

1986/014



**Surveillance des écosystèmes pastoraux
Sahéliens et cartographie de la
couverture nuageuse et des
précipitations**

**Rapport Final à la
Commission des Communautés Européennes
Direction Générale du Développement**

VIII/19/2

Novembre 1986

Surveillance des écosystèmes pastoraux Sahéliens et cartographie de la
couverture nuageuse et des précipitations

par

J B Stewart	NERC, Institute of Hydrology
J C Rodda	NERC, Institute of Hydrology
B K Wyatt	NERC, Institute of Terrestrial Ecology
D G Hewett	NERC, Institute of Terrestrial Ecology
E C Barrett	Bristol University
C H Power	Bristol University
J R Milford	Reading University
G Dugdale	Reading University
T C Taylor	Silsoe College
M A Keech	Silsoe College
A S Belward	Silsoe College

Rapport Final

à la

Commission des Communautés Européennes

Direction Générale du Développement

VIII/19/2

Novembre 1986

SOMMAIRE

	Page
RESUME DU RAPPORT FINAL	1
OBJECTIVES	1
METHODES	2
RESULTATS	4
DEVELOPPEMENTS OPERATIONNELS ENVISAGES	5
RESUME EXECUTIF	
INTRODUCTION	1
BUT	1
OBJECTIFS	1
METHODOLOGIE	2
ZONE D'ETUDE	4
RESULTATS	4
Estimation de la couverture nuageuse	4
Estimation de la pluviosité	6
Estimations pluviométriques quotidiennes	11
Variabilité spatiale de la pluviosité	13
Estimation de l'humidité du sol	14
Cartographie de la végétation et estimation de la biomasse	14
Conclusions	20
ANNEXE 1	
COUVERTURE NUAGEUSE ET PRECIPITATIONS AU SAHEL OCCIDENTAL	
ANNEXE 2	
CARTOGRAPHIE DE L'HUMIDITE DES SOLS ET DES PRECIPITATIONS AU SAHEL	

ANNEXE 3

**CARTOGRAPHIE DE LA VEGETATION ET DES SOLS, ESTIMATION DE LA
BIOMASSE AU SAHEL**

RESUME

SURVEILLANCE DES ECOSYSTEMES PASTORAUX SAHELIENS ET CARTOGRAPHIE DE LA

COUVERTURE NUAGEUSE ET DES PRECIPITATIONS

RESUME DU RAPPORT FINAL

OBJECTIFS

Ce projet s'attache au développement d'outils pratiques dans le domaine du suivi de l'élevage en Afrique Sahélienne.

Dans ces régions, où la densité de population est faible et la pluviosité très variable, les mesures au sol conventionnelles de la pluviométrie et de la croissance végétale ne peuvent pas fournir un indicateur adéquat de la présence de conditions de crise.

Seules les données satellitaires, qui sont fournies fréquemment pour de grandes étendues, peuvent donner des estimations fiables de la pluviosité locale et de la croissance végétale qui en résulte.

Le but de ce projet est dès lors de développer des modèles de productivité fourragère basés sur une estimation des pluies à partir de satellite.

Cet objectif est atteint en 3 phases:

1. des méthodes d'estimation de la pluviosité à partir de données satellitaires doivent être développées et testées.
2. il faut développer des modèles mettant en relation la distribution, le type et la densité de la végétation avec le niveau et la répartition dans le temps des pluies, tout en tenant compte d'autres facteurs écologiques.

enfin, le type, la distribution et la quantité de biomasse doivent être traduits en capacité de support de pâturage, afin de fournir une information correspondant aux besoins de gestion de l'élevage.

L'étude présente s'est surtout attachée aux deux premières phases.

METHODES

Les procédures décrites dans ce rapport ont été développées sur base d'une imagerie et de données de terrain collectées en République du Niger au long de la période septembre 1984 - septembre 1985. Le travail a donc bénéficié des contacts et des facilités obtenus par les membres de l'équipe de ce projet au cours d'années précédentes.

Au Sahel, la pluie est généralement associée à la formation de nuages à très haute extension dans l'atmosphère. Aussi, ces nuages sont froids et peuvent être détectés par les satellites météorologiques grâce aux senseurs opérant dans les longueurs d'ondes de l'Infra-Rouge thermique. Les estimations de la pluviosité moyenne sur des périodes de 10 à 30 jours ont été réalisées en reliant la durée de couverture en nuages atteignant les hautes altitudes à des mesures pluviométriques au sol et à certaines données climatologiques. Une étude ponctuelle d'estimation pluviométrique au 1er juillet 1985 fut également conduite avec succès.

La variabilité spatiale de la pluie a été étudiée d'après un réseau dense de 36 pluviomètres espacés de 2 en 2 kms en vue d'évaluer la calibration des données satellitaires à faible résolution vis-à-vis d'enregistrements pluviométriques ponctuels et la représentativité des résultats provenant du satellite à l'échelle de la résolution du senseur par rapport à la répartition pluviométrique réelle.

Quoique la pluie soit le plus souvent le facteur décisif en ce qui concerne la productivité écologique des zones semi-arides, d'autres facteurs sont également influents. Tout modèle précis

d'estimation de la productivité primaire doit ainsi tenir compte de facteurs tels que la pédologie et l'hydrologie. La phase suivante de l'étude considère donc certaines de ces variables et exploite les possibilités offertes par des satellites pour suivre l'évolution de la distribution et de la densité de la végétation en vue de développer et de tester de tels modèles de productivité fourragère.

L'estimation de l'humidité du sol se base sur la mesure de leur inertie thermique. En effet sous ciel tropical dégagé, la teneur en humidité de la frange superficielle du sol peut être déterminée à partir de la différence entre la température minimale de surface à l'aube et celle, maximale, du midi local.

On a développé un modèle de correction atmosphérique des mesures satellitaires de température qui sont aussi non déformées à cause de l'humidité de l'air. Les effets de la variation locale d'humidité du sol par rapport à une estimation moyenne de cette valeur ont également été considérés.

La biomasse herbeuse a été déterminée pour une gamme de formations végétales de la savane. Deux indices de végétation ont été dérivés des données numériques multispectrales - le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le PVI (Perpendicular Vegetation Index) - et ont ensuite été évalués. On a développé une méthode pour calibrer les données satellitaires météorologiques - à faible résolution et à haute fréquence - par l'intermédiaire des données Landsat.

Des analyses par régression ont été utilisées pour construire des courbes de calibration liant les biomasses mesurées aux indices NDVI et PVI. Ces corrélations ont ensuite été testées d'après des mesures indépendantes de biomasse.

Enfin, on a produit, à partir des images du NDVI, du PVI et des valeurs des pixels sur la droite des sols (SBI ou Sol Brightness Index), des cartes de la biomasse et de la pédologie pour une scène Landsat complète (185 km x 185 km).

RESULTATS

En utilisant l'imagerie infra-rouge Meteosat avec des seuils de température appropriés, on peut distinguer les régions couvertes par des nuages hauts, moyens et bas, ainsi que les zones dégagées. On a ainsi construit des cartes montrant la distribution des nuages au-dessus d'une zone de quelque $3 \cdot 10^6$ km² en Afrique Occidentale.

Dans la partie sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, les pluies proviennent de gros orages convectifs aisément identifiables sur l'imagerie infra-rouge. On a montré que les zones nuageuses produisant les pluies les plus intenses sont caractérisées par des gradients élevés de température et de développement en surface, deux indicateurs liés plus aux systèmes orageux en développement qu'à ceux en déclin.

Des méthodes d'estimation de la pluviosité journalière ont été expérimentées mais demanderaient des données et un développement complémentaires avant tout usage opérationnel.

Pour de plus longues périodes - 10 et 30 jours - on a développé un traitement automatique de l'imagerie infra-rouge qui donne la durée de présence de nuages en haute altitude. Les cartes de cette durée de couverture nuageuse sont liées à la distribution des pluies et on s'est attaché à convertir les durées en valeurs pluviométriques pour les périodes considérées. Les différentes méthodes requièrent 4, 8 ou 21 images par jour, certaines d'entre elles exigeant également des mesures pluviométriques pour les principales stations météorologiques. On a préparé, au moyen de ces méthodes, des cartes de la distribution des pluies pour la République du Niger durant les mois de la saison des pluies 1985.

Les résultats acquis par le réseau dense des 36 pluviomètres ont montré la grande variabilité de la distribution spatiale de pluies dans ces régions. Si le seul point de mesure dans cette zone de 10 X 10 kms s'était trouvé là où on a mesuré la plus faible pluviométrie, il aurait révélé un déficit pluviométrique par rapport à la pluviosité moyenne de quelque 30%; si au

contraire, il avait correspondu au point de mesure maximale, on en aurait déduit une saison humide avec une pluviosité de 40% au-dessus de la moyenne.

Cette variabilité spatiale crée un problème pour la calibration et le contrôle des mesures satellitaires par rapport aux mesures au sol. De plus, elle suggère que les estimations satellitaires des pluies régionales pour des périodes de 10 jours et plus devraient être un bien meilleur indicateur des conditions potentielles de sécheresse que les mesures pluviométriques ponctuelles classiques.

On a construit un modèle d'estimation de l'humidité moyenne, sur des zones étendues, des 20 cms supérieurs des sols.

Deux indices de végétation, le NDVI et le PVI ont été étudiés en tant qu'estimateur satellitaire de la biomasse. Des mesures au sol de la végétation ont été utilisées pour calibrer ces indices. Le PVI s'est révélé être plus sensible que le NDVI dans le cas de biomasses faibles et être bien corrélé aux mesures de biomasse herbeuse. La corrélation a par ailleurs été contrôlée avec succès par des mesures de biomasse effectuées par des observateurs indépendants. On a produit des cartes de la pédologie et de la biomasse directement à partir de l'imagerie satellitaire. Elles ont ensuite été contrôlées sur le terrain.

Le principe de faisabilité d'un système opérationnel de suivi de la végétation basé sur des données du satellite NOAA à orbite polaire a été établi. Mais il serait nécessaire d'en vérifier la validité par l'utilisation de l'imagerie NOAA réelle et par les données d'une saison de terrain complémentaire en vue de confirmer ces propositions dans la pratique.

DEVELOPPEMENTS OPERATIONNELS ENVISAGES

Les cartes de la durée de couvertures en nuages froids peuvent être rapidement préparées à partir de l'imagerie Meteosat. Les cartes correspondant aux périodes de 10 jours sont d'un intérêt agrométéorologique immédiat, même sans calibration, puisqu'elles identifient clairement les zones où il n'y a pas eu d'activités

orageuses et où la végétation annuelle devrait par conséquent être stressée.

Il a été montré que -- au vu de la grande variabilité spatiale de la pluviosité - les estimations pluviométriques satellitaires pour des régions moyennes et des périodes de 10 jours ou un mois devraient être plus fiables que les estimations pour les mêmes surfaces faites à partir de mesures pluviométriques ponctuelles.

Les méthodes d'estimation de la pluviosité déjà acquises, pour des périodes de 10 jours et plus, pourraient être développées en un système opérationnel utilisant aussi bien les données Meteosat et les données du satellite à orbite polaire NOAA. Un schéma opérationnel de mesure de la période de croissance végétale et de détermination d'éventuelles périodes - durant la saison des pluies - où l'humidité du sol ne serait plus suffisante pour maintenir cette croissance, pourrait être développée à partir du modèle d'estimation de l'humidité des sols.

Des procédures d'estimation de la biomasse herbeuse à partir d'un nombre limité de points de mesure au sol ont été établies pour des surfaces allant jusqu'à la taille d'une scène Landsat complète (185 kms x 185 kms). Il est probable qu'un système de suivi de la biomasse pourrait se baser à faible coût sur ces méthodes en utilisant l'imagerie du satellite à orbite polaire NOAA, bien que les détails opérationnels de cette procédure exigent encore quelques développements.

RESUME EXECUTIF

RESUME EXECUTIF

INTRODUCTION

Le chapitre présent résume les résultats de la contribution britannique au projet "Etude par télédétection de la désertification en bordure du Sahara" financé par la Commission des Communauté Européennes. Les rapports détaillés des trois sous-projets formant cette contribution sont repris dans les appendices 1 à 3.

BUT

Le projet se situe dans le cadre du développement d'outil de gestion et de planification des ressources agricoles, plus précisément pastorales, dans la zone sahelienne de l'Afrique.

Dans ces régions, faiblement peuplées et à pluviosité très variable, des mesures de terrain conventionnelles des précipitations et de la croissance végétale ne peuvent servir d'indicateur de présence de situation critique pouvant conduire à des famines à grande échelle. Seules les données satellitaires, fournies régulièrement pour de grandes surfaces, sont à même de donner des estimations fiables de la pluviométrie et de la croissance végétale.

Le but de ce projet est donc de développer des modèles de productivité des zones de pâturage basés sur des estimations satellitaires de la pluviosité.

OBJECTIFS

Ce but se décompose en trois stades successifs:

1. développer et contrôler des méthodes d'estimation satellitaire des précipitations
2. développer des modèles déterminant le type, la distribution et la quantité de végétation en fonction de la répartition

et du volume des pluies ainsi que d'autres facteurs écologiques influents.

traduire ces paramètres de végétation en terme de capacité de support ce qui est directement utilisable pour la gestion du bétail.

L'étude s'est concentrée sur les deux premiers points. Les objectifs particuliers sont:

développer une méthode d'estimation des précipitations journalières, par décade (10 jours) et mensuelles, ainsi que les totaux pluviométriques à plus long terme.

2. développer une méthode d'estimation de l'humidité du sol

cartographier la distribution de la végétation et en estimer la biomasse en vue de calibrer des modèles liant pluviosité et production primaire.

4. développer des méthodes de cartographie satellitaire de la biomasse, qui serviront d'informations directes pour la gestion des pâturages sur de grandes surfaces.

METHODOLOGIE

Les capteurs satellitaires peuvent uniquement mesurer la radiation émise ou réfléchié par la surface terrestre ou encore par l'atmosphère ou les nuages qui la surmontent. Ils ne peuvent pas mesurer directement les précipitations. Cependant, la présence de nuages, détectée par satellite, sert d'indicateur de pluies potentielles et peut donc mener à une estimation quantitative de celles-ci.

Au Sahel, la plupart des pluies sont associées à des lignes de grains (orages) mobiles. Ces orages sont identifiables sur imagerie satellitaire par l'étude de la couverture et des températures sommitales des nuages. Les systèmes orageux produisant les pluies significatives s'étendent jusqu'en haute atmosphère et atteignent dès lors des températures inférieures à -60°C . On a

quantifié, par rapport à des mesures pluviométriques classiques, la relation entre la pluviosité et la durée de vie des nuages dont les sommets atteignaient certaines températures (négatives) de référence.

C'est ici qu'intervient le problème classique - pour toutes les études pluviométriques par télédétection - de vérification des résultats. Les données satellitaires correspondent en effet à des mesures moyennes sur une certaine unité de surface (en l'occurrence 5 X 5 kms) alors que les données au sol sont des valeurs ponctuelles. Ce problème se pose particulièrement en région semi-aride, comme le Sahel, où la pluviométrie est très variable dans le temps et dans l'espace.

En condition de ciel tropical clair, l'humidité contenue dans les 10 (à 20) cms supérieurs d'un sol nu peut être estimée à partir de la différence de température de surface à l'aube (où elle est minimale) et peu après midi (maximale): le changement de diffusivité thermique du sol, à mettre en relation avec son contenu en eau, est en effet la cause principale des différentes gammes de températures diurnes observables.

Bien que la pluie soit souvent le facteur écologique limitant en ce qui concerne la productivité biologique d'un milieu semi-aride, d'autres éléments entrent en ligne de compte. Aussi l'étude de la seule pluviométrie ne peut conduire à un outil adéquat de gestion optimale des ressources fourragères. On devra également considérer d'autres facteurs, comme la pédologie et l'hydrologie. Une partie de cette étude s'est donc attaché à cartographier, par télédétection, la distribution de la végétation et la biomasse, en vue de développer des modèles de productivité impliquant les différents paramètres écologiques cités.

La biomasse herbacée a été mesurée sur toute une gamme de formations de savanes semi-arides, regroupées sur une région assez restreinte. On a ensuite calculé deux indices de végétation, à partir des données satellitaires, soit le PVI (Perpendicular Vegetation Index) et le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). On décrit premièrement comment calibrer l'imagerie AVHRR

au moyen des données Landsat MSS. On construit ensuite des courbes de corrélation entre biomasse et indices de végétation. Ces courbes sont contrôlées grâce à des mesures de biomasse acquises indépendamment. Enfin on calcule un indice de brillance des sols (SBI), utilisable d'une image à une autre, ce qui permet, en conjonction avec le PVI et le NDVI de cartographier à la fois les sols et la biomasse.

ZONE D'ETUDE

Les méthodes décrites ci-dessus sont conçues en vue de leur application à l'ensemble du Sahel. Cependant, leur mise au point exige une grande quantité de données de terrains fiables. C'est pour des raisons pratiques qu'une zone d'étude plus limitée a été retenue pour la phase expérimentale de ce projet. Le travail a ainsi pris place en République du Niger où certains membres de l'équipe collectent des données depuis plusieurs années et ont établi de bons contacts avec les institutions météorologiques et agricoles de ce pays.

Puisque les conditions écologiques y sont similaires, nous sommes confiants dans la validité des méthodes, calibrées au Niger, dans toute autre partie du Sahel, moyennant d'éventuelles modifications mineures.

La figure 1 délimite la zone couverte, en Afrique Occidentale, par l'imagerie Meteosat utilisée dans notre projet (soit la région limitée par 14°E, 7°O, 9°N et 25°N). On a également indiqué la région où ont été réalisés les relevés de terrain et où l'imagerie Landsat, disponible, a été traitée.

RESULTATS

Estimation de la couverture nuageuse

Au Sahel, les pluies sont généralement associées à des formations nuageuses à haute extension verticale. Par conséquent, les sommets de ces nuages sont froids: on peut ainsi les détecter grâce aux données infra-rouge thermiques de Meteosat, transmises quatre fois par jour (annexe 1, pp 16-37)

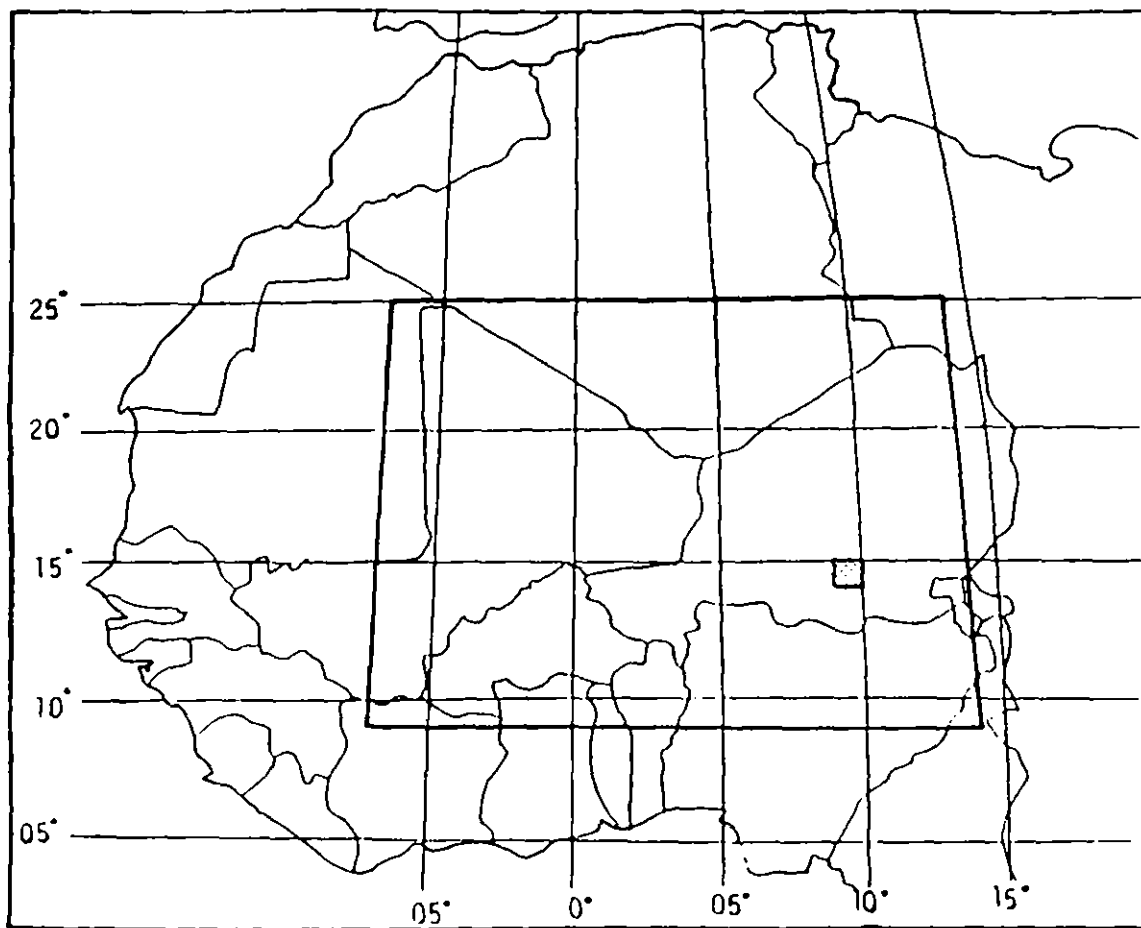


Figure 1 Carte d'Afrique occidentale délimitant la zone couverte par Meteosat.
Le carré pointillé correspond à la zone des relevés de terrain (en République du Niger) où l'imagerie Landsat MSS était également disponible.

Au vu de la relation altitude-température d'un nuage, il est possible de distinguer différentes classes d'altitude de nuage en fonction d'un découpage adéquat de la gamme des températures mesurée par satellite. On délimite ainsi trois catégories de nuages: nuages bas (< 5000 m), moyen (5000 m - 9000 m) et hauts (> 9000 m). On a mis au point une méthode de repérage et de classification automatique de la couverture nuageuse à partir des données Meteosat. Elle mène à une estimation quotidienne - et à plus long terme - de la couverture nuageuse sur la zone d'étude, tout au long des mois de juillet et d'août 1985 (tableaux 1 à 3).

Tableau 1 Surface de la couverture nuageuse (en %) pour les 4 enregistrements d'un jour donné: (1er juillet 1985)

Heure d'en- registrement	Nuages "hauts" %	Nuages moyens" %	Nuages "bas" %	% cou- verture nuageu- se globale	% ciel dégagé	% ciel dégagé pendant toute la journée
0330	9.7	8.5	32.6	50.8	49.2))
0900	7.9	7.5	14.6	30.0	70.0 )	) 36.6
1500	4.2	6.9	15.0	26.1	73.9))
2130	2.7	12.5	26.6	41.8	58.2))

Estimation de la pluviosité

On a développé deux méthodes distinctes d'estimations pluviométriques automatiques sur des périodes de 10 jours et de un mois.

Les deux méthodes utilisent la présence de nuages en haute altitude (révélée par les basses températures observables dans le canal IR thermique de Meteosat) comme indicateur de pluie vraisemblable. La première méthode englobe l'utilisation de données climatologiques. On construit des cartes du nombre de jours de pluie pour une période donnée (en fait le cumul des jours de présence de nuages en haute altitude). Une première estimation pluviométrique est obtenue en multipliant ce nombre par la "pluviosité moyenne d'un jour de pluie", valeur dérivée des atlas climatologiques, et conditionnée à l'échelle du pixel. Ces estimations sont comparées, pour les sites des stations synoptiques, aux observations réelles au sol; on calcule un facteur de pondération pour ajuster les premières aux secondes. L'ajustement est appliqué à l'ensemble de la zone d'étude en vue de produire les estimations pluviométriques définitives: le tableau 4 les compare aux mesures de terrain, pour les principales stations du Sahel.

La deuxième méthode lie pluviosité et durée de couverture nuageuse froide pour des périodes de 10 ou 30 jours de juin à août 1985. Dans ce cas, les données pluviométriques réelles (en vue de la calibration de la relation) sont fournies par les stations synoptiques, de 3 en 3 heures, et par quelques 120 autres stations. L'étude a suggéré que la température de -60°C était la plus discriminante pour distinguer les nuages générateurs (ou non) de pluie. On constate une assez bonne corrélation entre pluviosité médiane et durée de présence de couverture nuageuse froide (tableau 5). Cependant le pouvoir discriminant reste faible, partiellement à cause de l'extrême variabilité de la répartition spatiale de la pluie, point que l'on discute plus loin.

Les cartes de la durée de couverture nuageuse froide ont été préparées, pour chaque décade et chaque mois (en juin, juillet et août 1985) et pour l'ensemble de la République du Niger au sud du 19°N . Sur ces cartes, le contour de 8 heures correspond approximativement à 40 mm de pluies, celui de 16 heures à 80 mm. Ces cartes par décades (10 jours) sont d'un intérêt agrométéorologique immédiat, même sans calibration, puisqu'elles identifient clairement les régions sans orages, où la végétation annuelle est donc sévèrement stressée.

Tableau 2 Pourcentages de couverture nuageuse (et de ciel dégagé) sur les images reconditionnées à l'échelle de la journée (juillet 1985)

Date	% ciel dégagé	% ciel couvert	% ciel dégagé pendant une décade	% ciel dégagé durant (tout le mois)
1	36.6	63.4		
2	39.5	60.5		
3	32.6	67.4		
4	35.4	64.6		
5	35.7	64.3		
6	43.6	56.4	8.4	
7	40.6	59.4		
8	35.1	64.9		
9	37.9	62.1		
10	42.4	57.6		
11	29.8	70.2		
12	22.7	77.3		
13	38.7	61.3		
14	35.1	64.9		
15	32.8	67.2)
16	17.0	83.0	2.3	) 0.6
17	24.3	75.7)
18	29.3	70.7)
19	29.0	71.0)
20	24.2	75.8)
)
21	19.1	80.9)
22	14.7	85.3)
23	17.1	82.9)
24	24.0	76.0)
25	28.2	71.8)
26	31.6	68.4	0.3	
27	35.3	64.7		
28	47.9	52.1		
29	35.4	64.6		
30	25.4	74.6		
31	28.1	71.9		

Tableau 3 Pourcentages de couverture nuageuse (et de ciel dégagé) pour l'ensemble du mois, pour chaque heure d'enregistrement et les mois de juillet et d'août 1985)

Heure d'enregist- rement	juillet 85		août 1985	
	% ciel dégagé en permanence	% ciel couvert au moins une fois	% ciel dégagé en permanence	% ciel couvert au moins une fois
03.30Z	0.3	99.7	0.5	99.5
09.00Z	8.0	92.0	4.0	96.0
15.00Z	4.1	95.9	6.3	93.7
21.30Z	2.2	97.8	2.7	97.3

Tableau 4 Résultats PERMIT: Résumé des statistiques de régression entre les données pluviométriques obtenues pour les principales stations synoptiques du Sahel occidental et leur équivalent satellitaire.

Période	Coefficient de corrélation	Valeur du R ²
1-10 juillet	0.61	36.7%
11-20 juillet	0.66	43.5%
21-31 juillet	0.57	32.2%
1-10 août	0.64	40.8%
11-20 août	0.50	24.5%
21-31 août	0.66	44.0%

Tableau 5 Relation entre la durée de la couverture en nuages à sommet froid ($<-60^{\circ}\text{C}$) et pluviosité, pour 100 stations au Niger en juillet 1985 (n est le nombre de stations dans chaque catégorie)

Durée de couverture moyenne (heure)	n	Pluviosité		
		Médiane (mm)	quartile inférieur (mm)	quartile supérieure (mm)
0	4	7	1	14
0.5 à 4.5	4	16	5	27
5.0 à 9.5	4	40	12	65
10.0 à 19.5	43	85	53	115
20.0 à 29.5	43	90	64	117
>30	11	100	83	119

Tableau 6 Comparaison entre le taux de croissance des images et la pluviosité, pour les stations synoptiques du Niger en 1985

Taux de croissance ($\text{km}^2 \text{ hr}^{-1}$)	Pluviosité (mm)		
	0 à 0.1	0.1 à 10	10 à 100
-10^5 à -10^4	5 (71%)	0 (0%)	2 (29%)
-10^4 à -10^3	5 (71%)	1 (14%)	1 (14%)
-10^3 à 10^3	18 (90%)	1 (5%)	1 (5%)
10^3 à 10^4	7 (37%)	6 (32%)	6 (32%)
10^4 à 10^5	2 (14%)	6 (43%)	6 (43%)

Estimations pluviométriques quotidiennes

A nouveau, on envisage deux méthodes:

L'Université de Bristol a utilisé sa méthode BIAS pour produire - à titre d'exemple - les estimations pluviométriques pour une journée particulière de juillet 1985. La méthode BIAS a déjà été employée extensivement dans le cas d'autres continents. Elle consiste en une procédure interactive dans laquelle un analyste expérimenté interprète la situation nuageuse. Sur base de cette analyse, il estime la pluviosité, en prenant également compte de différents paramètres géographiques et climatologiques. Ce système intègre toutes les données synoptiques disponibles en vue de calibrer au mieux les estimations; il peut aussi fonctionner en l'absence de vérités-terrain.

Les résultats de cette technique, pour une journée isolée, ont montré une correspondance encourageante entre valeurs estimées et mesurées, bien que la haute variabilité spatiale des précipitations, surtout par rapport à la résolution de l'imagerie satellitaire, soit de nouveau apparente.

La deuxième approche considère la structure et la dynamique des zones actives d'une ligne de grains. Les variables reprises dans un tel modèle sont:

- a) la présence de nuages froids
- b) le taux de croissance des nuages
- c) le gradient horizontal de température en bordure des nuages.

Les images Meteosat successives sont utilisées pour déterminer le taux de croissance et le gradient de température. Le tableau 6 montre la tendance des fortes pluies à être associée aux taux de croissance élevés. On illustre de même l'influence du gradient de température. Cependant, il n'est pas possible, à ce stade, de développer un modèle général liant pluviométrie et dynamique nuageuse. Des études similaires, sur un nombre plus élevé de données, sont encore nécessaires pour la mise au point définitive du modèle.

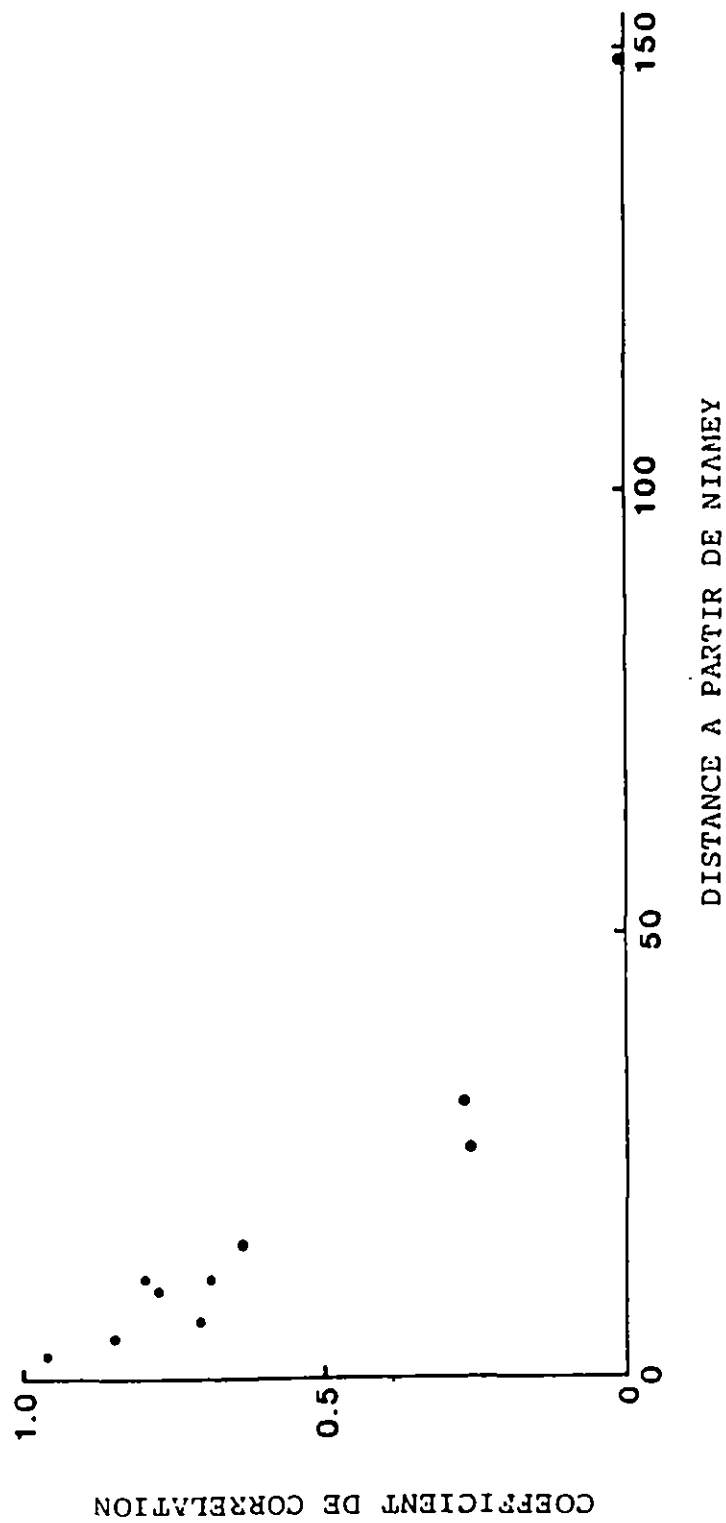


Figure 2 Variation de la corrélation de la pluviométrie observée (pour les orages convectifs à grande échelle) avec celle mesurée à Niamey en fonction de la distance par rapport à Niamey.

Variabilité spatiale de la pluviosité

La pluviosité, dans un orage moyen considéré individuellement, varie rapidement dans l'espace, en fonction de l'éloignement et de la fluctuation des cellules orageuses actives (voir fig. 2). Par conséquent, en ce qui concerne les événements pluvieux considérés séparément, un relevé pluviométrique isolé donnera une représentation tronquée de la pluviosité réelle sur une surface plus importante, par exemple, celle d'un pixel.

En vue de mesurer cette variabilité, on a réalisé une expérience en République du Niger, dans une région à pluviométrie moyenne de quelque 350 mm. Un réseau de 36 pluviomètres a été installé, selon une maille de 2 X 2 kms et sur une surface totale de 10 X 10 kms. Les relevés pluviométriques totaux (pour juillet et août 1985) variaient de plus du simple au double, concrètement de 128 à 273 mm (valeur moyenne: 215 mm).

Tableau 7 Médiane et quartiles inférieur et supérieur de groupes de pluies à Ibecetene (1985). Chaque groupe correspond à deux ou trois pluies apparues au cours de périodes de 10 jours en juillet et août 1985

Pluviosité		
Médiane (mm)	Quartile inférieur (mm)	Quartile supérieur (mm)
5	3	11
17	12	22
50	35	62
100	61	117

Le tableau 7 présente une analyse de la variabilité pluviométrique à l'intérieur de ce réseau (résultats acquis sur une seule saison). Il suggère que la plus grande partie de la gamme inter-

quartile d'estimation pluviométrique à partir de la durée de couverture nuageuse (tableau 5) apparaît bien dans les mesures de terrain correspondantes. En d'autres mots, les estimations pluviométriques satellitaires - pour des périodes de 10 jours et d'un mois - peuvent être meilleures que celles basées sur l'exploitation de n'importe quel réseau réaliste de pluviomètres.

Estimation de l'humidité du sol

Les études expérimentales ont montré que l'humidité de la frange supérieure des sols nus influençait le cycle journalier de leurs températures de surface. Sous ciel dégagé, les satellites détectent ce changement mais la mesure des radiances dans l'IR thermique est affectée par la traversée de l'atmosphère.

On a considéré des modèles de correction atmosphérique basés sur des mesures météorologiques routinières de la température de l'air et de l'humidité au sol. La température atmosphérique en mi-journée (mesurée par radiosonde) varie peu au cours de l'année. Si les corrections atmosphériques varient, ce sera donc en fonction des changements d'humidité de l'air. On a développé et testé le modèle d'humidité absolue suivant: en surface, on reprend la valeur mesurée au sol, puis décroissance selon un gradient de $- 1 \text{ gm kg}^{-1} \text{ km}^{-1}$ jusque 1500 m, puis décroissance exponentielle. Les corrections atmosphériques basées sur ce modèle d'humidité donnent une bonne approximation de la différence existant entre les mesures satellitaires de température de surface et celles de terrain (à 0.5 cm de profondeur).

Les effets de la variation spatiale de la pédologie et de l'humidité des sols ont également été considérés. En fin de compte, on montre qu'une méthode opérationnelle est réaliste en ce qui concerne l'estimation satellitaire de l'humidité des sols (20 cms supérieurs). On pourra utiliser cette méthode pour déterminer le début et la durée de la saison de croissance végétale, les périodes éventuelles de stress hydrique pouvant la limiter.

Cartographie de la végétation et estimation de la biomasse

L'étude a été menée sur un site de 25 X 25 kms près de Kao en République du Niger, au moyen de l'imagerie Landsat et des rele-

vés de terrain étalés d'octobre 1984 à septembre 1985. Bien que les méthodes opérationnelles devraient à l'avenir utiliser les données AVHRR-LAC (Local Area Coverage), on a dans un premier temps employé l'imagerie Landsat MSS pour minimiser les problèmes de cadrage sur le terrain et aussi parce que l'imagerie AVHRR-LAC n'était pas disponible en temps utile!

On a tout d'abord classé l'image selon un algorithme "maximum de vraisemblance". L'image résultante a été utilisée pour stratifier la zone d'étude et choisir des sites-tests représentatifs des grandes associations végétales présentes. On a de même montré que les deux facteurs déterminants dans la réponse spectrale des pixels étaient la pédologie et le taux de couverture herbacé.

Deux indices de végétation, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le PVI (Perpendicular Vegetation Index), ont été pressentis comme estimateurs satellitaires potentiels de la biomasse. Les relations spectrales de base entre sol et végétation ont été étudiées par radiométrie de terrain et au moyen des données Landsat. On a ainsi démontré la validité de l'approche par le PVI (figure 3).

Les données acquises au cours des relevés de végétation ont permis de calibrer et de tester les indices satellitaires de végétation. Le PVI s'est révélé être plus sensible que le NDVI dans le cas de biomasses faibles ($<100 \text{ kg ha}^{-1}$) (voir tableau 8 et figures 4,5) et être généralement bien corrélé aux biomasses herbeuses mesurées sur le terrain. Un ensemble de mesures de biomasse effectué indépendamment par le CIPEA-ILCA (Centre International pour l'Elevage en Afrique, International Livestock Commission for Africa) a permis de vérifier les estimations satellitaires de biomasse, avec des résultats encourageants (tableau 9)

Tableau 8 Comparaison des valeurs moyennes du NDVI (Normalized difference Vegetation Index) et du PVI (Perpendicular Vegetation Index) pour les différentes classes de couverture identifiées sur la zone d'étude de Kao

Classe de couverture	Réf. N°	NDVI	PVI (valeur numérique)
Latérite	1	0.049	0.2
Argile/latérite	2	0.072	0.4
Argile illuviale	3	0.073	-1.7
Sable	4	0.102	0.7
Savane arbustive dense	5	0.260	21.9
Savane sable latéritique	6	0.098	2.4
Savane moyennement dense	7	0.112	4.2
Savane peu dense	8	0.095	1.1
Savane très peu dense / steppe	9	0.099	1.5
Eau	10	0.228	16.3

Tableau 9 Erreurs entre biomasse herbeuse sèche estimée par satellite aux sites-tests ILCA (CIPEA) et celle mesurée entre le 26 août et le 3 septembre.

Site ILCA N°	Biomasse (kg ha ⁻¹)			% erreur	
	mesurée	PVI	NDVI ⁺	PVI	NDVI ⁺
2	5.5	6.6	6.3	20.0	14.5
3*	744.2	521.2	562.2	30.0	24.5
5	342.5	6.0	9.1	98.2	97.3
6	12.5	12.2	19.4	2.4	55.2
7	488.4	510.8	278.4	4.6	43.0
17	877.5	940.0	862.7	7.1	1.7
18	459.9	219.0	245.2	52.4	46.7

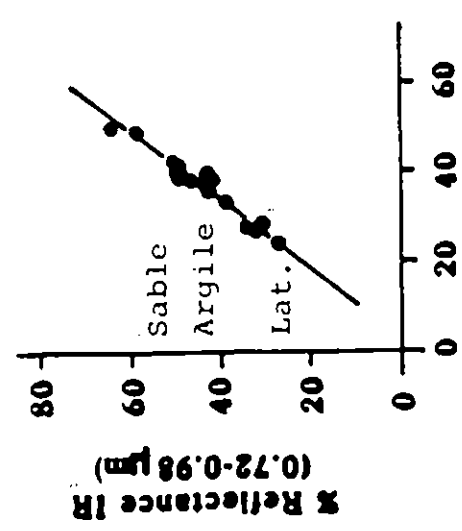
+ Régression au second degré

* Couverture nuageuse partielle du site

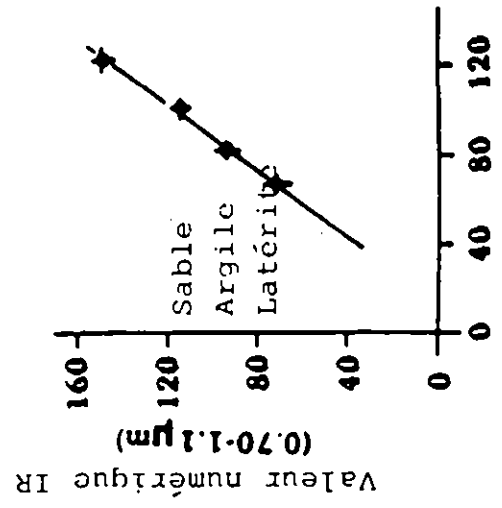
a) Radiomètre
 IR = 3.5 · 1.31R
 r² = 0.944 ..

b) Landsat MSS
 IR = 17.4 · 1.36R
 r² = 0.997 ..

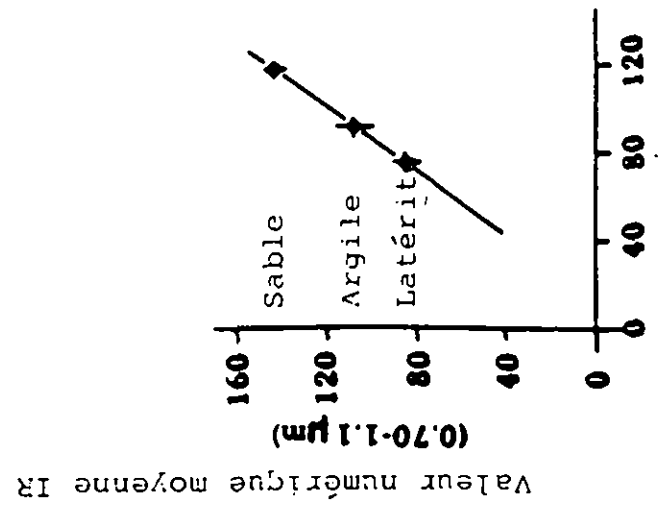
c) Données AVHRR-LAC simulées
 IR = 19.7 · 1.40R
 r² = 0.995 ..



% Réflectance R
 (0.62 - 0.68 μm)



Valeur numérique R
 (0.60 - 0.70 μm)



Valeur numérique moyenne R
 (0.60 - 0.70 μm)

Figure 3. Droite des sols obtenues à partir de a) radiométrie de terrain, b) Landsat MSS
 c) AVHRR (simulé)

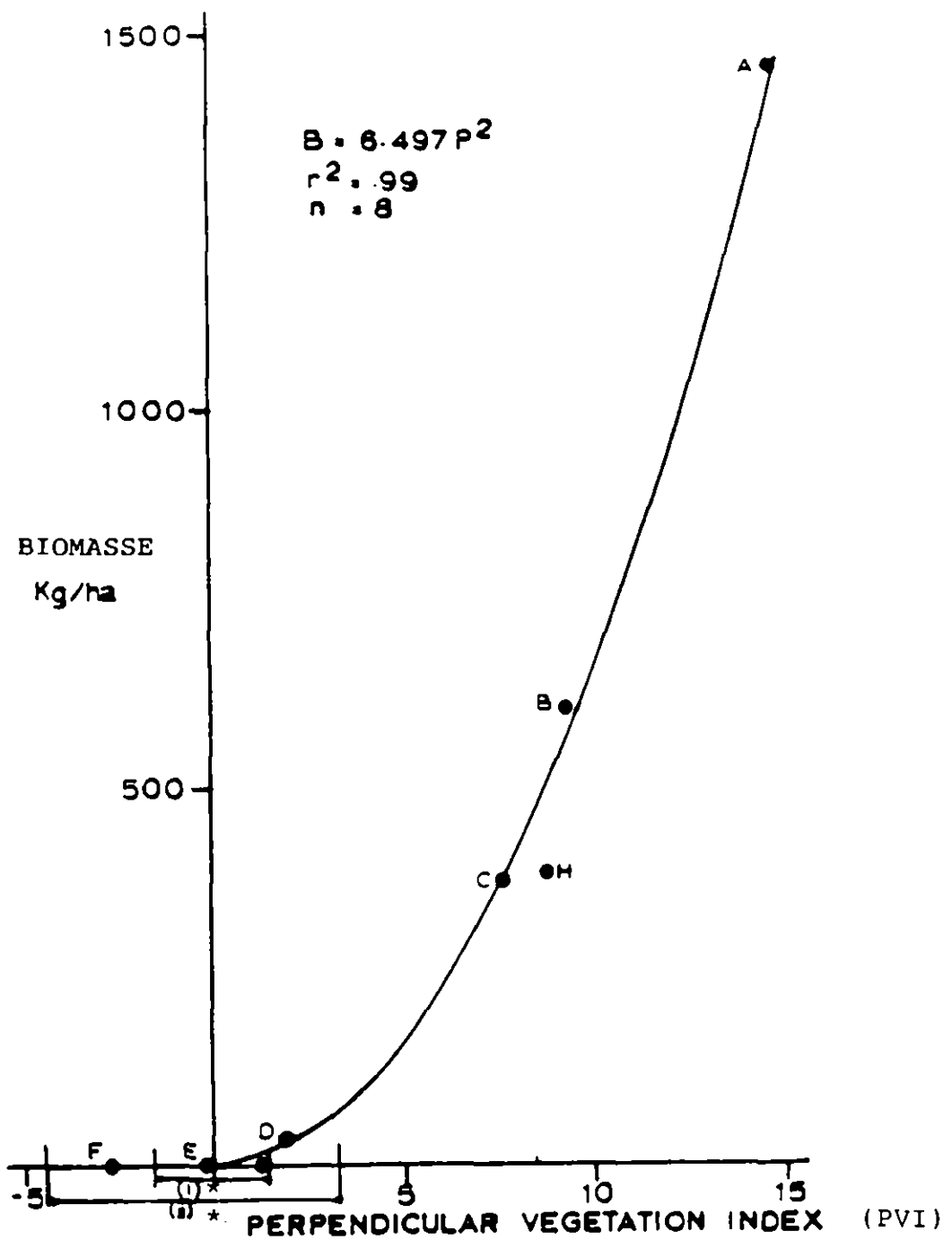


Figure 4 Courbe de corrélation pour l'estimation de la biomasse herbacée en fonction du PVI (Indice Perpendiculaire de Végétation)

= une erreur-standard de part et d'autre du PVI moyen d'un sol nu

ii = gamme des PVI observés pour les sols nus

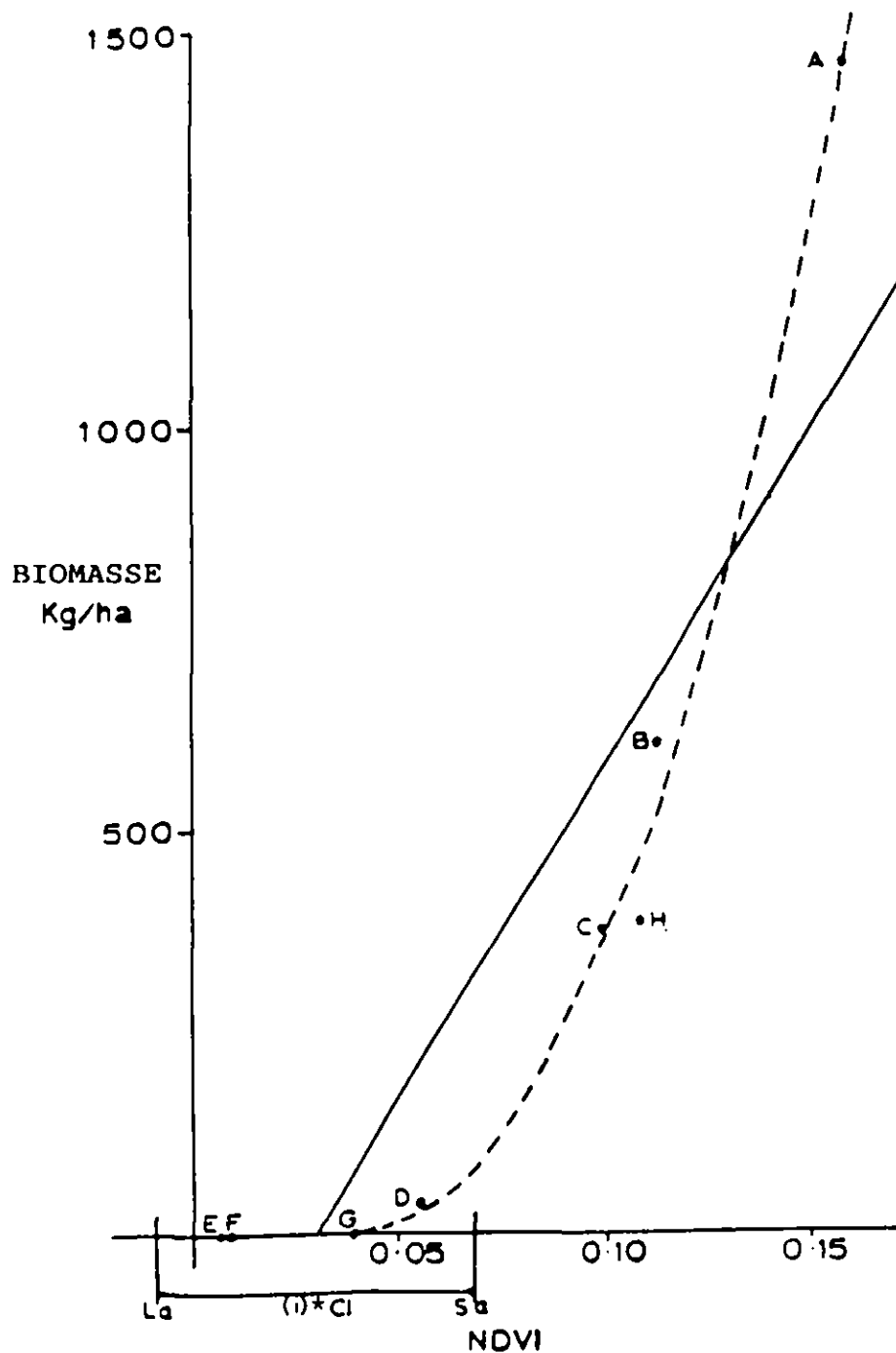


Figure 5. Courbe de corrélation pour l'estimation de la biomasse en fonction du NDVI (Normalized Difference Végétation Index)

= gamme des valeurs observées de NDVI pour 50 sites de sols nus. Il n'y a pas de tendance commune quant à la répartition à l'intérieur de cette gamme et les sigles déterminent la position des différents types de sols : la = latérite, cl = argile, sa = sable.

On a construit deux images par la transformation de l'espace bidimensionnel rouge/proche infra-rouge. Une image de la brillance des sols (SBI), donc indépendante des effets spectraux de la végétation, est obtenue par le simple examen de la brillance des pixels le long d'un axe parallèle à la droite des sols. Cette image correspond bien aux relevés pédologiques du terrain. Une seconde image considère cette fois la brillance des pixels le long d'un axe perpendiculaire à la droite des sols; c'est le PVI, elle est corrélée à la quantité de végétation, indépendamment du substrat.

En calibrant l'image PVI avec les données du tableau 4, on obtient une carte de la biomasse couvrant la zone de Kao. Elle correspond assez bien à la vérité-terrain. On construit avec succès une carte de brillance des sols et d'estimation de la biomasse pour l'ensemble de la scène Landsat MSS (185 kms X 185 kms), ce qui démontre la faisabilité de l'approche à grande échelle.

Enfin, l'imagerie Landsat a été dégradée dans sa définition spectrale et spatiale, en vue de simuler des données AVHRR-LAC (Local Area Coverage) des satellites de la NOAA. Ces données AVHRR simulées ont permis de calculer les indices de brillance exposés plus haut (PVI et SBI). Les résultats sont parfaitement comparables à ceux obtenus à partir de Landsat MSS; ils sont acquis maintenant sur base de données plus fréquentes et moins coûteuses.

CONCLUSIONS

On a développé avec succès des méthodes d'estimation de la couverture nuageuse et de la pluviométrie (pour des périodes de 10 et 30 jours, durant les mois de juillet et août 1985 en République du Niger). Les méthodes se basent sur l'étude des températures sommitales des nuages, mesurées par les senseurs IR thermiques du satellite géostationnaire Meteosat 2. Il faudrait, en vue de tester les méthodes par des données indépendantes et d'étendre les recherches à d'autres pays d'Afrique occidentale, pouvoir disposer d'information complémentaire et d'un temps de traitement correspondant.

On a formulé des méthodes d'estimation pluviométrique journalière. Elles demandent également des données et une période de traitement complémentaires pour développer les algorithmes, tester les résultats et les présenter sous une forme plus utile que celles des pixels (régions administratives, bassins de drainage, etc...).

Déterminer si les données moins fréquentes du satellite NOAA suffisent pour l'estimation de la pluviosité moyenne pour des périodes de 10 jours et d'un mois exige l'acquisition de données supplémentaires en Afrique occidentale ainsi que le financement de leur traitement.

Il en va de même pour les estimations d'humidité du sol si on veut les interpréter en termes utilisables pour l'agriculture. Rappelons cependant que l'on est déjà à même d'estimer l'humidité approximative des 20 cms superficiels des sols, à partir des seules données satellitaires et synoptiques.

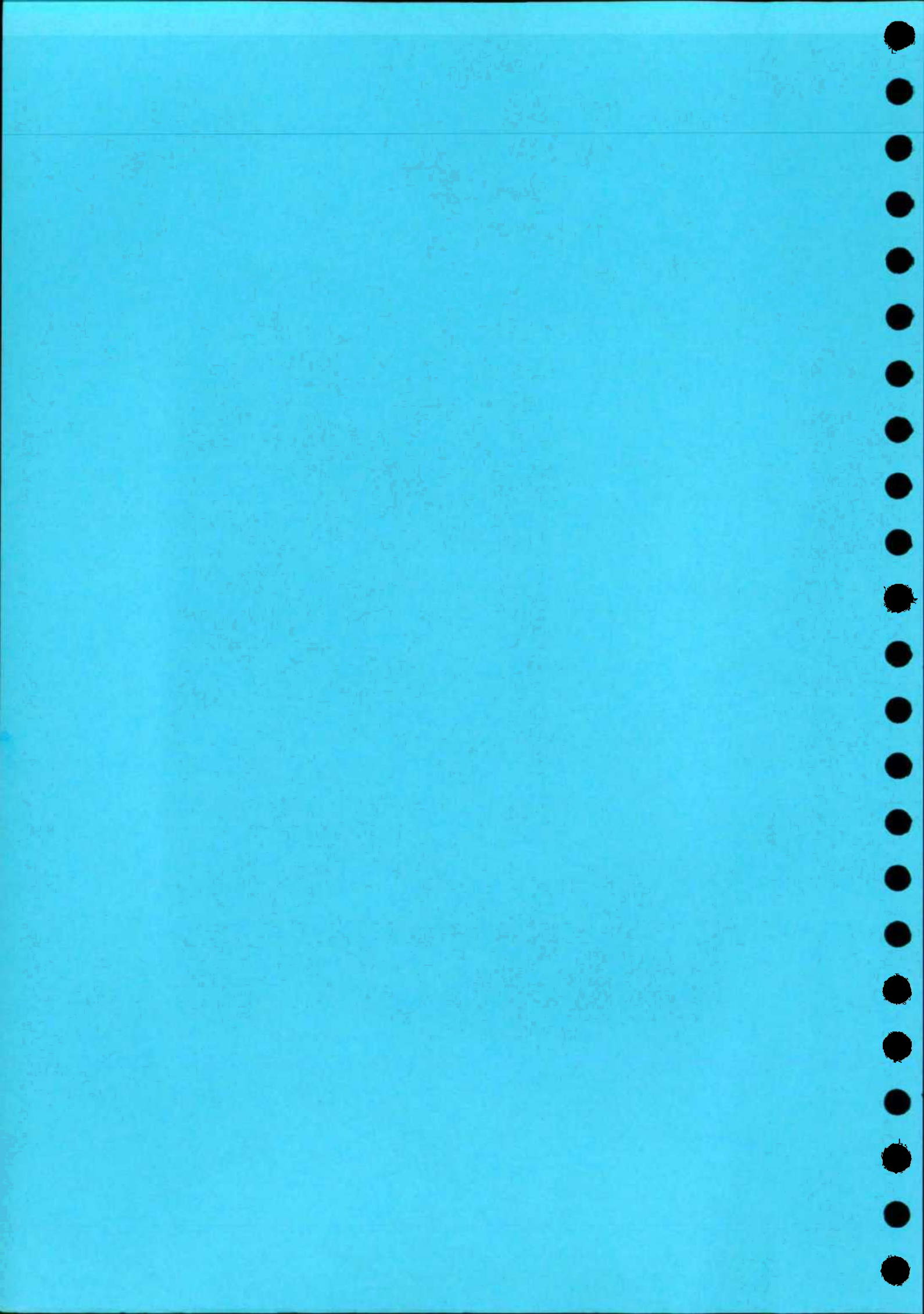
Les indices satellitaires de végétation peuvent être parfaitement calibrés par des mesures de terrain de biomasse et en servir d'estimateurs à une échelle adéquate pour la gestion des pâturages. Des développements seraient encore souhaitables pour montrer l'applicabilité de la méthode dans le cas du traitement de données NOAA AVHRR-LAC et pour évaluer les problèmes spécifiques de cette imagerie.

Dans le cadre d'une gestion opérationnelle des pâturages, les satellites à orbite polaire et basse, tels Landsat et Spot, ne peuvent garantir des données assez fréquentes. D'autre part, la résolution spatiale des satellites météorologiques empêche la calibration de leurs données sur le terrain. Un système optimal combinerait l'utilisation de données à haute résolution (mais à basse fréquence) dans un but de calibration et de données à haute fréquence (mais basse résolution) pour le travail routinier. L'emploi du NDVI en présence de végétation peu dense et d'arrière-fond pédologique variable peut conduire à des confusions, suite à l'influence spectrale de cet arrière-fond. Le PVI est plus fiable, on le préférera donc.

La mise sur pied d'un schéma opérationnel de suivi des écosystèmes pastoraux au Sahel exigerait:

- . la traduction de l'ensemble des procédures évoquées sous une forme opérationnelle.
- b. le développement d'un modèle de croissance fourragère en fonction des estimations satellitaires pluviométriques, de l'humidité du sol et de l'hydrologie locale.
- . le développement du logiciel correspondant ainsi que de sa notice explicative.

Il faudrait également, dans le cas de l'installation d'une cellule de travail en Afrique occidentale, prévoir la formation de scientifiques et d'informaticiens locaux, une documentation concernant les logiciels et une réserve de financement pour l'achat d'un micro-ordinateur adéquat.



COUVERTURE NUAGEUSE ET PRECIPITATIONS

AU SAHEL OCCIDENTAL

par

ERIC C. BARRETT

CLARE H. POWER

MICHAEL J. BEAUMONT

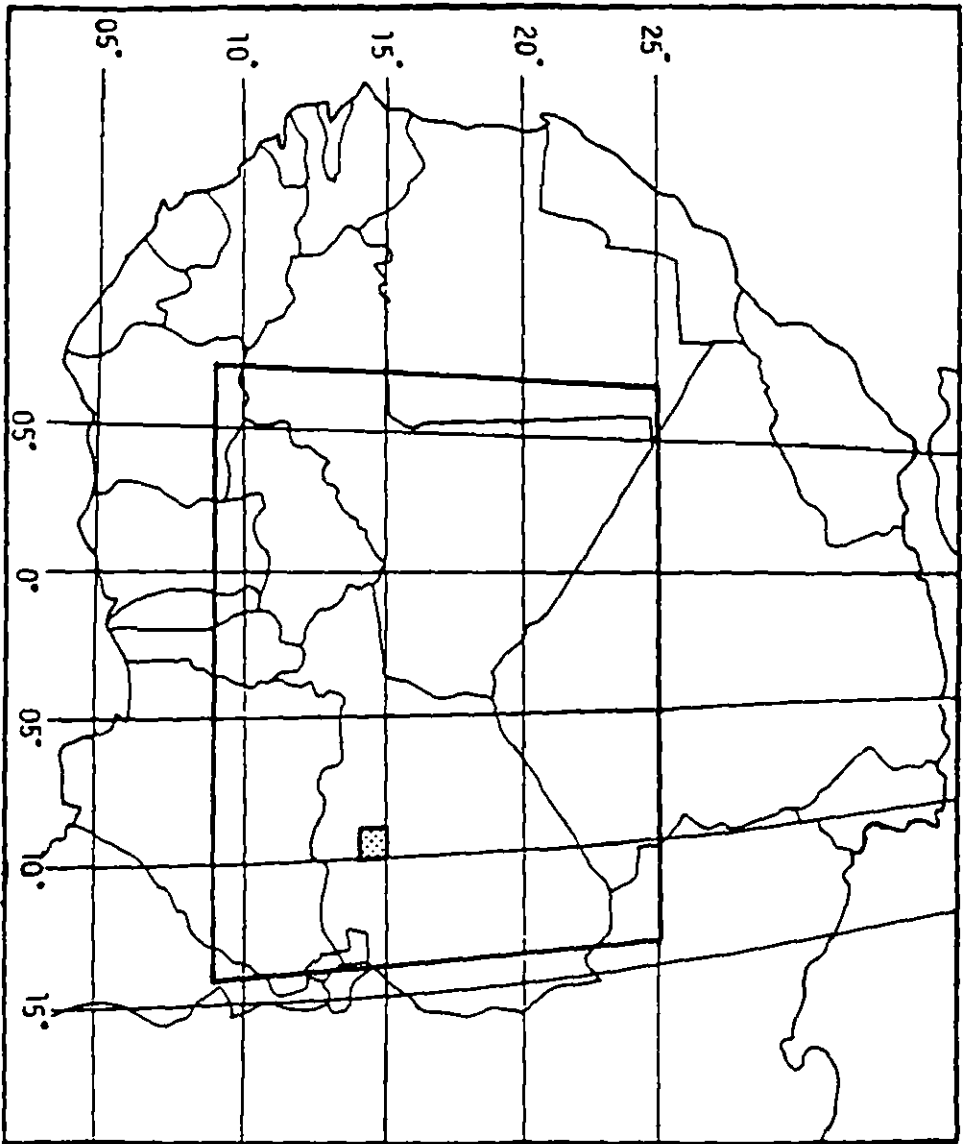
et

TIMOTHY S. RICHARDS

Remote Sensing Unit
Department of Geography
University of Bristol

SOMMAIRE

	Page
RESUME	
Introduction	
II Caractéristiques des précipitations au Sahel Occidental	
III Imagerie, équipement et méthodes préopératoires utilisés pour l'étude de 1985	
IV Evaluation de la couverture imageuse par télédétection	
1. Généralités	9
2. Méthode utilisée pour juillet/août 85	10
3. Résultats	15
Evaluation et cartographie de la pluviosité	37
1. Introduction	37
2. PERMIT: une procédure objective basée sur l'évaluation de la couverture nuageuse, résultats	41
3. BIAS: description d'une procédure interactive	48
VI Problèmes, solutions proposées, développements envisageables	82
VII Remerciements	86
VIII Bibliographie	87



Localisation de la zone d'étude au Sahel Occidental :
le carré en pointillé correspond à une partie de scène dont
les résultats du traitement sont détaillés échelle du pixel (voir pages 29 et 30)

RESUME

En tant que participant à l'étude internationale de télédétection financée par la Commission des Communautés Européennes et dont le sujet est le Sahel Occidental, l'Unité de Télédétection de l'Université de Bristol a voulu tester une méthode de suivi - par Meteosat - de la couverture nuageuse et de la pluviosité au-dessus de la région délimitée par $9^{\circ}16'$ et $25^{\circ}N$ et $7^{\circ}16'W$ et $13^{\circ}59'E$.

A partir de quatre enregistrements journaliers d'images IR Meteosat-2, on a établi une procédure qui différencie les régions couvertes par des nuages en haute, moyenne et basse altitudes ainsi que celles non couvertes et ceci en prenant les températures $241^{\circ}K$, $269^{\circ}K$ et $289,5^{\circ}K$ comme limites respectives des classes "Nuages hauts", "moyens" et "bas". On cartographie ensuite la couverture nuageuse et on en dérive certaines statistiques pour des périodes de 1, 10 et 31 jours. Cette procédure est reprise pour les différentes heures d'enregistrement (0330, 0900, 1500 et 2130Z) prises séparément.

Le suivi et l'évaluation des précipitations par télédétection sont nettement plus complexes qu'une simple estimation de la couverture nuageuse. En effet, on remarquera tout d'abord qu'une masse nuageuse hautement réfléchissante (froide) dans l'IR et/ou dans le visible n'est pas forcément génératrice de pluie. De plus, en milieu sec, les précipitations générées par les nuages n'atteignent pas toujours le sol. Enfin, la vérification des estimations satellitaires de la pluviosité est rendue difficile puisque - en l'absence de senseur météorologique radar - les vérités-terrain se rapportent à des mesures pluviométriques ponctuelles alors que les estimations satellitaires concernent des surfaces forcément aussi grandes que les pixels. Les vérités-terrain sont par ailleurs souvent incomplètes ou manquent de fiabilité d'une façon ou d'une autre.

Dans ce sous-projet, on a considéré jusqu'ici deux approches. Elles utilisent indifféremment les données des satellites géostationnaires et des satellites à orbite polaire.

Dans la première, appelée PERMIT, on transforme les statistiques de la classe "Nuages hauts" (statistiques obtenues lors de l'esti-

mation de la couverture nuageuse, voir supra) en estimations pluviométriques. On multiplie pour cela le nombre estimé de jours de pluie (nuages porteurs de pluie) d'après satellite par la pluviosité moyenne d'un jour de pluie ($R \text{ (rd)}^{-1}$), valeur cette fois obtenue à partir d'atlas climatologiques. On répète cette procédure pour chaque période de 10 ou de 31 jours.

On réalise alors une régression - pour les principaux points de relevés pluviométriques - entre les mesures en ces points et les estimations correspondantes obtenues à ce stade. La régression permet de calculer des coefficients de correction qui servent à cartographier au mieux la pluviosité, du moins son estimation, durant les mois de juillet et août 1985. Une technique bispectrale plus élaborée a précédemment été établie pour estimer la pluviosité à l'échelle du continent africain. On l'a modifié en vue de son application au cas particulier du Sahel Occidental, où les lignes de grains mobiles interviennent pour la majorité des précipitations.

Enfin, la méthode BIAS, une technique interactive à la fois applicable aux données des satellites géostationnaires et à orbite polaire, a été utilisée à titre de démonstration pour l'estimation de la pluviosité durant une journée donnée de juillet 85.

Les recommandations dans le cadre d'un travail futur visent surtout à améliorer le calcul des statistiques "Pluviosité moyenne par jour de pluie, en augmentant le volume de données, à contrôler au mieux la récolte des données au sol, à développer et à tester des méthodes plus poussées d'estimations satellitaires de la pluviométrie et, enfin, à concevoir et à réaliser une structure de contrôle des résultats, aussi bien en ce qui concerne ce travail que d'autres, à titre comparatif.

I. INTRODUCTION

Il est bien établi que la pluviosité au Sahel a diminué au cours de cette dernière moitié du XXe siècle. Bien qu'il n'y ait pas eu de tendance continue à la baisse ni un quelconque schéma global de variations pluviométriques, on constate que, pour une cinquantaine de stations sahéliennes, les valeurs pluviométriques mensuelles moyennes se sont situées au dessus de la moyenne de la période 1931-1969 durant les années 50 puis très nettement au-dessous durant les années 70. Depuis 1968, on a appelé cette pluviosité sans cesse décroissante "la sécheresse sub-saharienne" (Dennett et al. 1985)

Les pays sahéliens souffrent actuellement des répercussions de cette sécheresse et il semble dès lors approprié, si pas indispensable, de cerner les processus climatologiques et météorologiques liés à cette décroissance des pluies. On le fera en étudiant à la fois la cause immédiate (couverture nuageuse) et les conséquences les plus importantes (état de la couverture végétale, résultats agricoles, étendues des pâturages). La Commission des Communautés Européennes a dans ce but lancé un projet regroupant différents pays d'Europe Occidentale, dont le Royaume-Uni.

La contribution britannique, réalisée sous la direction du National Environment Research Council (NERC), est reprise sous le titre de "Suivi des Ecosystèmes de pâturages au Sahel et cartographie de la pluviosité et de la couverture nuageuse". Le présent travail en constitue une partie.

Le but de cette partie de l'étude est d'évaluer la faisabilité et la fiabilité de diverses méthodes utilisant les données satellitaires en vue de suivre l'évolution et de cartographier la couverture nuageuse, la pluviosité et la végétation au Sahel.

La contribution de l'Unité de Télédétection de l'Unité de Bristol reprend la partie concernant la couverture nuageuse et la répartition des pluies, et ce pour les deux mois de

l'année où la majorité des pluies prend place, soit juillet et août pour le Sahel.

Il est également prévu que l'Unité procède à une analyse de l'indice global NOAA de végétation et que différents développements en résulteraient. Cependant, au fur et à mesure de l'avancement du projet, d'autres instituts britanniques montrèrent un intérêt croissant en ce domaine et les données à haute résolution (LAC) que nous avions l'intention d'utiliser pour l'été 1985 n'étaient récemment pas encore distribuées par NOAA-NESDIS.

Par conséquent, il ne nous a pas semblé utile de déjà discuter cette activité dans le rapport présent.

II. LES CARACTERISTIQUES DES PLUIES AU SAHEL

Au Sahel Occidental, les mois de juillet et août sont habituellement les plus humides de l'année. La plus grande partie des pluies annuelles s'y concentrent. Durant cette période, le Front Inter Tropical (FIT) occupe en effet - du moins en Afrique de l'Ouest - la position la plus septentrionale au cours de sa fluctuation annuelle. Nourrie par des vents côtiers humides, en provenance de l'Atlantique, une situation d'air convectif instable se développe sur la région conduisant à des pluies violentes, organisées en systèmes structurés ou au contraire liées à des groupes de cumulonimbus isolés. Les systèmes organisés les plus fréquents sont les fameuses "lignes de grains d'Afrique Occidentale" dont on connaît maintenant la relation avec les ondes d'Est qui traversent régulièrement et à quelques jours d'intervalle la région en direction de l'Ouest. On montre que, dans certaines parties du Sahel Occidental, les lignes de grains interviennent pour plus des deux-tiers des précipitations en saison des pluies. Cependant, le long de la côte du Golfe de Guinée, l'influence des lignes de grains est faible, voire nulle, et les pluies locales s'apparentent à des crachins épais alimentés par des courants d'air côtier humide. Enfin, dans l'extrême Nord de la région étudiée, les pluies significatives sont associées à quelques tempêtes rares et dispersées.

Les plus hautes valeurs pluviométriques annuelles et estivales s'observent le long des côtes sud et sud-ouest de l'Afrique Occidentale. Cependant, on mesure ponctuellement quelques valeurs plus élevées encore à l'intérieur des terres, à cause de l'influence orographique de massifs tels que la Fouta Djallon dans le Nord-Ouest du Libéria et en Guinée. On retrouve cette influence du relief au niveau du plateau de Jos et des Monts Atacora au Togo. Au Nord du 10^e parallèle, le schéma de distribution des pluies devient beaucoup plus zonal (Ojo, 1977).

Globalement, les moyennes pluviométriques mensuelles et annuelles et celles du nombre de jours de pluie suivent ce mé-

me schéma de répartition précédemment décrit, soit des valeurs décroissantes depuis les côtes sud-ouest vers l'intérieur du continent.

A l'étude des différentes variables pluviométriques citées, on constate que les connaissances et les statistiques climatologiques deviennent de plus en plus floues et peu fiables au fur et à mesure que l'on se déplace des côtes méridionales vers les confins du Sahara. Alors qu'il n'est déjà pas facile d'obtenir des mesures pluviométriques fiables, ce type de données devient extrêmement rare lorsque l'on quitte les régions d'Afrique Occidentale les plus peuplées pour les zones à peuplement disséminé justement caractérisées par des événements pluvieux très variables et très localisés.

La mesure de la répartition des pluies se complique encore: alors que les pluies les plus importantes sont généralement observées en milieu d'après-midi ou en début de soirée (c'est-à-dire 14.00 à 18.00, temps local), il arrive que les conditions topographiques ou l'influence de certains vents perturbent complètement ce schéma et que la majorité des pluies s'observent la nuit ou au matin.

III IMAGERIE, MATERIEL ET PROCEDURES PRELIMINAIRES DE TRAITEMENT

En général, l'imagerie Meteosat est distribuée, sous forme brute, par l'Agence Spatiale Européenne. Dans notre cas, les données utilisées pour cette étude avaient déjà été enregistrées par A. Narracott du Département de Météorologie de l'Université de Reading.

Ces images étaient cependant présentées selon l'échelle des gris d'origine et géométriquement inversées. Il a donc été nécessaire de construire une imagerie négative de telle sorte que les nuages apparaissent dans les tons clairs et le sol en sombre. De même, on a utilisé les logiciels du I²S pour faire une rotation à 180° de l'imagerie, ceci dans le but de faciliter l'interprétation et la superposition d'un canevas géographique.

Enfin puisque les images ne correspondaient pas au format 512 X 512 pixels du I²S, il a été nécessaire de les y convertir avant d'éliminer toutes les zones non reprises dans la région de l'étude.

Si la majorité des traitements a été opérée sur le microordinateur PDP 11/44 de l'Unité de Télédétection, une partie des prétraitements et des calculs d'estimations pluviométriques a été effectuée sur un système Systeme 8750. Les résultats finaux sont obtenus soit sur une imprimante Epson F-100 soit à partir d'un enregistreur vidéo Ramtek 4000 couplé à l'écran du I²S.

IV ESTIMATION SATELLITAIRE DE LA COUVERTURE NUAGEUSE

1. GENERALITES

Les analyses (dites aussi "néphanalyses, ou encore étude des relevés et des cartes de la couverture nuageuse) et la cartographie de la couverture nuageuse étaient déjà des pratiques bien établies avant l'avènement du satellite (Harris, 1982). Cependant, avec l'arrivée des satellites météorologiques, les informations sont vite devenues très riches et complexes, à un point tel que la majorité des utilisateurs préféreraient pouvoir obtenir des cartes simplifiées de la situation atmosphérique!

Ces documents furent appelés néphanalyses satellitaires et remontent au début des années 60. (Bureau Météorologique US). Les propositions d'analyse plus poussée de la situation nuageuse furent avancées en 1975 par Barrett & Harris (en 1977) pour l'imagerie infra-rouge. Ces propositions recourraient toutes à une interprétation visuelle - humaine et subjective - de l'imagerie satellitaire et reposaient dès lors entièrement sur l'expérience et la compétence des analystes.

Plus récemment, on a commencé à s'intéresser à des méthodes objectives - basées sur l'utilisation de l'ordinateur - d'analyse de la couverture nuageuse, ainsi les procédures y gagneraient en vitesse d'exécution, en finesse et en objectivité. Ces méthodes sont plus facilement concevables dans le cas de la cartographie de la couverture nuageuse que dans celui de la distinction des types de nuages (Henderson-Sellers, 1984).

Un schéma détaillé de néphanalyse objective a été proposé par Shenk & Holub (1972) mais l'imagerie, visible et infra-rouge, ne détermine que de façon ambiguë les types de nuages lorsqu'on analyse les pixels pris séparément (on utilise la radiance et la température sommitale des nuages). Malheureusement, une étude tenant compte des pixels dans leur environnement - par exemple un étude texturale - est difficile à réaliser et conduit à une perte de résolution.

2. METHODE RETENUE POUR JUILLET-AOUT 1985

Au vu des remarques précédemment émises, on constate que notre travail se porte heureusement principalement sur la cartographie de la couverture nuageuse. Les nuages présents en Afrique Occidentale sont tout aussi opportunément peu variés, principalement des cumulus et des cumulo-nimbus. On observe cependant de même des nuages de type cirrus, généralement sous la forme de nuages convectifs à tête d'enclume, présentant de sérieux problèmes dans le cadre de notre étude. Ces nuages sont en effet fort réfléchissants dans le visible et l'infra-rouge et peuvent dès lors passer pour générateurs de pluie alors qu'ils n'en produisent pas ou que peu (Barrett & Grant, 1978; Lovejoy & Austin, 1979, Busting & Hardy, 1984).

L'objectif de cette étude est de produire toute une série d'estimations de la couverture nuageuse en Afrique Occidentale, pour des périodes de 10 et de 31 jours. On a utilisé à cette fin une méthode simple de "density slicing" (découpage en classes de radiance, selon des seuils choisis) d'après la relation bien établie entre la température et la brillance d'un nuage.

Notre but est de cartographier la couverture nuageuse au-dessus de la partie du Sahel Occidental comprise entre 9° et 25°N et 7°W et 14°E, et ce à partir de classifications produites en terme de "Nuages en haute atmosphère ou Nuages Hauts (NH)*", "Nuages en moyenne atmosphère ou moyens (NM)*" et "Nuages en basse atmosphère ou nuages bas (NB)*"

D'après cette classification, on définit les pourcentages de recouvrement des différents types de nuages et on cartographie la couverture nuageuse globale (par opposition aux zones de ciel dégagé*)

On a décidé d'appliquer ces traitements aux quatre enregistrements Meteosat quotidiens en l'occurrence 03.30, 09.00, 15.00 et 21.30Z.

* Par la suite, les abréviations NH, NM, NB, CC et CD désigneront respectivement les classes "Nuages hauts", "Nuages moyens", "Nuages bas", "Ciel couvert" et "Ciel dégagé".

Le choix de ces heures d'enregistrement reflète les caractéristiques du cycle météorologique journalier typique au Sahel et se rapproche des heures d'enregistrement des satellites météorologiques (à orbite polaire) NOAA (Ojo, 1977). Les résultats obtenus pour les quatre enregistrements quotidiens sont ensuite sommés et reclassifiés en vue d'obtenir une carte fusionnée unique, à l'échelle de la journée, distinguant zones jamais/au moins une fois couvertes par les nuages. On répète cette procédure pour des périodes de 10 jours, puis à l'échelle du mois. Il aurait également été possible de préparer des documents pour l'ensemble d'un mois (juillet ou août 1985) mais ne reprenant qu'un seul enregistrement quotidien (03.30, 09.00, 15.00 ou 21.40.2).

La figure 1 illustre la procédure suivie de cartographie de la couverture nuageuse. Puisque cette méthode se base sur la seule exploitation de l'imagerie IR, la question fondamentale repose sur la détermination de hauteurs typiques pour les classes NH, NM et NB* et des gammes de températures correspondantes, au Sahel, durant les mois de juillet et août. Notre choix s'est orienté en fonction de nombreuses références climatologiques, entre autres Ojo (1977), Barrett (1974), Goldie et al. (1958) et Griffiths (1972), de relevés par radiosondage en Afrique de l'Ouest, et d'après discussion avec l'équipe du "Foreign and Upper Air Enquiries" de l'Institut Météorologique britannique, à Bracknell.

Selon ces diverses sources, il ressort que, pour les tropiques, la limite la plus appropriée entre les classes NB et NM se situe au niveau des 500 mbar (5000m) et celle entre les classes NM et NH à quelques 300 mbar (9100m). Pour discriminer les classes NB et CD*, on a calculé la température minimale moyenne au niveau du sol en juillet et août à partir de relevés adéquats des températures pour l'Afrique Occidentale (Griffiths, 1972).

* Nuages "hauts", "moyens" et "bas" (rappel)

* Ciel dégagé (rappel)

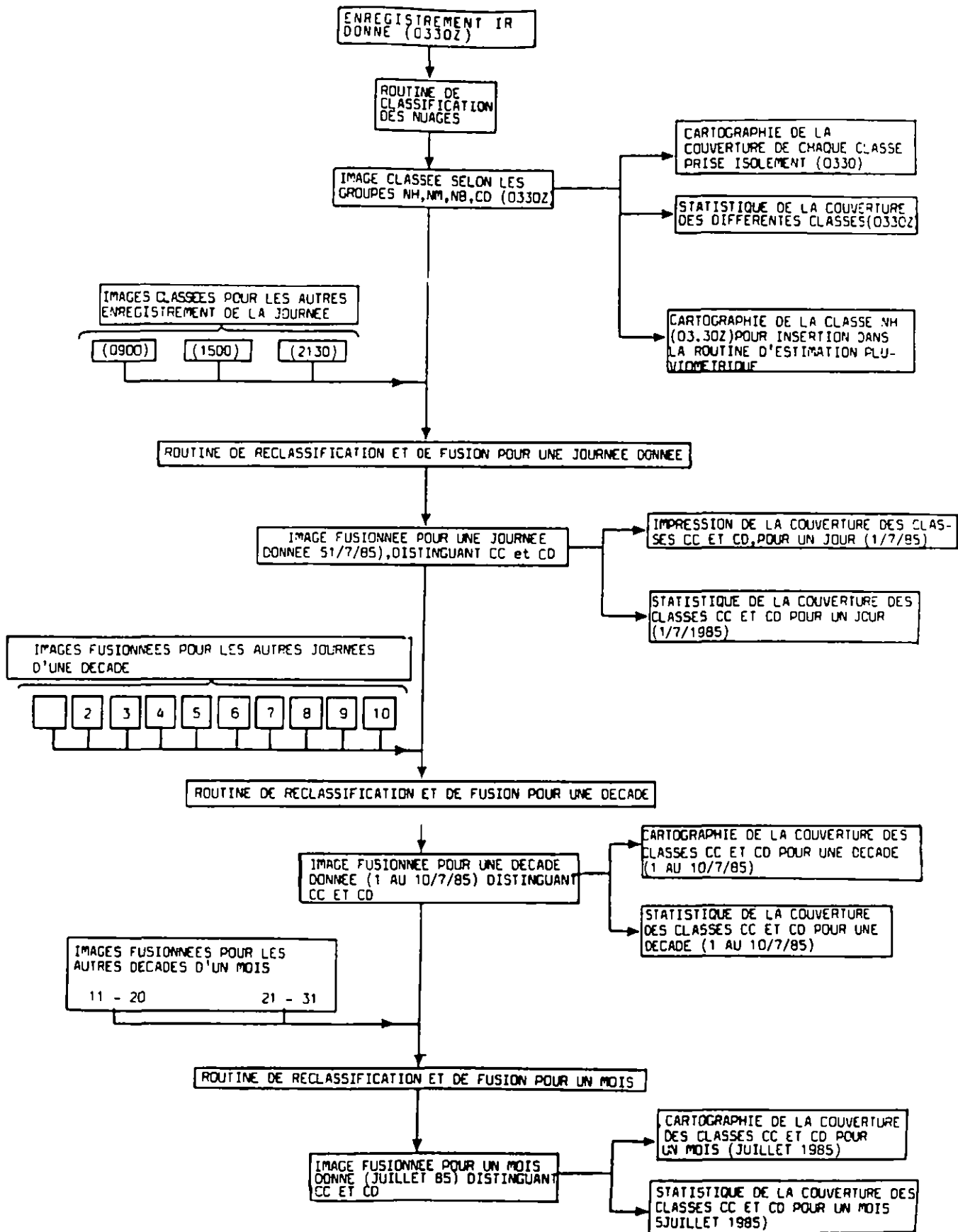


FIG.1. SCHEMA DETAILLE DE LA PROCEDURE DE CARTOGRAPHIE DE LA COUVERTURE NUAGEUSE.

Toute température supérieure à la valeur calculée est dès lors reliée à la classe CD, tout autre valeur se référant à une des trois classes nuageuses. Ayant établi les seuils - de température et de hauteur - des différentes classes nuageuses, il est nécessaire de convertir ces températures en valeurs de radiance. On a pour cela consulté le rapport n°13 déterminant le calibrage du satellite Meteosat 2 pour la période juillet-août 1985 (ESOC, 1985). Les températures des nuages, en kelvins, ont ainsi été converties en valeur de radiance, s'inscrivant des l'échelle des tons gris du système I²S 575, selon l'équation:

$$^{\circ}\text{K} = 99,312 \quad (\text{valeur numérique de radiance}) \quad 0,215$$

Les valeurs de gris résultantes ont été insérées dans le logiciel de classification et on les a utilisées, à titre de test, pour quelques images choisies parmi l'ensemble des données. La pratique a montré que la classe NB était souvent surreprésentée pour les enregistrements de 03.30Z, à cause de brouillards matinaux. Cette même classe était également surreprésentée aux autres heures dans les parties nord des enregistrements il s'agit vraisemblablement de la présence de vents de sable au-dessus du désert. On a considéré ces différents problèmes lors de la mise au point interactive de l'échelle des valeurs de gris, jusqu'à ce qu'on obtienne des classifications pleinement satisfaisantes.

Le tableau 1 montre les relations liant hauteur, pression, température et radiances retenues pour la cartographie de la couverture nuageuse. Les valeurs de gris correspondantes sont également reprises.

Le logiciel de traitement (voir fig. 1) a été conçu sous forme de routines destinées à cartographier la couverture nuageuse selon un density-slicing d'après certains seuils et à calculer les recouvrements des différentes classes obtenues. Le traitement est quasi-automatique sauf en ce qui concerne l'affichage des images et des fichiers et la copie des résultats sur disquettes ou CCT.

Tableau 1

Catégories de nuages et valeurs correspondantes de température, pression et de radiance IR Meteosat

Classe de nuage	Altitude moyenne de la base nuageuse	Pression moyenne à l'altitude de la base nuageuse	Gamme de température	Valeur de radiance sur imagerie Meteosat	Valeurs négatives sur I ² S
Température moyenne en surface (juillet/août)			289.5K	145+	109
Classe "nuages bas" (NB)	3,000m	700mb	268-289.5K	145	110
Classe "nuages moyens" (NM)	5,000m	500mb	267-242K	100	155
Classe "nuages hauts" (NH)	9,100m	inférieur	241K	63	192

On pourrait également insérer des commandes en vue d'obtenir des cartes d'une couverture nuageuse particulière, par exemple celles des classes nuageuses prises isolément (voir fig 2 (a) - (c)).

Les photographies ont été réalisées après un arrêt de la procédure automatique une fois la majorité des traitements déjà atteinte. On continue alors interactivement. Les scènes choisies peuvent être photographiées de l'écran I²S par un enregistreur vidéo Ramtek.

3. RESULTATS

Les résultats de l'analyse de la couverture nuageuse en juillet sont donnés à titre d'exemple aux figures 2, 3 et 4 et aux planches 1 (a) - (f). Elles illustrent les différents stades du traitement de l'imagerie IR. Les tableaux 2 à 5 résument certains de ces résultats sous forme quantitative. Le tableau 2 montre ainsi les pourcentages de couverture des différentes classes nuageuses, ainsi que leur couverture totale, pour un jour donné (1/7/85). La dernière colonne du tableau (extrême-droite) donne le pourcentage de la zone d'étude dont le ciel est resté tout le temps dégagé. Les tableaux 3 et 4 présentent les statistiques des classes CC et CD, les reconditionnements pour des périodes de 10 et 31 jours, durant les mois de juillet et d'août 1985.

Des cartes montrent la proportion "jours nuageux/jours sans nuages pour des périodes de 10 et 31 jours peuvent être calculées au départ des analyses quotidiennes. Elles n'ont pas été présentées ici.

Cependant, les figures 3 (a) - (d) illustrent des possibilités de reconditionnement distinguant zones jamais / au moins une fois couvertes par les nuages et ce pour les quatre enregistrements quotidiens traités séparément à l'échelle d'une décade ou d'un mois. Ce genre de cartes est fort utile pour étudier le cycle journalier de la couverture nuageuse et révéler ainsi les périodes où la pluie est le plus probable.

Enfin, la procédure de cartographie des nuages (voir fig. 1) pourrait encore générer bien d'autres types d'analyse CC/CD.

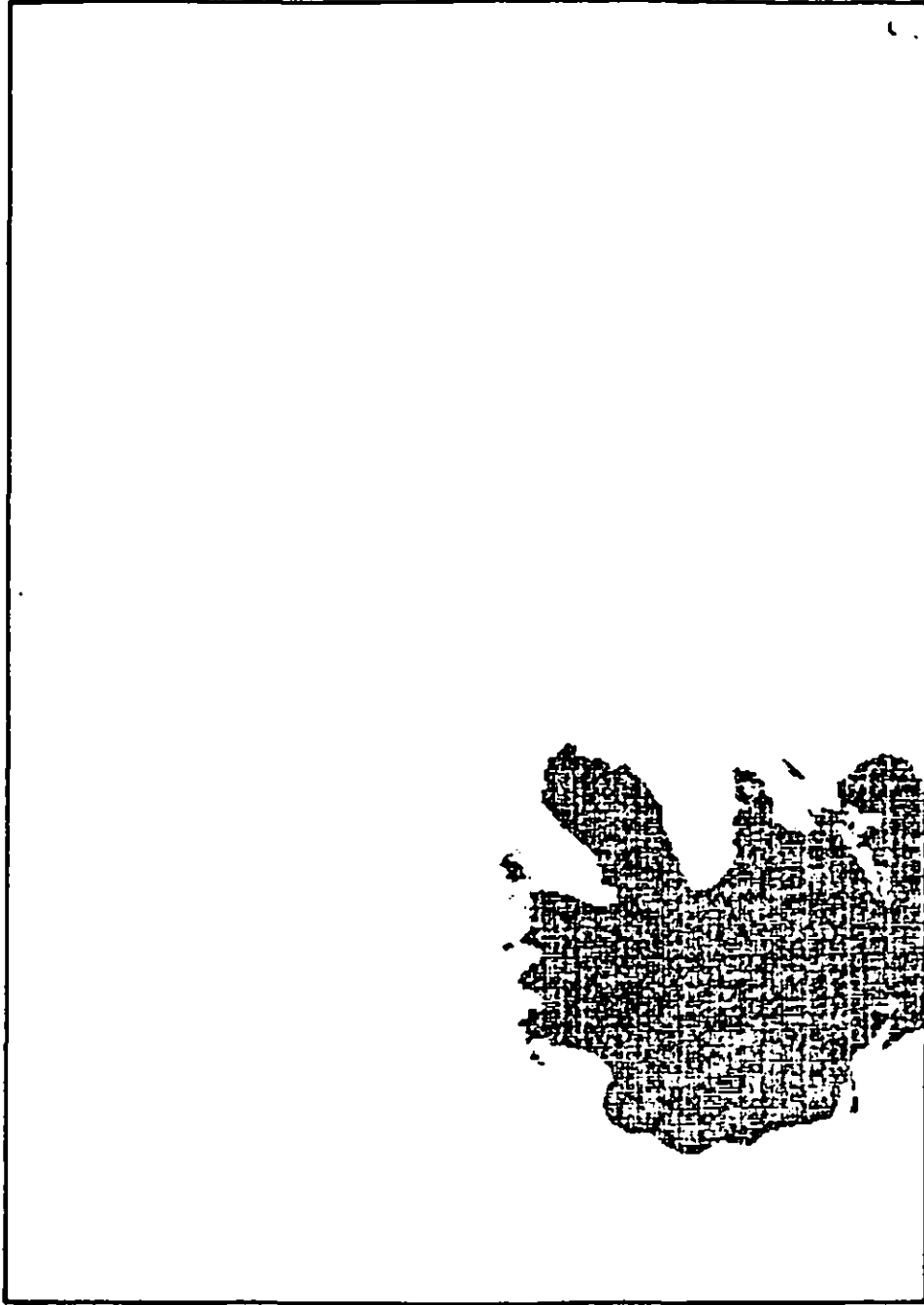


Figure 2 : Exemples de cartographie des types de nuages (1/7/1985)
Pour (a)-(c) les nuages sont représentés en noir, pour (d)-(h) en blanc.
2a: classe "Nuages hauts" (NH) (03.30Z)

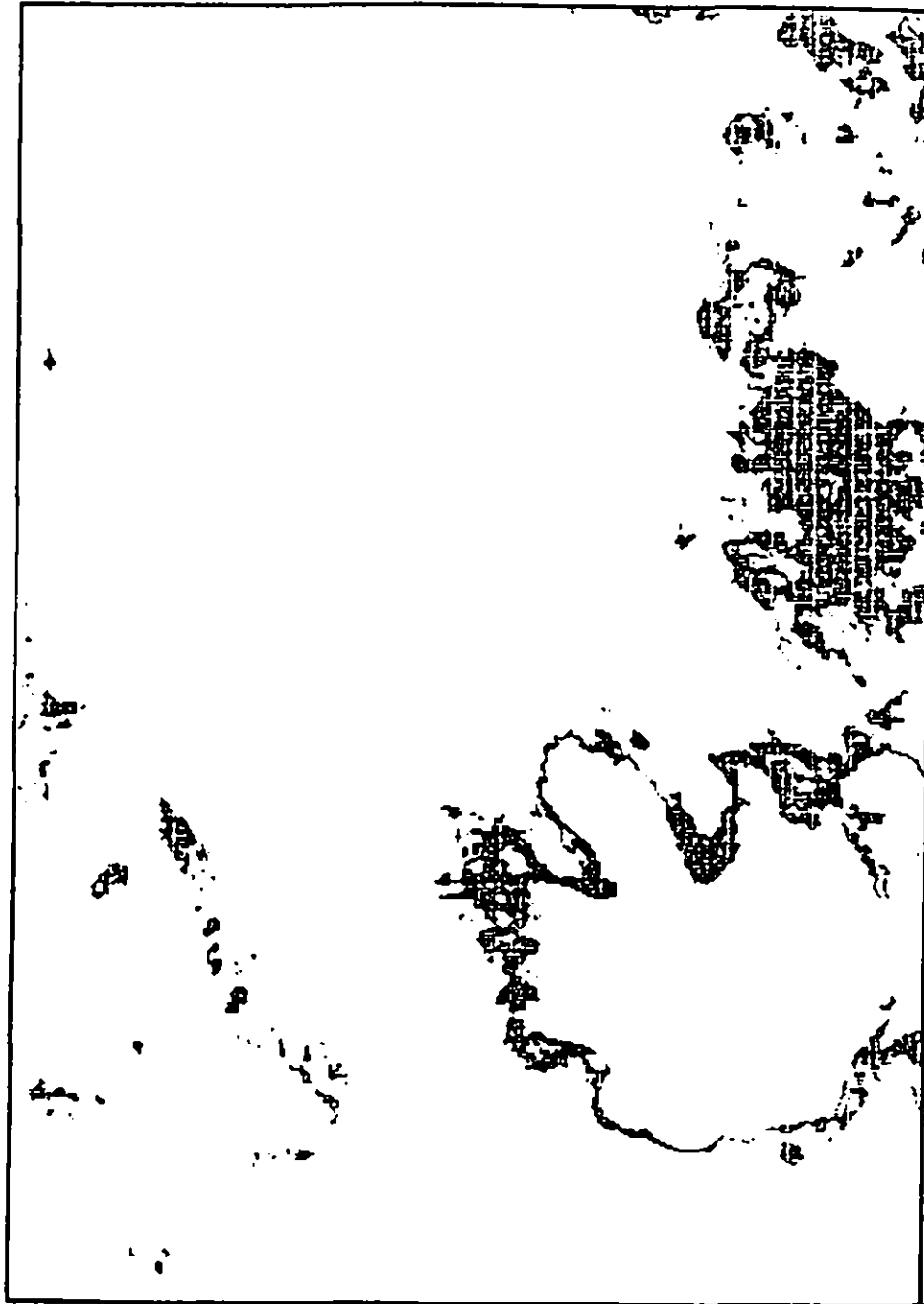


Figure 2b: classe "Nuages Moyens" (NM) (03,30 Z)



Figure 2c: classe "Nuages Bas" (NB) (03.30Z)

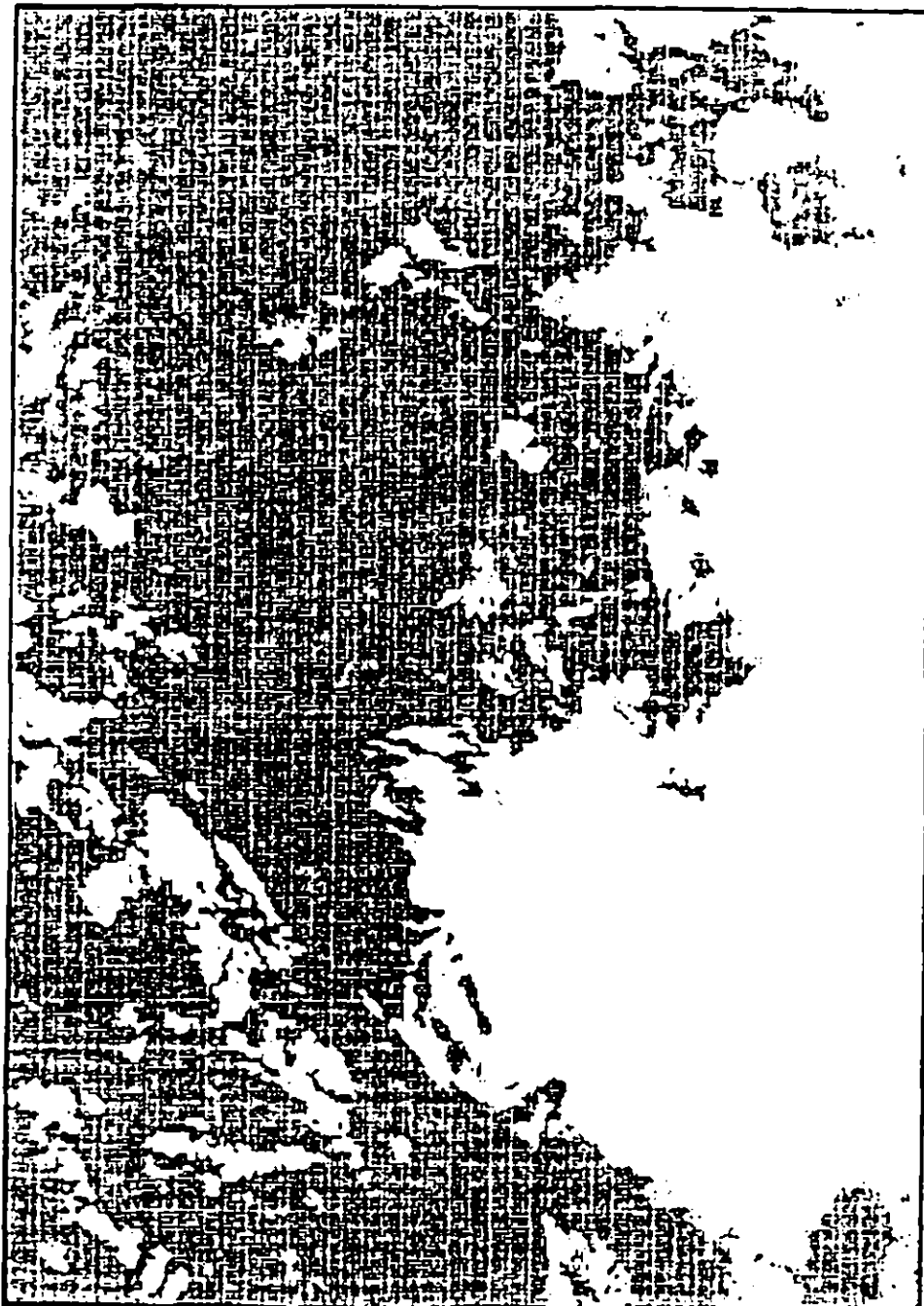


Figure 2d: classes "ciel couvert/ciel dégagé" (CC/CD) (03.30Z)



Figure 2e: classes CC/CD (09.00Z)

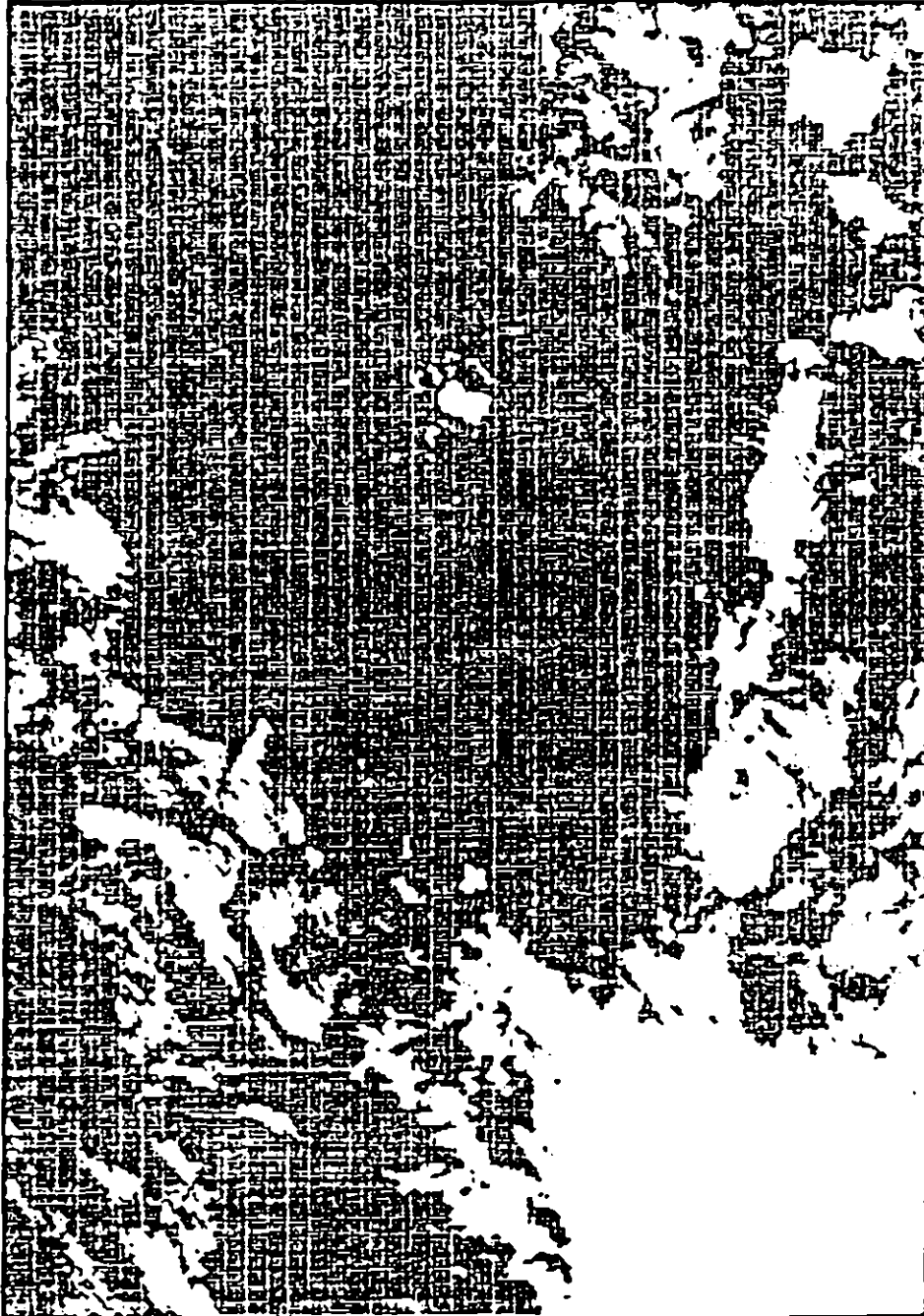


Figure 2f: classes CC/CD (15.00z)

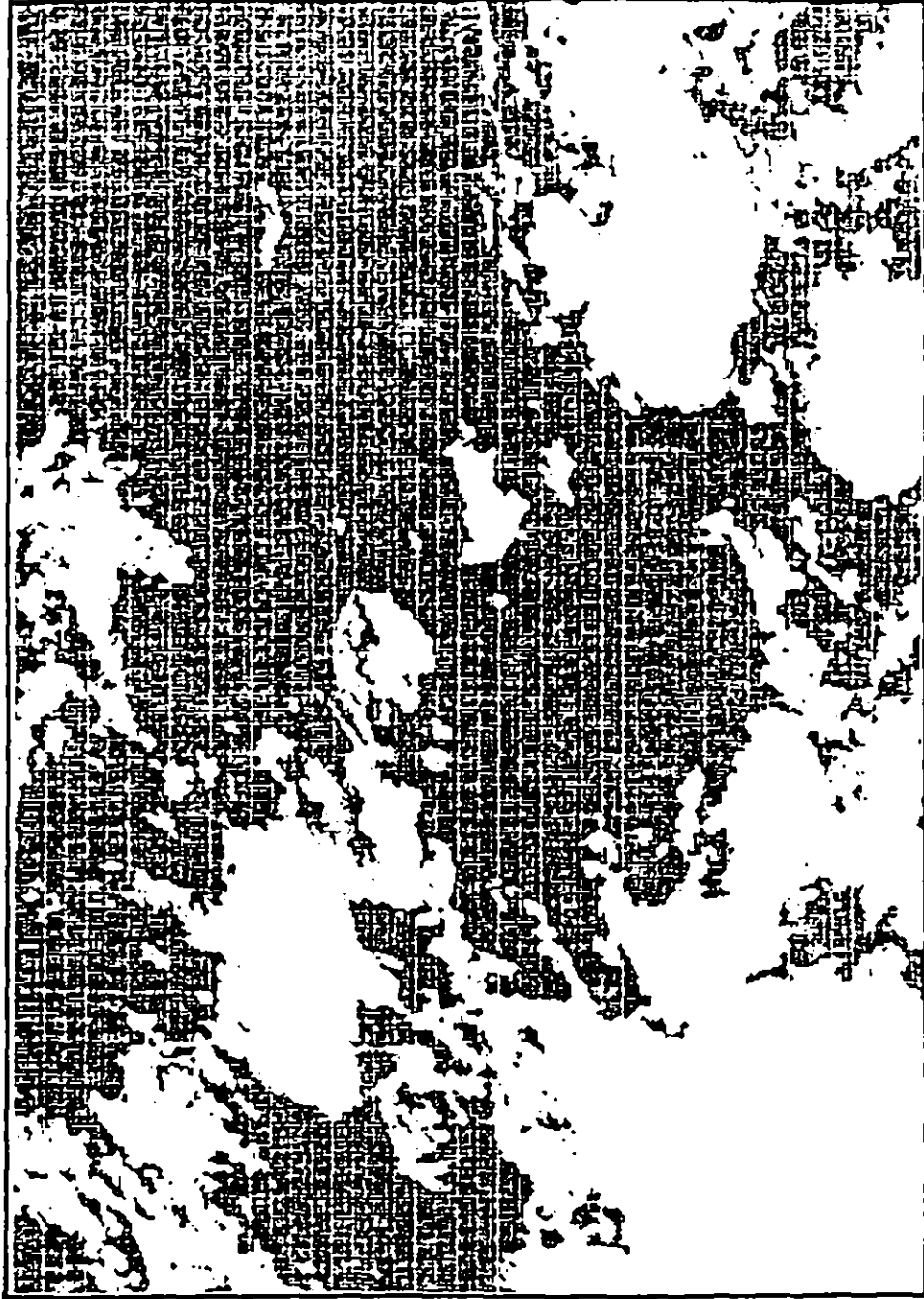


Figure 2g: classes CC/CD (21.30Z)

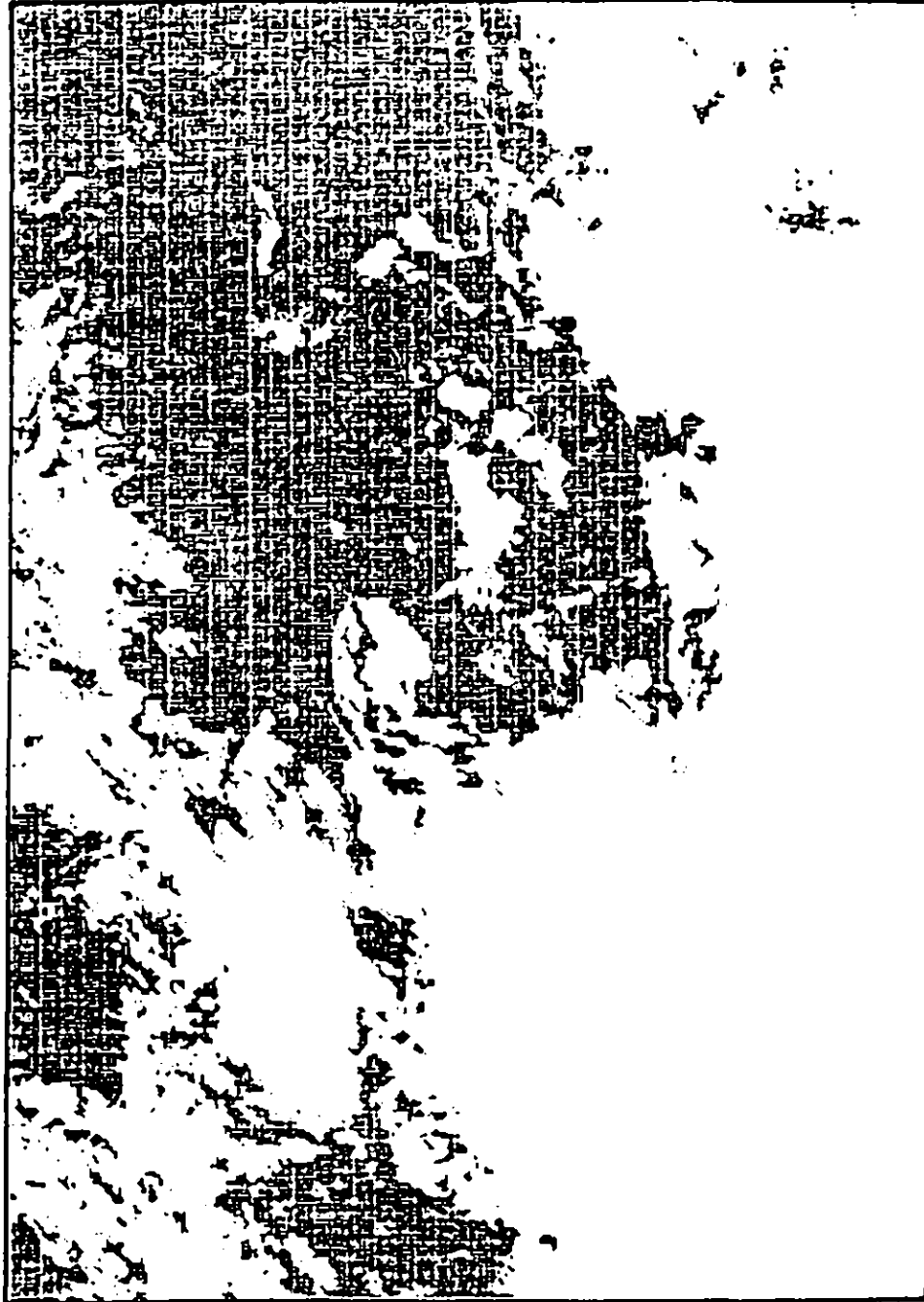


Figure 2h: image reclassifiée distinguant zone jamais/au moins une fois couverte par les nuages
(au cours du 1/7/1985)

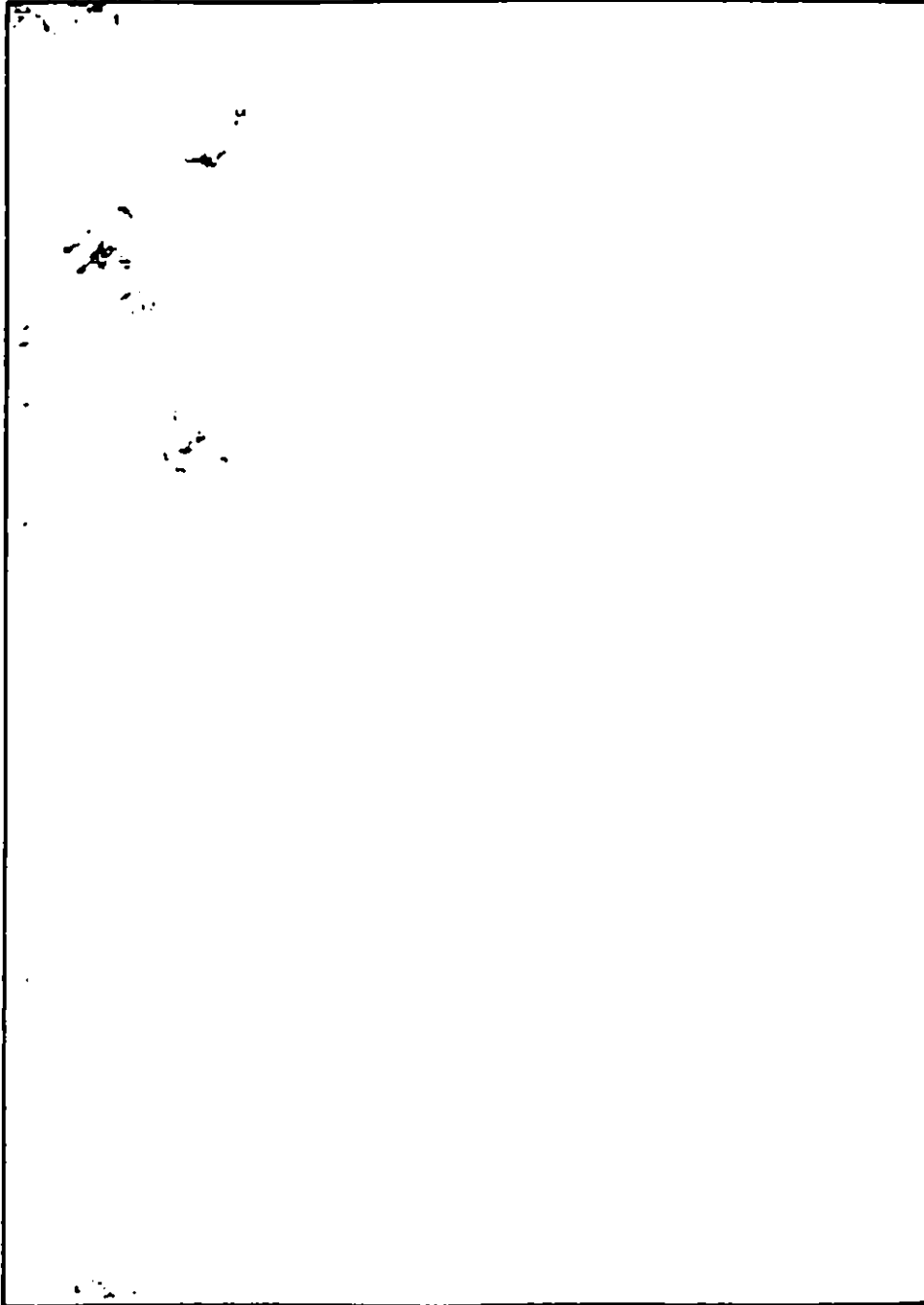


Figure 3: Images reconditionnées distinguant zone jamais/au moins une fois couvertes par les nuages en juillet 1985 (Les nuages sont codés en blanc)

3a: Pour les enregistrements de 03.30Z, ensemble du mois de juillet 85.

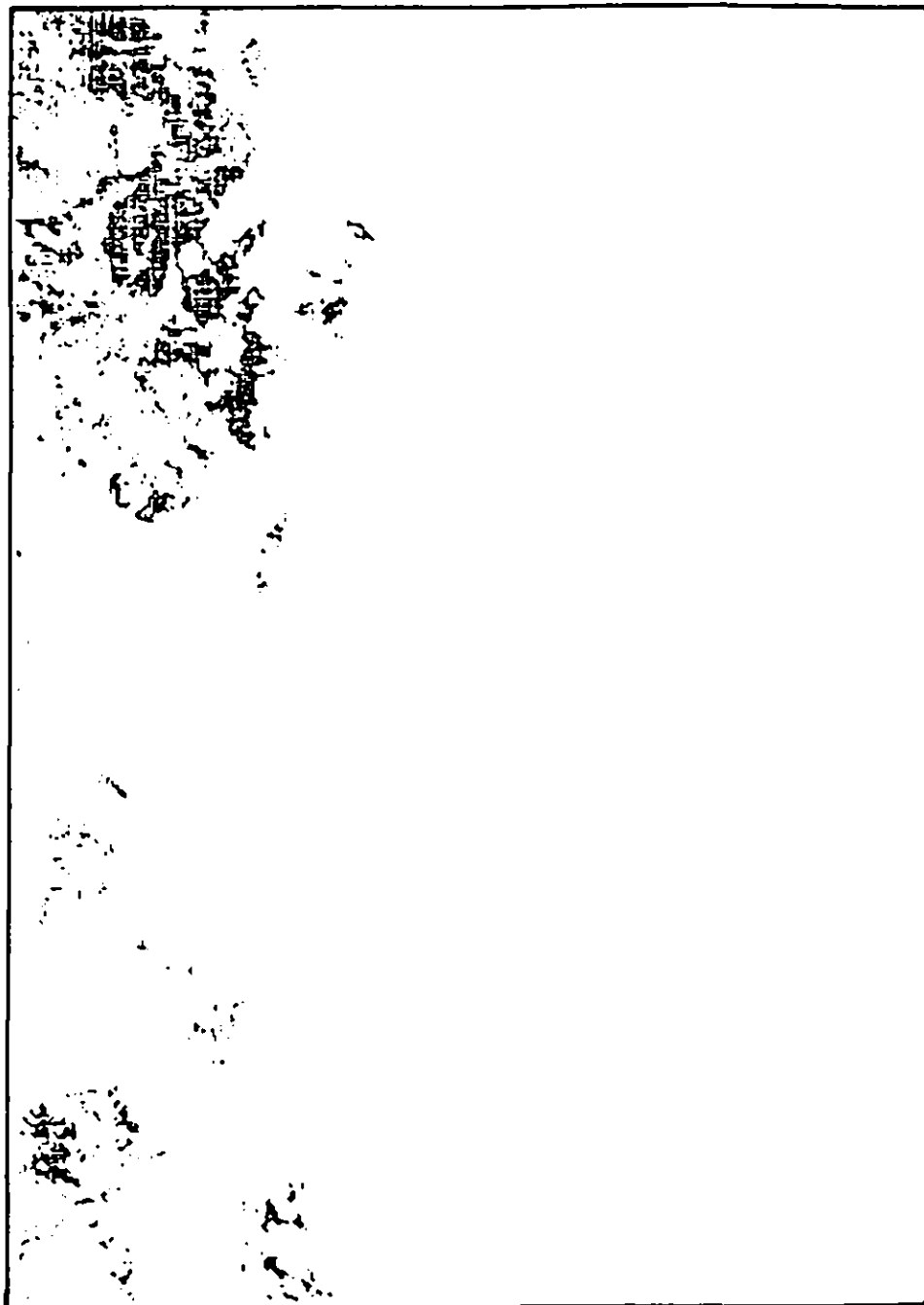


Figure 3b: pour les enregistrements de 15.002, ensemble du mois de juillet 85.

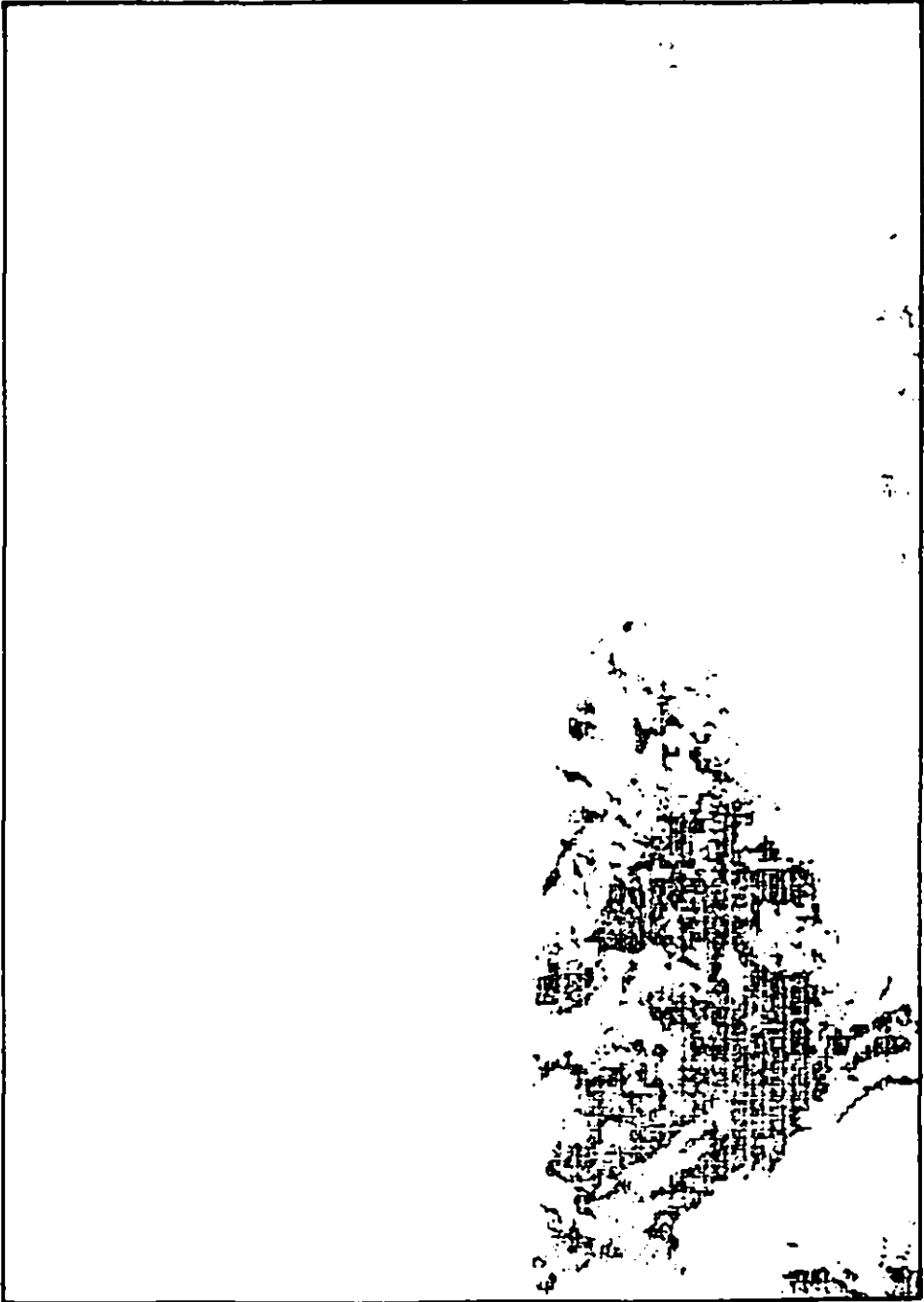


Figure 3c: pour la décade du 1-10 juillet.

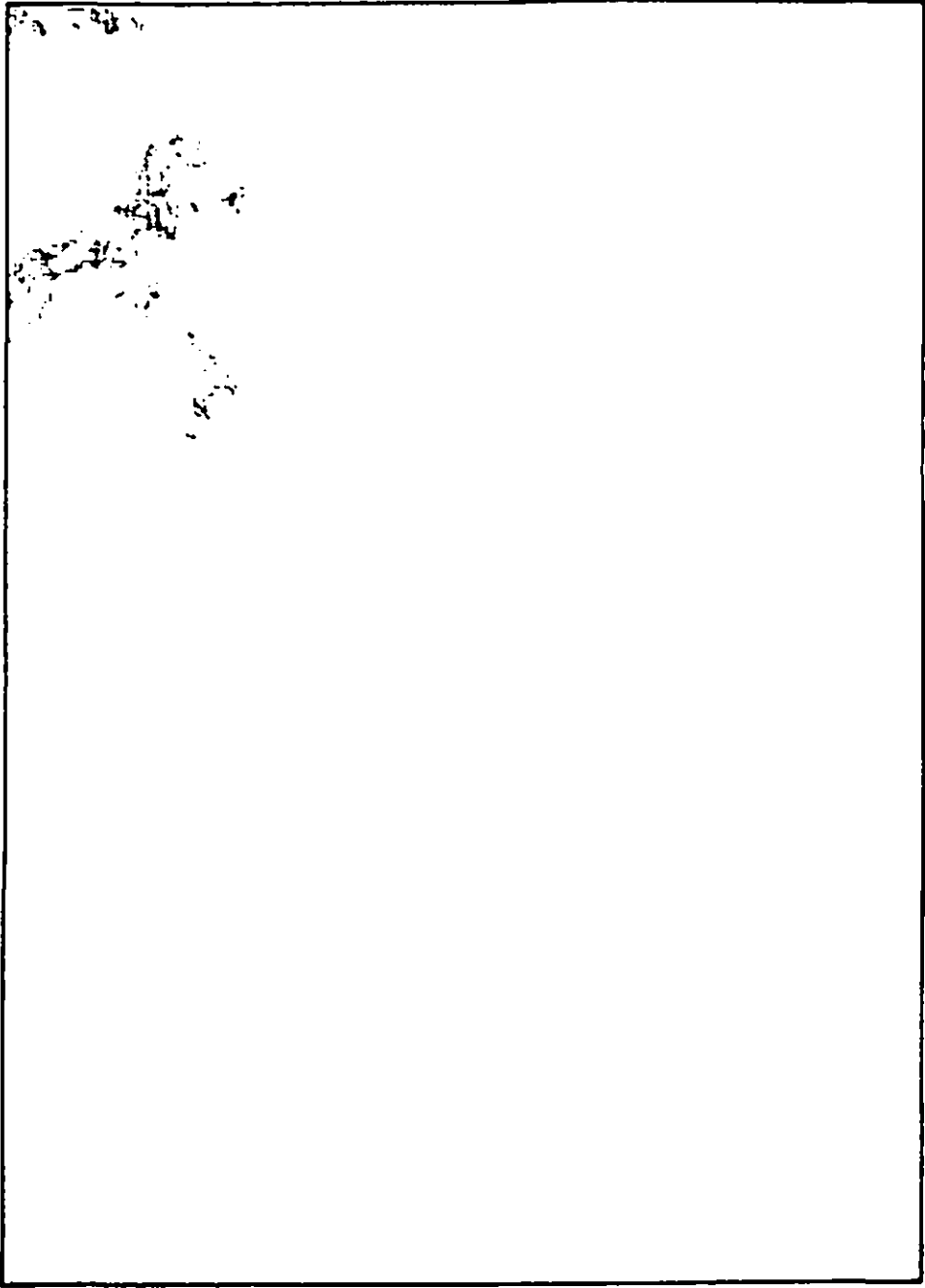


Figure 3d: pour la période du 1 au 31 juillet.

	394	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	
392	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	392
393	01	02	02	02	02	02	02	02	02	02	04	04	02	01	01	01	393
394				02	02	02	02	02	02	02	04	04	04	02		02	394
					02	02	02	02	04	04	04	04	02		02		395
396		02	04	04	04	04	04	04	04	04	04	04	04	02	02	02	396
397		04	04	04	04	02	02	04	04	04	04	04	04	02	02	02	397
398			02	04	04	04	04	04	04	04	02	02	04	02	02	02	398
				02	04	04	04	04	04	04	04	02	02	02	02		399
399	04	04	04	02	02	02	02	04	04	04	04	04	04	02	02	02	399
400	04	04	04	04	02	02	02	04	04	04	04	04	04	04	02	02	400
401	04	04	04	04	02	02	02	02	04	04	04	04	04	04	02	02	401
402			04	04	02	02	02	02	02	02	04	04	04	04	02	02	402
403		04	04	02	02	02	02	02	02	02	02	02	04	04	04	02	403
404	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	04	04	02	404
405					02	02	02	02					02	02	02	04	405
394	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411		

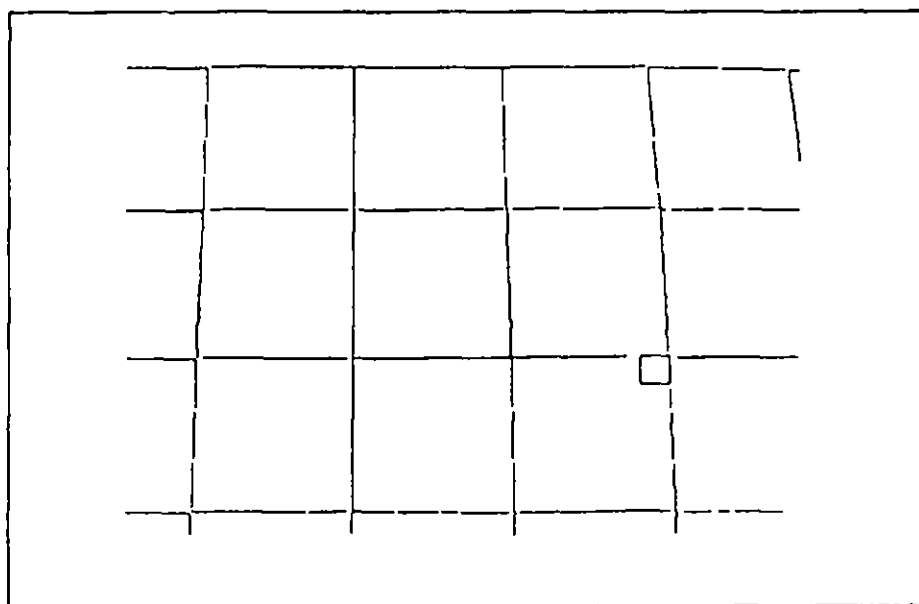


Figure 4a (haut) : Nombre de jours de pluie durant la décade du 1 au 10 juillet 85. Résultats présentés à l'échelle du pixel pour un échantillon de la zone d'étude.
 4b (bas) : Localisation de l'échantillon.

	394	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411		
392	01	01	01	01	01	01	01	01	01	21	21	00	00	00	00	00	392	
393	00	01	01	01	01	01	01	01	21	40	40	21	00	00	00	00	393	
394	01	11	21	21	21	31	31	31	21	40	40	40	31				394	
395							21	40	40	40							395	
396				10	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	21	396	
397		40	40	40	40	60	60	40	40	40	40	40	40	60	70	31	397	
398				40	40	40	40	40	40	21	21		70				398	
399													70	70			399	
400		10	40	21	21	21	21	40	40	40	40			70	70	70	400	
401	0	40	40	40	21	27	27	48	48	48	48	48	48	48	70	70	70	401
402	0	40		40	27	27	27	27	48	48	48	48	48	48	70	70	70	402
403				47	27	27	27	27	27	27	27	48	47	47	47	70	70	403
404						27	27	27	27	27	27					70	70	404
405				7	27	27	27	27	27	27	27			27	48	66	70	405
406				7	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	66	66	66	406
407								27	27	27	27				70	66	66	407

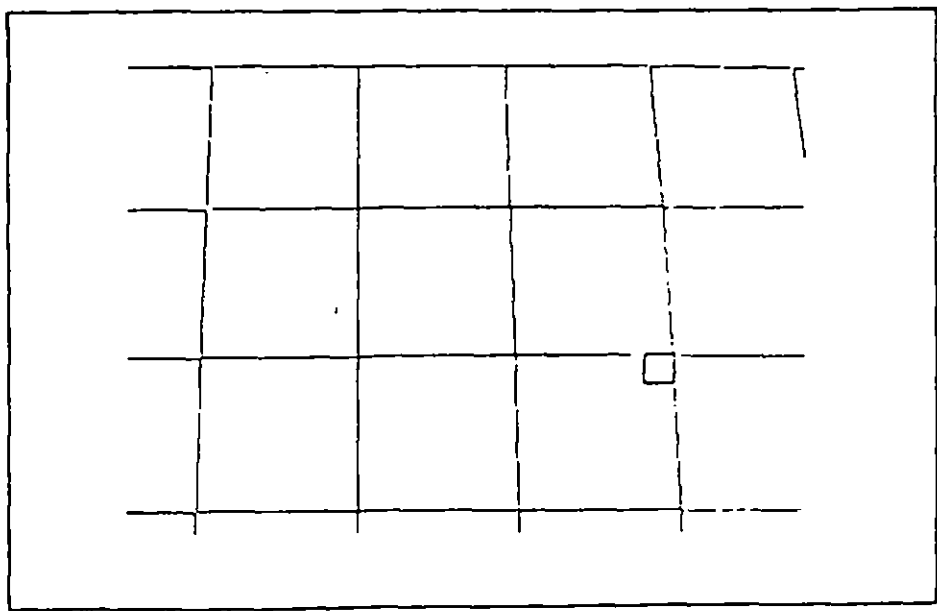


Figure 4c (haut) : Estimation de la pluviosité pour la décade du 1 au 10 juillet 85. Résultats présentés à l'échelle du pixel pour un échantillon de la zone d'étude.
 4d (bas) : Localisation de l'échantillon.

Planche 1 :

Exemples d'image de type nuageux (au 1/7/85, 03.30Z)
surimposés sur l'imagerie IR originale.

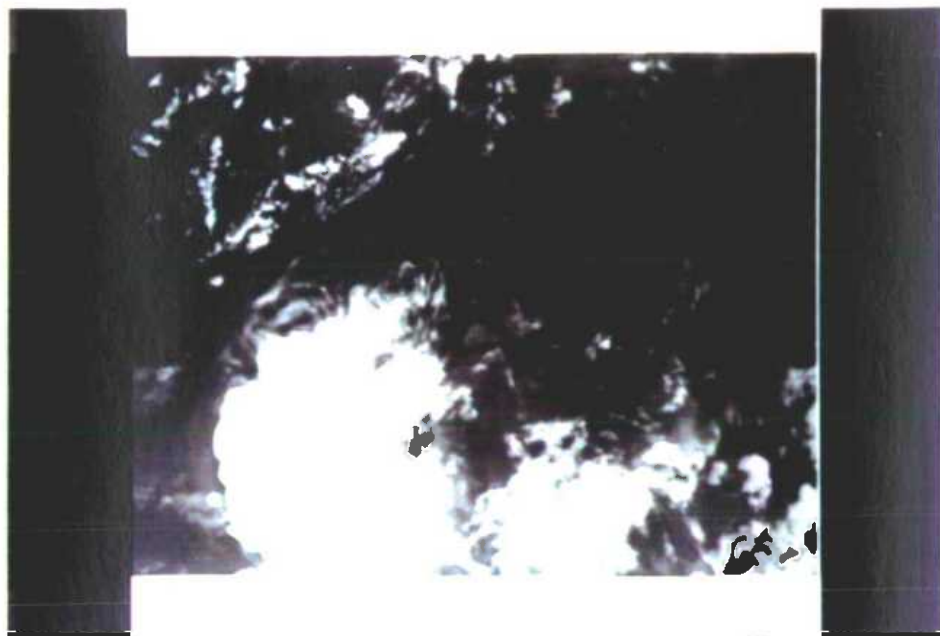


Planche 1a :

Image : IR Meteosat originale (1/7/85, 03.30Z)
utilisée pour la cartographie des nuages et les analyses PERMIT.

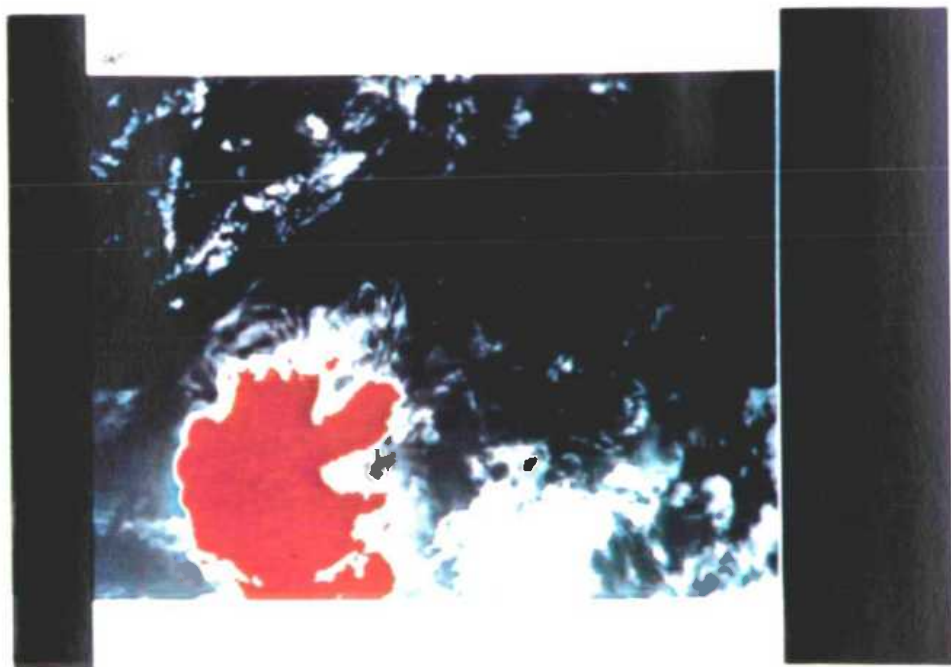


Planche 1b :

Classe NH (1/7/85, 03.30Z). La classe est codée en rouge.

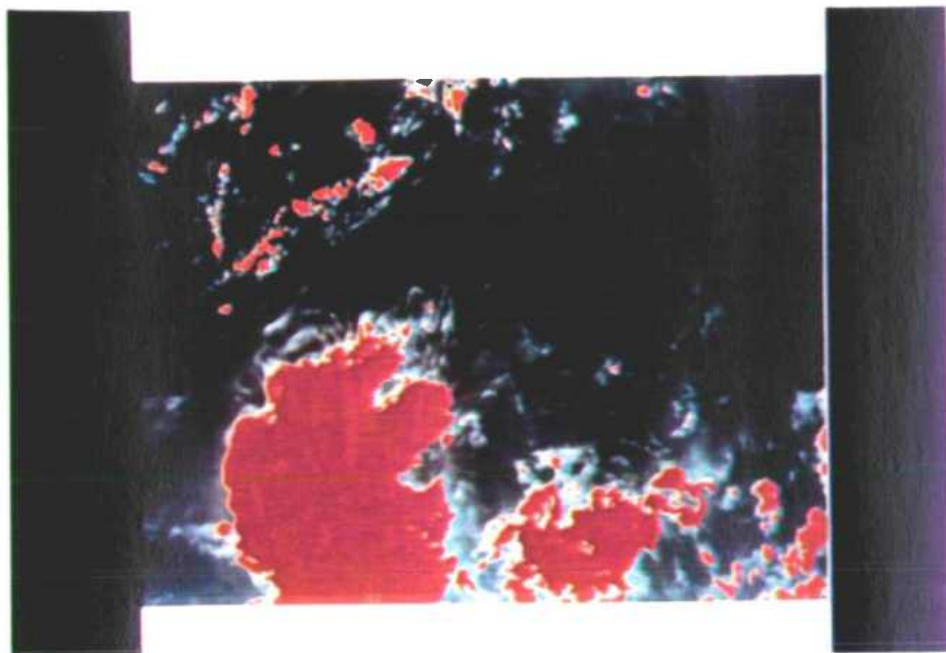


Planche 1c : Classes NH et NM (1/7/85, 03.30Z)
Les classes NH et NM sont codées en rouge.

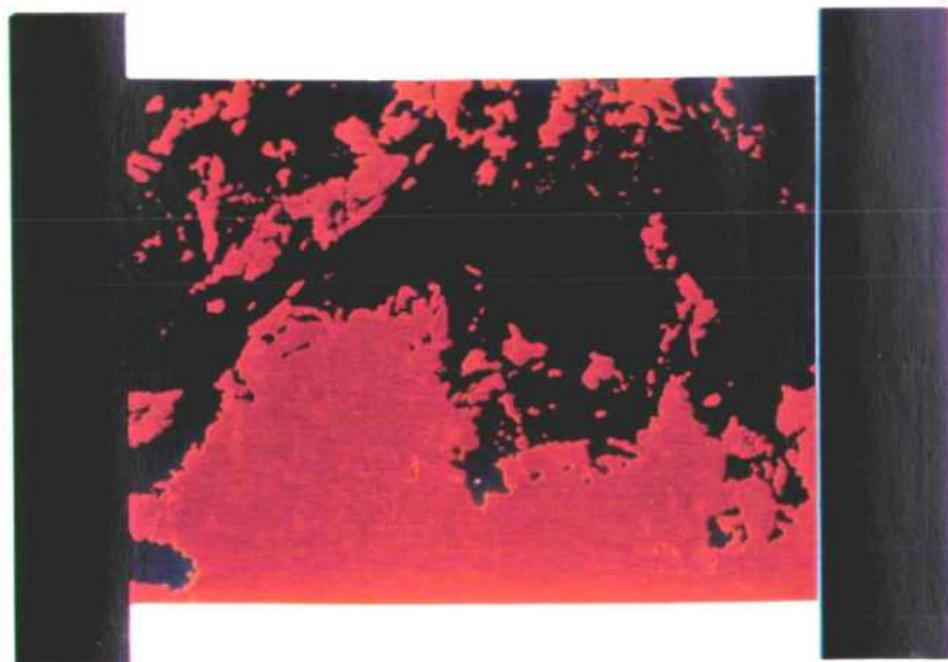


Planche 1d : Classes CC/CD (1/7/85, 03.30Z)
La classe CC (NH + NM + NB) est codée en rouge.



Planche 1e : Cartographie des différentes classes de nuages (1/7/85, 03.30Z)
 (cyan = classe NH, bleu clair = classe NM, bleu marine = classe NB,
 vert = classe CD).

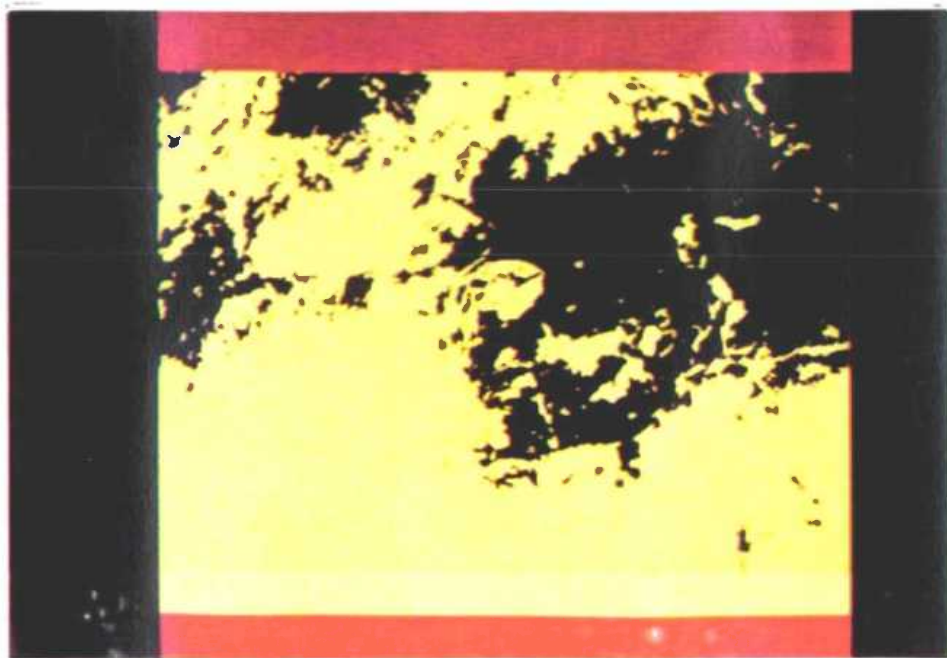


Planche 1f : Carte reconditionnée (à l'échelle d'un jour, 1/7/85) distinguant
 les zones jamais (en noir)/au moins une fois (en jaune) couvertes
 par les nuages lors des quatre enregistrements quotidiens.

Tableau 2

Pourcentage de recouvrement des différentes classes nuageuses
pour les 4 enregistrements d'un jour choisi (1/7/85)

Heure	NH	NM	NL	% CC	% CD	% CD durant toute la journée
03.30Z	9.7	8.5	32.6	50.8	49.2)
)
09.00Z	7.9	7.5	14.6	30.0	70.0)
)
15.00Z	4.2	6.9	15.0	26.1	73.9)
)
21.30Z	2.7	12.5	26.6	41.8	58.2)

Tableau 3

Pourcentage de recouvrement des classes CC/CD
pour des images reconditionnées quotidiennes
(juillet 85)

Date	% CD durant la journée	% CC au moins une fois durant la journée	% CD durant toute la décade	% CC au moins une fois durant la décade	% CD durant tout le mois	% CC au moins une fois durant le mois
1	36.6	63.4)			
2	39.5	60.5)			
3	32.6	67.4)			
4	35.4	64.6)			
5	35.7	64.3)			
6	43.6	56.4	)	8.4	91.6)
7	40.6	59.4))
8	35.1	64.9))
9	37.9	62.1))
10	42.4	57.6))
11	29.8	70.2))
12	22.7	77.3))
13	38.7	61.3))
14	35.1	64.9))
15	32.8	67.2))
16	17.0	83.0	)	2.3	97.7)
17	24.3	75.7))
18	29.3	70.7))
19	29.0	71.0))
20	24.2	75.8))
21	19.1	80.9))
22	14.7	85.3))
23	17.1	82.9))
24	24.0	76.0))
25	28.2	71.8))
26	31.6	68.4	)	0.3	99.7)
27	35.3	64.7))
28	47.9	52.1))
29	35.4	64.6))
30	25.4	74.6))
31	28.1	71.9))

NB: CC: Ciel couvert
CD: Ciel dégagé

Tableau 4

Pourcentage de recouvrement des classes CC/CD
pour des images reconditionnées quotidiennes
(août 85)

Date	% CD durant toute la journée	% CC au moins une fois durant la journée	% CD durant toute la décade	% CC au moins une fois durant la décade	% CD durant tout le mois	% CC au moins une fois durant le mois
1	27.0	73.0)			
2	34.0	66.0)			
3	29.0	71.0)			
4	29.0	71.0)			
5	19.3	80.7)			
6	27.0	73.0	)	2.7	97.3)
7	20.9	79.1))
8	20.5	79.5))
9	31.8	68.2))
10	29.7	70.3))
11	28.5	71.5))
12	23.1	76.9))
13	27.3	72.7))
14	25.6	74.4))
15	28.5	71.5))
16	25.3	74.7	)	2.0	98.0)
17	25.0	75.0))
18	13.4	86.6))
19	25.7	74.3))
20	41.0	59.0))
21	28.3	71.6))
22	28.4	62.5))
23	38.9	61.1))
24	31.1	68.9))
25	13.0	87.0))
26	17.6	82.9	)	1.5	98.5)
27	42.6	57.4))
28	45.7	54.3))
29	39.7	60.3))
30	33.1	66.9))
31	19.9	80.1))

NB: CC: Ciel couvert
CD: Ciel dégagé

Tableau 5

Pourcentage de couverture des classes CC/CD à l'échelle d'un mois:
images reconditionnées pour une heure d'enregistrement donnée
durant tout le mois de juillet/août 1985

Heures	juillet 85		août 85	
	% CD durant tout le mois	% CC au moins une fois	% CD durant tout le mois	% CC au moins une fois
03.30Z	0.3	99.7	0.5	99.5
09.00Z	8.0	92.0	4.0	96.0
15.00Z	4.1	95.9	6.3	93.7
21.30Z	2.2	97.8	2.7	97.3

ESTIMATIONS ET CARTOGRAPHIE DES PRECIPITATIONS

1. INTRODUCTION

On a accordé beaucoup d'attention aux techniques d'estimation et de suivi des précipitations par satellite météorologique depuis la formulation - déjà vieille (fin des années 60) - des premières méthodes utilisant l'imagerie visible et infra-rouge.

Atlas et Thiele (1981) et Barrett et Martin (1981) ont récapitulé l'ensemble des techniques développées jusqu'à la fin des années 70.

Cependant, de très nets progrès en ce domaine ont été réalisés par l'Université de Bristol depuis 1980, tout d'abord grâce à l'aide financière de la NOAA (dans le cadre du projet AgRISTARS), puis plus récemment grâce à celle de l'Agence Spatiale Européenne. Aussi la méthode initiale dite de "Bristol", utilisée durant les années 70 et qui était une procédure de relevé manuel de la couverture nuageuse sur photographie satellite a été remplacée depuis par une version interactive appelée BIAS (pour "Bristol/NOAA Inter-Active Scheme") et une autre procédure entièrement objective appelée ADMIT (Agricultural Drought Monitoring Integrative Technique).

Le but d'Admit est d'estimer la pluviosité par un seuillage bispectral des canaux visibles et IR des satellites géostationnaires (Barrett & D'Souza, 1985). Cette méthode repose sur l'idée que la pluie est le plus souvent générée par des nuages très réfléchifs dans le visible et très froids (sommets très élevés) dans l'Infra-Rouge. En vue de tenir compte de la variabilité journalière de la situation nuageuse tout en gardant les volumes de traitements à un niveau raisonnable, la technique utilise trois paires diurnes d'images IR et visibles, plus trois images nocturnes IR.

L'image diurne - à la fois visible et IR - permet de déterminer des "contours de dilatation" correspondant à la

croissance nuageuse. La formation brutale de nouvelles zones apparentes de pluie durant la période nocturne - donc sur la seule imagerie IR - doit être sérieusement comparée aux dilatations diurnes observées, puisqu'il y a une différence, relevée le jour, entre la surface nuageuse d'après imagerie IR, exagérée, et celle obtenue à partir de l'imagerie visible. On évitera ainsi l'"explosion" des zones nuageuses par l'utilisation des seules données IR.

Les premiers tests d'ADMIT, pour janvier et juillet 1985 ont livré des cartes pluviométriques qui, comparées aux données du réseau synoptique, se révèlent correctes à un niveau de 85%. Nous avons dès lors une grande confiance dans les estimations produites: elles sont obtenues en multipliant le nombre de jours de présence de nuages générateurs de pluie par les valeurs (R (rd^{-1})) (pluie moyenne par jour de pluie), réarrangées en fonction de la résolution des pixels à partir des données climatologiques existantes.

Il entrerait dans nos intentions d'utiliser la procédure ADMIT au Sahel Occidental pour les mois de juillet et d'août 1985. En Afrique de l'Ouest, la majorité des nuages porteurs de pluie sont mobiles et se déplacent d'Est en Ouest. Il nous a donc semblé préférable d'appliquer les contours de dilatation sur les seuls flancs ouest des zones nuageuses durant le jour, plutôt qu'à la circonférence complète de ces zones comme cela avait été le cas lors d'une étude à l'échelle du continent. Cependant, il nous a vite apparu que l'adaptation des logiciels - recourant à des contours de dilatation partiels dans notre cas particulier - nécessiterait un temps beaucoup plus long que ce qui avait été initialement prévu. Nous n'avons malheureusement pas eu le temps de terminer ces modifications avant la date limite du projet (30 juin 86). C'est pourquoi les résultats ADMIT pour l'Afrique de l'Ouest seront quelque peu retardés.

Au vu de tous ces problèmes, il fallait nécessairement produire des estimations pluviométriques au moyen d'une

méthode plus simple et plus directe. Nous avons ainsi utilisé la technique PERMIT (pour Polar-orbiter Effective Rainfall Monitoring Integrative Technique) dont les détails sont repris à la section V2 ci-dessous. Le but de PERMIT est de produire des cartes des précipitations cumulées sur des périodes de, par exemple, 10 ou 31 jours, en vue d'un suivi ou d'inventaires régionaux.

Cette technique est particulièrement bien adaptée aux situations nécessitant une approche directe et peu coûteuse. Un avantage supplémentaire du PERMIT est qu'il n'est pas seulement utilisable avec des données de satellites géostationnaires mais aussi - comme son appellation le suggère - avec celles des satellites à orbite polaire en cas de non disponibilité des premières. Ce point pourrait être primordial pour le développement de ce projet en Afrique occidentale si - comme nous le comprenons - les travaux futurs devaient se contenter des données des seuls satellites à orbite polaire.

Comparativement, le but principal de la technique BIAS est d'utiliser au mieux les canaux visibles et IR des différents types de satellites en même temps que des données au sol en vue de cartographier la pluviosité cumulée pour des périodes de 6, 12 ou 24 heures, sur des régions assez grandes, de manière plus fiable que par l'utilisation séparée des données satellitaires ou de terrain. Il est également vraisemblable que BIAS menera à de meilleurs résultats que ceux obtenus par des méthodes fort objectives, entre autres dans le cas de situations extrêmes ou imprévisibles, situations dont les méthodes objectives ont difficile à tenir compte. L'hypothèse sur laquelle se repose BIAS est que la pluviosité cumulée est une fonction de la couverture et du type de nuages tels qu'ils sont déterminés par satellite, d'un facteur de pondération morpho-climatologique (afin d'ajuster au mieux les estimations pluviométriques en fonction de la topographie et du climat locaux), d'un facteur de pondération synoptique en relation avec les stations de ce type, et de la durée de la couverture locale en nuages de pluie. Des tests préliminaires suggèrent une amélioration

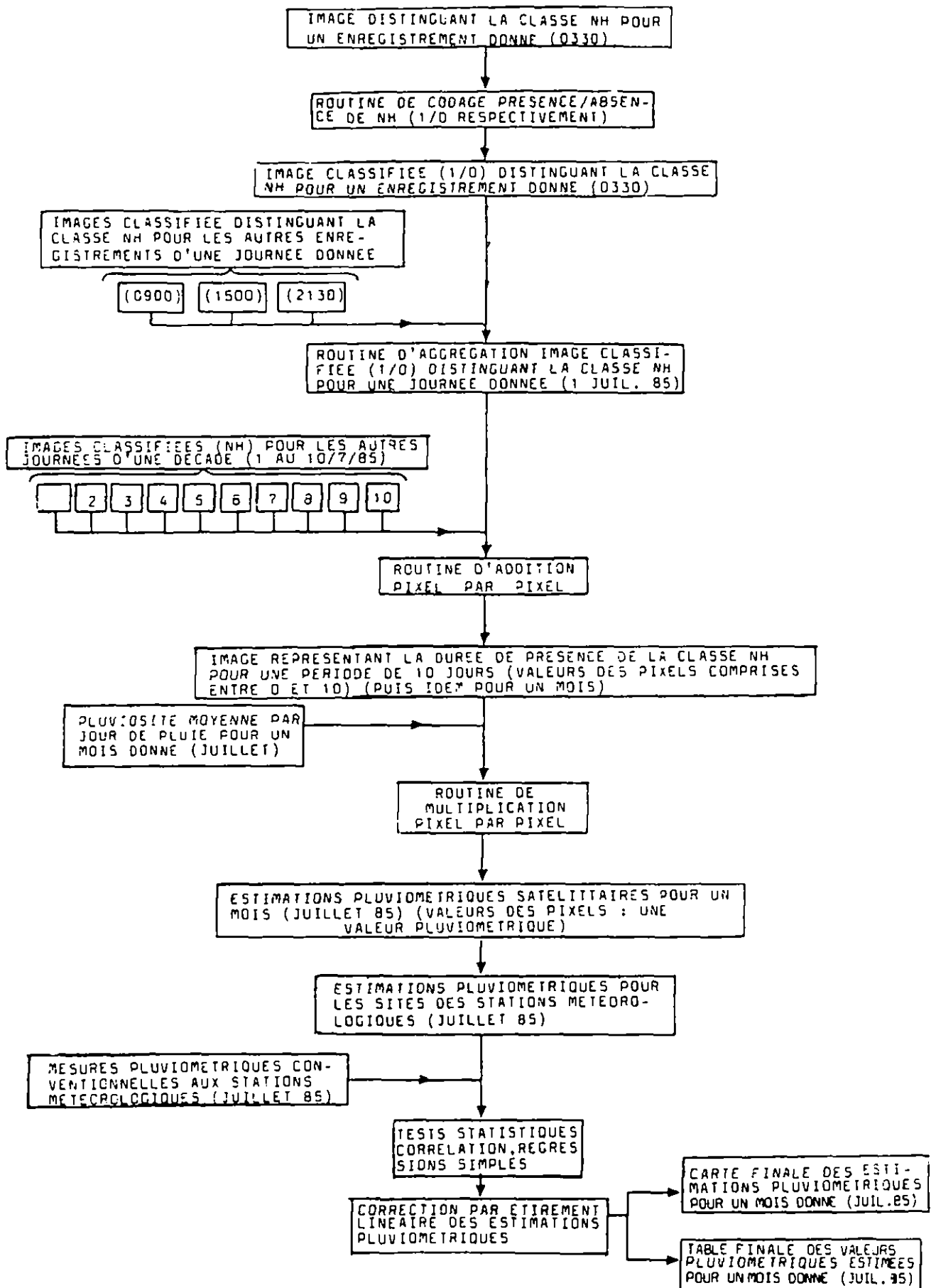


Fig. 5. Schéma détaillé de la méthode d'estimation pluviométrique PERMIT

de 10 à 25% des résultats par rapport aux isohyètes cartographiés à partir des données du réseau météorologique synoptique. (Moses et Barrett, sous presse). En ce qui concerne le projet présent, BIAS a été utilisé dans le cas d'une journée isolée afin de démontrer son applicabilité en Afrique Occidentale, aussi bien avec des données NOAA et Meteosat. La méthode est détaillée dans la section V3 ci-dessous.

2. PERMIT: une méthode objective basée sur l'estimation de la couverture nuageuse; résultats.

La méthode PERMIT, illustrée à la figure 5, dérive de la méthode ADMIT, plus exigeante en données (cfr supra). Elle a été conçue pour pouvoir fonctionner avec seulement quatre enregistrements IR par jour et est dès lors indifféremment utilisable avec les satellites géostationnaires et à orbite polaire. La méthode PERMIT repose sur les hypothèses suivantes:

- a. la couverture quotidienne des nuages de pluie peut être cartographiée efficacement par un seuillage approprié des températures sur quatre enregistrements IR (par exemple, les seuils précédemment utilisés);
- b. pour des périodes de 10 jours et plus, des estimations pluviométriques, valables en première approche, peuvent être obtenues en multipliant - pixel par pixel - le nombre de jours de pluie (estimé par satellite) par la pluviosité moyenne par jour de pluie (dérivée des atlas climatiques) (Thompson 1965, Leroux 1983);
- c. on peut obtenir des facteurs correctifs au moyen d'une régression entre les premières estimations pluviométriques et les observations au sol. Ces facteurs serviront à corriger les premières estimations selon un modèle d'étirement linéaire du logiciel I²S. On obtient ainsi des estimations de second ordre correspondant beaucoup mieux aux observations au sol. Autrement dit, ce stade permet un ajustement climatologique (données de terrain) des premières estimations;

d. les estimations de second ordre représentent la répartition pluviométrique réelle sur de grandes surfaces et pour des périodes de 10 jours et plus.

Il a été décidé de retenir la température de 241°K comme limite supérieure des nuages de pluie. C'était le seuil précédemment utiliser pour distinguer les classes NH et NM. Les planches 2, 3 et 4 montrent la répartition moyenne des pluies, le nombre moyen de jours de pluie et les valeurs ($R(\text{rd}^{-1})$), tels qu'on peut les dériver des statistiques climatiques pour les mois de juillet et d'août au Sahel, elles mêmes générées à partir de l'Atlas d'Afrique Tropicale (Leroux, 1983) numérisé sur le TDS HR48 de l'Unité de Télédétection, surimposé aux images Meteosat, transformé en données intégrées au niveau des pixels par la technique b-spline, ou convolution cubique, du I²S et lissées par un filtre médian de 9 x 9 pixels pour éliminer les discontinuités indésirables et le bruit de fond.

La figure 6 montre un exemple d'images composites de la couverture en nuages de pluie (NH) au cours d'une journée. Des images quotidiennes ont été construites avant d'opérer des fusions à l'échelle des décades et du mois.

La figure 7 illustre les transformations par étirement linéaire utilisées sur le I²S pour pondérer les premières estimations pluviométriques par les observations de terrain (voir supra). En ce qui concerne cette transformation, seules les données des stations synoptiques ont été reprises: nous avons en effet de sérieux doutes quant à la fiabilité des données du réseau météorologique nigérien au complet, que l'Université de Reading (département de météorologie) nous avaient transmises.

Il nous semble qu'en certaines occasions des observations "manquées" de pluies bien réelles ont été indûment codées comme "absence de pluie". Comme il ne nous est pas possible de distinguer les stations souffrant de ce genre d'erreurs, nous avons préféré nous contenter des seules données synoptiques, obtenues auprès du Bureau

Planche 2 :

Cartes de la pluviosité mensuelle moyenne (pour la légende, se referer à l'échelle des couleurs)

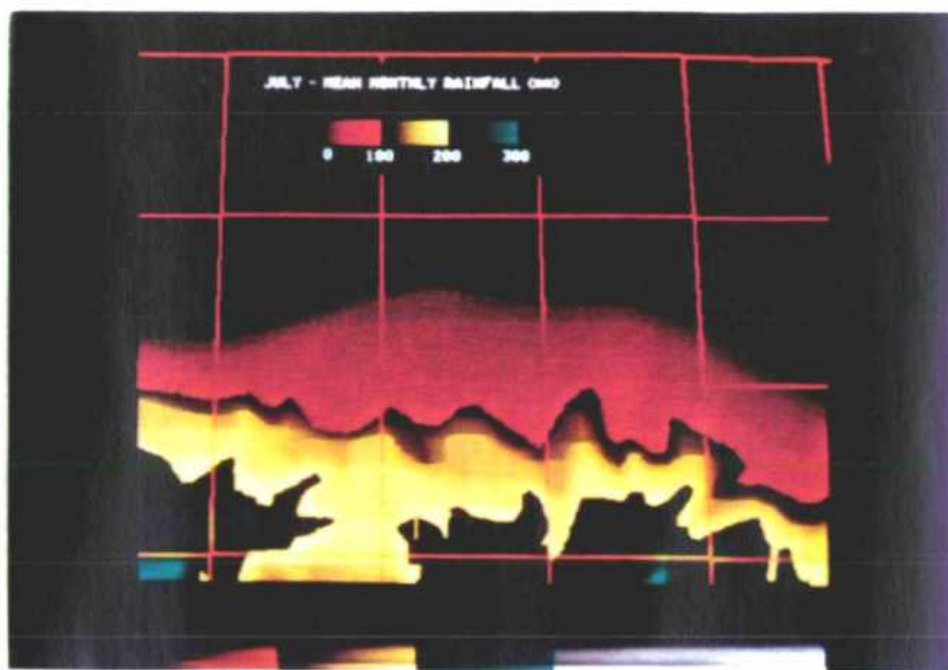


Planche 2a :

Juillet.

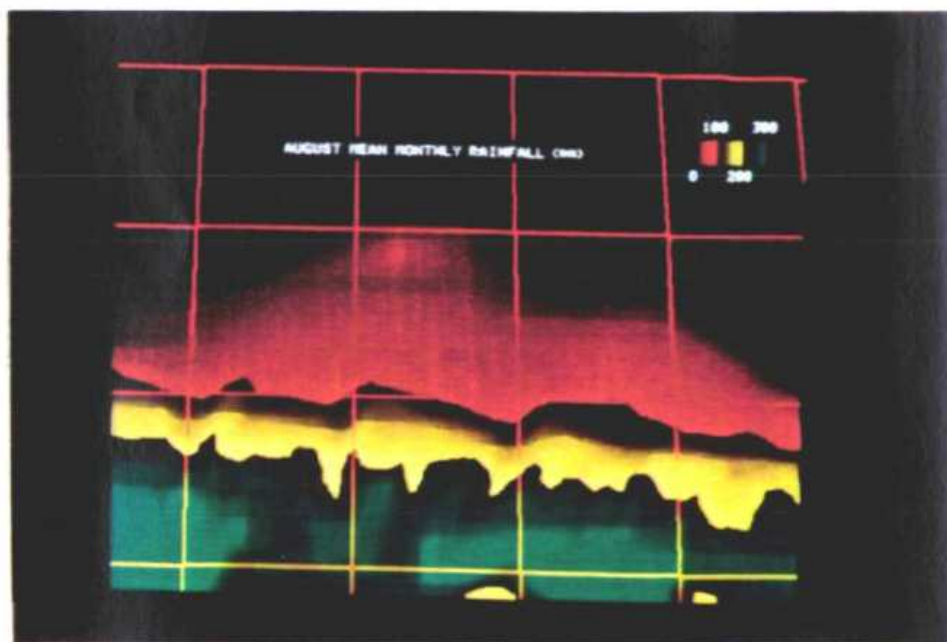


Planche 2b :

Août.

Planche 3 : Nombre mensuel moyen de jours de pluie.
(pour la légende, se référer à l'échelle des couleurs).

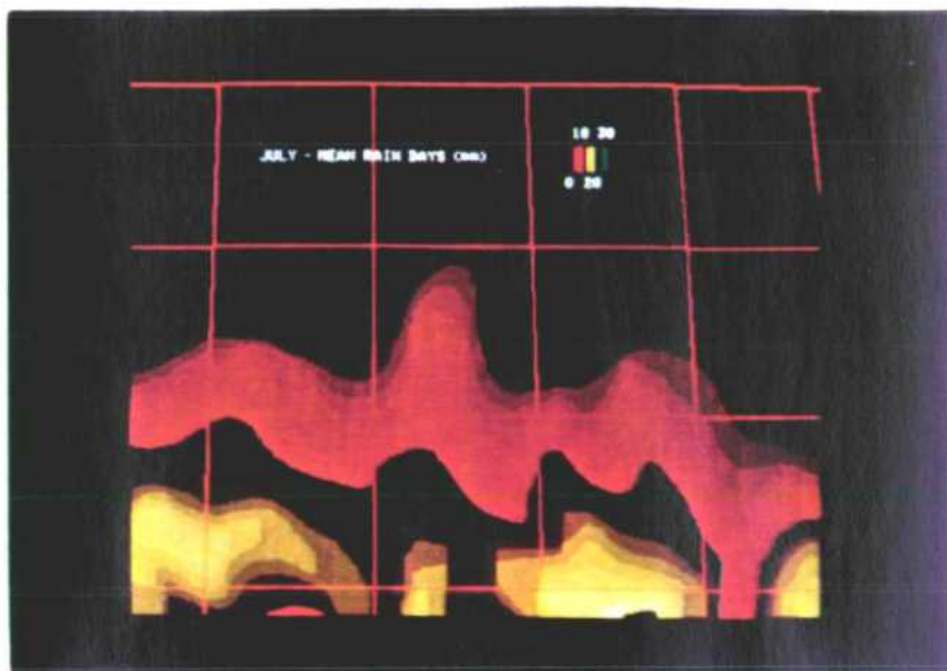


Planche 3a : Juillet.

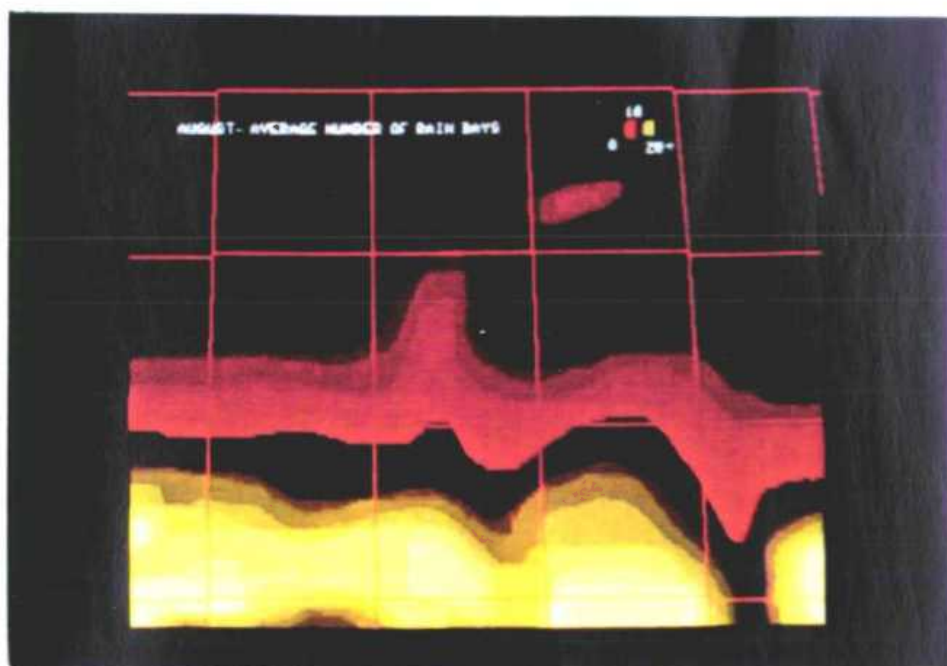


Planche 3b : Août.

Planche 4 : Pluviosité moyenne par jour de pluie (\bar{R} (rd⁻¹))

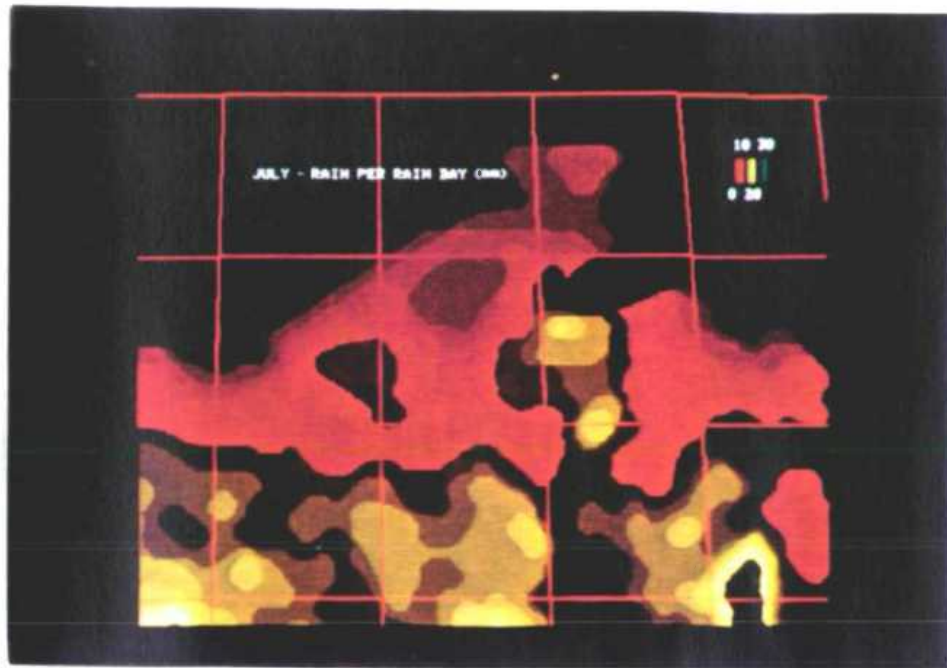


Planche 4a : Juillet



Planche 4b : Août.



Planche 6 : Carte composite de la couverture en images de pluies. (1er juillet 85).

FONCTION DE CORRECTION (1 - 10 JUILLET 85)

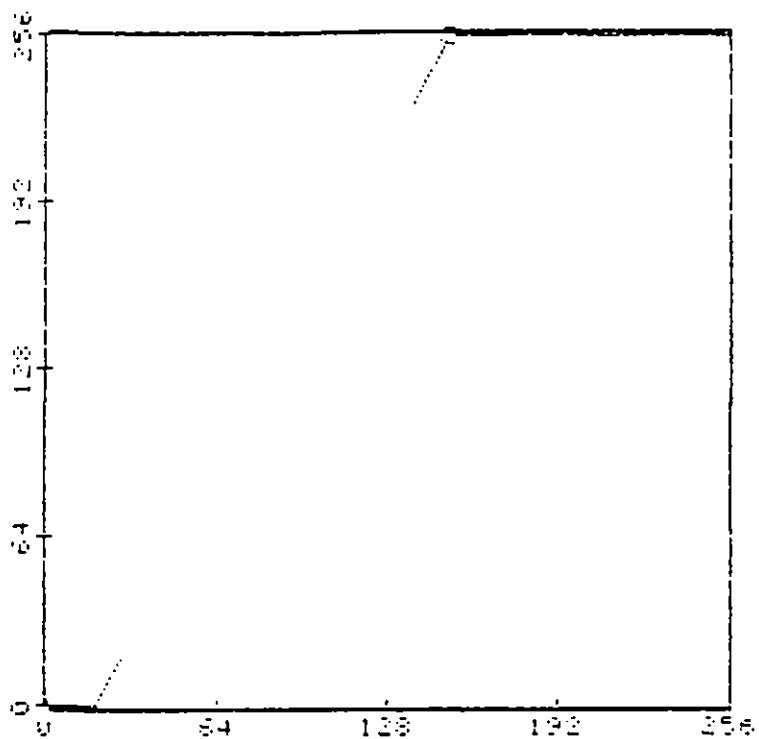


Figure 7 : Fonction de correction par étirement linéaire
exemple pour la décade du 1 au 10 juillet 1985.

Météorologique de Grande-Bretagne. Ces stations sont peu nombreuses mais au moins fiables.

Le tableau 6 et la figure 8 résument les caractéristiques des analyses par régression. Les planches 5 et 6 illustrent la distribution des pluies, estimées pour différentes périodes et présentées de diverses façons. Quoique les valeurs du r^2 soient modestes, l'absence relative et la fiabilité restreinte des données au sol suggèrent que les cartes pluviométriques satellitaires (auxquelles ces données au sol sont associées) sont néanmoins beaucoup plus représentatives de la distribution régionale des pluies que les cartes pluviométriques conventionnelles (préparées à partir des données de terrain).

3. BIAS: description d'une méthode interactive.

BIAS étant beaucoup plus complexe, il faudra l'expliquer plus longuement. L'Université de Bristol commença à s'intéresser au suivi satellitaire de la pluviosité en 1970, avec une étude climatique en Extrême-Orient tropical (Barrett, 1970).

Ce travail a conduit au développement d'une technique de relevé manuel de la couverture nuageuse pour un suivi de la répartition des pluies s'aidant de l'imagerie de satellites à orbite polaire (la méthode de "Bristol"). On se basait pour cela sur des documents photographiques (analogiques). La méthode fut appliquée dans diverses régions du monde avec un succès apparent. Plus récemment, elle fut utilisée pour étudier les accidents pluvieux extrêmement violents, arrivés au Sultanat d'Oman en juin 1977 (Barrett & Power, 1985).

Avec l'arrivée du programme AgRISTARS aux USA, il devint possible de développer une version interactive de la méthode de Bristol.

Cette version, appelée BIAS (Bristol/NOAA Inter Active Scheme) a été conçue pour travailler sur les systèmes de traitement d'images VICOM, VIRGS et plus récemment I²S en conjonction avec NOAA/NESDIS. Elle a depuis lors été ap-

pliquée à des régions d'Amérique du Nord et du Sud, en URSS, au Moyen-Orient, dans le cadre des essais d'application à grande échelle du projet AgRISTARS.

TABLEAU 6

Résultats du PERMIT; Résumé des statistiques de régression entre la pluviométrie mesurée au sol aux principales stations synoptiques du Sahel Occidental et les estimations satellitaires correspondantes

Période	Coefficient de corrélation	Valeur de r^2
1-10 juillet	0.61	36.7%
11-20 juillet	0.66	43.5%
21-31 juillet	0.57	32.2%
1-10 août	0.64	40.8%
11-20 août	0.50	24.5%
21-31 août	0.66	44.0%

Figure 8 : Régressions entre les estimations pluviométriques PERMIT ajustées (de second ordre) et les mesures synoptiques au sol.

Figure 8a : 1 - 10 juillet 1985

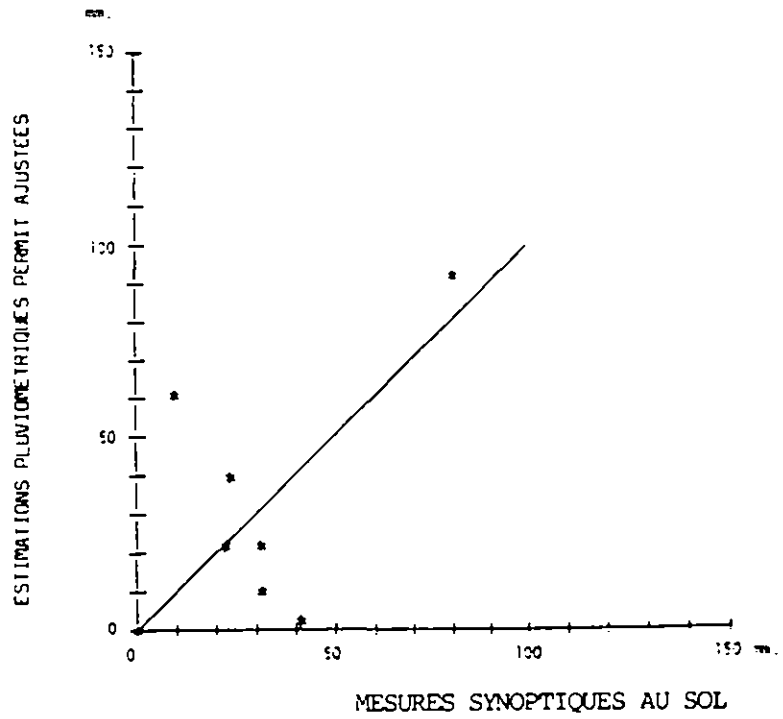


Figure 8b : 11 - 20 juillet 1985

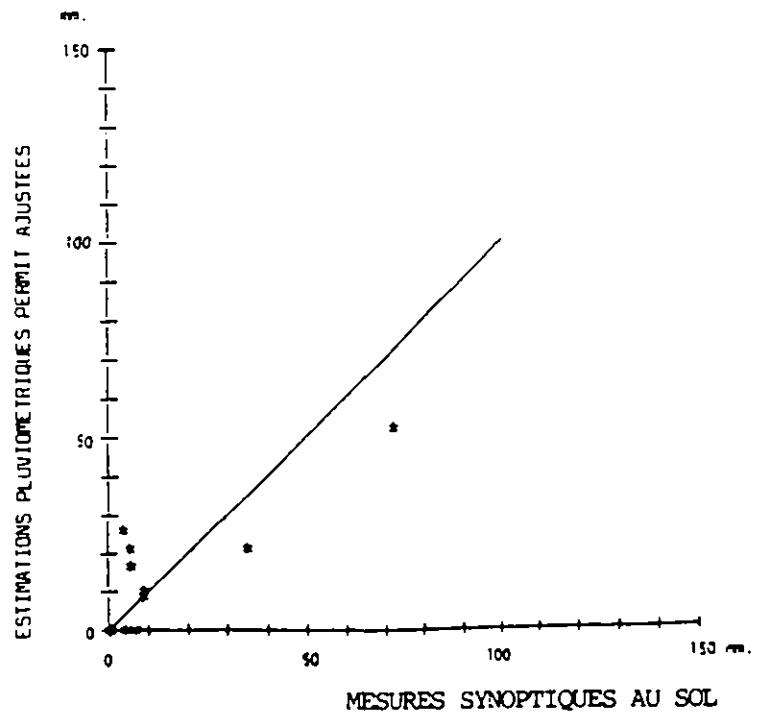


Figure Bc : 21 - 31 juillet 1985

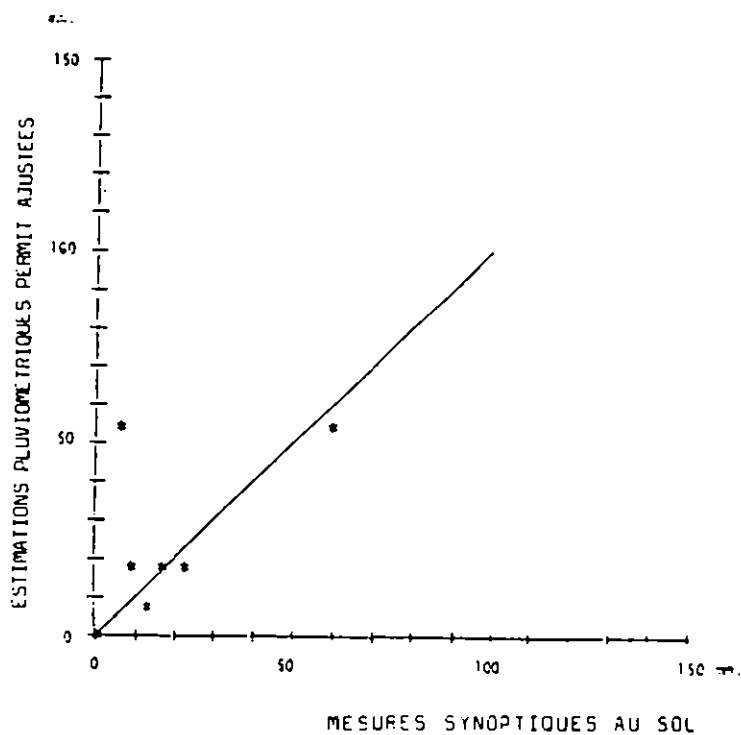


Figure Bd : 1 - 10 août 1985

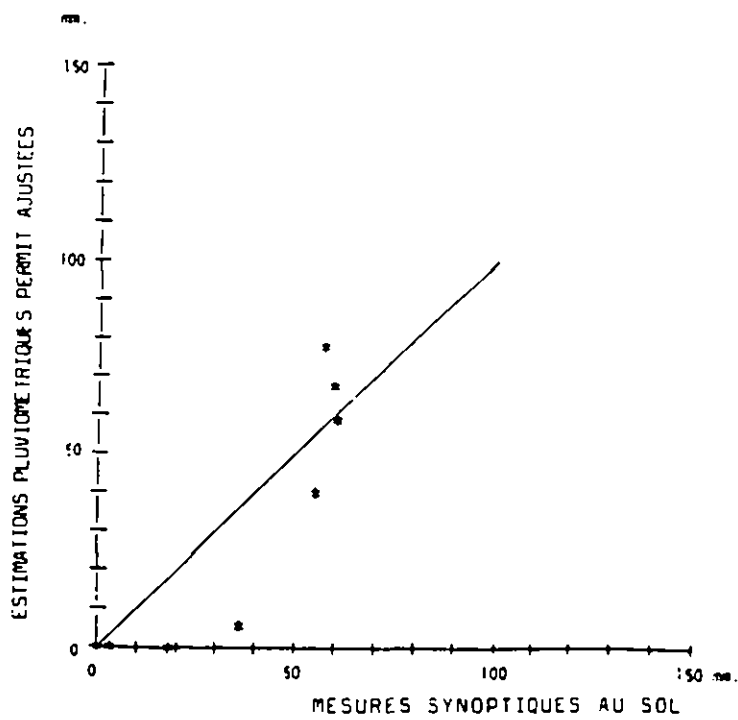


Figure 8e : 11 - 20 août 1985

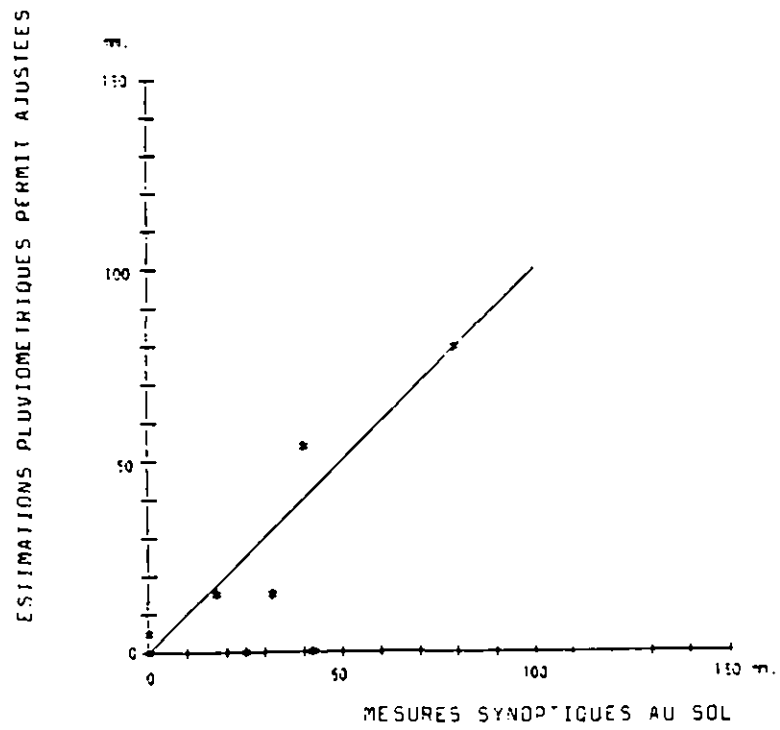
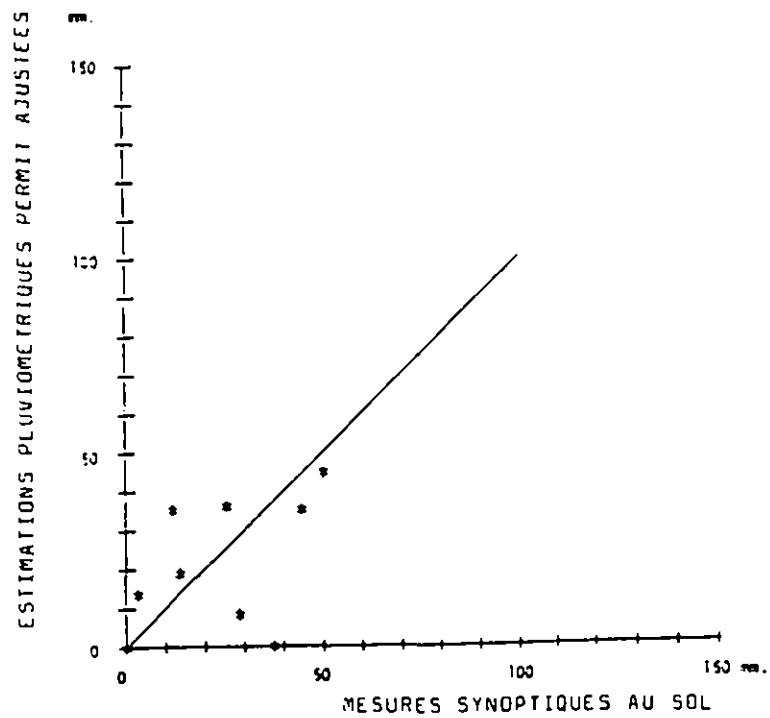


Figure 8f : 21 - 31 août 1985



3.1. Bases de la méthode

L'idée de BIAS est de parvenir, par une exploitation conjointe (cfr supra) des données satellitaires (canaux VIS et IR des satellites géostationnaires et à orbite polaire) et de terrain (mesures pluviométriques du réseau synoptique), à une meilleure estimation de la pluviosité, sur de grandes surfaces, que celles obtenues à partir de ces mêmes données traitées séparément.

L'hypothèse de base du BIAS s'exprime comme suit:

$$R = f(Ct, Ca, Sw, Mc)$$

où R est la pluviosité totale (généralement sur une période de 12 heures)

Ct, le type de nuages

Ca, la couverture nuageuse au-dessus d'un bloc de pixels

Sw, une pondération synoptique

Mc, une pondération morphoclimatique.

Le fondement même du BIAS est ce qu'on pourrait appeler la "Régression Globale" (en réalité une "look-up table" d'ordinateur) liant la pluviosité à divers indices de la situation nuageuse. Ces indices sont déterminés par l'étude de la couverture nuageuse sur imagerie visible et/ou IR.

La figure 9 illustre ce propos.

Dans les régions à faible variabilité pluviométrique saisonnière, sur des plaines sans relief, proches du niveau de la mer, lorsque les accidents pluvieux d'intensité excessive sont rares, on obtient d'excellentes estimations pluviométriques - au niveau de blocs de pixels - par une simple transformation des indices nuageux au travers de la "Régression Globale". Cependant ces circonstances idéales ne se présentent que rarement. On doit donc procéder à des ajustements tenant compte à la fois de variations météorologique

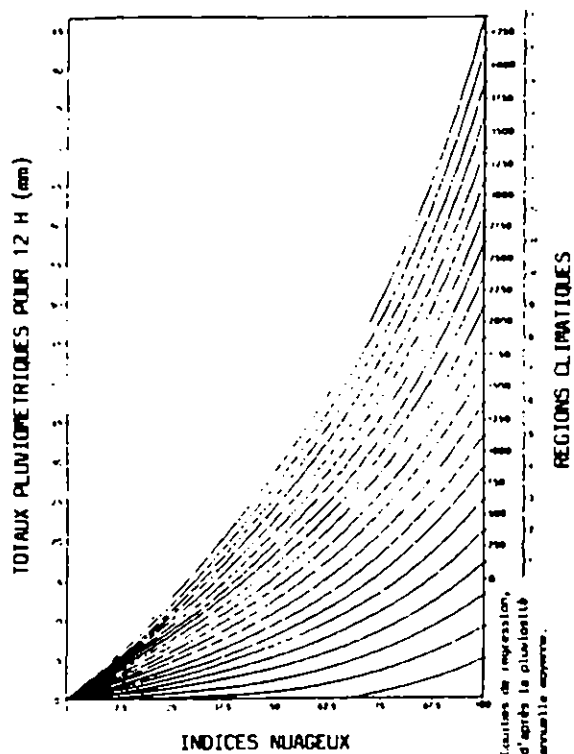
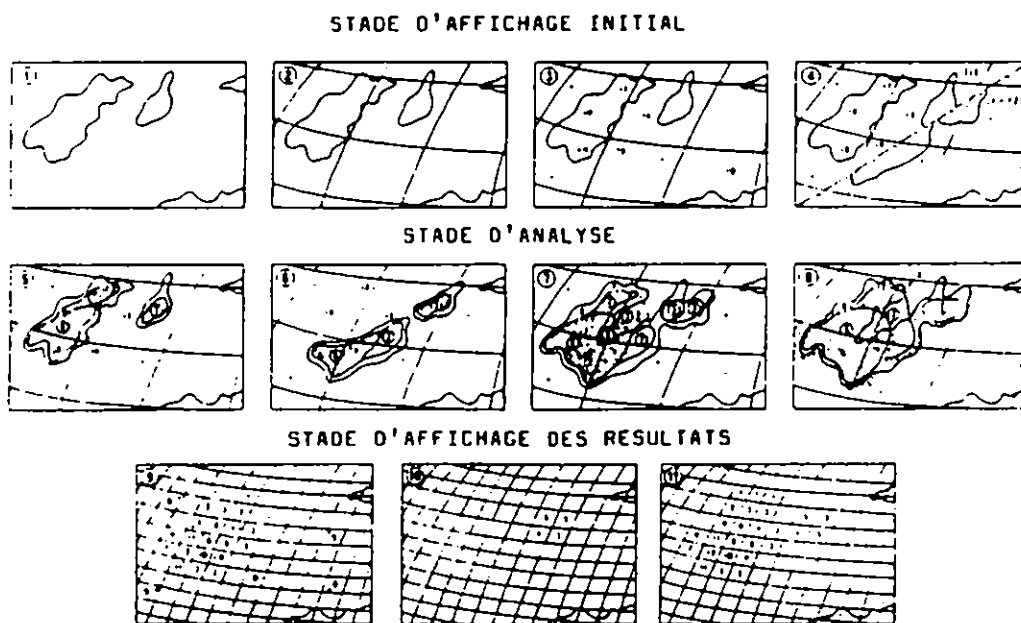


Figure 9 : (à gauche) "Régression Globale" du BIAS, telle que développée dans le projet agRISTARS. Comparativement aux versions précédentes, l'amélioration principale réside dans l'extension des régions climatiques considérées.

Figure 10 : (en bas) Etapes de la méthode interactive BIAS. Au stade d'affichage initial, l'opérateur se familiarise avec la situation synoptique et les principaux éléments nuageux et pluvieux. Au stade d'analyse, il identifie et cartographie ces éléments nuageux, en relation avec la vérité-terrain. Au stade d'affichage des résultats, il vérifie et accepte (rejette) l'analyse des zones de pluie.



(relation variable entre type de nuages et intensité de la pluie) et climatologique (accentué par l'influence du relief) entre un pixel et ses voisins. Ces ajustements sont apportés par les termes Sw et Mc.

Sw est une pondération synoptique calculée au niveau de blocs de pixel, à partir des données du réseau synoptique si elles semblent correctes et représentatives de champs nuageux relativement homogènes. L'introduction de cette routine flexible dans la "Régression Globale". Cette pondération est présentée graphiquement le long de l'abscisse de la régression. Ceci facilite le choix de la carte de régression représentant au mieux la situation météorologique particulière de tout point à tout moment et conduit donc à des estimations pluviométriques plus proches de la réalité que celles obtenues à partir de l'exploitation d'une situation météorologique "moyenne".

Mc est une pondération morpho-climatique, exprimée sous la forme de nombre mensuel moyen de jours de pluie. Cette valeur est calculée pour chaque bloc de pixels et pour chaque mois. Elle permet d'ajuster les estimations en fonction du climat et du relief locaux, ce qui conduit à un plus grand réalisme pour les résultats finaux.

Là où aucune donnée synoptique n'est disponible ou adéquate pour le calcul de Sw, l'accès à la "Régression Globale" se fait par une entrée de type climatologique, présentée graphiquement sur l'axe des ordonnées à droite, qui permet ainsi de choisir la courbe de régression la plus appropriée en fonction de la caractérisation climatologique de chaque bloc de pixels. Ainsi que la figure 9 le montre c'est un étalonnage latéral basé sur la pluviosité mensuelle moyenne.

3.2. Données nécessaires, affichage des données

Les besoins en données du BIAS sont repris ci-dessous, en ordre d'importance décroissant:

- . Imagerie IR de satellites météorologiques (géostationnaires ou à orbite polaire). De préférence selon une fréquence de 6 ou 12 heures.
- b. Données météorologiques synoptiques du réseau GTS (Global Telecommunication System).
- . Cartes météorologiques synoptiques (500 et 1000 mb).

Amélioration de contrastes de l'imagerie IR.

Imagerie dans le canal visible.

- . Cartes des mouvements atmosphériques verticaux et de la quantité d'eau précipitable.

Les données (si possible) GTS à implementer sur le système interactif comprennent:

- RR: totaux pluviométriques durant la période considérée (en mm)
- RRW: RR normalisé par pondération morphoclimatique (Mc) (en mm)
- w: situation météorologique précédente (symboles conventionnels)
- W: situation météorologique actuelle (symboles conventionnels)
- CC: type de nuages (un nombre pur), c'est-à-dire une traduction des catégories significatives de CH, CM et/ou CL en catégories aisément identifiables sur imagerie satellitaire (voir tableau 7).

La convention d'insertion des données sur le système interactif est la suivante : dans le cas de rapports météorologiques non significatifs ou manquants, l'in-

sersion est purement et simplement abandonnée (mais 0, en tant que par exemple "pluie nulle", est considéré comme significatif) pour la rubrique et l'endroit considéré. Si l'ensemble des données sont manquantes pour un point donné, la station en question est omise. Ces conventions limitent ainsi l'insertion de données à un niveau minimal, évitent toute surcharge inutile et les confusions conséquentes.

3.3. Opérations interactives du BIAS

On peut distinguer trois stades opératoires (voir fig. 10), tels que résumés ci-dessous:

1. un stade initial d'affichage grâce auquel l'analyste se familiarise avec la situation synoptique (au moyen des données ponctuelles et des cartes correspondantes) et les champs de nuages associés, mis en évidence sur l'imagerie satellitaire, aux heures t et $(t+n)$ (selon les possibilités)
2. un stade d'analyse durant lequel l'analyste dessine des premières limites pour les différents types de nuages, aux temps t et $(t+h)$ aussi proches que possible des situations en début et en fin de période d'estimation. Il retrace ensuite les zones globales de couverture nuageuse en vue de l'étude de la croissance et de l'advection des nuages entre les temps t et $(t+n)$, en tenant compte particulièrement des éventuelles zones de nuages non observées par satellite mais inferées de l'étude de la situation météorologique considérée.

Enfin, l'analyste dessine les limites des "aires d'influence" des stations météorologiques: elles sont nécessaires pour évaluer la calibration de type "météorologique" (météorological entry) à effectuer dans le cadre de la Régression Globale.

3. un stade d'affichage des résultats, dans lequel l'analyste accepte ou rejette les estimations pluviométriques obtenues; dans le cas d'un rejet, on reprendra, partiellement ou dans son entiereté, la procédure décrite.

TABLEAU 7

Tableau récapitulatif des indices de types nuageux et de leurs équivalent synoptiques

(a) Nom	(b) Indice du type de nuages	(c) Caractéristiques générales	(d) (e) (f) Classes de nuages C2 CM CH
Cumulo-nimbus avec cirrus (Cu nb/Ci)	10	Sommets nuageux pénétrant la troposphère et/ou localement très froids. Mis en évidence par des zones d'ombres localisées (visible) et par des températures très basses (Ir). Correspondent aux zones les plus actives des nuages convectifs. Les cirrus sont indispensables pour la définition de cette classe.	9
Cumulonimbus (Cu nb)		Zones de nuages convectifs bien développés (et/ou en développement), en forme d'enclume ou non, mais sans pénétration dans la troposphère	
Couches de stratiformes avec insertion de cumulonimbus (lay St/Cumb)		Nuages très brilliants, souvent étirés zonalement (frontaux) à texture "graveleuse" sur l'imagerie VIS (illumination oblique). Souvent avec des sommets nuageux isolés et froids. Peuvent également inclure	

	des nuages convectifs à maturation (avec des formes de colonnes et d'enclumes)
Enclumes denses de cumulonimbus (Cu nb A)	Enclumes très larges, dans un environnement de nuages (en colonnes) très localisés ou ayant déjà largement précipité.
Stratiformes en couches (Layd st)	Nuages frontaux à étirement longitudinal (zonal) caractéristique, dans le visible et l'IR. Quelques sommets de nuages moyennement à très froids.
Cumulocongestus 3 (Cu Cg)	Nuages ou cellules convectifs isolés, modérément brilliants (vis) et/ou modérément froids (IR) Cellules généralement petites.
Cumuliformes en couches (layd Cu)	Champs de nuages isolés irrégulièrement distribués. Parfois quelque peu organisés en cellules ou en bandes. Les températures sommitales se répartissent souvent en deux groupes distincts (sommets moyens et bas).
Altostratus épais (Al St)	Le plus souvent le long de la zone de remontée du front tropical, entre les champs de cirriformes et de stratiformes en couches à cheval sur la trace au sol du front.

*Stratus (st)		Couverture mince de nuages bas, présentent peu ou pas de texture (amorphes) et aux contours irréguliers, épousant souvent la topographie locale.	
*Stratocumulus (St cu)	1	Couverture de nuages bas et minces, avec une texture cellulaire ou en stries. Les surfaces couvertes sont souvent au moins deux fois plus importantes que celles dégagées	5
*Debris (D)	1D	Restes en décomposition d'épais nuages convectifs souvent sous forme de nuages isolés à contours ni vraiment marqués ni vraiment flous.	

Ces catégories sont peu importantes en termes de nuages générateurs de pluie. On peut les omettre pour simplifier et accélérer le traitement des cas complexes, particulièrement au niveau des applications concernant les prévisions de récoltes.

Cependant, s'ils sont dominants et à position stationnaire (ou en lent mouvement), ces nuages peuvent contribuer significativement à l'humidification des sols par des pluies légères mais persistantes. Ils devraient donc être inclus dans les analyses nuageuses en l'absence d'éléments nuageux plus significatifs.

3.4. Considérations d'ordre pratique

L'expérience acquise au cours des premières utilisations du BIAS est présentée, pour les nouveaux utilisateurs du système, dans une section pratique du "Guide de l'Utilisateur du BIAS I²S" (Barrett et Al, 1985). Cette section reprend différents aspects plus ou moins importants (évidents) de la méthode en général, mais examine également certains problèmes surgissant au niveau des aspects plus complexes de la méthode ou dans le cas d'application de celle-ci à certaines situations météorologiques particulières.

3.5. Evaluation des résultats

BIAS en étant toujours à un stade de développement, notre recherche a été moins axée sur une vérification des résultats que sur l'acquisition d'une expérience permettant d'améliorer les procédures de la méthode.

Cependant, les tests des résultats sur imagerie NOAA suggèrent que BIAS fournit en général des documents quelque 10 à 25% supérieurs aux cartes pluviométriques obtenues à partir d'un réseau synoptique de stations régulièrement espacées.

Dans le cas particulier d'une étude sur les Etats-Unis, il apparaît qu'on acquiert grâce au BIAS une amélioration d'environ 14% de résultats par rapport à ceux établis à une échelle continentale via les données d'un réseau synoptique à maillage régulier (surface de l'étude 3000 X 3000 km, dimension de la maille: 300 X 300 km) (Moses et Hubanks, communication orale).

3.6. Application du BIAS au Sahel Occidental

Pour démontrer l'applicabilité du BIAS aux régimes météorologiques convectifs, dominant l'Afrique de l'Ouest en juillet-août, on a choisi un jour particulier durant lequel les systèmes météorologiques étaient particulièrement actifs. Une telle situation

s'est présentée le 2 juillet 1985. Un groupe de lignes de grains traversait le sud de la région tandis que des mouvements convectifs brutaux en parsemaient le nord et le centre.

Avant toute utilisation du BIAS, il faut préparer deux fichiers de données de terrain (cfr supra): le premier correspondant aux pondérations morphoclimatiques, le second aux classes de climat. Ces fichiers ont été générés à partir de l'atlas de Leroux (1983) et sont respectivement illustrés par les figures 7 (a) et 7 (b). Nous aurions idéalement préféré obtenir les pondérations morphoclimatologiques à partir des valeurs ponctuelles ($R \text{ (rd)}^{-1}$) d'un réseau climatologique dense. Cependant, la rareté de telles données nous a empêché d'atteindre cet optimum: nos calculs de valeurs représentent donc la meilleure solution, même si elle n'est pas parfaite. (voir section V2)

La planche 8 montre l'évolution de la situation météorologique au dessus de la zone d'étude au travers d'un jeu d'images Meteosat IR prises de 6 en 6 heures, de 06.00Z au 2/7/85 jusque 06.00Z au 3/7/85.

Sur la planche 8(a), soit au début de cette période de 24 heures, l'élément le plus significatif est une ligne de grains dans le sud de l'image, une seconde ligne apparaissant partiellement à l'extrémité sud-est. Six heures plus tard (planche 8 (b)), les deux systèmes se sont déplacés vers l'ouest et les cumulonimbus de la ligne principale se démarquent plus nettement qu'auparavant.

A 18.00Z (planche 8 (c)), la croissance diurne des nuages a conduit à une couverture nuageuse nettement plus importante, toujours en liaison avec les deux lignes de grains et principalement par des échappées verticales de nuages cirriformes; de plus, des poches isolées de nuages convectifs s'observent maintenant un peu partout: dans le nord leur activité est cependant moindre.

Durant la nuit (planches 8 (d) et 8 (e)), les deux li-

Planche 7 : Fichiers de terrain du BIAS pour juillet.

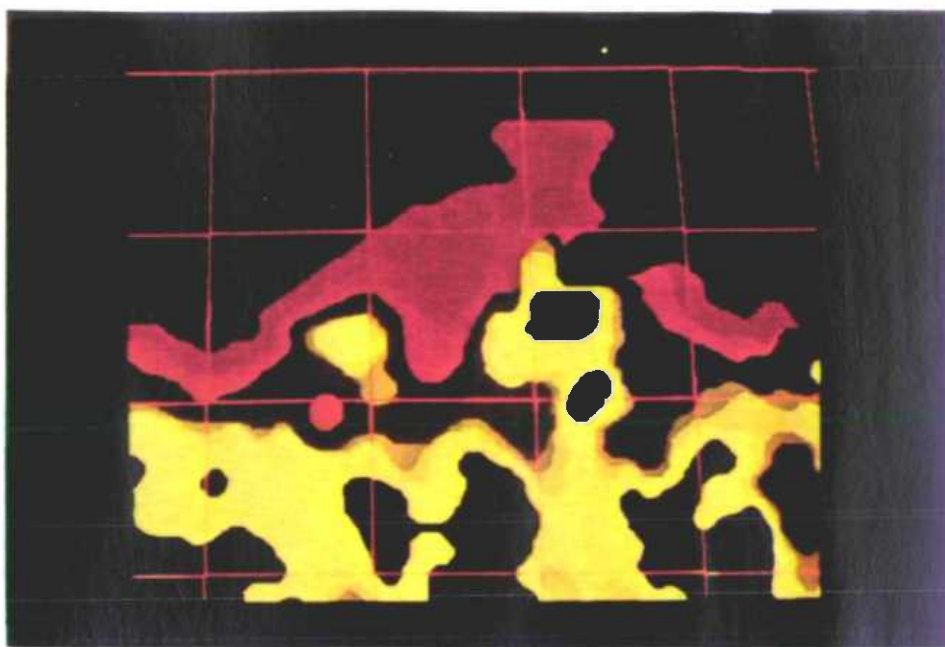


Planche 7a : Pondération morphoclimatique.

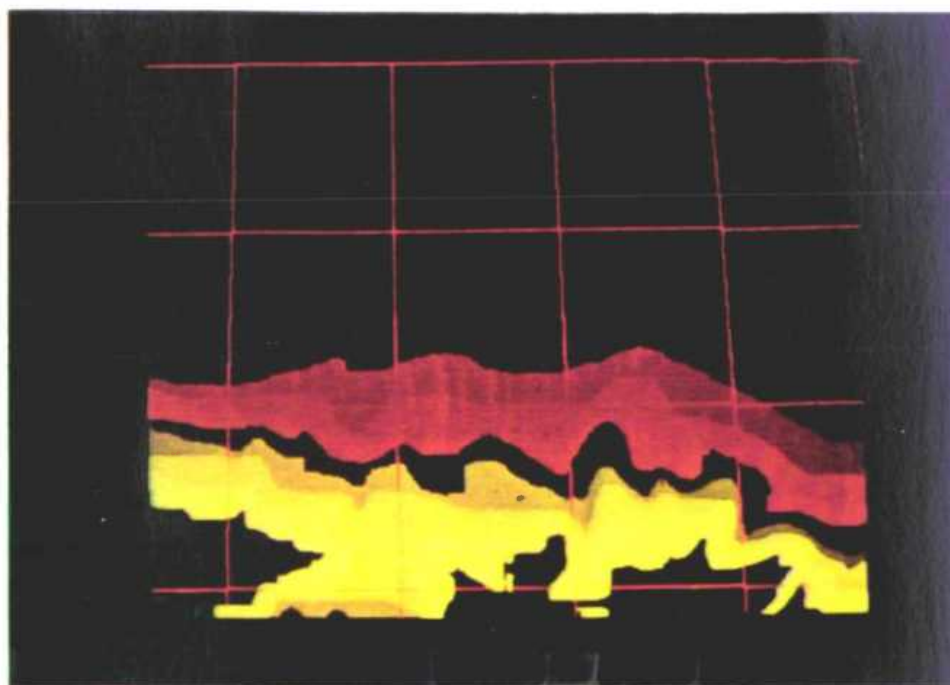


Planche 7b : Classes climatiques.

Planche 8 : Images IR Meteosat.

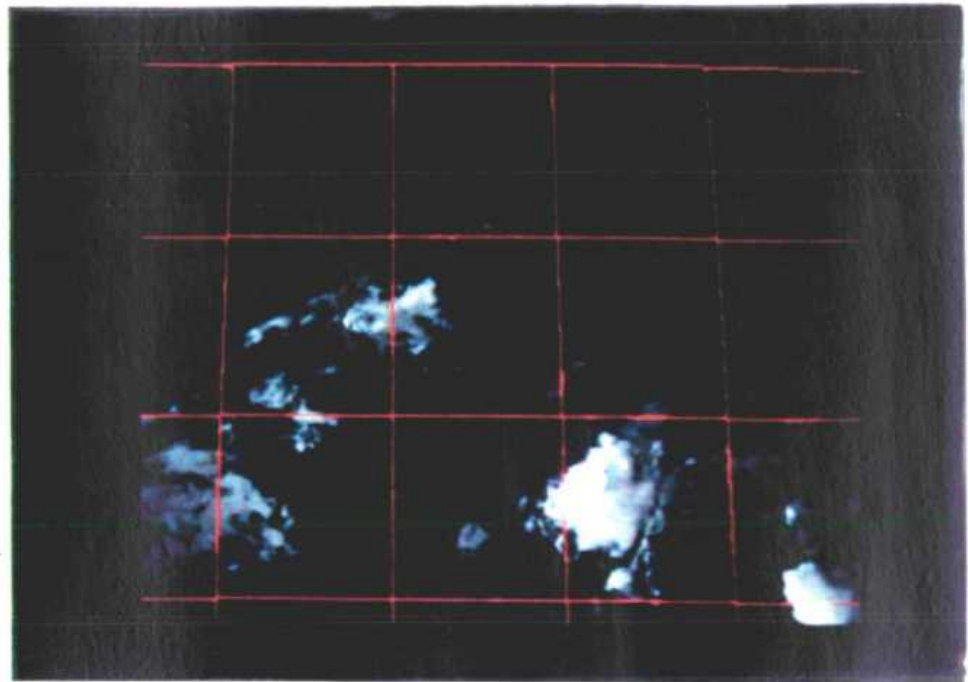


Planche 8a : 06.00Z, 2 juillet 1985 (t1).

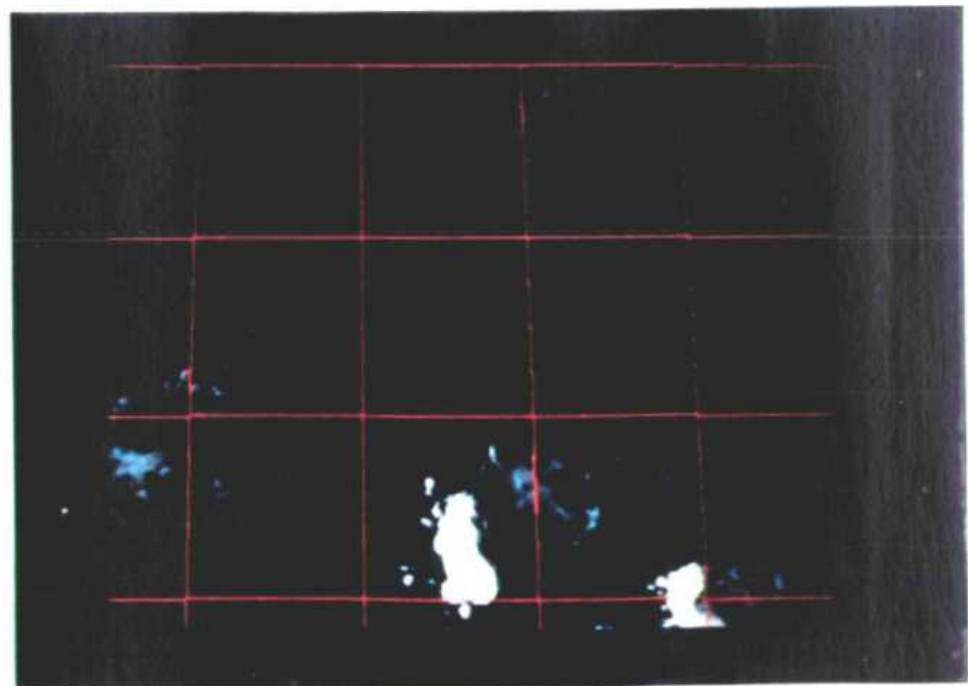


Planche 8b : 1200Z. 2 juillet 1985.

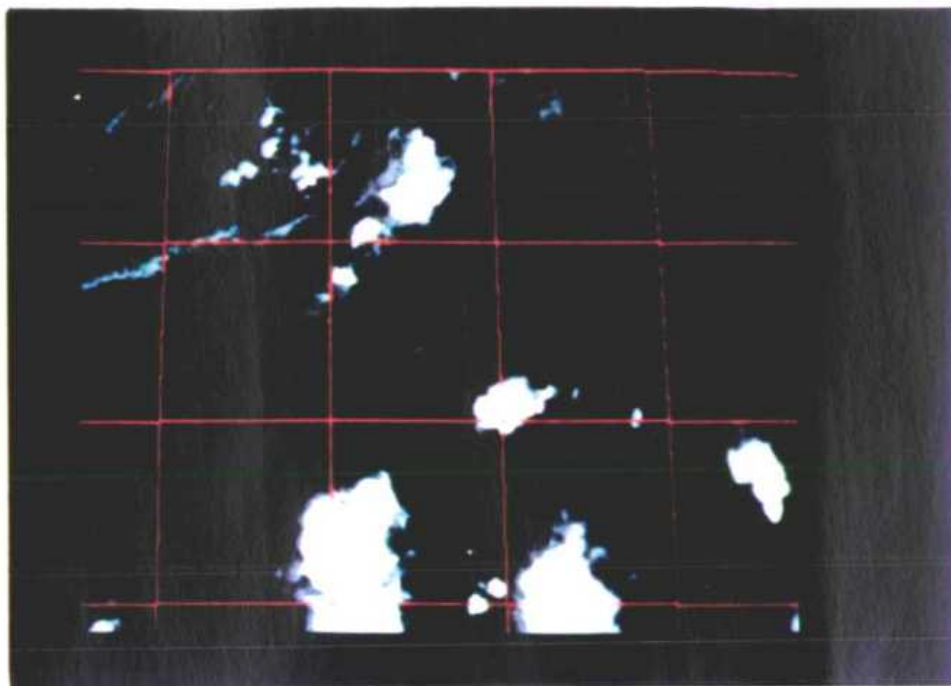


Planche 8c : 1800Z, 2 juillet 1985 (t2)

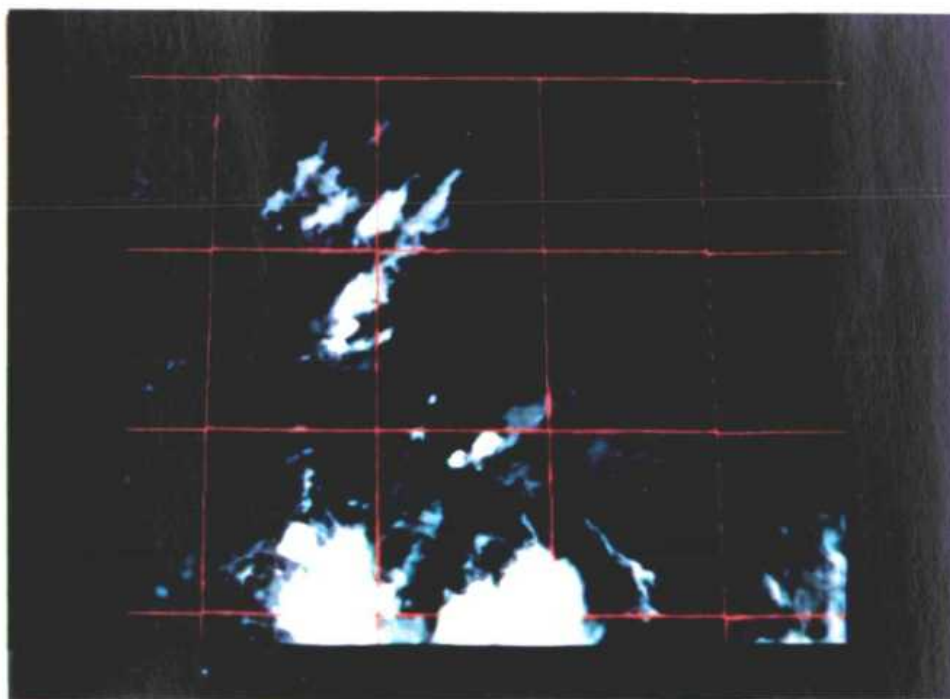


Planche 8d : 00.00Z, 3 juillet 1985.

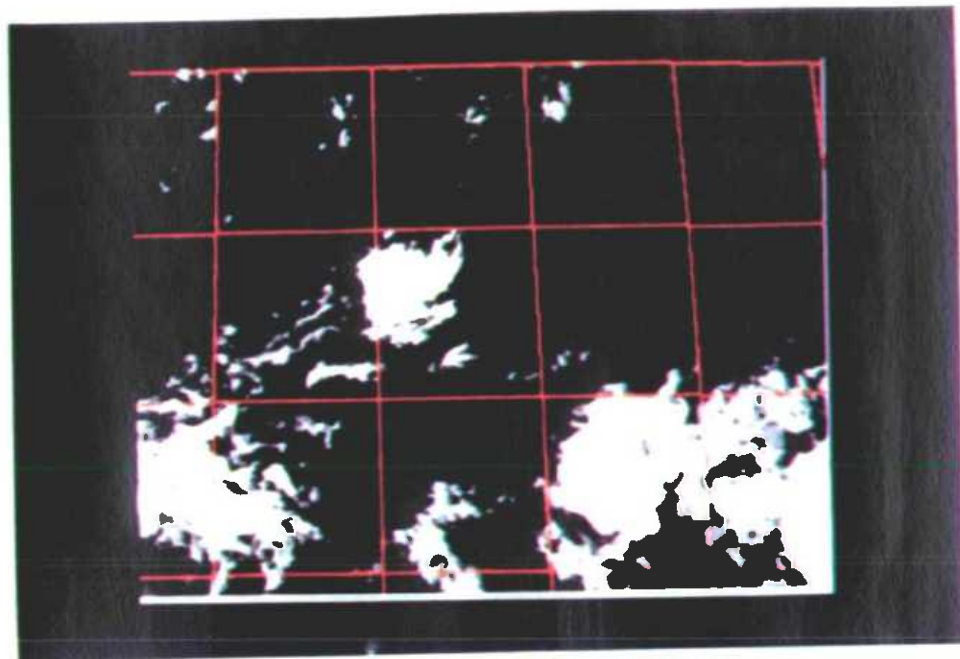


Planche 8e : 0600Z, 3 juillet 1985 (t3).

gnes de grains principales faiblissent et/ou sortent de la zone d'étude en se déplaçant vers le sud-ouest. Un nouvel élément nuageux s'est apparemment rapidement développé in situ dans le sud-est de l'image.

Les principales zones de nuages générateurs de pluie ont été délimitées avec le curseur du I²S pour les débuts et les fins des périodes de 12 heures. Par ailleurs, on a interpolé les situations présentées aux images de la planche 8, en s'appuyant également sur les relevés pluviométriques synoptiques pondérés par le facteur morphoclimatique. Les planches 9 (a), (b) et (c) montrent les résultats au temps t₁ et pour les périodes t₁ à t₂ et t₂ à t₃. Dans les impressions, la situation en début de période (de 12h) est présentée en jaune, celle de fin en magenta.

Pour compléter l'analyse nuageuse sur ces périodes de 12 heures, on tient également compte les situations à mi-période, ainsi que les planches 10 (a) et (b) le montrent pour la première et la deuxième période. L'intérêt de ces analyses intermédiaires (i) est de déterminer au mieux les régions influencées par les nuages pluvieux en cours de période. Ces analyses sont codées en cyan.

Le dernier stade de l'analyse est illustré à la planche 11: on y dessine les limites des "aires d'influence" d'une masse nuageuse donnée pour la période de 12 heures. Les estimations pluviométriques peuvent ainsi éventuellement être calibrées par des stations synoptiques incluses dans les aires d'influence.

Pour la première période (planche 11 (a)), une seule zone nuageuse dispose de données au sol, pour la seconde période, il y en a deux. En dehors des "aires d'influence", la pluviométrie est estimée par les courbes climatiques appropriées à chaque pixel pris séparément" (cfr planche 7a). Dans les aires, le choix de la courbe d'estimation pluviométrique se base sur les relations moyennes observées entre les indices

Planche 9 : Images à contrastes améliorés avec analyse des nuages.

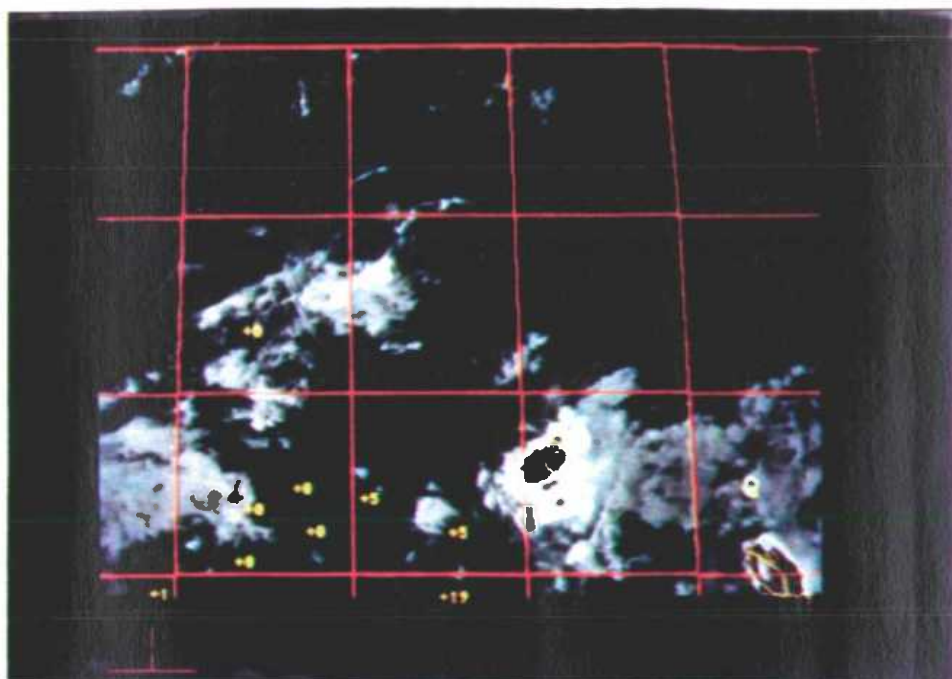


Planche 9a : t1.

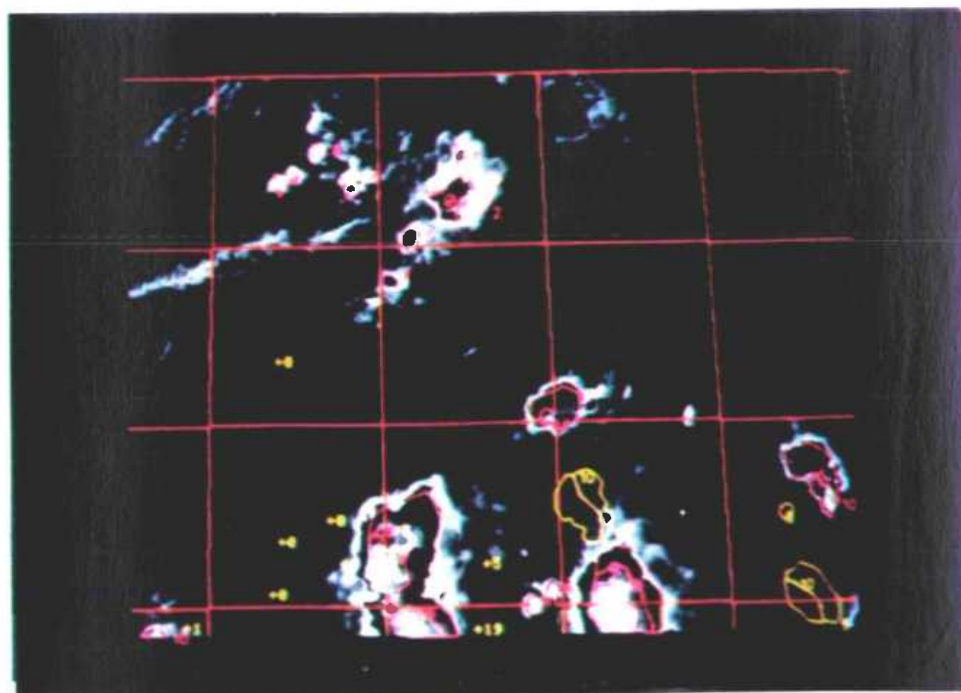


Planche 9b : t1 et t2.

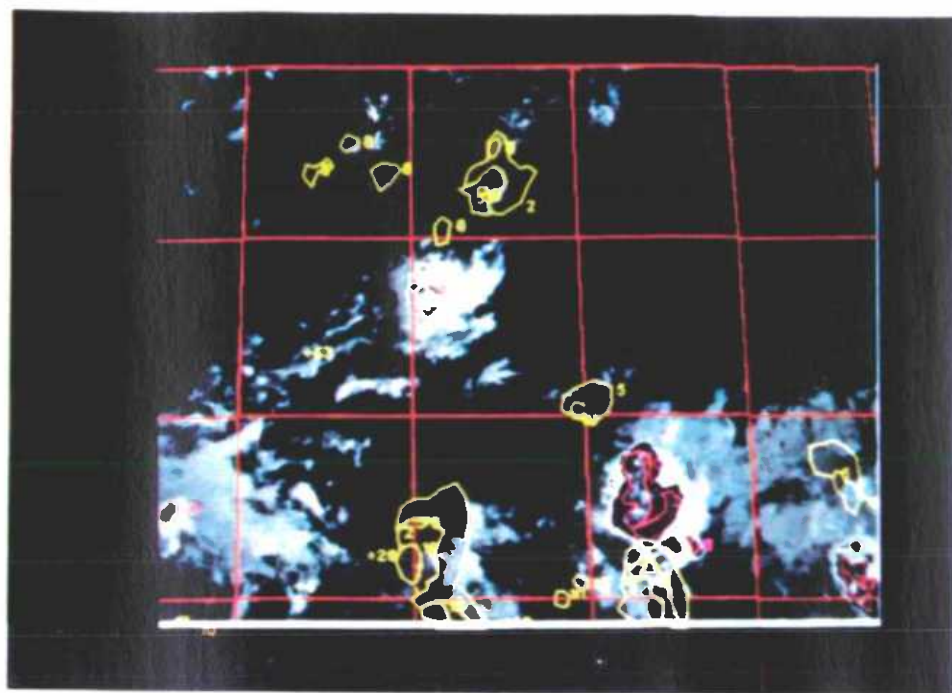


Planche 9c : t2 et t3.

Planche 10 : Analyse intermédiaire de la situation nuageuse.

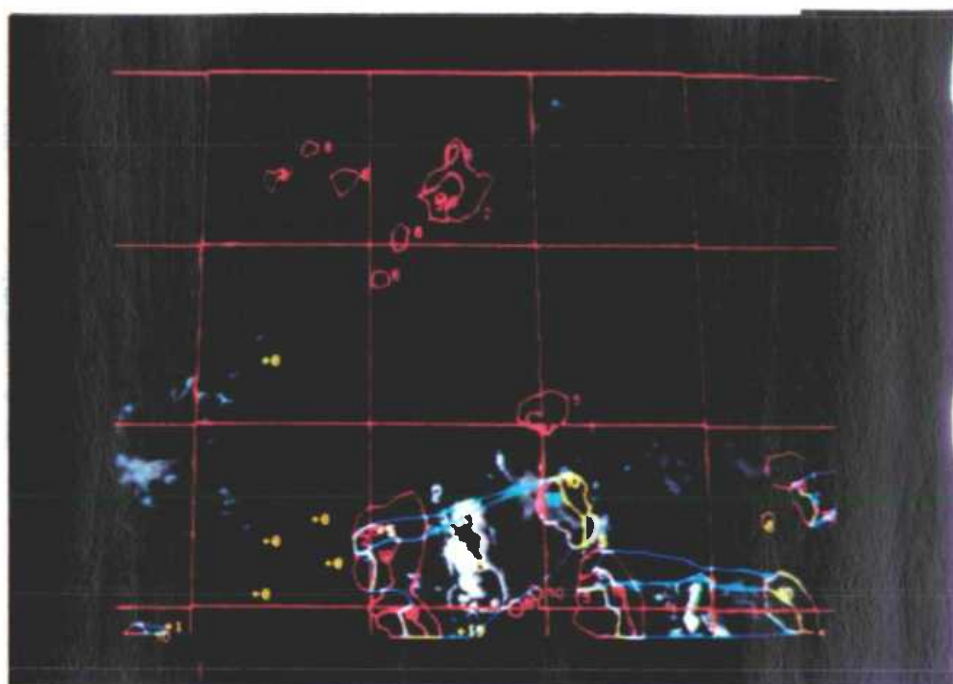


Planche 10a : à partir de la planche 9b, avec les analyses t1 et T2

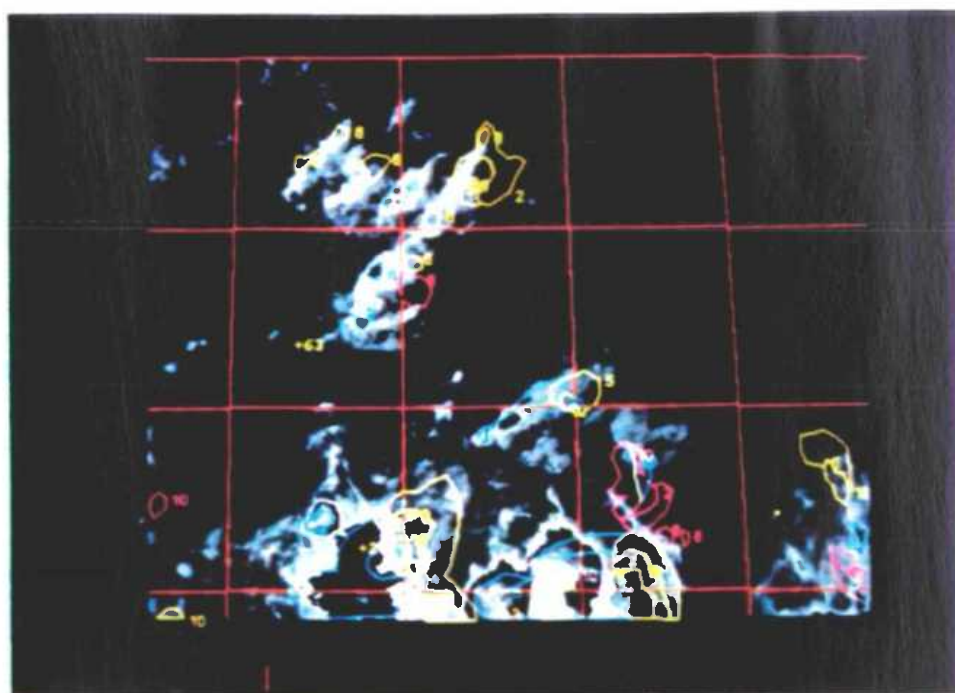


Planche 10b : à partir de la planche 9c, avec les analyses T2 et T3

Planche 11 : Analyse des aires d'influence.

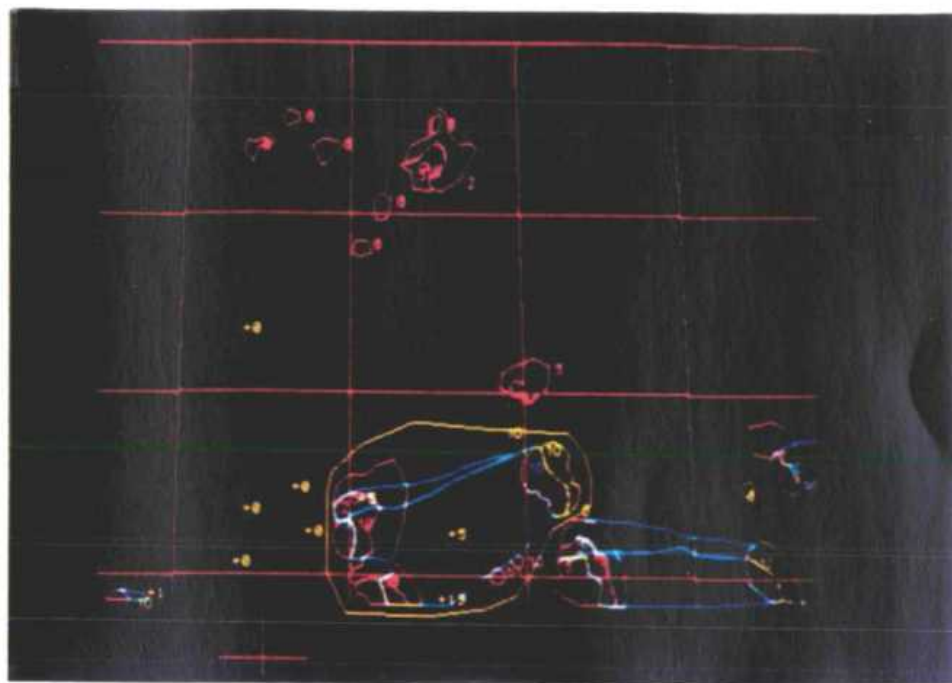


Planche 11a : Periode t1 - t2.

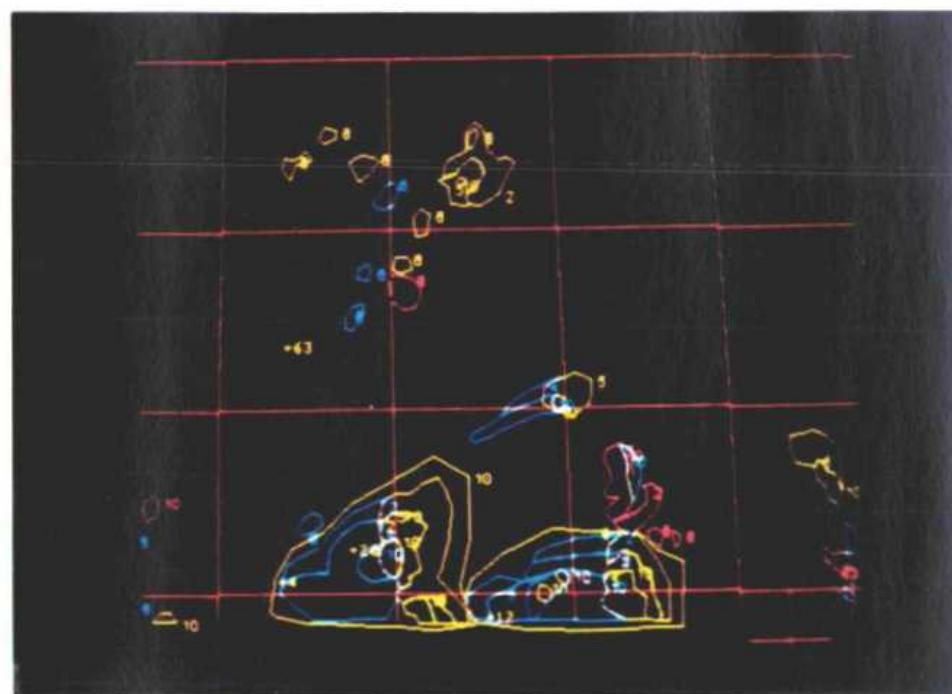


Planche 11b : Periode t2 - t3.

Planche 12 : Estimations pluviométriques et voleurs synoptiques.

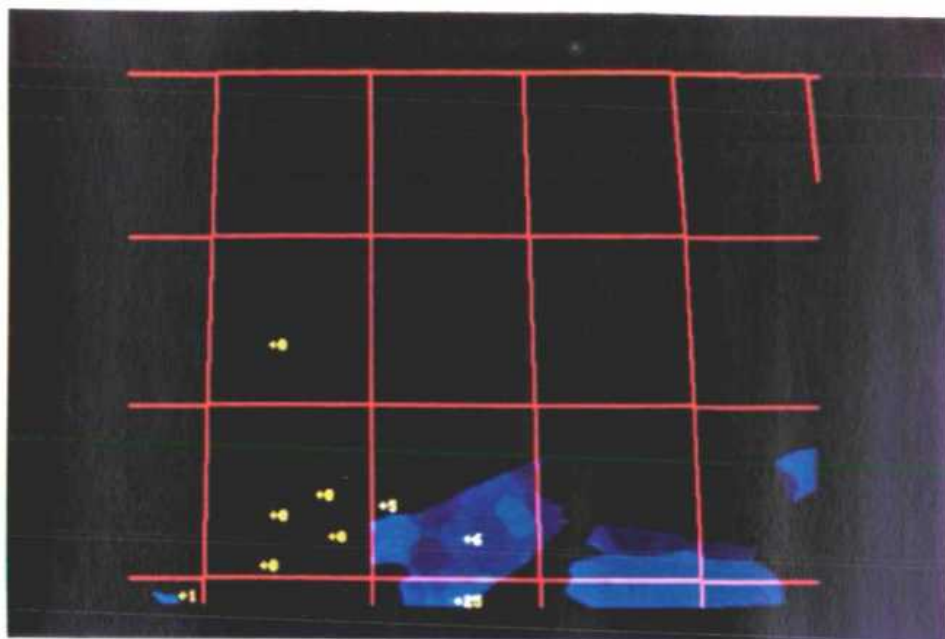


Planche 12a : Période t1 - t2.

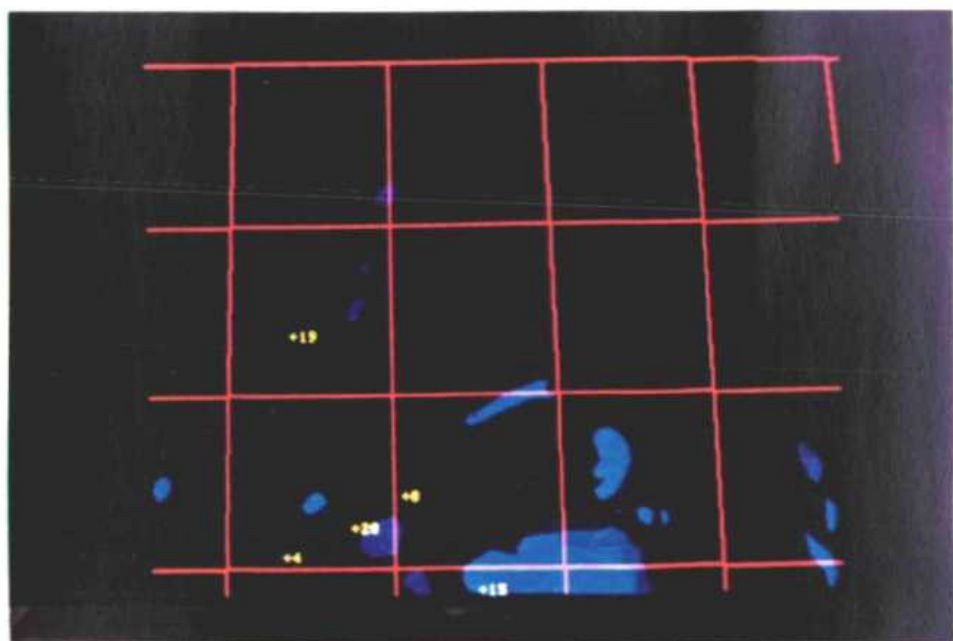


Planche 12b : Période t2 - t3.

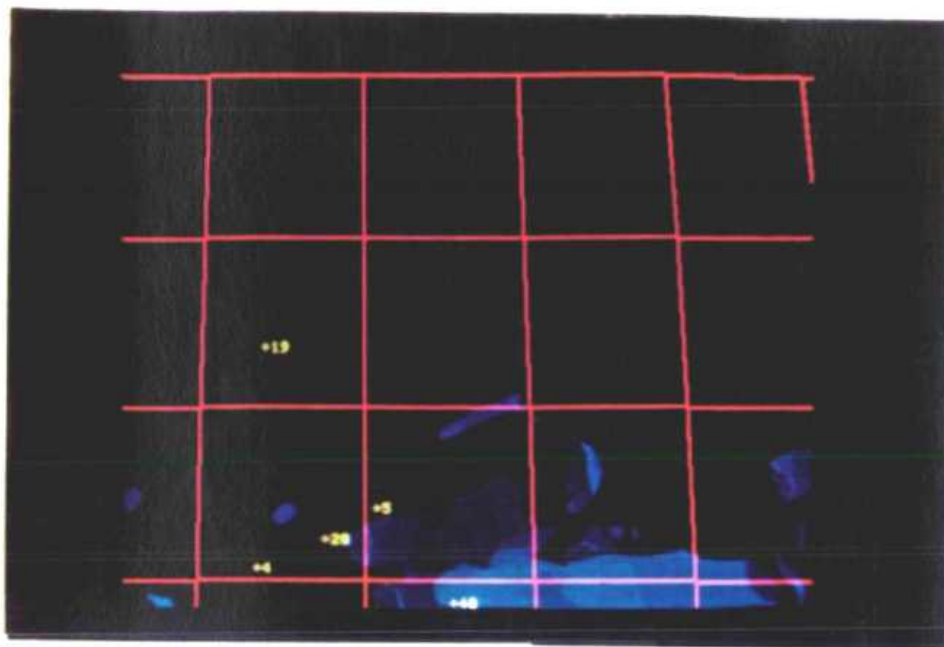


Planche 12c : Période t1 - t3.

nuageux et la pluviosité. On obtient des estimations définitives en pondérant les résultats intermédiaires par le facteur morphopédologique (planche 7 (b)).

Les résultats de l'analyse pour les 2 et 3 juillet sont présentés, à l'échelle du pixel, aux planches 12 (a), (b) et (c) pour les périodes suivantes: 06.00Z/18.00Z le 2 juillet, 18.00Z (2/7)/06.00Z (3/7), 18.00Z (2/7)/18.00Z (3/7).

Les chiffres surimposés correspondent aux reports pluviométriques synoptiques pour les mêmes périodes.

Les résultats pour une fenêtre de taille donnée (3X3 pixels) sont donnés sous forme numérique à la planche 13. La planche 13 (a) montre ainsi que les estimations pluviométriques s'accordent parfaitement aux mesures au sol pour 4 stations synoptiques, mais que l'estimation d'un autre point est nettement exagérée. Cependant, on rappellera ici que les données synoptiques sont ponctuelles et qu'il faut dès lors s'attendre à des disparités avec les estimations satellitaires. La planche 13 (b) soulève un autre type de problème: une station signale 19 mm de pluies dans une région où l'analyse n'en signale pas. Il faut dès lors remettre en question la validité des données de la station.

Les résultats totaux (sur 24 heures) sont illustrés aux planches 13 (c) pour l'ouest de la zone d'étude, et 13 (d) pour l'est, avec une légère superposition.

La correspondance entre estimations satellitaires et relevés au sol est généralement bonne sauf en ce qui concerne le relevé 19mm dans le nord, comme on l'a vu plus haut.

Dans un contexte opérationnel, le BIAS pourrait être amélioré grâce aux points suivants:

1. Des cartes de la situation synoptique pour guider l'analyse.

- . Continuité de l'étude, en appliquant la méthode sur des périodes plus longues et plus continues.
 - . Experience de l'utilisation de la méthode dans le cas de l'Afrique Occidentale. L'étude présente n'a en effet bénéficié d'aucun travail antérieur.
4. Filtrage effectif des données météorologiques en vue d'éliminer celles manifestement (et probablement) fausses. Ceci améliore à la fois la validité de la méthode pour certaines applications particulières (spécialement en ce qui concerne la calibration des "aires d'influence") et le contrôle des résultats.

Planche 13 : Détail des estimations pluviométriques au niveau de blocs de pixels.

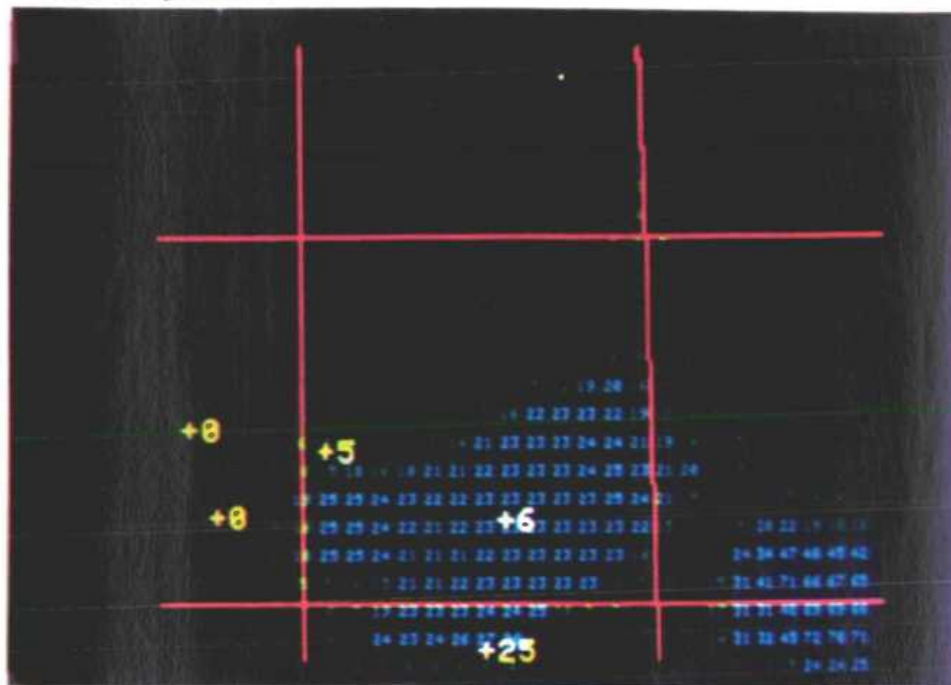


Planche 13a : Période t1 - t2.

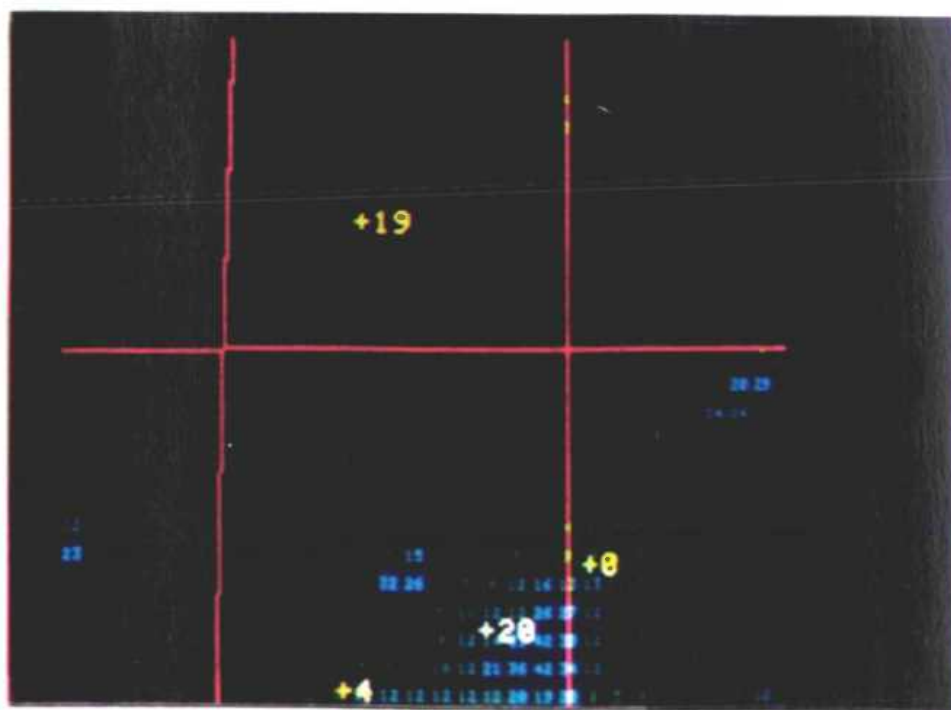


Planche 13b : Période t2 - t3.

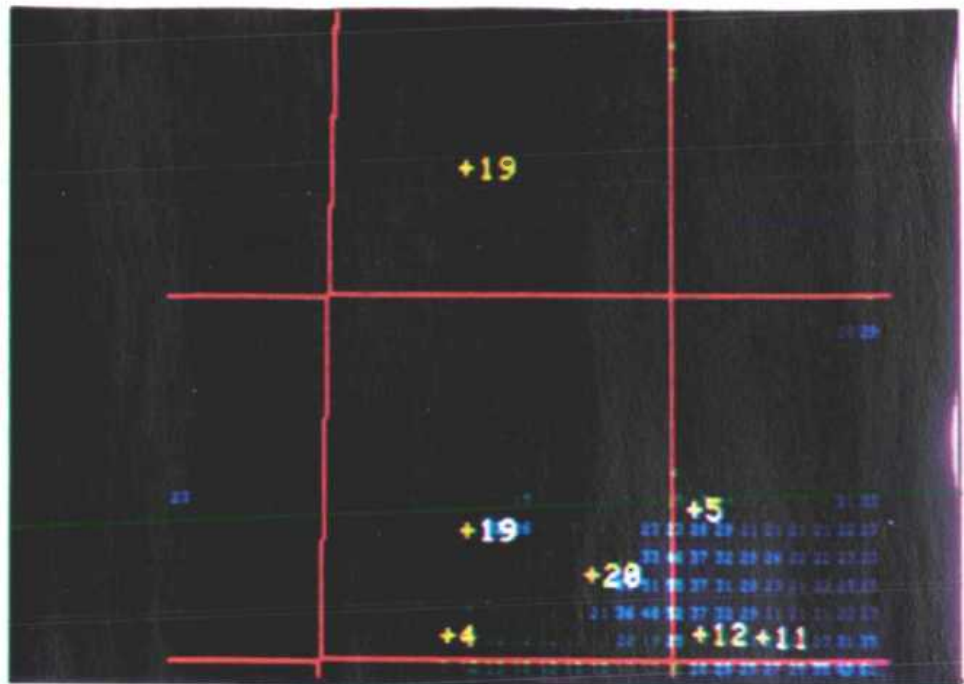


Planche 13c : Période t1 - t3.

VI PROBLEMES, SOLUTIONS EVENTUELLES ET POSSIBILITES FUTURES

Nous avons rencontré au cours de notre étude de nombreux problèmes au niveau des données satellitaires, des fichiers-terrains, des données synoptiques in situ, du logiciel et du matériel informatique sans compter ceux au niveau scientifique intrinsèque.

Nous ne commenterons brièvement que les plus importants à ce stade:

1. Problèmes d'enregistrement des données Meteosat, prétraitements variables des données disponibles à l'Unité de Télédétection (RSU) de Bristol pour juillet et août 84 et 85, restrictions budgétaires: ces trois facteurs ont limité nos analyses au seul été 1985.
2. La digitalisation des cartes du $(R(rd^{-1}))$, utilisées pour transformer les néphanalyses satellitaires en estimations pluviométriques, a mis en évidence le fait suivant: les cartes de moyenne mensuelle du nombre de jour de pluie et de la pluviométrie (Leroux) ont été préparées isolément. Comparées, elles conduisent à certaines impossibilités mathématiques pour le calcul des valeurs $(R(rd)^{-1})$. En conséquence, ces fichiers climatiques ne sont pas pleinement fiables, malgré le filtrage décrit en section V2.
3. Les données pluviométriques disponibles pour le Niger étaient dans l'ensemble assez suspectes, incluant manifestement des valeurs fiables et douteuses, incomplètes ou insatisfaisantes selon d'autres critères. Une certaine mesure de ce problème est obtenue lorsque l'on compare les régressions des estimations pluviométriques PERMIT soit par rapport à l'ensemble des données météorologiques disponibles soit par rapport aux seules données synoptiques les valeurs du R^2 dans ce dernier cas sont en moyenne doubles des valeurs de l'autre. On remarquera également que quelques stations complémentaires ne rapportaient pas ou peu de pluies, pour des périodes de 10 à 30 jours, bien qu'entourés de stations à très forte pluviométrie.

4. La définition des seuils des catégories de nuages est bien évidemment arbitraire, particulièrement difficile pour la discrimination des zones avec ou sans nuages et particulièrement importante pour les estimations pluviométriques des zones NM et NH. En ce qui concerne le premier point, les critères choisis sont valables dans la plupart des cas sauf pour les enregistrements à 03.30Z où les surfaces froides du sol peuvent se confondre avec des nuages bas. Pour le second point, le choix d'une limite de température assez basse peut théoriquement satisfaire à distinguer les nuages pluvieux à profonde convection, mais présente des inexactitudes au niveau des nuages pluvieux à sommet chaud et des nuages froids sans pluie.
5. Les totaux pluviométriques quotidiens, au niveau de chaque pixel, doivent normalement refléter à la fois la présence et la durée des nuages pluvieux. Si cette durée est considérée par BIAS, elle ne l'est pas par PERMIT, du moins sous sa forme actuelle. Ceci explique sans doute quelques points éloignés de la droite de régression liant les estimations cumulées PERMIT et les observations de terrain, pour des périodes de 10 jours.

Voici quelques solutions éventuelles aux problèmes énoncés:

1. Un prétraitement complet des données Meteosat doit être opéré de façon centralisée avant leur distribution aux différents sous-projets
2. Des fichiers climatiques doivent être constitués pour les stations à long terme fiables en vue d'établir des statistiques $(R(rd)^{-1})$ valables
3. Les données pluviométriques du réseau météorologique complémentaire doivent être vérifiées en vue de conduire à une calibration améliorée et à une vérification des estimations satellitaires.
4. Si possible, il serait sans doute intéressant de délimiter les classes nuageuses - du moins partiellement - se-

lon des critères météorologiques ou climatologiques (p.e. température au sol, coupe verticale par radiosonde). Cependant, un tel modèle hybride conduirait à de nouveaux problèmes, par exemple au niveau de l'opportunité - où et quand? - de ces ajustements

5. Si PERMIT devait être appliqué à l'estimation journalière des pluies, une sous routine de pondération des estimations en fonction de la présence des nuages pluvieux sur 1, 2, 3 ou 4 enregistrements serait essentielle. Elle serait de même fort utile pour des périodes de 10 et de 31 jours. Ces possibilités seraient avantageusement évaluées dans une deuxième étude.

Les développements futurs pourraient inclure les points suivants:

1. L'adaptation d'ADMIT au Sahel occidental, ainsi que prévu à l'origine, mais sous une forme de sous-routine de suivi des dilatations nuageuses vers l'ouest (cfr supra). Il serait particulièrement intéressant de comparer ADMIT, PERMIT et la méthode de l'Université de Reading en vue d'établir l'avantage éventuel des méthodes recourant à un emploi plus ou moins intensif des données satellitaires.
2. Une analyse et une comparaison des données NOAA-NDVI GAC (grandes surfaces) pour les étés 84 et 85, comme prévu à l'origine. Quoique de résolution grossière par rapport aux données LAC ou HRPT, les données GAC permettent vraisemblablement le suivi de l'environnement au niveau le plus élevé d'une méthode hiérarchique: elles fournissent des premières informations au niveau des récoltes, de l'état des pâtures, et permettent de choisir économiquement et efficacement les données - dans le temps et l'espace - à traiter à un deuxième ou troisième degré (de plus en plus précis).
3. Des tests plus exhaustifs de PERMIT, BIAS et ADMIT, sur de plus longues périodes en Afrique Occidentale. Etablissement de relations quotidiennes valables entre

PERMIT (méthode IR objective, utilisable avec des satellites géostationnaires et/ou à orbite polaire), BIAS (méthode interactive utilisable sur ces mêmes types de satellites, avec l'apport éventuel de données conventionnelles) et ADMIT (méthode IR/VIS objective, utilisant les données des satellites géostationnaires).

4. Développement de PERMIT et d'ADMIT en vue de leur calibration - là où c'est possible - par des données météorologiques conventionnelles (stations synoptiques) au lieu de statistiques climatologiques ($R(rd)^{-1}$)

VII REMERCIEMENTS

L'unité de télédétection de l'Université de Bristol tient à remercier les Communautés Européennes pour le soutien financier de ce projet, inscrit dans le cadre de leur programme "Lutte contre la faim dans le monde". Nous voulons également remercier les docteurs J. Rodda et J. Stewart de l'Institut d'Hygrologie du NERC pour leur coordination efficace et sympathique de notre projet avec d'autres travaux entrepris simultanément en diverses institutions du Royaume-Uni.

L'équipe de l'Office Météorologique de Grande-Bretagne nous a accordé une aide et des conseils précieux en certains domaines fondamentaux; d'autre part, le Département de Météorologie de l'Université de Reading nous a fourni les données Meteosat et des stations météorologiques complémentaires, ce dont nous lui sommes reconnaissants.

Nos remerciements vont également à G. D'Souza de l'Unité de Télédétection de l'Université de Bristol, pour son assistance en informatique, au docteur A.R. Harrison, de la même Unité, pour ses critiques et ses suggestions constructives, principalement en ce qui concerne la préparation des données climatologiques et de terrain, ainsi qu'à Mesdames G.M. Barrett et S.M. Daby pour la mise en page du rapport final.

VIII BIBLIOGRAPHIE

- Atlas, D. and Thiele, O.W. (eds.) (1981): Mesures pluviométriques depuis l'espace
NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md, USA.
- Barrett, E.C. (1970): Estimation pluviométrique mensuelle à partir de données satellitaires
Monthly Weather Review, 98 (1970), p. 322-27
- Barrett, E.C. (1974): La climatologie à partir des satellites
Methuen, London 418 pp.
- Barrett, E.C. (1985): AgRISTARS, volet 5: Guide de l'utilisateur du I²S
Rapport final au Département US du commerce, sous contrat de coopération N° NA85AA-H-RA010, 44 pp
- Barrett, E.C. & Grant, C.K. (1978): Une étude des nuages par Landsat 2 et ses implications pour l'élaboration de systèmes d'observation météorologiques futurs,
J. of British Interplanetary Society Vol. 31. p.3-10
- Barrett, E.C. & Martin, D.W. (1981): L'utilisation des satellites pour le suivi des pluies,
Academic Press, London, England. 366 pp.
- Barrett, E.C. & Harris, R. (1975): Une néphanalyse satellitaire améliorée,
Meteorological Magazine, 104, 1975. p. 9-16.

- Barrett, E.C. & Harris, R. (1977): Néphanalyses dans l'IR, Meteorological Magazine, 106, 1977, p.9-16
- Barrett, E.C., Beaumont, M.J., Richards, T.S. & Power, C.H. (1985a): Evaluation satellitaire des événements pluvieux exceptionnels en mai 1981 au Sultanat d'Oman (Autorité publique des ressources en eau, Ruwi, Oman, PAWR, 85-27, 1985, 35 pp.
- Barrett, E.C., Beaumont, M.J., Richards, T.S. & Power, C.H. (1985b): Evaluation satellitaire des événements pluvieux exceptionnels en août 1983 au Sultanat d'Oman (Autorité publique des ressources en eau, Ruwi, Oman, PAWR, 85-27, 1985, 45 pp.
- Barrett, E.C. & D.'Souza, G. (1985): Développement d'une série de résultats objectifs dans le cadre du suivi de la sécheresse en Afrique par Meteosat, Rapport final pour ESA et EARSel (31 Dec. 1985) ESA contrat N°. 6137/84/D/JS(SC).
- Barrett, E.C. & Power, C.H. (1985): Evaluation satellitaire des pluies exceptionnelles en juin 1977 au Sultanat d'Oman Autorité publique pour les ressources en eau, Ruwi, Oman, PAWR 85-25. 38 pp.
- Bunting, J.T. & Hardy, K.R. (1984): Identification des nuages et caractérisation satellitaire d'une atmosphère nuageuse Eds. Henderson-Sellers, A. Taylor and Francis, London, p.203-240.

Dennett, M.D., Elston, J. and
Rodgers, J.A. (1985):

Une nouvelle approche des
tendances pluviométriques
au Sahel,
Journal of Climatology, vol.
5, p. 353-361.

E.S.O.C. (1985):

Rapport de calibration de
Meteosat 2 (N° 13) pour
juillet-septembre 1985
MEP/MET, Meteosat
Exploitation Project,
E.S.O.C., Darmstadt, W.
Germany, Oct. 1985

Goldie, N., Moore, J.G. & Austin E.E.
(1958):

Température de l'atmosphère
supérieure dans le monde,
Geophysical Memoirs N° 101
vol. XIII (1), HMSO, London,
1958.

Griffiths, J.F. (ed.)(1972):

Climats d'Afrique,
Vol. 10, world Survey of
Climatology, ed. Landsberg,
H.E., Elsevier, Amsterdam,
Ch. 6, p.193-221.

Harris, R. (1982):

Néphanalyse à l'aide d'ordi-
nateur: l'état de la question
Remote Sensing and the
Atmosphere, Proceedings of
Annual Technical conference
of the Remote Sensing
Society, Liverpool 1982
p.248-254.

Henderson-Sellers, A. (ed.) (1984):

Etude par satellite d'une
atmosphère nuageuse: la
Troisième Planète
Taylor and Francis, London,
340pp.

- Leroux, M. (1983): Les climats d'Afrique tropicale,
Champion, Paris, 24pp plus
259 maps.
- Lovejoy, S. and Austin, G.L. (1979): La délimitation des zones de pluies à partir de données satellitaires vis/IR pour GATE et les latitudes moyennes
Atmosphere-Ocean, 17,
p.77-92.
- Meteorological Office, (1982): Guide de l'observateur,
HMSO, London, pp.220.
- Moses, J.F., and Barrett, E.C.
(sous presse) Procédures interactives d'estimations pluviométriques à partir de l'imagerie satellitaire et des observations de surface,
Proceedings of the
International Workshop on
Hydrologic Applications of
Remote Sensing Technology,
Cocoa Beach, Florida, 1985, LAHS.
- Ojo, O. (1977): Les climats d'Afrique Occidentale,
Heinemann 1977, pp. 216
- Shenk, W.E. and Holub, R.J. (1973): Une méthode multispectrale d'identification des nuages à partir de Nimbus-3 MRIR
présenté à la conférence sur
les radiations atmosphériques,
Fort Collins, Colorado
- Thompson, B.W. (1965): Les climats d'Afrique,
Oxford
University Press, London,
132 pp.

CARTOGRAPHIE DE L'HUMIDITE DES SOLS
ET DES PRECIPITATIONS AU SAHEL

par

James R. MILFORD

et

George DUGDALE

Département de Météorologie
Université de Reading

SOMMAIRE

Page

1.0 INTRODUCTION

- 1.1. Estimation des précipitations à partir des satellites météorologiques
- 1.2. Estimation de l'humidité des sols à partir de satellites météorologiques
- 1.3. Expériences et données de terrain.

2.0. ESTIMATIONS PLUVIOMETRIQUES

- 2.1. Buts 4
- 2.2. Cadre de l'étude 4
- 2.3. Objectifs et méthodes 9
- 2.4. Résultats et discussion 11

3.0. ESTIMATIONS DE L'HUMIDITE DES SOLS 24

- 3.1. Buts 24
- 3.2. Cadre de l'étude 24
- 3.3. Objectifs et méthodes 27
- 3.4. Résultats et discussion 28

4.0. CONCLUSIONS

5.0. REMERCIEMENTS

6.0. BIBLIOGRAPHIE

ADDENDA: Les archives de données TAMSAT à l'Université de Reading.

CARTOGRAPHIE DE L'HUMIDITE DES SOLS ET DES PRECIPITATIONS AU SAHEL

1.0. INTRODUCTION

Le Département de Météorologie de l'Université de Reading étudie depuis 1981 les applications possibles du satellite géostationnaire METEOSAT dans le domaine de l'agrométéorologie, avec le soutien de l'Administration britannique pour le développement Outre-Mer. Ce rapport décrit une partie des travaux effectués, concernant et partiellement financés par le contrat présent.

1.1. ESTIMATION PLUVIOMETRIQUE PARTIR DES SATELLITES METEOROLOGIQUES

Il existe deux types courants de satellites météorologiques en fonction: les géostationnaires, dont Meteosat, et ceux à orbite polaire. Chacun de ces satellites transmet des données concernant la réflectance et la température des surfaces survolées, respectivement dans le visible et l'infra-rouge thermique.

Meteosat fournit une imagerie avec une résolution de 5kms, 48 fois par jour, alors que le satellite à orbite polaire fournit des données à plus haute résolution mais seulement deux fois par jour. Un accord financier a été atteint en vue de maintenir en fonction le satellite géostationnaire pour la décennie à venir.

Aucun canal satellitaire ne donne des informations directes à propos des pluies; ces renseignements doivent être déduits des caractéristiques nuageuses observées par satellites. Généralement la pluie est générée par des nuages s'étendant très haut dans l'atmosphère et par là très froids qui, à cause de leur teneur élevée en eau sous forme liquide, apparaissent également très réfléchants dans le visible. Au Sahel les pluies proviennent majoritairement d'orages bien développés surtout durant la nuit. C'est pour cela que nous avons concentré nos recherches sur les

caractéristiques thermiques des sommets des cumulonimbus. Deux méthodes de ce type sont décrites dans la section 2. Elles se basent sur la relation liant pluviosité et présence de nuages dont le développement vertical atteint des régions atmosphériques plus froides que -50°C .

1.2. ESTIMATION DE L'HUMIDITE DES SOLS A PARTIR DES SATELLITES METEOROLOGIQUES

Les mesures d'humidité des sols à partir du canal IR thermique de Meteosat se basent sur l'inertie thermique de ceux-ci: sous ciel dégagé aux tropiques, la variation journalière des températures de la surface d'un sol nu dépend principalement du type pédologique et de la teneur en humidité des 10 à 20 cms superficiels de ce sol. Ainsi, si on peut mesurer, par satellite, cette variation journalière on peut en déduire l'humidité des couches superficielles des sols. Les difficultés d'application de la méthode se situent aux niveaux suivants: interférences atmosphériques sur la réponse thermique des sols, hétérogénéité de la surface mesurée instantanément, effets des nuages, des aérosols, de la végétation.

La section 3 reprend les stratégies étudiées pour contourner ces problèmes. Elle présente aussi les potentialités et les limites de la méthode pour le Sahel.

1.3. EXPERIENCES ET DONNEES DE TERRAIN

L'estimation satellitaire de la pluviosité et de l'humidité du sol recourt entre autres à l'utilisation de relations empiriques, directes ou englobées dans des modèles schématiques des processus physiques en place. Il est dès lors indispensable de disposer des mesures de surfaces par rapport auxquelles les données satellitaires peuvent être calibrées et contrôlées. Pour satisfaire cette exigence, nous avons recueilli à la fois des données météorologiques conventionnelles et des données issues de sites particuliers établis en fonction des besoins de l'étude. Les figures 1.1.(a) et (b) localisent la zone d'étude dans le cadre de l'Afrique Occidentale et la distribution des sources de données en République du Niger. On a par ail-

leurs réalisé quatre missions de terrain sur les sites-tests. Enfin, les archives TAMSAT* utilisée sont reprises en annexe (Addenda).

L'interprétation des données satellitaires, délivrées à l'échelle d'un pixel de surface assez grande, demande une connaissance de la distribution spatiale des phénomènes étudiés en vue d'adapter les mesures ponctuelles de terrain à l'échelle des mesures satellitaires. On a ainsi réalisé une expérience (juillet-août 1985) pour étudier la variabilité de la pluviosité et de l'humidité du sol à l'intérieur d'un carré de 10 X 10kms à Ibecetene (15°2N, 5°8E). Certains résultats de cette expérience sont repris dans les sections concernées. L'équipe TAMSAT a également pris la responsabilité de coordonner l'action d'autres collaborateurs du projet britannique et de leur fournir des contacts locaux pour les missions de terrain.

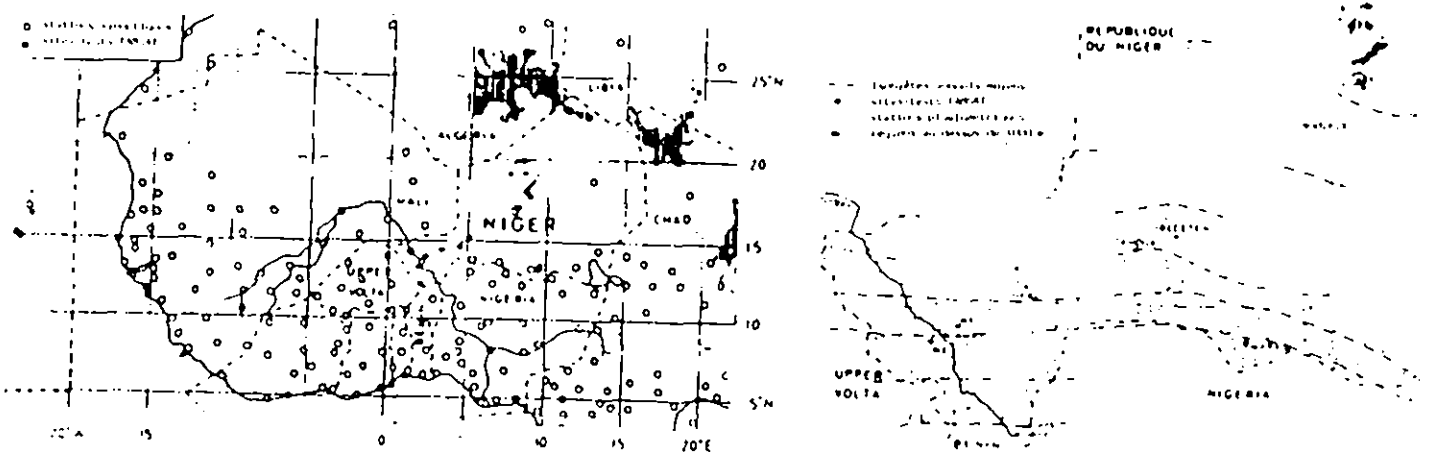


Figure 1.1

a - Carte d'Afrique Occidentale

b - Carte du Niger : stations météorologiques et sites-tests TAMSAT

* Tropical Agricultural Meteorology using SATellite and other data, programme de recherche en agramétéorologie tropicale réalisé au Département de Météorologie de l'Université de Reading.

2.0 ESTIMATIONS PLOUVIOMETRIQUES

2.1 BUTS

- 2.1.1. Utiliser les données couramment disponibles des satellites météorologiques en vue d'estimer, à différentes échelles, la pluviosité au Sahel. Développer ces techniques d'estimation jusqu'à un niveau opérationnel.
- 2.1.2. Définir le degré de précision des différentes méthodes et faire des recommandations dans le domaine des estimations pluviométriques satellitaires.

2.2. CADRE DE L'ETUDE.

2.2.1. Caractéristiques des orages

La quasi-totalité des pluies au Sahel sont d'origine convective et sont issues de systèmes orageux bien organisés connus sous le nom de "lignes de grains d'Afrique Occidentale". Un bon nombre d'auteurs, depuis Hamilton et Archbold (1945) jusque Bolton (1984), ont décrit les caractéristiques de ces orages aux échelles synoptiques et moyennes. Milford et Dugdale (1984) ont examiné l'utilisation de certaines dans le cadre d'études satellitaires, comme vu ci-dessous:

les lignes de grains couvrent sur imagerie satellitaire des surfaces de l'ordre de 10^5 km².

les lignes de grains se déplacent vers l'ouest à environ 60 km /h.

la majorité des pluies sont associées aux orages actifs récents à la bordure ouest des groupes de nuages.

les lignes de grains ont une durée de vie comprise entre quelques heures et plusieurs jours.

la pluviosité varie rapidement dans le temps et l'espace.

les pluies tombent majoritairement durant la nuit.

vii les cellules actives sont associées à des températures de nuages inférieures à -60°C .

viii toutes les zones nuages plus froides que -60°C ne sont pas forcément associées à une activité pluvieuse.

2.2.2. Variabilité spatiale de la pluviosité

La pluie provenant d'un orage déterminé varie rapidement avec la distance et la position des sites par rapport aux cellules orageuses les plus actives. Ces cellules ont une extension horizontale de quelques 10 kms.

La fig. 2.1. montre la diminution de la corrélation des pluies observées (par rapport à Niamey) lors de gros orages en fonction de la distance croissante (par rapport à Niamey).

Ceci implique que pour un orage et un site donné - la moyenne climatique pluviométrique (c'est-à-dire à long terme) d'un événement donnera une meilleure estimation pluviométrique de cet orage qu'une mesure située à plus de 15 kms du site en question.

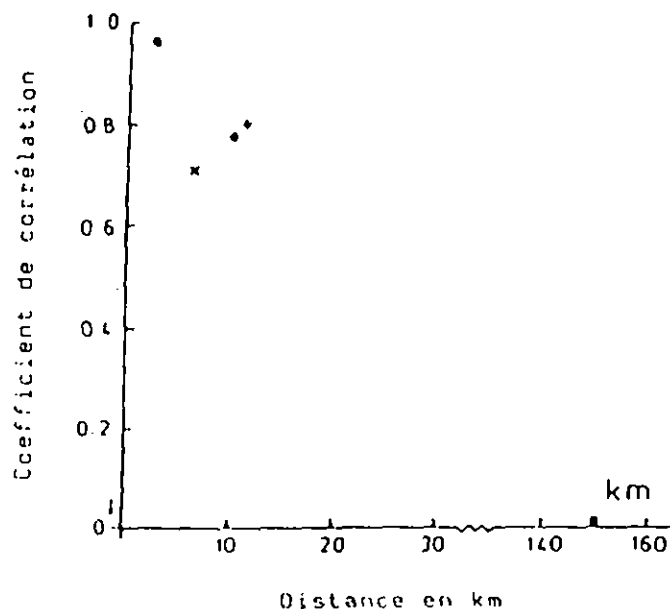
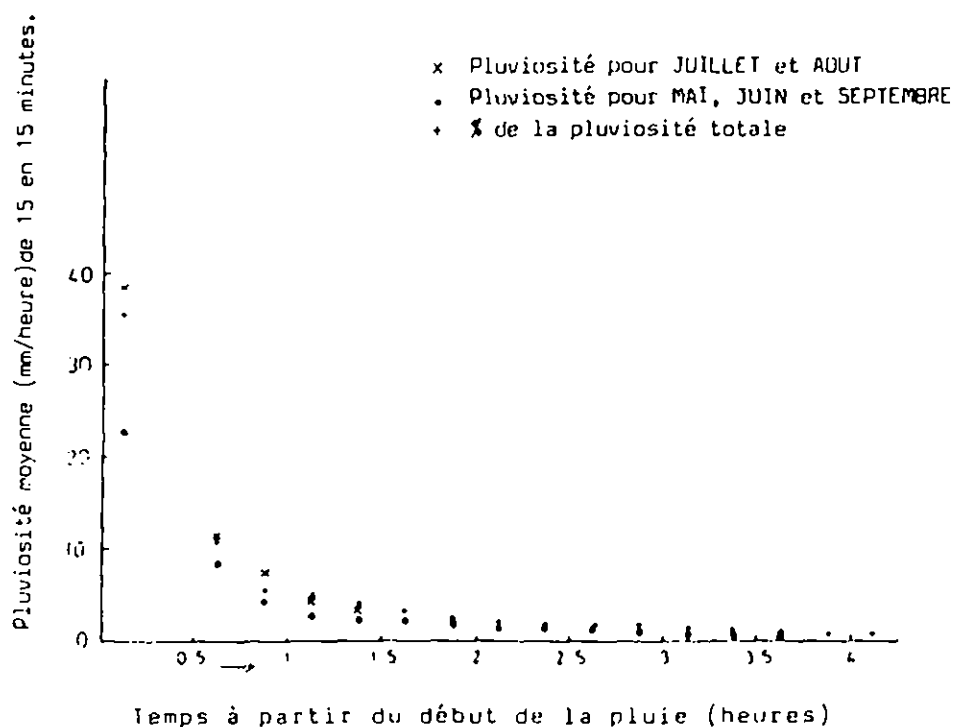


Figure 2. Corrélation des pluies observées sur des sites autour de Niamey (pluies en provenance de systèmes convectifs à grande échelle)

2.2.3. Imagerie satellitaire et lignes de grains

Une série typique d'images représentant le développement d'une ligne de grains est donnée à la figure 2.3. (ligne se propageant au sud-est du Niger). La plupart des pluies sont concentrées dans les premiers (donc à l'ouest) 50 kms, approximativement, des orages. Ce fait est illustré à la figure 2.2. obtenue à partir des enregistrements pluviométriques des principaux orages au-dessus de l'aéroport de Niamey (13°5N, 2°5E) entre 1975 et 1979. La durée des précipitations provenant de tels orages est typiquement comprise entre 2.5 et 4.5 heures alors que la couverture nuageuse persiste deux fois plus longtemps.



Pluviosité moyenne dans les lignes de grains au-dessus de Niamey (moyenne sur des intervalles de 15 minutes) en fonction du temps

Figure 2.2 : Schéma de répartition des pluies dans les lignes de grains.



1500 GMT

1800 GMT

2100 GMT

2400 GMT

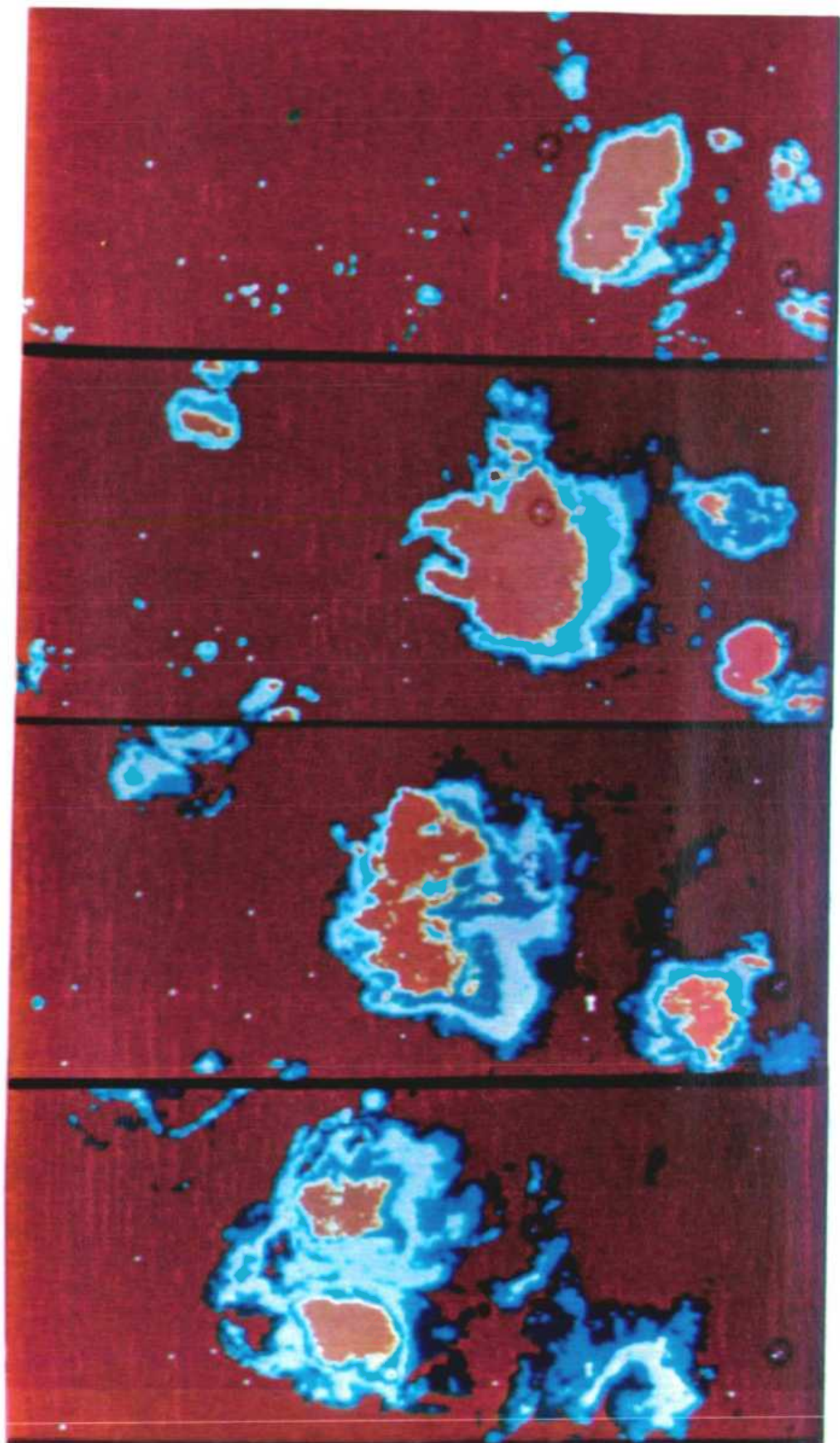


Figure 2.3 : Série d'images fausses-couleurs d'une ligne de grains générée au-dessus du lac Tchad (27 août 1982 à 1500 GMT) et se déplaçant vers l'Ouest durant les neuf heures suivantes. Les images sont obtenues à partir du canal IR thermique de METEOSAT. L'échelle des couleurs correspond à des pas de 10°C depuis les zones de surfaces ($T^{\circ} > -20^{\circ}\text{C}$) jusqu'au centres orageux les plus actifs ($T^{\circ} < 60^{\circ}\text{C}$).

2.2.4. Estimations pluviométriques partir données satellitaires

Pour estimer la pluviosité d'un événement orageux particulier au dessus d'une région de plusieurs km², il faut d'abord identifier les zones actives proches de la bordure de tête de la ligne de grains et différencier les nuages générateurs ou non de pluies dans la couverture nuageuse en retrait des zones les plus actives. Les indicateurs de ces cellules actives sont la croissance des sommets nuageux et une délimitation très marquée en bordure des lignes de grains.

On peut envisager un algorithme de la forme

$$R = a_0 + a_1 \frac{\partial \lambda}{\partial t} + a_2 \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{mm h}^{-1}) \quad (1)$$

où R, la pluviosité instantanée, dépend

- de la présence de nuages, plus froids qu'une température donnée

du taux de croissance des nuages

du gradient horizontal local des températures dans la ligne de grains

Les coefficients a_0 , a_1 , a_2 dépendront de la zone climatique et de la structure des orages. Il faut apporter un grand soin à la mesure des termes "taux de croissance" et "gradient de température" pour qu'ils soient à la fois appropriés aux caractéristiques de l'orage et à l'échelle de mesure de la pluviosité. On obtient la pluviosité quotidienne en intégrant la valeur R à partir de toutes les données satellitaires adéquates disponibles pour la journée. A long terme, la pluviométrie sur de grandes surfaces peut-être estimées à partir de la durée de couverture en nuages froids (couverture instantanée intégrée dans le temps), les autres termes ("gradient" et "croissance") devenant négligeables. Un même raisonnement peut être tenu pour la pluviométrie à long terme sur de petites surfaces pour autant qu'il y a plusieurs orages et peu d'effets

orographiques, autrement dit que les deuxième et troisième termes de l'équation tendent vers zéro.

On a donc (sur plusieurs jours) (avec D = durée totale de la couverture en nuages froids).

2.3. OBJECTIFS ET METHODES

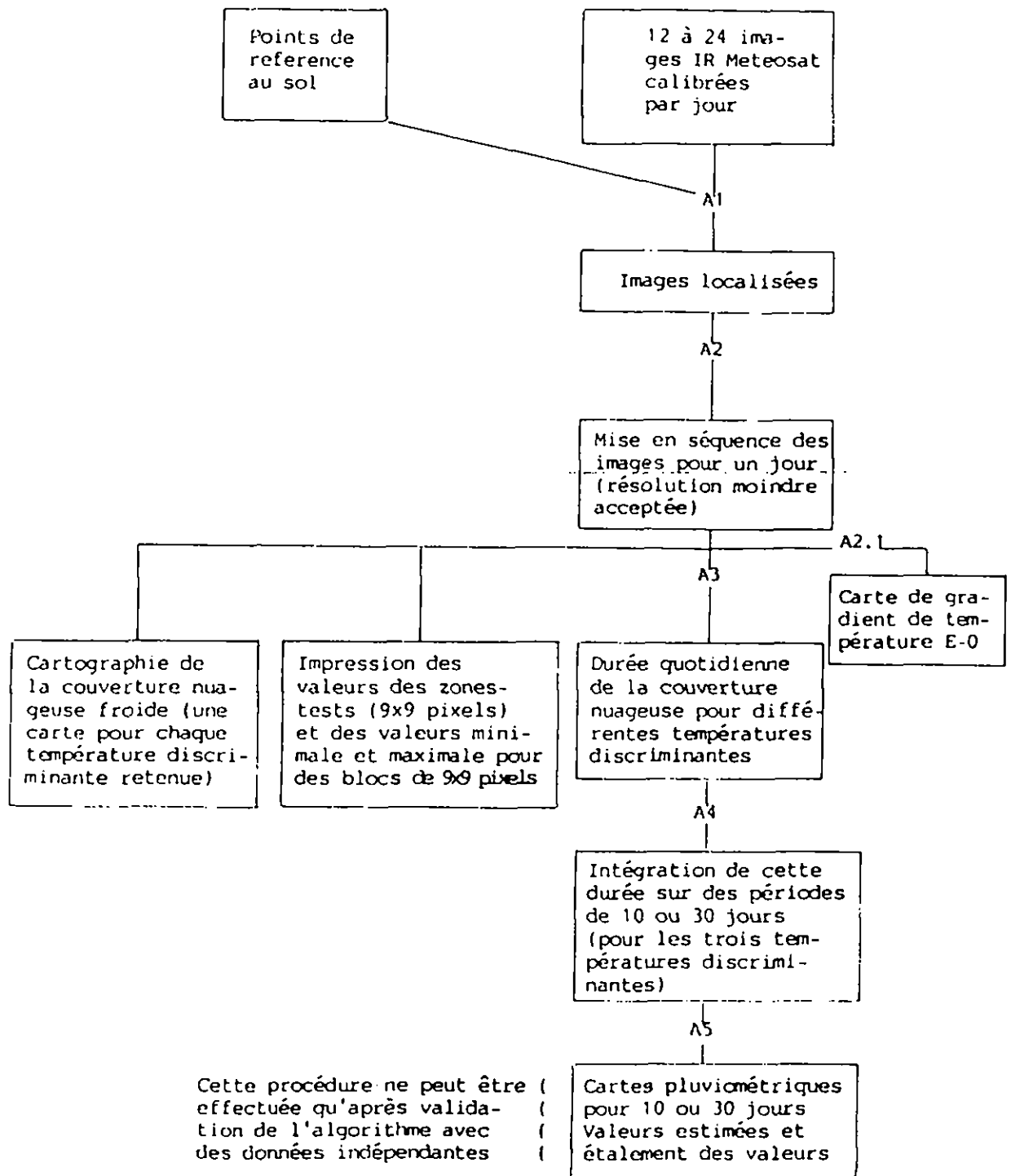
On reprend dans chacun des points suivants un objectif et la méthode élaborée pour l'atteindre.

2.3.1. Etablir, à partir d'une étude de cas, les valeurs approximatives des coefficients a_0 , a_1 et a_2 .

Les données satellitaires de 1985 ont été utilisées pour suivre l'évolution des lignes de grains au travers de la République du Niger. On a utilisé quelques 21 images numériques quotidiennes; les données au sol correspondantes ont été obtenues par le réseau synoptique, fournissant de 3 en 3 heures les valeurs de divers paramètres météorologiques et par quelques 120 stations pour les relevés pluviométriques. C'est le Service Météorologique National de la République du Niger qui a fourni les données au sol.

2.3.2. Traiter plusieurs mois d'enregistrements satellitaires pour extraire les paramètres nuageux nécessaires à la validation des algorithmes et au calcul des coefficients. Les données satellitaires (21 enregistrements IR quotidiens) ont ainsi été systématiquement traités pour les mois de juin, juillet et août, comme le montre la figure 2.4.

2.3.3. Evaluer la valeur statistique des coefficients calculés. Les régressions simples entre la durée de la couverture nuageuse froide et la pluviométrie observée ont été effectuées pour des périodes de 10 et 30 jours, et des limites discriminantes de température de -50°C , -60°C et -70°C . On a également relevé les écarts interquartiles de la pluviométrie pour les différentes périodes pour tester la valeur discriminante de la technique.



- A1 Correction manuelle de la localisation de l'image
 A2 Vérification de la localisation grâce à la séquence d'images quotidiennes (avec la meilleure résolution possible)
 A2.1 Calcul du gradient de la température au travers d'alignements de 5 pixels
 A3 Identification par chaque image et chaque image des températures inférieures à des seuils donnés, puis intégration à l'échelle de la journée (seuils -50°C, -60°C et -70°C)
 Intégration des images de durée journalière de couverture nuageuse froide.

Figure 2.4 : Diagramme montre le diagramme des données pour la cartographie de la pluviométrie pour des périodes de 10 et 30 jours

3.4. Etablir la variabilité spatiale réelle de la pluviométrie, à une échelle de 2 à 10 kms en vue d'estimer la précision de la technique. Un réseau de pluviomètres, spécialement installés dans ce but, selon une maille de 2 X 2 kms dans un carré de 10 X 10 kms, à Ibecetene, a permis de mesurer la pluviosité après chaque précipitation.

2.3.5. Tester la variabilité spatiale et temporelle des coefficients.

On a traité séparément les différents mois de la saison des pluies pour établir les meilleurs coefficients possibles pour des périodes distinctes de 10 à 30 jours.

2.3.6. Développer le logiciel d'estimation pluviométrique pour des périodes de plusieurs jours jusqu'à un niveau quasi-opérationnel. Les logiciels ont d'abord été conçus sur le système de traitement d'images ARIES II et ensuite adaptés au I²S/HP3000 qui l'a remplacé.

2.4. RESULTATS ET DISCUSSION

2.4.1. Etude de cas

L'étude concrète a confirmé que la température de -60°C discriminait généralement au mieux les nuages générateurs (du moins à un moment de leur existence) ou non de la pluie. On a de même montré que les systèmes en évolution sont associés, à leur stade de croissance, aux pluies les plus importantes. Le nombre réduit de données et la grande variabilité spatiale de la pluviosité à l'intérieur d'un pixel nous ont empêchés d'établir des relations quantitatives dans nos recherches.

2.4.2. Pluviométrie

Les totaux pluviométriques ont été mis en relation avec la durée totale de la couverture nuageuse pour des périodes de 10 à 30 jours, de juin à août 1985, avec des températures discriminantes de -50°C , -60°C et -70°C pour les sommets des nuages. La figure 2.5 met en rapport les durées totales de couverture nuageuse froide ($<-60^{\circ}\text{C}$) pour le

mois de juillet avec les valeurs médianes, des premiers et des derniers quartiles de la pluviosité. On montre ainsi qu'il existe bien une corrélation satisfaisante mais que le pouvoir discriminatoire de l'indice semble faible. L'évaluation de cette discrimination demande une analyse complémentaire à propos de la variabilité de la pluviosité à l'intérieur d'un pixel.

Les cartes de la durée de couverture nuageuse ($T^{\circ} < -60^{\circ}\text{C}$) ont été préparées par décennie et par mois pour juin, juillet et août, et pour la partie de la zone d'étude située au sud de 19°N . Ces images sont présentées aux figures 2.6. La figure (a) montre la durée totale de la couverture nuageuse de juin à août, les figures (b), (c), (d) les durées mensuelles.

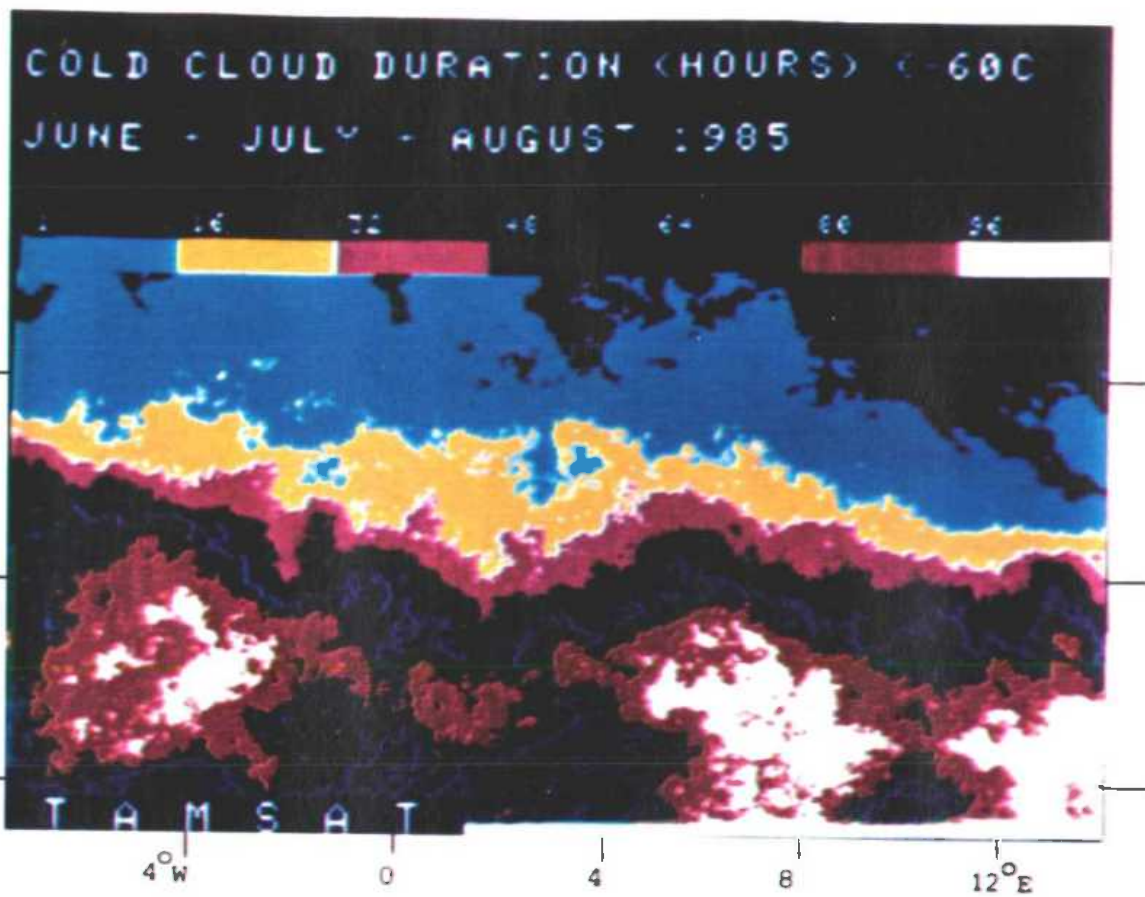
Dans la partie nord de l'image; on peut faire correspondre la ligne de 8 heures de durée avec l'isohyète de 40 mm, celle de 16 heures avec 80 mm. Ces relations n'ont pas encore été vérifiées pour la région au sud du 13°N à cause du manque de données pluviométriques.

DUREE DE COU- VERTURE NUAGEU- SE (heures)	PLUVIOSITE (MM)			N
	MEDIANE	Q_1	Q_3	
0	7	1	14	4
0.5 - 4.5	16	5	27	4
5 - 9.5	40	12	65	4
10 - 19.5	85	53	115	43
20 - 29.5	90	64	117	43
30	101	83	119	11

Figure 2.5. Résumé des données liant durée de couverture nuageuse froide (t° sommitale $< -60^{\circ}\text{C}$) et pluviosité pour plus de 100 stations au Niger en juillet 1985.

Chaque figure présente des maxima dans les zones climatologiquement favorisées par l'activité des orages convectifs: les Monts Cameroun, les plateaux septentrionaux du Niger et la courbe du fleuve Niger. Il est vraisemblable que les zones colorées en jaune correspondent pour le mois de juin - aux cultures déjà semées et aux herbes annuelles germées. Les régions colorées en bleu clair sont à ce point de vue marginales. Les cartes pour les différentes décades (figures e à m) ont une signification agrométéorologique même sans calibration précise en ce sens que les zones sans orages convectifs (colorées en noir) sont aisément identifiées. Par exemple, une zone de quelque 5000 km² centrée aux environs de 15°N et 0°E n'a reçu aucun orage durant la dernière décade de juillet. La végétation annuelle sera donc sérieusement stressée et ne devrait pas survivre à une seconde décade sèche.

La relation empirique entre pluviosité et durée de couverture nuageuse froide (pour les différentes températures-limites) est influencée par la structure physique et dynamique des orages. Ce phénomène est illustré à la figure 2.7. qui donne la durée de couverture (pour -60°C) et la mesure (au sol) pluviométrique médiane pour les mois de juin, juillet et août. Une variation saisonnière est évidente mais, comme celle-ci est faible par rapport à l'étalement de la pluviosité pour une même date, on peut utiliser la tendance saisonnière générale à l'échelle de la zone climatique du Niger. La disponibilité accrue en eau atmosphérique tend également à augmenter la pluviosité. L'effet de ce paramètre sur l'interprétation des zones méridionales des images de la figure 2.6 doit encore être évalué.



2.6(a)

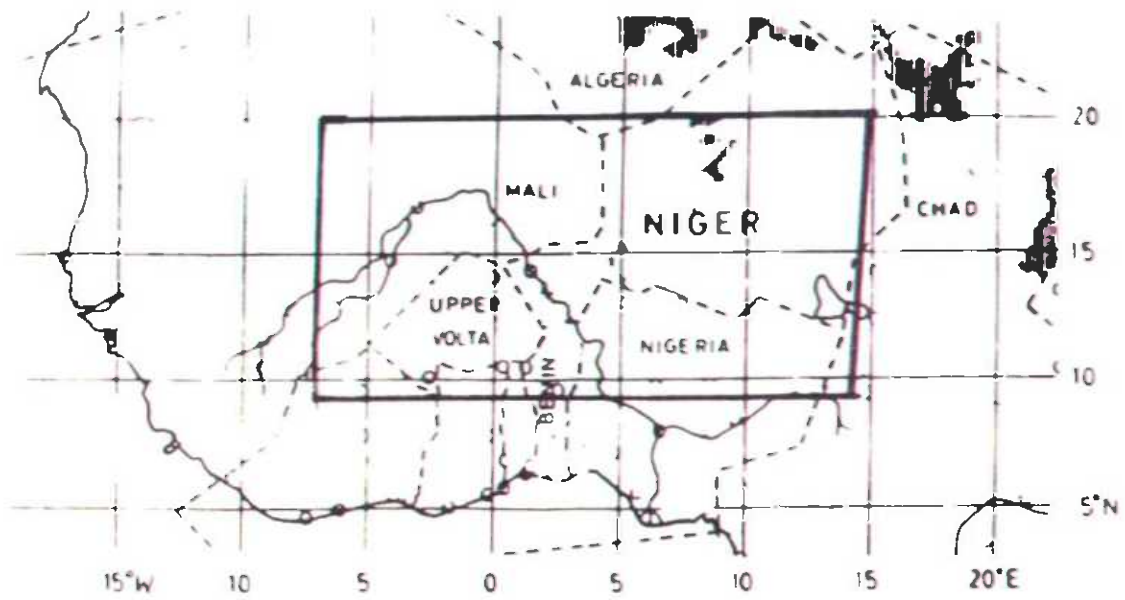


Figure 2.6 : Durée (en heures) de la couverture en nuages froids ($< -60^{\circ}\text{C}$) en 1985 au Sahel, dérivée à partir de 21 images METEOSTAT IR thermique par jour.

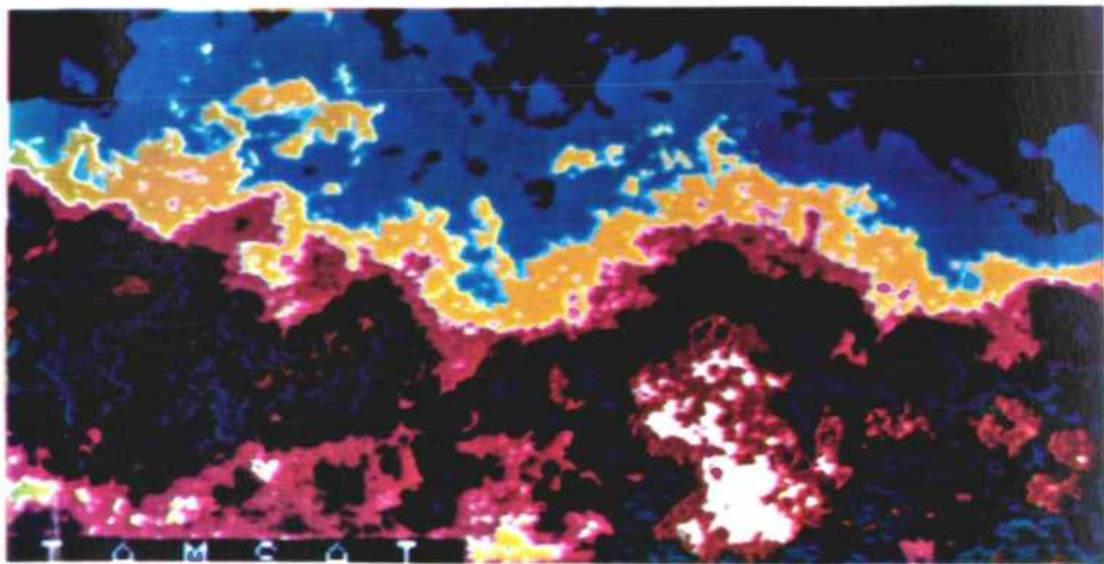
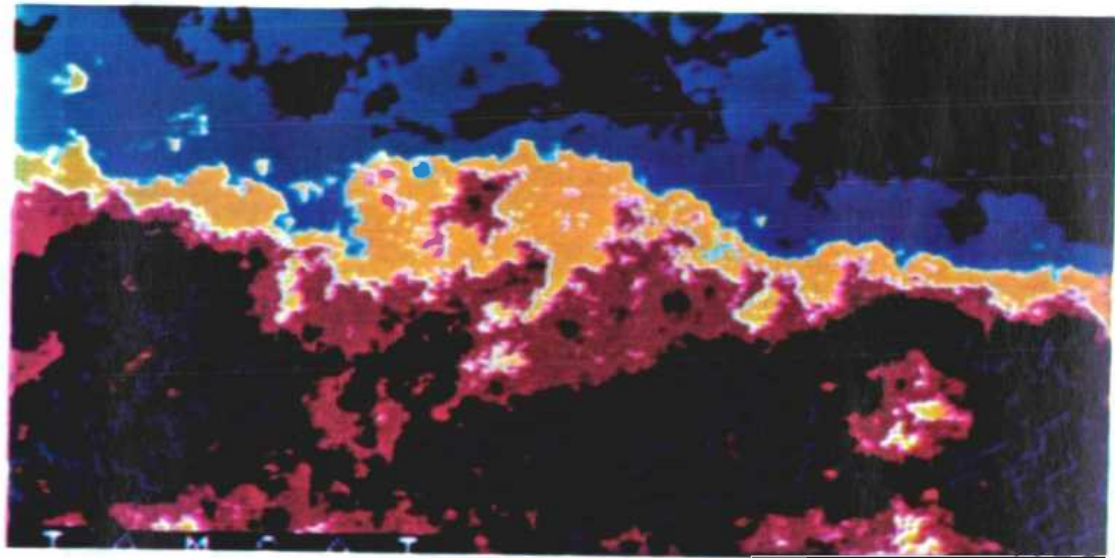
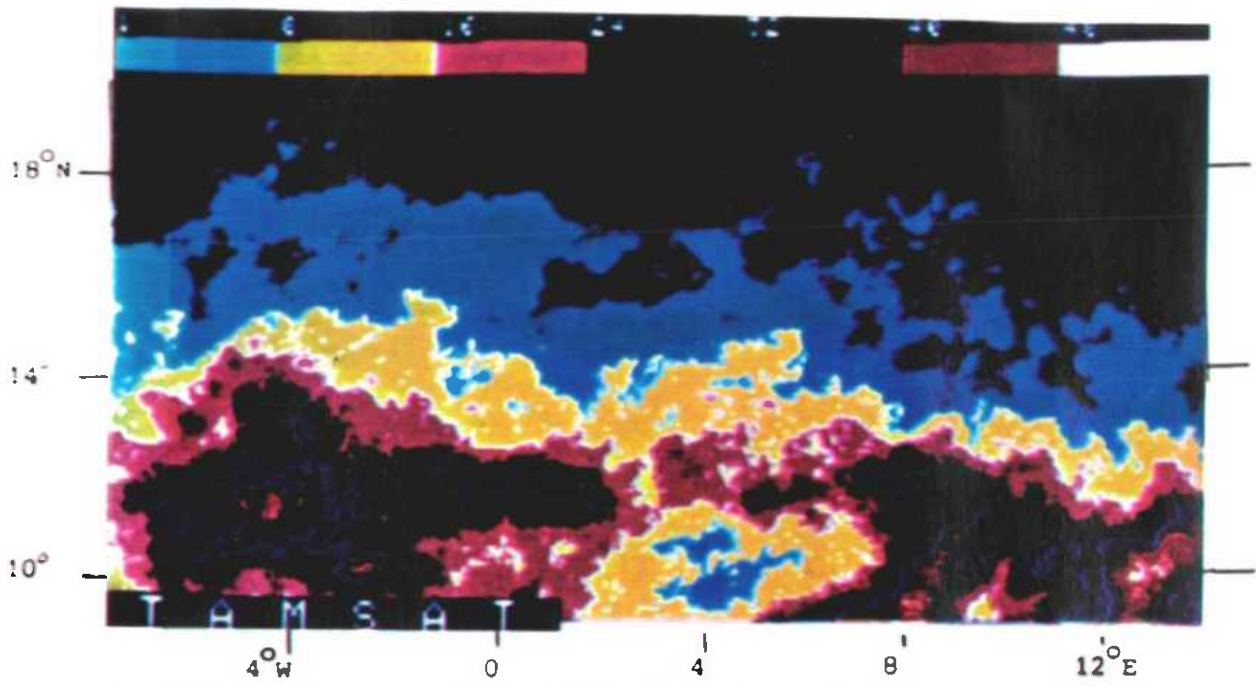


Figure 2.6 : Durée (en heures) de la couverture en nuages froids ($<-60^{\circ}\text{C}$) en 1985 au Sahel, dérivée à partir de 21 images METEOSAT IR thermique par jour.

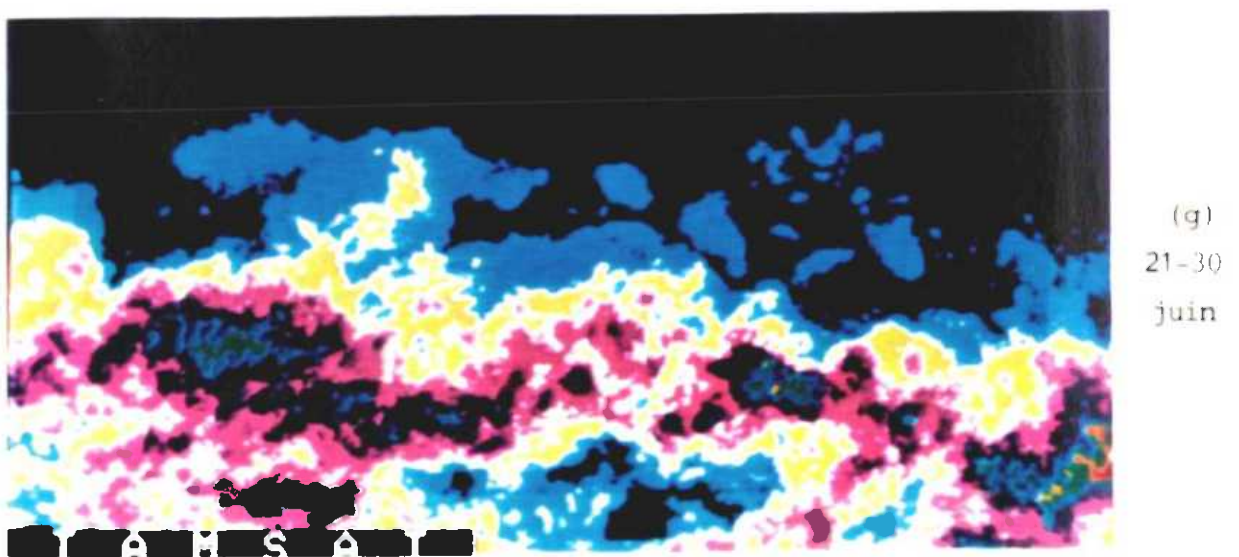
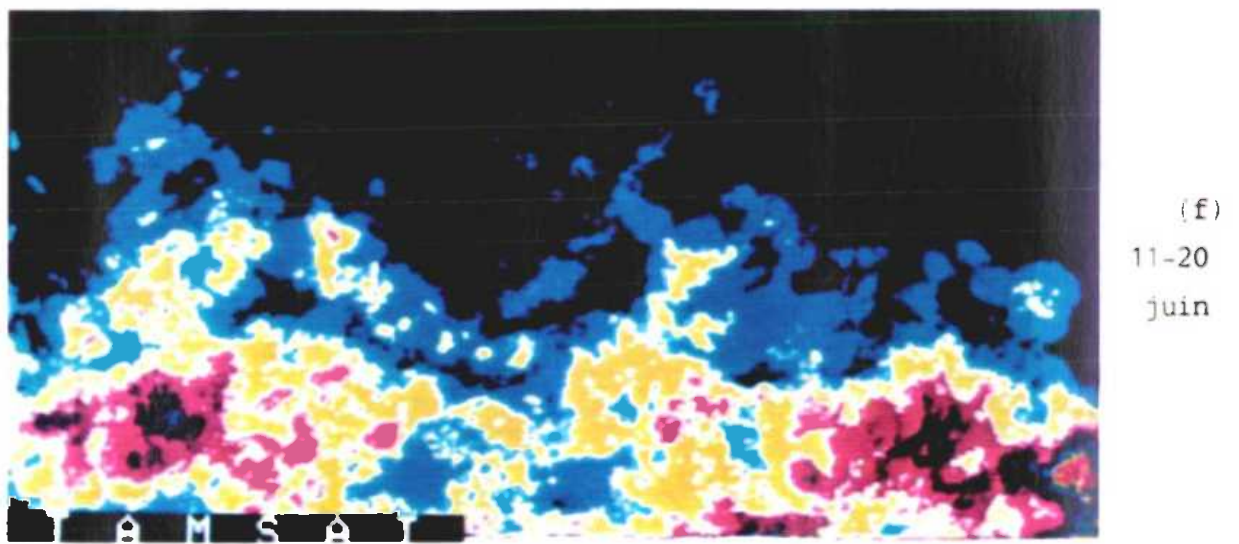
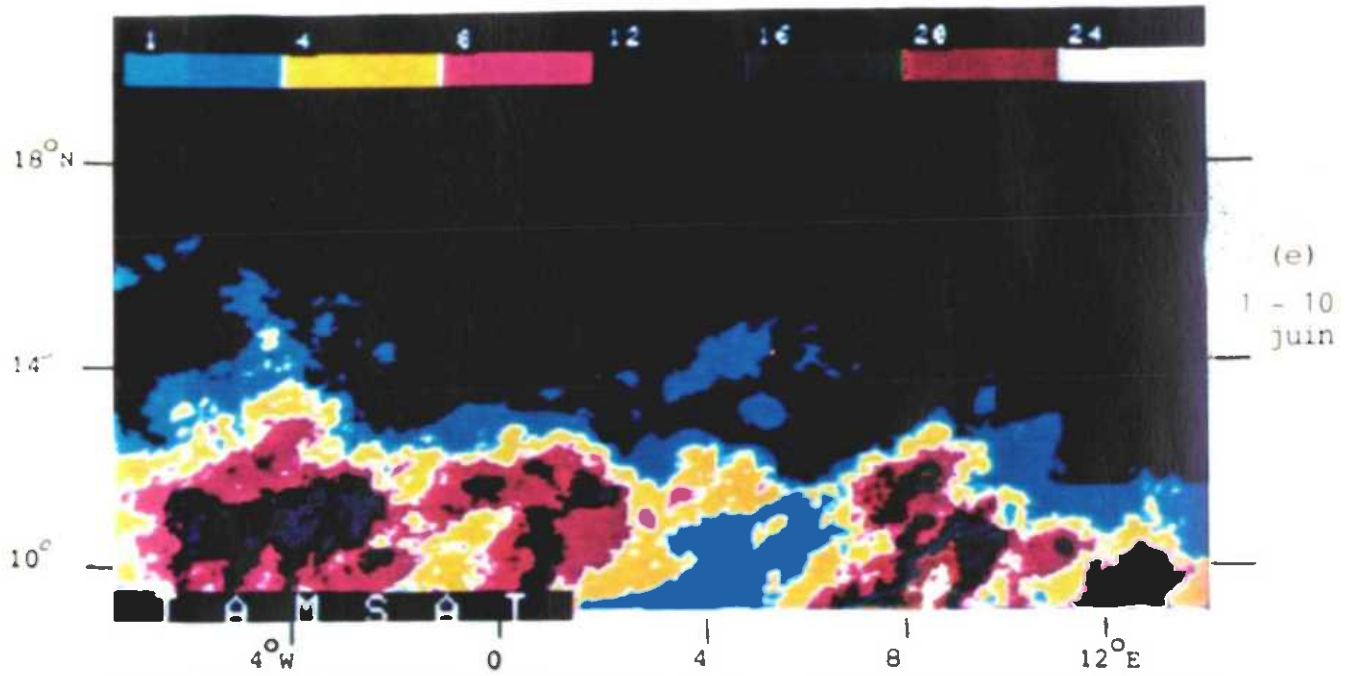


Figure 2.6 : Durée (en heures) de la couverture en nuages froids ($< -60^{\circ}\text{C}$) en 1985 au Sahel, dérivée à partir de 21 images METEOSAT IR thermique par jour.

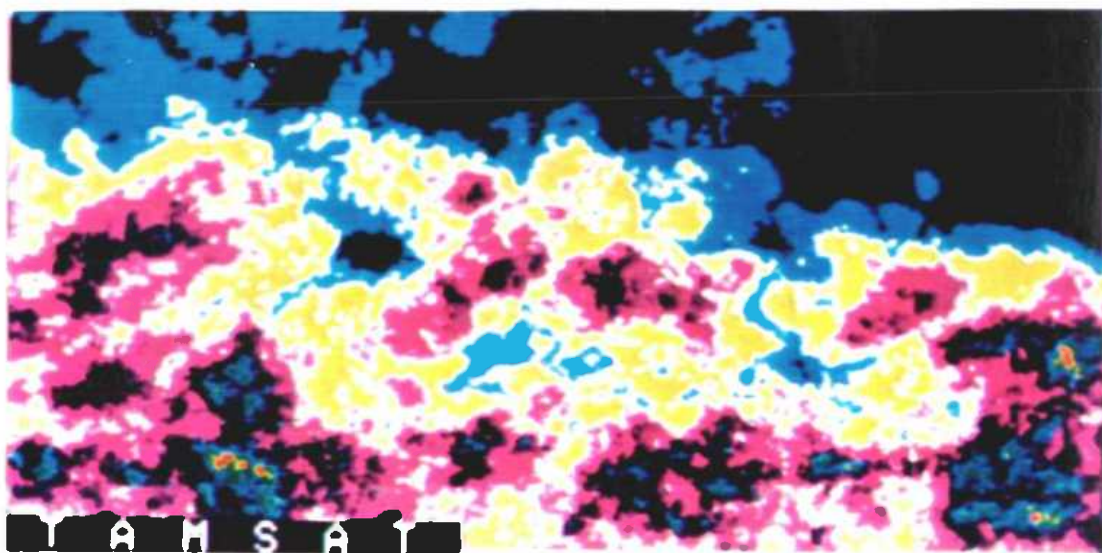
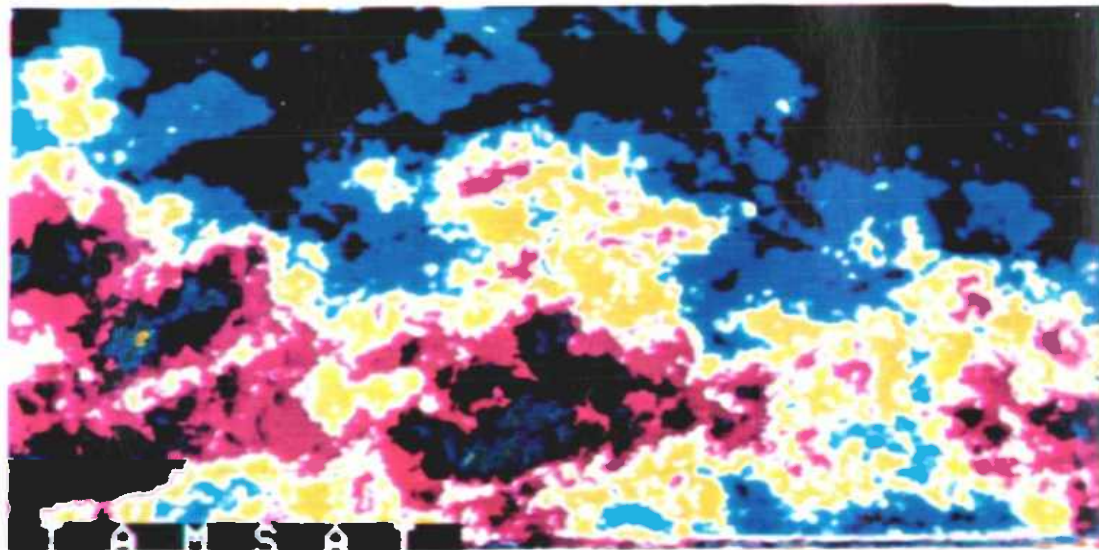
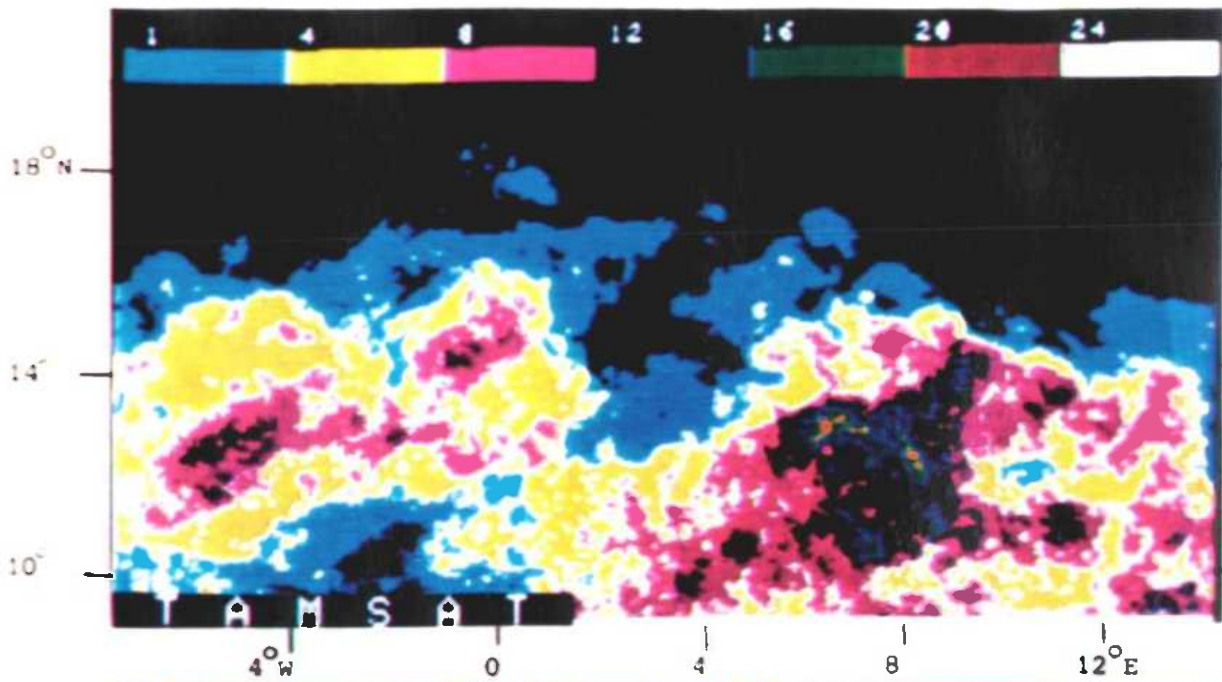


Figure 2.6 : Durée (en heures) de la couverture en nuages froids ($< -60^\circ$) en 1985 au Sahel, dérivée à partir de 21 images METEOSAT IR thermique par jour.

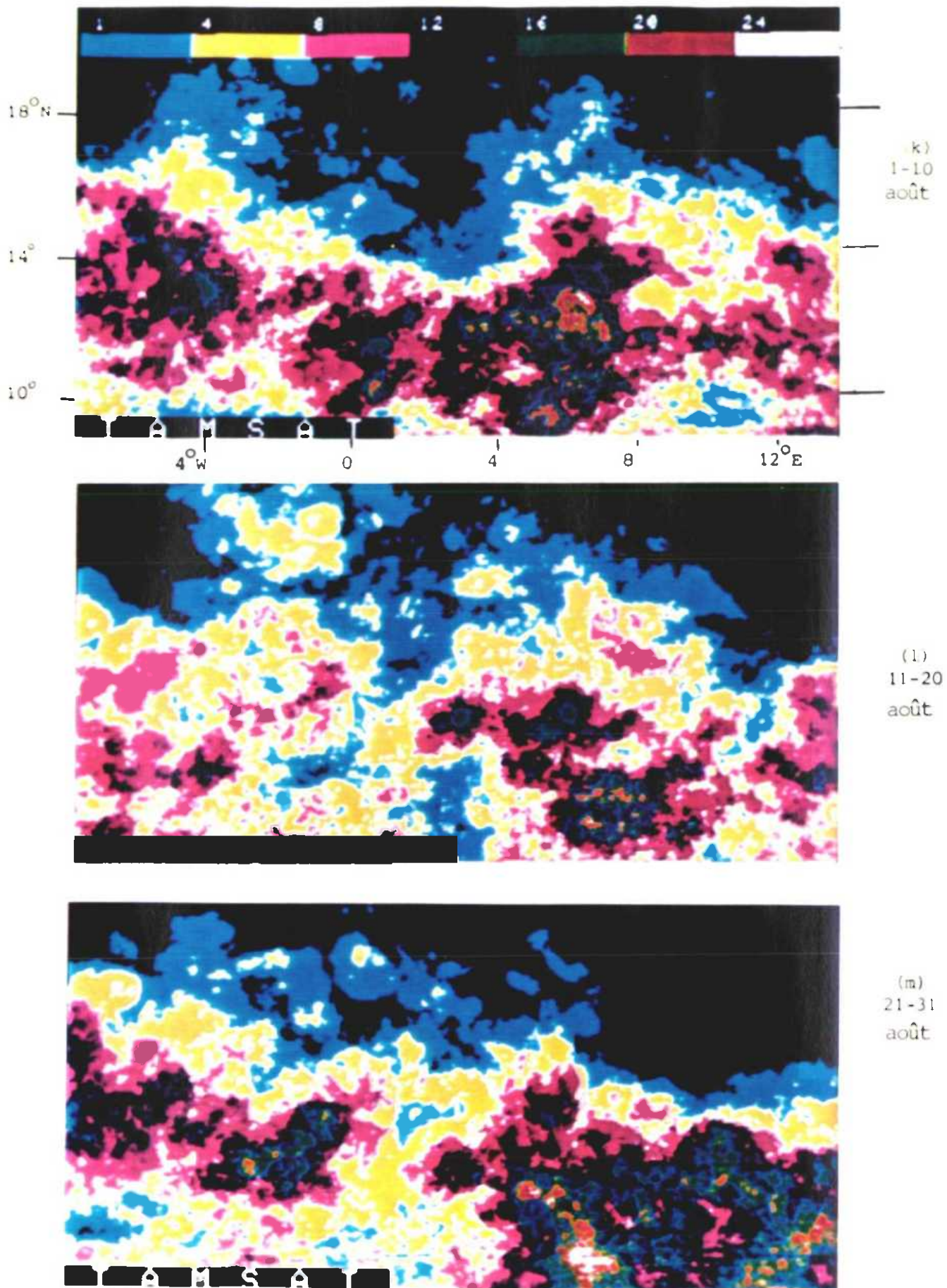
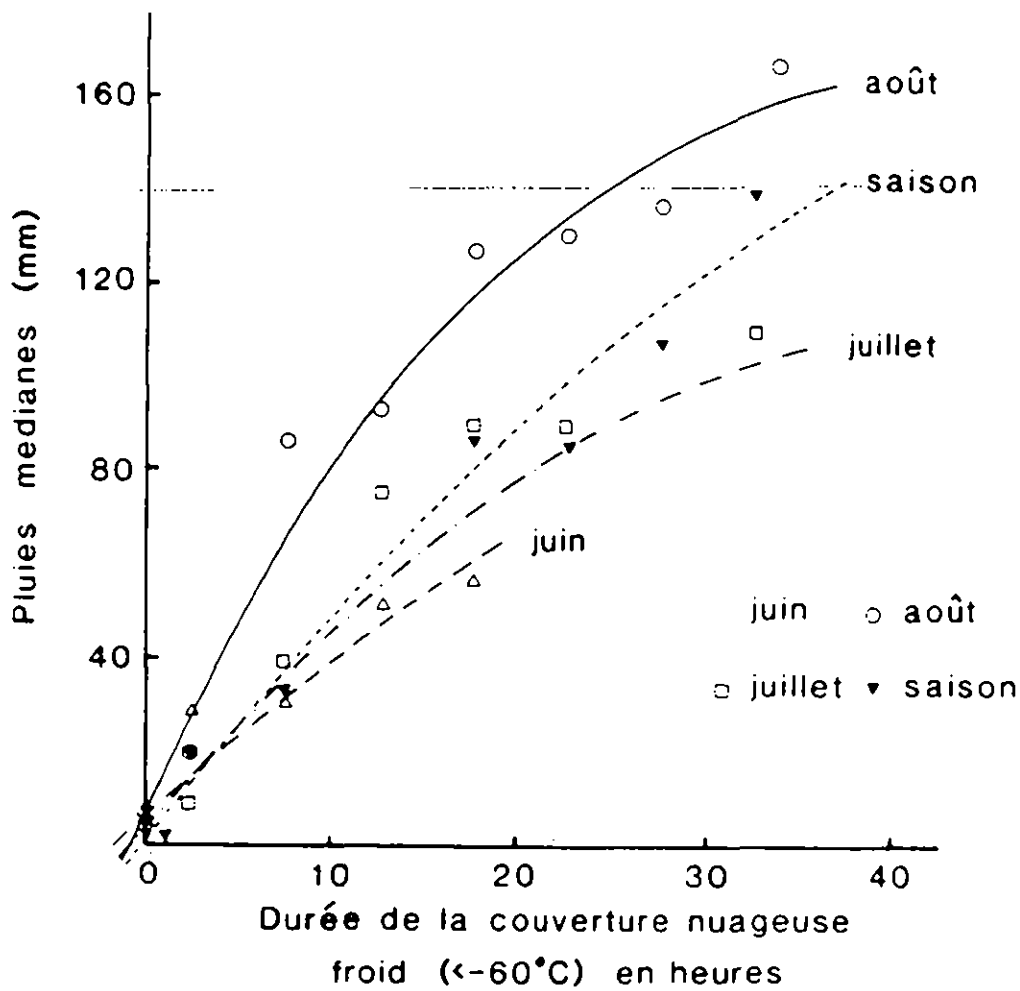


Figure 2.6 : Durée (en heures) de la couverture en nuages froids ($< -60^\circ$) en 1985 au Sahel, dérivée à partir de 21 images METEOSAT IR thermique par jour.



Figure

Pluviométrie médiane mesurée en surface versus durée de couverture nuageuse froide ($\le -60^{\circ}$) estimée par satellite pour juin, juillet et août 1985

L'expérience d'Ibecetene en 1985 a mis en évidence l'influence de la structure cellulaire des orages sur la distribution spatiale des précipitations. La figure 2.8 illustre ce point grâce aux mesures pluviométriques d'un réseau à maille de 2 X 2 kms lors de deux orages typiques. Chaque exemple montre une bande de précipitation maximale traversant la zone selon une orientation est-ouest. Le faible nombre d'orages enregistrés à Ibecetene durant la saison humide de 1985 interdit toute analyse statistique valable de la variabilité pluviométrique à une échelle de 10 kms. Cependant, en regroupant les événements orageux, on peut simuler la variation vraisemblablement observable des mesures par décades. Les intervalles interquartiles de pluies observés sont illustrés à la figure 2.9.: elle montre que la plupart des intervalles de pluies associées à une durée donnée de couverture nuageuse (figure 2.5) peuvent être retrouvés à l'intérieur d'un même pixel. Cette constatation est basée sur un nombre réduit d'observations pour une année à Ibecetene et doit donc être considérée avec réserve. Cependant, si elle est valide, elle indique que les estimations pluviométriques satellitaires pour des périodes de 10 jours ou d'un mois sont meilleures que les estimations basées sur n'importe quel réseau concevable de pluviomètres.

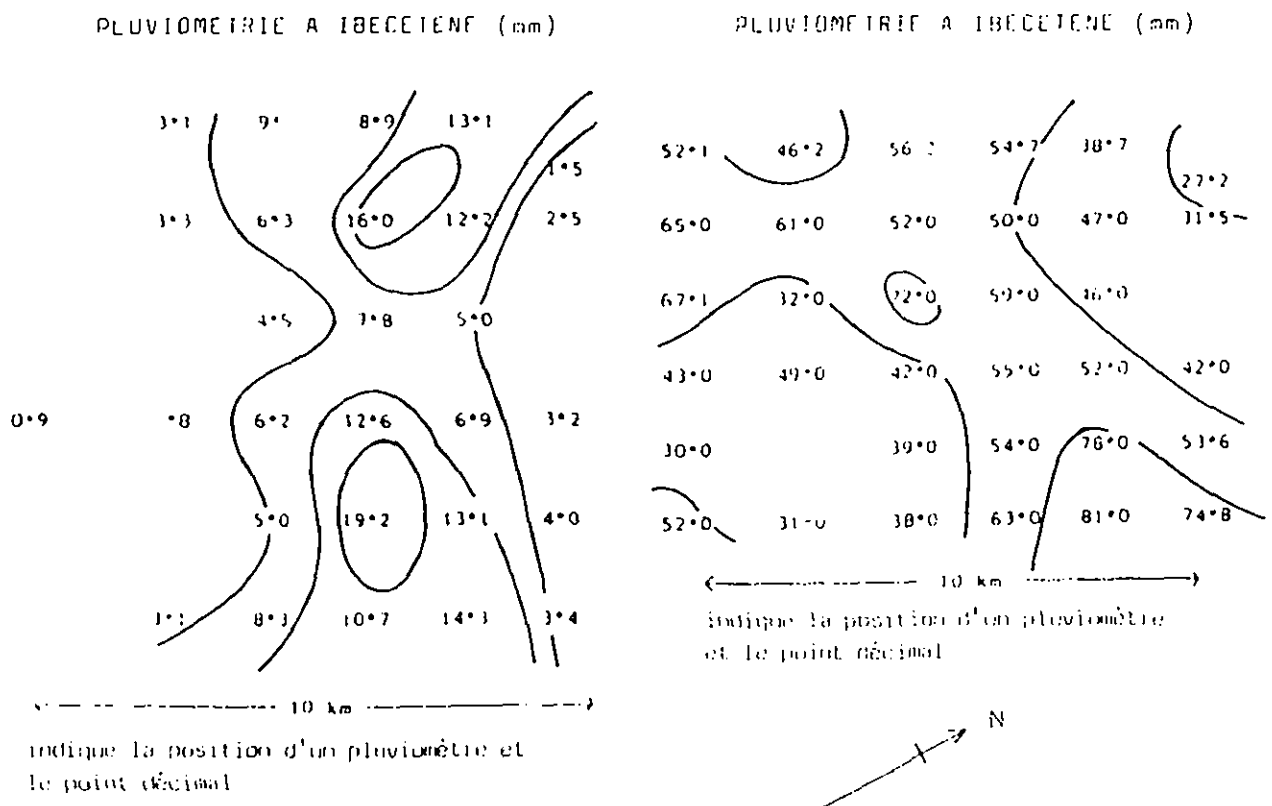


Figure 2.8 Pluviosité (mm) mesurée à Ibecetene, selon un maille de 2 x 2 kms.

15 juillet 1985

PLUVIOSITE en (mm)		
MEDIANE	Q ₁	Q ₄
5	3	11
17	12	22
50	35	62
100	61	117

Figure 2.9. Valeurs médianes et des quartiles pour des groupes d'événements pluvieux à Ibacetene en 1985.

--- Chaque groupe correspond à deux ou trois événements survenus durant les décades de juillet et d'août 1985.

2.4.3. Pluviosité quotidienne

L'analyse subjective d'une série d'images satellitaires IR permet d'identifier les parties les plus actives d'une zone nuageuse froide. Pour rendre cette identification objective et fournir des estimations pluviométriques quantitatives, il faut tester les trois paramètres de l'équation n° 1, soit a_0 , a_1 et a_2 .

Au vu du problème précédemment mentionné posé par la représentativité douteuse des données d'un seul pluviomètre pour une certaine surface, il est inévitablement difficile de juger si une méthode plus complexe mènera à une amélioration significative des estimations par rapport à un modèle simple de durée de couverture nuageuse froide. L'influence du taux de croissance des nuages est illustrée à la figure 2.10 qui confronte la fréquence d'événements pluvieux pour une gamme pluviométrique donnée avec le taux de croissance des sommets nuageux au-dessous de -60°C .

Taux de croissance (km ² hr ⁻¹)	Pluviosité (mm)		
	0 à 0.1	0.1 à 10	10 à 100
-10 ⁵ à -10 ⁴	5 (71%)	0 (0%)	2 (29%)
-10 ⁴ à -10 ³	5 (71%)	1 (14%)	1 (14%)
-10 ³ à 10 ³	18 (90%)	1 (5%)	1 (5%)
10 ³ à 10 ⁴	7 (37%)	6 (32%)	6 (32%)
10 ⁴ à 10 ⁵	2 (14%)	6 (43%)	6 (43%)

Figure 2.10. Comparaison du taux de croissance des nuages et de la pluviométrie pour les stations synoptiques du Niger (juillet 85)

Le tableau montre la tendance des fortes pluies à être associées avec les taux de croissance nuageuse élevés, alors que les pluies légères se répartissent plus ou moins équitablement entre les différentes classes de taux de croissance. Ces taux de croissance se rapportent cependant à l'ensemble de la couverture nuageuse et peuvent donc souvent relever de régions éloignées du point de mesure pluviométrique.

Les résultats des régressions liant la pluviométrie observée aux stations synoptiques (sur 12 heures) et les différents indices satellitaires de la couverture nuages sont présentés à la figure 2.11.

	Durée de la couverture nuageuse (1°C-60°C)		Taux de croissance des nuages		Gradient de température		Constante		Coefficient de correlation
	Coeff.	Rapp. T	Coeff.	Rapp. T	Coeff.	Rapp. T	Coeff.	Rapp. T	
3 termes	0.032	4.91	1.10×10^{-5}	0.13	-0.69	-0.39	1.42	0.81	0.50
2 termes	0.092	4.95	1.40×10^{-5}	0.16	-	-	1.75	1.15	0.50
2 termes	0.032	5.11		-	-	-	1.72	1.15	0.50
2 termes			9.6×10^{-5}	0.94	-1.034	-0.51	5.9	3.46	0.12

Figure 2.11. Résultats des régressions entre pluviométrie et durée et croissance de la couverture nuageuse, netteté de la bordure nuageuse.

On voit que le gradient de température est le terme le plus négatif, les enregistrements considérés étant directement antérieur et postérieur à l'arrivée des pluies sur la station synoptique. Le taux de croissance des sommets nuageux se calcule sur l'intervalle suivant directement le précédent.

Le taux T est le rapport entre le coefficient et sa déviation standard, donc un indice de la stabilité du coefficient.

Les résultats de cette analyse ne permettent pas de conclure et l'étude devrait être prolongée à partir de données plus importantes. Différentes définitions du taux de croissance et des termes de gradient doivent être testées pour améliorer la caractérisation objective de tout système orageux en pleine évolution.

ESTIMATION DE L'HUMIDITE DES SOLS

BUT

Etudier les possibilités de cartographie de l'humidité des couches supérieures des sols au Sahel grâce aux données satellitaires disponibles.

3.2. CADRE DE L'ETUDE

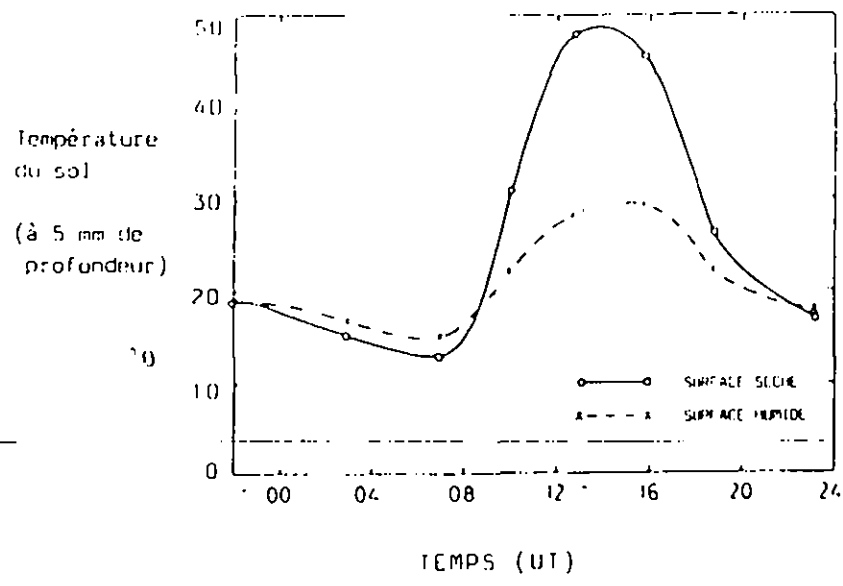
L'étude des émissions des microondes, de la réflexion de la lumière solaire et de la réponse thermique de la surface à un apport énergétique sont des techniques envisageables pour l'estimation satellitaire de l'humidité des sols. A long terme, l'utilisation des microondes se révélera sans doute comme la meilleure solution mais les problèmes de rugosité de surface actuels interdisent cette application pour l'instant. De même, il n'y a pas de financement prévu pour embarquer sur satellite des radiomètres à microondes satisfaisants.

Les sols humides sont moins réfléchissants que les sols secs. Cependant, un sol sableux léger, à drainage rapide, retrouvera une réponse de sol sec quelques heures seulement après le passage d'une pluie. La principale technique restante est dès lors l'étude de la réponse thermique de la surface du sol face à un afflux énergétique, soit l'inertie thermique.

La variation journalière de la température du sol dépend de la radiation solaire, de la température atmosphérique, du vent, de l'humidité de l'air, de la couverture nuageuse et des propriétés physiques du sol. De nombreux auteurs ont décrit les relations complexes liant ces variables (p.ex. Wetzel et al (1984).

Sous ciel tropical dégagé, les paramètres les plus importants en ce qui concerne la détermination de la température d'un sol en sont la conductivité et la capacité thermique. Ces deux paramètres, particulièrement la conductivité thermique, sont influencés par l'humidité du sol, les sols sableux secs étant, par exemple, 10 fois

Figure 3.1 . Effet de l'humidité du sol sur la variation journalière de sa température de surface.

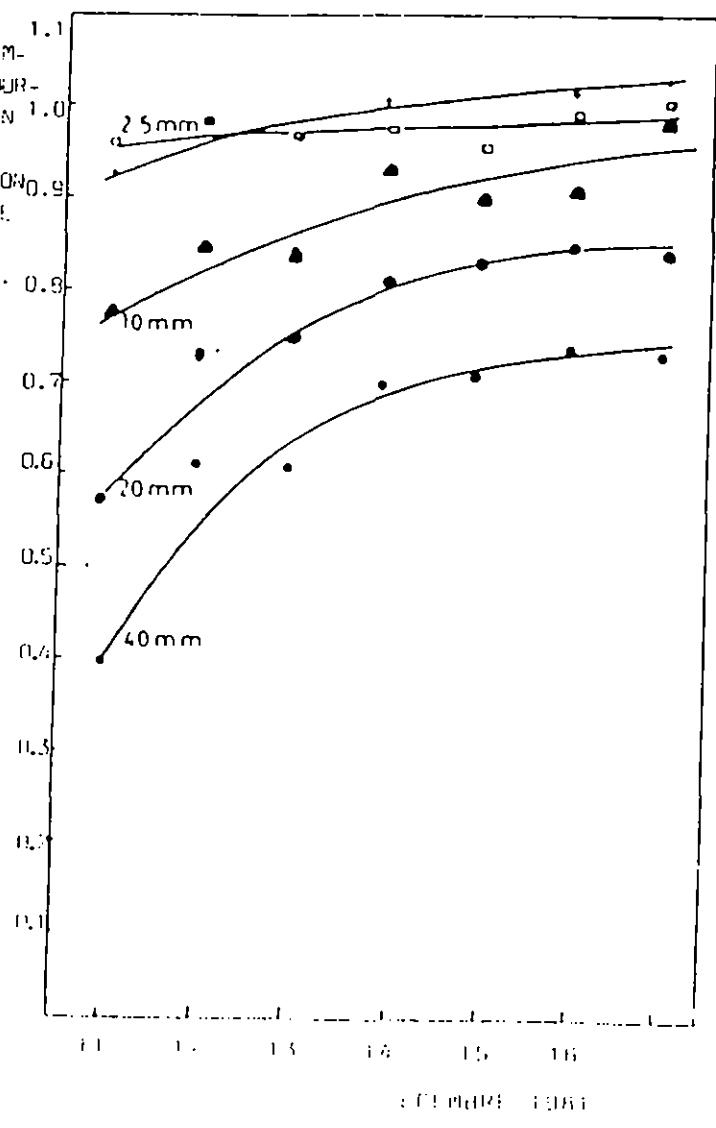


a. Températures journalières de deux sites à Niamey (11.12.81). Le site humide a été irrigué la veille avec 40 mm d'eau, l'autre n'a pas été irrigué depuis plusieurs mois.

ECART DES TEMPERATURES JOURNALIERES D'UN SOL, EXPRIME COMME FRACTION DE L'ECART DE TEMPERATURES D'UN SOL SEC.

NOTES SIMULEES APPLIQUEES

- 25 mm
- △ 5 mm
- ▲ 10 mm
- 20 mm
- 40 mm



b. Ecart journaliers de températures de sites à Niamey du 11 au 17 décembre 1981, exprimés comme fraction de l'écart journalier d'un sol sec. Les sites ont été irrigués comme décrit au 10 décembre.

plus conductifs que les sols sableux à 10% d'humidité (en volume).

L'effet de ce point sur la gamme de températures diurnes d'un sol est repris à la figure 3.1. a et b qui montrent que l'irrigation d'une parcelle avec 40 mm d'eau réduit, dès le lendemain, cette variation à quelques 15°C contre 36°C pour un même sol resté sec. Cette réduction peut encore se manifester une semaine plus tard.

L'utilisation de ces propriétés pour suivre l'évolution de l'humidité des sols à partir de satellite exige la quantification de quatre paramètres principaux:

a. l'influence de l'atmosphère, des nuages, des aérosols sur la réponse spectrale des sols.

l'influence de la pédologie sur l'inertie thermique des sols en fonction de leur humidité.

l'influence d'une stratification de l'humidité des sols (variation verticale)

les effets dus à l'inhomogénéité de l'humidité des sols à l'intérieur d'un pixel (variation horizontale).

L'absorption et l'émission atmosphériques dans l'infrarouge peuvent être calculées si on connaît sa température et son profil d'humidité (Wilkinson et al., 1982). L'influence des nuages et des aérosols cachant partiellement ou entièrement, la surface terrestre ne peut être compensée. Néanmoins, ces éléments étant facilement identifiables sur l'imagerie satellitaire, on peut éliminer les pixels affectés et les remplacer par les pixels correspondants d'enregistrements ultérieurs: une carte complète ne peut donc être construite que pour tous les 5 jours environ.

Le problème le plus gênant provient des nuages très fins, voire transparents, et de ceux qui n'occupent qu'une fraction de pixel. Les pixels ainsi atteints peuvent être éli-

minés en étudiant leur réflectivité, dans le visible, par rapport à une carte de l'albédo établie au préalable en conditions dégagées et pour les sols secs.

L'effet de la pédologie est aisément traité en utilisant les données satellitaires à l'échelle du pixel et en conditions sèche et saturée - en vue d'établir les gammes extrêmes de l'écart journalier de température.

Des modèles ont été construits pour étudier la stratification de l'humidité dans le sol (Ward et al, 1982, Wilkinson et al, 1983). Durant ce contrat, les recherches ont continué à propos du développement des techniques de corrections atmosphériques et de la distribution inégale de l'humidité dans le sol.

3.3. OBJECTIFS ET METHODES

Chacun des points suivant fixe un objectif et décrit la méthodologie utilisée pour l'atteindre.

3.3.1 Développer des méthodes de corrections atmosphériques des données satellitaires par les données synoptiques au sol. Les profils d'humidité atmosphérique au-dessus du Niamey ont été analysés pour développer une relation avec la vapeur d'eau totale et l'humidité absolue au niveau du sol. On a étudié les effets de différents modèles de profil atmosphérique (quantifiant la teneur totale en vapeur d'eau et l'humidité de l'air en fonction des données de surface correspondantes) sur les corrections atmosphériques résultantes.

3.3.2. Etudier les effets de la stratification de l'humidité dans les couches supérieures du sol.

Un modèle multi-couches de diffusion thermique a été utilisé avec toute une gamme de profils de diffusion correspondant aux distributions verticales potentielles de l'humidité du sol.

La réponse thermique en surface a été générée en fonction du cycle typique d'apport énergétique au Sahel.

3.3.3. Etudier les variations locales de l'humidité du sol en fonction de la pluviosité et de la redistribution de celle-ci par écoulement en surface et superficiel. L'expérience d'Ibecetene a permis les mesures, sur un réseau à maille de 2 kms, de la pluviométrie (après chaque pluie), de l'humidité du sol, de 30 à 170 cms de profondeur, périodiquement au cours de la saison sèche avec une sonde à neutrons et, pour certains sites choisis, de l'humidité du sol dans les 20 cm supérieurs après chaque pluie et durant les périodes d'assèchement entre celles-ci.

3.4. RESULTATS ET CRITIQUE

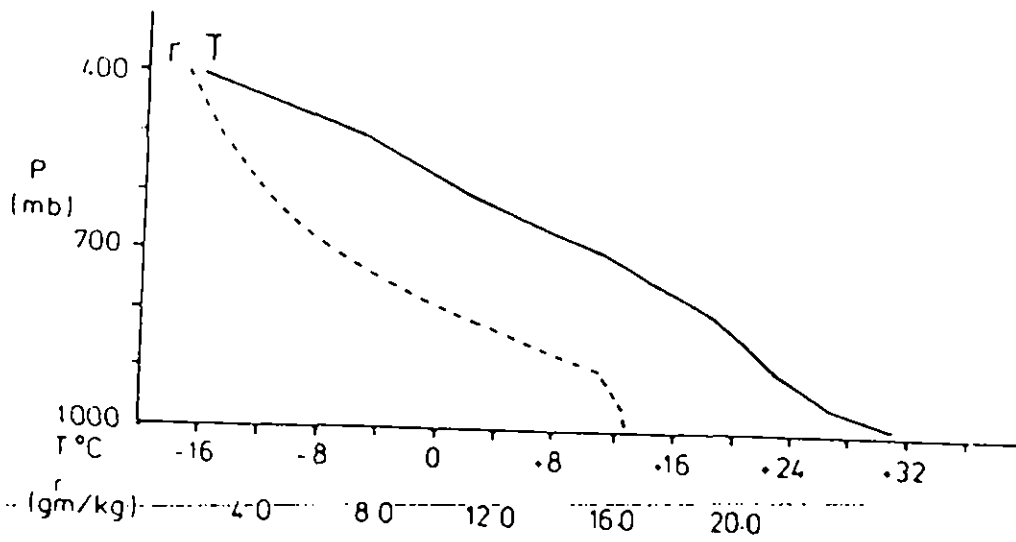
3.4.1. - Corrections atmosphériques des températures de surface mesurées par le canal Meteosat IR thermique

L'analyse des profils de la température et de l'humidité atmosphériques à Niamey, pour 1982 et 1983, a montré qu'une situation typique se développe en mi-journée, soit l'apparition d'une couche d'air, épaisse d'environ 1000 à 1500 m, avec un gradient de température supérieur à l'adiabatique sèche et une humidité absolue légèrement décroissante; au-dessus de cette couche, l'humidité chute très rapidement.

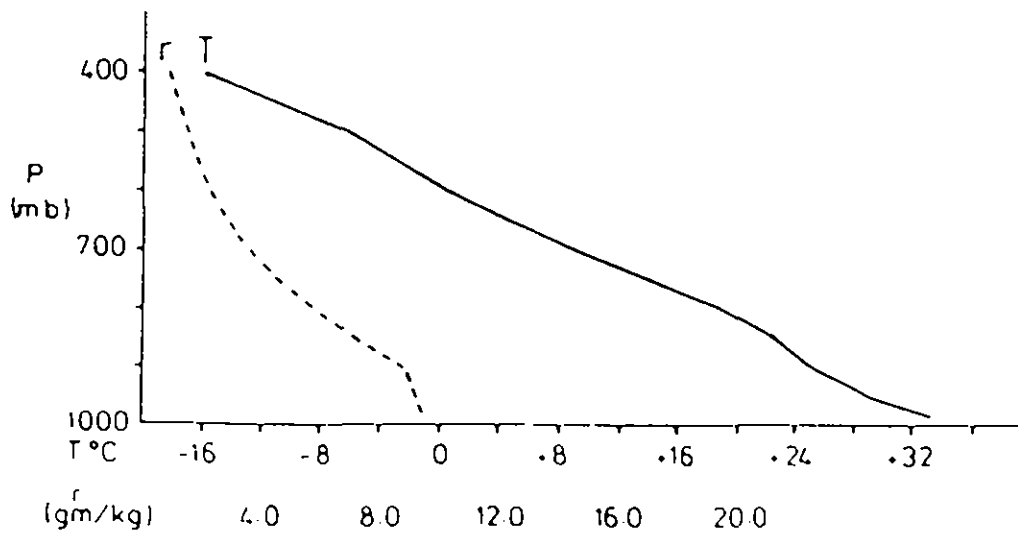
La variation saisonnière se marque par une température peu changeante, généralement moins de 2°C pour un même niveau atmosphérique (couches de 50 en 50 mb), mais par une grande variation de l'humidité. Ces points sont illustrés aux figures 3.2.a et b. Ainsi, les variations de correction atmosphérique, à une échelle quotidienne ou mensuelle, seront principalement déterminées par ces variations d'humidité.

On a élaboré un modèle d'humidité atmosphérique absolue qui se base sur une valeur à la surface diminuant durant les 1500 premiers mètres selon un gradient de $1 \text{ gm kg}^{-1} \text{ km}^{-1}$ puis de manière exponentielle.

On montre que ce modèle, qui correspond à la mesure du contenu total en eau dans l'atmosphère, conduit à une correction atmosphérique des données au sol indistinguible de celle calculée à partir des données de radiosondage.



(a) Juillet (milieu de la saison des pluies)



(b) Octobre (fin de la saison des pluies)

Figure 3.2 : Relevés de radiosondage typiques de Niamey.

Le même modèle de profil atmosphérique a été appliqué, d'après les mesures en surface de l'humidité prises à l'aéroport à Niamey (15.00GMT). La figure 3.3. compare les résultats à ceux de la correction par radio-sondage. Il y a une correspondance des valeurs corrigées, à quelque 2°C près pour des températures réelles au sol de 65°C (les observations maximales). Comme la correction atmosphérique décroît linéairement jusqu'à 0°C pour des sols à 23°C, cette différence de 2°C est sans doute la différence la plus grande existant entre les deux modèles de corrections. Les valeurs satellitaires corrigées d'après le modèle schématisant l'humidité de l'atmosphère (voir ci-dessus) ont été comparées, pour quelques jours dégagés, aux valeurs mesurées au sol. Les résultats sont présentés à la fig. 3.4. On voit que les corrections atmosphériques basées sur la mesure de l'humidité au sol sont de bonne approximations de la différence entre température du sol d'après satellite et d'après mesure à 5 mm de profondeur.

Il apparaît par ailleurs qu'il y a une certaine compensation entre les erreurs causées par l'émission imparfaite de la surface et les différences dues aux profondeurs de mesure de la température.

- 3.4.2. Les effets de la stratification de l'humidité des sols sont illustrés à la figure 3.5 pour un modèle simple à deux couches. Elle exprime l'écart des températures journalières à la surface en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure du sol (sèche ou humide) selon les propriétés typiques des sols sableux et d'après un modèle de flux calorifiques en surface basé sur des mesures de terrain.

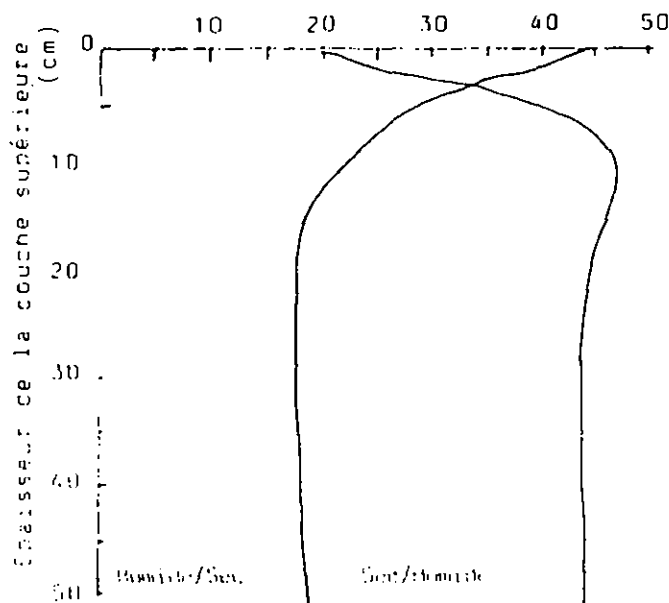


Figure 3.5 Calcul de l'écart quotidien des températures pour un sol sableux à deux couches horizontale et un cycle donné de flux énergétique du sol.

Seules les quelques 15 cms supérieurs ont finalement un impact significatif sur le cycle quotidien des températures. D'après la stratification de l'humidité du sol dans les 15 premiers cms, le cycle de température peut être interprété de différentes façons. La figure 3.6. associe différents teneurs en humidité dans les 10 cms supérieurs des sols avec différents écarts journaliers de température, en fonction de la distribution de l'humidité dans le sol. Généralement, on sera confronté au modèle humide/sec puisque une pluie de seulement 10 mm humidifie les 15 cm supérieurs du sol jusqu'à la capacité de terrain. Les teneurs en humidité correspondant aux écarts de température quotidiens sont dans ce cas les plus élevées dans la figure 3.6.

ECART DE TEMPERATURE (K)	45	35	25	15
TENEUR EN HUMIDITE DES 10 cms SUPERIEUR DU SOL,	0	0.6 3.2	2.8 4.7	6

Figure 3.6. Gamme calculée de l'humidité d'un sol sableux (10 cms supérieurs) en fonction des écarts de température journaliers d'après un flux calorifique donné en surface.

3.4.3. Le manque d'homogénéité de l'humidité du sol à l'échelle d'un pixel provient à la fois de la variabilité spatiale des précipitations et de leur redistribution. La variabilité de la pluviosité a été étudiée dans la section 2.4.2. pour la zone d'Ibecetene. Considérant que l'humidification des 15 cms supérieurs d'un sol (à capacité de terrain) requiert environ 10 mm de pluies, il est évident que seuls les orages principaux peuvent humidifier l'ensemble des sols d'une région, mais que la plupart des pluies sont capables de le faire partiellement.

Puisque la relation humidité du sol - écart des températures est linéaire, l'effet de pluies locales ne devrait pas conduire à de sérieuses erreurs sur l'estimation de taux d'humidité moyen à l'échelle d'un pixel. L'effet de l'écoulement en surface ne pose pas non plus de problème.

Par contre, si on étudie l'humidité des sols dans le cadre de leur bilan global en eau, la distribution des pluies et l'organisation de l'écoulement acquièrent une grande importance: en effet l'évapotranspiration d'une zone, localement sèche et humide, ne correspond en rien à celle d'une zone homogènement humide. Ainsi, la distribution inégale des pluies empêchera l'estimation de l'évapotranspiration basée sur les données pluviométriques moyennes à l'échelle d'un pixel.

CONCLUSIONS

De bonnes estimations de la pluviosité peuvent être obtenues, pour des périodes de 10 ou de 30 jours, avec une procédure presque complètement automatique.

L'applicabilité de la méthode en dehors de la zone sahélienne doit être étudiée. Les données d'une année complémentaire permettraient de confirmer la stabilité des algorithmes ou de quantifier leurs éventuelles variations zonales et saisonnières. Les événements pluvieux isolés peuvent être identifiés mais l'algorithme concerné d'estimation pluviométrique doit encore être amélioré.

Les données d'au moins deux années seraient nécessaires en vue d'établir la validité statistique des résultats. Les techniques d'estimation de l'humidité du sol (estimations moyennes en surface et pour les 10-20 cms supérieurs) peuvent être développées jusqu'à un stade opérationnel.

Des incertitudes au niveau des corrections atmosphériques limiteront sans doute la discrimination de l'humidité des sols à une échelle de quatre ou cinq intervalles (de saturé à sec). La distribution locale des pluies et leur répartition par écoulement en surface - à l'intérieur d'un même pixel - rendent l'information inappropriée pour l'estimation du bilan hydrique à long terme. Cependant les résultats peuvent être utilisés pour déterminer le début de la saison des pluies et les périodes plus sèches à l'intérieur de celle-ci. L'interprétation de cette information en termes de production agricole dépendra du type de culture et de la pédologie. On pourra vraisemblablement obtenir une bonne estimation des fourrages mais l'estimation des récoltes demanderait quant à elle une connaissance approfondie du terrain et du système agraire à une échelle inférieure à celle du pixel.

REMERCIEMENTS

Le travail décrit dans ce rapport a été financé par le contrat "Commission des Communautés Européennes DG XII/NERC" ainsi que par l'Administration du Royaume-Uni pour le développement Outre-Mer, en utilisant aussi partiellement l'équipement du NERC (Conseil de Recherches sur l'Environnement Naturel).

En plus des auteurs du rapport, les membres de l'équipe suivants ont contribué à cette recherche: A.F. Chadwick, I.D. Flitcroft, V.D. McDougall, A.S.N. Narracoott, M.A. Nyandwa et A.F. Traoré.

Le travail de terrain au Niger a été accompli en liaison avec le Centre Agrhymet de Niamey et le Service National de la Météorologie du Niger. La collaboration et le soutien de ces institutions furent essentiels pour la réalisation des programmes de terrain et de mesures de surface, desquels l'ensemble du projet dépendait.

BOLTON D. (1984) Génération et propagation des lignes de grains africaines. Quart. J.R. Met Soc. 110, 695-721

HAMILTON R.A. et ARCHBOLD H.W. (1945) Météorologie du Nigéria et des territoires adjacents. Quart. J.R. Met Soc. 71, 231-262

MILFORD J.R. et DUGDALE G. (1984) Prévvisions à courte échéance en Afrique occidentale par les données de Meteosat. Proceedings of 2nd International Symposium on Nowcasting, Norrkoping, Sweden, 3-7 September 1984.

WARD N.R., WILKINSON G.G., DUGDALE G. et MILFORD J.R. (1982) Cartographie satellitaire de l'humidité des sols au Sahel. Proceedings of Remote Sensing Soc., Annual Tech. Conf., Liverpool, December 1982.

WETZEL P.J., ATLAS D. et WOODWARD R.H. (1984) Déterminer l'humidité des sols d'après les données IR des satellites géosynchrones: une étude de faisabilité. J. of Clim & App. Meteorology, 23, 375-391

WILKINSON G.G., WARD N.R., DUGDALE G. et MILFORD J.R. (1982) Détermination du budget en eau des sols en Afrique Tropicale en utilisant les données satellitaires IR: le problème de l'atmosphère. Proc. EARS&L-ESA Symposium, Igls, Austria (ESA SP-175)

WILKINSON G.G., WARD N.R., MILFORD J.R. et DUGDALE G. (1983) Détermination du budget en eau des sols en Afrique Tropicale en utilisant les données satellitaires IR: le problème de l'atmosphère.

Archives TAMSAT à Reading1. Routine météorologiques habituelles

<u>Type</u>	<u>Période et fréquence</u>	<u>Zone</u>	<u>Format disponible</u>
Radiation globale	Mai à octobre (1982 à 1984) chaque heure	Niamey	Manuscrit
Température) Humidité) Nuages) Vent)	Mai à octobre (1982 à 1984)) toutes les 3 heures)	9 sites Niger	Manuscrit
Pression	toutes les 6 heures)		
Température du sol))		
Pluviométrie	2 fois par jour)		
Evaporation (bac))		
Température et humidité de la haute atmosphère	Mai à octobre (1982 à 1984)) quotidiennement, mai à sept) 1985) 1984/85 (toutes les 12 h)	Niamey	CCT
Pluviométrie	Avril à octobre 1982 à 1984, quotidiennement Mai à septembre 1985, quotidiennement	150 sites 100 sites	CCT Manuscrit

2. Données dans les tests sites de TAMSAT (1982 à 85)

Température du sol (9 profondeurs)	Mai à octobre 3 fois par jour)	Agadez Agrhymet Arlit)	CCT
Mesures gravimé- triques de l'humidi- té du sol (jusqu'à 20 cm)	Mai à octobre hebdomadaire)	Chikal Gaya Ibecetene Maradi x 2 Tahoua)	
Humidité du sol jusqu'à 2 m (sonde à neutron)	Occasionel)		Manuscrit
Température de radiation en surface	Mai à octobre (pas en 1985)	Arlit	Manuscrit

3. Données 1982 à 1985 CCI (METEOSAT digitale, résolution pixel)

TAMSAT	Données	Nombre d'aq./jour		Période	% Confiance	Format
Année	Zone approx.	VIS	IR			
1982	10°N-33°N 15°E-10°W	10	18	25/5-14/10	95%	Meteosat Archive
1983	10°N-33°N 15°E-10°W	10	18	6/5-15/10	95%	Meteosat GAMP
1984	10°N-33°N 15°E-10°W	4	24	2/5-15/10	80%	Meteosat PIDUS
1985	9°N-32°N 15°E-10°W	10	21	15/5-30/9	95%	Meteosat GAMP

4. Données expérimentales : détails sur demande.

CARTOGRAPHIE DE LA VEGETATION ET DES SOLS

ESTIMATION DE LA BIOMASSE AU SAHEL

par

John C. TAYLOR

Barry K. WYATT

Alan S. BELWARD

David G. HEWETT

Maurice A. KEECH

Silsoe College

Cranfield Institute of Technology

et

Institute of Terrestrial Ecology

Natural Environment Research Council

SOMMAIRE

	page
RESUME	5
INTRODUCTION	
OBJECTIFS	10
2.1. Objectifs généraux	10
2.2. Objectifs spécifiques	10
METHODES	12
3.1. Zone d'étude	12
3.2. Relevé de terrain	13
3.3. Imagerie	16
3.4. Analyse de l'imagerie	19
RESULTATS	21
4.1. Identification des grandes classes de couverture végétales	21
4.2. Indices de végétation	25
4.3. Estimation de la biomasse	31
4.3.1. Calibration	34
4.3.2. Images du PVI et des sols	39
4.3.3. Evaluation de l'estimation de la biomasse	41
4.4. Effet de la résolution spatiale sur les estimations zonales de la biomasse	47
CONCLUSIONS	49
BIBLIOGRAPHIE	51

REMERCIEMENTS

Nous remercions sincèrement l'aide et la collaboration précieuses qui nous ont été accordées lors de la préparation et de la réalisation de nos programmes de relevés de terrain. En particulier, nous aimerions remercier le Directeur Général du Centre Agrhymet, M. Bocar Coly, et le chef du Service National de la Météorologie du Niger, M. Boulama; sans leur aide et leur active coopération, nos missions de terrain auraient été impossibles.

Nous tenons particulièrement à remercier M. Alio Maidoukia de la Météorologie Nationale pour son soutien, son aide et le rôle qu'il a joué tout au long des visites de terrain.

L'aide de George Dugdale, du TAMSAT et du Département de Météorologie de l'Université de Reading nous a été fort utile pour établir les nombreux contracts nécessaires avec le Centre Agrhymet et le Service de la Météorologie Nationale à Niamey.

Nous remercions David Bourn et les responsables de l'ILCA pour l'intérêt qu'ils ont accordé à notre projet ainsi que pour leur aide pratique par la mise à disposition de leurs données sous une forme utilisable pour nos recherches.

Enfin, nous remercions la DG VIII de la Commission des Communautés Européennes qui a rendu possible ce travail par son soutien moral et financier.

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 Droite des sols et indice perpendiculaire de végétation (PVI)
- Fig. 2 République du Niger
- Fig. 3 Droites des sols obtenues à partir de a) radiométrie de terrain, b) landsat MSS, c) simulation d'AVHRR LAC
- Fig. 4 Indices perpendiculaires de végétation (PVI) obtenus à partir de a) radiomètre de terrain, b) Landsat MSS
- Fig. 5 Droite des sols dérivée de données simulées AVHRR-LAC, corrigées en fonction de l'angle solaire, pour août 1985
- Fig. 6 Courbe de calibration de la biomasse herbeuse sèche en fonction du PVI
- Fig. 7 Courbe de calibration de la biomasse herbeuse sèche en fonction du NDVI.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 Caractéristiques spectrales des senseurs Landsat MSS4, Landsat MSS5 et AVHRR NOAA7
- Tableau 2 Classes de couverture végétale identifiées en République du Niger, 1984-85
- Tableau 3 Matrice de confusion montant la fiabilité de la classification au niveau des zones d'entraînement.
- Tableau 4 Comparaison de valeurs moyennes du NDVI et du PVI pour les classes de couverture végétale identifiées dans la zone d'étude de Kao
- Tableau 5 Mesure de la biomasse, du NDVI et du PVI à Kao (2-6 septembre 1985)
- Tableau 6 Biomasse herbeuse sèche mesurée dans les sites-tests de l'ILCA (août-septembre 1985)
- Tableau 7 Estimation de la biomasse herbeuse sèche dans les sites-tests de l'ILCA, d'après l'imagerie MSS, en utilisant les PVI et NDVI calibrés sur des biomasses mesurées
- Tableau 8 Erreurs sur les biomasses estimées aux sites-tests ILCA comparées aux mesures de biomasse du 26 août au 3 septembre 1985
- Tableau 9 Effets de la résolution spatiale sur les estimations zonales de la couverture végétale dans la zone d'étude de Kao (basées sur l'imagerie Landsat d'octobre 1984)

LISTE DES PLANCHES

- Planche 1 Images fausses couleurs de la région de Kao d'après les canaux MSS 1, 2 et 4 en octobre 1984, mai et août 1985
- Planche 2 Classification "Maximum likelihood" (maximum de vraisemblance) basée sur 10 classes de la région de Kao (lissée par un filtre médian)
- Planche 3 Exemples de classes de couverture végétale
-
- Planche 4 Image du PVI (indice perpendiculaire de végétation) pour la région de Kao en août 1985
- Planche 5 Image du SBI (indice de brillance des sols) pour la région de Kao en août 1985
- Planche 6(a) Image fausses-couleurs de la région de Kao d'après les canaux MSS 1, 2 et 4 en octobre 1984
- Planch 6(b) Image AVHRR fausses-couleurs simulée (résolution LAC) de la région de Kao en octobre 1984

CARTOGRAPHIE DE LA VEGETATION ET DES SOLS

ESTIMATIONS DE LA BIOMASSE AU SAHEL

RESUME

Dans les savanes semi-arides, la pluie est souvent le facteur déterminant pour la productivité du système écologique. Néanmoins, d'autres facteurs ont également de l'importance et des mesures pluviométriques seules ne donneraient pas un outil adéquat pour une question optimale des pâturages.

On développera dans cette partie de l'étude des méthodes opérationnelles de cartographie satellitaire de la distribution et de la densité de la végétation en savane. De telles cartes de la distribution végétale présentent un intérêt direct pour le suivi des pâturages. Par conséquent, il est proposé de les utiliser pour relier les estimations pluviométriques satellitaires par rapport à la biomasse verte en vue de fournir une base pour le développement d'un système d'aide et d'information à la gestion des pâturages en Afrique sahelienne, à des échelles nationales et régionales.

La biomasse herbeuse a été mesurée pour toute une gamme de formations de savanes arides en République du Niger. On a également évalué deux indices de végétation dérivés des données satellitaires le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le PVI (Perpendicular Vegetation Index). On a ensuite construit des courbes de corrélation liant ces indices à la biomasse. Les corrélations ont ensuite été testées sur des mesures de biomasse acquises indépendamment. Un indice de brillance des sols, le SBI (Soil Brightness Index) a été calculé; il est compatible entre différentes images. Enfin, des cartes de la biomasse et de la pédologie ont été réalisées à partir des indices NDVI, PVI et SBI. On propose, pour conclure, un système opérationnel de suivi satellitaire de la biomasse des savanes herbeuses, aussi bien d'un point de vue quantitatif que de leur distribution spatiale, soit un outil indispensable à la bonne gestion de l'élevage.

INTRODUCTION

La télédétection devient une méthode de plus en plus utilisée dans le cadre de la prévision et de la gestion des ressources pastorales, dans de nombreuses régions du monde. En Afrique sahélienne, on s'est principalement intéressé à l'utilisation de l'imagerie satellitaire en tant qu'outil de suivi des pâturages: il s'agit d'exploiter au mieux les ressources, déjà touchées par la sécheresse, en vue d'une gestion optimale du cheptel.

Dans cet ordre d'idée, il faut tout d'abord identifier et cartographier les différentes communautés végétales. Dans un deuxième temps, le calcul de la capacité des pâturages nécessitera l'obtention d'estimations fiables de la biomasse pour différents types de végétation. Ces estimations doivent répondre en temps réel, ou avec un délai très court, aux variations de biomasse. Une cartographie des sols sera également intéressante puisqu'ils influencent la capacité de charge d'une région.

Puisqu'on a besoin de réponses rapides aux changements environnementaux, le système de suivi des pâturages se basera sur des données à haute fréquence d'acquisition. Par ailleurs, la résolution spatiale n'est pas un facteur limitant aux échelles régionales et nationales utilisées dans cette étude. Depuis peu, les données du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de NOAA ont suscité beaucoup d'intérêt dans le domaine de l'étude temporelle de la distribution végétale, entre autres à cause de sa haute fréquence d'acquisition des données (Hock, 1985). Ainsi, les données AVHRR, sous forme d'images NDVI, ont servi à illustrer les variations spatio-temporelles de la végétation à des échelles régionales (p.ex. Tucker, Gatlin et Schneider, 1984, Duggin et Piwinski, 1984) et continentales (Justice et al, 1985).

Cependant, la calibration d'une imagerie à faible résolution soulève un grave problème d'échantillonnage et de collecte des données de terrain. Il est en effet très difficile de mesurer des biomasses sur des zones-tests

comparables à la taille des pixels (champ de vue instantané de AVHRR-LAC, local area cover = 1,1 km). Par conséquent, peu de travaux ont publié une imagerie AVHRR calibrée en vue de l'estimation de la biomasse. Le rapport décrit une méthode d'utilisation de l'imagerie Landsat MSS pour résoudre ce problème et pouvoir relier les données AVHRR à des mesures de végétation.

Des études précédentes ont adopté diverses approches pour cartographier, par satellite, la végétation en région semi-aride: on a, par exemple, utilisé des classifications automatiques et supervisées (p.ex. Tucker, Townshed et Goff, 1985) et des indices de végétation. Divers indices ont été proposés pour l'estimation quantitative de la biomasse verte, à partir de données satellitaires multispectrales (Jordan, 1969; Pearson and Miller, 1972; Tucker, 1979; Kumar et Monteith, 1982; Curran, 1983). Ces indices sont tous hautement corrélés avec l'absorption par la végétation du rayonnement photosynthétique et donc, indirectement, avec la productivité primaire (Perry et Lautenschlager, 1984).

Parmi les différents indices proposés, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Cfr équation 1) est sans doute l'un des plus cités dans la littérature (p.ex. Tucker et al, 1983; Tucker et al, 1985; Justice et al, 1985)

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (1)$$

où NIR est le proche infra-rouge et R le rouge

un des principaux attraits du NDVI est qu'il est directement calculable à partir des données satellitaires et ne nécessite aucune connaissance de terrain. De plus, sa disponibilité comme produit standard de la NOAA, sous forme d'indice global de la végétation (GVI), a contribué à son usage répandu.

Cependant, l'utilisation du NDVI dans le cas d'une couverture végétale peu fournie et d'une réflectance variable de l'arrière-fond pédologique est peu recommandable vu que le

NDVI n'est pas indépendant du substrat (pédologique) et que des confusions peuvent survenir entre des formations végétales peu denses et certains sols nus. On détaillera ce problème plus loin.

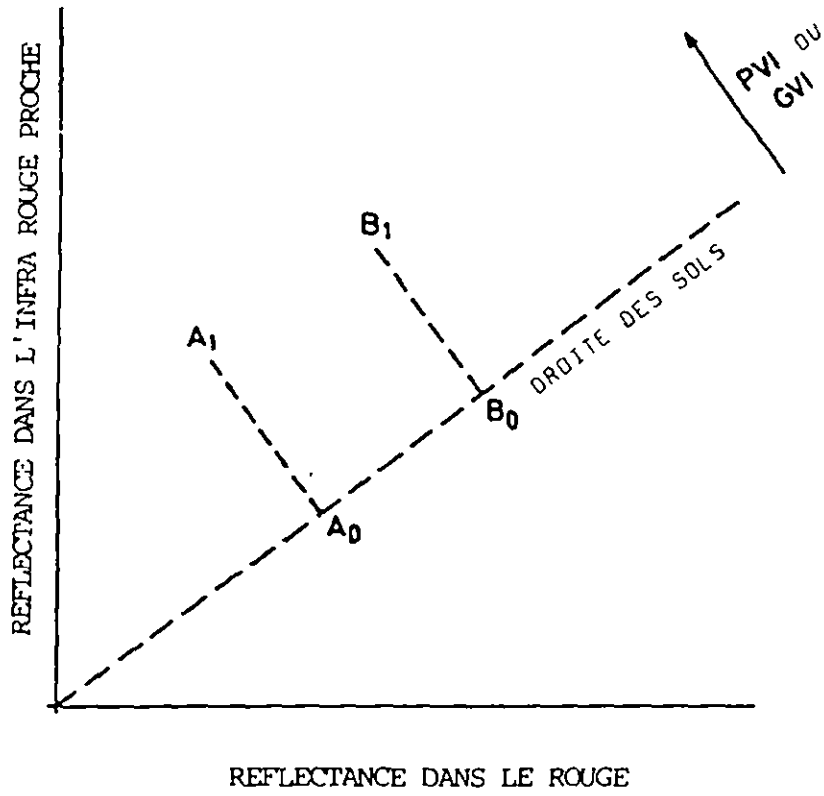
Une approche alternative, décrite dans le rapport, considère l'utilisation du PVI (Perpendicular Vegetation Index) (Richardson et Wiegand, 1977). Le PVI se base sur l'existence d'une forte relation linéaire au niveau de la réflectance des sols nus dans les longueurs l'onde du rouge et du proche infra-rouge: c'est la droite des sols (fig. 1). La présence de la végétation conduit, elle, à une absorption plus importante du rouge et à une réflexion accrue du proche infra rouge, ce qui se traduit par un déplacement de la réponse spectrale de la végétation par rapport à la droite des sols. On a montré que la composante de ce déplacement, perpendiculaire à la droite des sols, est liée à l'indice de surface foliaire verte (green leaf area index). C'est donc un indicateur indirect de la biomasse.

Concrètement, le PVI représente un des axes de la transformation des données spectrales dans le rouge et l'infra-rouge proche (équation n° 2)

$$PVI = [(R_{sol} - R_{veg})^2 + (NIR_{sol} - NIR_{veg})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Le PVI l'emporte sur le NDVI dans ce sens qu'il est indépendant vis-à-vis de la pédologie: les variations spectrales dues aux sols sont en effet concentrées sur l'axe de transformation des données parallèle à la droite des sols. Le PVI peut ainsi être utilisé à grande échelle tout en minimisant les confusions dues aux formations végétales peu couvrante. Il a par contre le désavantage d'exiger une connaissance de terrain suffisante pour distinguer des zones dépourvues de végétation, zones nécessaires à l'établissement de la droite des sols.

Figure 1. La droite des sols et l'indice perpendiculaire de végétation (PVI) (d'après Curran, 1983b)



2. OBJECTIFS

2.1. Objectifs généraux

Le but de cette partie de l'étude est double.

1. développer et tester des méthodes d'utilisation de l'imagerie satellitaire en vue de l'estimation du type de la répartition et de l'état des zones de pâturages en région semi-aride d'Afrique Occidentale et du suivi, dans le temps, des fluctuations de ces paramètres.

appliquer ces méthodes dans le cas concret d'une cartographie de la biomasse et du type de végétation, pour de grandes surfaces.

Ces cartes de la végétation consistent une éventuelle source de données pour l'établissement de modèles liant pluviosité et productivité des pâturages, et donc leur capacité de support. En attendant que ces modèles soient développés et testés, les cartes satellitaires de la végétation sont déjà d'un grand intérêt en tant que moyen direct d'observation et de suivi des pâturages en région semi-aride.

2.2. Objectifs spécifiques

Pour réaliser le plan de recherche, les objectifs particuliers suivants ont dû être définis:

développer des méthodes de calibration des données satellitaires en fonction des mesures au sol de la biomasse et de la détermination des types pédologique et végétal.

étudier diverses méthodes d'estimation satellitaire de la biomasse; en particulier, comparer les avantages respectifs du NDVI et du PVI pour l'estimation de biomasses herbacées faibles.

contrôler rigoureusement les estimations satellitaires à propos de la typologie des sols et de la végétation ainsi que de la biomasse.

comparer les performances relatives de différentes imageries; en particulier, étudier l'impact de la résolution sur les surfaces estimées pour les différentes classes pédologiques et végétales.

suggérer l'intégration des techniques présentes dans un schéma opérationnel global de suivi satellitaire routinier de la biomasse en région semi-aride, à des échelles nationales ou régionales.

3. METHODES

3.1. La zone d'étude

L'étude a été réalisée en divers sites de pâturages semi-arides en République du Niger (Afrique de l'Ouest). La localisation précise de ces sites-tests a été déterminée en fonction:

de la localisation, au Niger, des pâturages menacés par la sécheresse

de la localisation d'une partie des stations météorologiques du réseau TAMSAT, établi conjointement par le Département de Météorologie de l'Université de Reading et par le Centre Agrhymet de Niamey (voir annexe 1 du rapport)

de la disponibilité d'une imagerie Landsat MSS de bonne qualité

de considérations logistiques diverses, dont la facilité d'accès sur le terrain

Les observations ont été faites le long de 6 transects (Fig. 2)

Birni - Nkonni - Tahoua	140 km
Tahoua - Keita	70 km
Tahoua - Tilemses	110 km
Kao - Tchinn Tabaraden - Tassara	166 km
Tahoua - Abalak - Agadez	260 km

La plus grande variété de types de couverture végétale a été observée près de Kao et on y a délimité un site environ 50 kms sur 50 kms, équivalent donc à une partie de scène Landsat de 512 X 512 pixels, en vue de l'étudier de façon approfondie (voir Fig. 2). Cette zone correspond en partie à la ferme d'Etat d'Ibetecene -, où un réseau très dense de pluviomètres et de points de mesure de l'humidité du sol a été installé par l'équipe TAMSAT en vue d'étudier

la variabilité spatiale de la pluviosité. Cette localisation offrait ainsi les bases nécessaires à l'étude détaillée de relations entre la pluviosité, la pédologie, la végétation et les données satellitaires.

3.2. Relevés de terrain

Une première visite exploratoire a été réalisée en octobre 1984, soit à la fin de la saison humide. Par la suite, d'autres visites ont eu lieu en Mars-avril et Août-septembre 1985 afin de collecter des données de terrain respectivement en saison sèche et en saison des pluies. Le programme de relevés de terrain comportait quatre phases ou niveaux.

Premièrement, on a réalisé un relevé synoptique le long de transects choisis (voir plus haut) afin de déterminer les types prédominants de couverture végétale dans la région et une zone d'étude représentative pour des échelles plus détaillées: c'est la région de Kao.

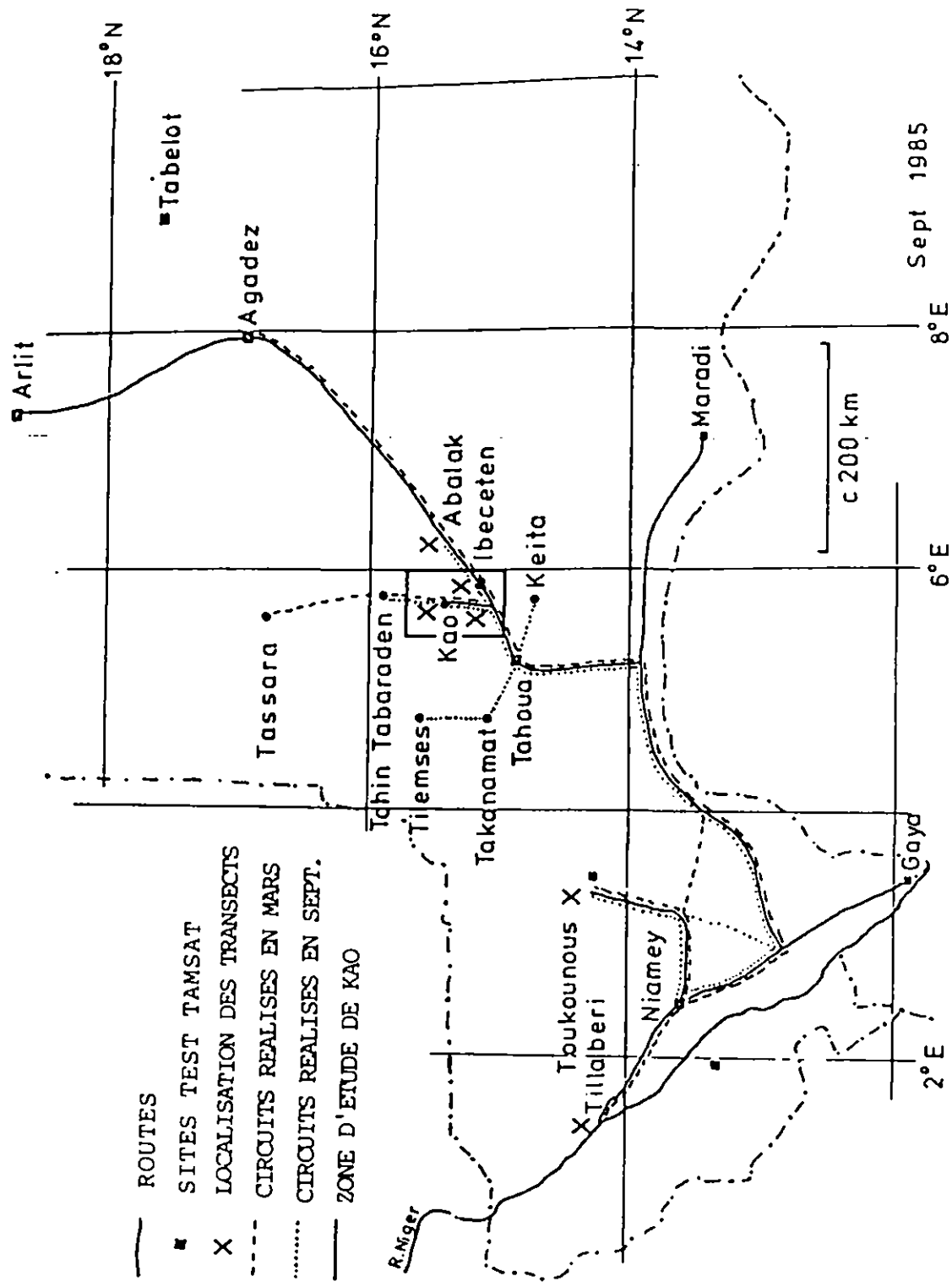
Deuxièmement, à l'intérieur de cette zone d'étude de Kao (fig. 2), on a établi des sites de mesure facilement repérables sur l'imagerie Landsat MSS. En ces sites, on a relevé en détail la composition et la densité de la végétation le long de transects, et également tenté de caractériser les influences spectrales mutuelles du sol et de la végétation. Troisièmement, on a conçu un système d'échantillonnage stratifié sur base d'une classification préliminaire de l'imagerie Landsat, elle-même guidée par les résultats de la première visite de terrain. Un set complémentaire de transects a été choisi, représentatif de chaque type de couverture identifié sur le terrain et l'imagerie. Un relevé de la végétation et des sols a été réalisé le long de ces nouveaux transects.

Les objectifs principaux de cette seconde série de relevés étaient:

Evaluer les résultats de la classification préliminaire de l'image.

Republique du Niger

FIGURE 2



fournir des données de terrain détaillées (biomasse, taux de couverture pour chacune des grandes catégories de couverture végétale en vue d'une analyse et d'une interprétation conséquentes de l'imagerie.

s'assurer que, pour des futures études de la corrélation entre biomasse mesurée et indices de végétation, les échantillons de végétation repris soient correctement stratifiés et que l'on considère la gamme la plus large de densités végétales présentes sur le terrain.

Enfin, un semis de points expérimentaux fut établi pour l'échantillonnage de la biomasse. Il correspond au réseau pluviométrique TAMSAT d'Ibecetene et devait au départ contribuer à la formation d'un stock commun de données pour les aspects botanique et météorologique du programme de recherche global. Il forme en fait également une source de données de terrain supplémentaire pour l'évaluation des estimations satellitaires de biomasse.

Des photographies fausses-couleurs de l'imagerie Landsat géométriquement corrigée furent utilisées sur le terrain pour orienter le relevé synoptique et aider au choix de sites repérables pour l'étude plus détaillée. On a par ailleurs réalisé un relevé photographique (35 mm) des principaux types de couverture végétale.

La réflectance des sols et de la végétation, le type de sol et de végétation ainsi que de la biomasse ont été relevés le long des transects linéaires. Comme indiqué plus haut, ces transects s'inscrivent dans le cadre d'un échantillonnage stratifié, représentatif de toutes les catégories majeures de couverture végétale identifiées sur la première classification d'une image Landsat MSS et confirmées lors de notre première visite de terrain (saison sèche)

La localisation des transects est indiquée à la fig. 2

Ces transects sont longs d'un km et les mesures ont lieu tous les 100 m. Les observations et les mesures sont relevées comme suit:

mesure de la végétation herbacée dans un quadrat de 2 X 2 m

échantillonnage de la végétation, collectée sur 50 X 50 cm, au centre du quadrat. Les échantillons sont ensuite séchés au four (jusqu'à atteindre un poids stable) et pesés en vue d'estimer la biomasse

échantillons de sol, pour chaque quadrat

4.- estimation visuelle de la proportion (en surface) du quadrat occupée par éléments du sol en fonction de leur granulométrie

comptage du nombre et de la taille des arbres et arbustes dans des quadrats de 100 X 100 m le long des transects

6. mesure du diamètre des troncs jusqu'à l'obtention d'un échantillon représentatif des arbres et arbustes pour chaque quadrat. L'étude des diamètres permet en effet d'estimer la biomasse des couronnes foliaires à partir de relations établies entre ces deux paramètres (Cisse, 1980).

La réflectance du sol et de la couverture végétale a été mesurée avec un radiomètre portable à 7 bandes (Spectrascan MPS 1000), sensible aux longueurs d'onde entre 0.4 et 2.35 μ m. Les analyses radiométriques se sont bien évidemment concentrées sur les 4 bandes MSS de Landsat.

3.3. Imagerie

La scène Landsat 5 couvrant notre zone expérimentale est codée 191/49 (respectivement path et row, orbite et rangée). Nous avons choisi trois scènes, globalement li-

bres de nuages, enregistrées le 7 octobre 1984, le 11 mai et le 31 août 1985 (planche 1). Les images d'octobre et d'août suivent la saison humide et montrent une végétation en bonne santé largement présente, particulièrement dans le cas de l'image d'août 1985. L'image de mai suit juste la saison sèche et, en plus de l'absence de végétation bien verte, on remarque une turbidité atmosphérique considérable, vraisemblablement due à des tempêtes de sable légèrement antérieures à la date d'enregistrement.

Les données Landsat MSS, TM et Spot ne s'adaptent guère à une utilisation opérationnelle routinière dans le domaine du suivi des pâturages au Sahel, cela est dû:

1. au coût élevé de l'imagerie

au volume de données trop important si on veut couvrir les grandes unités géographiques concernées; au délai et au coût du traitement de données trop élevés.

à la fréquence trop faible d'acquisition de données sans nuages (restriction surtout grave dans le cas de Landsat 4 et 5) ne repassant au même lieu que tous les 16 jours).

L'imagerie AVHRR, de la série des satellites NOAA, est fort attirante pour les applications de suivi de la végétation à une échelle régionale. Grâce au passage quotidien du AVHRR, il est possible de générer fréquemment une imagerie sans nuages (par exemple mensuelle) en faisant une mosaïque de pixels libres de nuages extraits de différentes images successives.

On a ainsi utilisé les données GAC (Global Area Cover) à résolution de 15 kms, pour étudier l'évolution de la végétation d'une échelle continentale (p.ex. Justice et al, 1985). Les données LAC (Local Area Cover) - à résolution de 1.1 km - ont été également considérées quoiqu'il en soit plus rarement fait mention dans la littérature. Ces données LAC semblent particulièrement convenir à des études aux échelles nationales ou régionale en effet, une

image (2 canaux repris) LAC de 512 X 512 pixels couvre une aire de 500 kms sur 500 kms et peut être aisément analysée sur un système de traitement d'images bon marché. Cependant la conception de l'échantillonnage de terrain pour la calibration de l'imagerie LAC (par exemple, en vue d'une estimation de biomasse) soulève des problèmes très complexes suite à la haute variabilité de couverture végétale à l'intérieur même d'un pixel LAC.

Nous avons contourné ces difficultés en simulant les données radiométriques AVHRR à partir de l'imagerie Landsat, tout en gardant les caractéristiques géométriques de cette dernière. On a pu calibrer l'imagerie AVHRR "à haute résolution" par rapport aux transects expérimentaux car ceux-ci restent identifiables à la résolution MSS retenue. Ayant utilisé les données AVHRR à "haute résolution" (c'est-à-dire résolution MSS) pour établir des relations du type biomasse - indices de végétation, on se propose de dégrader les "données AVHRR" jusqu'à une résolution LAC et d'utiliser l'image simulée ainsi obtenue pour le repérage géométrique des véritables données LAC: on pourra ainsi identifier les pixels LAC correspondant à des sites précis sur le terrain et donc calibrer directement les images AVHRR.

Le tableau 1 reprend les caractéristiques spectrales fondamentales des senseurs MSS et AVHRR. Les canaux AVHRR 1 et 2 sont les plus importants dans le domaine de la discrimination de la végétation. Les canaux MSS 3 et 4 se divisent la gamme spectrale du canal proche infra-rouge de l'AVHRR (bande 2) alors que le canal AVHRR 1 a une définition similaire (mais non identique) à celle du MSS2. On a choisi de simuler les données AVHRR en laissant les données MSS2 inchangées (pour AVHRR1) et on prenant la moyenne, au niveau du pixel, des canaux MSS3 et 4 (pour AVHRR2)

L'imagerie LAC est ensuite simulée en créant une image dont les valeurs de pixels correspondent à la moyenne de celles d'un bloc de 18 X 14 pixels MSS, soit une surface équivalente à la résolution AVHRR, et ce pour chacun des deux canaux.

Tableau 1: Caractéristiques spectrales des Landsat 4 et 5 / MSS
et de NOAA - 7 / AVHRR

<u>Bande spectrale</u>	<u>NOAA-7/AVHRR</u>	<u>Landsat 4 et 5/MSS</u>
Vert		Bande 1 - 0.50-0.60um
Rouge	Bande 1 - 0.58-0.68um	Bande 2 - 0.60-0.70um
Proche Infra-rouge	Bande 2 - 0.725-1.1um	Bande 3 - 0.70-0.80um
Infra-rouge moyen	Bande 3 - 3.55-3.93um Bande 4 - 10.3-11.3um	
Infra-rouge thermique	Bande 5 - 11.5-12.5um	

3.4. Analyse de l'imagerie

On a procédé à des classifications de type "maximum de vraisemblance" (maximum likelihood) en utilisant l'information, corrigée géométriquement et radiométriquement, des quatre canaux MSS.

Dans nos analyses, les PVI et NDVI furent calculées pour les "données AVHRR" (simulée à partir de MSS) comme suit:

$$R^* = MSS2 \quad (3)$$

$$NIR^* = (MSS3 + MSS4) / 2 \quad (4)$$

Pour le calcul du PVI, les radiances des sols nus furent mesurées pour des pixels-échantillons sur une composition colorée de la région et reportées sur un diagramme bidimensionnel NIR/R (figure 4). L'équation de la droite des sols résultante a été obtenue par régression linéaire (équation 5).

* R = "rouge"

NIR = "infra-rouge proche"

cfr équations 1 et 2

Les images PVI sont générées par rotation des axes dans l'espace bidimensionnel NIR/R, par simple transformation géométrique (transformation 6)

L'axe de transformation parallèle à la droite des sols est appelé Indice de Brilliance des Sols (Soil Brightness Index, SBI, cfr transformation 7) et révèle la nature du substrat (type et humidité des sols).

4. RESULTATS

4.1. Identification des grandes classes de couverture végétale

A la suite de la première mission de terrain (saison sèche) on a pu distinguer les dix catégories de couverture végétale reprises au tableau 2. Les principaux types de sols consistent en des latérites, aux affleurements facilement identifiables, avec des dépôts associés d'argile illuviale: la composition du mélange varie depuis des dépôts homogènes de graviers latéritiques près des affleurements de la cuirasse jusqu'à des dépôts d'argile seule lorsqu'on s'en éloigne, en passant par toute une gamme de mélange entre ces deux extrêmes.

Les dépôts argileux se rencontrent également dans les dépressions et les lits des rivières temporaires. Ceci nous conduit à suspecter la présence d'une couche d'argile en-dessous de la plupart des sols sableux qui sont de loin majoritaires dans notre région: ceux-ci semblent provenir de dunes formées antérieurement alors que le Sahara s'étendait beaucoup plus au sud qu'actuellement.

Tableau 2: Catégories de couverture végétale identifiées en République du Niger (1984-85)

<u>SOLS NUS</u>	<u>SURFACES PORTANT DE LA VEGETATION</u>	<u>AUTRE</u>
1 Latérite	5 savane arbustive dense, végétation interdunaire et dans les dépressions.	10 Eau libre
2 Plages argileuses, pavage par gravier latéritique	6 Savane arbustive sur sable latérique	
3 Argile illuviale	7 Savane herbeuse - densité moyenne	
4 Sable	8 Savane-faible densité (2)	) Classes de) pâturage)
	9 Savane-très faible densité (3))

L'amplitude du relief entre les crêtes et les vallées est généralement comprise entre 30 et 70m. On observe par ailleurs une densification notable du couvert végétal le long des lits des rivières, dans les dépressions et le long de certains flancs abrupts: ceci met en évidence l'importance de l'apport accru en humidité en ces points de concentration du ruissellement (sub)-superficiel. Ces communautés végétales arbustives, avec quelques *Calotropis procera*, sont clairement identifiables sur l'imagerie landsat MSS. En quelques rares sites, par exemple à Kao-même, de l'eau libre est présente, souvent couverte par une végétation aquatique considérable.

Lorsque la savane recouvre un sol sableux contenant des graviers latéritiques, elle apparaît différemment sur l'imagerie on la considère comme une autre classe.

Les communautés végétales précédentes se localisent dans certains sites précis et ne concernent qu'un faible pourcentage de la surface de la zone d'étude. Les zones de savane lache sur sol sableux sont les plus représentatives et représentent la source principale d'alimentation du cheptel au Niger, que ce soit selon les méthodes traditionnelles d'élevage nomadique ou dans les ranchs d'exploitation plus intensive des ressources herbacées. La couverture végétale de ces zones de pâturage est une mosaïque d'aires nues et d'aires de savane peu à moyennement denses sur lesquelles le tapis herbacé se développe en saison des pluies (principalement *Cenchrus biflorus*).

La densité de la couverture végétale en savane semble varier avec le relief et certaines cuvettes peuvent supporter des communautés assez denses. Trois classes de savane ont été distinguées sur le terrain, avec l'aide de copies photo d'images fausses-couleurs Landsat. Les différences les plus marquées entre ces catégories de savanes se rapportent principalement aux variations de substrat et de densité de la couverture végétale.

On a classifié l'image Landsat MSS d'octobre 1984 selon une procédure supervisée de type "maximum de

vraisemblance"; le résultat est lissé par un filtre médian en vue d'éliminer le bruit de fond. L'image obtenue est reproduite à la planche 2. Le but principal de cette étape est de faciliter la stratification de l'échantillonnage de terrain.

Une matrice des confusions pour les résultats de la classification dans les zones d'entraînement est présentée au tableau 3. Les valeurs sont des pourcentages de zones d'entraînement classifiées; les valeurs inférieures ou égales à 2% ne sont pas reprises.

Les zones d'entraînement sont généralement classées correctement à plus de 70%, à l'exception de la classe 7 (Savane peu dense) très nettement confondue avec la classe 6 (Savane sur sable/latérite). La plupart des confusions proviennent des zones de lente transition existant entre ces deux classes. La végétation aquatique est à la base d'un autre type de confusion entre eau libre et savane dense. La confusion entre eau et latérite échappe cependant à toute tentative d'explication sinon un recouvrement occasionnel des signatures spectrales. Seuls les classes 4 (Sable) et 5 (Savane dense) comportent une proportion significative de pixels non classifiés.

Le temps sur le terrain étant compté, il n'a pas été possible d'entreprendre une évaluation quantitative rigoureuse des résultats à l'échelle de toute la zone. Cependant, le parcours de transects de terrain nous a permis de vérifier subjectivement la validité des résultats. De plus, des transects d'estimation de la biomasse ont été établis le long desquels on a pu procéder à un relevé détaillé de la composition et de l'homogénéité de la couverture végétale dans chacune des classes (voir par exemple planche 3). A une échelle synoptique, la classification se révèle fort bonne et la localisation de sites de terrain donnés sur des copies photo de la classification possible. Les classes "Eau libre" "Argile", "Argile sur latérite", "Savane dense sur sable/latérite", et "Savanes moyennement à peu denses" apparaissent toutes comme distinguables et présentent une bonne uniformité intra-classe.

TABLE 3 - MATRICE DE CONFUSION MONTRANT LA PRECISION DE LA CLASSIFICATION
DANS LES ZONES D'ENTRAINEMENT

CLASSE SPECTRALE DE COUVERTURE	CLASSE										NON CLASSE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
LATERITE 1	89										7	
ARGILE/LATERITE 2	4	90			3							
ARGILE ILLUVIALE 3			88					10				
SABLE 4				85						4		8
SAVANE ARBUSTIVE DENSE 5					79						12	5
SAVANE ARBUSTIVE SUR SABLE LAT. 6		4				81	6					
CLASSES DE PATURAGE	SAVANE 1 7					41	53	4				
	SAVANE 2 8		10					79	7			
	SAVANE 3 9							16	73			
EAU 10										77		
% SURFACE	2.3	2.7	3.5	16.1	4.1	19.2	7.2	19.5	16.1	0.1		8.4

En ce qui concerne les classes restantes (Latérite, Sable nu et Savane dense), les résultats du tableau 3 sont largement confirmés. Dans la plupart des cas, les problèmes de confusion proviennent de la très haute variabilité spatiale de la couverture végétale, ce qui conduit à un choix difficile des transects expérimentaux.

Les zones latéritiques sont irrégulièrement coupées par des ravins d'érosion où la couche d'argile apparaît et se mêle à la latérite: des tâches de végétation dispersée se retrouvent souvent le long de ces ravins. La haute variabilité de l'état de surface dans ces zones de latérite apparaît très bien sur l'image classifiée.

Les régions classées "Sables nus" sur l'image d'octobre 1984 supportent, suite aux pluies de la saison humide 1985, une strate herbacée de densité très variable, quoique de grandes surfaces, particulièrement sur les sommets dunaires, demeurent classés de façon inchangée. Ceci suggère que les différences entre les deux classifications ne sont pas le résultat d'une erreur mais reflètent au contraire l'accroissement réel de la biomasse entre les 2 saisons de croissance de la végétation, très sèche en 1984 et plus proche de la moyenne (pluviométrique à long terme) pour 1985.

Bien que la classe "Savane dense" se distingue généralement bien et reste homogène, on peut la confondre avec de la végétation aquatique en croissance sur des surfaces d'eau libre. Ce problème reste cependant localisé dans certains sites et n'affectera donc les estimations de biomasse que pour ceux-ci.

4.2. Indices de végétation

On a étudié deux indices de végétation comme indicateurs satellitaires de la biomasse. On sait déjà que l'indice de différence normalisée de végétation (NDVI) est hautement corrélé à la surface foliaire verte et donc - du moins pour les cas de couverture végétale réduite - indirectement avec la biomasse verte. L'indice perpendiculaire de

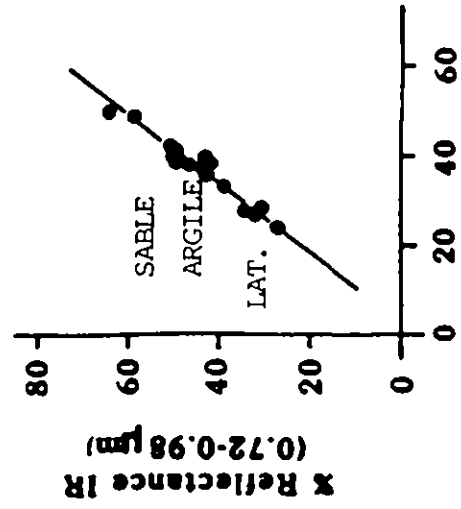
végétation (PVI) réagit de même; il reçoit généralement moins d'attention depuis qu'il exige une bonne connaissance de terrain pour sa définition.

Dans les deux cas, les indices sont calculés à partir des données des deux "canaux AVHRR" obtenus par dégradation de l'imagerie Landsat (cfr paragraphe 3.3.). Le NDVI peut être directement calculé à l'échelle du pixel par simple application de l'équation 1 sur les données de l'image référence.

Par contre, en ce qui concerne le PVI, il faut d'abord relever et évaluer la corrélation linéaire entre les réponses spectrales des surfaces nues dans le rouge et l'infra-rouge, autrement dit la droite des sols. Les résultats sont présentés à la figure 3 des droites des sols ont à la fois déterminées à partir a) d'une radiométrie de terrain, b) des données AVHRR simulées mais toujours à la résolution spatiale MSS, à partir des pixels correspondant aux sols nus. La figure 3c montre le résultat similaire à partir des données simulées AVHRR-LAC, où les pixels de sols nus ont été localisés par référence à l'imagerie de base MSS. Dans les trois cas on obtient une très forte corrélation entre les réponses dans le rouge et l'infra-rouge proche (pour les sols nus); la droite des sols a toujours une ordonnée à l'origine négative. La perte de résolution spatiale - lorsqu'on passe de MSS à AVHRR LAC a un impact remarquablement faible sur l'équation de la droite des sols. Par contre, et ce n'est guère étonnant, la droite des sols déterminée à partir de la radiométrie de terrain diffère des deux autres de façon significative.

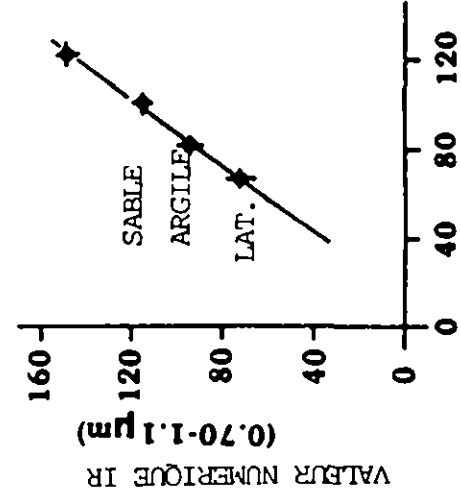
La figure 4 montre le comportement spectral de la végétation dans un espace bidimensionnel R-NIR* par rapport à la droite des sols. Les valeurs du PVI sont indiquées. La figure 4(a) reprend le relevé de communauté végétale à composition variée. Le diagramme montre bien un modèle constant de croissance simultanée du PVI et de la couverture végétale ainsi que du niveau d'activité photosynthétique (déduit de la présence de biomasse foliaire verte). La figure 4(b) présente les résultats semblables à partir

a) **RADIOMETRE**
 IR = 3.5 · 1.31R
 r² = 0.944 ..



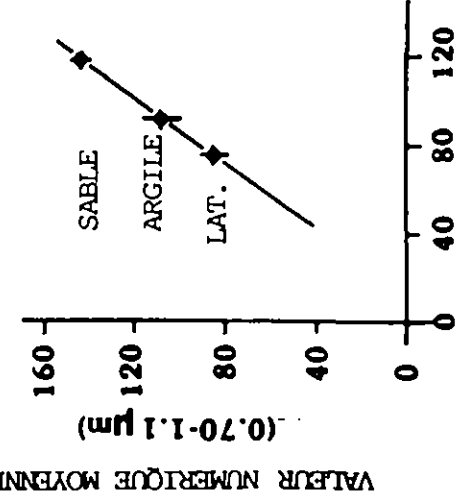
% Reflectance R
 (0.62 - 0.68 μm)

b) **Landsat MSS**
 IR = 17.4 · 1.36R
 r² = 0.997 ..



Valeur numérique R
 (0.60 - 0.70 μm)

c) **DONNEES AVHRR LAC SIMULEES**
 IR = 19.7 · 1.40R
 r² = 0.995 ..



Valeur numérique moyenne R
 (0.60 - 0.70 μm)

Figure 3 : Droites des sols obtenues à partir de a) radiométrie, b) Landsat MSS, c) AVHRR LAC (simulé)

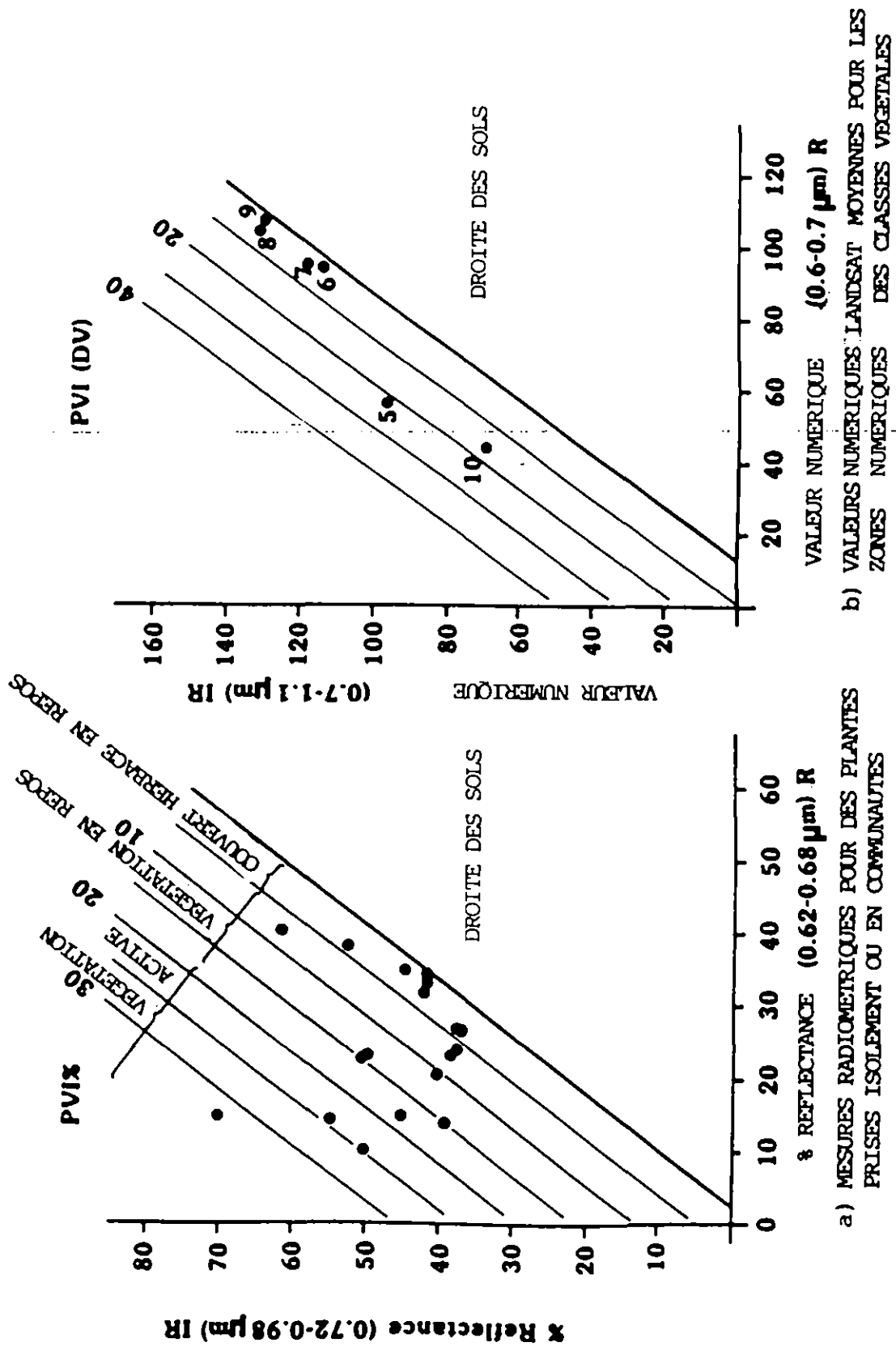


Figure 4. Indice Perpendiculaire de Vegetation (PVI) à partir de a) radiométrie de terrain, b) LANDSAT MSS.

des données AVHRR à résolution MSS, basés sur l'étude des zones d'entraînement que sont les transects d'évaluation de la biomasse pour les classes végétales du tableau 2. On observe le même comportement du PVI vis-à-vis de la végétation.

Le tableau 4 compare les valeurs moyennes du NDVI et du PVI pour les dix classes de couverture du tableau 2. Les résultats montrent les limitations du NDVI dans le cas de végétation peu dense sur des substrats variables. La zone d'entraînement pour le "Sable nu" à un NDVI moyen plus élevé que ceux de trois de nos classes à couverture végétale. Cette confusion entre les catégories de savane et les sols hautement réfléchifs n'apparaît pas avec le PVI, ce qui confirme les conclusions d'Elvidge et Lyon (1985) selon lesquelles le PVI est l'indice de végétation le plus approprié pour la cartographie et l'évaluation quantitative de la végétation en régions arides et semi-arides.

Tableau 4 Comparaison des valeurs moyennes du NDVI et du PVI pour différentes classes de couverture dans la zone d'étude de Kao

Classes de couverture	NDVI	PVI (valeur numérique)
LATERITE	0.049	0.2
ARGILE/LATERITE	0.072	0.4
ARGILE ILLUZIALE	0.073	-1.7
-SABLE	0.102	0.7
SAVANE ARBUSTIVE DENSE	0.260	21.9
SAVANE ARBUSTIVE SUR SABLE LATERITIQUE	0.098	2.4
SAVANE A COUVERTURE MOYENNE	0.112	4.2.
SAVANE A COUVERTURE FAIBLE	0.095	
SAVANE A COUVERTURE TRES FAIBLE / STEPPE	0.099	1.5
EAU	10 0.228	16.3

4.3. Estimation de la biomasse

Maintenant que l'on a démontré la validité du concept de "droite des sols" dans le cas du Niger, aussi bien d'après radiométrie de terrain que sur imagerie Landsat MSS, on s'attachera - dans le cadre de ce projet d'estimation satellitaire de la biomasse - à calibrer l'imagerie en reliant les indices de végétation (NDVI ou PVI) à des mesures de biomasse.

La technique d'échantillonnage et de mesure de la biomasse a été décrite dans la section 3.2. On a eu la chance de disposer d'une imagerie Landsat de haute qualité contemporaine à notre seconde campagne de relevés de terrain en août 1985. Il fut donc possible de relier les données de terrain aux indices de végétation dérivés de cet enregistrement.

Comme précédemment, on a tout d'abord corrigé radiométriquement l'image selon un angle solaire constant de 40°. Les bandes rouge et proche infra-rouge correspondant au AVHRR ont été générées selon la procédure décrite à la section 3.4. Le NDVI est ensuite calculé sur ces données (équation 1). Dans le cas du PVI, il est d'abord nécessaire de transformer les données en fonction d'une nouvelle droite des sols correspondant aux conditions d'irradiance et aux caractéristiques des résolutions spatiale et radiométrique de la nouvelle image.

On a choisi 50 pixels de façon aléatoire, correspondant à toute une gamme de sols nus, en fait à toutes les catégories pédologiques identifiées au tableau 2. On reprend les valeurs de chaque pixel dans les deux canaux et on les reporte dans un diagramme bidimensionnel (figure 5).

L'équation de la droite des sols est obtenue par régression linéaire

$$\begin{aligned} IR = & 1,2269.R \quad 12,6674 & (5) \\ & r^2 = 0,9872 \\ & n = 50 \end{aligned}$$

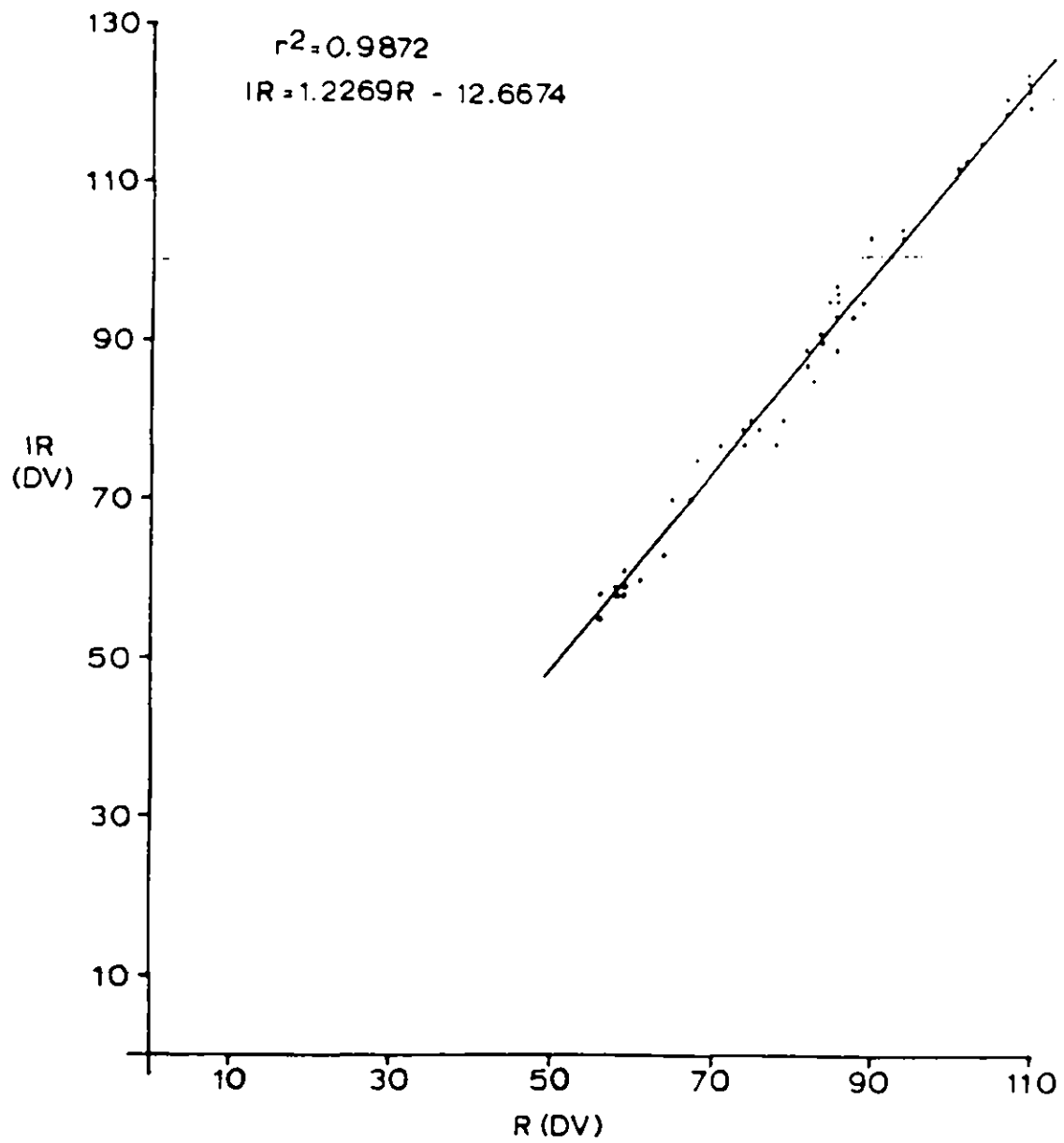


Figure 5. Ligne des sois obtenue à partir de données AVIRR LAC simulées et corrigées en fonction de l'angle solaire, août 1985.

Erreur standard sur l'estimation = 2,466

Le PVI et le SBI sont ensuite dérivés de cette droite des sols par simple rotation des axes de référence:

$$\text{PVI} = -(R-R_0)\sin\theta + (IR-I_{R0})\cos\theta \quad (6)$$

$$\text{SBI} = (R-R_0)\cos\theta + (IR-I_{R0})\sin\theta \quad (7)$$

où R_0 est l'ordonnée à l'origine de la droite des sols (canal rouge),
 I_{R0} est l'abscisse à l'origine de la droite des sols (canal IR),
 θ est le coefficient angulaire de la droite des sols.

En utilisant les valeurs R_0 , I_{R0} et θ de la droite des sols déterminée en (5), on obtient les équations du PVI et du SBI.

$$\text{PVI} = 8,003 - 0,7751R + 0,6318 IR \quad (8)$$

Erreur standard = 1,55

$$\text{SBI} = -6,523 + 0,6318R + 0,7751 IR \quad (9)$$

L'erreur standard sur le PVI a été calculée en appliquant la transformation du PVI à l'erreur standard obtenue pour la régression de IR sol par rapport à R sol.

En utilisant les transformations (8) et (9), on calcule les nouvelles valeurs des pixels en termes de PVI (déplacement perpendiculaire à la droite des sols) et de SBI (déplacement parallèle à la droite des sols), à partir des données R et NIR de l'imagerie AVHRR simulée, aussi bien à la résolution MSS que LAC.

4.3.1. Calibration

L'ensemble de nos transects de terrain se retrouve sur l'imagerie MSS et les zones d'entraînement ont été délimitées de façon à comprendre les pixels couverts par ces transects. Cette délimitation est possible puisque les transects ont été choisis en fonction de leur repérage aisé sur l'imagerie (c'était du moins un des critères fondamentaux pour leur choix). Le repérage est encore facilité par l'utilisation d'une couverture photographique en couleurs de chaque transect qui permet de localiser des bons points de référence.

Les pixels AVHRR des zones d'entraînement subissent ensuite les transformations en terme de NDVI et de PVI/SBI ce qui permet d'extraire les valeurs moyennes des NDVI et de PVI pour chaque transect ou classe de couverture.

Le tableau 5 reprend ces moyennes et on les compare ensuite aux mesures de biomasse (figures 6 et 7).

Tableau 5 Biomasse mesurée, PVI et NDVI à Kao, 2-6 septembre 1985

Site	Biomasse herbacée (kg ha ⁻¹)	PVI (DV)	NDVI	Description
A	1452	14.84	0.1577	Sable avec couvert herbacé peu dense, au sud du virage de Kao
B	604	9.26	0.113	Sable, couverte de savane moyennement dense
	374	7.55	0.0985	Sable, au ranch d'Ibecetene
	38	1.88	0.0546	Sable latéritique, savane
		-0.20	0.0074	Latérite, au nord du village de Kao
		-2.73	0.0075	Argile, sud de Kao (peut-être humide lors du passage du satellite)
		1.28	0.0387	Argile/latérite, au sud de Kao
	383	8.73	0.1070	Sable, sud de Kao

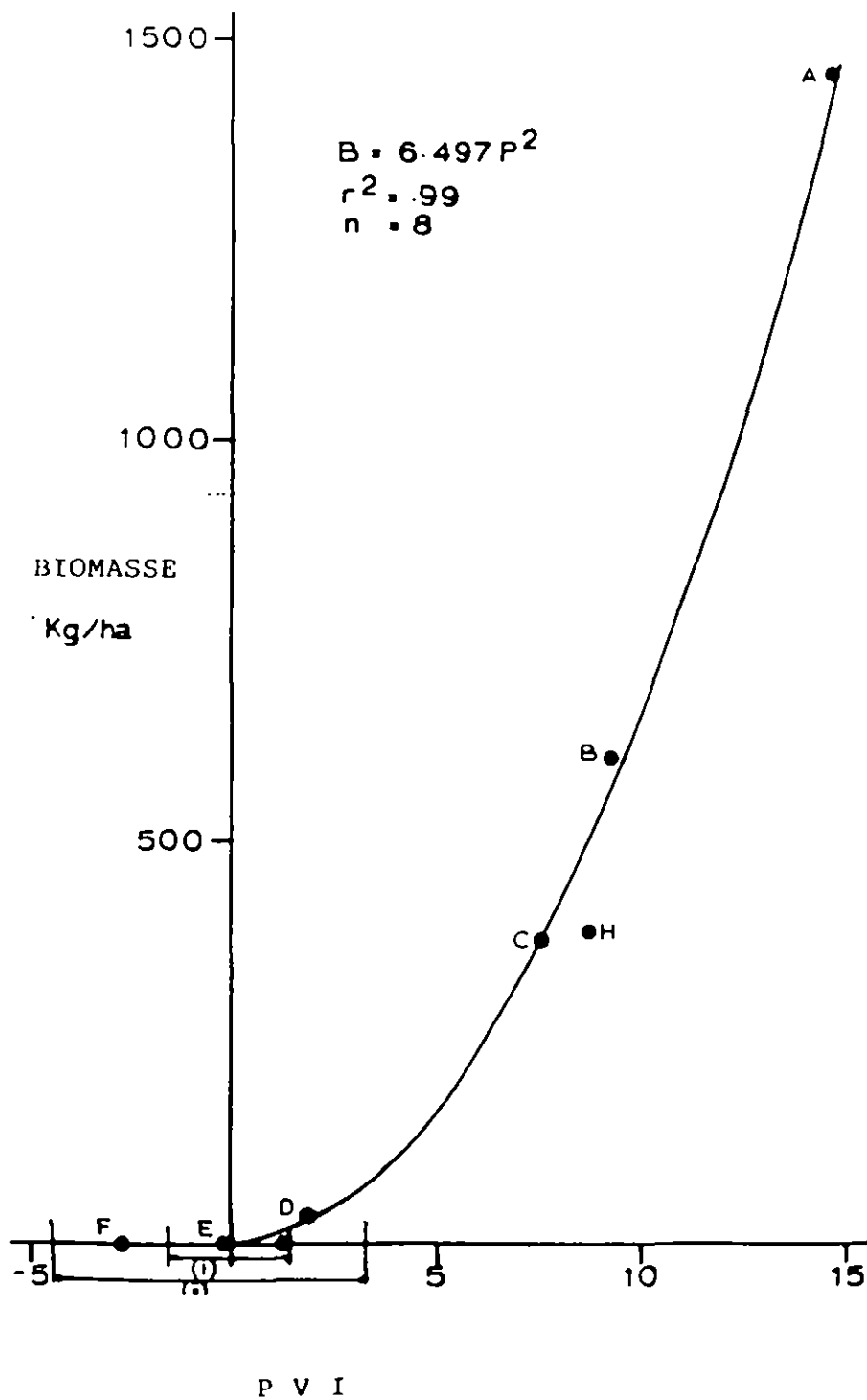


Figure 6. Courbe de corrélation pour l'estimation de la biomasse herbacée en fonction du PVI (Indice Perpendiculaire de Végétation).
 (i) = une erreur standard de part et d'autre du PVI moyen d'un sol nu.
 (ii) = gamme observée de valeurs du PVI pour des sols nus.

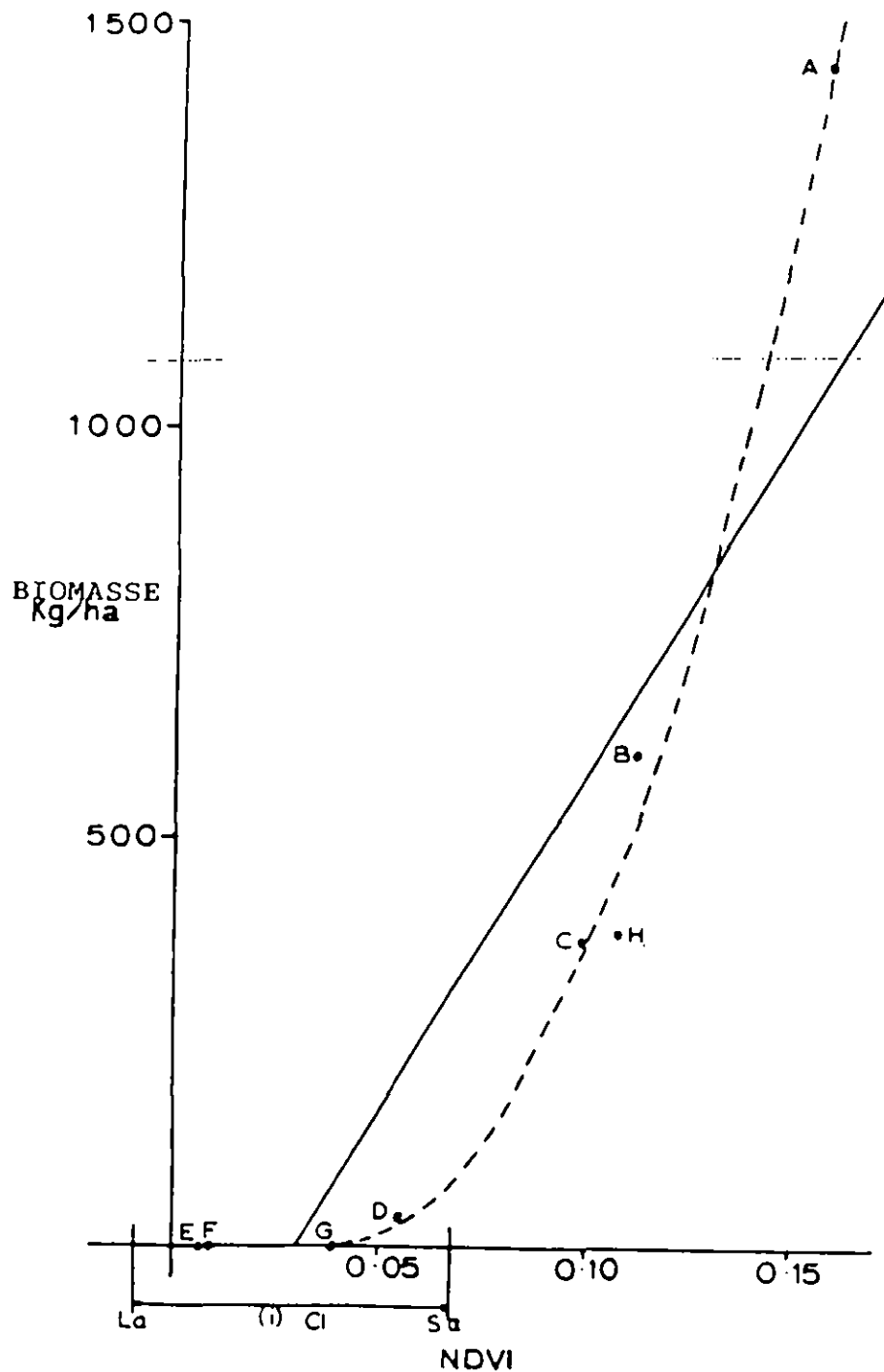


Figure 7. Courbe de corrélation pour l'estimation de la biomasse herbacée en fonction du NDVI
 (i) = gamme des valeurs observées de NDVI pour 50 sites de sols nus. Il n'y a pas de tendance commune quant à la répartition à l'intérieur de cette gamme et les sigles déterminent la position des différents types de sols (La = latérite, Cl = argile, Sa = sable).

Dans le cas du PVI, la corrélation la plus satisfaisante est obtenue par une relation du second degré.

$$\begin{aligned} \text{biomasse} &= 6,497 \text{ PVI}^2 & (10) \\ r^2 &= 0,994 \\ n &= 8 \end{aligned}$$

Les transects dépourvus de végétation (biomasse mesurée = 0) ont des valeurs du PVI s'étalant sur environ $\pm 1,5$ déviation-standard par rapport à la valeur moyenne du PVI des sols nus (voir fig. 6). De fait, les valeurs de PVI relevées pour les sols nus utilisés dans la détermination de la droite des sols varient de - 4,4 à 3,3 soit un intervalle de plus de 4 déviations standards. Cependant - par définition - le PVI d'une biomasse nulle est 0 et, dans le cas du PVI, la droite de régression doit passer par le point origine.

Le NDVI des sols nus présente un même type d'étalement: les valeurs du NDVI pour 50 pixels de sols nus, tirés au hasard pour le calcul de la droite des sols, se répartissent entre - 0,009 et + 0,067 (cette gamme est plus restreinte que celle du PVI, selon un facteur 10). Le NDVI n'est pas indépendant du substrat: on ne peut dès lors statuer à propos du passage de la courbe de régression par le point origine. En fait, pour de faibles biomasses, on aura vraisemblablement un ensemble de courbes correspondant aux différents types de sol, courbes convergentes pour les hautes valeurs de biomasse, c'est-à-dire lorsque l'influence du substrat sur la signature spectrale décroît.

Comme nous ne disposons pas de données appropriées pour considérer différentes courbes d'estimations de la biomasse en fonction du substrat, nous avons bien été obligés d'adopter une approche empirique globale. La figure 7 reprend deux courbes de calibration. La première (en trait continu) découle d'une régression linéaire reprenant toutes les données (équation 11)

$$\begin{aligned} \text{Biomasse} &= - 240.48 + 8194.36 \text{ NDVI} & (11) \\ r^2 &= 0,791 \\ n &= 8 \end{aligned}$$

La plupart des points de référence consistent en des plages de végétation sur sol clair (sables et argiles). Il est dès lors probable que le point E (latérite nue) ne convienne pas pour la calibration de la courbe. De même, le point F, une surface argileuse, aurait bien pu être humide à l'époque de l'enregistrement: ceci expliquerait les valeurs anormalement basses du PVI et du NDVI observées en ce point.

On procède donc à une seconde régression de la biomasse sur le NDVI, en ne reprenant pas ces deux points (figure 7, ligne pointillée). Dans ce cas, tout comme la corrélation biomasse - PVI, une relation du second degré donne de meilleurs résultats (équation 12)

$$\begin{aligned} \text{Biomasse} &= 180.15 \quad 8568.84 \text{ NDVI}^2 && (12) \\ R^2 &= 0,991 \\ n &= 6 \\ &\text{valable pour } 0,04 < \text{NDVI} < 0,16 \end{aligned}$$

4.3.2. Images PVI et SBI

La transformation (8) peut être appliquée pixel par pixel - à l'ensemble de l'image. Il peut être nécessaire d'incrémenter une certaine constante à l'ensemble des valeurs de pixels pour éviter des valeurs digitales négatives. L'image (une bande) résultante montre la répartition spatiale des valeurs de PVI.

Comme on a calibré le PVI par rapport à des mesures de biomasse, il est possible d'utiliser un simple "density slicing" (découpage en classes d'isodensités) en vue de générer une carte de la biomasse à partir de l'indice en question. Il faut encore juste déterminer les limites de "slicing" (du PVI) correspondant à des limites désirées des classes en termes de biomasse. La planche 4 est une de ces cartes de biomasse, dérivée de l'enregistrement de la région de Kao en août 1985. Une carte semblable peut être générée à partir du NDVI.

Dans la section 3.4, nous avons vu que la transformation de l'espace bidimensionnel R-NIR en fonction de nouvel axe

PVI concentrait les variations spectrales dues à la pédologie le long d'un axe parallèle à la droite des sols: c'est l'indice de brillance des sols (Soil Brightness Index, SBI), indicateur du type de substrat, indépendamment de la couverture végétale.

Si on applique la transformation (9) aux deux canaux (R et NIR) de l'image référence, pixel par pixel, on obtient une image (un seul canal) montrant la répartition spatiale des valeurs du SBI: les valeurs élevées correspondent aux sols hautement réfléchissants (sables, p.ex.), les valeurs basses aux sols plus sombres (argiles, latérite).

En fait, on traite cette image de façon semblable à celle du PVI pour obtenir une carte des sols (planche 5). Dans ce cas-ci cependant, il n'y a pas moyen de réaliser une calibration simple du SBI par rapport à la pédologie et il faut découper l'image (density slicing) de façon arbitraire. Notre connaissance de la région de Kao nous a permis d'ajuster les limites de classes de façon interactive jusqu'à obtenir sur l'image créée des limites pédologiques connues sur le terrain.

Si on veut que cette méthode soit pleinement utile, il est envisageable de déterminer certaines limites à partir de zones-tests connues en vue de leur utilisation pour d'autres régions ou d'une imagerie acquise à une autre date.

On a étudié la stabilité de ces limites-repères dans le temps en comparant les résultats obtenus à partir des images de la zone de Kao en octobre 1984 et en août 1985.

A première vue, il n'y avait que peu de correspondance et l'utilisation des limites retenues pour la première image donnait des résultats fort divergents avec la seconde.

Cependant, après normalisation de l'histogramme des valeurs du SBVI pour les deux images, en vue de s'assurer une distribution comparable des pixels dans la gamme de ces valeurs, le "density slicing" produit à partir du même set de limites de classes appliqué aux deux images de base des résultats quasi indifférentiels.

4.3.3. Validité de l'estimation de la biomasse

En même temps que notre programme de mesures de terrain en août-septembre 1985, une campagne bien plus importante de relevés était réalisée au Niger par le Centre International pour l'Elevage en Afrique (CIPEA ou ILCA, International Livestock Commission for Africa) dans le cadre de son étude "Integrated Livestock Project" (ILP). Le programme de recherche du CIPEA comprenait une campagne de radiométrie aérienne, avec couverture photographie aérienne correspondante et comptage des animaux. En même temps, des équipes du CIPEA procédaient à une série de mesures sur le terrain dont des mesures de la biomasse, selon des méthodes similaires aux nôtres (section 3.2). Ces campagnes de terrain ont eu lieu à trois reprises, depuis début août jusque fin septembre. Leur seconde campagne - conduite entre le 26 août et le 3 septembre - correspondait à la période de nos mesures et de l'acquisition des données Landsat (31 août 1985). Huit sites-tests du CIPEA couvraient cette image.

Le CIPEA nous a très aimablement transmis, non seulement les résultats de ses mesures de biomasse mais également une série de photographies aériennes obliques (dias 35 mm couvrant l'ensemble des zones-tests). Nous avons donc la réelle opportunité de pouvoir vérifier nos estimations de biomasse (via les indices de végétation calibrés sur nos propres mesures de biomasses) par rapport à une série de données comparables acquises indépendamment.

Le tableau 6 montre, en chaque site-test du CIPEA repris sur notre image Landsat, les biomasses mesurées lors des trois campagnes de terrain. Il faut cependant noter que les périodes de mesures ne correspondent pas parfaitement aux nôtres et qu'il y a de très rapides variations de biomasse au cours de la période de ces différentes campagnes. Ces variations reflètent la croissance rapide du tapis herbacé, et, souvent, son déclin tout aussi rapide, que ce soit par sénescence ou à cause du pâturage.

Pour chacun des huit sites CIPEA, repérés sur l'imagerie Landsat, on a estimé la biomasse à partir des indices sa-

tellitaires de végétation. La calibration des courbes d'estimation avait été réalisée sur une sous-scène réduite, la "zone-test" de Kao (512 X 512 pixels, soit environ 40 X 40 km). Les sites du CIPEA étant dispersés sur une surface bien plus grande, nous avons dû reprendre l'ensemble de la scène Landsat (environ 185 X 185 km) pour extraire les valeurs de radiance nécessaires au calcul des indices de végétation.

La scène Landsat a ainsi été traitée dans son ensemble similairement à la zone-test de Kao: correction radiométrique d'après un angle solaire constant, calcul des canaux AVHRR 1 et 2 simulés...

Tableau 6 Biomasse herbeuse sèche (kg ha⁻¹) mesurée dans les sites tests du CIPEA (ILCA) en août-septembre 1985

SITE ILCA (CIPEA) N°	Période de mesure		
	a	b	c
2	0.2	5.5	96.0
	320.5	744.2	666.2
	32.7	387.9	792.4
	7.1	342.5	85.6
	10.5	12.5	332.5
	23.1	488.4	437.6
	106.8	877.5	339.7
18	21.8	459.9	201.9

a) 3 au 10 août

b) 26 août au 3 septembre

c) 16 au 26 septembre

Pour faciliter la localisation des sites-tests du CIPEA, l'image a d'abord été corrigée géométriquement à une taille de pixel de 50 m X 50 m, en utilisant des points de contrôle extrait de la carte au 1.200.000 et un algorithme de transformation au plus proche voisin. Les coordonnées géographiques de chaque site étaient fournies par le système de navigation à inertie de l'avion: on les reprend pour déterminer le pixel correspondant approximatif sur l'image redressée. On obtient alors une localisation précise des sites en utilisant les photographies aériennes couleurs de ceux-ci (35 mm) vis-à-vis de l'image Landsat. Cette méthode donne une précision surprenante. Les sites CIPEA couvrent une aire d'environ 2 km x 0,5 km soit quelques 400 pixels (50 X 50 m). Dans la pratique, pour chaque site test, on détermine une zone d'entraînement de moins de 400 pixels, vu que l'erreur sur la localisation du site est de l'ordre de ± 1 à 2 pixels.

On a vu précédemment que la relation entre biomasse et indices de végétation était du second ordre (voir Section 4.3.1): l'utilisation d'une valeur moyenne de PVI ou de NDVI (pour l'estimation de la biomasse à l'échelle de chaque zone d'entraînement considérée comme un tout) est donc à proscrire. Il faut au contraire calculer la biomasse pixel par pixel et faire ensuite la moyenne des valeurs pour chacun des sites-tests.

Le tableau 7 reprend les valeurs estimées de biomasse herbeuse à partir du PVI et du NDVI, en considérant dans ce dernier cas diverses calibrations décrites en section 4.3.1. Il montre également, à titre de comparaison, les mesures de terrain réalisées entre le 26 août et le 3 septembre (soit la période de passage du satellite Landsat). Le tableau 8 considère les pourcentages d'erreur sur chaque estimation par rapport aux mesures de biomasse réelle, reprises au tableau 7.

Tableau 7 Biomasse herbacée sèche (kg ha⁻¹) aux sites tests ILCA (CIPEA) d'après estimation satellitaire (PVI et NDVI, calibrée sur des mesures de terrain de biomasse)

SITE ILCA (CIPEA) N°	PVI	NDVI (a)	NDVI (b)	Mesures de biomasse (c)
	6.6	101.2	6.3	5.5
3*	521.2	687.1	562.2	744.2
4**			-	387.9
	6.0	135.6	9.1	342.5
	12.2	184.0	19.4	12.5
	510.8	508.5	278.4	488.4
	940.0	830.5	862.7	877.5
18	219.0	482.3	245.2	459.9

(a) Régression linéaire en utilisant tous les points

(b) Régression linéaire du second ordre (6 points seulement)

(c) Mesures entre le 26 août et le 3 septembre (voir tableau 6)

couverture nuageuse partielle

** Couverture nuageuse complète.

Tableau 8 Erreurs au niveau des estimations de biomasse herbacée sèche (sites ILCA) par rapport aux biomasses mesurées entre le 26 août et le 3 septembre 1985

Site ILCA	Biomasse (kg ha ⁻¹)			% erreur	
	Biomasse mesurée	PVI	NDVI (a)	PVI	NVDI (a)
		6.6	6.3	20.0	14.5
3*	744.2	521.2	562.2	30.0	24.5
4**	387.9				
	342.5	6.0	9.1	98.2	97.3
	12.5	12.2	19.4	2.4	55.2
	488.4	510.8	278.4	4.6	43.0
	877.5	940.0	862.7	-	
18	459.9	219.0	245.2	52.4	46.7

(a) Régression du second ordre (6 points seulement)

Couverture nuageuse partielle

** Couverture nuageuse totale

En général, les erreurs sont de l'ordre de 5 à 30% ce qui est acceptable dans le cadre de l'estimation de la disponibilité en fourrage sur de grandes surfaces dans une optique stratégique de planification.

Globalement, il est difficile de choisir la meilleure méthode de calibration au second degré (PVI ou NDVI). L'approche via le PVI donne de très bonnes estimations pour les sites 2, 6, 7 et 17. Celle par le NDVI (second degré) semble conduire à des estimations légèrement moins satisfaisantes. Au vu de l'incertitude concernant le point-origine de la calibration du NDVI (voir section 4.3.1), il est vraisemblable que l'approche via le PVI donnera, à long terme, des résultats plus facilement reproductibles pour une succession d'images couvrant de grandes superficies sur une période assez longue.

La régression de premier ordre via le NDVI donne par contre des résultats nettement moins bons. En particulier, cette approche surestime grandement la biomasse dans le cas de végétation peu dense. Celle-ci doit donc être rejetée.

Nous sommes également conduits à reporter une série de conclusions plus particulières à propos de ces résultats:

Le site 4 était complètement recouvert par les nuages sur l'image Landsat, aucune analyse n'a donc pu être faite à cette date.

ii) Le site 3 étant partiellement recouvert par des nuages, on a calculé les indices de végétation à partir d'une zone contiguë. On peut justifier ce procédé par l'analyse visuelle de l'image suggérant une relative homogénéité de la végétation sur l'ensemble de la zone. Toutefois, on ne peut avoir une pleine confiance dans les résultats obtenus pour ce site: on voit de fait que les erreurs dans l'estimation de biomasse que ce soit via le PVI ou le NDVI se situent au-dessus de la moyenne.

iii) Les erreurs apparentes concernant le site 5 sont anormalement élevées. Le tableau 6 révèle des varia-

tions dans les mesures de biomasse qui le sont également. Les données de la première et de la dernière campagne de terrain suggèrent que la végétation des sites 2 et 5 est comparable, ainsi que le confirme l'interprétation visuelle de l'imagerie. Cela implique soit une erreur au niveau de la mesure de biomasse en ce site soit un changement très rapide de la couverture végétale au cours de la période considérée. Dans chaque cas, la comparaison des valeurs mesurée et estimée pour ce site n'est pas révélatrice.

- iv) Les estimations de biomasse pour le site 18 ne reflètent que peu la valeur mesurée sans que nous puissions en émettre une explication objective.

4.4. Effet de la résolution spatiale sur les surfaces estimées des classes de biomasse.

La plupart du travail exposé jusqu'à présent a toujours considéré une imagerie à résolution assez élevée (Landsat MSS: 80 m).

Notre but est de construire un système opérationnel travaillant sur des données à haute fréquence d'acquisition et à résolution plus faible, telle que l'imagerie NOAA AVHRR-LAC (pixel de 1,1 X 1,1 km). Il est dès lors important d'étudier l'effet de cette réduction de résolution spatiale sur l'estimation des biomasses et indirectement celle des surfaces des différentes classes de biomasse.

A titre de première approche de ce problème, on a généré une imagerie avec les caractéristiques spectrales et spatiales de AVHRR LAC à partir des données Landsat MSS (cfr section 3.3, planche 6a, 6b).

Les images PVI de la zone de Kao ont ainsi été construites aux résolutions MSS et LAC, comme vu précédemment.

On découpe ensuite les deux images en six classes de couverture végétale, par simple density slicing et on compare

les surfaces obtenues pour les classes dans les deux cas (tableau 9).

Tableau 9 Effets de la résolution spatiale sur les surfaces estimées des classes de couverture végétale dans la zone d'étude de Kao (basé sur l'analyse de l'imagerie Landsat d'octobre 1984)

PVI	Biomasse kg ha ⁻¹	% surface		
		MSS	AVHRR	Type de couverture
< 1	0	27	45	Sol nu
2-3	0-70		38	Savane très peu dense
4-7	71-200	27		Savane peu dense
8-15	201-1500			Savane arbustive dense
16-31	> 1500			Végétation dans les dépressions et le long des cours d'eau
>32				

La perte de résolution spatiale a considérablement influencé l'extension des surfaces délimitées. Ce fait est particulièrement évident en ce qui concerne les zones à végétation dense, typiquement concentrées sur des surfaces bien moindres que celle d'un pixel IAC.

Cependant, la proportion générale des différentes classes s'est globalement plutôt bien maintenue et un travail futur pourrait considérer une correction du biais introduit par la perte de résolution.

CONCLUSIONS

Les indices satellitaires de végétation peuvent être reliés vis-à-vis des mesures de biomasse au sol.

Ces indices de végétation - moyennant une calibration adéquate - peuvent être utilisés comme estimateurs de la biomasse herbacée, avec une précision suffisante pour conseiller la politique de gestion des pâturages à une échelle nationale ou régionale.

- iii) Les images multispectrales classifiées sont une aide réelle pour la conception de programme d'échantillonnage sur le terrain, particulièrement dans le cas de fonds cartographique insatisfaisant ou indisponible.
- iv) La calibration des données satellitaires vis-à-vis des données de terrain exige une imagerie à résolution spatiale relativement élevée. Si Landsat convient parfaitement en ce domaine, les données des satellites météorologiques sont cependant à rejeter.

Les données requises pour un système de gestion des pâturages nécessitent une fréquence d'acquisition supérieure à celle offerte par les satellites à orbite polaire base de type Landsat. Nous suggérons cependant l'utilisation des données Landsat en tant qu'outil de calibration de l'imagerie AVHRR-LAC.

- vi) L'utilisation du NDVI dans le cas de végétation peu dense et d'arrière-fond pédologique variable peut conduire à des confusions spectrales de surfaces dépourvues ou non de végétation, suite à l'influence du substrat sur le NDVI.
- vii) L'utilisation du PVI conduit à de meilleurs résultats et est donc préférée à celle du NDVI.
- viii) L'exploitation de l'indice de brillance des sols (SBI) peut fournir une cartographie des sols. Si des références de terrain sont nécessaires pour définir

des limites de classes pertinentes, les résultats obtenus sur les sites-tests sont cependant applicables pour le reste de l'image, pour autant que les histogrammes des images SBI soient normalisés.

- ix) Les changements de résolution spatiale (p.ex. de MSS vers LAC) ont un impact important sur les estimations de surface des classes de couverture végétale, particulièrement dans le cas de communautés végétales à extension spatiale moindre que celle du pixel considéré. Ce problème nécessite un complément d'étude.

- x) Un système opérationnel de cartographie et de gestion des pâturages est parfaitement envisageable, ainsi qu'il l'a été exposé dans ce rapport. Vu que les besoins en données restent modestes (imagerie à faible résolution dans 2 canaux) un tel système peut aisément être implementé sur un micro-ordinateur: celui-ci serait avantageusement installé dans le pays concerné, ce qui facilite l'acquisition en données de terrain (nécessaires pour la calibration des estimations de biomasse) et encourage l'utilisation de l'information obtenue par les autorités responsables de la gestion de l'élevage.

- xi) Une condition essentielle à l'installation de ce système serait le suivi d'un programme adéquat de formation par le futur personnel local de la station d'étude des pâturages.

REFERENCES

- Cissé, M.I. (1980) Production fourragère de certains arbres au Sahel: relations entre biomasse foliaire maximale et divers paramètres physiques (H.N. le Houérou, ed), International Livestock Commission for Africa, Addis Ababa, 205-210)
- Curran, P.J. (1983) Télédétection multispectrale pour l'estimation de l'indice de surface foliaire verte, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 309:257-270.
- Curran, P.J. (1983b) Problèmes pour l'estimation satellitaire de la-biomasse des couronnes foliaires, In *Ecological Mapping from Ground, Air and Space*, ITE Symposium N° 10, (R. Fuller, Ed), Institute of Terrestrial Ecology, Abbots Ripton, UK, 84-100.
- Duggin, M.J. and Piwinski D. (1984) Recueil d'indices de radiance pour le suivi de la végétation au moyen des données NOAA VHRR; effets atmosphériques et autres sur les données multitemporelles, *Applied Optics*, Vol 23, N) 15:2620-2623
- Elvidge, C.D. and Lyon, R.J.P. (1985) Influence des variations lithologiques et pédologiques sur l'estimation de la biomasse verte, *Remote Sensing of the Environment*, 17:265-279
- Hock, J.C. (1985) Suivi des ressources naturelles au moyen des satellites à orbite polaire NOAA. In *Advanced Technology for Monitoring and Processing global Environmental data*, Proceedings of the International Conference of the Remote Sensing Society and the Centre for Earth Resources Management, University of London, 5-12.
- Jordan, C.F. (1969) Détermination de l'indice de surface polaire à partir de la qualité de la lumière sur le plancher de la forêt, *Ecology*, 50:663
- Justice, C.O. Townshend, JR.G., Holben, B.N. and Tucker, C.J. (1985) Analyse de la phénologie de la végétation au moyen des données des satellites météorologiques, *International Journal of Remote Sensing*, vol 6, n° 8:1271-1318

Kumar, M. and Monteith, J.L. (1982) Télédétection et croissance végétale, In Plants and the daylight spectrum (H. Smith, Ed), Pitman, London 133-144

Pearson, R.K. and Miller, L.D. (1972) Cartographie satellitaire de la biomasse des récoltes sur pied pour l'estimation de la productivité des prairies, In Proceedings of the 8th International Symposium, Remote Sensing of the Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1357-1381.

Perry, C.R. and Lautenschlager, L.F. (1984) Equivalence fonctionnelle des différents indices spectraux de végétation, Remote Sensing of the Environment 14(1-3):169-182

Richardson, A.J. and Wiegand, C.L. (1977) Distinguer la végétation de l'arrière fond pédologique, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43:1541-1552

Tucker, C.J. (1979) Combinaisons linéaires du rouge et de l'IR photographique pour le suivi de la végétation, Remote Sensing of the Environment, Vol 8, N° 2:127-150.

Tucker, C.J., Gatlin, J.A. and Schneider, S.R. (1984) Suivi de la végétation du Delta du Nil avec l'imagerie NOAA-6 et 7, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 50, N° 1:53-61.

Tucker, C.J., Townshend, J.R.G. and Goff, T.E. (1985) Classification de la couverture des sols en Afrique au moyen des données satellitaires, Science, vol 227, N° 4685:369-375

Tucker, C.J., Vanpraet, C.J., Boerwinkel, E. and Gaston A. (1983) Suivi satellitaire de la production totale de biomasse sèche au Sahel sénégalais, Remote Sensing of the Environment, 13:461-474.

Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Sharman, M.J. and Van Ittersum G. (1985) Estimation satellitaire de la production totale de biomasse herbeuse au Sahel sénégalais: 1980-84, Remote Sensing of the Environment, 17:233-249.



Planche 1. Composition colorée (fausses-couleurs à partir des bandes MSS 1,2 et 4) de la zone d'étude de Kao en octobre 84, mai et août 1985.

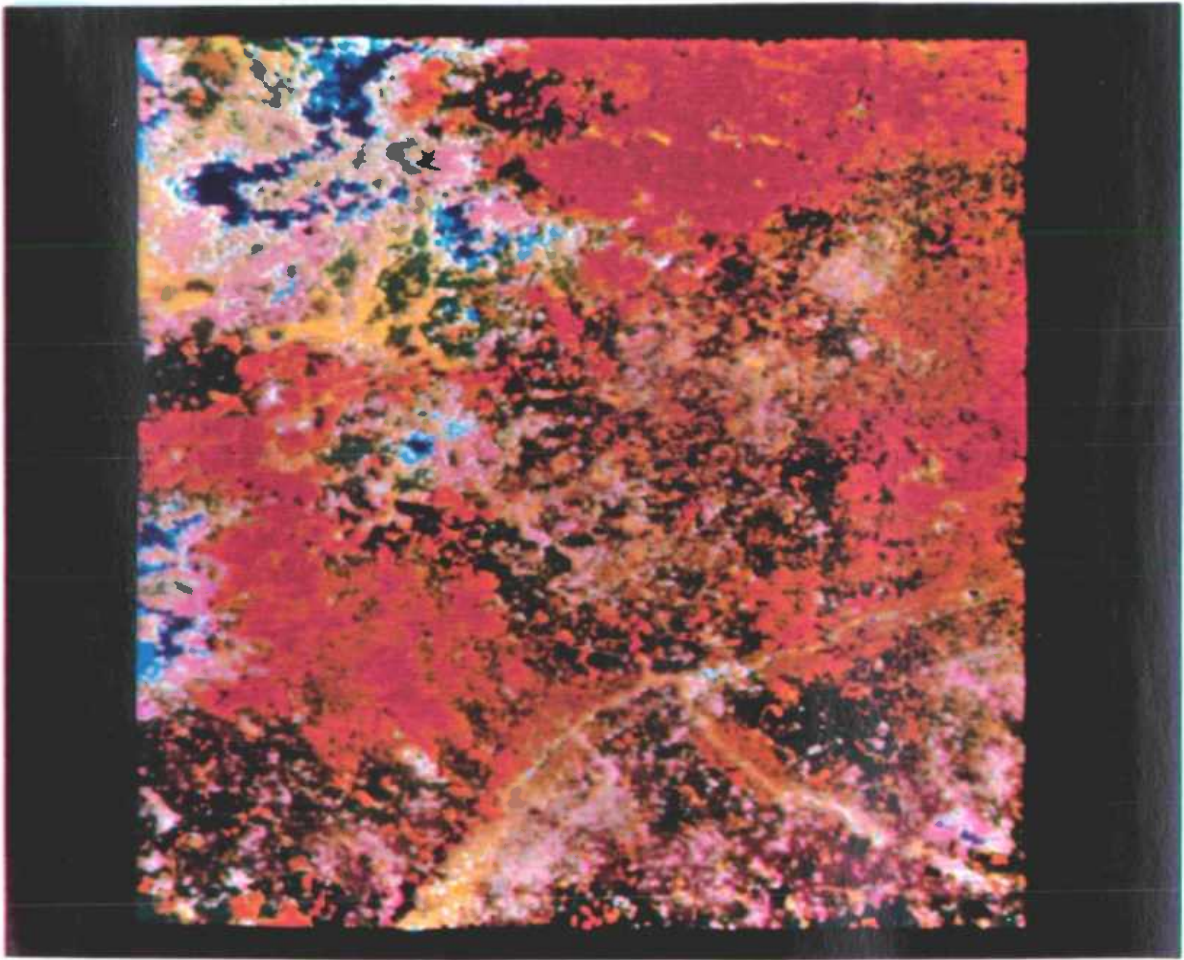


Planche 2. : Classification de type "maximum de vraisemblance" de la région de Kao. (10 classes, résultats lissés par un filtre médian).



Planche 3. : Exemples de classes de couverture végétale : à l'avant-plan, savane à très faible couverture; au milieu, savane à faible couverture; à l'arrière plan, savane à fourrés denses, le long d'un cours d'eau.



Planche 4. : Image de l'Indice Perpendiculaire de Végétation, pour la région de Kao en août 1985.
 (note : grey = gris, brown = brun, gold = or, red = rouge, yellow = jaune, cyan = turquoise)
 (corrigée en fonction de l'angle solaire, lissée selon un filtre médian).

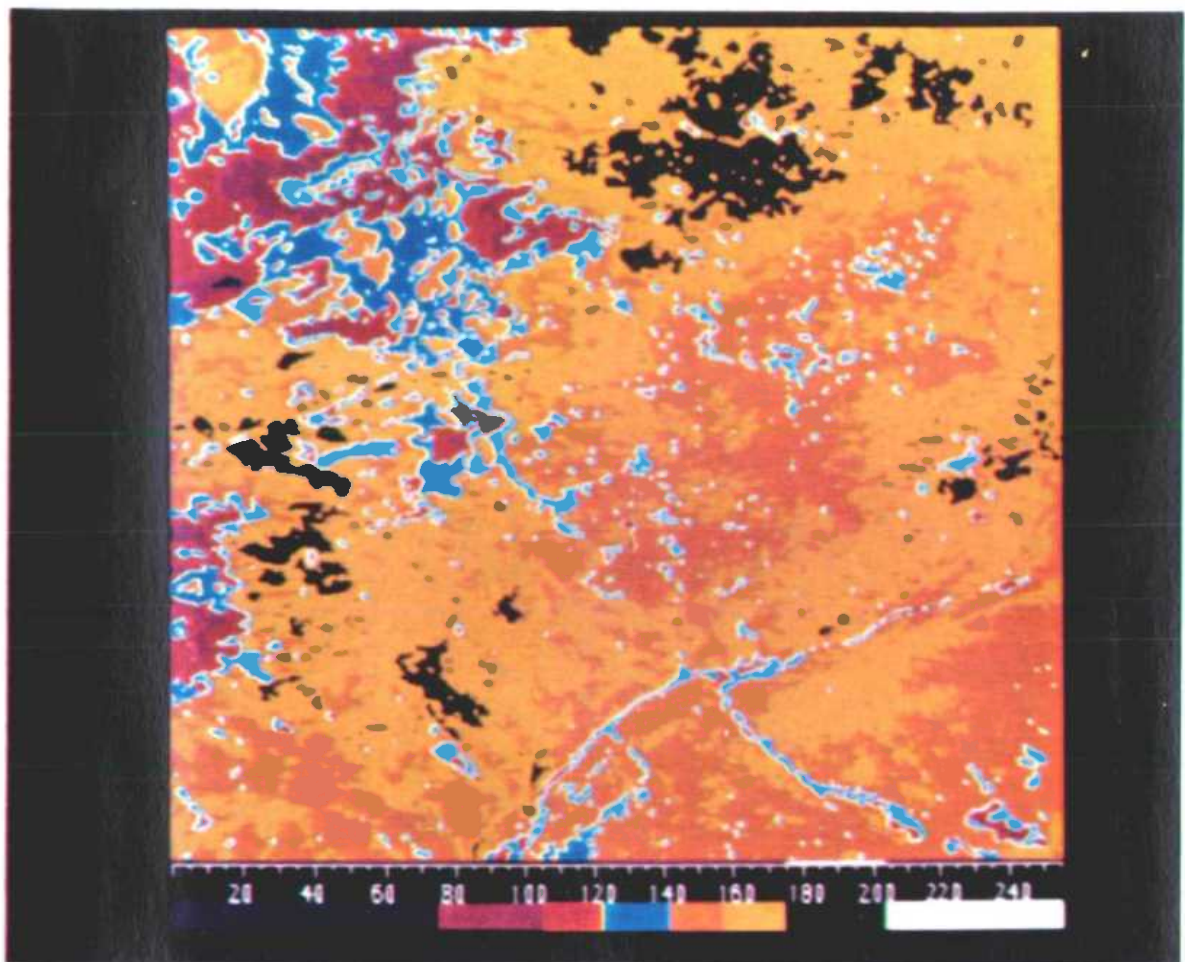


Planche 5.: Image de l'Indice de Brilliance des Sols (SBI) pour la région de Kao en août 1985.
 (Bleu = eau; magenta = latérite; rouge = argile/latérite; cyan = argile; or, jaune, verts = sables).



Planche 6. (a) : Composition colorée fausses couleur (MSS 1,2 et 4) de la région de Kao, octobre 1984.

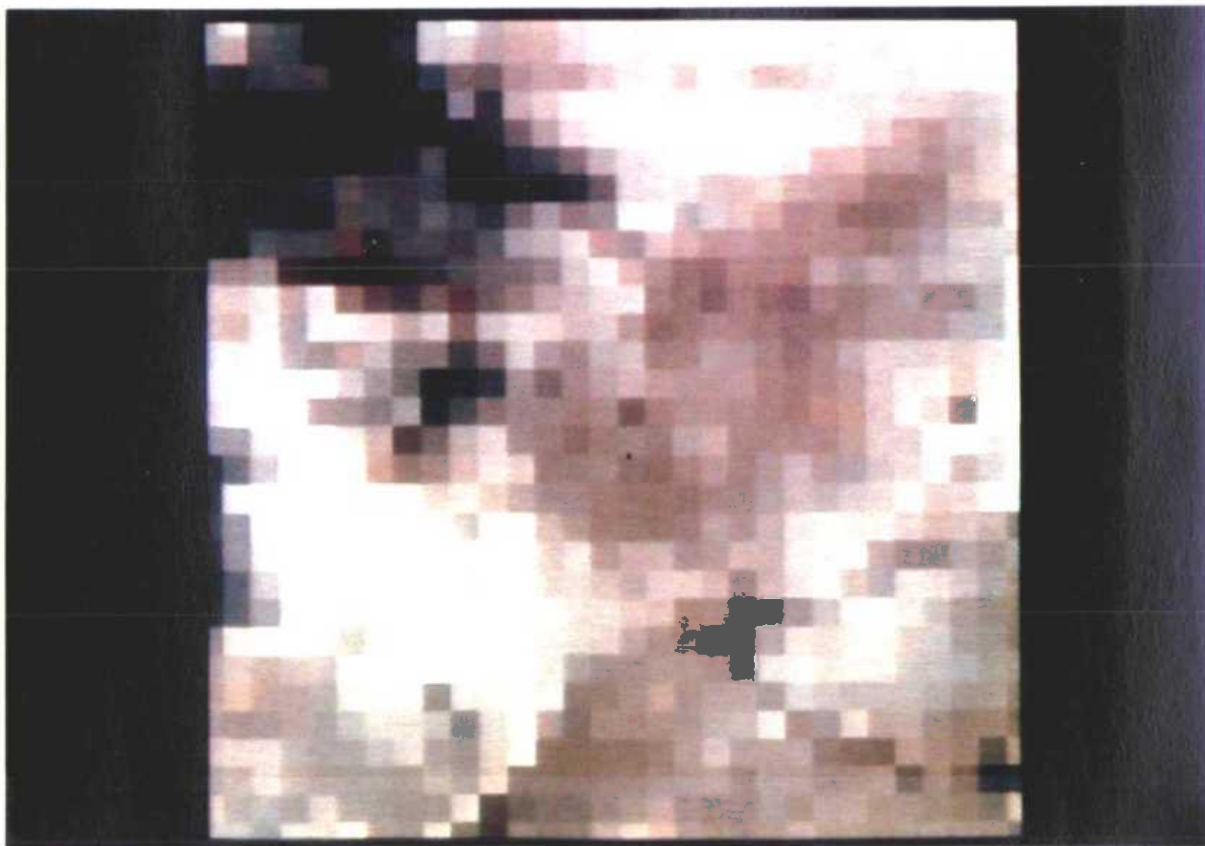


Planche 6. (b) : Image fausses-couleurs AVHRR simulée de la région de Kao (à la résolution LAC), octobre 1984.