm 1,0 \text{ mm.j}^{-1}$  en valeur journalière ; cette erreur est notablement réduite par l'utilisation des valeurs cumulées sur plusieurs jours.

Il est ainsi possible de proposer des cartographies d'ETRj pour les journées claires sur la partie nord du Sénégal (en gros au-dessus de la latitude de Dakar), comme le montre la figure 5 qui illustre ces cartographies pour 2 journées particulières.

Les estimations d'ETR ainsi effectuées ont pu être utilisées pour en déduire la cartographie des rapports (ETR/ETM), qui traduisent la satisfaction des besoins en eau sur les principales cultures, et à partir des relations entre rendement et ETR/ETM, pour proposer, à titre exploratoire, des cartographies de rendement basées sur des séries historiques décennales.

## Relations entre ETR et indices de végétation

Parallèlement, l'analyse simultanée de l'ETR et des données d'indice normalisé NDVI déduites de 10 dates Noaa acquises à Mas Palomas au cours de la saison des pluies (en introduisant un décalage de 20 jours sur l'ETR pour tenir compte du temps de réponse sur la production de biomasse traduite par l'indice NDVI), fait apparaître une très bonne concordance, que traduisent des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,99, entre l'évolution temporelle des ETR et des NDVI cumulés (fig. 6).

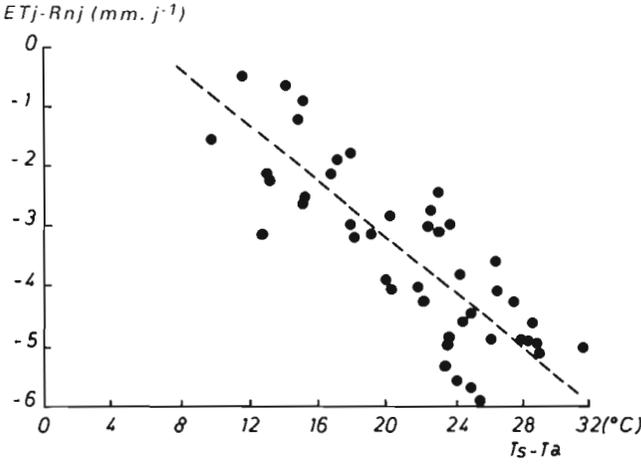
---

\* (version BIP 4 de Forest), simulé pour 4 cultures (mil, niébé, arachide et jachère d'herbe) ; l'ETR qui correspond à chaque station est obtenue par la pondération de l'ETR de chaque culture par sa surface relative donnée dans les statistiques agricoles.

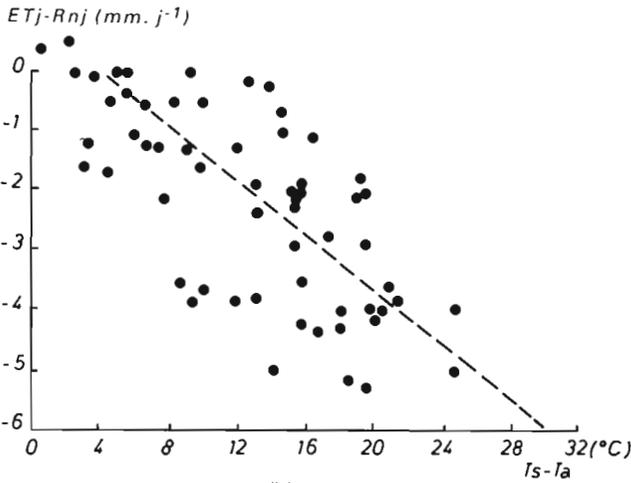
\*\* pour les détails sur l'étalonnage et la correction atmosphérique voir SEGUIN *et al.* (1988).

\*\*\* soit :

- à 20 km (résolution dégradée en couverture totale du globe à l'échelle hebdomadaire),
- à 1 km, à partir de 1986 (données journalières reçues à la station de l'ESA de Mas Palomas, aux Canaries).



(a)



(b)

FIGURE. 4 - Relation entre ETR - R<sub>n</sub> journalière et T<sub>s</sub> - T<sub>a</sub> (T<sub>s</sub> Meteosat à 13 h 30 TU et T<sub>a</sub> température maximale sous abri) au Sénégal en 1984 (a) et 1985 (b). Le trait pointillé correspond à la relation ETR - R<sub>n</sub> = 1.0 - 0.25 (T<sub>s</sub> - T<sub>a</sub>).

### Complémentarité entre IR thermique et indices de végétation

Il apparaît ainsi, à l'échelle de la décade et des échelles de temps supérieures (mois, saison des pluies), une forte complémentarité de l'IR thermique et des indices de végétation au niveau de l'ETR (et plus globalement de la pluviométrie) :

$$\sum ETR = \sum R_n + a - b (\sum T_s - T_a) \tag{13}$$

$$\sum ETR = d \sum R_g \cdot NDVI \tag{14}$$

avec  $d = E_b \cdot E_c / n.c$

Cette complémentarité, traduite par les relations respectives de  $\sum T_s$  et de  $\sum NDVI$  avec la pluviométrie annuelle (et non plus avec ETR, dont nous ne disposons pas



FIGURE. 5 - Cartographie d'ETR obtenue à partir des données Meteosat et de la relation simplifiée  $ETR - R_n = 1.0 - 0.25 (T_s - T_a)$  pour deux journées particulières (a. 17-07-1984, b. 13-08-1988).

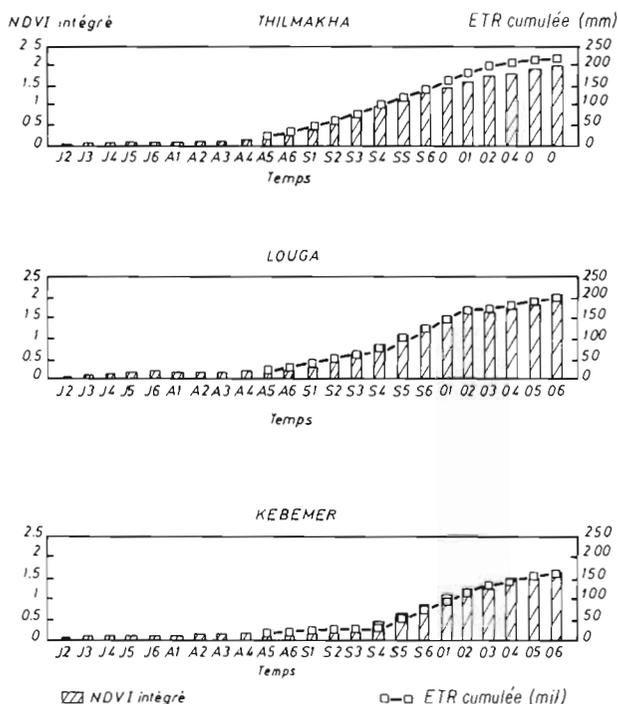


FIGURE. 6 - Évolution simultanée des ETR (avec un retard de 20 jours) et NDVI cumulés au cours de la saison des pluies 1986 pour 3 sites au Sénégal (Thilmakha, Louga et Kebemer). L'abscisse représente le temps (la lettre étant l'initiale du mois, et le chiffre l'identification de la pentade).

d'estimation au niveau du réseau Agrhymet), se retrouve au niveau du Sénégal (fig. 7 et 8), mais également dans l'ensemble de l'Afrique sahélienne (fig. 9 et 10) pour l'année 1984.

## CONCLUSION

L'analyse effectuée à partir des données satellitaires Meteosat et Noaa-AVHRR sur l'Afrique sahélienne a montré les possibilités d'accéder à une estimation de l'ETR et de ses variations spatiales en utilisant conjointement la température de surface et l'indice de végétation normalisé.

Les résultats présentés ici représentent une première contribution exploratoire dans ce domaine nouveau. Ils confirment les potentialités des données satellitaires pour le suivi agrométéorologique des cultures dans cette zone géographique, mais ils doivent être précisés par des travaux ultérieurs (actuellement en cours) qui visent à améliorer la précision des estimations ainsi obtenues et à valider celles-ci par des dispositifs de mesure d'ETR sur des zones homogènes de dimensions compatibles avec l'échelle de résolution satellitaire (en particulier le kilomètre carré accessible à partir de Noaa-AVHRR).

FIGURE. 7 - Relation entre  $\Sigma T_s$  sur 15 dates et la pluie cumulée pour 11 stations du Sénégal au cours de la saison des pluies

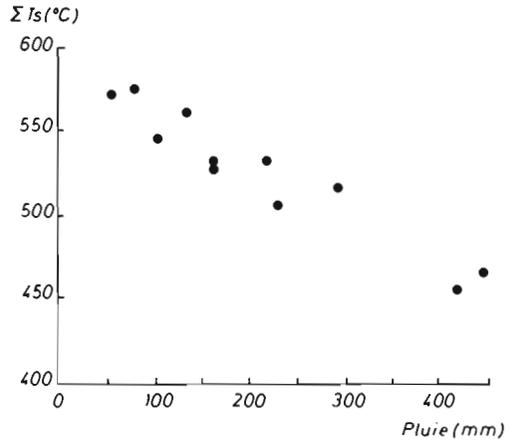


FIGURE. 8 - Relation entre NDVI intégré et la pluie cumulée pour 11 stations du Sénégal au cours de la saison des pluies 1984.

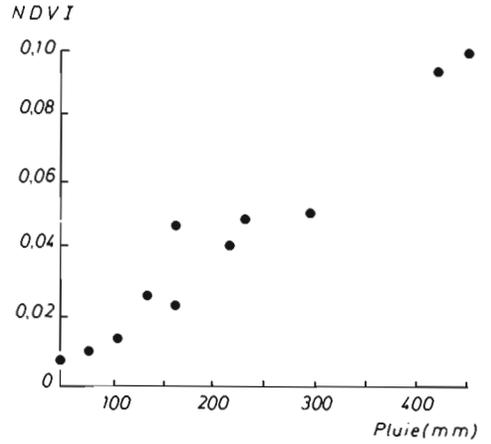
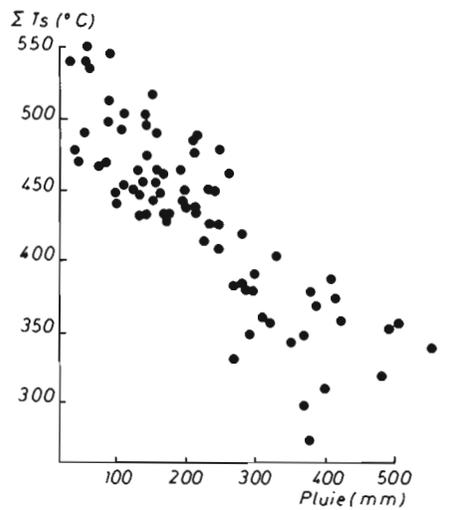


FIGURE. 9 - Relation entre  $\Sigma T_s$  et la pluie cumulée pour 80 stations du réseau Agryhmet au cours de la saison des pluies 1984.



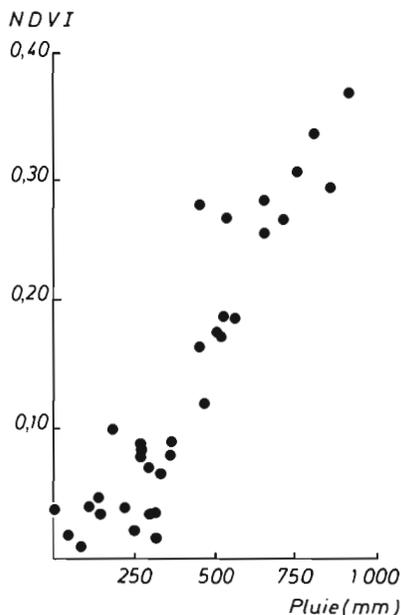


FIGURE. 10 - Relation entre NDVI intégré et la pluie cumulée pour 80 stations du réseau Aghrymet au cours de la saison des pluies 1984.

#### BIBLIOGRAPHIE

- AASE (J. K.) et SIDDOWAY (F. H.), 1981. - Assessing winter wheat dry matter production via spectral reflectance measurements. *Rem. Sens.Env.*, 11 : 267-277.
- ASRAR (G.), FUCHS (M.), KANEMASU (E. T.) et HATFIELD (J. L.), 1984. - Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. Journ.*, 76 : 300-307.
- ASSAD (E.), 1984. - Télédétection et bilan hydrique : application à l'évapotranspiration régionale. Mémoire DEA. Science de l'Eau et Aménagement. USTL Montpellier, 57 p., *multigr.*
- ASSAD (E.), 1987. - Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne : cas du Sénégal. Thèse de doctorat, USTL Montpellier, 258 p., *multigr.*
- ASSAD (E.), SEGUIN (B.), KERR (Y.), FRETEAUD (J.-P.) et LAGOUARDE (J.-P.), 1986. - Approche quantitative de la pluviométrie au Sénégal à l'aide d'images infrarouge thermique du satellite Meteosat. *Veille Clim. Sat.*, 13 : 21-30.
- BUDYKO (M. I.), 1974. - Atlas du bilan thermique de la terre. Gidrometeoizdat, Leningrad.
- CARN (M.), DAGORNE (B.), GUILLOT (B.) et LAHUEC (J.-P.), 1987. - Estimation des précipitations par satellite au Sahel pour la période de mai à septembre 1987. *Veille Clim. Sat.*, 20 : 26-31.
- CHOISNEL (E.), 1985. - Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. In : «Les besoins en eau des cultures». Conf. CCID Paris, Sept. 1984. INRA, Versailles.
- COCHEMÉ (J.) et FRANQUIN (P.), 1967. - An agroclimatology survey of a semi-arid area in Africa South of Sahara. OMM, Genève, *Note technique* n° 86, 136 p.
- DANCETTE (C.), 1976. - Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. *Agron. trop.*, 31 : 281-338.
- DANCETTE (C.), 1983. - Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agron. trop.*, 38 : 281-294.

- FOREST (F.), 1982. - Évolution, de la pluviométrie en zone soudano-sahélienne au cours de la période 1940-1979. Conséquences sur le bilan hydrique des cultures pluviales au Sénégal. *Agron. trop.*, 37 : 17-23.
- FRANQUIN (C.) et FOREST (F.), 1977. - Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. trop.*, 32 : 7-11.
- GOSSE (G.), VARLET-GRANCHER (C.), BONHOMME (R.), CHARTIER (M.), ALLIRAND (J.-M.) et LEMAIRE (G.), 1986. - Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6 : 47-57.
- HATFIELD (J. L.), KANEMASU (E. T.), ASRAR (G.), JACKSON (R. D.), PINTER (P. J.), REGINATO (R. J.) et IDSO (S. B.), 1984. - Leaf-area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *Int. Journ. Rem. Sens.*, 6 : 167-177.
- IMBERNON (J.), ASSAD (E.), GUINOT (B.) et DAGORNE (D.), 1987. - Évaluation de la pluviométrie par cumul des images infrarouge thermique Meteosat (Sénégal) en 1986. *Veille Clim. Sat.*, 16 : 49-59.
- JACKSON (R. D.), REGINATO (R. J.) et IDSO (S. B.), 1977. - Wheat canopy temperatures : a practical tool for evaluating water requirements. *Water Res. Res.*, 13 : 651-656.
- JUSTICE (C. I.), TOWNSHEND (J. R. G.), HOLBEN (B. N.) et TUCKER (C. J.), 1985. - Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. Journ. Rem. Sens.*, 6 : 1271-1318.
- KERR (Y.), ASSAD (E.), FRETEAUD (J.-P.), LAGOUARDE (J.-P.) et SEGUIN (B.), 1987. - Estimation of evapotranspiration in the Sahelian zone by use of Meteosat and NOAA/AVHRR data, communication présentée au XXVI<sup>e</sup> COSPAR, Toulouse, juillet 1986, Symposium n° 3, *Adv. Space Res.*, 7 : 161-164.
- KERR (Y.), IMBERNON (J.), DEDIEU (G.), HAUTECOEUR (D.), LAGOUARDE (J.-P.) et SEGUIN (B.), 1989. - NOAA-AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *Int. Journ. Rem. Sens.* vol. X, n° 4-5 : 847-854.
- KIMES (D. S.), MARKHAM (B. L.), TUCKER (J. C.) et MC MURTREY III (E.) Jr, 1981. - Temporal relationships between spectral response and agronomic variables of a corn canopy. *Rem. Sens. Env.*, 11 : 401-411.
- KOLLENKARK (J. C.), DAUGHTRY (C. S. T.), BAUER (M. E.) et HOUSLEY (T. L.), 1982. - Effects of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopies. *Agron. Journ.*, 74 : 751-758.
- KUMAR (M.) et MONTEITH (J. L.), 1982. - Remote sensing of crop growth. In : «Plant and the daylight spectrum», Academic Press, London : 133-147.
- LIETH (H.), 1975. - Primary productivity of the major vegetation units of the world, in Primary productivity of the biosphere. *Springer Verlag*, Berlin : 203-217.
- MONTEITH (J. L.), 1977. - Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, B, 281 : 277-294.
- NÈGRE (T.), IMBERNON (J.), GUINOT (J.-P.) et CARN (M.), 1987. - Estimation de la pluviométrie 1984, 1985, 1986 par cumul des synthèses thermiques Meteosat. *Veille Clim. Sat.*, 20 : 62-70.
- POUYAUD (B.), 1985. - Contribution à l'évaluation de l'évaporation des nappes d'eau libre en climat tropical sec. Thèse Doctorat d'État, Université de Paris-Sud, 254 p., *multigr.*
- RIOU (Ch.), 1972. - Étude de l'évaporation en Afrique Centrale. Contribution à la connaissance des climats. Thèse Doctorat d'État, Paris, 211 p.
- SEGUIN (B.), 1984. - Estimation de l'évapotranspiration à partir de l'IR thermique. In C.R. du 2<sup>e</sup> Coll. int. Signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, Sept. 1983, Inra, Versailles : 427-447.
- SEGUIN (B.), 1986. - On the relationship between NDVI and global productivity. In Proc. ISLSCP Conference, Rome, Dec. 1985, ESA, Paris : 299.

- SEGUIN (B.), BRUNET (Y.) et PERRIER (A.), 1982a. - Estimation of evaporation : a review of existing methods and recent developments. EGS Symposium on Evaporation, Leeds (Gr. Br.). Août 1982.
- SEGUIN (B.), BAEZ (S.), MONGET (J.-M.) et PETIT (V.), 1982b. - Utilisation de la thermographie infrarouge pour l'estimation de l'évaporation régionale. *Agronomie*, 2 : 7-16.
- SEGUIN (B.), ASSAD (E.), FRETEAUD (J.-P.), KERR (Y.) et LAGOUARDE (J.P.), 1987. - Water balance monitoring in sahelian regions with thermal IR and vegetation index data from meteorological satellites. *In* : Proceedings of the 20th Symposium on the environment, éditées par ERIM. Ann. Arbor., Michigan. : 993-1003.
- SEGUIN (B.), ASSAD (E.), FRETEAUD (J. - P.), IMBERNON (J.), KERR (Y.) et LAGOUARDE (J.-P.), 1989.- Use of meteorological satellites for water balance monitoring in sahelian regions. *Int. Journ. Rem. Sens.*, 10 : 1101-1117.
- SEGUIN (B.) et ITIER (B.), 1983. - Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int. Journ. Rem. Sens.*, 5 : 371-383.
- SEGUIN (G.), MANDEVILLE (J.-C.), KERR (Y.) et GUINOT (J.-P.), 1986. - A proposed methodology for daily ET mapping using IR satellite imagery. *In Proc. ASAE Coll. Advances in evapotranspiration*. Chicago, dec. 1985 : 385-392.
- SELLERS (P. J.), 1985. - Canopy reflectance photosynthesis and transpiration. *Int. Journ. Rem. Sens.*, 6 : 1335-1372.
- TUCKER (C. J.), HOLBEN (B. H.), ELGIN (J. H.), et MC MURTREY III (J. E.), 1981. - Remote sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Rem. Sens. Env.*, 11 : 171-190.
- TUCKER (C. J.), TOWNSHEND (J. R. G.) et GOFF (T. E.), 1985. - African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227 : 369-375.
- TURC (L.), 1954. - Calcul du bilan de l'eau, évaluation en fonction des précipitations et des températures. *In* : Publ. n° 38, Assemblée de Rome, t. III, AIHS, Paris : 188-202.
- VIDAL (A.), KERR (Y.), LAGOUARDE (J.- P.) et SEGUIN (B.), 1986. - Télédétection et bilan hydrique : utilisation combinée d'un modèle agrométéorologique et des données de l'IR thermique du satellite Noaa-AVHRR. *Agric. For. Meteorol.*, 29 : 155-175.
- WIEGAND (C. L.) et RICHARDSON (A. J.), 1984. - Leaf area, light interception and yield estimation from spectral component analysis. *Agron. Journ.*, 76 : 543-549.