

Détermination de la phase dynamique des nuages convectifs (croissance, décroissance) à partir de leur indice volumique et de leur surface sur une image instantanée

Yves Arnaud^a

Francis Laloë^b

Résumé

Une méthode automatique de suivi des amas nuageux en Afrique de l'Ouest nous permet de suivre l'évolution de certains paramètres des nuages (surface, indice volumique, position...) et d'en déduire ainsi leur phase dynamique (situation dans le cycle de vie). Le cycle de vie des nuages convectifs se décompose en trois phases (croissance, maturité et décroissance). La relation entre la surface et l'indice volumique pour un événement donné apparaît liée à la phase du nuage. La séparation entre la croissance et la décroissance du nuage peut se faire en déterminant le rapport volume/surface (pour une surface donnée le nuage présente un volume plus important dans sa phase de croissance que dans sa phase de décroissance). Notre étude s'attache à vérifier si les relations entre les deux variables pour un événement particulier sont applicables pour l'ensemble des événements. La première méthode utilisée pour séparer les deux groupes (nuage croissant/décroissant) consiste à calculer une régression linéaire sur l'ensemble des données et à considérer que les points ayant des résidus positifs correspondent à des phases de croissance et que ceux qui ont des résidus négatifs correspondent à des phases de décroissances. Cette méthode de classification permet de déduire la phase du nuage avec un certain succès (80 % de réussite) à partir d'une seule image. Par ailleurs nous avons procédé à un calcul de régression linéaire sur chaque événement et nous avons montré que la prise en compte individuelle des événements n'améliore pas le pourcentage de variance expliquée par la relation d'ensemble, cependant un test statistique nous a permis de rejeter l'hypothèse d'une seule relation valable pour tous les événements. D'autre part, nous avons procédé à une analyse factorielle discriminante sur l'ensemble des données (25 événements) qui montre que nos deux classes (croissance et décroissance) sont séparables. Une validation montre qu'environ 80 % des points de chaque classe sont bien affectés. Les deux méthodes précédentes permettent donc de déterminer pour la période considérée (saison des pluies 1989) la phase dynamique d'un nuage convectif à partir d'une seule image par la simple observation des paramètres statistiques du nuage.

^alaboratoire d'hydrologie, Centre ORSTOM de Montpellier, B.P. 5045, 34032 Montpellier

^blaboratoire d'hydrobiologie et océanographie tropicales, Centre ORSTOM de Montpellier, B.P. 5045, 34032 Montpellier

1 Introduction

Dans notre étude les données du canal infrarouge thermique (bande 10-12 μm) du satellite Météosat sont utilisées pour identifier les nuages pluvio-gènes en Afrique Sahélo soudanienne. Les objectifs de l'expérience sont d'une part l'estimation des pluies par satellite et d'autre part l'amélioration des connaissances sur les systèmes précipitants de ces régions. En effet, l'Afrique de l'Ouest est touchée depuis une vingtaine d'années par une sécheresse (Lamb, 1985 ; Sircoulon, 1976, 1985) qui limite les ressources en eau ne suffisant plus aux besoins agricoles. La connaissance de la répartition des pluies au Sahel peut permettre une meilleure gestion des ressources en eau et donc favoriser le développement de ces régions. Cependant de par le manque de données conventionnelles sur les précipitations, il est apparu intéressant de se servir des images satellitales et notamment de celles de Météosat pour effectuer le suivi de la pluviométrie dans ces régions. Cette étude s'intègre donc dans le programme EPSAT (Cadet et Guillot, 1991) et plus particulièrement dans EPSAT-Niger (Hoepffner *et al.*, 1989; Lebel *et al.*, 1991) qui a pour principal objectif la définition et l'application d'algorithmes opérationnels d'estimation des pluies par satellite ainsi que la connaissance de la structure des champs de pluie de ces régions. Dans une étude antérieure (Arnaud *et al.*, 1991), nous avons montré la possibilité de suivre automatiquement les amas nuageux sur des séquences d'images fournies par le satellite Météosat. En effet, ce satellite fournit des images toutes les demi-heures (48 images par jour) et le suivi d'un même nuage est possible grâce aux surfaces d'intersection de ceux ci d'une image sur l'autre. Au cours du suivi, divers paramètres sont calculés avec notamment la surface et l'indice volumique qui sont utilisés dans cette étude mais aussi des paramètres de position et de forme des nuages. Le suivi automatique permet le traitement d'un grand nombre d'événements sans utiliser des données dégradées, permettant ainsi une analyse plus précise des paramètres des nuages. Pour la problématique de l'estimation des pluies par satellite, la dynamique des nuages est un paramètre important puisqu'il semble que l'intensité des précipitations soit différente suivant la phase d'activité d'un nuage. Des travaux antérieurs (Stout *et al.*, 1979) ont montré que le maximum des précipitations avait lieu dans la phase de croissance pour des nuages convectifs typiques. L'intérêt de pouvoir déterminer avec une seule image la situation d'un nuage dans son cycle de vie trouve son application directe lors de l'utilisation de satellites défilants. Le programme TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) (Simpson *et al.*, 1988) qui utilisera un satellite défilant comportant des instruments spécifiques pour l'estimation des pluies sur les régions tropicales pourra bénéficier de ce travail. Ce type de satellite induit des erreurs d'échantillonnage dans le temps. Celles ci seront compensées en partie si la dynamique (sens d'évolution) d'un nuage est connu entre deux images. Dans cette étude 25 événements ont été choisis parmi ceux de la saison des pluies 1989. Ces événements ont tous produit plus de 1 mm de pluie sur au moins 5 des 60 stations pluviographiques installées en 1989 sur la zone d'étude "degré carré de Niamey", soit 10000 km^2 environ (Thauvin, à paraître).

2 Objectifs du travail

Une relation présentant un phénomène d'hystérésis a été mise en évidence de façon plus ou moins nette sur les 25 événements étudiés. L'exemple du 10 septem-

bre 1989 (fig. 1) illustre bien ce phénomène. Sur cet exemple, la détermination de la phase du nuage dans son cycle de vie est possible en calculant le rapport volume/surface, puisque celui-ci est plus grand dans la phase de croissance que dans la phase de décroissance (accroissement plus rapide de la hauteur du sommet du nuage que de son extension horizontale dans la phase de croissance). Cependant, il

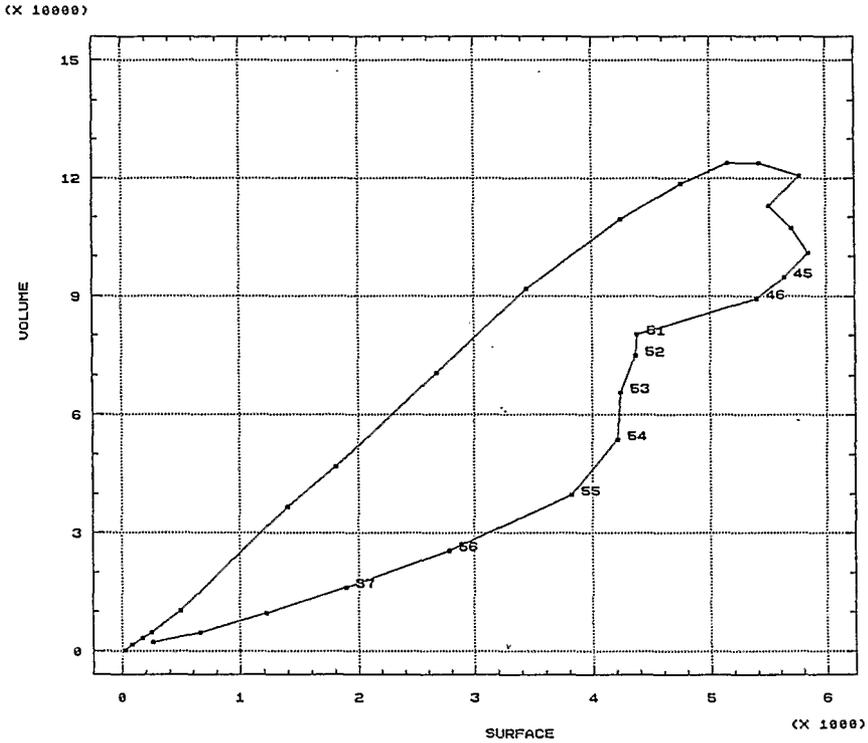


Figure 1: Relation entre l'indice volumique ($\% km^2 \cdot C$) et la surface (en nombre de pixel) pour l'événement du 10 septembre 1989. Les nombres indiquent la présence simultanée de pluie et du nuage sur notre zone d'étude.

reste à vérifier si cette même détermination est possible sur l'ensemble des événements et si il existe deux types de relations distinctes associées aux deux principales phases du nuage (croissance et décroissance). Les différentes phases d'un nuage sont associées à des dynamiques internes différentes modifiant l'aspect extérieur de celui-ci. Le cycle de vie d'une cellule convective se décompose en trois parties :

1. étape de formation : marquée par l'intensification des courants ascendants, qui a pour conséquence l'augmentation rapide de la hauteur du sommet du nuage et son extension horizontale ;
2. étape de maturité : marquée par la présence simultanée de courants ascendants et descendants. L'air est entraîné par les précipitations, et l'évaporation de celles-ci au contact d'un air plus chaud a pour effet de refroidir l'air environnant, augmentant ainsi sa densité et favorisant les courants descendants. L'enclume des cumulo-nimbus commence alors à s'étaler à la base des couches stables supérieures ;

3. étape de dissipation : c'est le stade de disparition des courants ascendants, c'est à dire l'épuisement du stock d'énergie latente emmagasinée dans le nuage. L'enclume atteint son développement horizontal maximum et commence à s'affaisser puis à se dissiper. Bien que le cycle de vie des cellules convectives et celui des amas nuageux tropicaux soient différents, il est possible de les relier puisque les formations nuageuses sont des ensembles de cellules convectives.

Ainsi, ces différentes phases sont appréhendables sur les séquences d'images satellitaires comme le montre la figure 1. Le but de cette étude spécifique est de les déterminer à partir d'un cliché instantané.

3 Méthodologie

Le graphe représentant les valeurs des indices volumiques en fonction des surfaces, pour tous les événements, (fig. 2) indique une relation d'allure linéaire avec une variabilité croissante en fonction de la surface. Les transformations logarith-

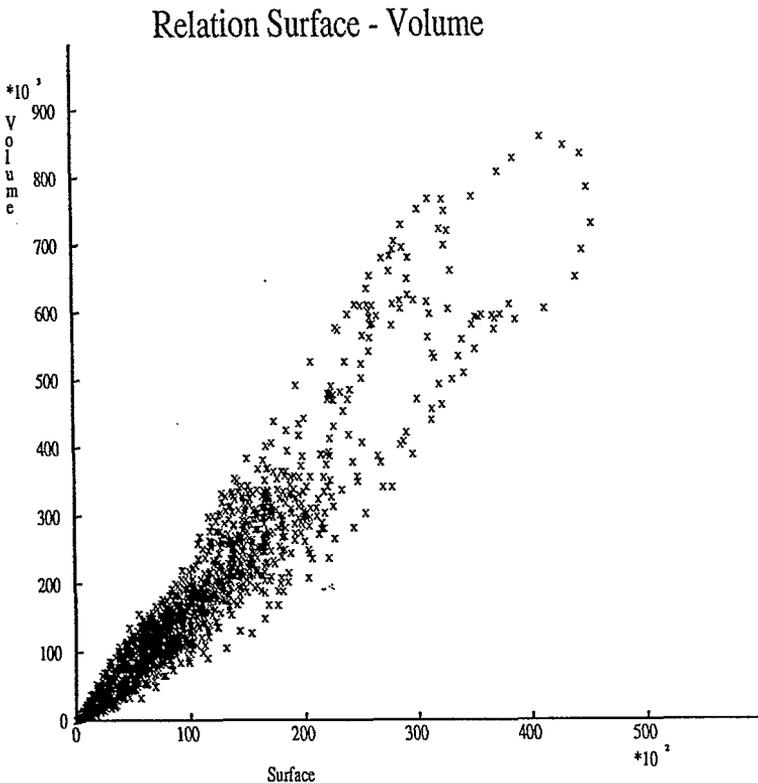


Figure 2: Relation d'ensemble (pour les 25 événements étudiés) entre l'indice volumique et la surface.

miques appliquées sur les deux axes conduisent encore à une relation linéaire mais avec, cette fois, un impact réduit de la surface sur la variabilité des logarithmes des volumes (fig. 3). Dans cette étude, les analyses ont toutes été menées sur les valeurs des variables transformées ($\ln(\text{Volume})$ et $\ln(\text{Surface})$).

Relation Log(Surface) - Log(Volume)

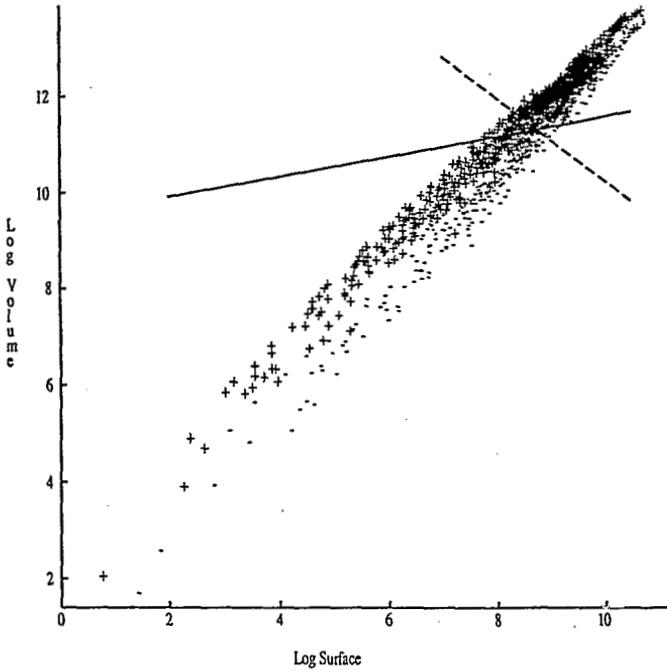


Figure 3: Relation d'ensemble entre le logarithme népérien de l'indice volumique et le logarithme népérien de la surface. Les symboles "+" représentent les observations classées a priori comme ayant une évolution croissante; les "-" comme ayant une évolution décroissante. Les symboles "." représentent les observations non classées. La ligne en trait plein relie les barycentres des deux classes d'observations; celle en trait interrompu représente l'axe factoriel discriminant du nuage de point.

Grâce aux informations fournies par le suivi des nuages (évolution temporelle de la surface et du volume), nous avons pu affecter chaque observation à l'une des trois catégories suivantes selon la situation du nuage dans son cycle de vie.

- période de croissance : observations pour lesquelles la surface et l'indice volumique sont supérieurs à ceux de l'observation précédente.
- période de décroissance : observations pour lesquelles la surface et l'indice volumique sont inférieurs à ceux de l'observation précédente.
- période de maturité : toutes les autres observations pour lesquelles la surface et l'indice volumique ne suivent pas la même évolution par rapport à l'observation précédente, cette phase correspondant à une augmentation de la surface et une diminution du volume. Les situations présentant simultanément une diminution de la surface et une augmentation du volume n'ont pas été observés sur ce jeu de données.

D'autre part, la première observation de chaque événement a été arbitrairement affectée à la première catégorie (nuage en phase croissante) car le suivi débute

généralement au début de la formation du nuage et dans sa phase de croissance. Cette classification des points à l'aide de l'évolution temporelle des nuages, nous servira de référence tout au long de ce travail. Pour aboutir à la classification des nuages à partir d'une seule image, deux méthodes sont proposées dans cet article.

3.1 Méthode utilisant les résidus de la relation Log volume Log surface

Dans un premier temps, nous avons recherché une estimation par les moindres carrés des paramètres du modèle linéaire (modèle (1)) liant le logarithme népérien de la surface au logarithme népérien de l'indice volumique d'un nuage sur une image donnée :

$$\ln(V_{ik}) = l\widehat{V}_{ik(1)} + \varepsilon_{ik} = b_i + a_i \ln(S_{ik}) + \varepsilon_{ik}$$

avec V_{ik} : indice volumique observé pour l'observation k de l'événement i ; S_{ik} : surface observée pour l'observation k de l'événement i ; a_i, b_i : coefficients d'ajustement pour chaque événement ; ε_{ik} : résidus de l'ajustement pour l'observation k de l'événement i . L'ajustement obtenu explique 96,1% de la variance des $\ln(V_{ik})$. Nous avons ensuite effectué l'ajustement en supposant égaux tous les a_i d'une part et les b_i d'autre part afin de supprimer "l'effet événement". Le modèle recherché (modèle (2)) est alors de la forme :

$$\ln(V_{ik}) = l\widehat{V}_{ik(2)} + \varepsilon'_{ik} = b + a \ln(S_{ik}) + \varepsilon'_{ik}$$

Cet ajustement explique 95% de la variance des $\ln(V_{ik})$. D'autre part, les estimations \widehat{V}_{ik} données par la formule

$$\widehat{V}_{ik} = e^{a+b \ln(S_{ik})}$$

expliquent 90,6% de la variabilité des données brutes V_{ik} . Ce pourcentage est obtenu par la formule :

$$\frac{\text{var}(V_{ik}) - [\sum_{i,k} (V_{ik} - \widehat{V}_{ik})^2]/1835}{\text{var}(V_{ik})}$$

où 1835 représente le nombre de degrés de liberté du modèle (nombre d'observations -2).

L'équation du modèle qui sera utilisé par la suite est : $\ln(V) = 1,87 + 1,1 \ln(S)$ et ne tient pas compte de "l'effet événement". La qualité de ce second modèle n'est que de très peu inférieure en terme de variance expliquée à celle du précédent, indiquant que la relation semble relativement stable pour l'ensemble des événements. Nous avons donc procédé à un test statistique sur l'hypothèse H_0 -une seule relation valable (égalité des a_i entre eux et des b_i entre eux) pour tous les événements-, pour lequel nous avons calculé la différence des sommes des carrés résiduels des deux modèles (51,2) que nous avons divisé par la différence entre les nombres de degrés de liberté des deux modèles (48) et enfin nous avons divisé la valeur ainsi obtenue par le carré résiduel moyen (0,084667) -somme des carrés résiduels (151,3) divisée par le nombre de degrés de liberté (1787)- du modèle le plus fin ; ces opérations correspondent à l'expression suivante :

$$\frac{[(\sum_{i,k} (\ln(V_{ik}) - l\widehat{V}_{ik(1)})^2) - (\sum_{i,k} (\ln(V_{ik}) - l\widehat{V}_{ik(2)})^2)] / (ddl_1 - ddl_2)}{(\sum_{i,k} (\ln(V_{ik}) - l\widehat{V}_{ik(1)})^2) / ddl_1}$$

le résultat obtenu est 12,59. Sous l'hypothèse H_0 , la valeur ainsi obtenue (12,59) est une réalisation d'une variable de Fisher à 48 et 1787 degrés de liberté : $F_{48/1787} = 12,595$. Le test de comparaison des deux modèles conduit donc au rejet de l'hypothèse (H_0) d'une seule relation valable pour tous les événements avec un risque inférieur à 1/1000. Cependant l'utilisation d'un tel modèle avec une relation par événement n'aurait pas d'intérêt pratique puisque le modèle dépend des événements eux mêmes et ne peut donc pas être utilisé pour une démarche générale (il serait alors nécessaire d'avoir l'information temporelle du nuage pour calculer tous les paramètres du modèle).

A l'aide du modèle simplifié explicité précédemment, nous avons donc calculé les résidus ϵ'_{ik} associés à chaque point. Grâce à leurs signes nous avons pu déterminer leur position par rapport à la droite de régression. Les points au dessus/dessous de la droite de régression, ayant des résidus positifs/négatifs sont affectés dans les classes des nuages croissants/décroissants. Nous avons ensuite procédé à la validation des résultats en comparant la classification de chaque point établie à l'aide du modèle (valeur des résidus) avec la classification de référence effectuée à l'aide de l'évolution temporelle du volume et de la surface. Au tableau 1 sont portés les effectifs des observations en fonction de la classe d'évolution et du signe du résidu.

Tableau 1: Table de contingence : la variable "signe" représente le signe des résidus, et la variable "référence" le type d'évolution observée a priori (croissant, indéterminé, décroissant) pour chaque observation.

signe	+	-	total
référence croissant	587	203	790
indéterminé	152	188	340
décroissant	125	582	707
total	864	973	1837

Parmi les 790 observations "nuages croissants", 587 (74%) ont des résidus positifs et 203 (26%) ont des résidus négatifs. Parmi les 707 observations "nuages décroissants" 125 (18%) ont des résidus positifs et 582 (82%) des résidus négatifs. Les observations indéterminées se répartissent dans des proportions semblables au sein des deux catégories de résidus. Pour observer la répartition des points ainsi que le type de confusion dans chaque classe, les observations ont été réparties en 6 catégories :

- Les deux premières correspondent à de bons classements ("1" croissant-résidus positifs et "2" décroissants-résidus négatifs).
- Les deux suivantes correspondent à de mauvais classements ("3" décroissants-résidus positifs et "4" croissants-résidus négatifs).
- Les deux dernières ("5" et "6") correspondent aux observations indéterminées (nuage à maturité) ayant des résidus positifs ou négatifs.

Avec cette méthode, il est impossible de séparer les points représentant un nuage à maturité du reste; les points correspondant (résidus positif/négatif) sont affectés à l'une des deux classes précédentes (croissant/décroissant) et seront donc reportés dans les classes ("5" et "6"). Au tableau 2 sont portés, pour chaque événement, les pourcentages d'observations selon les 6 catégories définies précédemment : certains événements tel que celui du 23 août 1989 (numéro 8) ont leurs observations bien classées, d'autres tel que celui du 20 août 1989 (numéro 10) conduisent à des résultats nettement moins satisfaisants. Les figures 4 et 5 représentent les graphes

Tableau 2: Répartition (pourcentages) des observations dans chaque groupe défini comme suit 1 (croissants bien classés), 2 (décroissants bien classés), 3 (décroissants mal classés), 4 (croissants mal classés), 5 (indéterminés classés croissants), 6 (indéterminés classés décroissants), en fonction de l'événement considéré

classe	1	2	3	4	5	6	total
événement							
1	29	42	16	0	13	0	100
2	24	41	21	0	14	0	100
3	45	30	7	9	5	5	100
4	31	38	12	7	7	5	100
5	32	26	15	0	15	14	100
6	40	24	12	2	10	12	100
7	41	30	0	14	4	10	100
8	45	41	0	9	0	5	100
9	33	39	6	11	11	0	100
10	33	13	13	16	14	13	100
11	16	22	18	8	21	14	100
12	28	47	8	5	8	4	100
13	28	36	7	14	13	3	100
14	46	33	3	0	8	10	100
15	44	17	8	16	0	15	100
16	18	39	13	2	18	10	100
17	55	13	0	28	0	5	100
18	18	40	25	0	10	7	100
19	21	39	18	9	12	0	100
20	27	30	10	9	13	10	100
21	55	26	0	4	3	13	100
22	34	38	14	0	12	2	100
23	47	30	9	2	2	9	100
24	21	45	12	2	16	3	100
25	15	50	17	4	15	0	100

des valeurs observées pour ces deux événements, la relation générale (établie avec l'ensemble des événements) et la relation particulière (établie avec l'événement considéré).

Dans les deux cas, l'ajustement établi à partir des points de l'événement lui même est meilleur que celui établi avec tous les événements. Les deux droites

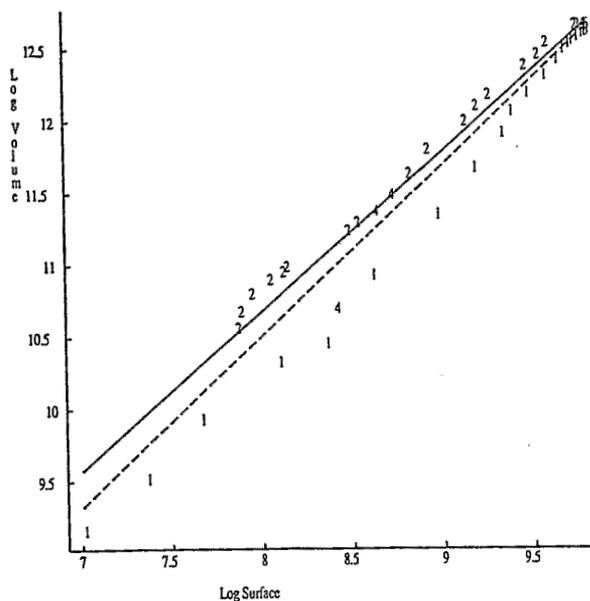


Figure 4: (cf. légende de la figure 5)

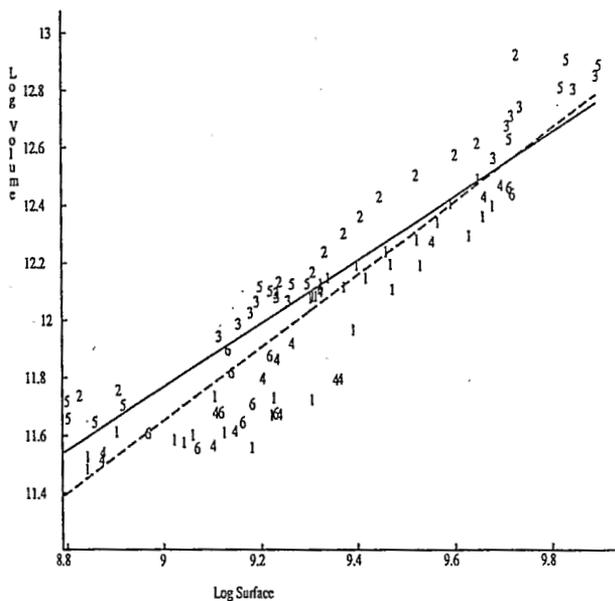


Figure 5: Relations entre le logarithme de l'indice volumique et le logarithme de la surface pour les événements du 23 août 1989 et du 20 août 1989. La droite en trait plein représente la droite de régression établie avec l'ensemble des événements et celle en trait interrompu la droite de régression établie à partir de l'événement lui même. Les valeurs 1 à 6 indiquent le type de classement réalisé, les valeurs 1 et 2 représentent de bons classements, les valeurs 3, 4 indiquent des confusions et 5, 6 des points non classables.

(x 100000)

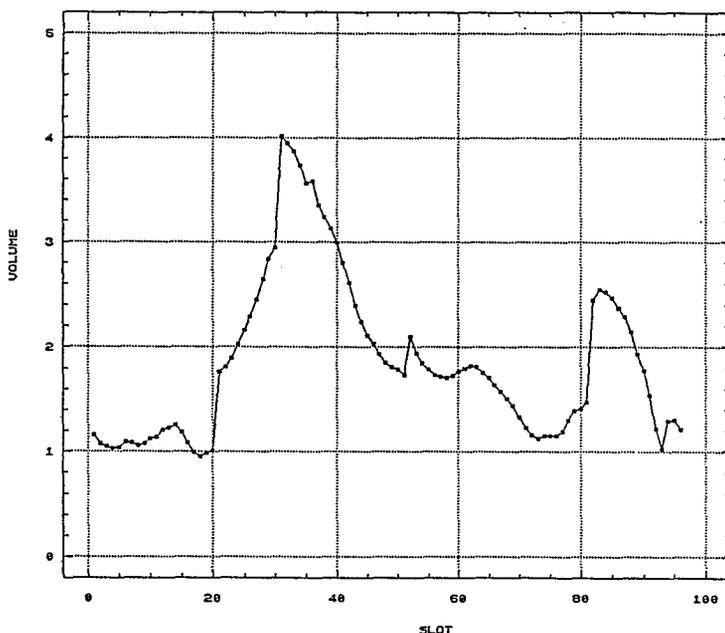


Figure 6: Evolution temporelle (slot) de l'indice volumique pour l'événement du 20 août 1989.

restent cependant très voisines. L'événement du 23 août 1989 représente un amas nuageux qui est passé par un seul maximum, par contre l'événement du 20 août 1989 est passé par plusieurs phases de croissance-maturité-décroissance avant de se dissiper (fig. 6); ce qui peut expliquer les confusions entre les deux classes (croissance/décroissance). En effet, la relation volume-surface n'est pas forcément la même pour un même nuage au cours de ses reprises d'activité. Sur l'exemple du 13 août 1989 (fig. 7), on constate que lors de la deuxième reprise d'activité le nuage présente, à surface égale, un indice volumique inférieur à celui de la première. D'autre part, la méthode de suivi utilisée ici permet de suivre un groupe de nuages d'une même perturbation, ces nuages pouvant se trouver dans des phases différentes alors que les caractéristiques sont calculées sur l'ensemble des nuages. Cette dernière considération peut expliquer une partie des confusions observées si on considère que les nuages d'une même perturbation peuvent être dans des phases différentes.

3.2 Classification par analyse factorielle discriminante (A.F.D.)

La méthode décrite dans le paragraphe précédent permet de séparer les nuages en phase de croissance de ceux en phase de décroissance (points définis par un couple volume-surface) en considérant la position des points par rapport à la droite de régression de l'ensemble. Cette dernière méthode donne de bons résultats mais l'A.F.D. est une méthode plus adaptée à ce genre de problème. En effet l'A.F.D. regroupe deux aspects, celui de l'analyse de variance et celui de l'analyse

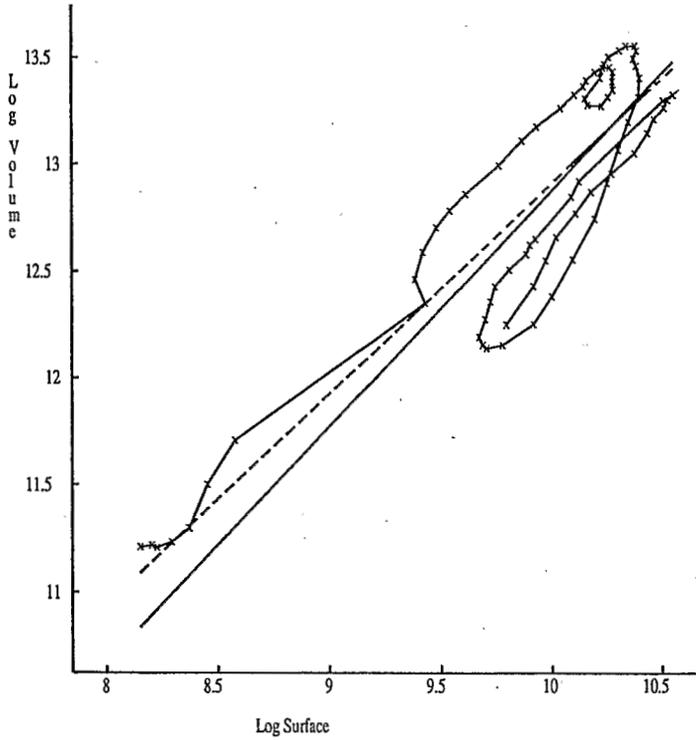


Figure 7: Relation entre le logarithme de l'indice volumique et le logarithme de la surface pour l'événement du 13 août 1989. La droite en trait plein représente la droite de régression établie avec l'ensemble des événements et celle en trait interrompu la droite de régression établie à partir de l'événement lui même.

en composantes principales puisque la première est utilisée pour son caractère inférentiel et la deuxième pour son caractère descriptif (Tomassone, 1988). L'A.F.D. permet donc de comparer deux populations connues a priori et éventuellement de rattacher des nouvelles observations à une des deux populations. Cette dernière possibilité n'a pas encore été exploitée, puisque toutes les observations ont été utilisées pour établir le modèle.

Dans la mesure où il existe d'une part, une relation générale, positive et d'allure linéaire, entre les logarithmes des surfaces et des volumes, et où il apparaît d'autre part que, pour une surface donnée, le volume des nuages en phase croissante est supérieur à celui des nuages en phase décroissante, les barycentres des groupes de points correspondants à ces phases sont alignés selon une direction différente de celle de l'ensemble du nuage de points (fig. 2). Dans ces conditions, une analyse factorielle discriminante, consistant à rechercher une direction maximisant la variabilité entre classes par rapport à la variabilité intra classes, est susceptible de conduire à des résultats intéressants pour une classification.

Nous avons réalisé une telle analyse à partir des points affectés a priori à l'une des deux catégories "nuages en phase croissante ou décroissante". Les coefficients de l'axe discriminant selon les logarithmes de la surface et du volume sont égaux à $-4,1$ et $3,5$; la moyenne générale des observations :

$-4,1 * \ln(\text{surface}) + 3,5 * \ln(\text{Volume})$ étant égale à $4,41$.

La moyenne des valeurs de l'équation suivante :

$$-4,1 * \ln(\text{Surface}) + 3,5 * \ln(\text{Volume}) - 4,41$$

est égale à $0,87$ pour les nuages en phase croissante et à $-0,78$ pour les nuages en phase décroissante.

On considère alors, pour une observation donnée qu'elle relève d'une phase croissante ou décroissante selon que la valeur de sa projection sur l'axe discriminant donnée par le résultat de l'expression suivante :

$$FD = -4,1 * \ln(\text{surface}) + 3,5 * \ln(\text{Volume}) - 4,41$$

est plus proche de $0,87$ ou de $-0,78$ (c'est-à-dire supérieure ou inférieure à $0,045$). La direction définie par cet axe discriminant est perpendiculaire à la direction générale du nuage de point (fig. 2). La classification ainsi réalisée conduit aux résultats présentés au tableau 3.

Les résultats sont sensiblement équivalents à ceux obtenus avec la méthode précédente. Quatre vingt un pourcents (respectivement 80%) des nuages en phase décroissante (croissante) sont correctement affectés.

On peut préciser, en fonction des valeurs prises sur l'axe discriminant, les probabilités de bon ou mauvais classement des observations. Pour ce faire, nous avons calculé, en fonction du décile relativement à l'axe discriminant, la répartition des observations selon la phase déterminée a priori (tableau 4).

On constate que, parmi les 183 observations du premier décile ($FD < -1,443$) 163 (89%) correspondent à des nuages en phase décroissante et 9 (5%) correspondent à des nuages en phase croissante. Pour les trois premiers déciles ($FD < -0,597$), 426 des 551 observations (77%) correspondent à des nuages en phase décroissante et 52 (9%) à des nuages en phase croissante. Pour les trois derniers déciles ($FD > 0,51$) 452 des 552 observations (82%) relèvent de nuages en phase croissante et 46 (8%) d'observations de nuages en phase décroissante. Pour le dernier décile ($FD > 1,471$) les pourcentages correspondants sont de 96% et 2%.

Tableau 3: Table de contingence : la variable "A.F.D." représente le classement en fonction de l'A.F.D. et "référence" représente le type d'évolution observée à priori ("plus" croissant, "?" indéterminé, "moins" décroissant).

A.F.D.	moins	plus	total
référence			
décroissant	643	147	790
indéterminé	185	155	340
croissant	138	569	707
total	966	871	1837

Tableau 4: Répartition (par décile) du nombre de points affectés dans chaque classe d'évolution de nuage. La variable "référence" représente le type d'évolution défini a priori.

référence	décroissant	indéterminé	croissant	total
décile				
1	163	11	9	183
2	142	25	17	184
3	121	37	26	184
4	101	44	38	183
5	92	57	35	184
6	79	44	61	184
7	46	68	69	183
8	32	36	116	184
9	11	14	159	184
10	3	4	177	184
total	790	340	707	1837

Les déciles intermédiaires correspondent à 40% des observations $1,471 > FD > -0.597$ conduisent à des classements bien entendu moins efficaces surtout pour le sixième décile pour lequel les observations sont quasiment équi-réparties dans les deux classes définies a priori.

4 Perspectives et conclusion.

Les deux principaux résultats de cette étude sont d'une part la mise en évidence d'une relation présentant un "phénomène d'hystérésis" entre la surface et le volume pour les nuages convectifs sur un échantillon de la saison des pluies 1989 et d'autre part la mise en évidence de deux relations distinctes selon la phase du nuage. Ce type de relation confirme les connaissances sur le fonctionnement théorique des phénomènes convectifs, cependant l'utilisation de la télédétection pour aboutir à ce genre de conclusion ouvre des perspectives d'étude à plus ou moins grande échéance.

A l'aide des deux méthodes précédentes, nous avons montré la possibilité de déterminer la phase d'un nuage à partir d'une seule image avec environ 80% de réussite. Ce résultat pourra être utilisé pour affiner les méthodes d'estimation des pluies avec les satellites défilants et permettra d'estimer la situation d'un nuage dans son cycle de vie à partir d'une seule image. Cependant, il serait intéressant de vérifier sur un plus grand nombre de cas la validité de la relation obtenue par rapport aux événements qui présentent plusieurs phases actives au cours de leur vie pour s'assurer que la relation ne change pas au fur et à mesure des reprises d'activités. D'autre part, il serait intéressant de vérifier la validité des relations établies à partir de l'année 1989 sur d'autres années et de comparer les résultats au cours de l'avancement de la saison des pluies pour voir une éventuelle influence du flux de mousson.

Le cycle d'hystérésis mis en évidence dans cette étude pourrait servir à quantifier la productivité d'un nuage et son efficacité mais il resterait encore à répartir les précipitations sous le nuage et au cours du temps. Dans cette optique, une étude est encore nécessaire pour étudier la répartition spatiale des pluies sous un nuage ainsi que leur répartition temporelle. Une telle étude nécessite la mise en place d'un réseau d'observation sur une grande échelle car le réseau pluviographique actuel des pays concernés est très irrégulier. De plus les données ne sont pas toujours accessibles et sont sous forme d'enregistrement papier dont le dépouillement est très lourd. Une solution consiste à utiliser des stations à enregistrement numérique ou même télétransmises permettant un accès aux données immédiat sous un format directement exploitable. Le programme de suivi automatique pourrait être développé dans ce sens pour permettre d'une part la sélection des stations touchées par un nuage à un moment donné et d'autre part l'accès direct aux informations pluviographiques de la banque de donnée.

Références bibliographiques

- Arnaud Y., M. Desbois and J. Maizi, 1991 : Automatic tracking and characterization of african convective systems on Meteosat pictures. *Journal of Applied Meteorology* (sous presse).
- D. L. Cadet et B. Guillot, 1991 : Programme de recherche EPSAT (Estimation des Pluies par SATellite) diffusion interne ORSTOM ; Ministère de la coopération.
GENSTAT 5 reference manual, 1988, Clarendon press Oxford, pp 749.
- Hoepffner M., T. Lebel, and H. Sauvageot, 1989 : EPSAT Niger : a pilot experiment for rainfall estimation over West Africa. *Proceedings WMO/IAHS/-ETH workshop on precipitation measurement, St Moritz, Switzerland*, pp 251-258.
- Lamb P.J., 1985 : Rainfall in sub-Saharan west Africa during 1941-1983. *Z.Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Vol 21, pp 131-139.
- Lebel T., 1991, Estimation des précipitations au Sahel : l'expérience EPSAT-NIGER. *Soil Water Balance in the sudano Sahelian Zone (Niamey Workshop, February 1991)*, pp 13.
- Lebel. T., H. Sauvageot, M. Hoepffner, M. Desbois, B. Guillot, P. Hubert, 1991; "EPSAT-NIGER : Towards satellite rainfall estimation over the Sahel". *Journal of Hydrological Sciences* (à paraître).
- Thauvin V., 1991; *Etude des précipitations en milieu Sahélien à l'aide du réseau dense de pluviographes de l'expérience EPST-NIGER ; thèse de doctorat de l'université des sciences et technique du languedoc, montpellier (à paraître)*.
- Tomassonne R., 1988 : Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle discriminante ? *ITCF, Paris*, pp 56.
- Tomassonne R., 1989 : Comment interpréter les résultats d'une régression linéaire ? *ITCF, Paris*, pp 55.
- Simpson Joanne, Robert F. Adler and Gerald R. North, 1988 : "A proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol 69, N° 3, pp 278-295.
- Sircoulon J., 1976 : Les données hydropluviométriques de la sécheresse en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1973 et 1940". *Cahiers ORSTOM série Hydrologie, Numéro spécial Sécheresse*, Vol 13, N° 2, pp 75-174.
- Sircoulon J., 1985 : La sécheresse en Afrique de l'ouest. Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973. *Cahiers ORSTOM série Hydrologie*, Vol XII, N° 4, pp 75-86.
- Stout John. E., David W. Martin, Dharendra N. Sikdar, 1979 : Estimating GATE rainfall with geosynchronous satellite images. *Monthly Weather Review*, Vol 107, pp 585-598.

Szejwach, G. and M. Desbois, 1978 : Dynamic classification of mesoscale cloud patterns, *Journal of Applied Meteorology*, 17, pp 1406-1411.