

ESTIMATION DES PLUIES AU SÉNÉGAL PAR LA MÉTHODE TAMSAT

A. TOURÉ¹ et ND. N'DIAYE²

(1. Centre de suivi écologique, BP 154, DAKAR, SÉNÉGAL

2. Direction de la Météorologie nationale, DAKAR, SÉNÉGAL

Tél : 221.25.80.66. Fax : 221.25.81.68)

RÉSUMÉ

Le CSE et la direction de la Météorologie nationale, DMN, ont entrepris depuis la saison des pluies 1989 de tester l'approche TAMSAT pour estimer les pluies par satellite au Sénégal. Les limites du modèle ont été mises en évidence. Toutefois, les niveaux de coefficients de détermination encourageants atteints, suggèrent la prise en compte, dans le modèle, de paramètres physiques supplémentaires pour améliorer les estimations. Parmi ces paramètres on peut citer par exemple les indices d'orages. Dans ce cadre, les données TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS) de la NOAA/AVHRR seront exploitées dans une étude ultérieure.

I - INTRODUCTION

L'importance de connaître les quantités de pluies tombées n'est plus à démontrer au Sahel. En effet, dans la zone soudano-sahélienne, tout déficit d'eau, ressource primaire, a un effet immédiat et potentiellement dangereux sur cette région déjà marginalisée de par sa pluviosité, son agriculture et son élevage (UICN, 1989), Ainsi, face aux péjorations climatiques observées ces dernières années, plusieurs organismes et instituts de recherches sont en train de mener d'intenses expérimentations dans le domaine de la climatologie et plus particulièrement en matière d'estimation des pluies par télé-détection. Dans ce cadre, plusieurs méthodes en cours d'élaboration se fondent sur l'utilisation de diverses données telles que, entre autres, les informations issues des satellites, des radars et aussi des mesures de terrain. Le principal objectif visé étant, bien entendu, d'arriver à estimer de manière opérationnelle, à des pas de temps décadaire, mensuel et annuel, les quantités de pluies tombées.

II - MÉTHODOLOGIE DE CALIBRATION

1 - Les données et les logiciels

1.1 - Les données satellitaires et pluviométriques

De par leurs caractéristiques physiques et orbitales, de même que leurs fréquences de prises de vue quasi permanentes d'une image du disque terrestre complet (2 500 pixels sur 2 500 lignes) toutes les demi-heures dans deux bandes spectrales en plus de l'infra-

rouge thermique, les satellites MÉTÉOSAT constituent un outil de choix pour la collecte d'informations sur les nuages, entre autres. Les satellites MÉTÉOSAT, pour rappel, sont positionnés sur une orbite géostationnaire, à 35 800 km d'altitude (position nominale), au-dessus du méridien de Greenwich et de l'Équateur.

Les 18 à 24 images (en fonction de leur qualité) par jour, acquises permettent de calculer les durées de nuages froids (cold cloud duration ou CCD), principalement composées des cumulo-nimbus, sur l'ensemble du territoire aux échelles décadaire et mensuelle ainsi que pour le cumul de la saison de juin à septembre. Dans le même temps, les données pluviométriques décadaires sont collectées sur 170 postes gérés en majeure partie par la direction de la Météorologie nationale.

L'ensemble de ces informations sont, progressivement depuis 1989, entrées dans une base de données dont les différents champs sont composés des coordonnées géographiques des différents postes dans la projection UTM, des CCD aux seuils de température - 40, - 50, et - 60 °C et enfin des pluies décadaires, de juillet 1989 à septembre 1993.

1.2 - Les programmes

Afin de faciliter le traitement des images satellitaires et d'automatiser l'exploitation de la base de données, deux logiciels ont été développés :

- **METECCD** : a été conçu par l'Institut de géographie de Copenhague, avec les conseils du groupe TAMSAT; il fonctionne comme un module du logiciel CHIPS, utilisé pour le traitement des images au CSE. Ce module est utilisé pour le calcul des CCD et leur conversion en estimations pluviométriques sur la base des coefficients déterminés par les analyses statistiques.
- **RAIN**, quant à lui, est un programme qui a été développé au CSE avec CLIPPER, il est utilisé pour l'extraction des informations à partir de la base de données pour les besoins des analyses statistiques sur SYSTAT.

2 - Rappel de l'approche TAMSAT

L'approche TAMSAT (Tropical Applications in Meteorology using SATellite data) de l'université de Reading a été largement décrite par DUGDALE *et al.* (1986), Mc DOUGALL *et al.* (1988) et TOURÉ *et al.* (1993).

Celle-ci consiste à estimer les précipitations (mm) sur des aires (fig. 1) climatologiquement homogènes (TOURÉ *et al.*, 1989) à partir des CCD. Pour ce faire, une régression linéaire établie, dans chaque zone et pour les différents seuils de température, entre les données brutes de pluie d'une part et les CCD d'autre part, permet de déterminer les coefficients a_1 et a_0 respectivement pente et ordonnée à l'origine de la ligne de régression. Pour cette analyse les valeurs médianes (ou moyennes) de pluies de chaque classe et les valeurs centrales des classes de CCD correspondantes (FLITCROFT *et al.*, 1986) ont été utilisées en considérant l'ensemble des trois décades de chacun des mois analysés.

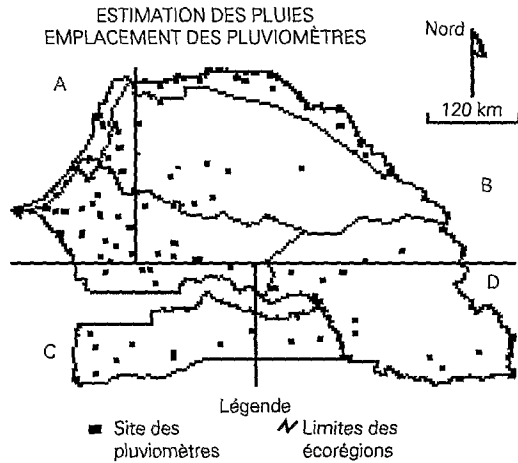
La ligne de régression jugée la meilleure pour chaque zone est alors utilisée pour produire des cartes décadaires, mensuelles et annuelles montrant la répartition de la pluie sur l'ensemble du pays selon la relation suivante :

$$\text{Pluie} = a_1 * \text{CCD} + a_0 \quad \text{pour CCD} > 0 \quad (\text{autrement Pluie} = 0)$$

La même procédure a été, également, appliquée pour l'analyse des totaux mensuels de pluies et de CCD.

C'est dans le souci d'avoir un nombre statistiquement valable d'enregistrements et parvenir éventuellement au développement d'équations de régression stables, qu'il a été utilisé toute la série de données de pluies et de CCD de 1989 à 1992 d'une part et celle de 1989 à 1993 d'autre part.

Figure 1 : Découpage du Sénégal en zones climatologiques homogènes à partir des données pluviométriques 1951-1987 et réseau pluviométrique suivi par la DMN.



III - LES RÉSULTATS ET LEUR INTERPRÉTATION

1 - Résultats

1.1 - Analyse décadaire

La base de données décrite au chapitre II, a permis de faire des analyses de régression au niveau de chaque zone homogène, entre « médiane » et centre de classe de durée de nuages froids (CCD) correspondant, pour les trois décades de chacun des mois considérés (DUGDALE *et al.*, 1986).

Les données de 1989 à 1992 ont été traitées en premier lieu. L'allure du nuage de points représentant « pluie vs CCD » (dispersion), le coefficient de corrélation de la relation établie ainsi que les résultats de l'analyse de variance de la régression linéaire proposée ont conduit au choix du meilleur seuil de température et en conséquence la meilleure relation « pluie vs CCD » que l'on puisse espérer obtenir.

Le tableau 1 présente les modèles décadaires obtenus sur la base de la série de données de 1989 à 1992. Des différentes ordonnées à l'origine obtenues, seules celles des décades de juillet de la zone A affichent une valeur négative. Le seuil - 50 °C paraît plus fréquent pour les décades d'août et de septembre. Quant à celles de juillet, c'est plutôt celui de - 40 °C qui est prédominant. Les coefficients de corrélation semblent plus élevés dans la zone A durant les décades de juillet et août ; alors qu'en septembre,

Tableau 1 - Régressions à l'échelle décadaire de 1989 à 1992.

Mois	Zone A					Zone B					Zone C					Zone D				
	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T
Juillet 123	438	2.66	- 1.69	0.56	-40	323	2.73	48.6	0.41	- 60	216	466	1.69	0.34	- 60	298	27.9	1.99	0.48	- 40
Août 123	459	2.37	0.80	0.58	- 50	374	2.12	6.54	0.52	- 50	168	564	1.88	0.34	- 60	551	14.8	1.14	0.43	- 40
Sept. 123	386	1.54	10.6	0.43	- 50	313	1.56	28.4	0.49	- 50	134	138	1.82	0.60	- 50	134	13.8	1.82	0.60	- 50

Tableau 2 - Régressions à l'échelle décadaire de 1989 à 1993.

Mois	Zone A					Zone B					Zone C					Zone D				
	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T
Juillet 123	624	2.58	- 3.07	0.60	- 40	573	1.75	10.7	0.45	- 50	413	46.7	2.9	0.41	- 60	279	44.2	2.07	0.39	- 60
Août 123	601	2.32	4.58	0.53	- 50	432	2.14	2.15	0.53	- 50	391	45.6	1.71	0.45	- 40	228	48.3	2.4	0.41	- 60
Sept. 123	695	0.99	15.7	0.13	- 40	509	1.22	15.6	0.33	- 50	409	36.6	1.06	0.14	- 40	251	31.0	1.54	0.48	- 50

ce sont plutôt les zones C et D qui ont les coefficients les plus élevés. On remarque également que plus l'ordonnée à l'origine est élevée, plus les coefficients de corrélation entre pluviométrie et CCD sont plus petits sauf en zone D, pour les décades de juillet et août. Par contre, les pentes des droites de régression ne semblent pas liées de manière aussi simple, aux coefficients de corrélation correspondants.

L'augmentation des effectifs « pluies décadaires et CCD » par l'inclusion des données de 1993 dans les séries de données considérées a permis d'avoir les résultats rassemblés dans le tableau 2.

Un premier examen des coefficients de corrélation « r » obtenus ne montre pas *a priori* une amélioration des relations déjà obtenues avec les séries de 1989 à 1992. Les coefficients ont même baissé dans 7 cas sur 12.

Une analyse plus approfondie devrait considérer les intervalles de confiance de ces coefficients, voire des pentes des droites de régression et des ordonnées à l'origine.

L'utilisation de l'abaque de FISHER pour apprécier la signification de « r » montre que les coefficients « r » obtenus avec la série 1989-1993 ne sont pas significativement différents de ceux issus de la série 1989-1992 sauf en septembre dans les zones B et C où les « r » ont baissé de manière significative. Les intervalles de confiance des « r » sont respectivement 0,43-0,55 et 0,48-0,71.

La stabilité des seuils de température sélectionnés, également, n'a été observée que dans 6 cas sur 12. De plus, rien ne semble prouver que cette stabilité est définitive.

1.2 - Analyse mensuelle

La même analyse faite dans la section 1.1 a été reprise à l'échelle mensuelle. Les résultats présentés dans les tableaux 3 et 4 ont été obtenus à partir des totaux mensuels de pluviométrie et de CCD à différents seuils de température (- 40 °C, - 50 °C, et - 60 °C), issus des données décadaires correspondantes de la base de données.

Le tableau 3 récapitulant les résultats obtenus sur les séries de 89-92 montre que les coefficients de corrélation calculés sont dans l'ensemble assez faibles. Quatre cas font exception : juillet et août, zone A - août zone B - septembre zone D. Nous constatons que les faibles corrélations sont encore liées à des ordonnées à l'origine très élevées.

Le seuil - 40 °C semble caractériser les zones A et C de juillet à septembre et celui de - 50 °C les zones B et D pour cette même période sauf en août pour la zone D avec - 60 °C.

L'incorporation des données de 1993 (tableau 4) n'apporte pas d'amélioration sensible. En effet, les corrélations affichent une augmentation dans 6 cas sur 12. Toutefois, seulement deux cas ont été significativement prouvés par l'abaque :

- septembre, zone A de 0.12 (zone d'indétermination) à 0.22 (avec un intervalle de confiance de 0.09-0.34),
- juillet, zone D de 0.17 (zone d'indétermination) à 0.32 (avec un intervalle de confiance 0.12-0.50).

Les seuils de température persistent, cependant, dans 8 cas sur 12, ce qui laisse entrevoir que la variabilité mensuelle est plus faible que celle de l'échelle décadaire.

D'autre part, l'abaque de FISHER indique une baisse significative des « r » dans 3 cas :

- août, zone A 0,75 à 0,65
- août, zone B 0,84 à 0,71
- août, zone D 0,86 à 0,46.

Tableau 3 - Régressions à l'échelle mensuelle de 1989 à 1992.

Mois	Zone A					Zone B					Zone C					Zone D				
	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T
Juillet	167	1.96	-0.64	0.79	-40	140	1.25	44.16	0.34	-50	95	130.3	1.07	0.38	-40	65	194.0	0.27	0.17	-50
Août	142	1.71	-1.57	0.75	-40	120	2.24	15.02	0.84	-50	93	34.5	2.47	0.50	-40	52	97.3	3.76	0.52	-60
Sept.	170	0.23	87.82	0.12	-40	114	0.81	57.36	0.25	-50	96	106.6	1.06	0.64	-40	63	11.48	2.26	0.86	-50

Tableau 4 - Régressions à l'échelle mensuelle de 1989 à 1993.

Mois	Zone A					Zone B					Zone C					Zone D				
	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T	N	a ₁	a ₀	r	T
Juillet	217	1.96	1.47	0.77	-40	183	1.28	43.52	0.38	-50	125	111.57	1.42	0.44	-40	86	173.29	0.64	0.32	-50
Août	192	2.17	19.76	0.65	-50	164	2.03	38.76	0.71	-50	124	2.94	4.15	0.51	-50	72	85.32	4.14	0.64	-60
Sept.	218	0.39	81.25	0.22	-40	155	0.46	69.90	0.21	-40	128	113.66	1.05	0.52	-40	79	115.53	0.95	0.46	-40

2 - Interprétation

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail illustrent assez les limites de l'approche TAMSAT qui symbolisent les méthodes axées sur l'exploitation du canal infrarouge du satellite « géostationnaire MÉTÉOSAT ».

L'ordonnée à l'origine négative des décades de juillet constatée depuis la 1^{re} année semble être caractéristique de la zone A. Elle peut s'interpréter par une surestimation systématique de la pluviométrie par les CCD. En effet, la période de juillet correspond à l'installation de l'hivernage au Sahel matérialisée par la reprise des phénomènes convectifs et une augmentation de la nébulosité. Toutefois, l'influence de l'anticyclone des Açores reste notable dans la zone A, à cette période, ce qui limite l'efficacité des systèmes pluviogènes.

Les différences de seuils de température constatées aussi bien dans l'espace que dans le temps témoignent, à cette échelle décadaire, de la grande variabilité spatio-temporelle du climat qui caractérise la zone d'étude et qui a déjà été observée par de nombreux auteurs dont DUGDALE *et al.* (1986).

Les cas de persistance constatés ne sont donc dus qu'au hasard. Par conséquent, les modèles de ce type gagneraient à inclure un module permettant le choix objectif et systématique du seuil de température d'une année à l'autre.

Les coefficients de corrélation obtenus sont dans l'ensemble faibles. En effet, une grande dispersion peut être notée dans les différents nuages de points qui caractérisent les relations établies. Cette dispersion a été en partie interprétée par MILFORD (1988) par la nature localisée des pluies de la zone. D'autre part, la pluviométrie moyenne sur un pixel MÉTÉOSAT ne peut pas être restituée de manière effective par un seul pluviomètre appartenant à ce pixel. Enfin, cette approche ne représente pas correctement, *a priori*, les années à pluviométrie exceptionnelle.

La relation observée entre les ordonnées à l'origine et le niveau de corrélation peut s'expliquer par le fait que d'autres types de nuages plus « chauds » que les seuils considérés donnent également des pluies appréciables, d'où une perte notoire d'informations qui sont filtrées dès le départ.

Toutes les considérations qui précèdent militent en faveur d'une exploitation rationnelle des données d'altitude (TOVS) afin de mieux caractériser au plan météorologique les événements pluvieux observés.

IV - VALIDATION

Un essai de validation des estimations de pluies a été tenté dès la première année d'application de la méthodologie TAMSAT au Sénégal (TOURÉ *et al.*, 1989). La méthode de passage des données ponctuelles de pluies décadaires et mensuelles à des données correspondantes représentatives du pixel MÉTÉOSAT était celle proposée par FLITCROFT *et al.* (1989). Il s'agissait d'utiliser la relation :

$$\hat{a} = \lambda_1 p(x,y) + \lambda_2 P_{\text{moy}} \quad (1)$$

avec \hat{a} = pluie régionalisée à la taille du pixel MÉTÉOSAT,

$p(x,y)$ = pluie ponctuelle de la station (de coordonnées x ; y),

P_{moy} = moyenne pluviométrique de la station par jour pluvieux (obtenue à partir des données historiques),

λ_1 et λ_2 coefficients liés par la relation $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$.

La validation consistait à faire une analyse de régression pour établir des relations de la forme

$$P_{\text{est}} = u + vP_{\text{rég}}$$

et tester par analyse de variance, l'égalité des moyennes pluviométriques à partir des échantillons « satellitaires » et « régionalisés » obtenus.

Les résultats sont repris dans les tableaux 5, 6 et 7 qui montrent que la pluie estimée par satellite est significativement différente de la pluie régionalisée dans six cas sur douze en juillet, cinq cas sur douze en août et sept cas sur douze en septembre.

Ainsi le modèle présentait déjà des faiblesses pour restituer l'information dans les zones à forte pluviométrie (C et D). Et l'on s'est posé la question de savoir si le type de modèle proposé par TAMSAT n'est valable que dans la zone sahélienne « type » (pluviométrie < 500 mm) et pour les années à pluviométrie moyenne ? Ou si les limites constatées n'étaient dues qu'à la faiblesse du jeu de données disponibles (un an de données pluviométriques et satellitaires).

La considération de la deuxième hypothèse a conduit à l'utilisation des séries de données (décadaires, mensuelles et saisonnières) de 1989 à 1992 afin de déterminer les nouveaux coefficients a_0 et a_1 du modèle et d'estimer la pluviométrie de 1993 sur cette base.

1 - Méthodologie

La validation consiste dans un premier temps à spatialiser les données pluviométriques observées en 1993 et ensuite procéder à une comparaison des cartes ainsi obtenues à celles estimées par imageries satellitaires.

1.1 - Spatialisation des données observées

Le fichier de base est le fichier ASCII comportant les 170 stations pluviométriques sélectionnées ainsi que leurs coordonnées géographiques (latitude, longitude) et leurs pluviométries décadares, mensuelles et saisonnières de juillet à septembre 1993.

Sous SURFER chaque colonne de données (décade, mois, saison) permet de générer une structure raster par krigeage et d'obtenir en sortie un fichier de données (extension GRD) avec des pixels de 5 km de côté (résolution MÉTÉOSAT). Un utilitaire GRD2IDR.EXE permet de passer du format GRID au format image (extension img) de IDRISI.

Ainsi ont été obtenues neuf images décadares, trois images mensuelles et une image saisonnière de juillet à septembre 1993. Il faut préciser que la carte saisonnière a été, quant à elle, obtenue par sommation des trois cartes mensuelles.

1.2 - Validation des pluies estimées par satellite

Les relations établies précédemment ont conduit, à travers le logiciel CHIPS, à l'élaboration des 13 images de pluviométrie estimée par satellite. Celles-ci ont été par la suite converties en format IDRISI avec la même projection géométrique que les cartes issues des données régionalisées permettant ainsi de disposer de 13 paires d'images à comparer.

Tableau 5 - Juillet 1989. Régressions entre pluies estimées et pluies régionalisées (dixième de mm).

Décade	Zone	u	v	r	r ²	F	Prob. (%)
Déc 1	A	331	- 0.13	0.167	0.028	1.29	26.19
Déc 2	B	934	- 0.20	0.154	0.024	0.89	35.30
Déc 3	C	63	1.26	0.929	0.863	82.00	0.00
Déc 1	D	428	0.35	0.600	0.360	8.45	1.05
Déc 2	A	636	0.17	0.399	0.159	8.13	0.66
Déc 3	B	471	0.10	0.242	0.059	2.30	13.38
Déc 1	C	832	0.01	0.027	0.001	0.01	91.73
Déc 1	D	423	0.41	0.660	0.436	11.59	0.39
Déc 2	A	1 576	0.16	0.227	0.052	2.56	11.21
Déc 3	B	124	0.40	0.544	0.296	15.55	0.04
Déc 2.	C	157	0.85	0.876	0.767	45.98	0.00
Déc 3	D	543	0.318	0.422	0.178	3.25	8.83

Tableau 6 - Août 1989.

Décade	Zone	u	v	r	r ²	F	Prob. (%)
Déc 1	A	426	0.04	0.326	0.106	5.59	2.12
Déc 2	B	254	0.16	0.231	0.053	1.97	16.61
Déc 3	C	560	0.02	0.145	0.021	0.32	58.58
Déc 1	D	491	0.24	0.764	0.583	13.98	0.39
Déc 2	A	951	- 0.04	0.185	0.034	1.67	19.93
Déc 3	B	1 116	- 0.04	0.088	0.008	0.29	59.70
Déc 1	C	1 053	0.05	0.471	0.222	3.42	8.65
Déc 1	D	914	- 0.02	0.265	0.070	0.75	40.95
Déc 2	A	415	0.98	0.732	0.535	47.23	0.00
Déc 3	B	840	0.12	0.271	0.073	2.53	11.77
Déc 2	C	953	0.12	0.497	0.247	7.20	1.31
Déc 3	D	451	0.53	0.779	0.608	15.43	0.29

Tableau 7 - Septembre 1989.

Décade	Zone	u	v	r	r ²	F	Prob. (%)
Déc 1	A	235	0.13	0.34	0.12	5.70	2.04
Déc 2	B	249	- 0.06	0.29	0.08	3.01	8.85
Déc 3	C	197	0.22	0.69	0.48	21.03	0.02
Déc 1	D	553	0.18	0.54	0.29	5.35	3.62
Déc 2	A	120	0.11	0.40	0.16	7.95	0.72
Déc 3	B	138	0.05	0.25	0.06	2.24	14.00
Déc 1	C	219	0.32	0.55	0.30	10.46	0.36
Déc 1	D	754	0.20	0.56	0.31	6.43	2.28
Déc 2	A	93	0.71	0.64	0.41	30.72	0.00
Déc 3	B	121	0.08	0.18	0.03	1.07	30.98
Déc 2	C	477	0.19	0.37	0.14	3.31	8.00
Déc 3	D	462	0.03	0.04	0.002	0.02	87.52

r² : coefficient de détermination du modèle - F : résultat du test d'analyse de variance - u et v : constantes issues de la régression entre la pluie estimée et la pluie régionalisée, v étant la pente de la droite de régression.

La démarche consiste à faire une analyse de régression entre deux images correspondantes (estimée et régionalisée) avec l'hypothèse que les pixels de chacune des « images » sont indépendants (absence d'auto-corrélation). Il est, ainsi, obtenu pour chaque paire d'images la relation :

$$P_{\text{reg}} = a P_{\text{est}} + b \quad (2)$$

avec P_{est} la valeur du pixel estimée par satellite,

P_{reg} la valeur correspondante du pixel régionalisée à partir des données ponctuelles observées,

a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression.

L'égalité parfaite entre deux cartes donnerait une pente non différente de l'unité et une ordonnée à l'origine égale à zéro.

2 - Résultats

Les résultats de cette analyse sont illustrés dans les tableaux 8 et 9. On peut y trouver, outre les paramètres de régression a et b, selon la relation (2), le coefficient de corrélation entre les deux variables P_{reg} et P_{est} . Le résultat t du test montre que toutes les pentes obtenues à différentes échelles (décadaire, mensuelle et saisonnière) sont significativement différentes de 1 au seuil de 5 %. L'erreur standard de ces pentes, le coefficient de détermination de la régression exprimé en pourcentage ainsi que l'appréciation sur la validité de l'estimation figurent également sur ces tableaux.

3 - Interprétation

Ainsi toutes les pentes obtenues sont significativement différentes de 1. Autrement dit, il existe une différence réelle entre chaque couple d'images considérées et que l'information satellitaire « pluie estimée » ne restitue pas encore la pluie réellement reçue.

Ce résultat peut être dû à plusieurs causes :

- d'abord notre hypothèse d'indépendance entre pixels peut ne pas être valide, compte tenu de la nature essentiellement mobile des systèmes pluvio-gènes (lignes de grains) de la zone (CHADWICK *et al.*, 1989),
- le modèle ne prend pas en considération la contribution des nuages moyens à caractère orageux du type altocumulus qui peut être appréciable ; ce qui tend à sous-estimer la pluviométrie réellement enregistrée,
- comme l'a fait remarquer d'ailleurs AUSTIN (1987), l'exploitation exclusive de l'imagerie infrarouge ne permet pas d'éliminer les cirrus dans la détermination des CCD,
- de manière générale, la validation des estimations de pluies par satellite se heurte à l'absence d'un référentiel fiable de validation. Concernant la présente étude, l'exercice d'interpolation des pluies ponctuelles devrait considérer une zone plus large que celle retenue jusqu'ici. En d'autres termes, il s'agit d'intégrer les données des pays environnants, pour une interpolation plus correcte. En outre, l'actuelle zone d'étude déborde à l'ouest sur l'océan Atlantique où l'on ne dispose pas de mesures pluviométriques. L'application d'un masque éliminant la partie océanique devrait être utilisée avant de procéder à l'analyse de régression.

Tableau 8 - Résultats statistiques de la validation des pluies décadaires estimées (en mm).

Pas de temps	a	b	r	t	s.e. (pente)	R ² (%)	Validité
Déc 1 juillet	0.30	12.17	0.78	159.97	0.0019	60	oui
Déc 2 juillet	0.28	20.21	0.43	62.56	0.0045	18.77	non
Déc 3 juillet	0.15	32.40	0.51	76.51	0.0020	26.68	oui
Déc 1 août	0.60	15.07	0.68	121.29	0.0049	46.48	oui
Déc 2 août	0.44	15.11	0.65	111.91	0.0039	42.51	oui
Déc 3 août	0.39	21.67	0.74	143.06	0.0027	54.72	oui
Déc 1 sept.	0.15	31.72	0.37	51.62	0.0029	13.59	non
Déc 2 sept.	0.16	39.63	0.28	37.68	0.0043	7.74	non
Déc 3 sept.	0.15	25.92	0.22	29.69	0.0051	4.95	non

Tableau 9 - Résultats statistiques de la validation des pluies mensuelles et saisonnières estimées (en mm).

Pas de temps	a	b	r	t	s.e. (pente)	R ² %	Validité
Mois de juillet	0.27	52.76	0.64	109.81	0.0025	41.59	oui
Mois d'août	0.59	27.13	0.76	153.74	0.0038	58.25	oui
Mois de sept.	0.15	90.13	0.32	44.58	0.0044	10.50	non
Cumul juil-sept.	0.40	145.85	0.71	131.67	0.0031	59.59	oui

a : pente de la droite de régression - b : ordonnée à l'origine de la droite de régression - r : coefficient de corrélation - t : valeur de t (student) observée par la régression - s.e. (pente) : erreur standard sur la pente - R² (%) : coefficient de détermination.

Malgré les limitations évoquées plus haut, les coefficients de détermination symbolisant les pourcentages de variance expliquée par les régressions sont dans l'ensemble non négligeables aussi bien pour les décades que les mois et la saison.

Ainsi, il a été sélectionné les cas où les R² sont supérieurs à 25 % non comme étant des cas où la validité est prouvée mais plutôt comme ceux pour lesquels les CCD, aux seuils choisis, font partie des estimateurs significatifs de la pluie reçue au sol.

Des estimateurs complémentaires restent donc à identifier. Il est envisagé, dans ce sens, d'exploiter ultérieurement les données TOVS de sondage verticale de l'atmosphère.

V - CONCLUSION

Les tentatives d'estimation de pluies par télédétection se heurtent encore à des contraintes liées à l'incapacité des satellites à rendre compte des processus microphysiques des nuages observés.

L'approche TAMSAT a le mérite d'être simple et indépendante des données courantes de pluviométrie collectées sur le terrain. Toutefois, son application à l'échelle restreinte du Sénégal présente des difficultés d'ordre conceptuel. En effet, l'analyse

basée sur cinq années de données de pluies et de CCD a montré que ces seules CCD ne restituent souvent pas toute l'information pluviométrique recherchée. D'autre part, les paramètres de régression ainsi que les seuils de température n'ont pas affiché une stabilité constante. L'augmentation des effectifs de pluies et de CCD n'améliore pas, dans l'ensemble les relations proposées.

Ces résultats nous conduisent à considérer que la forte variabilité interannuelle du climat, quoique atténuée à l'échelle mensuelle, suggère, la définition d'une typologie d'hivernage plutôt que de faire référence à une situation « moyenne » induisant une surestimation ou une sous-estimation des pluies de l'hivernage en cours. En d'autres termes, les tendances de l'hivernage en cours devraient permettre de l'identifier à court terme (échelles décadaire, mensuelle) à un hivernage passé dont il emprunterait les différentes caractéristiques pour établir les paramètres de régression appropriés.

L'absence d'un référentiel fiable de validation limite encore de manière générale la portée des modèles d'estimation des pluies par satellites. Cependant, un compromis devrait être trouvé en tenant compte des objectifs d'estimation des pluies et des échelles spatiales et temporelles impliquées. La prise en compte en plus des CCD d'autres estimateurs physiques issus de données TOVS par exemple, devrait sensiblement améliorer, à des pas de temps décennaux et mensuels, l'information pluviométrique satellitaire à l'échelle du Sénégal.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUSTIN G., 1988 - The role of models in techniques for the estimation of rainfall from Satellites. In *Report of the International workshop on Satellite Techniques for estimating precipitation*. December 6-8, Washington D.C.
- CHADWICK A.F., DUGDALE G., TRAORÉ A.F. and MILFORD J.R., 1989 - Operational rainfall mapping over the Sahel ODA/FAO/EEC.
- DUGDALE G., FLITCROFT I.D. and MCDUGALL V.D., 1986 - The calibration and interpretation of METEOSAT based estimates of Sahelian rainfall. Eumetsat; Proc. 6th METEOSAT Users Meeting, Amsterdam, Nov. 1986.
- FLITCROFT I.D., MCDUGALL V.D., MILFORD J.R. and DUGDALE G., 1986 - The calibration and interpretation of METEOSAT based estimates of Sahelian rainfall. Proc. 6th METEOSAT Sci. Users Meeting, Amsterdam, Nov. 1986.
- MCDUGALL V.D., SAUMBY M., DUGDALE G. and MILFORD J.R., 1988 - *Relationship between rainfall and cloud top temperature in Tropical Africa seasonal and regional effects*. Department of Meteorology, University of Reading, U.K.
- MILFORD J.R., 1988 - Potential and limit of rainfall estimates using cold cloud statistics. In *Report of the International workshop on Satellite Techniques for estimating precipitation*. December 6-8, Washington D.C.
- TOURÉ A., N'DIAYE N.D. et THIAO W., 1989 - *Estimation de la pluviométrie au Sénégal par MÉTÉOSAT*. Publications CSE/DMN.
- UICN, 1989 - *La pluviométrie dans le Sahel*. Dossier IIED n° 10 du Programme des Réseaux des Zones Arides, 13 pages.