

**UNIVERSITÉ DE PARIS I PANTHÉON – SORBONNE
U.F.R. DE GÉOGRAPHIE**



**LES PARAMÈTRES DE L'ENVIRONNEMENT ET LA
PLUVIOGÉNÈSE À TRAVERS UN SYSTÈME
D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE**

APPLICATION À L'HIVERNAGE 1990 AU SÉNÉGAL

THÈSE DE DOCTORAT

**Présentée par
Aminata NDIAYE**

**Sous la direction de
Madame le Professeur Martine TABEAUD**

Soutenue le 20 décembre 1994 devant le Jury composé de :

Professeur François CUQ	Rapporteur, Directeur, Géosystèmes/CNRS/Brest
Professeur Michel DESBOIS	Examineur, Directeur, LMD, École Polytechnique
Professeur Bernard GUILLOT	Examineur, Directeur Antenne ORSTOM de Lannion
Professeur Thierry SAINT-GERAND	Rapporteur, Université de Caen
Professeur Martine TABEAUD	Directrice de Thèse, Université ParisI Panthéon-Sorbonne

**UNIVERSITÉ DE PARIS I PANTHÉON – SORBONNE
U.F.R. DE GÉOGRAPHIE**



**LES PARAMÈTRES DE L'ENVIRONNEMENT ET LA
PLUVIOGÉNÈSE À TRAVERS UN SYSTÈME
D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE**

APPLICATION À L'HIVERNAGE 1990 AU SÉNÉGAL

THÈSE DE DOCTORAT

**Présentée par
Aminata NDIAYE**

**Sous la direction de
Madame le Professeur Martine TABEAUD**

Soutenue le 20 décembre 1994 devant le Jury composé de :

Professeur François CUQ	Rapporteur, Directeur, Géosystèmes/CNRS/Brest
Professeur Michel DESBOIS	Examineur, Directeur, LMD, École Polytechnique
Professeur Bernard GUILLOT	Examineur, Directeur Antenne ORSTOM de Lannion
Professeur Thierry SAINT-GERAND	Rapporteur, Université de Caen
Professeur Martine TABEAUD	Directrice de Thèse, Université ParisI Panthéon-Sorbonne

À Élisabeth DIOP “Näkö Böroom Bi Yërëm”,

À mes parents, mes frères et sœurs,

À mon fils Makhou.

SOMMAIRE

Sommaire	4
Remerciements	5
INTRODUCTION GENERALE	7
PREMIERE PARTIE: LE SÉNÉGAL : UN CLIMAT SAHÉLIEN MARITIME ?	10
Chapitre I : Mécanismes du climat en Afrique de l'ouest	12
I. Dynamique des centres d'action	14
II. Masses d'air et fluxa.....	17
III. La ZITC et les flux de discontinuité.....	26
IV. Manifestations pluvieuses	31
Chapitre II : Sénégal : “finisterre ouest africain”	40
I. Caractéristiques physiques du milieu.....	42
II. Composantes biotiques des paysages	67
III. Les régions climatiques et l'occupation humaine traditionnelle	73
DEUXIEME PARTIE: IMPACTS DE LA SÉCHERESSE ET RECHERCHES DE SOLUTIONS	84
Chapitre III : Déstabilisation de l'équilibre actuel : bilan et conséquences	87
I. Rappel de quelques processus fondamentaux	87
II. Impacts de la sécheresse sur le milieu	97
III. Actions et réactions anthropiques à effet généralement négatif	104
Chapitre IV : Apports de la recherche scientifique : estimation des pluies	118
I. Exemple de suivi des amas nuageux.....	119
II. Exemples de méthodes statistiques.....	127
TROISIEME PARTIE: OBJECTIFS, OUTILS ET MÉTHODES DE TRAVAIL	137
Chapitre V : Rappel de la problématique et données disponibles	140
I. Pourquoi le recours à la télédétection et à l'élaboration d'un sig.....	140
II. Données utilisées.....	146
Chapitre VI : Outils informatiques et méthode de travail	169
I. Outils informatiques	169
II. Methodologie.....	172
QUATRIEME PARTIE: PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET PERSPECTIVES	191
Chapitre VII : Comportement spatio-temporel des paramètres de l'environnement	193
I. Documents d'origine spatiale	193
II. Suivi des paramètres aérologiques	207
Chapitre VIII : relations pluies/autres paramètres	241
I. Paramètres indicateurs de la pluie.....	242
II. La pluie en 1990	248
CONCLUSION GÉNÉRALE	266
ANNEXES	269
LISTE DES SIGLES ET SYMBOLES.....	287
BIBLIOGRAPHIE	288
TABLE DES ILLUSTRATIONS	300
TABLE DES MATIERES	308

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin m'ont aidé, soutenu et encouragé à réaliser ce travail.

À mon Directeur de Recherche, Madame le Professeur Martine TABEAUD, qui m'a accordé toute sa confiance en s'intéressant à ce travail, j'exprime toute ma gratitude. Ses conseils, sa bienveillance, sa disponibilité ont permis l'aboutissement de ma thèse. Elle m'a par son dynamisme, ses conseils, fait profiter de ses grandes connaissances en matière de climatologie, ce qui a largement contribué à ma passion de poursuivre mes recherches avec enthousiasme.

Je suis très reconnaissante à Monsieur Bernard GUILLOT, Directeur de l'Antenne ORSTOM de Lannion, et Monsieur François CUQ, Directeur du Laboratoire Géosystèmes (CNRS) de Brest, de m'avoir accueilli au sein de leurs unités de recherche, en me fournissant les moyens de réaliser mon travail dans les meilleures conditions, d'avoir suivi avec intérêt et corrigé ce travail, mais aussi, d'avoir bien voulu accepter d'être les Rapporteurs de cette thèse.

Je remercie infiniment Monsieur Michel DESBOIS, Directeur de Recherche à l'École Polytechnique/Laboratoire de Météorologie Dynamique, et Monsieur Thierry SAINT-GERAND, Maître de Conférences à l'Université de Caen d'avoir bien voulu accepter d'être membres du Jury de cette thèse malgré leur charge de travail.

Je remercie vivement Monsieur Dominique DAGORNE, Ingénieur à l'Antenne ORSTOM de Lannion, à qui je dois la conception de la plupart des programmes informatiques qui ont servi à la réalisation des traitements en télédétection.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur LÉONHART, Directeur du Laboratoire Informatique des Sciences de l'Homme (CNRS) de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), pour m'avoir ouvert les portes de son unité de recherche, pendant toute la durée de mes travaux de thèse.

Que Madame Françoise PIROT et Monsieur Maurice LEGRAND, du groupe Système d'Information Spatiale de ce Laboratoire retrouvent ici mes remerciements les meilleurs pour leurs précieux conseils.

Je remercie Monsieur Jean Paul GILG et Madame Hélène GEROYANIS, Chargés de recherche au CNRS pour m'avoir conseillé et encouragé tout au long de ce travail.

Lors de ce travail de thèse, j'ai eu à bénéficier d'une bourse d'excellence du Gouvernement Français (Ministère de la Coopération et du Développement). Que cette Institution, et en particulier Monsieur CHAPELET, ex Chef de Mission de la Coopération française au Sénégal et Madame LEBAR, Hôtesse-Gestionnaire au CIES, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse tous mes remerciements aux structures et organismes sénégalais qui m'ont chaleureusement accueilli et aidé à réaliser ce travail. Que Messieurs DIÈYE, TOURÉ, BOCOUM et DIOP, Chercheurs au Centre de Suivi Écologique de Dakar, et Monsieur MASSALY de la Direction Météorologique Nationale de Dakar, trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier Monsieur Siméon FONGANG, Professeur à l'IUT de Dakar pour la relecture de cette thèse et Monsieur Pascal SAGNA, Maître-assistant à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour ses suggestions.

Mention spéciale à Monsieur Dominique BRETTE et à ses filles, Florence et Valérie, à Madame Odette CHEMIN, à Monsieur Pierre MERTENS et famille, à Monsieur Jean Louis HUIBANT, pour leur soutien sans faille, leurs encouragements et leur accueil pendant mes années d'études en France, dans une ambiance familiale toujours chaleureuse.

Enfin, ma reconnaissance va à tous mes amis du LISH de Paris, du Laboratoire Géosystèmes de Brest, de l'antenne ORSTOM de Lannion, de l'Institut de Géographie de Paris et de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar qui m'ont encouragé, soutenu et ont donc largement contribué à la réalisation de ce travail.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les changements climatiques observés au Sahel, et leur conséquence directe : la sécheresse persistante, expliquent l'acharnement des scientifiques à multiplier les recherches visant à mieux maîtriser ce phénomène (Desbois, 1988 ; Citeau, 1988 ; Fontaine, 1988 ; Janicot, 1987 ; Courel, 1984 ; Leroux, 1983 ; Tabeaud, 1981...). Comprendre les origines naturelles et/ou anthropiques et mesurer les impacts permettraient d'appréhender, de mieux gérer et partant, de proposer des solutions adaptées. Dans cette perspective, différents types de recherches ont été menés, soit pour une application pratique et immédiate sur le terrain, soit dans un but prévisionnel (Guillet et al. 1987, Diagne et al, 1991...).

La connaissance de la quantité et de la distribution spatiale des précipitations est la première condition à remplir pour pouvoir comprendre l'évolution à long terme des processus liés au déficit hydrique et fournir des moyens d'aide à la gestion et à la planification. Or, le nombre et la répartition des stations météorologiques ne permettent pas d'appréhender correctement l'hétérogénéité spatiale et temporelle des pluies. Le recours à l'imagerie satellitaire semble, par conséquent, la solution la mieux adaptée pour résoudre ce problème. Les méthodes d'estimation des pluies par satellite se fondent sur la mise au point de modèles basés sur la mesure des relations entre les relevés pluviométriques des stations, la température radiative et/ou l'occurrence de nuages pluviogènes identifiés à partir des images Météosat. La combinaison de ces deux types de données a fourni des résultats, plus ou moins, satisfaisants selon la latitude et selon la qualité des images utilisées par les méthodes de calculs. Dans le but d'améliorer les méthodes existantes, et afin de les adapter à des conditions physiques et climatiques d'échelle plus fine, diverses tentatives visant à minimiser les erreurs observées sur les résultats de synthèse ont été appliquées. Il s'agit essentiellement d'introduire un terme correcteur dans les méthodes de calcul afin de réduire, sinon d'éliminer, l'influence de certains facteurs géographiques et/ou atmosphériques, notamment sur les informations d'origine spatiale.

Le taux de validité des méthodes zonales varie en fonction des régions. Au pas de temps décadaire et à une échelle spatiale fine, elles ne donnent pas de résultats satisfaisants et ne répondent pas complètement aux besoins des agroclimatologues (Cadet et Guillot, 1991). C'est le cas du Sénégal, où ce fait semble exagéré par une certaine originalité climatique issue de la position géographique du pays.

Le Sénégal est un pays aux régions climatiques contrastées. Situé entre les latitudes 12 et 16° Nord, il présente, du nord au sud, une transition entre les climats sahélien, soudanien et guinéen. Il possède une façade côtière d'environ 700 km de long, et offre, sur le plan topographique, un contraste marqué entre la partie occidentale du pays où l'altitude dépasse rarement 50 m, et le relief plus ou moins accidenté (environ 500 m) du Sénégal Oriental. Les influences déterminantes des domaines océanique et terrestre sur l'évolution des paramètres aérologiques, vecteurs du climat, provoquent une double transition climatique, du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest.

La position de finistère qu'occupe géographiquement le pays a-t-elle une influence déterminante sur le climat ? La proximité de l'océan atlantique impose-t-elle des nuances à certains paramètres atmosphériques, modifiant ainsi le schéma climatique zonal plus ou moins commun à bon nombre de pays sahéliens ? Ces interrogations rappellent que l'atmosphère repose sur un plancher tantôt continental, tantôt océanique. Elle ne peut donc être conçue comme un système fermé qui fonctionne en vertu de principes physiques internes. Étudier le climat du Sénégal suppose, par conséquent, un regard sur les deux planchers, l'un par rapport à l'autre, puis par rapport à l'atmosphère.

L'originalité climatique du Sénégal se reflète dans l'évolution spatio-temporelle des précipitations et, par conséquent, invalide en grande partie les méthodes générales d'estimation de pluies développées dans l'ensemble de la bande sahélienne.

La quasi-totalité de la population des pays sahéliens (90%) dépend directement de ressources (élevage et agriculture) directement liées à la "relative" abondance et à la régularité des précipitations. Quantifier les pluies permet donc une meilleure gestion de l'eau disponible à des fins agronomiques. Le choix de l'échelle agroclimatologique (pas de temps décadaire), adopté dans l'application des méthodes d'estimation des pluies, explique largement le souci des scientifiques d'adapter la recherche aux besoins socio-économiques locaux de populations en grande partie rurale.

Nous nous sommes fixés comme objectif, pour tenter de répondre à toutes ces interrogations, de développer une base d'information géographique permettant d'analyser, au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG), plusieurs paramètres (relatifs au substrat et aux facteurs aérologiques) susceptibles d'avoir une influence sur les mécanismes des précipitations.

Notre étude concerne, essentiellement, l'hivernage 1990. Ce choix est déterminé par le fait que cette saison des pluies a été considérée comme sèche, du fait du déficit

pluviométrique enregistré, sur l'ensemble du pays, mais également, parce que le démarrage des précipitations s'est effectué de manière complexe. Les premières pluies ont été enregistrées au Sénégal Oriental dès la première décennie du mois de mai tandis que la saison n'a débuté, dans l'ensemble du pays, qu'à partir de la deuxième décennie de juillet.

Cet écart dans les dates des premières précipitations peut-il simplement être attribué à des pluies précoces au Sud-Est du pays liées au microclimat et à la disposition de la topographie locale ? Ou bien s'agit-il d'un retard correspondant à un déficit pluviométrique important des autres régions ? Toujours est-il que, ce phénomène relatif au démarrage et à l'installation de l'hivernage a eu des répercussions sur les valeurs des cumuls annuels, confirmant ainsi la sécheresse caractéristique de cette saison 1990.

L'analyse spatiale des interrelations entre paramètres d'origine, de nature et de structure diverses peut se réaliser au sein d'un système d'information géographique qui permet, non seulement de faire une analyse et une inter-comparaison de ces données hétérogènes, mais également d'effectuer un traitement "géo-relationnel" de l'information spatiale et thématique (Cuq, 1988) : dans un premier temps, travers l'intégration des informations au sein d'une base de données (sous format numérique), ce qui permet de surmonter les contraintes de stockage et de gestion des données ; ensuite, dans une perspective d'analyse spatiale et de recherche d'une expression synthétique des éléments pertinents et de leur interdépendance.

PREMIÈRE PARTIE :

LE SÉNÉGAL : UN CLIMAT SAHÉLIEN MARITIME ?

INTRODUCTION DE LA PREMIÈRE PARTIE

Deux volets seront abordés dans cette partie. Pour mieux comprendre le contexte climatique général dans lequel évolue notre zone d'étude, nous allons dans un premier temps rappeler les mécanismes de la circulation atmosphérique en Afrique de l'ouest. Il faut d'abord comprendre que la climatologie de l'Afrique de l'Ouest ne forme pas un phénomène particulier, isolé de circulation atmosphérique générale. Mais qu'il constitue, comme chaque maillon de cette chaîne dynamique mouvante et globale, un élément complémentaire et par conséquent, fondamental. Il faut également rappeler, que la moindre déstabilisation d'ordre naturel ou anthropique, d'un des vecteurs de la circulation atmosphérique générale, peut engendrer sur l'ensemble du système, des conséquences plus ou moins néfastes selon l'ampleur du phénomène. Les impacts se manifestant dans un court terme pourraient interpeller les scientifiques du moment et les diriger vers des recherches de solutions adéquates permettant, sinon de résoudre, du moins de trouver un équilibre afin de surmonter les fléaux. Le cas le plus dramatique c'est quand les aléas climatiques proviennent d'origines lointaines et donc se manifestent dans un long terme. Cela complique de manière considérable toutes tentatives de recherches de solution d'adaptation.

La sécheresse persistante qui sévit au Sahel a, depuis plus d'une vingtaine d'année, mobilisé des scientifiques opérant dans des domaines de recherches divers et complémentaires. La complexité des origines (naturel et cyclique, anthropique et permanent), de ce phénomène (qui tend de plus en plus à s'auto entretenir), fait qu'il est difficile à maîtriser et à appréhender.

Cette sécheresse persistante, n'intéressant à un moment donné que l'extrême Nord du Sénégal, piétine depuis quelques années et gagne en latitude vers le Sud. Présenter le Sénégal permet d'abord de le situer géographiquement ensuite de mieux appréhender le contexte climatique global dans lequel il évolue. Ainsi l'objet de notre second chapitre sera de montrer comment la position géographique particulière du Sénégal "bouleverse", plus ou moins, le schéma zonal initial et impose une subdivision en plusieurs régions climatiques locaux, plus nuancées que partout ailleurs dans la zone sahélienne.

CHAPITRE I :

MÉCANISMES DU CLIMAT EN AFRIQUE DE L'OUEST

La circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest est soumise à la circulation atmosphérique générale, elle-même conséquence du déséquilibre énergétique du système Terre-Océan-Atmosphère.

Le bilan radiatif étant positif dans la zone intertropicale (entre 35° Nord et 35° Sud) et négatif au-delà, il en résulte nécessairement un transfert d'énergie, d'une part des basses couches vers les hautes et moyennes couches atmosphériques, et d'autre part des régions à bilan excédentaire vers les moyennes et hautes latitudes à bilan déficitaire (fig. 1).

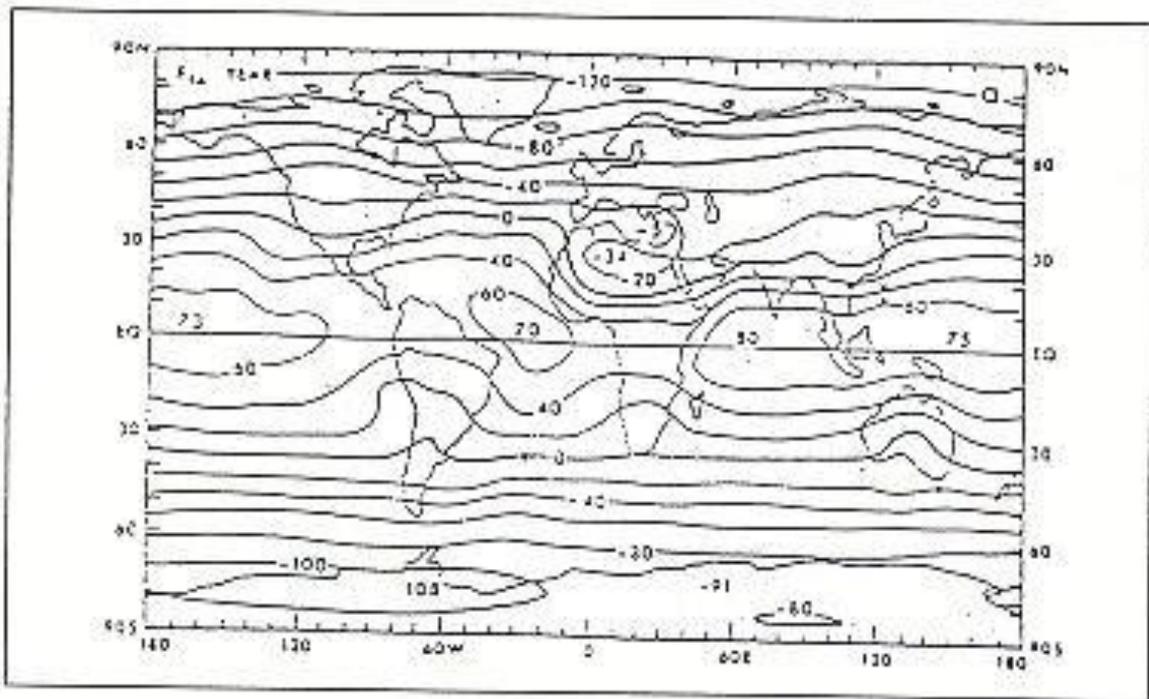


Fig. 1 : Distribution globale du rayonnement net entrant au sommet de l'atmosphère (moyenne annuelle) watt m² (Campbell et al., 1980)

Les phénomènes de compensation ou transferts d'énergie entre les différentes latitudes, s'effectuent par l'intermédiaire des courants aériens et généralement sous forme de chaleur latente, mais également par les courants marins.

Proposé en 1735 par Hadley (fig. 2), ce modèle théorique de circulation décrit, schématiquement, une branche ascendante au niveau de l'équateur et une subsidence au niveau des pôles, ce qui ne tient pas compte du forçage mécanique issu de la rotation de la terre.

La force de Coriolis empêche les échanges méridiens directs en imprimant une déviation qui, toutefois, perd de sa vigueur au voisinage de l'équateur. Ce mécanisme général implique, directement, la dynamique des centres d'action et de la zone intertropicale de convergence (Z.I.T.C.) qui sont les éléments fondamentaux de la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest.

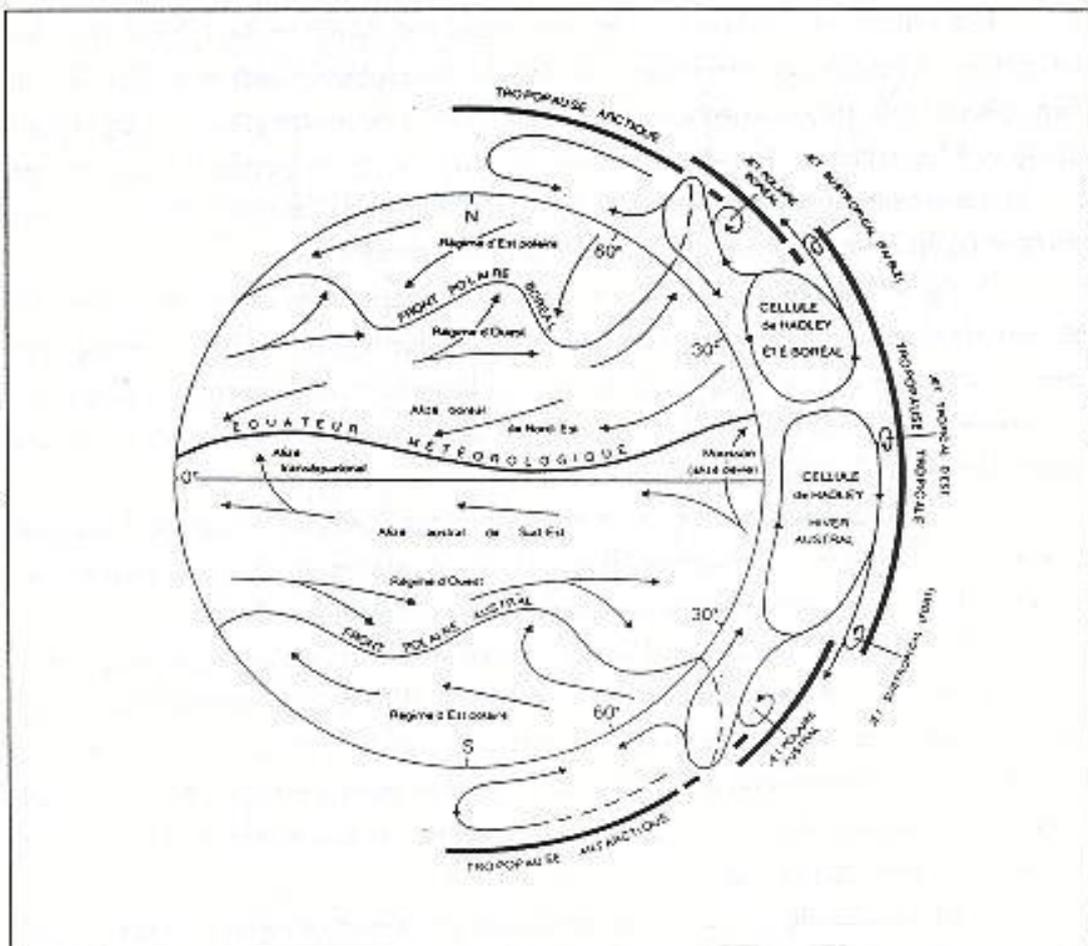


Fig. 2 : Représentation de la circulation générale de l'atmosphère selon Palmen (1950) (Dhonneur, 1985)

Peut-on parler du climat du Sénégal sans rappeler les mécanismes de la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest ? Toujours est-il que comprendre la dynamique climatique de la région permettrait de mieux saisir le contexte global et partant de mieux saisir les motivations de cette étude.

I. DYNAMIQUE DES CENTRES D'ACTION

1. Origine dynamique

Les principaux centres d'action qui intéressent l'Afrique de l'Ouest sont les anticyclones subtropicaux atlantiques, des Açores (hémisphère Nord) et de Ste-Hélène (hémisphère Sud). Ils appartiennent à la double ceinture de hautes pressions (fig. 3) qui sépare vers les latitudes 30 et 40° le domaine intertropical des moyennes latitudes et sont, comme l'ensemble du système, soumis à une translation saisonnière, plus ou moins marquée en fonction des années, vers le pôle de l'hémisphère en été.

D'origine dynamique, ils existent en permanence et sont assez stables sur l'Atlantique dont la température de surface est peu sujette aux variations saisonnières (inertie thermique des océans). En revanche, sur le substratum terrestre où l'amplitude saisonnière est très marquée, les hautes pressions sont renforcées ou remplacées par des cellules thermiques souvent très puissantes. Ainsi, l'extension zonale de ces cellules anticycloniques est fonction de l'indice de circulation qui selon sa force fait que les cellules des Açores et de Ste-Hélène s'étendent en longitude ou s'éloignent du continent africain dans les basses couches. Toutefois, vers l'altitude 2000 m, c'est-à-dire lorsque les masses d'air échappent à l'influence du substratum terrestre, leur persistance s'étend hiver comme été. Elles s'élèvent jusqu'à la tropopause avec une inclinaison à la fois vers l'Ouest et vers l'équateur. Ainsi, l'anticyclone des Açores situé grossièrement sur le parallèle 35° Nord est décalé, à 4000 m, sur le 15° Nord à l'Est des Caraïbes, et Ste-Hélène sur le 17° Sud à l'Est du Brésil, pour une latitude de surface de 30° Sud.

Leur maximum de pression et de dynamisme est atteint en hiver, car durant cette période, ils sont renforcés par des expulsions d'air polaire issues des moyennes latitudes. Ces intrusions d'air froid sont facilitées par la formation d'un couloir dépressionnaire pouvant s'étendre jusqu'à 10° Nord et favorisant des manifestations pluvieuses de type "heug" (voir IV). Fort de ces pulsions énergétiques, les cellules anticycloniques atteignent leur position la plus proche de l'équateur pendant l'hiver de l'hémisphère. En revanche, pendant l'été, elles perdent de leur intensité et s'en éloignent. La structure verticale qui sépare les deux ceintures de hautes pressions est soumise à une variation spatiotemporelle plus ou moins importante selon les années et cette variation spatiotemporelle est étroitement liée au bilan énergétique global, qui intervient directement sur la position et le dynamisme des anticyclones.

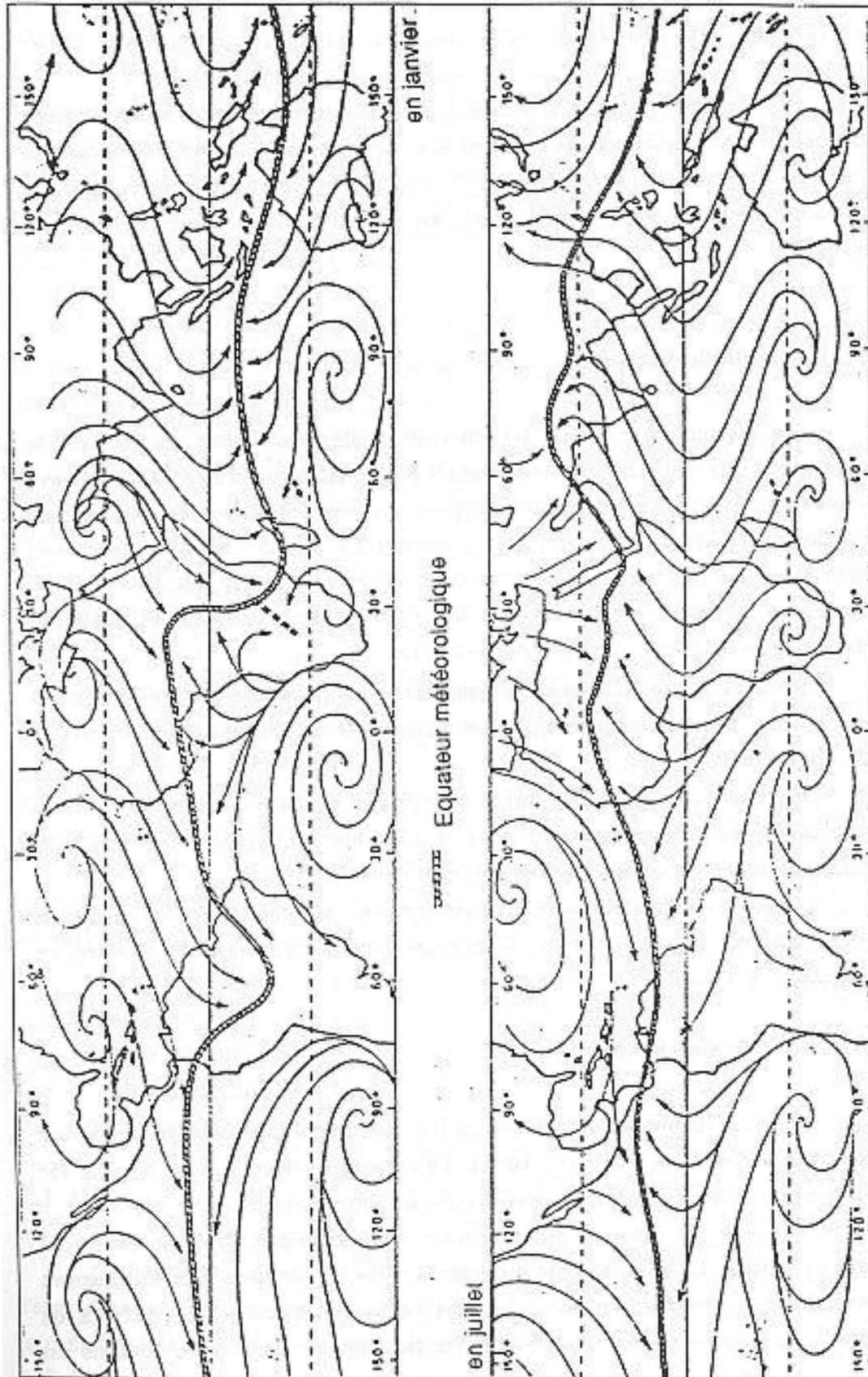


Fig. 3 : Schéma de la circulation dans la zone intertropicale en janvier et en juillet (Le Borgne, 1988)

2. Origine thermique

Le substratum terrestre, sensible aux variations thermiques, exerce une influence considérable sur la répartition des pressions de surface. En hiver, il se refroidit et favorise la formation de cellules anticycloniques qui, l'été, sont remplacées par des dépressions.

Ces cellules thermiques sont étroitement liées aux saisons et disparaissent avec l'altitude.

2.1. La cellule libyenne

Elle est thermique en surface mais est coiffée en altitude par une cellule dynamique appartenant à la ceinture des hautes pressions intertropicales. Par conséquent, elle n'existe dans les basses couches que pendant l'hiver boréal et doit son origine, au refroidissement du substratum terrestre pendant cette période. En effet, les basses températures que connaît la masse continentale, engendrent un refroidissement et une stabilité des masses d'air à son contact. Cet air froid et sec a tendance à se tasser entraînant ainsi la création d'une aire de subsidence.

Si elle est puissante, la cellule libyenne s'étend en longitude et reste soudée à la cellule des Açores. Cela suppose cependant un indice de circulation fort, c'est-à-dire un jet d'altitude intense.

En revanche, si la vitesse du jet reste faible, la cellule libyenne s'éloigne de l'anticyclone des Açores favorisant ainsi la formation d'un couloir de circulation méridienne le long des côtes du Maroc et de la Mauritanie.

Dans ce couloir s'effectuent des transferts directs de masses d'air polaires et équatoriales dont le brassage est à l'origine des pluies d'hiver souvent constatées en Afrique de l'Ouest.

2.2. La dépression saharienne

On peut la définir comme une dorsale reliant la cellule anticyclonique des Açores aux hautes pressions de l'Asie continentale. Elle s'étend aux environs de 15° Nord dans les basses couches, entre ces deux cellules anticycloniques.

Elle ne se manifeste que pendant l'été et doit son origine au réchauffement du continent africain. En effet, pendant cette période, les températures sont extrêmement élevées (35° C en moyenne), ce qui favorise le réchauffement et l'ascendance de l'air à son contact. Ce phénomène est accentué par le fait que la dépression saharienne est surplombée aux environs de 850 Hpa par un anticyclone qui reste soudé à celui des Açores et qui le renforce de plus en plus entre 500 et 700 Hpa (Courel M.F., 1984).

Toutefois, vu son origine thermique, la dépression saharienne perd de son intensité en haute troposphère, c'est-à-dire là où l'influence du substratum disparaît, soit vers 850 Hpa.

II. MASSES D'AIR ET FLUX

Des cellules anticycloniques naissent des flux de vent qui assurent le transfert du surplus énergétique entre les différentes latitudes mais également entre les différentes couches de l'atmosphère. Trois types de masses d'air circulent en Afrique de l'Ouest.

Dans les basses couches de l'atmosphère l'air boréal et austral circulent par l'intermédiaire des alizés issus des centres d'actions précités, cédant la place en altitude à l'air équatorial transporté par les jets.

1. Dans les basses couches

Dans les basses couches atmosphériques, la force de Coriolis impose aux alizés une direction Sud-Ouest dans l'hémisphère boréal et Nord-Ouest dans l'hémisphère austral. Cependant, leur direction tout comme leurs caractéristiques thermiques et hygrométriques sont différentes en fonction de la latitude, de leur trajectoire mais aussi selon la forme et la position des cellules anticycloniques qui les engendrent.

En altitude, c'est-à-dire lorsque la force de frottement disparaît, leur vitesse croît de manière considérable avec un maximum révélé par les sondages sur l'atlantique vers 3000 m.

Ainsi, en fonction du parcours adopté : continental et/ou maritime, on distingue trois sortes de flux :

- l'alizé maritime

- l'alizé continental ou harmattan
- la mousson

1.1. L'alizé maritime

Ce flux de direction Nord-Est se manifeste quand la cellule des Açores qui l'engendre reste bien centrée sur l'Atlantique. Il a par conséquent un parcours océanique et malgré sa très forte charge en humidité, n'engendre pas de précipitations. En revanche, la fraîcheur qu'il apporte aux régions côtières qu'il traverse est incontestable. Cela se manifeste par des brouillards matinaux, de la rosée mais aussi par un "environnement" plus agréable qu'à l'intérieur des terres.

Cependant, étant à l'origine des upwellings (voir deuxième chapitre), il est en quelque sorte responsable de l'aridité observée dans ces mêmes bandes côtières. S'il finit son parcours sur l'Afrique, il devient alizé maritime continentalisé (fig. 4).

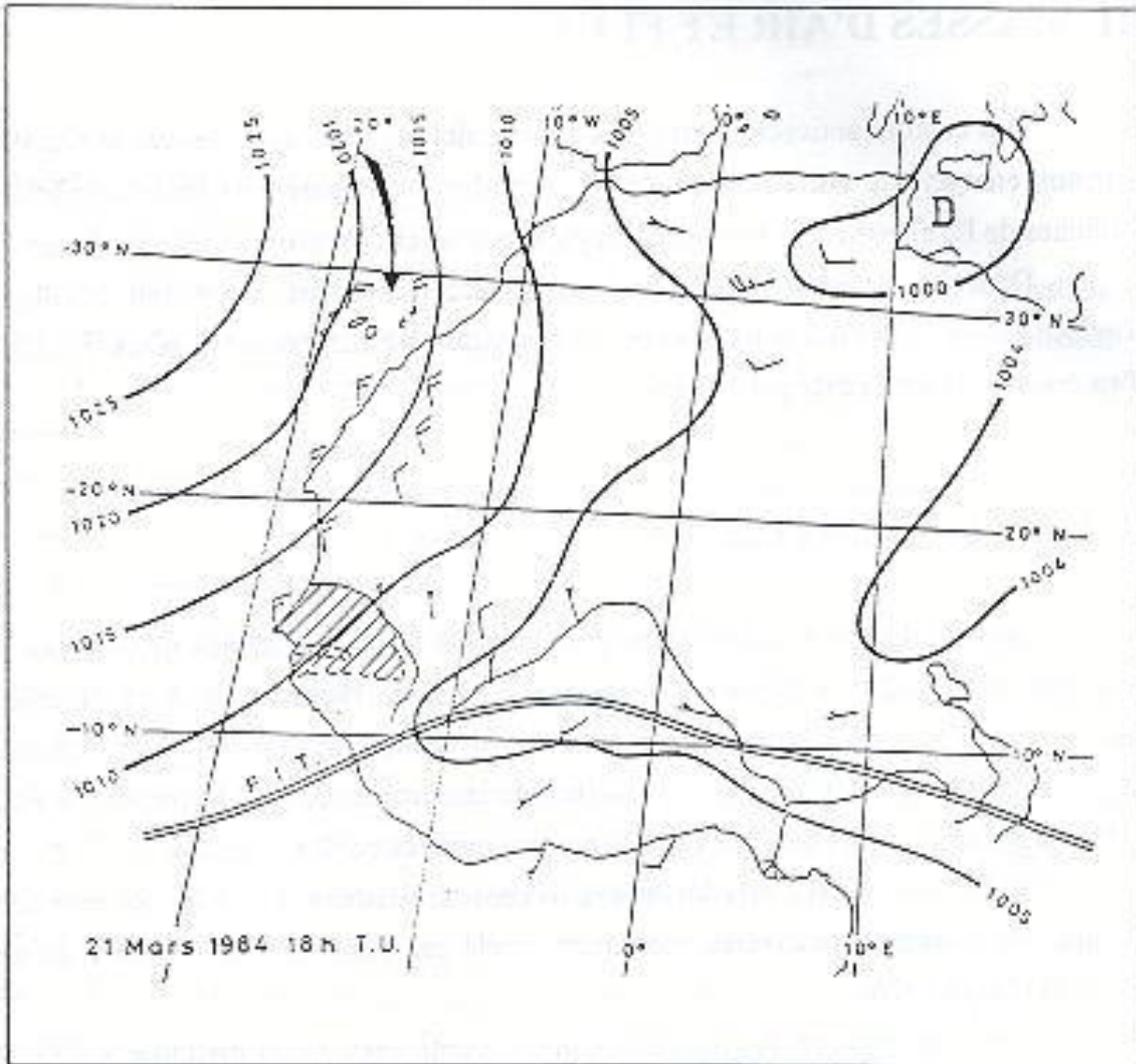


Fig. 4 : Situation d'alizé maritime continentalisé (Le Borgne, 1988)

Ce nouvel itinéraire s'accompagne de la chute considérable de son taux d'humidité. Sa siccité s'aggrave au fur et à mesure qu'il pénètre à l'intérieur du continent. Ce vent sec soulève la poussière du Sahara et sa capacité de charge en lithométéores varie en fonction de sa force de déplacement.

L'une des principales caractéristiques de l'alizé maritime reste l'inversion de température qui s'établit au sein de sa structure verticale (fig. 5). La fréquence de ce phénomène est surtout repérée au-dessus de l'Atlantique Nord.

D'ampleur et de position variables selon la latitude (500 m d'altitude en bordure des zones arides d'Afrique du Nord-Ouest, 2000 m vers l'équateur, où la température de l'océan est plus élevée), l'inversion d'alizé résulte du contact entre l'air turbulent

ascendant issu des basses couches (réchauffement du substratum et diminution sensible de la pression de surface) et l'air sec, stable et subsident des couches supérieures.

Cependant, il n'y a aucune discontinuité dynamique entre ces deux volumes d'air qui s'écoulent dans la même direction en formant un flux unique d'Est (Godard et Tabeaud, 1993).

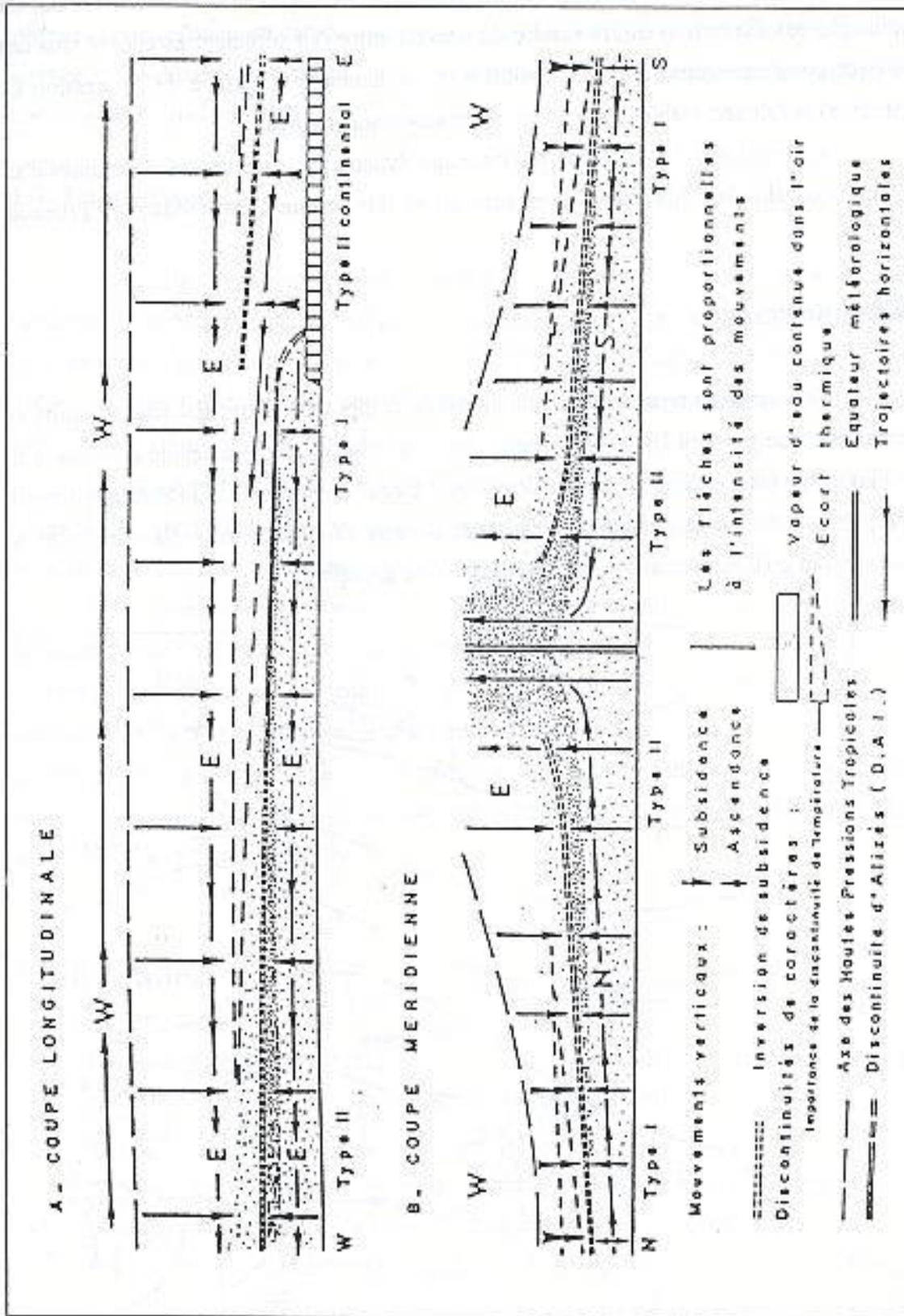


Fig. 5 : Illustration des composantes de l'inversion d'alizé (Leroux M., 1980)

1.2. L'harmattan

C'est un alizé typiquement continental de composante Nord-Est (fig. 6). Il ne se manifeste que pendant la saison sèche et doit son origine, soit à la cellule libyenne, soit au couplage entre celle-ci et l'anticyclone des Açores. Contrairement à l'alizé maritime, il ne présente aucune stratification verticale et dépasse rarement 7 m/s. Sa stabilité et sa siccité font qu'il ne peut, aucunement, engendrer de précipitation.

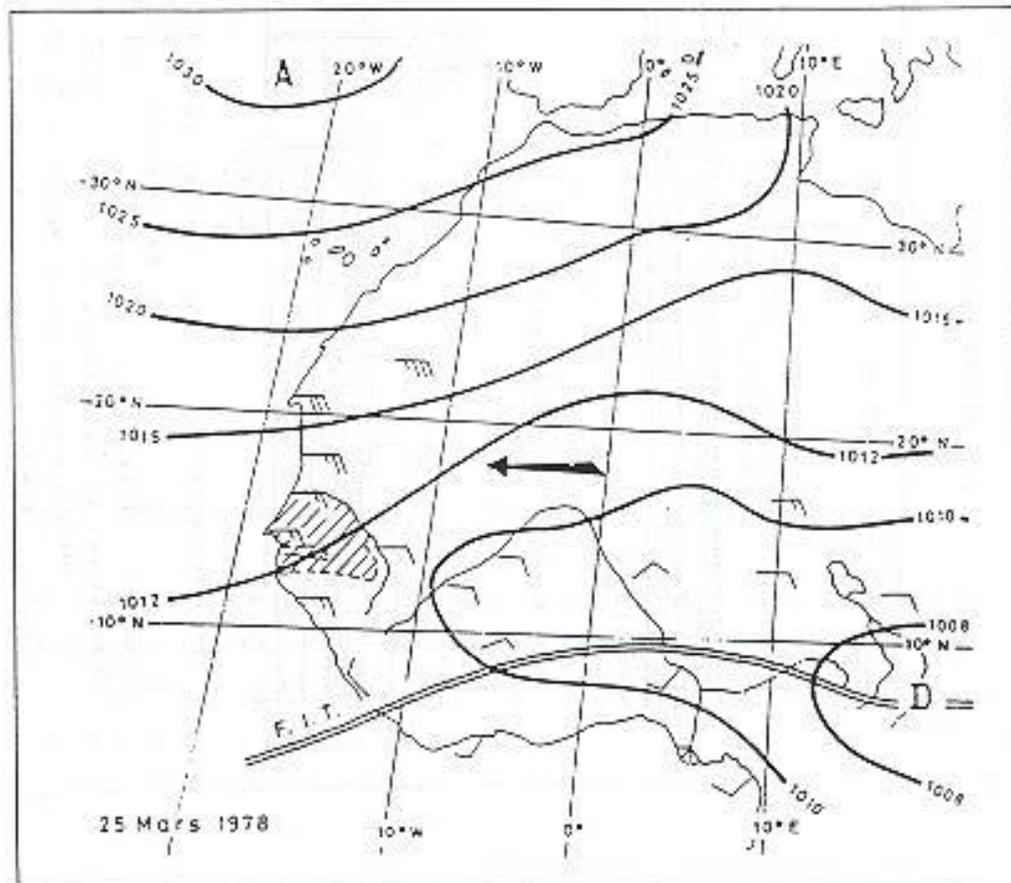


Fig. 6 : Situation d'harmattan (Le Borgne, 1988)

Cependant, sa particularité réside dans le fait qu'il est associé à une très forte amplitude diurne, liée aux écarts thermiques enregistrés dans ces zones dépourvues de végétation (réchauffement rapide du au rayonnement solaire intense et direct pendant la journée ; refroidissement nocturne allant parfois jusqu'à la gelée matinale par suite de la forte émissivité de la terre).

1.3. La mousson

De secteur Sud-Ouest, elle est originaire de l'hémisphère Sud, plus précisément de l'anticyclone de Ste-Hélène. En Afrique occidentale, c'est un alizé maritime

continentalisé de composante Sud-Ouest. Elle a un début de parcours maritime et finit son trajet sur le continent. Cette déviation vers l'Est est entraînée par la traversée de l'équateur et la rotation de la terre (force de Coriolis).

La mousson résulte d'une double action dynamique, l'une issue du renforcement hivernal de l'anticyclone de Ste-Hélène (puissance maximale), l'autre de l'aspiration exercée par la dépression saharienne (Suchel J.B., 1988).

C'est donc un flux transéquatorial qui, en traversant l'océan (moyenne de température 28° C) et la forêt dense des régions équatoriales acquiert de nouvelles caractéristiques thermiques et hydriques.

En effet, ce flux chaud se charge d'humidité, conduisant à l'établissement sur le continent d'un régime de mousson favorable au développement de phénomènes convectifs et de fortes précipitations. Son épaisseur et son intensité décroissent avec la latitude mais aussi avec l'éloignement de la côte. Au Sahel, elle atteint rarement 1500m.

2. En Altitude

Dans les moyennes et hautes couches de l'atmosphère les flux, étroitement liés à tout le système de surface, subissent également des changements, plus ou moins marqués de position et de direction, en fonction des saisons.

Ainsi, en hiver boréal, le flux d'Est des alizés est surmonté par des vents d'Ouest avec, précisément, un maximum dans le JET d'Ouest subtropical vers 200Hpa.

En été, cette circulation d'altitude, comme tout l'ensemble du système, subit une translation vers le Nord. Et au-dessus du flux de mousson, règnent des vents de composante Est : le Jet d'Est Africain (J.E.A.) et le Jet Tropical d'Est (J.T.E.). Ils sont d'origine différente. Le JEA circule seulement au-dessus de l'Afrique alors que le JTE est quasi-planétaire.

2.1. Le Jet d'Est Africain (J.E.A.)

Flux observé entre les niveaux 700 et 400 Hpa selon les saisons. Il a pour origine le contraste thermique et géographique entre l'océan atlantique et le continent africain. On peut attribuer son existence "au fort gradient thermique horizontal observé entre la

dépression saharienne (air très chaud) et la marge Nord de l'anticyclone de Ste-Hélène (air relativement moins chaud)" (Fontaine B., 1981)

2.2. Le Jet Tropical d'Est (J.T.E.)

Observé dans la haute troposphère entre 200 et 100 Hpa, il n'existe que dans l'hémisphère boréal. Il a une double origine thermique liée à la géographie du Sud-Est asiatique. Il doit son existence, d'une part, aux contrastes thermiques entre les massifs montagneux du Tibet (altitude environ 5000 m et source de chaleur sensible) et les régions océaniques équatoriales et d'autre part, au renforcement thermique engendré par le dégagement de chaleur latente issu de la mousson indienne (Fontaine B., 1981).

Sa vitesse maximale au-dessus du continent africain est enregistrée en juillet, en rapport avec le renforcement de la mousson indienne (dont la puissance est maximale à cette période) qui augmente l'apport énergétique de l'anticyclone d'altitude tibétain. Cependant, cette vitesse qui est de 29 m/s lors de l'entrée du J.T.E. sur le continent africain, diminue au fur et à mesure qu'il avance vers l'Ouest pour n'atteindre que 13 m/s sur la côte occidentale (Leroux, 1980).

Les phénomènes météorologiques observés en Afrique de l'Ouest, notamment, les ondes d'Est et les lignes de grains qui engendrent jusqu'à 80% des précipitations, sont étroitement liés à ces flux d'altitude. Par leur dynamisme et leur plus ou moins grande vigueur le J.T.E. et le J.E.A. stimulent ou défavorisent la formation de ces énormes amas nuageux pourvoyeurs de pluie.

De ce fait, un J.T.E. puissant et un J.E.A. moins bien installé favorisent une bonne pénétration de la mousson et une intense activité (détente et ondulations du J.E.A. facilitant les mouvements verticaux). En revanche, un J.T.E. moins marqué et un J.E.A. fort entraînent un cisaillement vertical (entre 850 et 600 Hpa), ce qui constitue un frein aux raccordements verticaux et, par conséquent, un obstacle à la convection et à la libération de chaleur latente, énergie indispensable pour l'auto-entretien du système (Fontaine B., 1981 ; fig. 7).

Le comportement des jets d'altitude est tellement important qu'il sert de référence quant à la différenciation des années dites "sèches" et celles dites "normales". Ainsi, une pluviométrie peut être considérée comme "normale" lorsqu'il se réalise un équilibre entre les jets ou que le J.T.E. est plus fort que le J.E.A. (Leroux M., 1974).

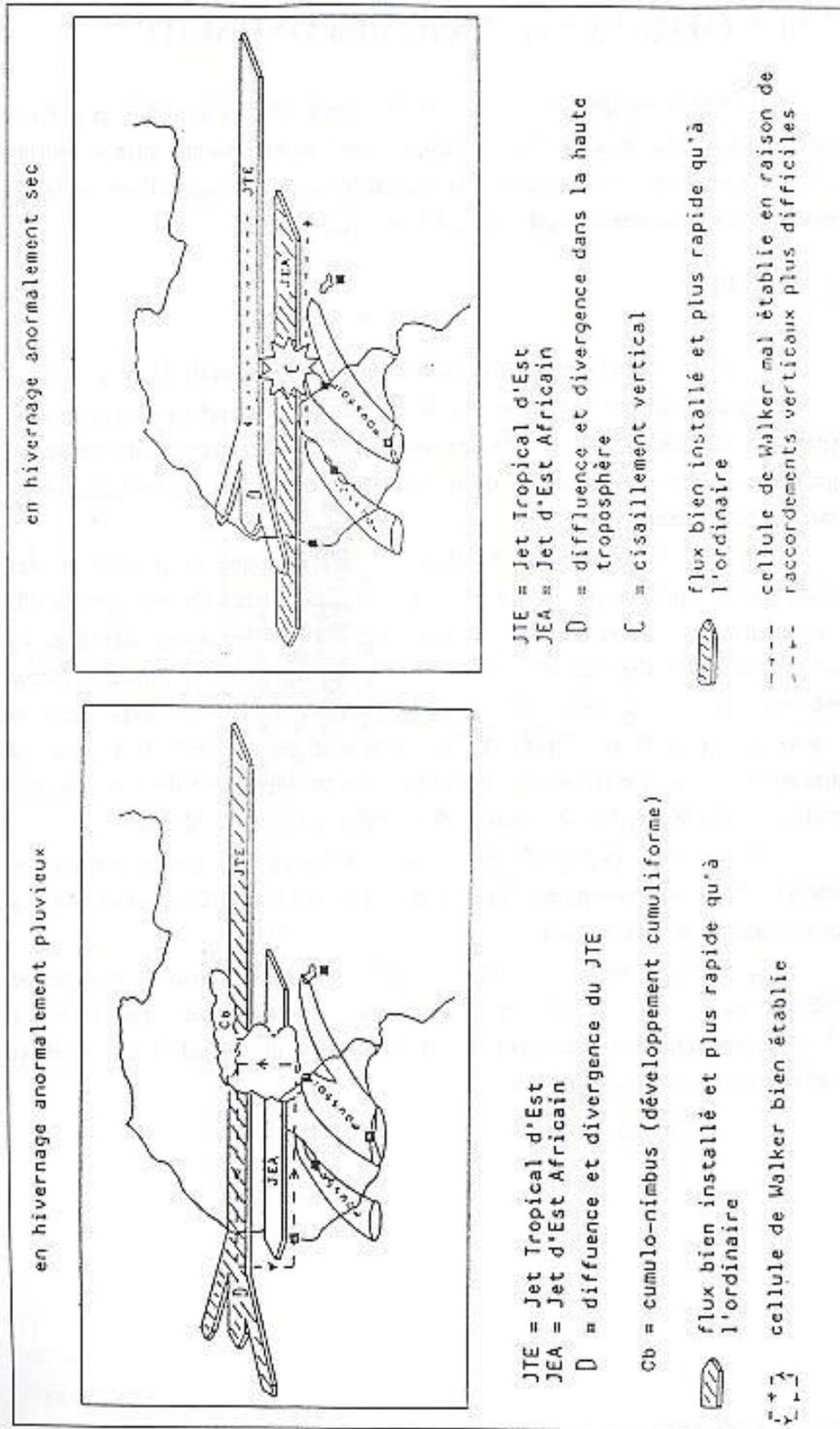


Fig. 7 : Schéma présentant la configuration type de la circulation zonale Ouest-africaine (Fontaine B., 1986)

III. LA ZITC ET LES FLUX DE DISCONTINUITÉ

Il s'agit, principalement, de zones où convergent des flux de nature et d'origine diverses, créant soit, une convergence dynamique et, par conséquent, une forte ascendance (Z.I.T.C.) soit, une discontinuité thermique et ou hydrique dans les couches inférieures soumises aux influences du substratum (F.I.T. et F.A.L.).

1. La ZITC

Elle constitue la limite entre la circulation boréale et australe. C'est la zone des minima de pressions où convergent les flux venant des deux hémisphères. Elle subit également des mouvements de translation saisonnière.

Ses migrations sont évidemment liées à la dynamique des centres d'action qui en se renforçant ou en s'affaiblissant l'attirent ou la repoussent.

De ce fait, en Afrique de l'Ouest, la ZITC occupe sa position la plus septentrionale en juillet-août, entre 5 et 10° Nord, alors qu'en décembre-janvier elle oscille entre 0 et 5° Nord, soit une amplitude d'environ 10°.

Cependant sa trace au sol sur le continent est très différente de celle observée sur l'océan où l'amplitude thermique est moins marquée. Toutefois on remarque la présence d'une double ZITC selon les années.

Ce fut le cas en 1984 (fig. 8 et 9) où le dédoublement de la ZITC linéaire a atteint une envergure et une fréquence exceptionnelle en rapport avec des configurations particulières de la température de surface de l'atlantique (Tabeaud et al., 1986).

Ce phénomène est engendré par la formation d'un anticyclone d'altitude qui crée une subsidence au sein même de la ZITC. L'apparition de cet anticyclone est plutôt liée à un phénomène de compensation (Ndiaye, 1990).

La ZITC est une aire d'intense activité convective car d'énormes quantités de vapeur d'eau issues des deux hémisphères s'y accumulent et y donnent ainsi naissance à d'importantes formations nuageuses, à fort développement vertical (cumulonimbus) et porteuses d'intenses précipitations.

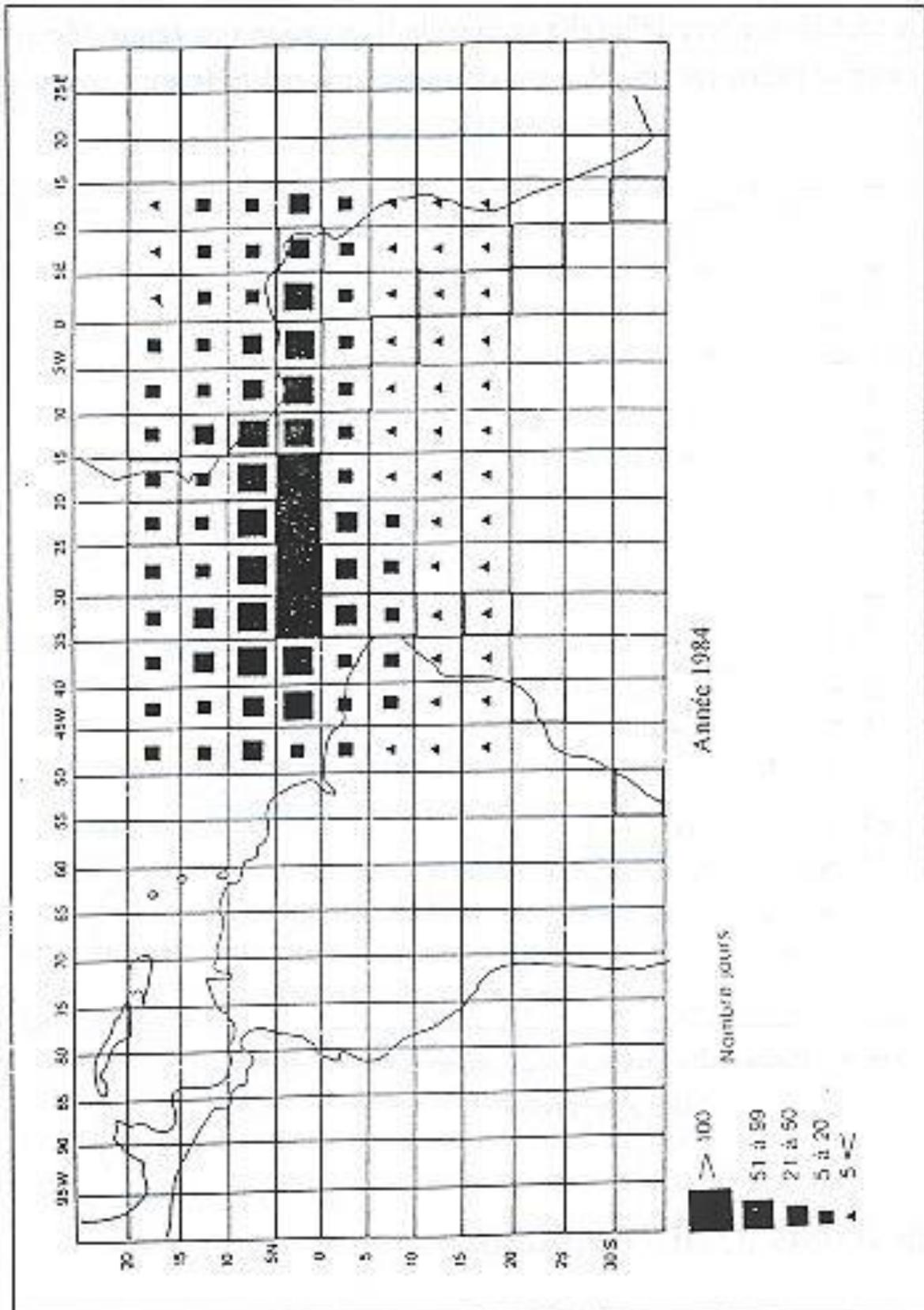


Fig. 8 : Représentation de la fréquence d'apparition des doubles ZITC (cumul annuel) (Lammare D. ; Tabeaud M., 1986)

De ce fait, la troposphère équatoriale reste une importante source d'énergie, perpétuellement réalimentée par l'apport des mouvements ascendants et par la chaleur latente des divers processus de condensation dans les cumulonimbus.

Ainsi, on peut tenter de résumer les translations saisonnières de la ZITC par le fait que tout hémisphère déficitaire en énergie la repousse vers l'autre hémisphère afin de compenser son déficit par une plus grande surface prise dans la zone source (Ricard J.L., 1985).

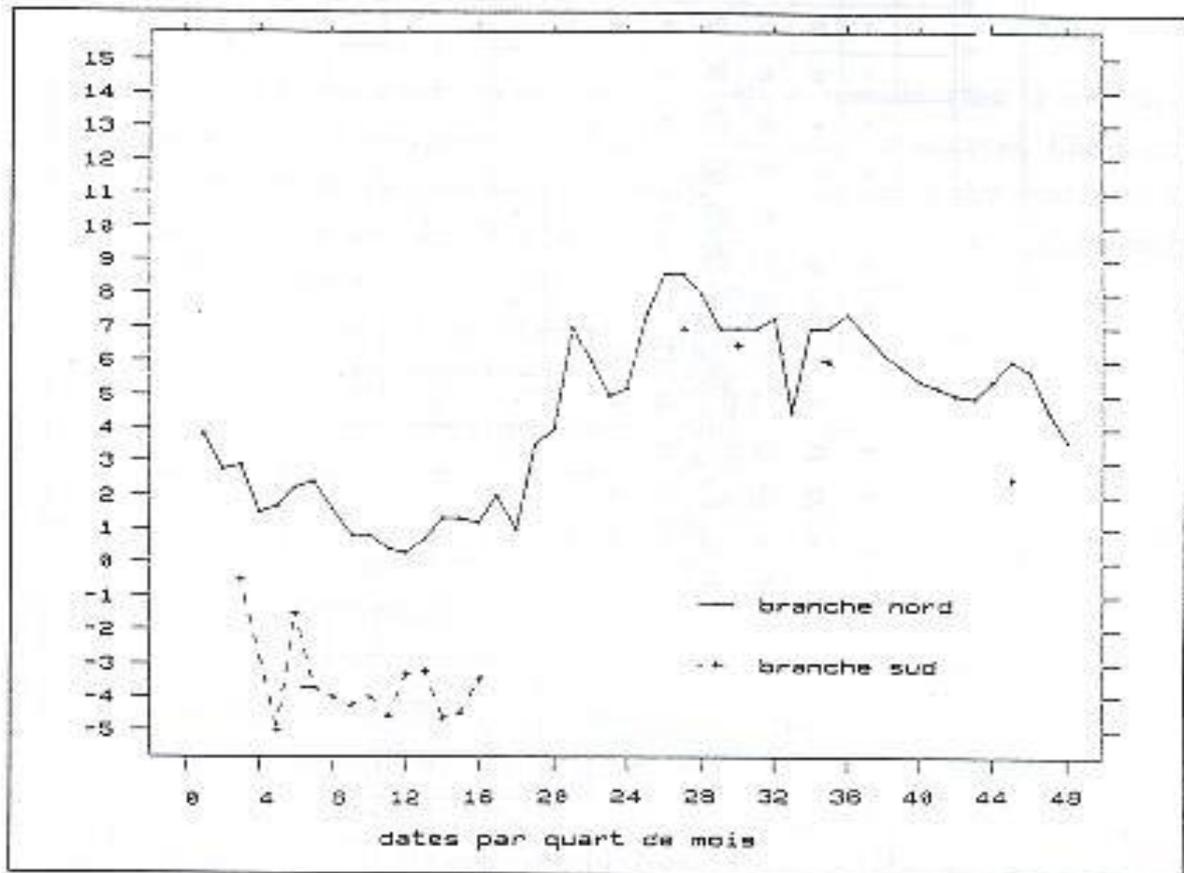


Fig. 9 : Position des amas convectifs observés à 28°W en 1984 (Ndiaye A., 1990)

2. Les fronts de discontinuité

2.1. Le Front InterTropical (FIT)

C'est principalement l'axe des minima de pressions en surface. C'est une ligne au sol, où convergent les flux boréaux et austraux (fig. 10). Il se présente sous forme d'une structure frontale ou "s'affrontent" des masses d'air de températures ou plutôt de degrés hygrométriques différents.

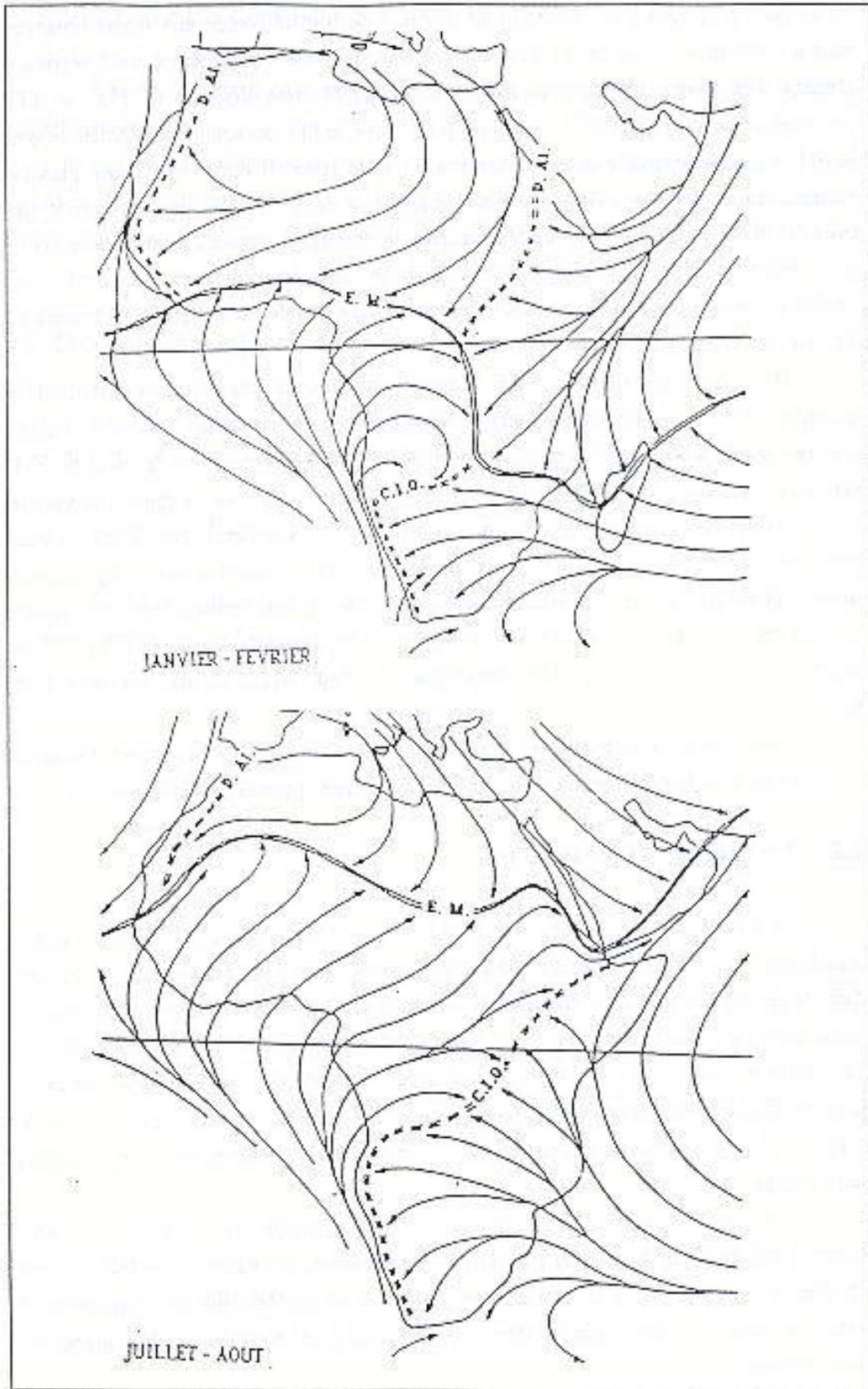


Fig. 10 : Flux et discontinuities sur l'Afrique : E.M. Equateur Météorologique, C.I.O. Confluence Inter-Océanique, D.AI. Discontinuité d'Alizé (Leroux M., 1983)

Cependant, ni le terme de “front” ni sa structure ne font référence aux fronts observés dans les moyennes latitudes. Le FIT se caractérise par une triple discontinuité décrivant chacune une pente particulière. Ainsi, on distingue trois dérivés du FIT : le FIT continental qui a un tracé sur le substratum terrestre, le FIT océanique sur l’Atlantique et le FIT semi-continental à cheval entre l’océan et la terre. Il décrit une pente plus ou moins marquée selon sa position géographique et se décale de plus en plus vers le Sud avec l’altitude. La partie continentale présente la plus forte inclinaison du Nord vers le Sud (relief, végétation, masse continentale), et c’est le long de cette pente que s’échelonnent sur plusieurs centaines de kilomètres les grandes zones pluviométriques en Afrique de l’Ouest (voir IV).

Ainsi, des migrations du FIT dépend le rythme de ces précipitations dont la quantité reste incontestablement fonction de l’épaisseur de la mousson. Dans les basses couches où l’influence du substratum est importante, la remontée vers le Nord du FIT nécessite six mois environ alors qu’il ne faut que quatre mois pour sa migration vers le Sud. Cela parce que l’hémisphère Nord est plus sujet aux variations thermiques (masses continentales) et par conséquent, l’hiver boréal est plus vigoureux que l’hiver austral (inertie thermique de cet hémisphère océanique). De ce fait, l’anticyclone des Açores perdant très vite sa détente estivale est repoussé rapidement vers le Sud et tout le système avec lui, alors que son homologue du Sud résiste mieux aux variations saisonnières.

Ainsi, on peut dire que le “déséquilibre des forces aérodynamiques” des deux hémisphères a un impact considérable sur la plus ou moins grande oscillation du FIT.

2.2. Le Front d’Alizé (F.A.L.)

Le Front d’Alizé (F.A.L. ou Discontinuité d’Alizé) est une zone de contact caractérisée par une discontinuité dynamique et hygrométrique des principales masses d’air. Il résulte du contact entre les flux océaniques plus ou moins chargés d’humidité (alizé maritime ou alizé maritime continentalisé) et les masses d’air continentales souvent très sèches (harmattan). Son tracé suit exactement celui de la côte occidentale africaine mais en fonction des forces aérodynamiques qui l’engendrent, il peut s’étendre vers le continent. Il a pour limite méridionale le FIT et de ce fait, subit également des translations saisonnières.

Ainsi, en été boréal, le FAL se limite à la côte sénégal-mauritanienne mais peut atteindre la latitude 5° Nord en hiver (fig. 10). Le déplacement de ces zones de

discontinuité dépend de la position des centres d'action responsables des flux qui les engendrent et donc des variations thermiques qui demeurent très marquées dans les couches inférieures de l'atmosphère.

IV. MANIFESTATIONS PLUVIEUSES

Les précipitations en Afrique de l'Ouest sont caractérisées par une forte variabilité spatio-temporelle.

Sur la partie sahélienne prévalent deux types de saisons. Une sécheresse quasi absolue de novembre à mai : c'est la saison sèche, et une saison des pluies, grossièrement entre juin et octobre, avec un maximum de précipitations en août.

1. Dynamique pluviométrique

Ce mécanisme peut être schématisé en deux grandes étapes : le transfert du potentiel en eau, la naissance et le développement des systèmes convectifs.

1.1. La vapeur d'eau

Le potentiel en eau disponible est largement d'origine océanique. Il provient essentiellement des océans Atlantique et Indien (fig. 11).

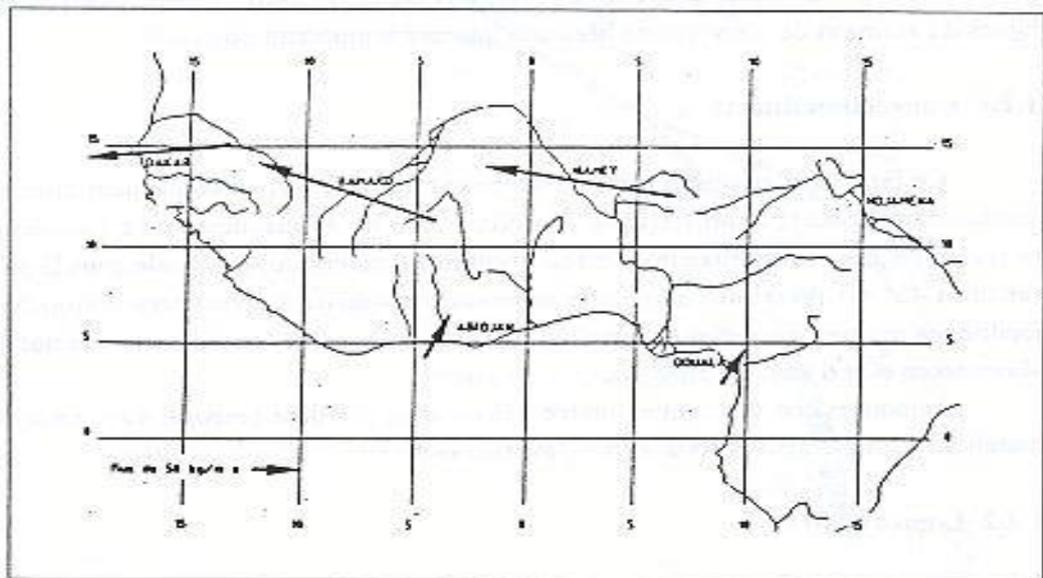


Fig. 11 : Flux horizontaux de vapeur d'eau en août 1979 entre le sol et 300 mb. La longueur de la flèche est proportionnelle au flux (De Félice et al., 1982)

La vapeur d'eau provenant de l'Atlantique transite par l'intermédiaire de la mousson qui, sèche à l'origine, s'humidifie en traversant l'océan chaud en cette période (environ 28° C). Cela facilite de manière considérable les mécanismes de l'évaporation. Également, une autre source d'humidification de la mousson demeure la chaleur latente dégagée par la forêt tropicale.

Toutefois, le flux d'humidité provenant de l'Est reste beaucoup plus important que celui apporté directement par la mousson (fig. 11).

La vapeur d'eau injectée par les intenses mouvements verticaux qui se développent dans la mousson indienne alimente le flux général d'Est régnant en altitude pendant l'hivernage. De ce fait, elle a un rôle considérable sur la formation des lignes de grain qui assurent l'essentiel des précipitations en Afrique de l'Ouest.

Cependant, la quantité de vapeur d'eau disponible reste de loin moins importante que les modalités de son utilisation qui font intervenir directement les jets d'altitude.

1.2. Types de convection

Les types de convections qui intéressent le Sénégal se manifestent sous deux formes. Il s'agit essentiellement de convections d'origine plutôt dynamique comme les lignes de grains et de convections liées aux intenses températures diurne.

1.2.1. Convection diurne

Ce type de convection reste sensiblement lié aux forts rayonnements diurnes qui surchauffent le substratum terrestre. En effet, il ne se manifeste qu'à l'intérieur des terres où les masses continentales enregistrent une température maximale dans la journée (environ 45° C) favorisant ainsi, une situation d'instabilité souvent très marquée. Cela facilite les mouvements d'ascendance et crée une convection locale et des précipitations abondantes si le niveau de condensation est atteint.

La convection thermique, limitée dans le temps et dans l'espace, s'accompagne de manifestations pluvieuses sous forme d'averses isolées.

1.2.2. Lignes de grains

Ce sont d'énormes amas nuageux se déplaçant d'Est en Ouest (fig. 12) et adoptant le plus souvent une composante Sud. Cette tendance méridienne se traduit par une forte variabilité pluviométrique entre les régions méridionales et septentrionales.

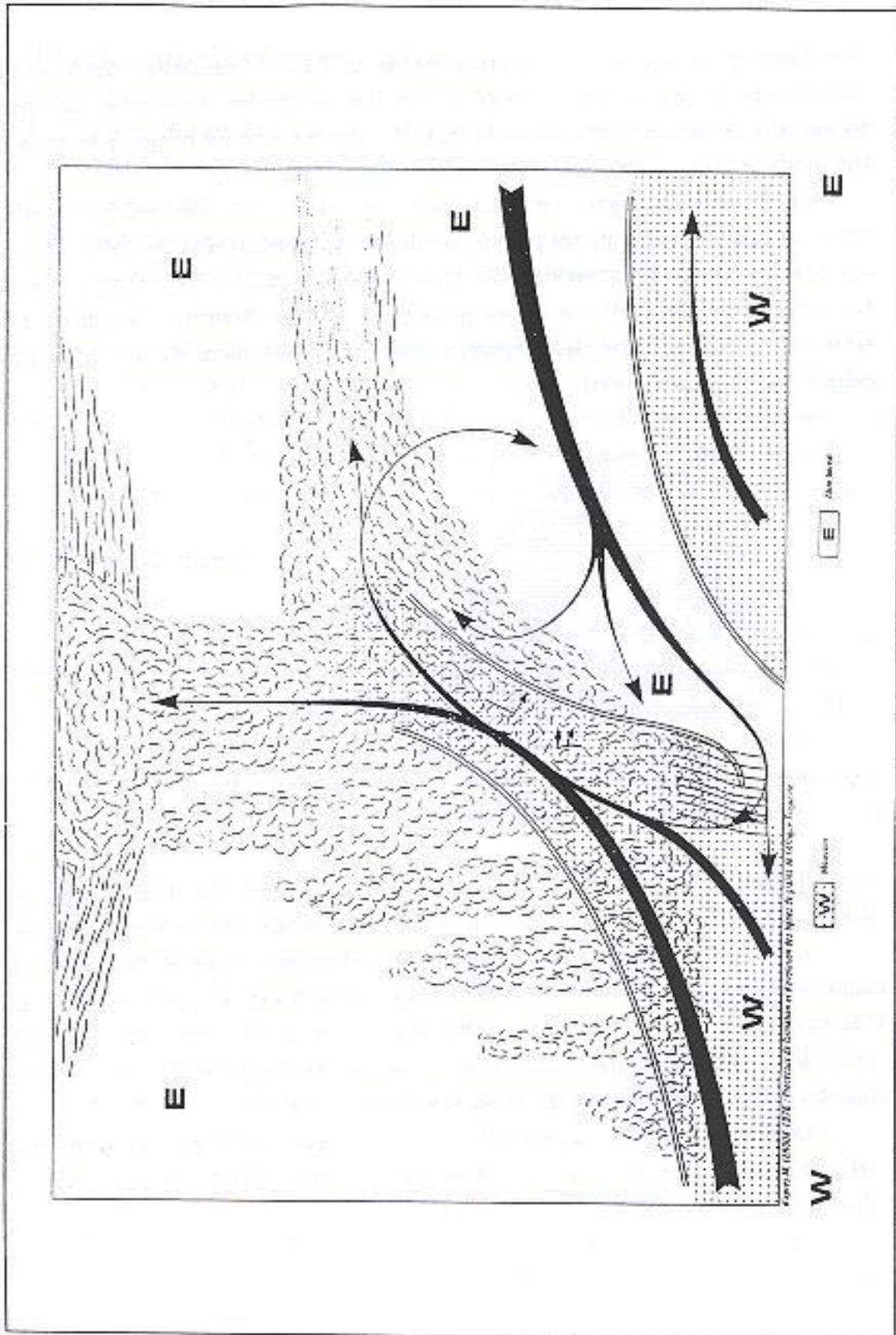


Fig. 12 : Coupe verticale Schématique d'une ligne de grains (Leroux, 1983)

“Les lignes de grains évoluant à proximité de la ZITC rencontrent des conditions pluviogéniques plus favorables que celles qui sont les plus proches de la trace au sol de l'équateur météorologique, là où le flux de mousson est moins épais et de ce fait, moins propice à d'abondantes chutes de pluies” (Sagna, 1992).

Cependant, les lignes de grains apportent jusqu'à 80% des précipitations du Sahel. La figure 13 confirme ces propos pour le Sénégal pendant la saison 1990.

Elles ont une progression rapide : environ 2000 km en 24 h. Leur durée de vie est fonction de leur organisation et de leur position en latitude. Pour un échantillon de 17 amas étudiés et suivis depuis leur apparition jusqu'à leur disparition, la durée de vie varie entre 51 et 9 h (Thiao1988).

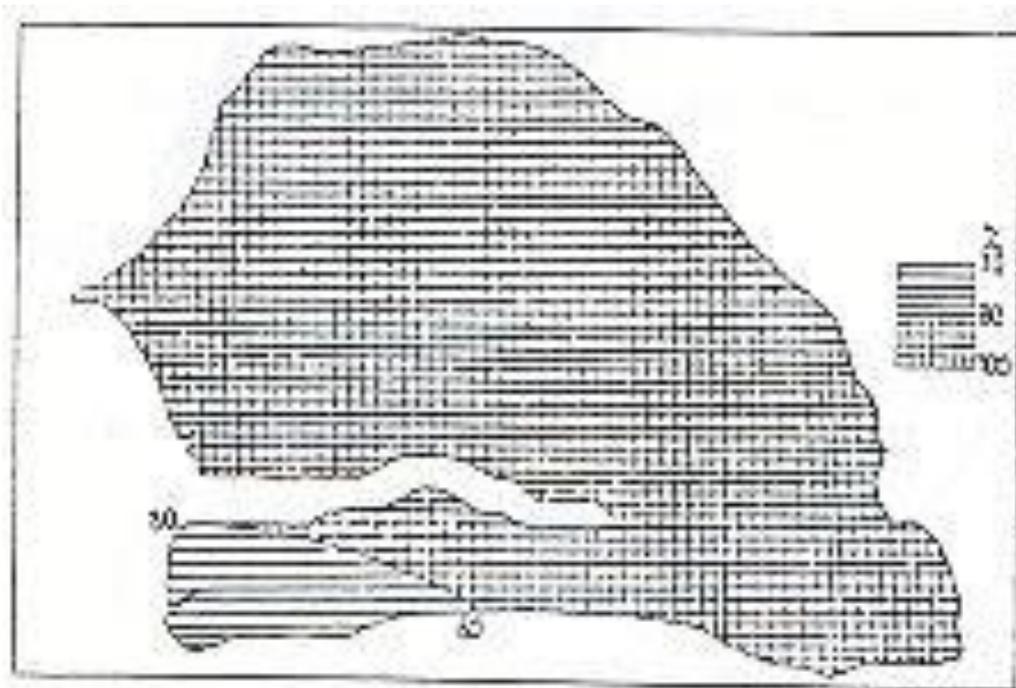


Fig. 13 : Apport pluviométrique des lignes de grains au Sénégal en 1990 (Sagna P., 1992)

Toutefois, chaque amas a ses propres particularités en fonction de sa naissance, de sa trajectoire mais également de l'environnement atmosphérique dans lequel il évolue.

La formation de ces phénomènes météorologiques implique directement le comportement des jets d'altitudes. En effet, comme nous l'avons souligné plus haut,

un JTE puissant et JEA moins bien installé facilitent le développement des systèmes convectifs et donc la formation des lignes de grains ; en revanche, le schéma inverse constitue un obstacle à l'installation de ces phénomènes convectifs.

De ce fait, on peut souligner que la convection est conditionnée par la structure verticale du champ de vent qui, par conséquent, reste le facteur déterminant pour une efficace utilisation du potentiel en eau disponible.

2. Précipitations et types de temps

La pluviométrie est rythmée en Afrique sahélienne par l'existence de deux saisons.

Une saison sèche, très longue allant de novembre à mai, où on n'enregistre que quelques rares averses liées aux manifestations polaires.

Ces phénomènes d'une fréquence statistique faible (150 passages pluvieux en 30 ans) se manifestent entre les mois de décembre à février. Dans les régions situées plus au Sud, cet apport pluviométrique reste très faible dans le pourcentage des totaux annuels mais demeure d'importance dans celui des zones proches du Sahara.

La saison des pluies ou hivernage va de mai à octobre. C'est pendant cette période qu'on enregistre l'essentiel des précipitations avec un maxima au mois d'août. La structure du FIT, la mousson, les lignes de grains et finalement tous les maillons du système agissent sur la qualité et la quantité de ces précipitations.

2.1. Pluies de "heug" en hiver boréal

Les advections d'air polaire à l'intérieur de l'Afrique de l'Ouest ont donné lieu à de nombreux travaux (Seck, 1962 ; Leroux, 1983 ; Yattara et al. 1985 ; Le Borgne, 1988). Ce sont des manifestations d'hiver qui résultent de l'invasion d'air polaire en altitude.

Elles s'accompagnent d'une accélération de la vitesse de l'alizé, se traduisant dans les régions démunies de végétation par le soulèvement de poussières ou de lithométéores et par des phénomènes pluvio-orageux, ce qui est souvent surprenant pour la population en cette période de l'année (entre décembre et avril).

Leur mécanisme est lié à la circulation méridienne et à l'existence d'un talweg d'altitude ou d'une goutte froide permettant à l'air polaire de se glisser le long de la face orientale de l'anticyclone des Açores et d'atteindre les basses couches.

Il permet en même temps à l'air chaud équatorial, de remonter sur l'autre face du couloir d'échange méridien, le long de la cellule libyenne.

La rencontre dans ce talweg de ces deux flux, l'un froid et l'autre chaud et humide, entraîne dans les moyennes et hautes couches une condensation et par conséquent la formation de masses compactes d'altocumulus, d'altostratus, de cirrostratus, et de cumulonimbus. Ce sont ces derniers qui engendrent les orages et les fortes précipitations.

Cependant, tout le volume d'eau précipité n'atteint pas le sol car il doit traverser une épaisseur de 2 à 3000 m d'air chaud et sec. Et au cours de cette descente, les précipitations s'évaporent en partie ou en totalité.

Toutefois, leur rôle dans les régions sèches est réel. En effet, à Nouadhibou, dans le désert mauritanien, elles représentent 28 % du total annuel, ce qui est important. Mais leur importance et leur volume diminuent progressivement vers le Sud. Ainsi, leur pourcentage dans le total annuel n'est plus que de 7 % à Nouakchott, 1,5 % à Saint-Louis, et 0,1 % à Ziguinchor. Cette baisse peut être attribuée à l'augmentation parallèle des pluies d'hivernage vers le Sud.

2.2. Pluies d'hivernage

Cette pluviométrie, soumise à une forte variabilité spatio-temporelle reste pourtant le paramètre déterminant du comportement des cultures pluviales et partant, des niveaux de production (Diagne et Sonko, 1990). Ainsi elle est d'une importance capitale dans les pays sahéliens en majorité agricole.

La distribution de ces précipitations dans le temps et dans l'espace est étroitement liée à la pénétration de la mousson, au comportement des lignes de grains et par conséquent, reste tributaire de l'ensemble du système climatique ouest africain. Ces précipitations se manifestent de façon différente selon la latitude et cela en fonction des phénomènes météorologiques qui les engendrent. Ainsi, on distingue quatre zones pluviométriques classées en fonction de ces facteurs géographiques et météorologiques (fig. 14).

2.2.1. Zone A

Située au Nord de la zone d'influence du FIT, cette région est caractérisée par une intense sécheresse. C'est le domaine de la branche finissante de l'harmattan qui après un long parcours sur le Sahara garde sa siccité d'origine et ne peut pas engendrer de précipitations.

2.2.2. Zone B

Dans cette zone qui s'étend sur environ 200 km, la mousson n'est pas suffisamment épaisse (1000 à 1500 m) pour déclencher des précipitations importantes. Cependant, à l'intérieur des terres, au regard des températures élevées pendant la journée (35 à 45° C) des formations nuageuses à évolution diurne peuvent engendrer des orages isolés de fin d'après-midi.

2.2.3. Zone C1

Sous influence de l'activité de la mousson, cette zone s'étend sur environ 400 km et connaît des précipitations abondantes. Cela parce que la mousson est assez épaisse (1000 à 4000 m) pour permettre une bonne évolution des lignes de grains (venues de l'Est et liées à une convection thermodynamique des masses d'air) à mi-parcours mais aussi pour provoquer des orages locaux isolés.

2.2.4. Zone C2

Cette zone correspond au maximum de l'activité de la mousson qui atteint une épaisseur de 3500 à 4000 m. Cette zone couvre une latitude de 500 km environ. C'est le domaine privilégié des perturbations mobiles organisées (lignes de grains et ondes d'Est). Les pluies très abondantes, y sont à caractère continu et non orageux. Les précipitations d'hivernage en rapport avec la pénétration de la zone C2 ne concernent qu'une partie du Sénégal. Il s'agit particulièrement de la Basse Casamance (Leroux M., 1983).

2.2.5. Zone D

Située très au Sud, cette zone échappe de plus en plus à l'influence de la mousson et reste le domaine de l'alizé maritime issu de l'anticyclone de Ste-Hélène. Cependant, on peut y enregistrer quelques faibles pluies engendrées par des formations de nuages issues de l'étage moyen (stratus, stratocumulus).

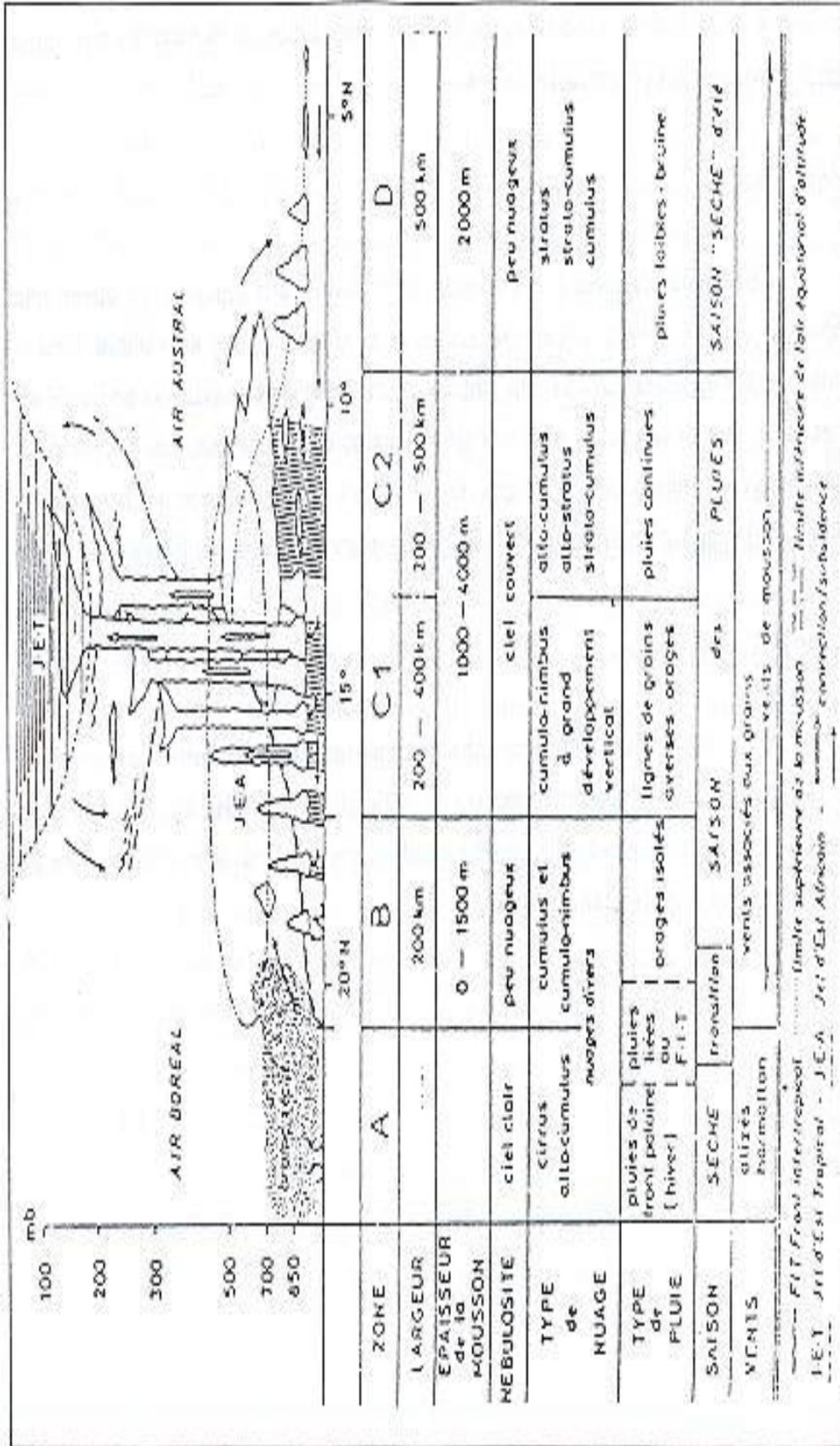


Fig. 14 : Coupe schématique de la troposphère Ouest africaine (Dhonneur, 1985)

Conclusion partielle

L'étude d'une sécheresse doit d'abord montrer quels sont les aspects de la circulation atmosphérique régionale et locale qui inhibent les précipitations en bloquant les ascendances et les activations humides (Durand-Dastes F., 1985).

L'objectif de notre premier chapitre, était d'abord de montrer comment les centres d'actions par l'intermédiaire des flux aussi bien de surface que l'altitude, la ZITC, le FIT, etc., constituent les vecteurs fondamentaux de la climatologie de l'Afrique de Ouest.

De la dynamique de ces éléments dépendent le rythme et la durée des saisons. Si par exemple, la remontée du FIT et la pénétration de la mousson vers le Nord ne s'effectuent pas "normalement" (épaisseur de la mousson trop faible pour atteindre le niveau de condensation), on assiste à un élargissement des zones A et B.

Ainsi, la bande sahélienne gagne du terrain vers le Sud, incorporant largement la partie septentrionale du Sénégal jusqu'à la latitude du bassin arachidier. Ce phénomène atteint son paroxysme si l'anticyclone des Açores reste intense pendant l'hivernage. Il exerce à travers les fortes pulsions des alizés, une influence sur la trajectoire des lignes de grains en leur imposant une direction plutôt méridionale.

Cette première partie nous a également permis de saisir et de prendre en considération le rôle fondamental de la circulation atmosphérique générale dans la climatologie régionale. Il s'agit ici de l'Afrique de l'Ouest mais, rappelons que, tout type de climat observé sur l'ensemble du globe est, d'abord, une composante de la circulation atmosphérique générale, avant de subir une quelconque influence locale.

Le second objectif de cette partie est d'effectuer une présentation de la zone d'étude. Cela va conduire à parler, dans le chapitre suivant, des phénomènes géographiques et physique caractérisant le Sénégal, ce qui revient d'abord à souligner l'importance des aspects locaux pouvant favoriser l'existence de microclimats, ensuite, à travers l'évolution de ces éléments appréhender la climatologie locale.

CHAPITRE II :

SÉNÉGAL : “FINISTÈRE OUEST AFRICAIN”

L'objectif principal de ce chapitre se rapporte à la description des éléments physiques qui caractérisent le Sénégal. Cela dans le but de donner une vision géographique globale de notre zone d'étude. Appréhender les facteurs géographiques consiste à saisir l'influence déterminante qu'ils exercent sur les paramètres aérologiques et vice versa ; ce qui permet par la suite de mieux comprendre non seulement la dynamique des phénomènes convectifs mais également les facteurs entravant leur évolution normale.

Les causes et conséquences de la déstabilisation de la convection “utile” (nuages précipités) et les recherches de solutions entreprises par les scientifiques seront plus largement abordées dans la deuxième partie de notre exposé.

Situé grossièrement entre les latitudes 12° et 16°30 Nord et entre les longitudes 12° et 18° Est, le Sénégal occupe une superficie de 197 161 km². Il doit son nom au fleuve Sénégal, un des plus grands fleuves de l'Afrique de l'ouest tant par la superficie de son bassin versant (345 000 km²) que par sa longueur (environ 1800 km). Ce fleuve sépare le Sénégal de la Mauritanie au Nord et du Mali à l'Est.

Le Sénégal s'étend essentiellement sur la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien décrivant une pente inclinée de façon régulière vers l'océan Atlantique.

De ce fait, hormis la pointe Ouest où l'on observe quelques failles et le Sud-Est où affleure le socle, le relief du Sénégal est relativement plat. La structure topographique du Sénégal est grossièrement composée de bas plateaux et de vastes plaines. Cette disposition d'ensemble est entrecoupée, d'une part par deux grands fleuves : le Sénégal et la Gambie et d'autre part, par une multitude de petites dépressions sèches ou mortes. Il s'agit principalement des anciennes vallées du Ferlo du Sine et du Saloum.

De la durée et de l'efficacité de la saison des pluies dépendent fondamentalement l'activité des principaux fleuves précipités et la densité du couvert végétal. La disposition géographique des cours d'eau tout comme celui des paysages végétaux sont également le reflet de la structure morphopédologique.

Il est donc nécessaire d'apprécier, même de manière brève, l'évolution de ces principaux facteurs suivant les modifications que subissent les plantes, ce qui permet d'abord de répertorier les espèces les plus affectées par la sécheresse des espèces les plus résistantes qui s'adaptent plus ou moins à l'aléa en restreignant périodiquement leurs activités physiologiques.

Finisterre ouest africain, le Sénégal, largement ouvert sur l'océan Atlantique dispose d'une zone côtière longue de plus de 700 km. Cette large bordure océanique engendre une multitude de conséquences.

Au plan socio-économique (pêche, tourisme, etc.), ces conséquences sont bénéfiques.

Au plan climatique, elles sont plus complexes. De ce point de vue, elles impliquent des relations multiples qui s'exercent préférentiellement via l'atmosphère et par des séries d'actions et rétroactions, sur le couvert végétal, les processus d'érosion, etc.

L'originalité des conditions climatiques observées au Sénégal est en partie attribuée à cette position géographique en contact direct avec le milieu océanique. Il en résulte, une régionalisation climatique fortement nuancée en opposition avec le schéma classique existant dans bon nombre de pays sahéliens.

La première partie de l'analyse consiste à cerner la disposition et l'évolution du substrat terrestre et des paramètres physico-géographiques, caractérisant notre zone d'étude, ce qui nous permet par la suite, de comprendre comment les subdivisions régionales sont effectuées à travers les types de temps observés.

Cependant, les modifications climatiques (et une de leurs conséquences directes à savoir la sécheresse) n'engendrent-elles pas une mobilité des limites régionales prédéfinies ? La délimitation régionale en fonction de l'évolution des phénomènes locaux ne nécessite-t-elle pas une restructuration ?

Quand on sait, de surcroît, que les paramètres atmosphériques et terrestres à l'origine de ces phénomènes climatiques, subissent eux-mêmes, depuis plusieurs années, des modifications sans précédent, dans l'histoire récente.

I. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU MILIEU

1. Basses altitudes et pentes faibles dominant la topographie

À l'exception du Sud-Est qui culmine à environ 500 m, le relief du Sénégal demeure relativement bas avec une moyenne de 50 m environ (fig. 15). Il est grossièrement constitué d'une vaste plaine, notamment à l'Ouest, de bas plateaux au centre et dans le Ferlo, de cordons dunaires situés sur le littoral et au Nord-Ouest, et de la grande vallée alluviale servant de lit au fleuve Sénégal.

Il serait intéressant de pouvoir établir une carte des pentes permettant de caractériser les différents types dominants (topographiques, stratigraphiques, orographiques, hydrographiques, etc.). Cela afin de pouvoir appréhender l'évolution de certains phénomènes physiques tels que l'infiltration, l'exposition, le ruissellement, l'écoulement liés à leurs formes, à leur structure et par conséquent aux mouvements des masses d'air les traversant. Plusieurs tentatives utilisant des méthodes de calculs différentes ont été faites. Cependant, l'échelle de la carte topographique numérisée étant très fine (1/1000 000), les résultats obtenus ne donnent qu'un aperçu de la pente globale ; ce qui est, pratiquement, sans intérêt pour notre étude car l'échelle ne répond pas à la problématique de départ.

L'appartenance de la zone d'étude à la cuvette tertiaire sénégal-mauritanien qui décrit une pente inclinée vers l'Atlantique où elle s'enfonce sur plusieurs centaines de km explique la platitude de son relief. Ainsi, la plate-forme continentale est assez large puisque la côte est presque partout plate et les reliefs de l'arrière-pays peu élevés (Michel P., 1973). On note, cependant, deux zones distinctes en fonction de la disposition de ce plateau continental.

Très étroit au Nord du Cap-Vert, avec une orientation Nord-Nord-Est, il s'incline vers l'Est dans la partie méridionale de cette presqu'île et s'élargit au fur et à mesure que l'on s'avance vers le Sud. L'isobathe 200 m est à 30 km aux environs de Kayar contre 90 km vers Ziguinchor.

Dans la partie septentrionale du pays, entre Dakar et Saint-Louis, s'étend un vaste cordon de dunes littorales déplacées par le vent et plus ou moins aplaties (avec des sols sableux et pauvres en argile, en potasse et en acide phosphorique). À l'arrière de ce chapelet de dunes sableuses existent des dépressions plus ou moins inondées et des lacs dont le Retba, dix fois plus salé que l'océan et qui attire bon nombre de touristes à cause de sa couleur plus ou moins "rose pourpre" selon la saison.

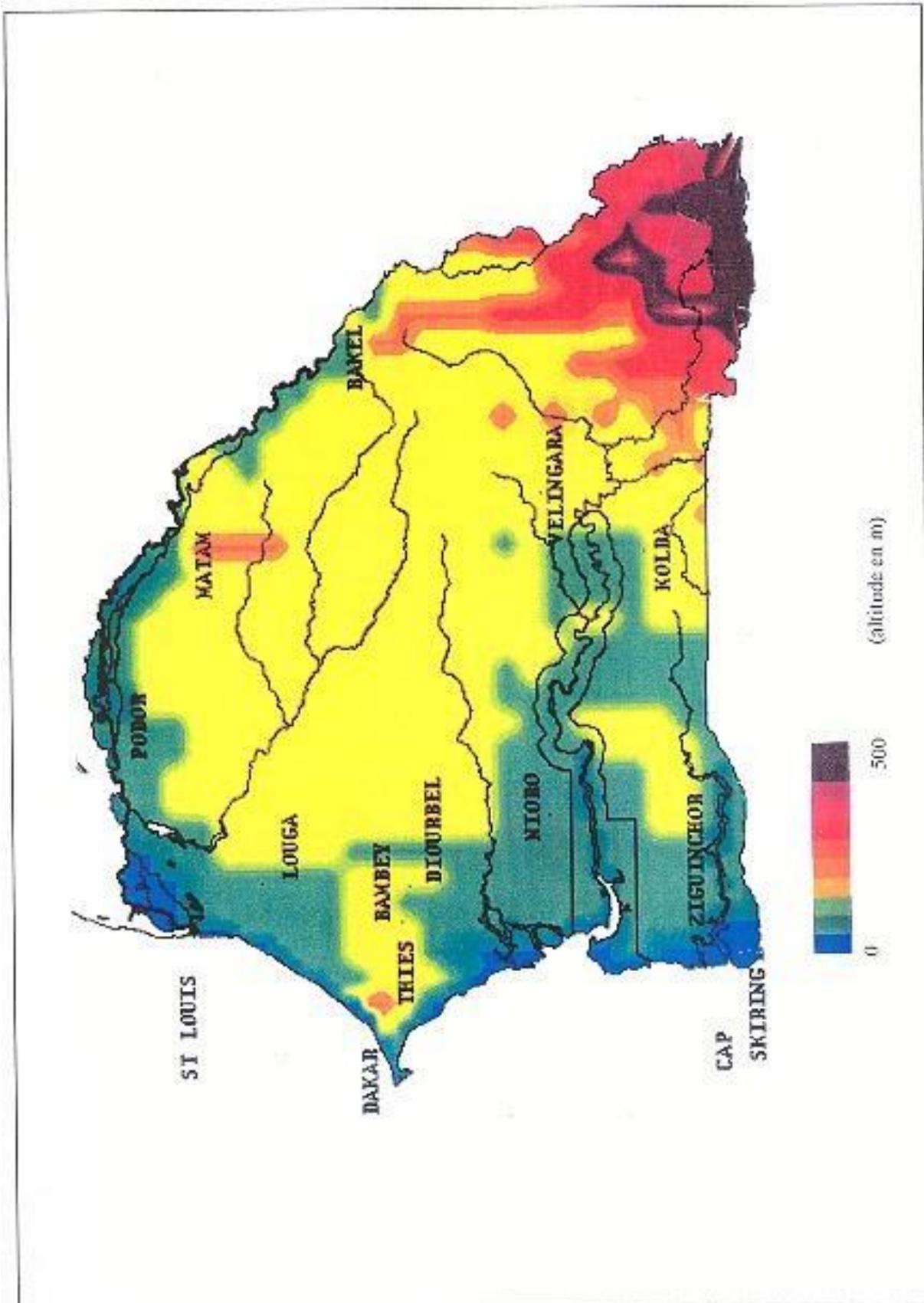


Fig. 15 : Carte altimétrique du Sénégal (pixel Météosat)

Il existe également dans la région du Ferlo des dunes fixées et des dunes réalimentées et déplacées en fonction de l'origine, de la force et des changements de direction des vents. La force des vents dépasse rarement 5 m/s pendant l'hivernage (vitesse maximale de la saison 1990 a été enregistrée à Saint-Louis : 6,3 m/s), ce qui est faible pour le climatologue mais suffisamment efficace pour le géomorphologue. Un tel vent est capable de déplacer des particules de sable dont le diamètre peut atteindre jusqu'à 250 μ

Il est également à noter l'existence des deux grandes vallées alluviales qui constituent les lits des fleuves Sénégal et Gambie. Celle du Sénégal n'est pas plate mais présente un micro relief complexe (Michel P., 1973).

Après Bakel, à l'extrême Est du pays, son lit s'élargit pour atteindre 25 km de largeur. De direction Nord-Ouest dans cette région, il change d'itinéraire vers Bogué et se dirige vers l'Ouest. Ensuite, c'est la traversée en méandre des régions septentrionales (existence de bras morts et de méandres isolés), où sa largeur atteint une taille maximale pour former un delta. Au niveau de Saint-Louis, la langue de Barbarie (mince cordon littoral) constitue le seul obstacle le séparant de l'océan Atlantique.

Le second cours, malgré le fait que son ossature principale soit, administrativement, en dehors de notre zone d'étude, mérite d'être analysé ne serait-ce que de manière sommaire, afin de rendre la perception climatologique plus exhaustive, plus complète, moins partielle. Ainsi donc, la vallée alluviale de la Gambie se caractérise par une multitude de méandres en amont. Dans la partie aval, ces boucles disparaissent et la largeur du lit augmente pour atteindre 4 km à l'embouchure.

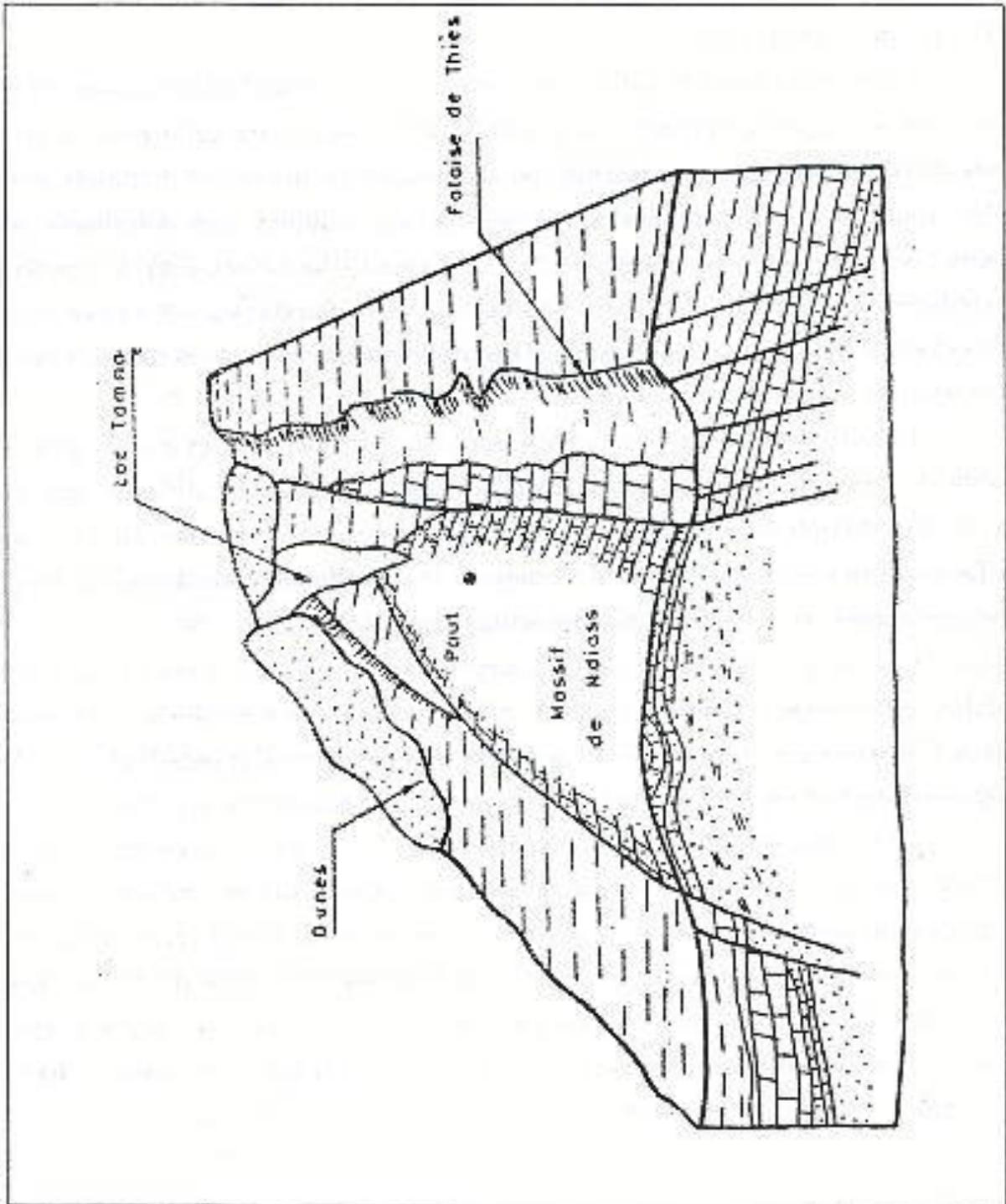
Il y a d'autres types de dépressions constituées par d'anciennes vallées aujourd'hui sèches ou mortes. Il s'agit notamment de la vallée du Ferlo qui entaille les bas plateaux de la région du même nom. Ces plateaux gréseux sont, par endroits, recouverts de dunes rouges fixées dont l'altitude moyenne est de 50 m (entre 10 m aux abords du fleuve Sénégal et plus de 100 m aux environs de Bakel).

Il est à noter aussi, l'existence des vallées sèches du Sine et du Saloum situées au Centre-Ouest du pays. Ce sont des édifices morphoclimatiques actuellement constituées à l'aval par des bras de mers, par suite de l'envahissement par les eaux de

l'Atlantique. Ils demeurent, néanmoins, des témoins historiques d'une activité érosive jadis dynamique.

Dans la région méridionale, la vallée de la Casamance, constituée d'innombrables petits bras, incise les bas plateaux du Sud, perchés autour de 50 m. Vers Ziguinchor, elle adopte une forme d'entonnoir du fait de son élargissement. Cette vallée est soumise aux phénomènes de marées. Son estuaire en forme de ria, est fréquemment envahi par l'eau de mer.

À l'extrême Ouest, dans la presqu'île du Cap vert, apparaissent les édifices volcaniques du Cap Manuel et des Mamelles (culminent à environ 105 m), constituant les côtes rocheuses à falaises de cette région. Au Sud de cette région, s'élèvent le massif de Ndiass et la falaise de Thiès (fig. 16) qui est un escarpement (100 m au Nord et au Sud) de faille inversé, évoluant en cuesta et dominant la dépression Somone - Lac Tamna (Dubresson A. et al., 1980).



**Fig. 16 : Structure et relief de la presqu'île du Cap-Vert (Massif de Ndiass et Falaise de Thiès)
(Dubresson A. et al.)**

Le relief du Sud-Est qui est une continuation du Fouta-Djallon constitue, hormis les régions précitées, l'exception topographique du pays. Dans cette zone, le relief est très morcelé (collines, bas-plateaux, buttes, inselbergs...) avec une altitude moyenne d'environ 200 m. Les principales unités morphostructurales sont constituées par les monts Bassari (avec une orientation Sud-Sud-Ouest/-Nord-Nord-Est), la boucle de la Gambie et les buttes du Falémé dépassant chacun les 400m d'altitude. Le point culminant de cet ensemble topographique est à 581 m d'altitude, surmontant les plateaux tabulaires qui séparent le Sénégal de la Guinée (Michel P., 1973)

Localement, tout relief favorise l'ascendance adiabatique des masses d'air. De ce point de vue climatique, ces reliefs sont importants. Pour le climatologue, son altitude n'est pas suffisante pour faire obstacle à l'évolution des flux de surface; mais il contribue à l'accentuation des phénomènes d'ascendance et donc de convection et, en conséquence, peut influencer considérablement la répartition des précipitations.

Les effets orographiques sont observés au début de l'hivernage car les premières pluies se manifestent toujours par le Sud-Est, avant de se répandre sur l'ensemble du pays. Cela nous permet de souligner que le relief sous-régional (Fouta-Djallon) influence, dans une large proportion, la distribution spatiale des précipitations au Sénégal.

La topographie induit des contrastes thermiques qui, à toutes les échelles, sont déterminantes pour caractériser les masses d'air. Ainsi, d'autres influences provenant d'entités topographiques allogènes méritent d'être signalées. Il s'agit notamment de ceux du continent asiatique (massif du Tibet), de l'Afrique de l'Est et du Nord dont les influences sur le comportement des flux (JEA, JET, Alizés) intéressant notre zone d'étude (rôle capital dans la naissance et l'évolution des lignes de grains : 80 % des précipitations), sont indiscutables.

L'absence de carte des pentes (pour une localisation des masses d'air ascendantes selon l'orientation) ne nous permet aucune évaluation de microphénomènes d'ascendance orographique liée aux structures topographiques isolées. Nous avons cependant relaté, de façon globale, l'influence déterminante du relief sur la climatologie locale. Cela, notamment, à travers la répartition spatiale des pluies en début de saison. Il a été montré comment l'évolution des masses d'air au Sud-Est du pays favorise les manifestations pluvieuses à caractère orographique d'où le démarrage précoce de l'hivernage dans cette région.

2. Un bassin sédimentaire facteur de variabilité

2.1. Le socle Birrimien

Dans la région orientale du Sénégal, s'observe des affleurements de roches plissées à faciès divers. Ce sont essentiellement des fragments du socle ouest africain ayant pour origine le Birrimien. Ces roches plissées, d'épaisseurs variables et légèrement métamorphisées sont grossièrement constituées de schistes, de quartzites et d'argilites. Par endroit, existent de petits massifs formés par des intrusions de granites de types variés.

2.2. Les séries du Primaire

Il s'agit essentiellement des séries du Paléozoïque, généralement pas métamorphisées. Elles se présentent sous deux aspects différents : une série tabulaire et une série plissée. Elles couvrent, de manière discontinue le socle et sont essentiellement constituées par divers types de grès. Ces formations ont été partiellement érodées ultérieurement. La forme et la présence de roches subvolcaniques - dolérites formant des sills - répertoriées dans les contreforts du Fouta-Djallon et dans les reliefs de la "boucle" de la Gambie (Michel P et al. 1973) témoignent des secousses qu'ont subies ces séries au cours des violents mouvements hercyniens, vers la fin du Primaire.

2.3. Les formations sédimentaires d'âge Secondaire-Tertiaire

L'évolution du bassin sédimentaire s'est effectuée en plusieurs phases. Elle est caractérisée, au Secondaire, par une série de transgression, plus ou moins, intense et couvrant la majeure partie du Sénégal. Au Crétacé supérieur et à l'Eocène, le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien était presque, entièrement, envahie par la mer. Il en a résulté des dépôts massifs de graviers, de sables... d'épaisseur considérable. La fin du Maestrichtien est caractérisée par une émergence généralisée et par l'affleurement d'un faciès gréseux dans la presqu'île du Cap-Vert concernant, singulièrement, le massif de Ndiass.

L'affleurement au Tertiaire, de la couche marno-calcaire du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, a notamment intéressé la majeure partie de l'intérieur du pays : des bas plateaux du Ferlo au Sud de la Gambie. L'émergence ne s'est produite qu'à partir de l'Eocène Moyen. Le Continental terminal - dont le cuirassement par endroit

engendré par une probable altération chimique qui s'est effectué au Pliocène supérieur - a particulièrement concerné la partie Est et Sud-Ouest du pays avec, localement, des dépôts de grès argileux.

Hormis la région du Cap-Vert (présence de horsts et de grabens) qui a subi à la fin du Tertiaire une tectonique cassante (ankaratries et tufs du Cap-Manuel, basanites des îles Madeleines et Gorée au Miocène supérieur), le bassin sédimentaire est faiblement affecté. La structure est monoclinale avec un faible pendage vers l'océan (Dubresson A. et al. 1980).

2.4. Dépôts sédimentaires et volcanisme au Quaternaire

Les fluctuations du niveau de la mer, en rapport avec les variations climatiques observées au Quaternaire, ont engendré une multitude de dépôts de natures et d'origines diverses. Les changements climatiques se sont accompagnés de dépôts sableux d'origine éolienne (dont les dunes littorales le long de la grande côte Nord), lors des épisodes arides ; et des alluvions d'origine fluviale ou lacustres au cours des épisodes humides. Des dépôts marins ou fluviaux sont également observés au fond des vallées littorales.

Les éruptions du Quaternaire ont engendré la formation d'édifices volcaniques au Nord-Ouest de la presqu'île du Cap-Vert. Il s'agit notamment des Mamelles, essentiellement constituées de basanites recouvertes de dolérites.

3. Des sols variés

Les facteurs de la pédogenèse sont multiples et complexes. Des éléments fondamentaux, comme la roche-mère, constituent la base même d'un sol. Cependant, certains facteurs déterminants, en agissant directement sur la texture, l'acidité, la composition chimique des sols, perdent de leur influence au fur et à mesure que ces derniers évoluent.

D'autres, comme la végétation (grande pourvoyeuse de matière organique, d'humus, etc.) ; la structure topographique (rôle déterminant quant-au développement de certains phénomènes physiques comme le lessivage, l'érosion, etc.), la faune (micro-organismes favorisant les processus de décomposition de la matière organique) et le climat (qui à travers plusieurs facteurs tels le vent, la pluie, les températures, l'humidité, etc., conditionne, freine, ou accélère le déroulement de certains phénomènes physiques) ont une perpétuelle influence sur l'évolution des sols.

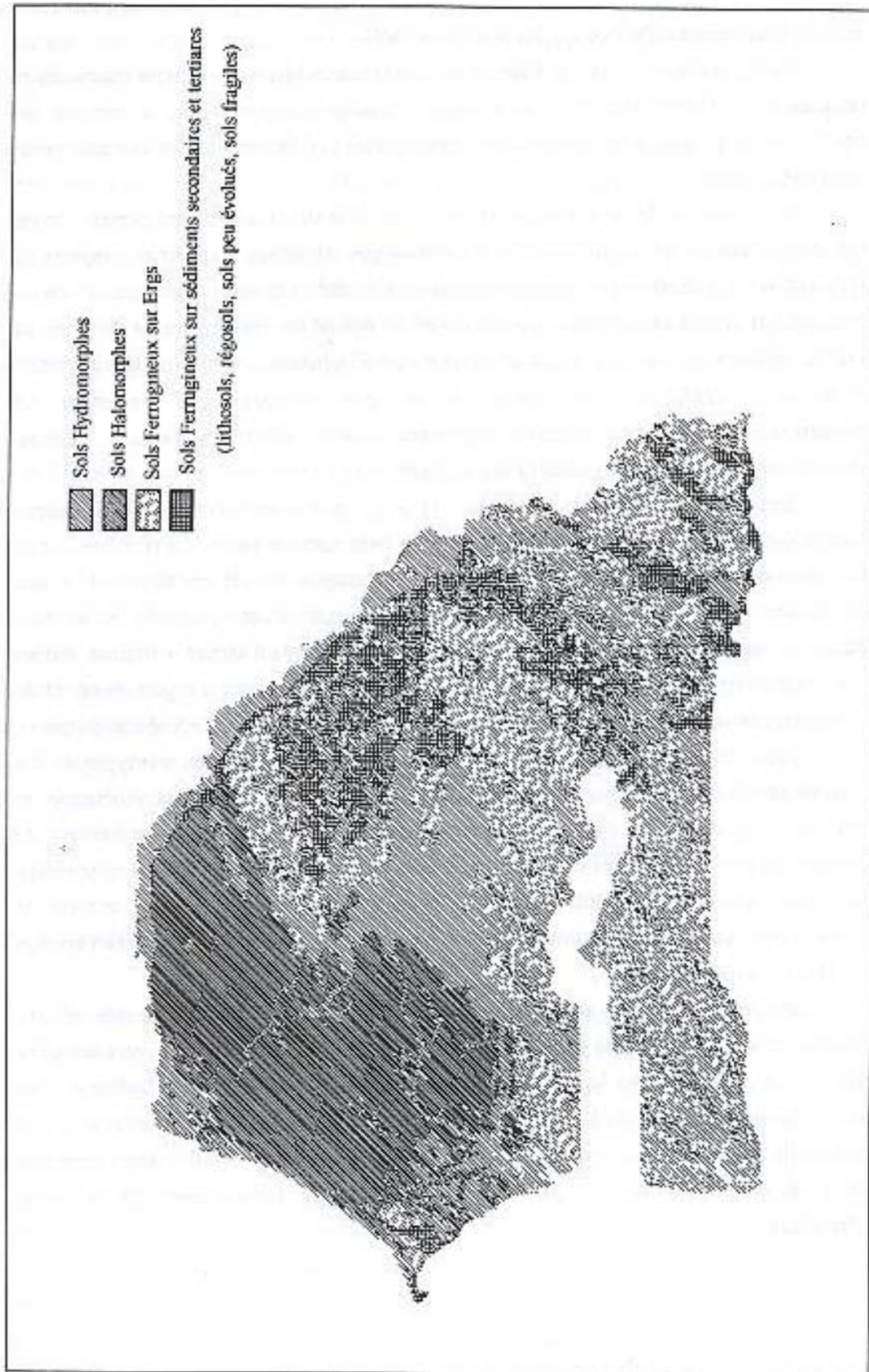
Enfin, les humains par différentes actions (feux de brousses, engrais chimiques et organiques, etc.) contribuent dans une large proportion à entretenir, à enrichir ou contrairement à déstabiliser, de manière remarquable, l'évolution normale des sols (voir Deuxième Partie).

Seule une étude exhaustive de la texture et de la structure d'un sol permet d'avoir des connaissances sur sa composition minéralogique, chimique, etc. et, par conséquent, de mesurer ses caractéristiques physiques (degré d'acidité, capacité d'échange, etc.). En se référant à la carte morphopédologique du Sénégal, établie par les chercheurs du CSE de Dakar, on distingue quatre grandes catégories de sol (reflétant le caractère du support géologique), regroupant une multitude de sous-groupes dont l'évolution est essentiellement liée aux nuances imprimées par le climat (sécheresse, salinité, exposition, vent) et l'environnement local.

Les différents types de sols (fig. 17) sont répartis en fonction des conditions morphoclimatiques. Il s'agit notamment de sols halomorphes (salinité exacerbée par la submersion), de sols hydromorphes (dans les marécages, les vallées alluviales et aux abords des lacs) craquelées en permanence pendant la saison sèche, de sols ferrallitiques (dans les régions méridionales), de sols sablonneux (résultants d'apport d'origines variées dont singulièrement les dunes littorales), de sols isohumiques (dans la région Nord) et de sols ferrugineux (riches en fer, répartis par endroit dans le bassin arachidier et le Sud-Est du pays).

Ainsi, dans les régions septentrionales du Sénégal, dominent les sols typiques des régions sahéliennes. La pauvreté de la matière organique (pauvreté de la végétation et des micro-organismes) et, par conséquent, du manque d'humus, explique la faiblesse de l'activité de ces types de sols caractérisés par une altération chimique réduite, saisonnière ou quasi inexistante. Ils sont de couleurs bruns ou bruns-rouges et sont exposés, de manière permanente, à la déflation et, de manière particulière (pendant l'hivernage), à l'érosion hydrique (ruissellement).

Au Nord-Ouest, le vaste cordon de dunes littorales est composé de sols sableux pauvres en argile, en potasse et en acide phosphorique. Dans l'arrière-pays, vers la région des Niayes, existent des sols argilo-sableux de couleur noire. Ces sols hydromorphes sont localement appelés deck-joor. Leur richesse et leur engorgement temporaire en eau font qu'ils favorisent dans cette région, la mise en valeur et, donc, l'exploitation intensive de produits maraîchers ; ce qui contribue largement à l'abaissement de la nappe phréatique.



**Fig. 17 : Carte morphopédologique (source : CSE de Dakar)
LISH/Logiciel Arc/Info, version 6.0.1**

Vers Ndiass, c'est-à-dire au Sud de cette région, ils cèdent la place à des sols ferrugineux et calcimorphes, riches en phosphate (d'où l'activité d'extraction massive dans la région de Thiès et, notamment, à Taïba). Du Sud de cette zone au bassin arachidier, existent des sols ferrugineux (localement appelés sols joor) tropicaux caractérisés par une gamme de couleurs très nuancée allant du beige au rouge en fonction de leurs origines, de leur évolution et du drainage. Le degré de lessivage est également exprimé par cette gamme de couleur. La catégorie non lessivée couvre la partie septentrionale de cette zone : Kayar, Tivaouane, Bambilor, Thiès, Diourbel, etc. C'est dans la partie située plus au Sud (Kaolack, Kaffrine) que l'on retrouve les types de sols les plus exposés au lessivage.

Les sols ferrugineux existent également dans les régions méridionales, notamment au Sud de la Gambie. Cette zone (Casamance, notamment) est cependant le domaine par excellence des sols ferralitiques (latéritiques) meubles et très riches en oxyde de fer ; ce qui explique leur coloration uniforme en rouge. En Basse Casamance (vers Oussouye), sur les surfaces basses et sur les pentes des plateaux, existent des terres argileuses, de couleur grise ou noire. Ces cuvettes recouvertes par des sols hydromorphes constituent le bassin rizicole du Sénégal.

Dans les embouchures des fleuves qui sont des zones basses, plates, on retrouve des sols halomorphes caractérisées par une salinité et une acidification très élevées : pH < 6,5 dans la région du Delta (Michel P., 1973), < 3 dans certaines zones de Basse Casamance. L'absence répétée de précipitations qui a conduit à l'assèchement des vallées (à certaines périodes de l'année), à l'abaissement des nappes profondes et, de surcroît, au bilan hydrique négatif, favorise la remontée de l'eau de mer. Les conséquences de cette submersion sont parfois observées loin à l'intérieur des terres (à une distance d'environ 450 km des côtes sur le fleuve Sénégal avant la mise en service du barrage antisel de Diama). Aussi, la forte évaporation aggravant la siccité, exacerbe la stagnation et la formation de fines pellicules de sels. Ces sols sont également exposés à l'érosion marine, hydrique et éolienne.

Il existe aussi des vertisols, répartis de manière très dispersée, dans le pays. Ils sont grossièrement repérés vers la région de Mbour, au Sud-Est de Bakel et au Nord-Ouest de Kédougou. La nudité de plus en plus exacerbée par les aléas climatiques et l'action humaine, expose la plupart des sols jadis couverts, soit à l'érosion (éolienne, hydrique) soit au ralentissement de leurs activités physiques (altération chimique, entre autres) ; ce qui n'est pas sans conséquences sur les processus d'évolution du milieu naturel (voir Deuxième Partie).

4. Un océan bordier caractérisé par des upwellings

Nous allons, dans un premier temps, aborder certains aspects de l'hydrologie maritime concernant la zone de transition entre les côtes sénégalaises et l'océan Atlantique. Ensuite, nous analyserons les différentes caractéristiques des températures de surface de la mer et leurs influences sur l'évolution des masses d'air dans les basses couches.

Il ne s'agit pas ici, d'effectuer une étude océanographique de la région mais simplement de montrer comment le proche océan, à travers la manifestation de certains phénomènes influence, de manière déterminante, la climatologie locale et, particulièrement, la bordure côtière.

4.1. Deux sortes d'upwellings

Rappelons que la bande côtière sénégalaise s'allonge sur plus de 700 km. Cette proximité de l'océan joue un rôle déterminant sur la climatologie locale. Les modifications climatiques observées dans la sous-région (dont un des résultats spectaculaires est la sécheresse persistante) ont également des répercussions dans le domaine océanique.

Nous allons à travers les Températures de Surface de la Mer (TSM) observées au Sénégal, montrer le rôle de l'Atlantique dans l'humidification et l'échauffement des masses d'air le traversant. Le comportement des upwellings en rapport avec l'évolution de ces masses d'air et des flux de surface permet de mieux appréhender la dynamique océanique à quelques miles au large des côtes sénégalaises.

La zone de transition entre l'espace immergé et le substratum terrestre constitue la zone des upwellings. Ces phénomènes, comme beaucoup d'autres caractérisant l'étroite interdépendance du système Terre-Océan-Atmosphère, subissent des fluctuations en fonction de l'évolution complexe des paramètres qui les engendrent. Le phénomène d'upwelling, processus de remontée des eaux froides profondes en surface, entraîne une stabilisation des masses d'air à son contact (le parallélisme des isothermes, observés dans les zones d'upwelling en est une nette confirmation). Ces manifestations côtières se déroulant dans la zone de transition entre l'espace immergé et le substratum terrestre, résultent d'une double action des facteurs aérologiques et géographiques. Les vents, par leur force et leur direction, les eaux océaniques par leur température, leur salinité et leur densité, le plateau continental par son orientation, sa topographie sont autant d'éléments, à l'origine de ces phénomènes. Le principal moteur de ces phénomènes côtiers est le vent.

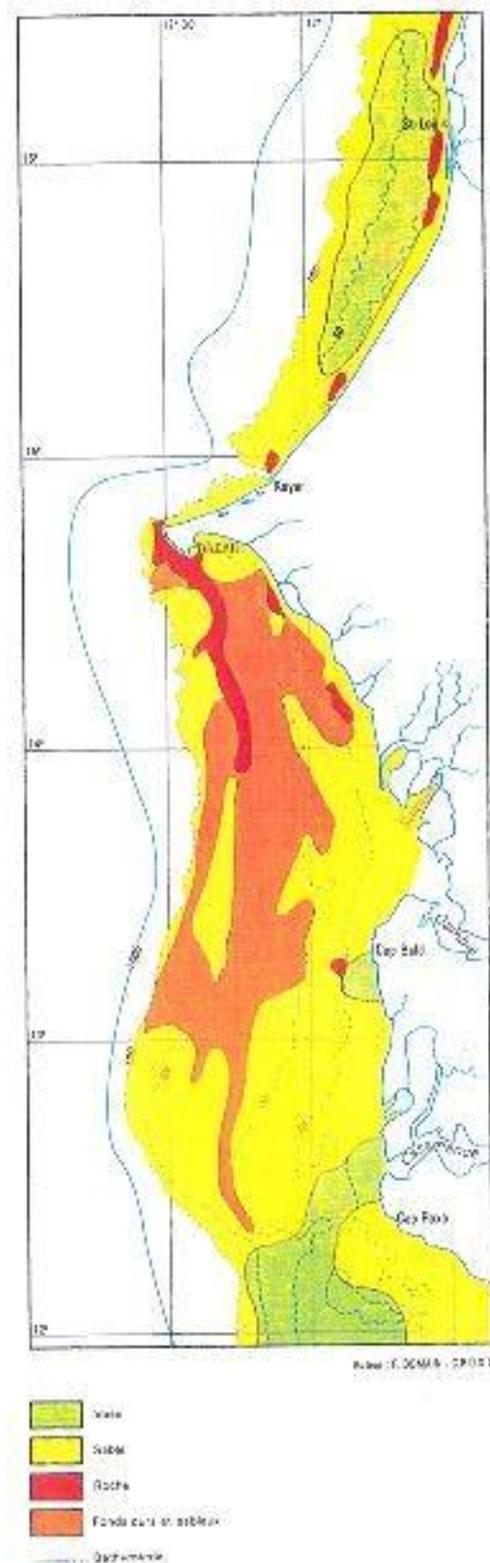


Fig. 18 : Topographie et nature des fonds du plateau continental du Sénégal (Domain F., 1977)

Rappelons qu'au Sénégal, la dynamique des mouvements aériens, en fonction de la position et de la vigueur des principaux centres d'actions (Açores et Sainte-Hélène) qui les génèrent, est soumise à des fluctuations saisonnières, ce qui se traduit par l'existence de deux sortes d'upwellings : l'un permanent, et l'autre semi-permanent en rapport avec le balancement saisonnier de tout le système. Aussi, partant de ce fait, les upwellings, comme les vents qui les engendrent, subissent la force de Coriolis et par conséquent s'intensifient en s'éloignant de l'équateur (forçage mécanique plus vigoureux : il y existe cependant un autre type d'upwelling lié à d'autres facteurs)

Or, au Sénégal, le schéma habituel est inversé du fait de la morphologie du plateau continental et de la disposition de la presqu'île du Cap vert (fig. 18). Couvrant une superficie d'environ 29580 km², large de 27 miles à la hauteur de Saint-Louis et de 54 miles au Sud du Sénégal, ce plateau continental est rétréci au maximum au niveau de la presqu'île du Cap-Vert. Si bien que, les manifestations des phénomènes côtiers sont modifiées car elles dépendent également de l'agencement bathymétrique (Rebert J. P. et al., 1977).

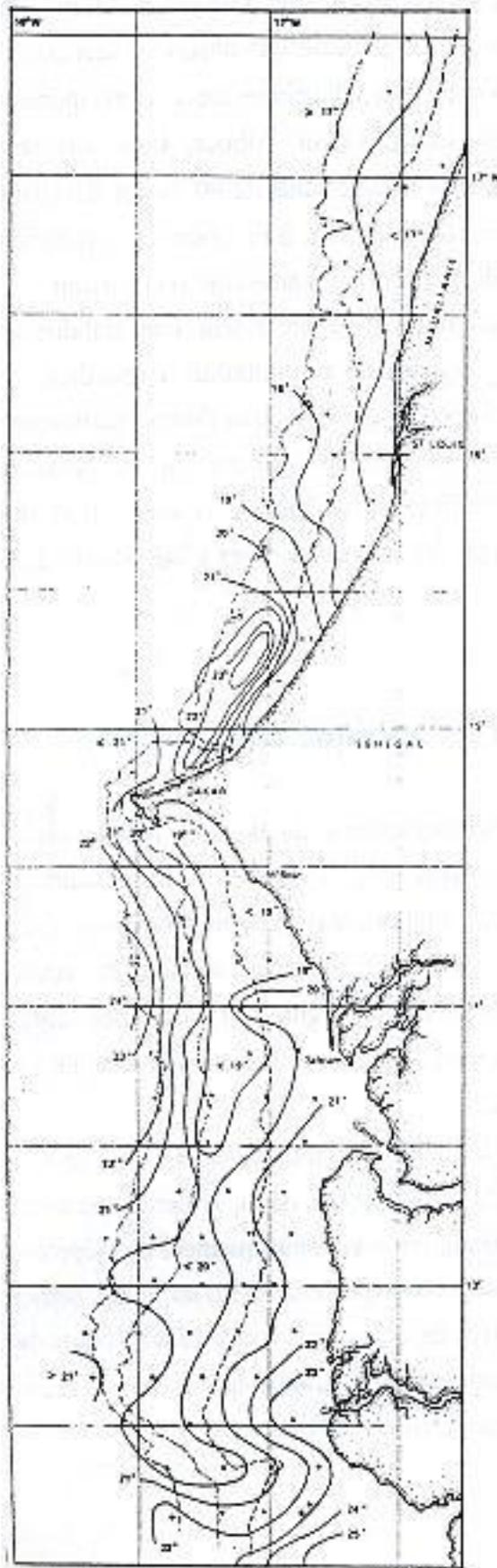
Ainsi donc, en plus de la fluctuation des régimes de vent, la disposition bathymétrique de la région côtière de Dakar (côte très avancée dans la mer), entraîne une différence d'intensité des flux verticaux de masses d'eaux. Les upwellings évoluent de manière différente au Nord et au Sud de la presqu'île du Cap-Vert. D'ampleur comparable à ceux enregistrés au Sud en période d'alizés forts ou de secteur maritime, les upwellings observés au Nord de la presqu'île du Cap-Vert sont atténués au cours des périodes d'alizés faibles ou de secteur Nord-Ouest-Nord. Cela accentue les disparités caractérisant ces deux régions côtières. L'intensité des upwellings est déterminante pour les apports en sel minéraux et engendre donc d'énormes inégalités de part et d'autre de cette presqu'île du Cap-Vert. La résurgence et les apports en sel minéraux sont plus importants dans les régions situées au Sud (Roy C., 1989). L'abondance des ressources halieutiques et partant, l'économie du secteur de la pêche en sont directement affectées.

4.2. Le proche océan: les Températures de Surface de la Mer (TSM)

Les TSM observées sur la marge océanique sont en partie le reflet des phénomènes côtiers que nous venons de décrire. Les fluctuations des TSM sont donc liées à l'évolution de tous les facteurs précités en rapport étroit avec la fréquence des upwellings.

Par ailleurs, l'existence d'une corrélation entre la variabilité des précipitations côtières et celle des TSM a été démontrée par de nombreux chercheurs. Des déserts côtiers (dont celui de la bordure mauritanienne longé par le courant froid des Canaries atteignant les côtes sénégalaises et celui du Namib longé par le courant froid de Benguela) sont bien répertoriés dans les zones d'upwellings. Les masses d'air au contact des eaux de surface à températures faibles, se refroidissent et se stabilisent à la base. Tout mouvement d'ascendance est ainsi contraint. Les masses d'air très denses, s'alourdissent et se tassent favorisant la création d'un anticyclone local.

Au Sénégal, les valeurs moyennes de TSM (fig. 19) sont variables selon la latitude. Dans la partie septentrionale, à la hauteur de Saint-Louis, elles sont de l'ordre de 19° C sur la côte contre 28° C au large, d'où, une stabilité et une subsidence des masses d'air parcourant cette région, ce qui explique, en partie, les faibles valeurs de pluies qui y sont enregistrées. Tandis que, ailleurs, de fortes précipitations sont généralement observées dans les zones à TSM élevées. Tout cela prouve que l'océan est une source potentielle de chaleur pour les masses d'air le traversant.



Le cas le plus représentatif est celui de la mousson qui s'alimente aussi bien en énergie qu'en eau en traversant l'océan (l'océan indien (semi fermé et donc plus chaud) : mousson indienne ; l'Atlantique et, dans une proportion moindre : mousson africaine). Au Sénégal, les stations de CapSkirring et de Ziguinchor situées au Sud-Ouest, en pleine zone de mousson, peuvent être citées comme exemples car elles enregistrent les plus fortes valeurs de pluies de l'ensemble du pays. L'océan est donc bien une source potentielle d'énergie. Les valeurs de réflectances sont moins soumises aux fluctuations saisonnières (inertie thermique) que ceux du substratum terrestre, ce qui influe largement sur ceux de l'albédo. Avec un bilan thermique, positif dans les zones tropicales, l'océan en tant que régulateur thermique, exporte à travers les courants marins, son surplus d'énergie de ces régions vers les latitudes à bilan énergétique déficitaire ; ce qui équivaut dans les basses couches de l'atmosphère aux échanges aériens. Le rôle important des températures élevées de l'eau de surface pour le réchauffement des masses d'air traversant l'océan (exemple de la mousson) a été mis en évidence. Aussi, à travers les faibles températures côtières caractérisées par les upwellings, avon-nous souligné le rôle, sur la pluviométrie, de la stabilisation des masses d'air évoluant dans les zones concernées.

Fig. 19 : TSM observées au Sénégal (Campagne CAP) (Privé et al., 1977)

Les conséquences de ces interactions apparaissent jusque dans l'arrière-pays de ces régions. La subsidence de l'air résulte des conditions favorables à l'installation d'un anticyclone thermique local (une des causes principales de la sécheresse voire des déserts observés dans ces régions côtières). Pourtant, le corollaire à savoir, le taux d'humidité élevé, voire même saturé enregistré dans les villes du littoral (Saint-Louis, Dakar, Mbour, Cap-Skiring, etc.) bénéfique à l'installation d'un microclimat plus vivable (plus de 90 % des infrastructures touristiques) s'oppose, cependant, à la siccité des masses d'air observée à l'intérieur des terres, c'est-à-dire là où l'influence immédiate de l'océan s'amenuise ou disparaît.

Les basses températures de l'eau de surface entraînent une stabilité et une subsidence de l'air à leur contact, d'où, l'absence de précipitation. Cependant, ce flux saturé, a tendance à pénétrer sur le continent et si les conditions thermodynamiques sont favorables à une ascendance, il peut être pluvigène. Si en revanche les températures de surface de l'eau sont suffisamment chaudes, la convection reste au-dessus du trait de côte. C'est ce qui explique la présence des nuages souvent observés à Saint-Louis tandis que dans l'arrière-pays circule un air sec.

5. Une densité du réseau hydrographique trompeuse

La seule référence au chevelu hydrographique de la carte établie par l'IGN (1961) donne l'impression d'un réseau dense (fig. 15). La plupart de ces ramifications n'ont cependant qu'une activité temporaire (n'existent donc qu'en hivernage) quasi insignifiante. Bien des talwegs sont complètement inactifs et constituent actuellement des vallées sèches ou "mortes".

La figure 20 numérisée après validation sur le terrain restitue mieux la réalité avec un milieu quasi "désertique" au Nord et un réseau plus ou moins ramifié au Sud.

Pendant ces dix dernières années, les débits des grands fleuves traversant la zone sahélienne ont réduit de 40 % (Albergel J. et al., 1993). Ainsi, le déficit persistant des eaux de surface engendré par les aléas climatiques a systématiquement, des répercussions sur les nappes souterraines.

De nombreuses recherches effectuées au Sahel démontrent que la plupart des nappes des fleuves ne se sont pas rechargées au cours de cette longue série d'années de sécheresse. Cela engendre une baisse considérable des modules et une faiblesse, voire même une absence des crues (Courel, 1984).

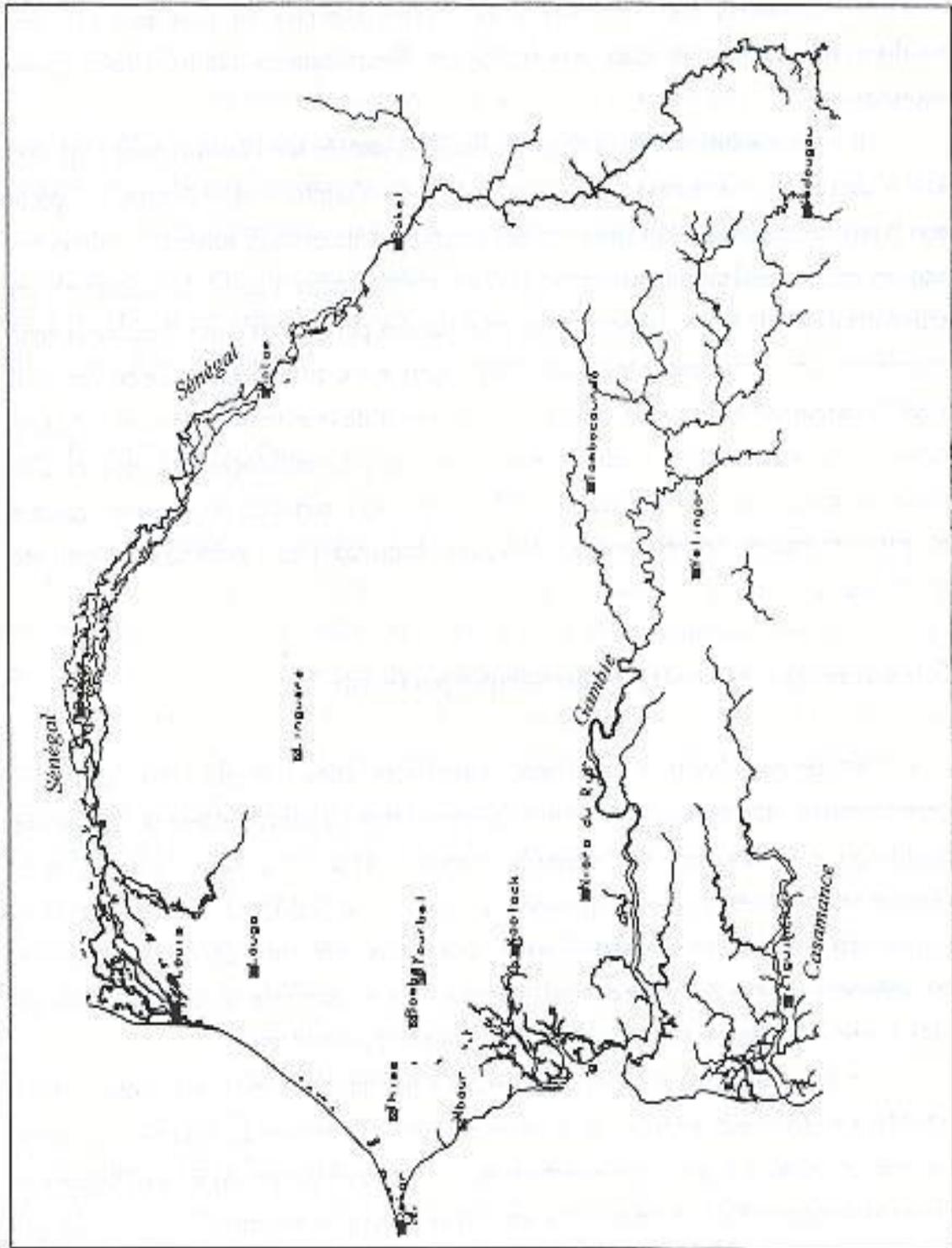


Fig. 20 : Réseau hydrographique du Sénégal (numérisé sous Arc Info, 1994, source : IGN)

Avant d'orienter notre analyse vers une observation globale du déficit hydrique et hydrologique enregistré sur l'ensemble du réseau, nous allons d'abord effectuer une étude descriptive des plans d'eaux existants. Ensuite, nous poursuivrons notre étude à travers l'observation de quelques cas concrets très représentatifs de la réalité terrain. Ces exemples constituent les principales unités hydrographiques du pays tant par leur localisation géographique, leurs caractéristiques climatologiques que leurs rôles socioéconomiques.

Il s'agit d'abord du fleuve Sénégal. Par l'ampleur de son bassin versant (345 000 km² à cheval sur quatre pays : la Guinée, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal qui porte son nom), son volume d'eau (phénomènes de crues et de décrues suivent le rythme des saisons avec, cependant, un tarissement plus ou moins régulier à partir de décembre), ses différents débits, le fleuve Sénégal est l'un des plus grands cours d'eau de la zone sahélienne.

Le second exemple caractéristique n'est autre qu'un défluent de ce fleuve. Il s'agit principalement du lac de Guiers (le plus étendu du pays), situé au cœur de la zone sahélienne et subissant, depuis quelques années, des bouleversements associés à des influences anthropiques. Des études récentes (Gac, 1994 ; Albergel, 1993...) ont montré comment l'écosystème lacustre et, par conséquent, ses propriétés chimiques, hydrologiques, biologiques, etc., ont été déstabilisées

5.1. Un réseau hydrographique disproportionné

Au Sénégal, les trois principaux fleuves sont d'une inégalité remarquable. Ce déséquilibre se situe surtout au niveau de la superficie des bassins versants et de l'activité hydrologique. Il s'agit essentiellement du Sénégal (à l'Est et au Nord du pays), de la Gambie (à cheval entre le pays qui porte son nom et le Sud-Est du Sénégal) et de la Casamance (dans la région méridionale).

Les cours inférieurs de ces fleuves sont normalement soumis aux marées, mais on observe une remontée de ce phénomène de plus en plus vers l'amont par suite des divers effets de la sécheresse.

Le Sénégal, avant d'atteindre l'Atlantique par un vaste delta, est rejoint par de nombreux cours d'eaux de tailles et de caractéristiques différentes. La Gambie, s'écoulant sur environ 1 200 km prend également naissance dans les hauteurs du Fouta-Djallon (en Guinée-Conakry). Très sinueuse dans son cours moyen et supérieur (seule partie qui concerne le Sénégal), elle couvre un bassin versant

d'environ 78 000 km² (Dubresson et al.). Elle est alimentée par une multitude de bras dont le Niokolo-Koba.

Enfin, la Casamance avant de former une ria vers la ville de Ziguinchor et amorcer sa plongée dans l'Atlantique, prend au passage, à travers les bas plateaux du Sud, plusieurs affluents dont le principal est le Soungrougrou.

La région Sud-Est du Sénégal, bénéficiant d'un relief escarpé avec comme support un socle constitué de roches imperméables, d'une pluviosité plus abondante qu'ailleurs, est dotée d'un réseau hydrographique dense et très hiérarchisé. Il s'agit essentiellement des cours supérieurs des trois principaux fleuves précités et de leurs affluents.

À l'Ouest, les vallées sèches du Sine et du Saloum, ne sont fonctionnelles qu'occasionnellement selon la localisation et l'abondance. Cependant, cela ne concerne que l'amont de ces rivières. En effet, des bras de mers occupent l'aval de ces vallées largement envahies par les eaux de l'Atlantique.

Il existe également dans la région du Ferlo, une vallée morte du même nom. Cette immense vallée à activité quasi insignifiante dans son cours moyen et supérieur, entaille les bas plateaux de cette région et s'élargit de plus en plus vers le Nord-Ouest avant d'atteindre le lac de Guiers.

5.2. Le fleuve Sénégal

D'une longueur d'environ 1 800 km, le Sénégal prend naissance dans les hauteurs du Fouta-Djallon (fig. 21). Constitué au départ par le Bafing (branche principale née à 900 m d'altitude au Fouta-Djallon) et le Bakoy (né à 800 m d'altitude dans les plateaux mandingues), il prend plus de vigueur à Bafoulabé (au Mali) c'est-à-dire à la confluence de ces deux bras.

À l'amont de Bakel, en territoire sénégalais, il est rejoint par plusieurs affluents dont la Falémé. C'est également dans cette région qu'il décrit une énorme boucle en direction du Nord-Ouest. Quelques kilomètres en aval de Bakel, plus précisément vers Bogué, il s'incline vers l'Ouest en direction de l'Atlantique.

Son vaste delta s'amorce aux environs de Richard-Toll. C'est également à cette hauteur que la Taoué (petit affluent) relie le fleuve Sénégal au lac de Guiers. En amont de Saint-Louis, avant d'être rejoint par les marigots de Djeuss, Lamsar et Gorom, il change de direction et s'écoule vers le Sud-Sud-Ouest. Il finit sa longue

course dans cette ville où il n'est séparé de l'Atlantique que par la langue sableuse de Barbarie. Comme l'ensemble des éléments qui caractérisent ces régions intertropicales, le fleuve Sénégal connaît un régime à variation saisonnière marquée (étiage pouvant atteindre 9 mois selon la latitude) qui se calque sur la saisonnalité pluviométrique. Les périodes de hautes eaux sont enregistrées pendant l'hivernage.

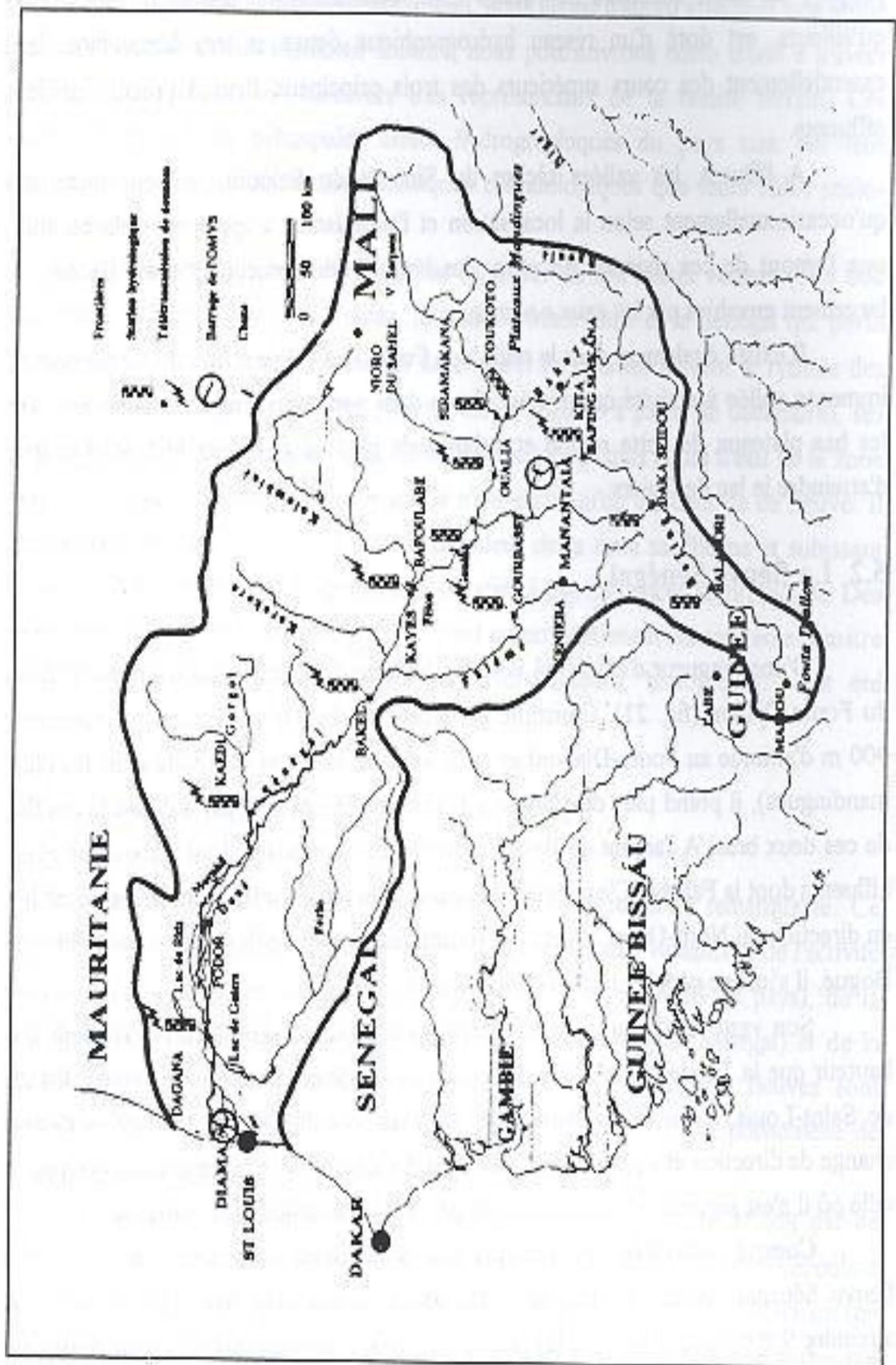


Fig. 21 : Bassin du Fleuve Sénégal (Albergel et al., 1993)

L'essentiel de ses apports en eau étant d'origine méridionale, les crues, liées principalement à la pluviométrie (secondairement, à beaucoup d'autres facteurs dont la perméabilité du support, l'infiltration, la hauteur des nappes souterraines, l'évaporation elle-même liée à la température de l'air et à la vitesse du vent), s'amenuisent de ces régions vers l'aval. Ainsi, on remarque une nette diversité dans les valeurs des débits enregistrés (tableau 1).

**Tableau 1 : caractéristiques hydrologiques du bassin du Sénégal (période 1951-1989)
(Albergel et al., 1993)**

Bassin (Stations de contrôle)	Superficie du bassin versant (km ²)	Précipitation annuelle moyenne (mm)	Débit moyen annuel (m ³ /s)	Volume moyen annuel (10 ⁹ m ³)	Débit caractéristique* d'étiage (m ³ /s)	Débit caractéristique** de crue (m ³ /s)
Bafing (Bafing Makana)	22 000	1 600	271,0	8,55	6,37	1 210
Bakoya (Teukoto)	16 500	1 200	58,4	1,84	0,11	336
Beaulé (Siramakana)	59 500	780	44,9	1,42	0,00	293
Falémé (Kidira)	28 900	1 020	148,0	4,67	0,25	1 045
Haut Sénégal (Bakel)	218 000	820	648,0	20,40	4,11	3 515

C'est en zone sahélienne, malgré les apports de quelques affluents dont le gorgol, que les débits les plus faibles sont enregistrés, d'où l'existence de nombreux méandres dans cette région.

De même, toujours dans cette région septentrionale, plusieurs bras morts témoignent de méandres abandonnés qui constituent de vastes marigots isolés du cours d'eau principal à écoulement d'Est-Ouest.

Pendant la saison sèche (période des mortes eaux), on notait avant la mise en service du barrage de Diama, une importante remontée de l'eau océanique avec des influences directes jusqu'aux environs de Podor (plus de 450 km de la côte).

Véritable fléau, ce phénomène était lié à la faiblesse du débit du fleuve pendant cette période (absence de pluie ; très forte évaporation due aux températures élevées et à la présence de l'harmattan ; affaissement des nappes souterraines).

Avec la succession des années sèches depuis 1968, ce phénomène s'est accentué de manière considérable entravant les cultures irriguées traditionnelles dans cette région.

Pour mieux maîtriser les vicissitudes du fleuve liées aux aléas climatiques (à savoir l'irrégularité des crues et la remontée de l'eau de mer), de grands travaux ont été entrepris il y a de cela quelques années. Cela afin de construire deux types de barrages à fonctions différentes. Il s'agit d'abord, en 1986 du barrage antisel de Diama à l'aval

du fleuve pour entraver la remontée des eaux marines. Puis de celui de Manantali (1988) à double fonction, situé plus en amont du fleuve. La première étant de pouvoir stocker les eaux de pluies d'hivernage afin de les restituer en saison sèche (régularisation du régime fluvial, intensification des cultures irriguées, et navigabilité permanente), et la seconde, de produire de l'énergie hydroélectrique.

En plus des maladies hydriques observées sur les populations, d'autres conséquences néfastes liées aux barrages de Diama et Manantali sur l'écosystème fluvial et lacustre (Guiers) ont également été repérées, or, leur mise en fonction date seulement de quelques années (Gac et al., 1993).

5.3. Le lac de Guiers

A l'Ouest du Sénégal existent quelques lagunes et de minuscules lacs dont les principaux sont le Retba et le Tamna (Nord-Ouest). Le lac de Guiers, situé à la hauteur de Richard-Toll constitue cependant, de par son ampleur, le plus important lac d'eau douce du pays. Grande dépression d'origine tectonique, le lac de Guiers est situé à la latitude 14° 09' Nord et à la longitude 16° 08' Ouest (Gac, J.Y. et al., 1993). Défluent du fleuve Sénégal, il communiquait avec celui-ci par la Taoué située aux environs de Richard-Toll. Ce petit défluent caractérisé par de nombreux méandres, alimente le périmètre sucrier de cette ville en eau. Aujourd'hui, un canal le reliant directement au fleuve permet de réguler les eaux du lac et par conséquent de contrôler les phénomènes de crues et décrues initialement rythmés selon les saisons.

Large d'environ 7 km et s'allongeant sur 50 km, ce lac aux contours irréguliers s'oriente du Nord-Nord-Est au Sud-Sud-Ouest (Michel P., 1973). Dans sa bordure Sud-Ouest sont observés quelques alignements de dunes fixées de tailles différentes. Sur le plan morphologique, il se subdivise en deux entités (fig. 22) distinctes aussi bien par leur superficie, leur profondeur que par leur charge en eau. La partie septentrionale qui est la plus vaste représente 80 % du volume total d'eau du lac (tableau 2).

Tableau 2 : Caractéristiques morphométriques du lac de Guiers, à la cote l.m IGN (Gac et al., 1993)

	Région Nord	Région Sud	Total lac
Surface (km ²)	170	70	240
Volume (m ³)	338	52	390
Surface/Volume	0,50	1,35	0,62
Profondeur moyenne (m)	1,99	0,74	1,63
Profondeur max. (m)	3,00	1,75	

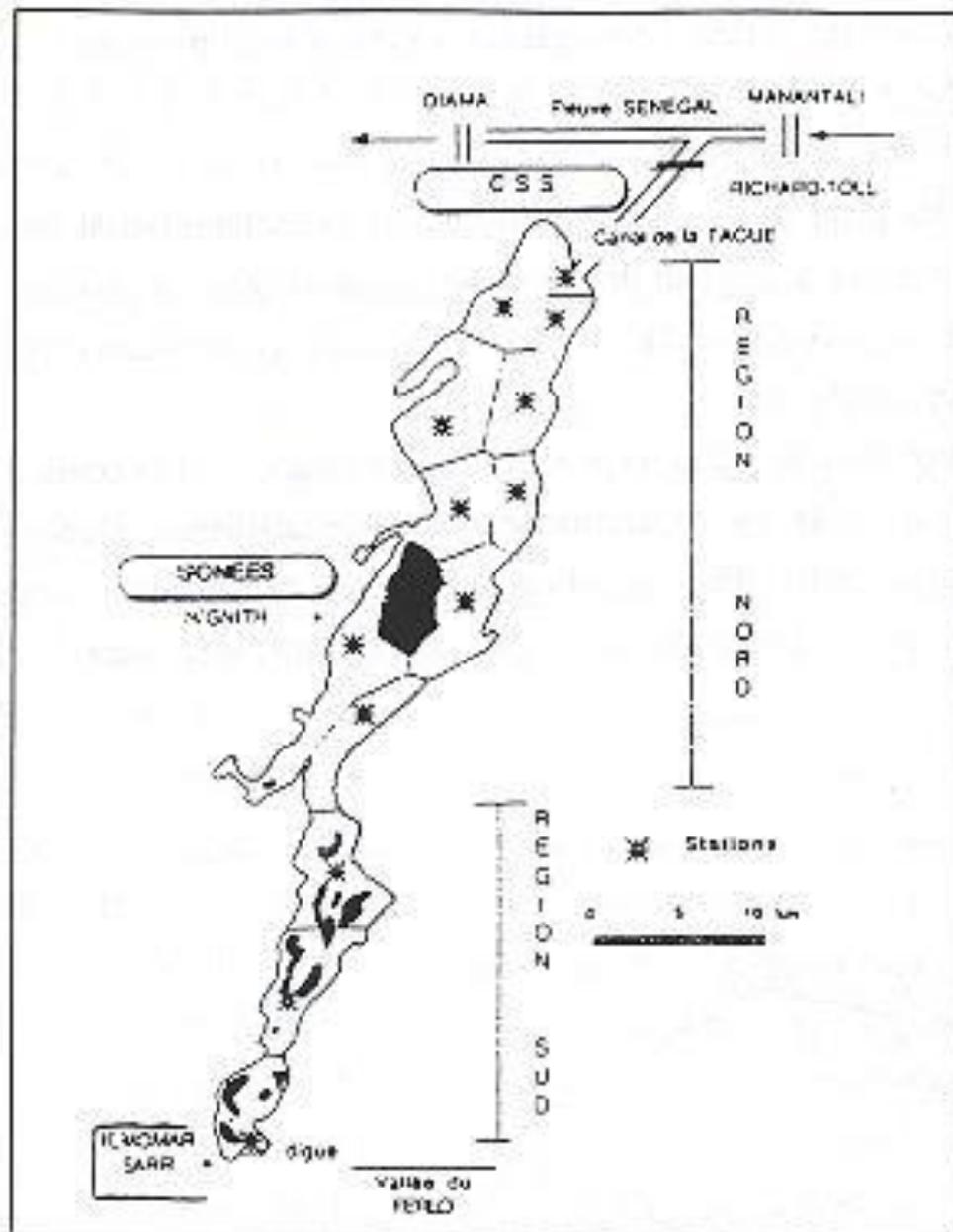


Fig. 22 Carte du lac de Guiers, à la cote Lm IGN (Gac et al 1993)

Ce lac qui alimente Dakar en eau a également avant la construction des édifices hydrologiques qui régulent actuellement son niveau annuel, subi les aléas climatique. Une des conséquences des baisses d'alimentation en eau douce est la chute du niveau moyen et l'assèchement partiel, comme ce fut le cas en 1983 dans la région méridionale. Il s'est alors produit une intrusion de la langue d'eau salée venue de l'Atlantique qui a perturbé totalement l'écosystème aquatique.

Les édifices hydrologiques à fonctions multiples et complémentaires de Diama, à 50 km de Saint-Louis et Manantali, plus en amont à 1200 km de l'embouchure (fig. 23) en régulant les crues et décrues du fleuve Sénégal, ont ainsi, modifié le régime

naturel du lac qui n'en est qu'un défluent si bien que la comparaison des écosystèmes anté (c'est-à-dire avec un régime régulé par le rythme des saisons et donc seulement par les précipitations) et post-barrages fait apparaître des disparités au niveau de la composition chimique, de l'hydrologie et de la végétation lacustre (voir Deuxième Partie).

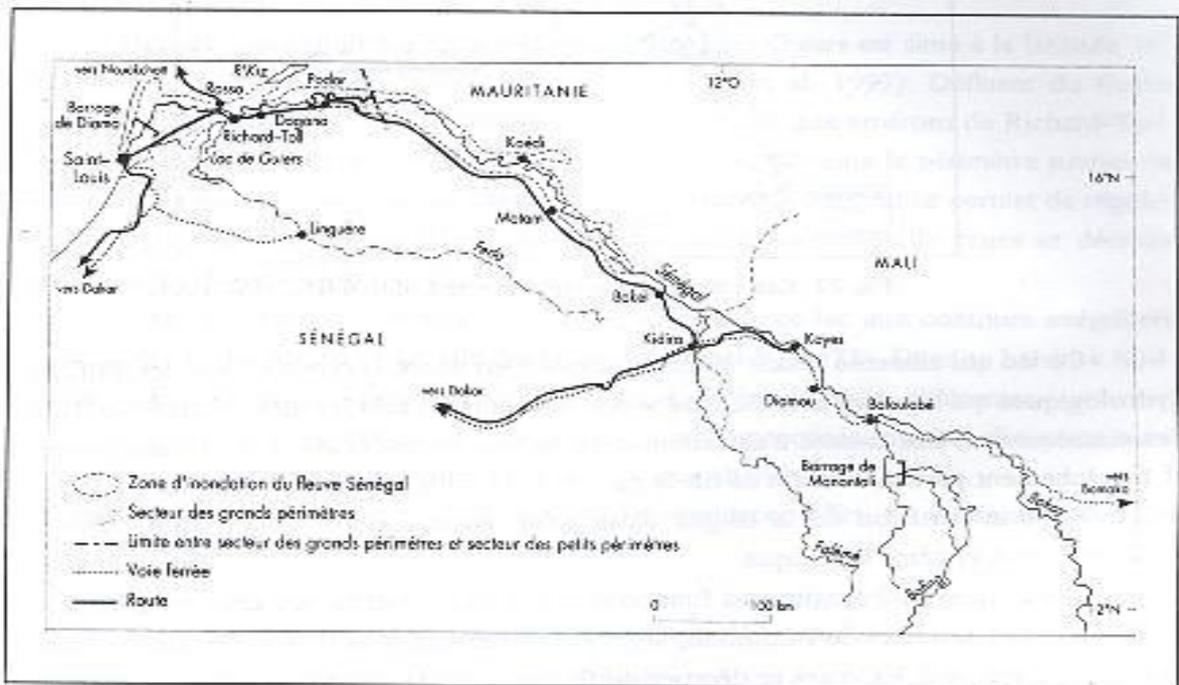


Fig. 23 : Aménagements hydroélectriques de la vallée du fleuve Sénégal (Dubresson et al., 1994)

Après une description sommaire des cours pérennes et temporaires, et plus généralement, des principaux plans d'eau répertoriés au sein de notre zone d'étude, l'accent a particulièrement été mis, sur le fleuve Sénégal afin d'évaluer son importance climatique et socio-économique.

L'une des conséquences majeures de la sécheresse est le tarissement partiel ou temporaire des plans d'eau, accentué par la forte évaporation et la baisse du niveau des nappes souterraines. L'ampleur de la submersion (abordée plus largement dans notre Deuxième Partie) dans les cours inférieurs, voire même moyens des fleuves en est un témoin conséquent.

Le second constat est que, la région, du fait de son appartenance à la bande sahélienne et de l'insuffisance de ses aménagements (absence d'infrastructures et sous-exploitation des ressources hydrologiques), constitue une source potentielle d'émigration de jeunes gens vers Dakar et parfois en transit pour l'Europe.

II. COMPOSANTES BIOTIQUES DES PAYSAGES

Sous toutes les latitudes, les conditions climatiques, au travers de la disponibilité calorifique et de la présence de l'eau influencent la densité et l'évolution des formations végétales.

Sous les tropiques, par suite de l'absence d'hiver, elles sont le reflet de la répartition des précipitations.

Cependant, les types de sols, la topographie, la nature de la nappe phréatique, l'exposition, etc. conditionnent et régulent de manière considérable la vie des plantes à une échelle plus fine.

Au Sénégal, la disposition du couvert végétal met en évidence deux caractéristiques distinctes. L'homogénéité des formations végétales s'oppose à l'hétérogénéité des espèces. On note en effet, une zonalité biogéographique allant des steppes sahéliennes aux forêts clairsemées des régions méridionales.

La carte d'estimation de la biomasse établie par le CSE (fig.24) reflète bien cette diversité latitudinale. Cependant, l'existence et la prolifération de certaines espèces repérées par endroit montre, une fois de plus, que la végétation est le reflet des facteurs édaphiques et climatiques qui au Sénégal, ne répondent pas seulement à un dispositif zonal, si souvent montré en Afrique de l'Ouest comme l'exemple type. Les espèces sont très variées.

Dans certaines régions, la présence d'eau douce, d'eau saumâtre et d'eau salée en permanence entraîne une humidification des microclimats même hors de l'hivernage et donc une végétation spécifique.

Cependant, les caractéristiques particulières, surtout au point de vue physiologique, résultent de longues adaptations, en particulier, au stress majeur de ces milieux : la sécheresse.

Dans un premier temps, nous allons montrer la distribution spatiale des formations végétales. Ensuite, les espèces végétales les plus résistantes aux rudes conditions climatiques retiendront notre attention.

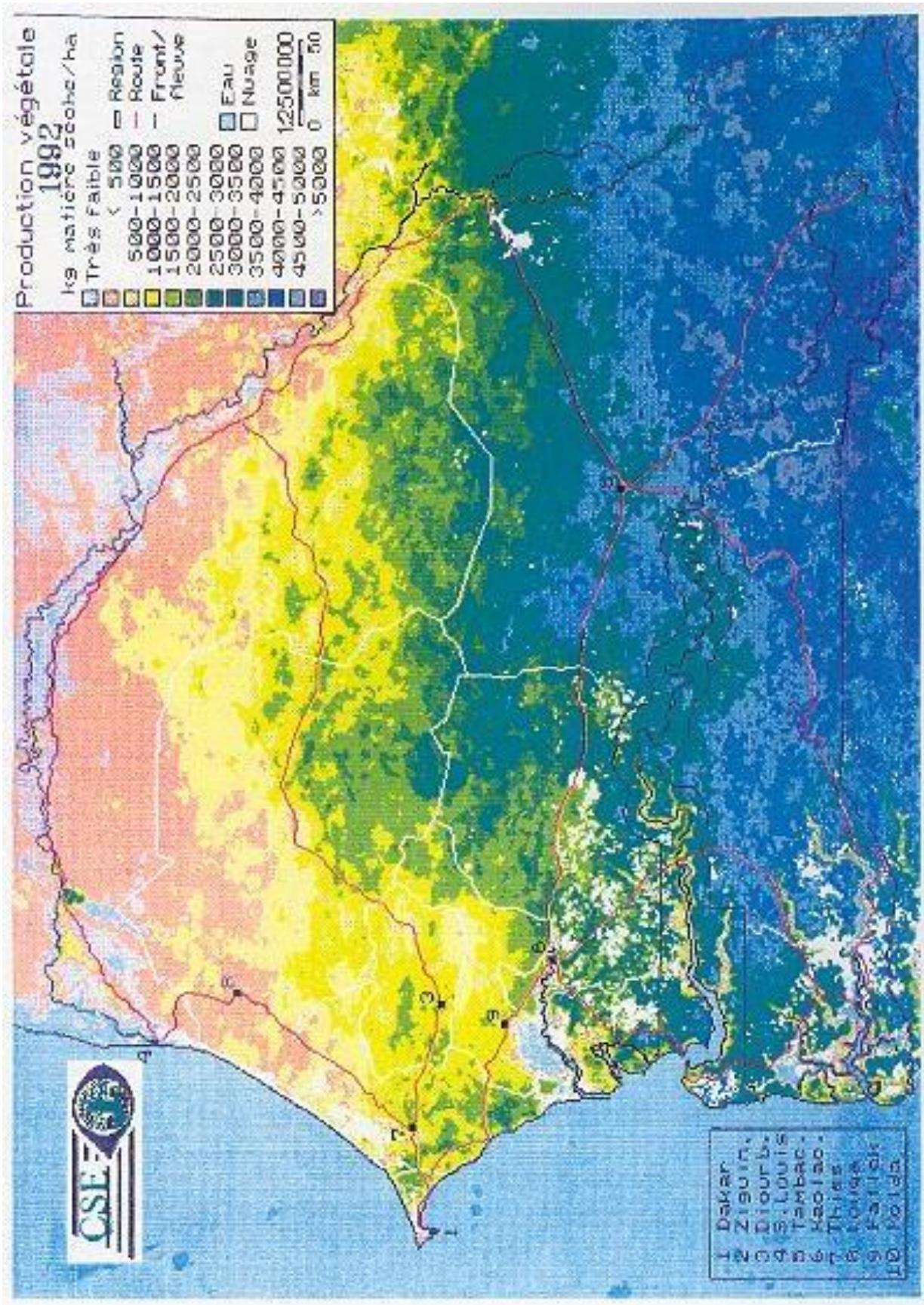


fig. 24 : Carte de la végétation réalisée à partir des indices calculés (CSE, 1992)

1. Homogénéité spatiale et hétérogénéité des formations végétales

Dans l'ensemble, si l'on trace un transect méridien au Sénégal, on constate que la densité du couvert végétal, quasi nulle au Nord prend forme et se confirme au fur et à mesure que l'on avance vers le Sud.

Dans la partie sahélienne, c'est-à-dire là où la saison sèche peut atteindre 10 mois, se manifeste une steppe éparse d'une densité de plus en plus faible en fonction de plusieurs facteurs. Pendant la saison sèche, de vastes espaces de sols nus séparent les quelques arbustes qui caractérisent cette steppe et dont la sobriété se reflète dans leur physionomie : rabougri, épineux, caduque. La photo n° 1 prise au Sud de Saint-Louis montre des espèces d'*Acacia* (Kad) adaptés aux rudes conditions climatiques de cette région sahélienne.

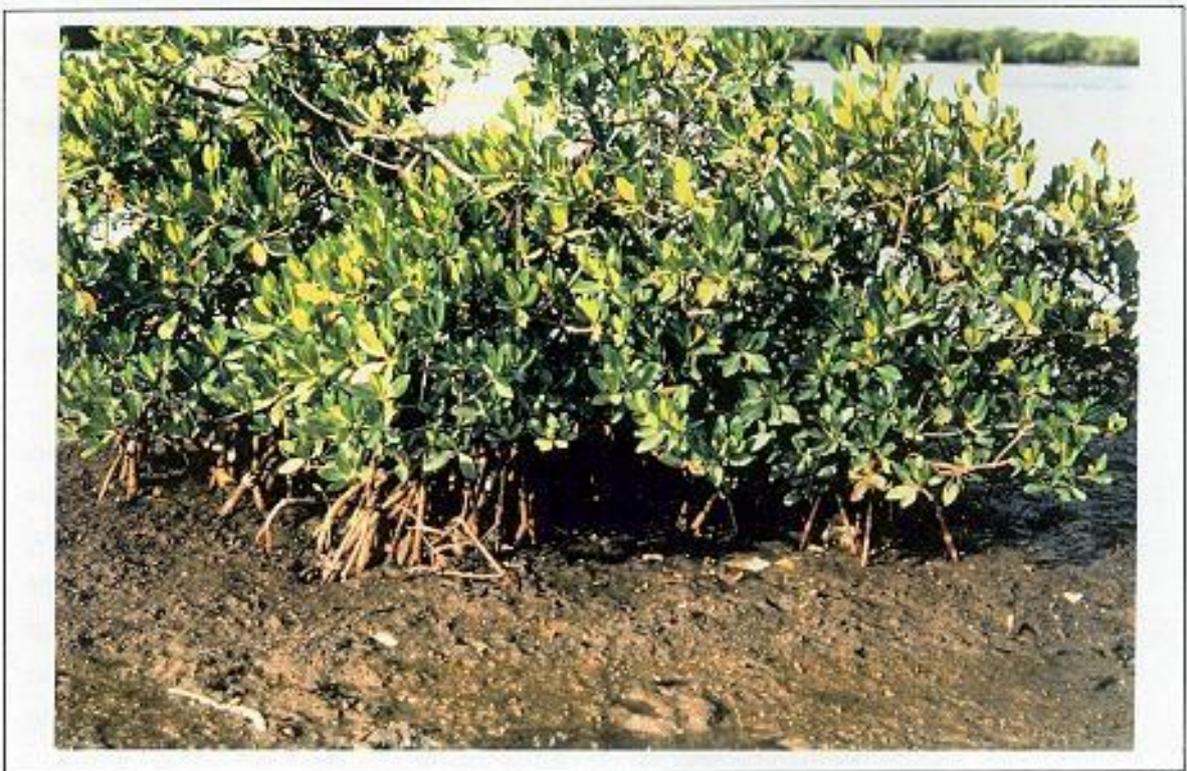
Pendant l'hivernage, un tapis d'herbe d'une hauteur négligeable s'installe. Cette strate herbacée devient, cependant, de plus en plus rare dans les zones les plus exposées à la sécheresse (édaphique par exemple) où elle est remplacée par des graminées coriaces, essentiellement constituées d'épines (le plus connu est le cramcram ou *Cenchrus biflorus*). Selon les hivernages excédentaires ou déficitaires, l'ensemble du tapis herbacé n'est pas forcément reconstitué chaque année.

Au Sud de cette région, les pluies permettent le développement d'une savane arborée. Après un parcours dans les régions septentrionales, la traversée de cette zone devient moins contraignante, plus aisée. On se sent moins étouffé, soulagé, libéré car la formation végétales donne l'impression de respirer, d'être moins asphyxiée malgré la contrainte de la longue saison sèche. Les ligneux caractéristiques de cette zone (Santang ou *Daniellia oliveri*, Ditax ou *Detarium senegalensis*, etc.) sont disposés de manière lâche, séparés par une strate arbustive ou buissonnante (dont le Ngër ou *Guiera senegalensis*). Pendant la saison des pluies, se mêle à ce dispositif une strate herbacées ou graminéenne.

Dans les régions méridionales, et plus précisément là où l'on enregistre les plus fortes valeurs de précipitation et/ou les facteurs morphopédologique sont remarquablement propices au développement d'une composition floristique dense, domine l'arbre. Pourtant, les formations végétales forestières ont également perdu de leur densité naturelle et se sont dégradées au fil des ans. En saison des pluies, le tapis herbacé est plus dense qu'ailleurs. Parmi les espèces arborées représentatives de cette région méridionale on note le palmier à huile ou *Elaeis guineensis* dont le nom local est tiir, le fromager ou *Ceiba pentandra* localement appelé bentegni.



**Photo n° 1 : Végétation sahélienne (au Sud de Saint-Louis, Grande Côte ; Sénégal)
(Rieucan, juillet 1983/INTERGEO)**



**Photo n° 2 : Végétation de mangrove (Sokone, Saloum ; Sénégal)
(Pirazzoli, décembre 1976/INTERGEO)**

À ce schéma somme toute zonal, s'ajoutent des manifestations d'azonalités ou d'intrazonalité. Hormis la perturbation caractérisée par l'existence de quelques

ligneux au sommet des dunes, l'azonalité de la flore est localisée, par endroit, en bordure de l'Atlantique.

Le Sine et le Saloum se rejoignant dans une zone maritime envahie de vasières forment un estuaire marécageux colonisé par une végétation de mangrove : type de végétation tout à fait particulier, vivant dans un milieu semi-marin, semi-continental (photo n° 2).

En Casamance, la mangrove entourée dans l'arrière-pays de quelques îlots de forêts clairsemées, avec des palmiers et un sous-bois formé par un tapis herbacé, constitue une véritable originalité. Les cuvettes plus ou moins humides de la Basse Casamance (vers Oussouye), à terre argileuse de couleur grise ou noire, constituent le bassin rizicole (culture sur les pentes des plateaux) du Sénégal mais souffrent également de la sécheresse et de divers types d'érosions (voir Deuxième Partie).

Il existe enfin des périmètres de forêts protégées dites "classées" dont l'initiative a été prise depuis 1936. À cette époque, le Sénégal est une colonie française, et rappelons que c'est en 1930 que, pour la métropole, l'Assemblée Nationale vote une loi permettant de protéger par classement les sites ayant un intérêt biologique ou paysager. C'est l'amorce d'une législation qui conduira en 1959 et 1960 à la création des parcs nationaux. L'exploitation abusive de bois et les feux de brousse avaient poussé les autorités de l'époque à prendre cette directive. Et donc, toute activité anthropique néfaste aussi bien pour la flore que pour la faune y était, par une législation particulière, strictement interdite.

Malheureusement, malgré le fait que cette législation soit encore en vigueur au Sénégal, on assiste, devant la contestation de quelques populations locales poussées par des besoins socio-économiques (exploitation agricole, bois domestiques) au "déclassement" de certaines de ces zones.

2. Adaptation à la sécheresse

Rappelons qu'au Sénégal, l'hivernage s'étend entre deux et six mois selon la latitude. Toutefois, en agroclimatologie, la notion de durée n'a pas de sens car elle ne permet pas de mesurer l'efficacité d'une saison pluviométrique. La répartition des pluies pendant l'hivernage compte plus que la durée. Pour les formations végétales, le terme d'efficacité est relayé par celui de prépondérance.

En ce qui concerne l'abondance des pluies, les régions septentrionales se voient exclues par suite de l'indigence des abats. Pourtant en intitulant cette sous partie "adaptation à la sécheresse", c'est bien à la végétation de cette région que l'on pensait, végétation de steppe à épineux particulièrement formée de jujubiers, de tamariniers, ou d'acacias. Elle est la plus exposée à l'évaporation, la plus soumise à cette lutte perpétuelle contre les difficultés imposées par la maigre disponibilité en eau.

Pour lutter contre les aléas climatiques (absence de précipitations, sécheresse de l'air, tarissement des nappes profondes...), les plantes utilisent divers moyens d'adaptation afin de survivre dans un environnement hostile. Cette recherche de solutions (parfois éphémères) dépend de chaque espèce. Elle est surtout d'ordre physiologique.

En adoptant une morphologie particulière (feuilles menues ou caducité saisonnière ; écailles ou aiguilles à la place des feuilles, etc.) et un certain comportement physiologique (dont fermeture temporaire des stomates), certains types de végétations arrivent à freiner ou à ralentir au minimum leurs fonctions vitales de transpiration et de respiration. L'hypertrophie des racines aussi bien en profondeur que sur le plan latéral, est également une méthode utilisée par certaines espèces (dont les eucalyptus), de manière à puiser au maximum l'eau.

Une autre forme d'adaptation est le xéromorphisme (feuilles microscopiques), ce qui limite la transpiration des feuilles et les dépenses d'énergies liées à l'activité chlorophyllienne. Certaines espèces d'herbes ou de graminées, pour lutter contre la sécheresse, ont des rhizomes (bulbes), c'est à dire des sortes de réservoir à eau. Certaines espèces sont parfois complètement métamorphosées mais s'adaptent parfaitement aux péripéties imposées par les aléas climatiques. Leur sobriété limite leurs besoins à un total annuel dérisoire allant de 50 à 100 mm d'eau au minimum. Il s'agit notamment du baobab ou *Adansonia digitata*, de certains *Acacia* dont *albida* ou *radiana*. Mais, la situation économique est parfois telle que les populations les endommagent pour la médecine traditionnelle (racines et écorces à vertus médicinales) et par nécessité ou par ignorance les abattent (feuilles utilisées comme fourrage pour les animaux, bois de chauffe pour les ménagères, etc.).

En bout de chaîne causale, ces déprédations accélèrent les processus d'érosion d'origines diverses. Des recherches de solution ont été entreprises à travers le développement de projets de reboisement. Ainsi, pour fixer les sols, et pour stopper la mobilité de certaines dunes, de vastes programmes de reboisement ont été élaborés. Mais ils sont difficiles à gérer et ont engendré des conséquences variables qui seront abordées, plus amplement, dans notre Seconde Partie.

III. LES REGIONS CLIMATIQUES ET L'OCCUPATION HUMAINE TRADITIONNELLE

Cette partie, purement descriptive, rappellera l'agencement des zones climatiques classiques. Six aires (fig. 25) peuvent se différencier selon les types de temps produits par les interactions entre les éléments du milieu et les conditions synoptiques d'échelle plus vastes. La mobilité des bornes climatiques régionales, constituant une des lignes directrices de notre travail, sera plus amplement abordée dans la Quatrième Partie.

1. Des régions climatiques croisant les effets de la zonalité et de l'océanité

Comme nous l'avons déjà souligné, la mousson et les lignes de grain constituent les principaux vecteurs de précipitations en Afrique de l'ouest. Sachant que la trajectoire privilégiée de ces perturbations pourvoyeuses de pluie est plutôt méridionale et que la pénétration de la mousson vers les régions septentrionales est aléatoire par suite du grand nombre de facteurs nécessaires, l'évidence d'un schéma pluviométrique dramatique s'impose dans les régions septentrionales.

Les recherches effectuées dans cette région montrent que la bande sahélienne ne cesse de s'étendre vers le Sud (Le Borgne, 1988) atteignant des latitudes jusque-là insoupçonnées. Cette réalité n'épargne pas le Sénégal où elle se manifeste par une déstabilisation des limites climatiques régionales habituellement définies. En plus de l'élargissement de la bande sahélienne vers les régions méridionales, la disposition géographique du pays, complique le schéma climatique zonal habituel. La climatologie régionale se nuance grâce au croisement des transitions du Nord-Sud et Est-Ouest. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte, disparaît l'influence maritime et donc s'affirme le caractère continental. Suivant l'axe Nord-Sud, le climat zonal sahélien bien installé au Nord, repousse de plus en plus vers le Sud la zone soudano-guinéenne, dont la superficie se réduit d'autant.

Cette extension de la zone sèche vers le Sud a des influences sur les mouvements de population. Les mouvements migratoires se sont accentués à un rythme entraînant un dépeuplement des campagnes accentuant le phénomène de macrocéphalie déjà observé dans beaucoup de capitales ouest africaines. Cette fuite massive des campagnes vers les villes a engendré d'autres problèmes encore plus difficiles à résoudre dont la mendicité, l'habitat spontané.

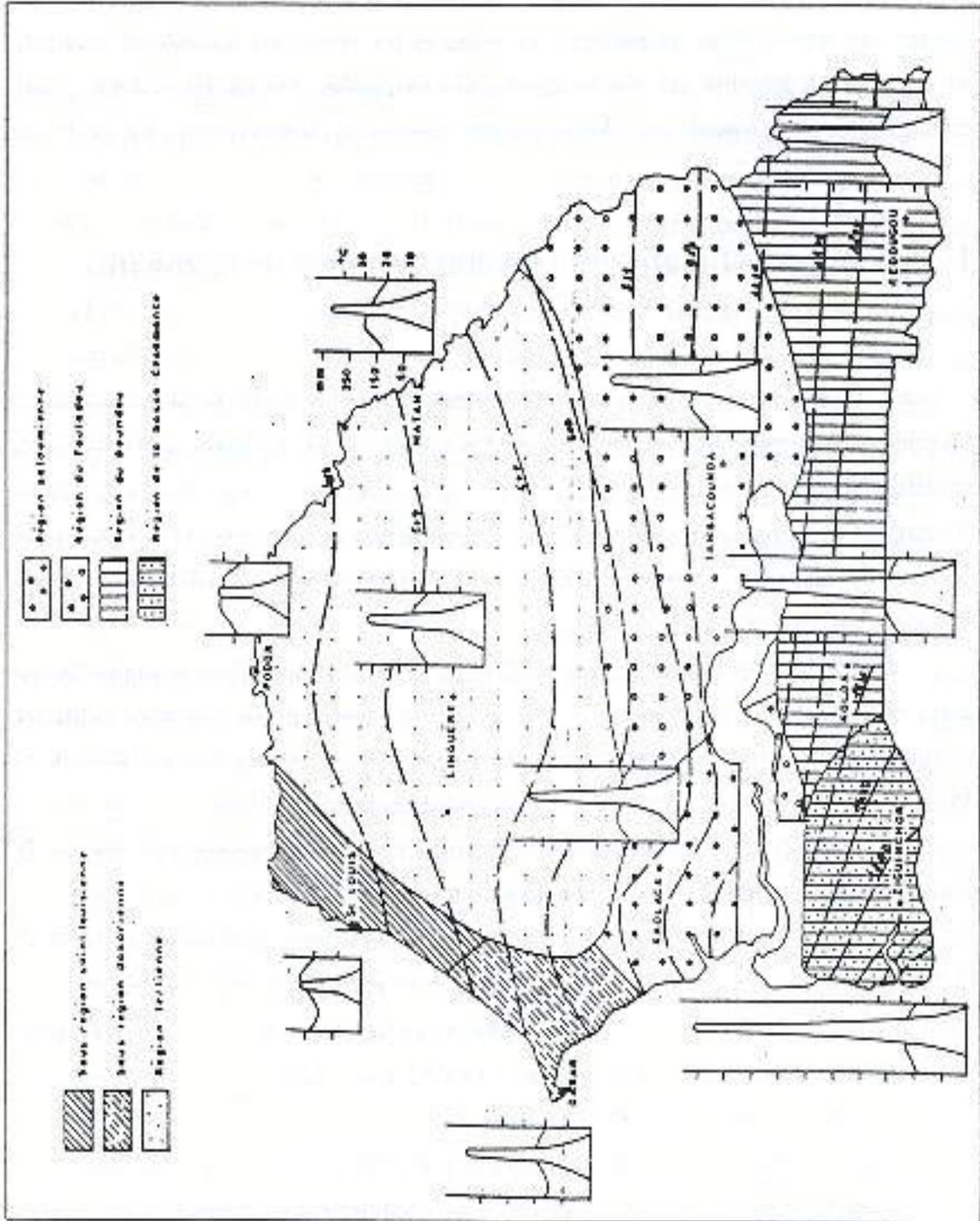


fig. 25 : Régions climatiques du Sénégal (Dubresson A. et al.)

1.1. Le Ferlo (voir fig. 25)

C'est la plus vaste des régions climatiques avec une partie septentrionale typiquement sahélienne. Même pendant l'hivernage, les manifestations pluvieuses restent sporadiques localement. Les valeurs extrêmes des paramètres aérologiques enregistrés, y constituent le "livre des records" du Sénégal : brièveté de l'hivernage, infimes totaux de précipitations annuelles < 300 mm), températures caniculaires (extrêmement élevées avoisinant parfois 45° C), évaporation pluviométrique. L'intensité des phénomènes thermiques caractérise de manière déterminante le climat de cette région. Cela peut être attribué à la présence quasi annuelle de sols dénudés, augmentant ainsi les valeurs de l'albédo, et limitant la part de l'énergie incidente utilisée pour la chaleur latente.

En plus de l'installation tardive des précipitations (par rapport au Sud-Est du pays où elles démarrent dès le mois de mai), leur cumul annuel atteint rarement 300 mm dans l'extrême Nord de cette région. À titre d'exemple pour l'année 1990, le cumul annuel des précipitations enregistrées dans la station de Podor, très représentative de cette région, est de seulement 128,1mm.

La structure topographique et la nature des sols, entraînent un type particulier de végétation très adapté au manque d'eau. Les espèces végétales très hétérogènes, sont essentiellement constituées d'une steppe de graminées à laquelle s'ajoutent des arbustes nains et/ou à épines qui perdent partiellement ou entièrement, selon le degré de sécheresse, leurs feuilles pendant la saison sèche, plus longue qu'ailleurs. Parfois localisées dans des sites sableux, ils sont constamment agressés, d'abord par les vents en saison sèche (ensablement) ensuite par le ruissellement qui pendant l'hivernage arrache les plantes les plus fragiles. La strate herbacée, essentiellement constituée de graminées ne se développe que durant l'hivernage.

Plus au Sud, la strate arbustive bien fournie, dans les dépressions, est composée de ligneux usant d'un arsenal de moyens pour, également, se protéger et s'adapter aux rudes conditions climatiques.

1.2. La Grande Côte (voir fig. 25)

Située sur la bordure océanique Nord, cette région se subdivise en deux sous-secteurs : celui de Dakar et celui de Saint-Louis. Très largement soumise à l'influence atlantique, la région de la Grande Côte s'étend en latitude de Saint-Louis au Nord de l'estuaire du Saloum. Le couvert végétal est le reflet principalement de la

pluviométrie, les espèces rencontrées sont rustiques par suite des rudes conditions climatiques.

Hormis la sensation de fraîcheur quasi permanente engendrée par la proximité océanique, cette région est très exposée à la sécheresse. Le Secteur de Saint-Louis, du fait de sa position à l'extrême Nord du pays, est directement sous l'influence des alizés issus de l'anticyclone des Açores. La saison sèche y est plus longue que partout ailleurs dans ce "pays", trop au Nord pour intéresser la pénétration de la mousson. En marge du parcours des lignes de grains les manifestations pluvieuses y sont rares. Les upwellings observés le long de la grande côte, en favorisant la stabilité des masses d'air parcourant la région concourent, également, à l'installation d'une saison plus grise que pluvieuse. Le secteur de Dakar situé plus au Sud, présente les mêmes caractéristiques avec en plus, une position latitudinale un peu plus avantageuse pour les lignes de grains (24 enregistrements en 1990 (fig. 26)) et à l'installation d'une mousson de basse couche quelque peu épaisse.

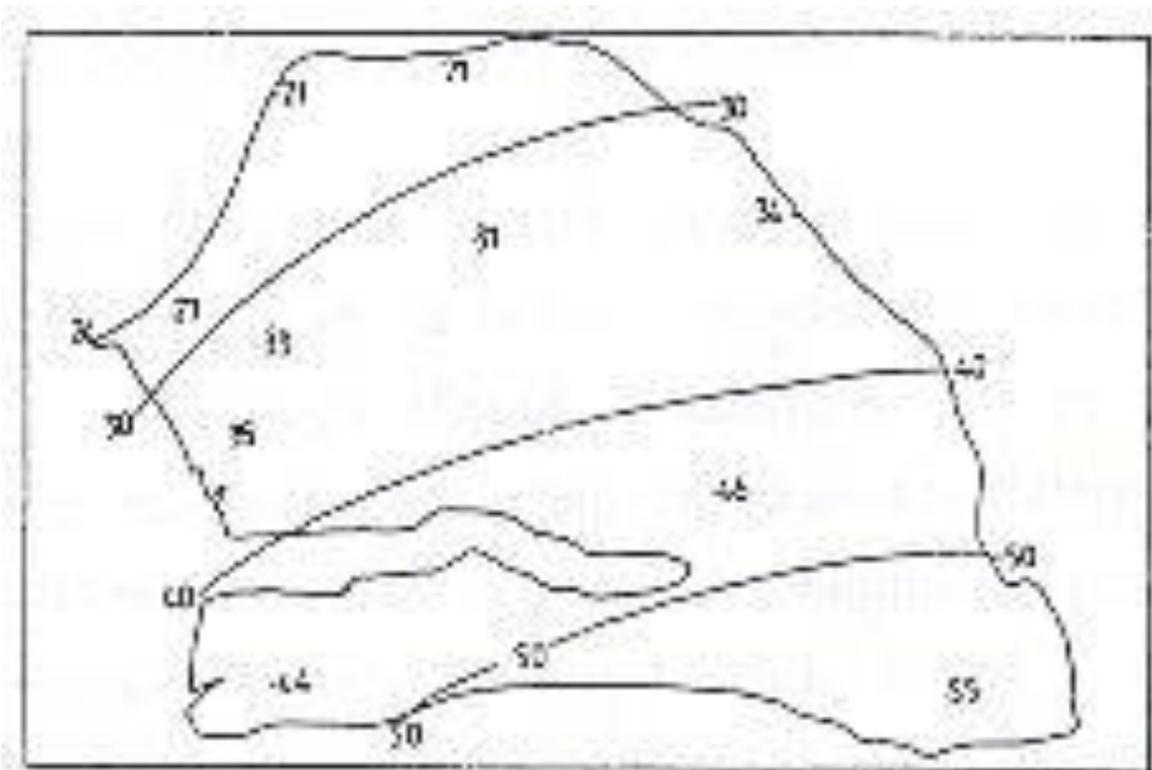


Fig. 26 : Lignes de grains enregistrées au Sénégal en 1990 (Sagna, P. 1992)

1.3. Le Fouladou (voir fig. 25 légende)

Situé au Sud-Est de la région ferlienne, le Fouladou est paradoxalement caractérisé par de fortes valeurs d'évaporation, une insuffisance quantitative et une irrégularité des précipitations. La continentalité s'affirme au détriment des influences océaniques car la région est située à l'intérieur des terres.

Les contrastes observés entre la partie Nord-Ouest et le Sud-Est sont remarquables. Au point de vue hydrographique, le Sud-Est drainé par le cours inférieur de la Gambie, bénéficie également du passage de quelques affluents du Sénégal alors que le Nord-Ouest est vide d'écoulement pérenne.

Compte tenu de la forte variabilité des précipitations, l'existence de ce réseau hydrographique et d'une topographie plus accidentée, sont très importantes pour la végétation qui exploite tout apport en eau pour se densifier (pluies orographiques par exemple dans le Sud-Est). De plus les conditions édaphiques sensiblement différentes entre les ensembles favorisent le développement des plantes dans le secteur Sud-Est.

1.4. Le Saloum (voir fig. 25)

En bordure océanique, entre le Sud de la Petite Côte et la basse Gambie, c'est la région de la culture arachidière. L'épuisement et l'appauvrissement des sols par la surexploitation de cette culture commerciale, qui se conjuguent aux rudes conditions pluviométriques, expliquent le déplacement du bassin arachidier du Centre Nord du pays vers le Saloum et de plus en plus vers le Sud-Est.

Dans les zones marécageuses des anciennes vallées du Sine et du Saloum, la végétation est de type mangrove. Ailleurs, les strates arbustives et herbacées cèdent la place à une strate arborée qui s'affirme au fur et à mesure que l'on s'avance vers le Sud. La station type de cette région est Kaolack, dont le cumul annuel des précipitations pendant la saison 1990 est de 446,8 mm avec une température moyenne de 29° C.

1.5. Le Boundou (voir fig. 25 légende)

Située au Sud-Est du Sénégal, cette région tire son originalité de sa structure morphologique. Le relief y est le plus accidenté de tout le pays. La topographie accidentée est à l'origine de l'ascendance adiabatique des masses d'air, si bien que, les premières pluies sont toujours enregistrées dans cette région. Les précipitations dominantes sont à caractère orageux (voir Premier Chapitre : zone CI) mais au cœur

de l'hivernage, les limites occidentales et méridionales sont intéressées par les pluies continues de la zone C2 (Leroux M., 1983).

Le Boundou abrite également un réseau hydrographique plutôt chevelu même si la plupart des cours d'eau ne sont que semi-permanents et ont par conséquent une activité sporadique d'hivernage. La forêt clairsemée associant une strate arbustive et une strate herbacée est le reflet des conditions morphopédologiques et pluviométriques. L'exploitation agricole type de cette région concerne une autre plante industrielle : le coton.

1.6. La Basse Casamance (voir fig. 25)

Il s'agit essentiellement de la région littorale située au Sud de la Gambie. C'est également une région d'embouchure. La Casamance, après avoir reçu différents affluents adopte une forme d'entonnoir dans sa partie avale. Peuplée de mangroves, de palétuviers, de palmiers dans les dépressions humides des zones marécageuses, cette région constitue le grand bassin rizicole du Sénégal.

Du point de vue climatique, c'est dans cette région que s'effectuent les premiers contacts entre la mousson et le continent, et les ultimes entre lignes de grains en fin de parcours et continent.

La pluviométrie s'en trouve affectée, les valeurs enregistrées y sont de loin les plus élevées du pays. La station type de cette région, est celle de Cap-Skiring, située à l'extrême Sud-Ouest du pays.

En 1990, le cumul des précipitations enregistrées dans la station de Podor (située au Nord), 129,1 mm ne représentait que le 1/10^{ème} de celui relevé à Cap-Skiring 1.234,2mm.

2. Des régions urbaines prédatrices de leur espace

La géographie est une science unique où s'imbriquent deux grands domaines plus ou moins complémentaires : l'un humain et l'autre physique. Par conséquent, toute étude géographique exhaustive d'un pays ou d'une région, implique, nécessairement, un regard sur le mode d'occupation de l'espace par la population locale, plus ou moins conditionné par le climat.

Le phénomène d'exode rural observé au Sénégal depuis quelques années est une preuve concrète de cette dépendance de l'homme aux conditions climatiques.

L'existence de deux saisons contrastées, l'une très longue et sèche et l'autre pluvieuse mais courte a toujours été un facteur de mouvement de population des campagnes vers les villes.

Pendant la saison sèche, certains paysans (seulement les hommes) effectuaient des séjours temporaires dans la capitale pour y travailler comme ouvriers dans les infrastructures portuaires ou dans les usines.

Ensuite, ces mouvements migratoires temporaires ont concerné les femmes qui, à leur tour, venaient dans la capitale pour y effectuer des travaux domestiques. Avec la persistance de la sécheresse et l'accroissement de la population, ces flux migratoires ont pris une ampleur incontrôlable entraînant des conséquences plutôt difficiles à gérer.

Au lieu de retourner pendant l'hivernage dans les campagnes et compter sur une saison des pluies hypothétique, la plupart des migrants ont préféré s'implanter dans la capitale. Ce mouvement de non-retour a bouleversé l'occupation de l'espace traditionnel entraînant un déséquilibre entre la conurbation dakaroise et les campagnes.

Le déséquilibre d'ordre économique entre la capitale et le reste du pays, bien connu dans la plupart des pays africains, est donc exacerbé par une densité de population inégale (fig. 27). On dénombre 730 000 habitants à Dakar-ville et 740 000 à Pikine contre 100 000 à Saint-Louis en 1991 (Dubresson et al., 1994). Ce schéma, plutôt bouleversant, est accentué par l'accroissement naturel de la population d'où la création de villes champignons, pour la plupart, caractérisées par un habitat spontané autour de la capitale. Aux problèmes de gestion socio-économique, s'ajoute celui du déboisement (déboiser pour s'installer, pour construire et pour cuisiner...) liée à cette macrocéphalie de la capitale.

Ce schéma urbain sombre amène à s'interroger sur l'avenir du Sénégal. Des potentialités comme la pêche, l'énergie éolienne et solaire sont cependant encore mal exploitées. Dans une perspective de décentralisation, des projets de développement ont été élaborés (fig. 28) là où les potentialités hydrologiques sont favorables, notamment dans les rivages du fleuve Sénégal et en Basse Casamance. Cela a également conduit à l'intensification du secteur primaire (notamment l'élevage) dans certaines régions bouleversant non seulement les écosystèmes naturels mais encore plus les équilibres sociaux préexistants. Les conséquences de cette réorganisation sociale seront développées plus largement dans notre Deuxième Partie.

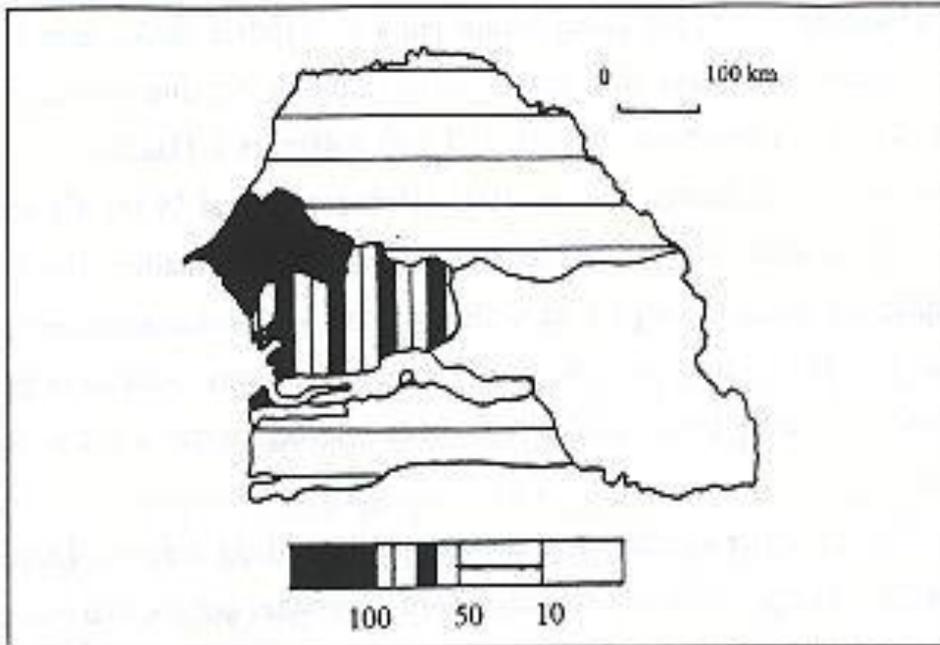


Fig. 27 : Densité de la population en 1990 (Source : Dubresson et Al., 1994)

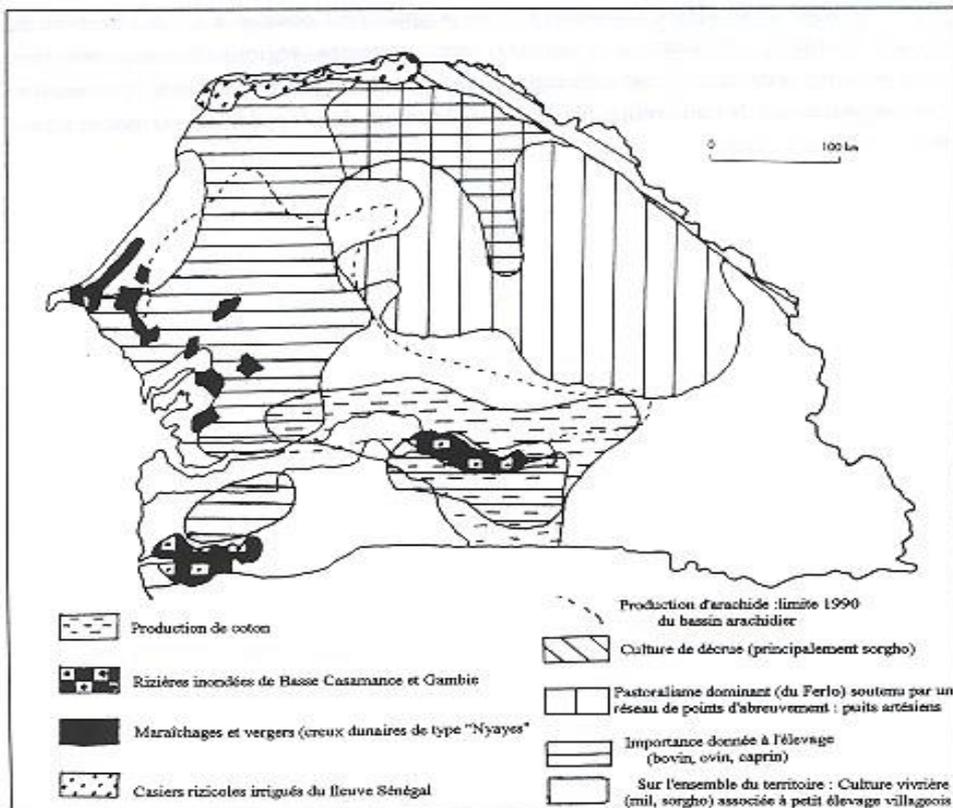


Fig. 28 : Activités régionales (Sources : Dubresson A. et al., 1994)

Conclusion partielle

Dans ce chapitre, il était question d'établir une sorte de carte 'd'identité du Sénégal' (Mbow, 1984). Cela permet non seulement d'avoir un aperçu global de notre zone d'étude mais de distinguer les caractéristiques propres à chaque entité régionale ; les particularités physico-géographiques étant les causes de cette pluralité régionale. Certaines régions, plus exposées aux aléas climatiques, se dépeuplent au profit de la capitale.

L'exode massif des populations rurales vers Dakar engendre d'autres problèmes encore plus difficiles à gérer. Par conséquent, peut-on dire que cette fuite massive vers la capitale est une solution. Pour tenter de limiter ce phénomène de macrocéphalie propre à bon nombre de pays ouest africains, donc pour lutter contre la sécheresse persistante, diverses tentatives de lutte ont été effectuées tant à l'échelle nationale qu'à l'échelle communautaire. Cette question sera largement abordée dans la partie suivante.

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

L'analyse des mécanismes du climat en Afrique de l'ouest montre comment certains facteurs comme les centres d'actions (et les flux qui en sont issus), la ZITC, le FIT, les lignes de grains..., sont étroitement liés et conditionnent un bon déroulement de l'hivernage. Une bonne saison des pluies ne se mesure pas en quantité d'eau précipitée mais en qualité quant à la distribution annuelle. Nous avons constaté qu'un bon début de saison des pluies suivi d'un climat contraignant, avec au cœur de l'hivernage des séquences sèches très longues entrave, le cours normal du cycle végétatif des plantes cultivées ou spontanées. Par ailleurs, la sécheresse, l'humidité de plus en plus réduite vers l'Est, la stabilité locale des masses d'air, ne sont pas moindres -et doivent par conséquent retenir en priorité notre attention -car ce sont des éléments qui entravent de manière déterminante le déroulement normal de la pluviogenèse.

Le contact entre deux milieux géographiques différents : proche océan et continent (particulièrement la bande côtière) a permis de différencier des échelles spatiales nuanciant la zonalité.

La disposition du plateau continental au large du Sénégal, les alizés provenant de l'anticyclone de Açores, le courant froid des Canaries sont autant de facteurs qui, en favorisant l'installation de phénomènes côtiers comme les upwellings, contribuent largement à la stabilisation des masses d'airs entravant le développement de phénomènes convectifs dans les zones concernées.

En 1985, F. Durand-Dastès établissait une distinction entre la sécheresse "météorologique", qui apparaît dès que les pluies sont inférieures à l'ETP, la sécheresse "biologique" qui se manifeste à partir du moment où les réserves en eau sont épuisées et où les plantes commencent à flétrir, et la sécheresse 'hydrologique' où le bilan négatif conduit au tarissement des nappes superficielles. Dans cette première partie de notre exposé, nous avons pu décrire le rapport étroit de cause à effet qui lie ces trois aléas climatiques. Nous constatons que les deux derniers types de sécheresse ne sont que la conséquence d'une carence pluviométrique intense et persistante.

L'état du couvert végétal dans la partie septentrionale du pays, l'inactivité de certains cours d'eau, même au cœur de l'hivernage, l'épuisement des nappes souterraines, l'érosion exacerbée du substrat pédologique par déflation éolienne (absence d'obstacles) sont autant de conséquences de l'existence d'une sécheresse

météorologique saisonnière et de la récurrence périodique d'années déficitaires. L'étude des manifestations de cet aléa et de ses impacts sur les composantes du milieu, sera développée dans la deuxième partie de notre exposé.

Sachant qu'au Sahel, la sécheresse est un aléa à causalité complexe, avec interférence de faits d'ordres physiques et d'ordre humain (Durand-Dastes F., 1985), les conjonctions d'éléments naturels et anthropiques ayant aggravé ce phénomène, les impacts des facteurs climatiques poussent vers l'aridification, malgré l'acharnement de certains scientifiques pour combattre ou du moins pour mieux gérer ce fléau. Cela fera l'objet de notre Deuxième Partie.

Il ne s'agira pas de faire une nomenclature des recherches établies dans la zone sahélienne, mais d'exposer quelques méthodes qui mériteraient soit d'être validées sur un champ d'application plus vaste, soit d'être affinées en vue d'une plus grande efficacité. Pour cela, d'autres paramètres devraient certainement être retenus. Nous en revenons ainsi à notre objectif de départ, c'est à dire rechercher au travers ses paramètres aérologiques et terrestres le ou les éléments déterminants qui permettraient d'améliorer les méthodes préexistantes d'estimation des pluies.

Quant aux solutions, nous avons évoqué comment certaines interventions humaines (grands projets à investissement financier considérable, coûteux pour les pays car ayant augmenté la dette extérieure) ont contribué à déstabiliser l'activité normale des édifices naturels. Les conséquences plus ou moins néfastes engendrées par le changement artificiel de niveau du fleuve Sénégal et du lac de Guiers, sont une preuve irréfutable d'une intervention anthropique discutable. Bien qu'à priori secondaire, cet état de fait s'inscrit dans une évolution à long terme.

Pourtant, d'autres atouts climatiques, qui restent encore au stade expérimental, pourraient être exploités. Il s'agit notamment de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire qui méritent d'être appréhendées et mieux exploitées pour répondre aux besoins qui croissent sans cesse croissants.

DEUXIEME PARTIE :
IMPACTS DE LA SÉCHERESSE ET RECHERCHES DE
SOLUTIONS

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

Les facteurs météorologiques constituent, avec le milieu géographique et atmosphérique, un seul élément, unique et global, dont l'évolution normale dépend de la cohésion d'ensemble. Cette interdépendance complexe, entre éléments de l'environnement atmosphérique et domaines géographiques, obéit à des règles physiques et naturelles, conduisant à un équilibre général. Cet équilibre, en principe, stable au sens commun du mot "nature" peut être perturbé par des changements globaux et l'action anthropique. L'homme souvent par ignorance ou nécessité, par inconscience ou indélicatesse, contribue, de manière déterminante, à la déstabilisation et à la rupture de l'équilibre précaire définissant le milieu dans lequel il évolue.

Cette partie de notre exposé revêt d'abord un caractère synthétique. Elle est également descriptive dans la mesure où, elle fait état d'un bilan et, par conséquent, est basée sur un constat. Celui-ci va essentiellement porter sur les causes anthropiques de la dégradation du milieu naturel, dans le but de montrer que, les multiples actions humaines, plus ou moins directes, contribuent à exacerber le phénomène de sécheresse observé, depuis plusieurs d'années, dans la bande sahélienne.

Avant d'aborder cette étape géographique, car au carrefour entre sociétés et espaces naturels, nous allons tenter de montrer, comment un fléau peut s'auto-entretenir et ainsi perdurer pendant plus d'une vingtaine d'années. Pour mieux comprendre l'ampleur des impacts de la sécheresse, il faut expliquer les rétroactions entre la déstabilisation de certains paramètres aérologiques et la dégradation du milieu naturel.

Le fonctionnement de certains processus physiques, essentiels au maintien du potentiel d'eau disponible, fera également l'objet d'un rappel. Il s'agit notamment de la vie des végétaux, éléments clés du bilan de l'eau via les transferts de chaleur latente. Les mécanismes de la convection "utile", qui constituent une des lignes directrices de notre étude, méritent également un développement.

Notre propos est également d'expliquer à travers les travaux effectués par divers spécialistes, notamment des climatologues, des physiciens de l'atmosphère, etc., la diversité et la complémentarité de multiples approches, afin de proposer des solutions de préventions et/ou d'adaptation à la sécheresse.

Les recherches relatives aux méthodes d'estimation, de quantification de la pluviométrie, s'ajoutent aux quelques ébauches de solutions socio-économiques entreprises par les pays concernés.

Au niveau scientifique, ces travaux s'inscrivent dans deux perspectives complémentaires. L'une, visant à mieux maîtriser la complexité des relations d'échanges et de compensations du système Terre-Océan-Atmosphères, à toutes les échelles spatio-temporelles et, pas seulement, aux échelles planétaires ou zonales. L'autre, socio-économique et locale, vise à rendre l'utilisation du potentiel d'eau existant plus efficace et ainsi, de proposer aux populations concernées des stratégies d'adaptation à la sécheresse.

Le fait que 90% de la population sahélienne vivent, directement, de ressources agricoles ou pastorales, étroitement liées à la pluviométrie, a en partie largement contribué à activer les recherches en matière de quantification des pluies. La connaissance de la genèse des pluies devrait conduire à des prévisions à caractère probabiliste permettant à chacun de prendre des risques en matière de production vivrière.

Cette motivation prévisionnelle ne semble pas inaccessible au regard du fait que, plus que la quantité, c'est le mode de distribution des précipitations dans l'année qui importe. Quantifier la pluie à partir d'éléments moteurs permettrait de, trouver le ou les paramètres inhibiteurs et peut-être un jour, maîtriser ces mécanismes.

Comprendre les modalités d'évolution des processus pluviométriques permettrait, d'expérimenter des espèces végétales capables d'adapter le calendrier végétatif aux différents rythmes des précipitations. Cet acharnement à vouloir rentabiliser la quantité d'eau disponible, en fonction des besoins locaux, se reflète même sur les modalités des pas de temps d'expérimentations. La décade, échelle agroclimatologique, par excellence, est adoptée pour la plupart des méthodes d'estimation des pluies.

Ainsi, la seconde phase de notre exposé va consister à décrire quelques méthodes d'estimation des pluies appliquées dans la zone sahélienne. Certaines de ces méthodes, développées aux CMS de Lannion, ne feront pas l'objet d'un rappel dans cette partie puisqu'elles nous ont servi de références. Nous les avons testées et appliquées à nos recherches, en vue de comparaison avec les résultats finaux issus de notre étude. L'approche comparative sera largement décrite dans les parties suivantes.

CHAPITRE III :

DESTABILISATION DE L'ÉQUILIBRE ACTUEL : BILAN ET CONSÉQUENCES

La première partie de ce chapitre a pour objectif, de décrire et, de rappeler quelques relations étroites du système Terre-Océan-Atmosphère, afin de souligner les éléments de déstabilisation qui peuvent intervenir.

Mesurer le rôle fondamental de la biosphère dans le maintien de l'équilibre naturel est un thème de recherche fréquent à grande échelle, mais beaucoup moins à l'échelle globale. Cette distorsion d'approche entre physicien et naturalistes explique la difficulté d'emboîtement des résultats nécessaires aux applications potentielles.

Appréhender les précipitations à travers les modalités de leurs manifestations et leur distribution spatiale, constitue l'un des éléments essentiels de notre étude. Pour cela, il s'avère indispensable de rappeler les mécanismes fondamentaux des phénomènes convectifs, régissant la pluie.

Ainsi, avant d'expliquer les rapports entre l'homme, le climat et l'environnement naturel dans lequel il évolue, sera proposé un bref aperçu des mécanismes d'échanges entre les différentes interfaces.

I. RAPPEL DE QUELQUES PROCESSUS FONDAMENTAUX

1. Echanges Sol-Plante-Atmosphère

L'équilibre de la biosphère exige des échanges aussi bien avec l'environnement atmosphérique qu'avec le support terrestre. Ces échanges s'effectuent, d'une part, à travers une absorption d'énergie au niveau du support terrestre (sels minéraux, eau, humus, etc.) et au niveau de la radiation solaire (oxygène, carbone) et, d'autre part, à travers les réactions biologiques liées au développement de la plante. Schématiquement, le rôle de la biosphère, capitale pour le maintien des éléments essentiels à l'équilibre de l'environnement atmosphérique et terrestre, peut être résumé par deux processus physico-chimiques complémentaires. Il s'agit d'une part, de la libération d'eau, de gaz carbonique, d'oxygène, dans l'atmosphère par l'intermédiaire des processus physiologiques des végétaux (photosynthèse, respiration et transpiration) et, d'autre part, de la fertilisation du support terrestre par la production de matière organique dont l'humus.

Les divers processus d'assimilation, de transformation, d'absorption et de libération de constituants atmosphériques (gaz carbonique, eau, oxygène, etc.) s'effectuent généralement par l'intermédiaire des stomates (sortes de pores microscopiques existant sur les feuilles). Ces réactions physico-chimiques sont accentuées ou entravées par la présence du soleil qui, par conséquent, joue un rôle déterminant dans les échanges gazeux entre les végétaux et l'atmosphère.

La quasi-totalité de l'énergie radiative, absorbée par les végétaux, est transformée en chaleur. La moitié de cette énergie thermique est stockée sous forme de réserve ou immédiatement transformée pour les besoins d'autoentretien des plantes. Cela s'effectue par les mécanismes de la respiration qui assurent le transfert du surplus d'eau de la terre vers l'atmosphère. L'autre moitié est libérée dans l'atmosphère par rayonnement thermique et par transpiration à travers l'évaporation.

Paradoxalement, la réaction photosynthétique qui est une des caractéristiques principales des plantes utilise seulement 1% de l'énergie solaire (Diédhiou, 1992). En effet, à partir de l'énergie lumineuse, absorbée par certains pigments comme la chlorophylle, de l'eau et du gaz carbonique, une réaction photochimique constitue à fabriquer de la matière organique à l'intérieur de certaines cellules des plantes.

Ces processus physico-chimiques, indispensables au maintien de l'équilibre thermique et physiologique de la plante, témoignent de son importance et du rôle d'intermédiaire qu'elle joue dans les échanges (rejet et/ou absorption de gaz, d'éléments minéraux) Sol-Plante-Atmosphère. L'eau évaporée définit la chaleur latente atmosphérique.

En Afrique de l'Ouest, le rôle de l'énergie issue de la biosphère, se reflète dans la charge en humidité de la mousson lors de son passage au-dessus de la forêt équatoriale (Chamard, 1986)

2. Activités physiologiques de la biosphère

Il existe une étroite relation entre Terre-Plante-Atmosphère. Et c'est ce rapport déterminant qui permet aux végétaux d'assurer leurs fonctions vitales à savoir la respiration, la transpiration, la photosynthèse (fixation du carbone).

Nous allons, à travers l'action des paramètres climatiques, sur la vie des plantes et, la réaction de ces derniers, dans le maintien de l'équilibre naturel, expliquer les multiples fonctions d'interdépendances entre ces différents éléments.

2.1. La photosynthèse

La photosynthèse est une réaction chimique fondamentale à la vie des végétaux. Les plantes puisent dans l'atmosphère le carbone indispensable pour leur formation, leur nourriture et l'entretien de leurs tissus. La fixation du carbone dans l'atmosphère s'effectue par l'intermédiaire des stomates. Ce sont également ces derniers qui assurent la synthèse chlorophyllienne en faisant appel à la lumière solaire. Le soleil à travers les rayons lumineux, fournit l'énergie nécessaire pour la réalisation de cette réaction chimique.

Ce processus exige également une certaine température avec, cependant, un optimum pour chaque type de plante. On note dans la partie septentrionale du Sénégal, certaines espèces (voir photo n° 1, première partie) capables de s'adapter à tous les excès de températures observés dans ces régions. Cela leur permet d'effectuer, avec un minimum d'énergie, les réactions photosynthétiques en adaptant leur température intérieure à celle du milieu ambiant.

2.2. La respiration

Comme chez les êtres humains, la respiration est une fonction capitale chez les végétaux. Il s'agit chez ces derniers, d'une absorption d'oxygène et, d'un rejet de gaz carbonique, en l'absence de soleil.

La respiration des plantes, qui s'effectue de manière continue, est largement fonction de l'état de l'atmosphère. Le rythme de ce processus physiologique s'accroît selon l'intensité d'un paramètre: la température. Ainsi, si la température est trop élevée pour la plante, elle perd plus de carbone par respiration qu'elle n'en gagne par photosynthèse. Cette activité physiologique dépend, toutefois, de chaque plante et certaines d'entre elles sont capables de la rythmer (réduire ou accentuer au maximum) afin de s'adapter aux conditions immédiates de leur environnement.

2.3. La transpiration

Ce phénomène physiologique consiste à transformer l'eau liquide en vapeur d'eau. Son intensité est également liée à celui de la température de l'air. Dans une moindre proportion, ce phénomène est activé par d'autres facteurs dont la force du vent (activité ralentie par vent calme et accélérée par période de turbulence), le degré hygrométrique de l'air (ralentissement en présence d'air saturé et intensification en présence d'air sec). L'évaporation et la lumière solaire qui commandent directement l'ouverture des

stomates, à travers lesquelles s'effectue ce phénomène, jouent également un rôle déterminant dans le déroulement de ce phénomène physiologique.

Tout comme les autres processus, la transpiration des plantes s'effectue encore par l'intermédiaire des stomates. Ces pores constituent par conséquent une source potentielle de vapeur d'eau.

La perte en eau des plantes est doublement proportionnelle à la température de l'air et la vitesse du vent. Ces facteurs thermodynamiques, par leur intensité, contribuent à la libération de chaleur latente dans l'atmosphère en créant des conditions favorables aux phénomènes évaporatoires.

L'humidité relative constitue, en revanche, un facteur inversement proportionnel à la transpiration. Cela qui fait que cette fonction est nulle quand l'air est saturé, alors que dans certaines régions de la bande sahélienne, où pendant la quasi-totalité de l'année l'atmosphère est sèche, la transpiration prend des proportions considérables. Comme l'air est très sec, les températures élevées, la déperdition par évapotranspiration s'effectue de manière immédiate et permanente.

Ainsi, on peut dire que la transpiration, qui permet la libération de vapeur d'eau dans l'atmosphère, est également une fonction biologique qui dépend étroitement du rythme d'évolution des paramètres atmosphériques. L'action combinée des facteurs aérologiques et du substratum, sur lequel reposent les végétaux, va être traitée dans la partie suivante.

2.4. Rôle moteur des paramètres étudiés sur la vie des végétaux

Comme nous l'avons montré plus haut, les systèmes foliaire et racinaire définissent l'importance des échanges énergétiques entre biosphère, support terrestre et ambiance atmosphérique. Le rythme d'évolution (ouverture, fermeture, porosité, etc.) de ces éléments intermédiaires est cependant lié à l'environnement dans lequel ils évoluent. Cela qui fait intervenir le type de climat, lui-même déterminant pour les types de sols sur lesquels reposent les végétaux. De l'environnement climatique, élément essentiel du bilan de l'eau, dépendent la distribution géographique des couverts végétaux et vice versa. Partant de cette relation d'interdépendance, on peut dire que les paramètres aérologiques, vecteurs du climat, agissent de manière plus ou moins directe sur la vie et l'évolution des plantes.

Dans la bande sahélienne, cette relation entre paramètres atmosphériques et végétation revêt un caractère particulier. Les végétaux sont soumis à une lutte perpétuelle afin de s'adapter aux conditions imposées par l'environnement climatique sec. Toutefois, chaque type de plante a des capacités d'adaptation dont dépend sa survie.

Aussi, certains facteurs climatiques, indispensables quant au bon déroulement des processus physiologiques de la biosphère, ne reflètent pas ce caractère inhibiteur mais ont, au contraire, un rôle bénéfique pour l'équilibre des végétaux.

Toujours est-il que les relations de cause à effet, entre biosphère et environnement climatique, reposent sur des échanges plus ou moins directs, accélérés, ralentis ou inhibés par l'action des facteurs atmosphériques.

- Les facteurs thermiques comme la température ont un double rôle sur la vie des plantes : tantôt un facteur vital pour l'accomplissement des fonctions physiologiques de la végétation, tantôt un facteur limitant. L'action combinée de la température, qui conditionne l'ouverture des stomates et, de l'évaporation favorise indirectement le recyclage de l'eau issue des plantes par transpiration.

Si la température est trop élevée pour les végétaux, ils perdent plus de carbone par respiration qu'ils n'en gagnent par photosynthèse. C'est notamment le cas dans les régions septentrionales où, les plantes utilisent divers moyens pour réduire, au minimum, leurs réactions biologiques afin de mieux s'adapter aux conditions climatiques rigoureuses, d'où leur adaptation morphologique. Il s'agit, généralement, d'arbustes nains ou à épines, constitués de petites touffes (feuilles caduques ou microscopiques pouvant s'enrouler pour ralentir la transpiration), ou d'arbustes développant en profondeur et surtout en largeur la ramification de leur système racinaire (racines pouvant atteindre en profondeur la nappe phréatique, ou s'élargissant à fleur du sol pour occuper le maximum d'espace).

Ce type de peuplement coriace peut également être constitué de microorganismes (notamment certaines espèces d'acacia) capables d'utiliser tous les moyens physiologiques pour s'adapter, au point de coloniser tout une aire au détriment d'autres espèces qui, à force de perdre leur eau sans pouvoir la renouveler flétrissent et finissent par mourir. La prolifération de certains végétaux colonisateurs s'effectue, parfois, par sécrétion d'acides nocifs aux espèces environnantes.

- Le rôle des précipitations dans la vie et l'évolution des plantes s'effectue de deux manières. D'abord elles remplissent par infiltration les nappes souterraines que les racines de certaines plantes peuvent atteindre. Par la morphologie de leurs racines, la plupart des végétaux se nourrissent dans le sol en puisant en profondeur l'eau des nappes souterraines. On peut par conséquent affirmer que, la quasi-totalité de l'eau utilisée par les plantes, pour assurer leurs fonctions vitales, provient du sol. De plus, les précipitations interviennent indirectement sur la vie des végétaux par l'intermédiaire d'autres facteurs dont l'humidité (vapeur d'eau atmosphérique), l'évaporation, l'infiltration, etc.

- Le vent à également une double action sur la vie des plantes. Il peut être un facteur bénéfique. Car il est capable de transporter certaines graines dans des zones allogènes et, par conséquent, favoriser l'extension d'espèces végétales d'une région à l'autre. Il peut également entraîner des conséquences surprenantes. Aussi, en accélérant les processus d'évaporation, le vent agit indirectement sur les activités physiologiques de la biosphère, notamment, la transpiration.

- Nous avons évoqué l'importance du système racinaire dans les échanges entre végétation et environnements atmosphérique et terrestre. De la morphologie des végétaux, et par conséquent des racines, dépendent, les échanges entre les plantes et le support sur lequel elles reposent, ce qui fait directement intervenir les facteurs pédologiques qui méritent également d'être soulignés.

Le sol, en tant que substrat sur lequel reposent les plantes et leurs racines joue un rôle primordial dans la vie et l'équilibre de la végétation. Selon sa composition chimique, sa porosité, sa capacité d'échange, il constitue une source d'alimentation en eau, en fer, en sel minéraux pour les végétaux.

À part le carbone fixé dans l'air, c'est le support terrestre qui fournit tous les éléments nutritifs dont les plantes ont besoin. Ces échanges entre le support pédologique et la plante s'effectuent par l'intermédiaire des racines qui fixent directement du sol les sels minéraux, le fer, les oligo-éléments.

En retour, la végétation concourt au maintien de l'équilibre naturel des sols. La litière végétale, décomposée sous l'effet de la température par les micro-organismes (dont les bactéries, les champignons, etc.), fournit l'humus qui est un fertilisant naturel pour les sols. On peut, par conséquent, affirmer que ce sont deux éléments étroitement liés qui s'entretiennent mutuellement.

Cela est confirmé au niveau de certaines formations végétales qui ne sont, en quelque sorte, que le reflet du type de sol sur lequel elles reposent. Les échanges entre ces deux éléments sont, par conséquent, indispensables au maintien de l'équilibre naturel avec comme intermédiaire entre le support terrestre et l'atmosphère les végétaux. De là découlent tous les dangers d'érosion des sols.

- Il est également important de rappeler, dans les types d'échanges pouvant concerner biosphère et environnement géographique et atmosphérique, le rôle du réseau hydrographique qui, par sa densité et sa vitalité conditionne le maintien des nappes souterraines. Il constitue également une source potentielle de vapeur d'eau pour l'évaporation et donc influence directement le degré hygrométrique de l'air, condition des réactions physiologiques des végétaux.

- De même, le soleil agit plus ou moins directement dans ces échanges énergétiques. À travers le rayonnement lumineux, il joue un rôle primordial dans la vie des plantes. En leur permettant d'effectuer les processus photosynthétiques, il agit sur leur croissance, leur germination, et sur leur physionomie notamment sur l'aspect des feuilles. Cela qui n'est pas sans conséquence sur la morphologie des stomates, intermédiaires fondamentaux, dont l'activité commande les échanges entre biosphère et environnement atmosphérique.

Ce bref rappel des activités physiologiques de la biosphère permet de comprendre le rôle déterminant des paramètres atmosphériques dans les échanges Sol-Plante-Atmosphère, ce qui devrait permettre, par la suite, d'effectuer une sorte de bilan global, afin de distinguer, géographiquement, les zones à potentialités énergétiques déficitaires des zones sources de chaleurs sensibles. Cela d'autant que, dans les régions sèches, la végétation est perpétuellement soumise à l'action des facteurs climatiques, entravant plus les processus physiologiques libérateurs d'énergie cinétique qu'ils ne les favorisent.

Même si les 9 millions de km² (dont 3,5 millions de km² : cuvette amazonienne ; 1 million de km² : cuvette congolaise ; 1,2 millions de km² : archipel de l'Asie du Sud-Est) de forêt denses humides, jouent un rôle encore peu connu sur les grands équilibres de notre planète (Achard et al., 1990), la zonation ne doit pas amener à envisager des évolutions climatiques distincts entre milieux secs et humides. L'atmosphère est constituée, d'un seul tenant, et il existe des phénomènes de compensations qui permettent par échanges énergétique de maintenir une relative

stabilité “naturelle”. Ce transfert d'énergie cinétique matérialisé par les systèmes convectifs, s'effectuent par l'intermédiaire des flux atmosphériques.

3. Les mécanismes de la convection

Au Sénégal, la quantité de vapeur d'eau atmosphérique provient, comme nous l'avons expliqué dans notre première partie, de sources allogènes. Véhiculé par les flux aériens, le potentiel d'eau disponible dans l'atmosphère est issu soit des masses océaniques (indien, par l'intermédiaire du JTE et atlantique, transporté par la mousson) soit de la forêt équatoriale ou tropicale humide de l'Afrique.

Cette eau atmosphérique, sous forme de vapeur, est obtenue par le biais des phénomènes évaporatoires, eux-mêmes conditionnés, par le degré de siccité et la température de l'air. Le passage des masses d'air sursaturées à la formation des nuages se fait cependant en plusieurs étapes et nécessite des conditions atmosphériques et thermodynamiques favorables à une ascension : température et pression atmosphérique suffisamment propices pour provoquer et maintenir une instabilité indispensable à la détente des masses d'air.

Les masses d'air sursaturées pris dans ce mouvement d'instabilité atmosphérique, se refroidissent au fur et à mesure que s'effectue leur ascendance.

L'existence de fines particules de poussières dans l'atmosphère facilite la condensation de la vapeur d'eau autour de ces noyaux, accélérant ainsi les processus d'agglomérations des molécules d'eau.

Au Sénégal, comme partout dans la bande sahélienne, les noyaux de condensation sont véhiculés par le vent, qui en transportant des poussières d'origine saharienne, contribue indirectement au développement des processus de condensations de la vapeur d'eau atmosphérique. Ce flux atmosphérique fournit les particules indispensables à la réalisation des processus de convection.

Autour de ces noyaux, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes dont le diamètre augmente avec l'ascendance et l'abaissement des températures. Le refroidissement dû à l'altitude réduit la vitesse de déplacement des molécules d'eau qui tendent de plus en plus à s'agglomérer et à se densifier.

À force de se refroidir, ces agrégats finissent par former des cristaux de glace de tailles et de densités variables, selon les conditions atmosphériques environnantes

qui conditionnent le degré de turbulence du mouvement ascendant. En continuant de s'agglomérer, les cristaux de glace ainsi formés, grossissent de plus en plus et se densifient. À ce stade de leur évolution, il suffit d'une collision entre eux, ou que, des gouttes en surfusion se mêlent à ces amas de glaces denses et lourds pour entraîner une chute hors du courant ascendant. Se déclenche alors le processus de précipitation qui est fonction du type de nuage vecteur du phénomène.

De la taille, de la hauteur et de l'organisation du système nuageux dépendent la qualité et la quantité d'eau précipitée. La morphologie des nuages (Cirrifformes : étage supérieur, Stratiformes : étage moyen, Cumuliformes : fort développement vertical) est variable en fonction de leur altitude (déterminante pour la température), de leur densité (épaisseur) et de leur degré de maturité (compacité des molécules).

Le degré hygrométrique de l'air, tout comme la température de l'atmosphère traversée par les cristaux de glace en chute, sont déterminants quant à la forme des manifestations pluvieuses.

La pluie peut atteindre le sol sous différentes formes. Elle peut également, avant d'atteindre le sol être évaporée si l'environnement traversée est chaud et très sec.

La fréquence de cette situation paradoxale est notamment observée dans la région de Saint-Louis. Dans cette partie septentrionale du Sénégal, les conditions liées aux mécanismes du développement des systèmes convectifs semblent a priori présentes (humidité relative élevée : proche Atlantique; fréquence de noyaux de condensation dans l'atmosphère...).

Cependant, l'intensité des facteurs thermodynamiques, notamment les fortes valeurs de températures liées à la radiation solaire (sols nus) et la force du vent (plus élevée que partout ailleurs en début d'hivernage), en contribuant par le biais des phénomènes évaporatoires au maintien d'une atmosphère sèche, entravent l'aboutissement des processus pluvio-gènes. L'eau précipitée, traversant une atmosphère chaude et sèche est évaporée avant d'atteindre les basses couches.

Cette thèse, à priori bien fondée et largement développée depuis quelques années (Savané et al., 1989) mérite cependant d'être appréhendée de manière plus objective. Cela d'autant plus que l'existence d'outils modernes (répétitivité et précision des images satellitaires, systèmes radar) permet un suivi opérationnel des systèmes convectifs depuis leur naissance jusqu'à leur complète dissipation.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons expliqué le rôle d'intermédiaire que joue la biosphère dans les échanges entre milieu géographique et environnement atmosphérique. La végétation a une influence considérable sur la relation existant entre les différents éléments du bilan de l'eau. Et Comprendre les processus physiologiques des plantes permet de saisir les modifications affectant la couverture végétale en milieu sahélien. Cela d'autant plus que les conditions atmosphériques favorables à la réalisation de ces processus physico-chimiques sont elles-mêmes perturbées.

Aussi, en rappelant les mécanismes de la convection et du déclenchement des précipitations, nous constatons qu'il y a une quantité non négligeable de facteurs qui entrent en action. Il s'agit, notamment, de l'évaporation (qui fournit la quantité d'eau disponible dans l'atmosphère), du taux d'humidité de l'air (qui a un double rôle : conditionne la sursaturation de l'air mais également la forme et la quantité d'eau précipitée), des conditions thermodynamiques (qui favorisent ou bloquent ces phénomènes précités et dont dépendent l'évolution et l'organisation des nuages).

Le rappel de ces processus physico-chimiques montre la relation d'interdépendance qui existe entre les différents paramètres aérologiques et terrestres : la végétation qui contribue au maintien de chaleur latente dans l'atmosphère est en conséquence favorable au développement des systèmes convectifs.

L'absence d'un seul maillon entraîne la rupture de l'équilibre naturel général, conduisant à des phénomènes spectaculaires, avec des conséquences multiples. Dans les pays sahéliens, ce déséquilibre caractérisé par la sécheresse persistante se reflète à travers la déstabilisation des processus des précipitations.

L'objet principal du rappel de ces processus physico-dynamiques était d'aider à la compréhension des relations atmosphérique/substrat (végétation et sol).

Dans la suite de l'exposé, nous montrerons, à travers les impacts de la sécheresse sur le milieu mais aussi à travers l'action de l'homme sur l'environnement, comment les facteurs fondamentaux, indispensables au déroulement des processus physico-dynamiques précités sont déséquilibrés. Il ne s'agira pas d'établir une sorte de bilan exhaustif, mais seulement, de retracer les grandes lignes qui vont, par la suite, permettre de comprendre l'acharnement de tous ceux qui se sentent concernés afin de contrôler et/ou surmonter ce fléau.

II. IMPACTS DE LA SÉCHERESSE SUR LE MILIEU

1. La déflation éolienne et la salinisation

Des études récentes ont montré une certaine augmentation de la force des vents alizés provenant de l'anticyclone des Açores pendant la saison des pluies et même au cœur de l'hivernage (Sagna P., 1992), entravant les processus de remontée du FIT et la pénétration de la mousson. Ce phénomène est lié au dynamisme de ce centre d'action pendant cette période de l'année, repoussant avec vigueur les flux injectés par son homologue de Sainte-Hélène.

Cette accélération constatée des vitesses de vents n'est pas sans conséquences notamment de l'intensification des courants côtiers (Roy, C. 1989) et, par conséquent, des mécanismes liés aux mouvements de la masse d'eau. Ces phénomènes favorables à l'installation des upwellings entraînent la stabilisation des masses d'air circulant dans les basses couches et donc inhibent les processus de convection.

De même, les vents, en activant de manière indirecte les mouvements ondulatoires de la mer et, par conséquent, les phénomènes de surcote qui peuvent se cumuler avec les marées biquotidiennes, exacerbent la submersion. Cela d'autant plus que, la pénétration de l'eau de mer est facilitée par la sécheresse persistante et ses conséquences : tarissement des fleuves, nappes superficielles pas rechargées, etc. Ce phénomène de submersion est constaté dans les cours inférieurs des fleuves côtiers, victimes d'une salinisation intense.

Une étude (Mougenot, B. et al., 1990) basée sur le suivi par imagerie Spot (multidates), et la cartographie de l'état de surface à partir des luminances, a mis en évidence une augmentation de la salinité des nappes et des sols du fleuve Casamance, de deux à trois fois plus élevée que celle de l'eau de mer, une acidification des sols de mangrove et de certaines terrasses. Ce phénomène désastreux se traduit par une disparition partielle de la végétation à l'embouchure et une disparition totale à amont.

La salinisation des sols est observée jusque dans certains cours moyens de certaines vallées fluviales. Pour le cas du fleuve Sénégal, les conséquences de la pénétration de la langue salée ont été observées à plus de 450 km de l'embouchure (Gac J.Y., 1988).

Aussi, les flux aériens, en accentuant les phénomènes évaporatoires (notamment à l'intérieur des terres où le degré hygrométrique de l'air est très faible) contribuent à l'assèchement des sols et à la stagnation de sels en surface. La conséquence directe de

ce phénomène se manifeste par une formation de fines croûtes de sel recouvrant les sols.

L'installation de ces couches de sel en surface (Photo n° 1) modifie d'une part la texture et la structure originelle des sols et d'autre part influence directement les rayonnements terrestres et solaires.

La forte insolation (inclinaison directe des rayons solaires dans ces latitudes), la nudité (régions plus ou moins dépourvues de végétations) et l'hypersalinisation des sols augmentent les valeurs d'albédo. D'où l'intensification des conditions thermiques favorisant la présence d'une atmosphère sèche en permanence. Cette siccité de l'air en présence de fortes valeurs de températures accentue les phénomènes évaporatoires, ce qui ne fait qu'autoentretenir le phénomène.

Les vents, en agissant sur les mouvements ondulatoires des masses d'eau océanique contribue également de manière indirecte à activer les phénomènes d'érosion et d'éboulement observés sur les côtes à falaises de la presqu'île du Cap-Vert.

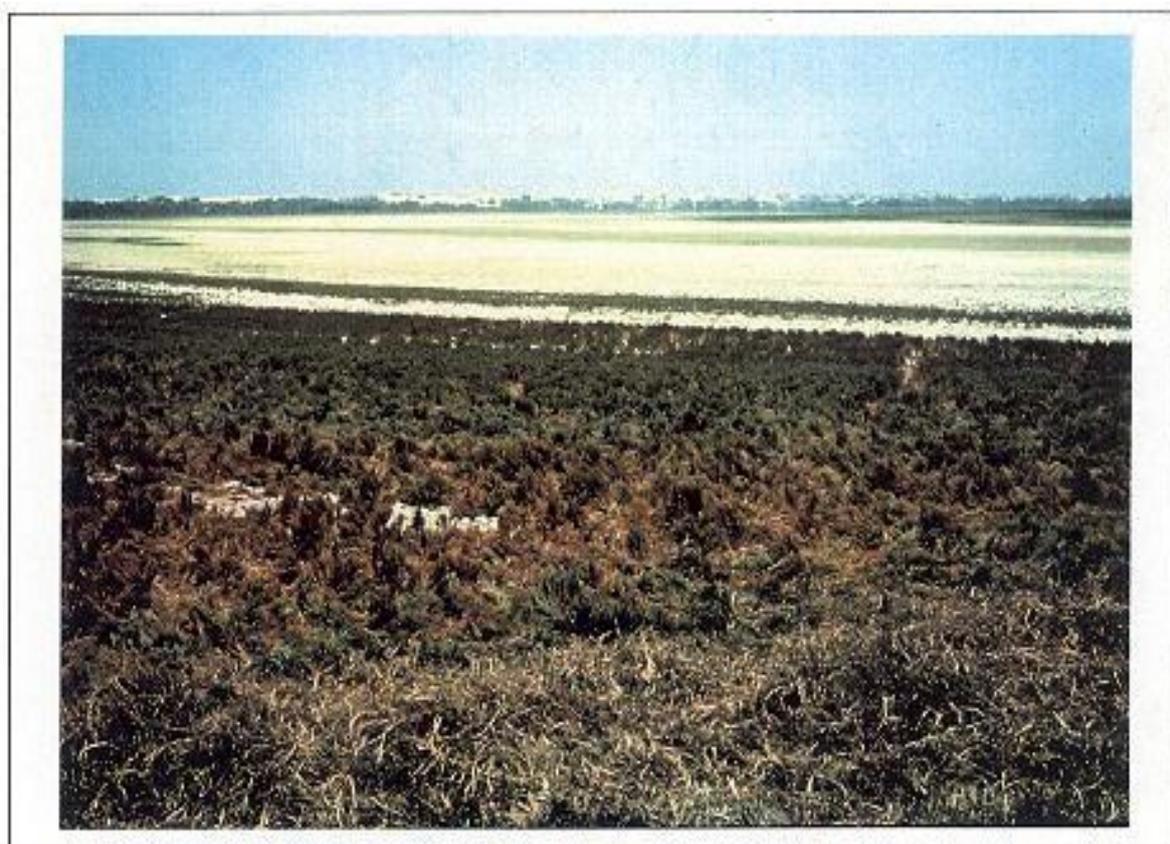


Photo n° 1 : Plaque de sel (Kaolack ; Saloum, Sénégal) (Mahé, 1986/INTERGEO)

La force du vent est importante, surtout dans les régions septentrionales (voir : Quatrième Partie). Cela notamment dans le Ferlo où l'air est sec en permanence et où les phénomènes évaporatoires accroissent de manière considérable (voir Quatrième Partie). Cela se traduit par une perte en eau, un dessèchement et un flétrissement des rares plantes existantes.

Les espèces qui ne sont pas capables de restreindre leurs fonctions physiologiques afin de s'adapter à cet environnement hostile sont les plus concernées. D'où, l'existence d'une végétation particulièrement coriace dans les régions exposées à ce fléau.

Sur le substratum terrestre, l'écoulement de l'air est de plus en plus accéléré par suite par l'absence d'écran. Cette fluidité est exacerbée par l'absence ou la faiblesse de la densité du couvert végétal ; ce qui se traduit par un ensablement des arbustes et parfois même par un déchaussement pouvant aller jusqu'au déracinement.

Cette fluidité des courants de surface est également facilitée par la topographie très plane, n'offrant que de faibles obstacles à la propagation du vent.

Cette mobilité accrue des masses d'air en surface entraîne, en présence de températures intenses, des phénomènes de turbulences contribuant largement à l'érosion et au déplacement de fines particules de sable ; ce qui, par conséquent, contribue à la destruction des principaux éléments meubles du sol. Aussi, comme nous l'avons déjà évoqué, le moindre obstacle à ces transferts de particules fines favorise la création de dunes qui sont en permanence réalimentées et/ou déplacées.

L'alimentation par ensablement concerne, d'une part, les dunes originelles préexistantes, dont l'installation est liée à une structure morphologique ancienne, et d'autre part, les dunes vives ayant une origine récente et résultant de dépôts de sables éoliens autour d'obstacles (photo n° 2) : arbustes, buissons (Courel, 1984).



**Photo n° 2 : Détail de végétation dans les dunes (Langue de Barbarie, Grande Côte, Sénégal)
(Pirazzoli, décembre 1976/INTERGEO)**

Aussi, dans la plupart des régions côtières (Dakar par exemple), l'ensablement par voie éolienne reste un phénomène bien connu, qui touche directement la végétation des sites urbains, mais également certaines habitations et infrastructures urbaines (essentiellement les routes).

Dans les basses couches de l'atmosphère, la recrudescence des flux d'alizés combinée à la stabilité extrême de l'air liée à la subsidence des anticyclones subtropicaux entraîne des processus érosifs bien visibles sur les images satellitaires (Nouaceur Z., 1994). Le mouvement des flux, en déplaçant le sable du Sahara vers les régions méridionales, influe de manière déterminante sur l'insolation. Le vent favorise la formation en altitude d'une couche de lithométéores de diamètres différents. Cette couche de poussières a plusieurs rôles selon la taille des éléments qui la composent. Si les particules déplacées sont fines, elles accentuent la diffusion de la lumière solaire en captant tous les rayons solaires. Si en revanche, elles sont d'une taille plutôt épaisse, elles conduisent à l'installation d'une atmosphère trouble.

Cette couche de poussière atmosphérique constitue une source potentielle de noyaux de condensation. Cependant, si elle n'est pas assez épaisse pour atteindre le niveau de condensation, elle favorise la création d'une couche d'inversion de température (voir première partie) dont la forte fréquence pendant ces dernières années a fait l'objet de diverses recherches (Nouaceur Z., 1994).

Ce phénomène se manifeste parfois sous forme de brouillards accentuant considérablement les troubles de la visibilité. Les vents de sables favorisent également la prolifération et la recrudescence de certaines maladies comme la conjonctivite (véritable fléau pour la population locale entre février et mai).

La déstabilisation du milieu naturel a un impact sur l'évolution des facteurs climatiques qui à leur tour, perturbés, autoentretiennent cette dégradation.

Le ruissellement et la forte évaporation liée à la conjonction de divers éléments dont la siccité de l'air, les hautes températures et les vitesses élevées du vent, sont également des facteurs qui concourent, de manière plus ou moins directe, à la dégradation du milieu naturel.

2. Le ruissellement et l'évaporation

Le ruissellement est un phénomène physique dont l'existence est liée à la combinaison de divers facteurs. Il suppose avant tout l'existence de précipitations mais varie selon leur intensité.

La morphopédologie (degré d'inclinaison et orientation des pentes, composition et granulométrie du sol, perméabilité du substrat), la hauteur des nappes souterraines, le degré hygrométrique de l'air (évaporation), la nature du couvert végétal (hauteur et surtout densité) sont autant de facteurs qui conditionnent le ruissellement. De la nature de tous ces éléments dépend, le cheminement superficiel non concentré de l'eau précipitée.

Au Sénégal les précipitations liées aux lignes de grains et aux pluies d'orages engendrées par la convection diurne (voir: Première Partie) se manifestent souvent de manière subite ; ce qui favorise par ruissellement le lessivage des sols épuisés, d'une part par la salinisation et l'érosion éolienne, et d'autre part, par la traversée d'une longue saison sèche. Cela d'autant plus, que l'évolution de certains sols pendant cette période de l'année est souvent ralentie à cause de l'absence d'éléments nutritifs apportés par la maigre végétation.

Le manque d'humus et de micro-organismes, l'absence de pluie pendant une longue période sont autant d'éléments qui conduisent au ralentissement ou même à l'arrêt de la pédogenèse (altération chimique quasi inexistante).

L'érosion des sols pendant l'hivernage n'est par conséquent, qu'une continuation de l'appauvrissement et de l'épuisement observés pendant la saison sèche. Dans la région du Ferlo, ces types de sols sont repérables par leur couleur beige traduisant une activité stoppée ou du moins une pauvreté en matière organique.

La sécheresse et les températures qui s'accroissent au fur et à mesure que l'on s'avance à l'intérieur des terres, exacerbent l'évaporation qui conduit à un rétrécissement et à l'épuisement des nappes souterraines. Ce phénomène s'effectue soit de manière indirecte par transpiration des végétaux soit directement par évaporation sur les sols ou les cours d'eaux.

Le degré hygrométrique de l'air étant faible et les températures très élevées, l'évaporation croît dans les régions éloignées de la côte. L'accroissement des phénomènes évaporatoires influence, considérablement, l'activité physiologique des

plantes en leur faisant perdre leurs réserves en eau. Le pompage dans le sol étant plus intense, les nappes souterraines s'amenuisent souvent.

Dans la région Nord, vers Richard-Toll, la sécheresse, la siccité de l'air, l'absence de végétation, et l'épuisement des stocks d'eau conduisent au craquèlement et à la fissuration de certains sols, jadis gorgés d'eaux. Ce phénomène impressionnant, visible à l'œil nu, est très grave.

Les nombreux impacts de la sécheresse sur l'environnement, présentés tout au long de ce chapitre ont des conséquences parfois irrémédiables pour les écosystèmes naturels.

Dans la partie suivante, sera abordé l'aspect humain du problème. L'homme qui évolue dans ce milieu naturel, n'a-t-il pas par le poids de ses actions contribué à l'installation de ce déséquilibre. Connaît-il, gère-t-il, maîtrise-t-il les limites de son environnement ? Conçoit-il son action dans l'immédiateté de la survie, la gestion à moyen terme de ressources plus ou moins épuisables, la conservation à long terme d'un patrimoine ?

III. ACTIONS ET RÉACTIONS ANTHROPIQUES À EFFET GÉNÉRALEMENT NÉGATIF

1. Contribution de l'homme à la déstabilisation du milieu

On assiste à une détérioration et à un appauvrissement considérable du substrat par l'action anthropique. Cette intervention humaine est-elle conditionnée par des besoins socio-économiques (élevage, agriculture...) ? Peut-on attribuer cette mainmise néfaste à une méconnaissance quand on observe de près certains faits comme le déclenchement délibéré de feux brousses, pour fertiliser les sols, avec tous les risques de débordement, d'élargissement que cela comporte ? Quelle qu'en soit la raison, l'évolution du milieu naturel se trouve fortement modifiée par l'action humaine.

Les éléments les plus directement touchés par les effets de cette mainmise humaine sont notamment la végétation, les sols, les réserves en eau des nappes souterraines. Cependant, la globalité d'évolution des éléments d'un milieu donné conduit à des dégradations d'ensemble d'espaces plus ou moins vastes (depuis le m² jusqu'à plusieurs dizaines ou centaines de km²).

Les liens unissant la convection et le substrat évoqué plus haut ont permis de montrer que les systèmes pluviogènes étaient moins efficaces sur un espace très dégradé.

L'épuisement et l'appauvrissement des sols, le rétrécissement des nappes profondes et la surexploitation des végétaux, résultent d'une action humaine non contrôlée qui exacerbe la sécheresse naturelle et crée ainsi, un état de déséquilibre qui tend à s'autoentretenir.

Au Sénégal, les interventions humaines sur l'environnement naturel sont variables. La nourriture de 90 % de la population dépend directement du secteur primaire. La population ayant une augmentation rapide, les activités liées à l'élevage et à l'agriculture ont une part considérable dans la destruction du milieu. Cela d'autant plus que les équilibres sociaux préexistants sont déstabilisés par l'intensification du secteur primaire (Galais J., 1990).

La surexploitation par les monocultures commerciales (à l'exemple de l'arachide) constitue un des facteurs qui ont entraîné un épuisement et une destruction des sols notamment dans le centre du pays. Le doublement de la superficie du bassin arachidier afin de multiplier la production a un effet néfaste sur des sols jusque-là susceptibles de donner de bons rendements, mais que la culture de l'arachide a rendu très acides.

En plus de cet épuisement des sols par l'acidification issue de la culture arachidière, les mauvaises conditions pluviométriques ont conduit à la translation du bassin arachidier du Cayor (du nord) vers le Saloum et le Sud-Est. Située à une latitude plus méridionale, et par conséquent plus arrosée, cette région est devenue le fief de la culture arachidière qui exige une quantité annuelle d'eau comprise entre 700 et 1000mm. La surexploitation des sols y conduira à l'épuisement du support des cultures et donc à la baisse des rendements. Faudrait-il alors encore migrer vers une région plus méridionale pour produire l'arachide?

De même, dans la plupart des régions, la méthode traditionnelle de défrichements par brûlis est pratiquée à la fin de la saison sèche pour fertiliser les sols. Or, ce procédé conduit généralement aux feux de brousses qui détruisent aussi bien la flore que la faune des régions concernées (photo n° 3 et 4). La fréquence des feux de brousses est quasi annuelle avec une recrudescence entre mars et mai c'est-à-dire en fin de saison sèche. Ce phénomène est d'autant plus grave, que, pendant cette période, la végétation est sèche et les vitesses de vent plus élevées (harmattan). La propagation des feux a des conséquences mal mesurées mais elle touche parfois la population locale. Ces pratiques, contrairement à l'objectif visé, d'enrichissement des sols, concourent à la destruction de l'humus qui est incontestablement un fertilisant naturel.

Un autre fléau qui concerne directement la végétation est le déboisement. Cela est d'autant plus alarmant qu'aucune espèce n'est épargnée. Le déboisement de manière délibéré touche toutes les strates de la végétation. Les principales causes de cette destruction anarchique sont d'ordre économique et social (charbon de bois, mobilier, etc.). Le volet social de cette déforestation est relatif à la forte pression démographique et à l'urbanisation. L'accroissement de la population a conduit à l'élargissement de sites d'habitations et en conséquence, à une demande accrue en bois (maisons avec des charpentes en bois, bois de chauffe : 58 % de l'énergie domestique de base).

En 1981, les besoins énergétiques du Sénégal étaient estimées à 2 400 000 TEP (Tonnes Equivalent Pétrole) et à lui seul, le bois en a fourni plus de 50 %, c'est-à-dire 1 400 000 TEP (UNESCO, ASPHG 1984).

Ce phénomène de déboisement est également lié à l'élargissement des zones de cultures résultant du fort taux d'occupation humaine dans certains milieux ruraux. Il y a une primauté des cultures commerciales et alimentaires au détriment de la végétation "naturelle". La destruction en Basse Casamance, des forêts de mangrove situées dans les dépressions humides et berges des cours d'eau au profil des casiers rizicoles, en est un exemple.



Photo n° 3 : Feu de brousse (Niokolo-Koba, Boundou ; Sénégal) (Mahé, 1976/INTERGEO)



Photo n° 4 : Après le feu de brousse (région de Kaolack, Saloum ; Sénégal) (Mahé, 1976/INTERGEO)

L'intensification de l'élevage et les difficultés de gestion des pâturages qui en résultent, constituent également des éléments de détérioration du milieu naturel. 30 % de la végétation accessible (sur 365 jours) est victime de la pression animale (Prévost Y., 1990), (fig. 1). Pour nourrir le surplus de bétail, l'ébranchage des arbustes et arbres, notamment les Acacia dont le feuillage résiste à la longue saison sèche, est effectué pendant toute cette période. Le recours au pâturage aérien n'est stoppé qu'avec l'apparition des premières pousses d'herbacées qui ne suit pas obligatoirement et partout les premières pluies (Courel M.F., 1984).

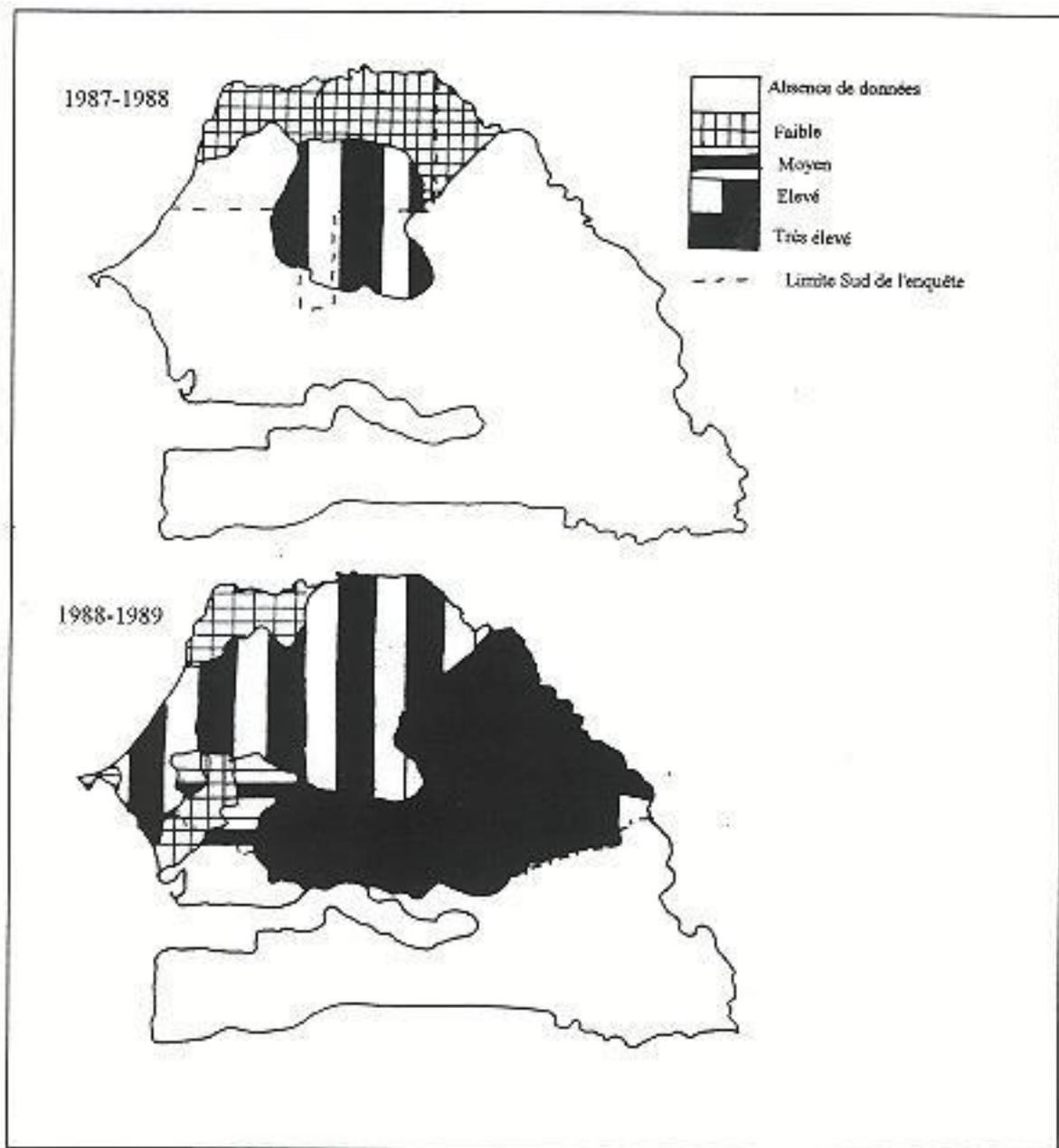


Fig. 1 : Indice de pression animale en 1987-1988 et 1988-1989 dans le Nord du Sénégal. Utilisation sur 365 jours, 30 % de la végétation accessible (Source : Prévost 1990)

La modernisation du secteur de l'élevage qui a été entreprise a eu pour conséquence directe la destruction de l'équilibre social préexistant (la sédentarisation des types éleveurs étant un phénomène récent).

La multiplication des forages et points d'eaux (plus de 4000 sites recensés sur l'ensemble Sénégal en 1993 : Ministère de l'Hydraulique) a accentué la dégradation du substrat naturel dans ces périmètres.

La manifestation directe de ce phénomène est le piétinement des jeunes pousses et des graminées sur une grande surface autour des points d'eau (surcharge pastorale) pendant l'hivernage, le déboisement, l'ébranchage des végétaux pendant la saison sèche (pâturage aérien), et l'épuisement (voire même le tarissement) des réserves souterraines d'eaux.

Cette crise écologique prend des proportions étonnamment graves, "d'autant plus que les éleveurs en majorité dans cette région n'ont qu'une préoccupation : leur cheptel. D'où le décalage entre leur logique et celle des chercheurs qui veulent en priorité la valorisation de la productivité végétale" (Prévost Y., 1990).

Toutefois, le volet moderne de la contribution anthropique à la dégradation du milieu naturel conduisant à la déstabilisation des facteurs climatiques s'observe beaucoup plus dans les sites urbains.

En effet, tout comme les feux de brousses pratiqués dans les zones rurales, certaines industries urbaines constituent également une source de pollution atmosphérique (tableau 1). Au Sénégal, certaines méthodes utilisées pour raffiner l'huile brute (singulièrement l'huile d'arachide) se font par adjonction puis par rejet dans l'atmosphère de certains produits odorants et colorants (UNESCO, ASPHG 1984).

Aussi, certaines usines comme la cimenterie de Rufisque (située à quelques km au Sud de Dakar), rejettent dans l'atmosphère des fumées contenant des résidus de calcium. Ces débris emportés par les vents se déposent aux alentours des sites concernés. Cela se traduit par la stagnation d'une couche blanchâtre sur le sol, la végétation et parfois même sur les habitations ; ce qui peut autant affecter la croissance des végétaux que la santé des populations locales (UNESCO, ASPHG, 1984). La solution la plus simple consisterait à les éloigner des foyers urbains mais ce déplacement requière bien d'autres aménagements dont la création d'infrastructures de transport.

	IPCC 1990*				IPCC 1992**					
	CO ₂	CH ₄	CO	N ₂ O	NO _x	NMCH	1 000 TE-CO ₂	%	1 000 TE-CO ₂	%
Énergies conventionnelles										
Transformations, transport et distribution	900	1.023	0.182	0,035	2,4	0,57	1 033	3,4	921	5,0
Consommation finale	1 497	0,492	77	0,38	11,0	7,3	2 360	7,7	1 600	9,7
Biomasse - énergie										
Transformations	1 116	47	303			39,9	3 441	11,2	1 626	8,9
Consommation finale	1 680	28	181			27,9	3 117	10,1	1 987	10,8
Changement d'affectation des sols										
Défrichements agricoles	5 884	0,63	28	0,371	0,304	1,3	6 114	19,8	5 992	32,6
Défrichement à vocation énergétique	3 122			0,204			3 181	10,3	3 177	17,3
Feux de savane										
		36	1 500	0,428	10	73	6 855	22,2	515	2,8
Autres sources d'émissions										
Production de ciment	196						198	0,6	196	1,1
Animaux domestiques	89	124					2 605	8,5	1 364	7,4
Ordures ménagères		32					768	2,5	445	2,4
Riziculture		47					994	3,2	521	2,9
Combustion des résidus de récolte		1,7	30	0,024	0,556		155	0,5	25	0,1
Utilisation d'engrais chimiques				0,015			4	0,0	4	0,0
Total	14 484	318	2 207	1,4	24	150	30 825	100	18 374	100
Bilan par type de gaz										
Total TE-CO ₂ IPCC 1990*	14 484	6 685	6 616	417	978	1 645	30 825			
% IPCC 1990	47	21,7	21,5	1,3	3,2	5,3	100			
Total TE-CO ₂ IPCC 1992**	14 484	3 502		386			18 374			
% IPCC 1992	79	19		2			100			

* et ** : cf notes sous le tableau II

Tableau 1 : Bilan des émissions de gaz à effet de serre au Sénégal par source d'émission et par type de gaz en 1988 (x 1000 tonnes) (Amous, 1993)

2. Exemples de solutions socio-économiques régionales et conséquences

Les grandes lignes relatives à l'intervention abusive de l'homme aussi bien sur l'environnement atmosphérique que sur le milieu géographique dans lequel il évolue ont été largement soulignées. Peut-on attribuer ce bilan négatif très lourd à une inconscience ou simplement à une désinformation ?

S'il est difficile de lutter contre la sécheresse, il est en revanche plus aisé de lutter contre ses effets négatifs sur l'agriculture ou plus largement sur la vie rurale qui est de loin la plus touchée par ce phénomène, du moins dans la région sahélienne.

Les pays concernés ont, en tout cas, avec le concours de la communauté internationale et par le truchement des scientifiques, essayés d'ausculter la réalité et de prendre des mesures plus ou moins efficaces, visant à utiliser différentes méthodes afin de lutter contre la sécheresse (voir 2.2.). C'est le cas du C.I.L.S.S. (Comité de InterÉtat de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) regroupant en son sein la plupart des pays de la bande sahélienne, de l'O.M.V.S. (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal), etc.

Pour limiter les dégâts engendrés par la sécheresse et la désertification à travers la vulgarisation de l'information, il faut sensibiliser les populations locales qui, pour la plupart ne voient pas les effets de leurs actions sur l'environnement et, par conséquent privilégient la satisfaction de leurs besoins quotidiens à court terme. Les convaincre n'est pas une tâche facile.

Vu que le taux d'alphabétisation est très faible, les campagnes d'informations exigent non seulement un déplacement assidu de spécialistes sur le terrain pour initier la population rurale mais également un suivi régulier en vue de vérifier l'efficacité des méthodes vulgarisées. Les campagnes de sensibilisation doivent également s'effectuer à travers les médias (radio et télévision en dialectes locaux : sous forme d'émissions culturelles, de publicités...) et s'adresser aussi bien au monde rural (par exemple en encourageant le développement de pépinières villageoises) qu'à la population urbaine (les poussant à utiliser le gaz pour les tâches ménagères au détriment du charbon de bois). Leur but essentiel est de s'appesantir sur le respect de l'environnement, la préservation et l'économie de l'énergie disponible (particulièrement la végétation).

Une autre phase de lutte contre les aléas climatiques est la construction d'infrastructures nécessaires pour une meilleure gestion de l'eau disponible. Il s'agit

notamment des barrages de Diama et Manantali sur le fleuve Sénégal par les pays de l'O.M.V.S.

2.1. Moyens de lutte à l'échelle locale

Le potentiel biologique des sols étant gravement atteint, à chaque succession d'années sèches, la lutte contre la déflation éolienne en fixant les sols s'est souvent avérée très efficace.

Au Sénégal, pour stopper l'érosion éolienne, des projets visant à construire des pare-vents (afin de fixer dunes mobiles) et à revigorer le couvert végétal, se sont multipliés. De manière concrète, cela s'est traduit par une politique de reboisement, entreprise à travers tout le pays. Une tentative d'implantation de forêts d'eucalyptus a par conséquent été organisée dans le but de limiter, ou, mieux, d'enrayer ce fléau. Tentative très réussie dans la mesure où cette espèce végétale a une capacité d'adaptation remarquable a par conséquent proliféré rapidement. Le vent est ainsi fixé par un couvert arboré, de plus, relativement, 'esthétique' dans le paysage.

Cependant, certaines variétés qui sécrètent des produits toxiques afin d'éliminer les quelques rares espèces originelles et colonisent plus vite l'environnement local, ont largement contribué à acidifier les sols. Cette variété d'eucalyptus, très acide et également constituée de racines qui poussent en profondeur concourant ainsi à ponctionner nappes souterraines. Le problème pédologique n'est nulle part résolu par les eucalyptus qui, dans le meilleur des cas ne développent pratiquement aucun sol, si bien qu'un déboisement à moyen terme reproduirait les mêmes effets néfastes en peu de temps (Tabeaud, Simon, Dufour, 1994).

Une autre solution concernant la protection de la végétation existante est la surveillance des feux de brousses par satellite. La répétitivité des informations captées par Météosat (30 mn) permet un repérage rapide des feux de brousses et par conséquent une mobilisation immédiate et efficace. Cela permet également de détecter l'origine du feu souvent allumé volontairement. Des travaux récents ont montré comment à partir d'un suivi des changements de l'état de surface à partir de scènes NOAA, il est possible de détecter les feux de brousse sur les images en sélectionnant les pixels ayant un compte numérique à sursaturation.

L'immersion des sols et l'hypersalinisation qui en résulte a engendré de graves problèmes dont l'épuisement et l'érosion des sols. En Basse Casamance, les solutions proposées consistent à réaliser des aménagements hydroagricoles : construction de

diguettes locales (pour dévier la remontée l'eau de mer), de petits barrages antisel. Cependant, suite à la répétitivité de la sécheresse, certaines de ces infrastructures locales ne reçoivent pas les débits suffisants pour fonctionner normalement (Olivry J.C., 1987).

L'intrusion de la langue saline entraîne également la réduction des terres à rizière. Mais résoudre entièrement ce problème suppose de généraliser la destruction de la végétation locale, déjà entreprise par les populations, afin d'étendre les terres cultivables dans les marécages (zones alluvionnaires humides). Les conséquences de cette détérioration du couvert végétal n'ont pas été regardées sur le moyen et le long terme.

2.2. Tentatives à l'échelle sous-régionale

Afin de lutter de manière efficace contre la sécheresse et ses conséquences directes, les pays de l'O.M.V.S. se sont réunis autour de projets communautaires et se sont lancés dans de grands travaux de construction de barrages. Cette entreprise qui vise à mieux gérer la quantité d'eau disponible a donné naissance au barrage anti-sel de Diama situé en amont de Saint-Louis et à celui de Manantali situé dans le cours inférieur du fleuve Sénégal.

La construction du premier édifice avait pour but principal de stopper la remontée de la langue salée provenant de l'Atlantique dont les conséquences multiples et désastreuses sont déjà évoquées en début de chapitre. Quant à la réalisation de Manantali, plusieurs objectifs étaient visés.

Les grandes lignes de ce projet étaient la production d'énergie hydroélectrique (puissance de 200 Mw avec une production annuelle de 800 Gwh), et la régularisation artificielle du niveau du fleuve Sénégal à travers une meilleure gestion des eaux pendant l'hivernage : laminage et contrôle des fortes crues, amortissement des plus forts débits et régulation annuelle. Cela en vue de restituer le surplus d'eau stocké pendant la saison sèche, de permettre de manière permanente, une navigabilité sur une longue distance depuis Saint-Louis jusqu'à Kayes et une mise en valeur par système d'irrigation de 375 000 ha répartis le long de la vallée (Albergel J. et al., 1993).

Après la mise en marche de ces infrastructures hydrologiques, des recherches basées sur des modèles de simulations numériques et d'analyses statistiques (banque de données hygrométriques constituées d'une longue série chronologique : 1900-1992) ont été effectuées. Ces travaux appuyés par des prélèvements sur divers composantes

du fleuve (eau, sol, végétation, etc.) et des séances d'expérimentations en laboratoire ont été réalisés dans le but d'évaluer la probabilité de réussite et d'efficacité des objectifs initialement assignés à ces édifices. Le but final est de comparer l'évolution pré et post-barrages de l'écosystème fluvial ou lacustre. Il s'agit ici du lac de Guiers qui est le principal défluent du fleuve Sénégal et dont le rôle socio-économique au Sénégal est incontestable.

Ces ouvrages hydrologiques, coûteux pour les pays concernés, auraient engendré d'après les études effectuées, des conséquences d'autant plus alarmantes qu'elles sont pour l'instant minimisées. Les impacts de la sécheresse sur les performances de ces édifices à fonctions multiples dépendent largement de la durée et de l'amplitude de la pénurie d'eau (fig. 2) d'une part et des consignes de gestion appliquées d'autre part. Le plus fort taux d'échec des objectifs assignés à ces ouvrages concerne, d'après les scénarii, la période 1976-1992 : sécheresse persistante (Albergel J. et al., 1993).

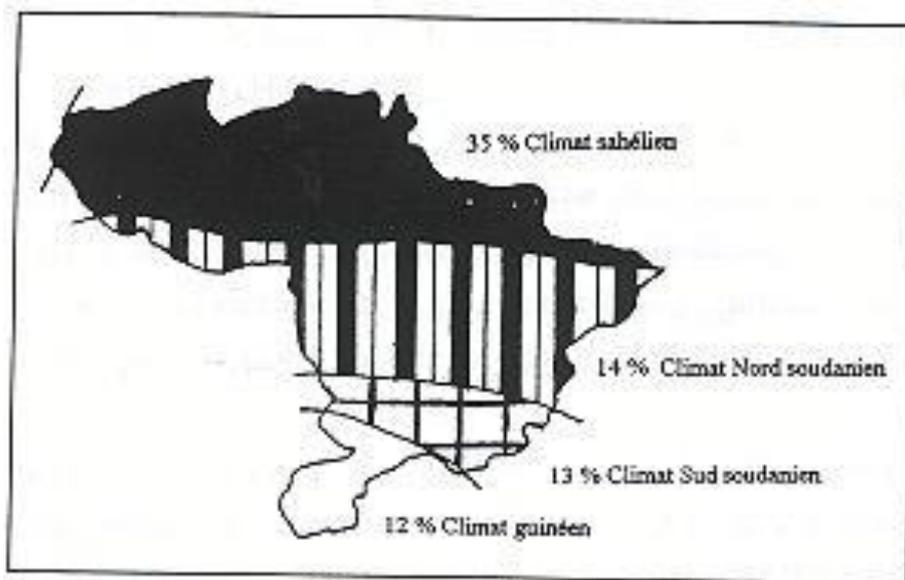


Fig. 2 : Déficit de la période 1969-1991 par rapport à la moyenne 1951-1980 dans le bassin versant du Sénégal (Source: Albergel et al., 1993)

Certains travaux récents ont démontré que, hormis la fourniture d'eau (préservation du surplus pendant l'hivernage et restitution du stock en période de décrue) pour l'irrigation, la plupart des objectifs initialement visés est loin d'être atteinte (fig. 3, tableau 2) et que même l'équilibre de l'écosystème fluvial et lacustre n'est pas pour autant épargné.

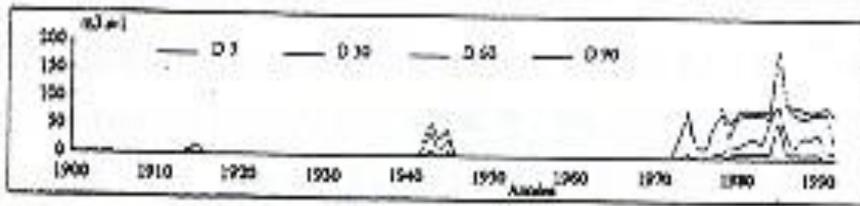


Fig. 3 : Un scénario de déficit du débit pour la navigation (valeurs atteintes ou dépassées (D_n) pendant n jour dans l'année) (Albergel, 1993)

Tableau 2 : Perte de production électrique due au soutien de la crue (Albergel, 1993)

Période de référence	1905-1992	1950-1969	1970-1992
Puissance moyenne, scénario 1 (Mw)	92,3	115	48,0
Puissance moyenne, scénario 2 (Mw)	101,0	115	67,7
Différence des deux (perte due au soutien de crue) (Mw)	8,7	0	19,3

Pour le lac de Guiers, principal fournisseur d'eau pour Dakar, les impacts se reflètent surtout sur la qualité hydrologique et la composition chimique des eaux (tableau 3). Les modifications de l'écosystème lacustre ont favorisé de nouvelles conditions physiques et chimiques de l'eau qui, à leur tour, interviennent sur le système biologique.

Tableau 3 : Qualité des eaux des régions Nord et Sud du Guiers (meq/l) et minéralisation globale des eaux (mg/l) avant période (P1) et après (P2) la mise en fonction du barrage de Diama (Gac et al., 1993)

	Région Nord			Région Sud		
	P1 (1979-82)	P2 (1989-92)	Δ	P1 (1979-82)	P2 (1989-92)	Δ
H lac (m)	0,38	0,93		0,38	0,93	
Vol. (Mm ³)	225	324		27	49	
Cl	1,47	1,03	-30%	8,99	3,35	-52%
SO ₄	0,28	0,51	85%	1,50	0,64	-57%
HCO ₃	1,57	1,21	-23%	5,21	3,02	-42%
Ca	0,87	0,51	-30%	2,06	1,18	-48%
Mg	0,83	0,72	-14%	3,71	2,03	-45%
Na	1,46	1,13	-23%	7,50	3,69	-51%
K	0,13	0,14	9%	0,62	0,33	-47%
Σ anions	3,32	2,75		13,69	7,01	
Σ cations	3,30	2,60		13,89	7,21	
Min. gl. (mg/l)	227	197	-18%	921	480	-48%

2.3. Quelques actions positives pour la population

Ce tableau plutôt critique des réactions humaines face à la sécheresse cache cependant les conséquences bénéfiques des aménagements notamment hydro-agricoles pour la population locale. La construction des barrages hydroélectriques, loin d'atteindre les objectifs visés, a cependant permis l'aménagement de cultures d'irrigation surtout en saison sèche. Il s'agit notamment d'une intensification des cultures vivrières, principalement, le riz et le sorgho et du maraîchage (voir Deuxième Chapitre : fig. 28). Certains projets de développement dans les campagnes, comme le casier de Richard-Toll par exemple qui bénéficie largement de ces infrastructures, permettent également de décentraliser la capitale.

Au regard, on peut affirmer que, les édifices infrastructures hydrologiques sur le fleuve Sénégal, malgré le faible taux de satisfaction par rapport aux buts visés, ont engendré deux effets positifs pour la population sénégalaise : couvrir en partie les besoins alimentaires du pays et stopper ou, du moins, limiter l'exode rural dans une région traditionnellement fournisseuse de migrants. La question que l'on se pose est de savoir jusqu'à quand durera cette amorce de stabilité précaire ?

Conclusion partielle

Dans ce chapitre, notre propos était de montrer comment le déséquilibre naturel résultant de la sécheresse persistante est entretenu par les interventions anthropiques. Sachant que l'équilibre du milieu naturel fait intervenir tous les éléments qui le composent, il était nécessaire de montrer comment la déstabilisation de certains facteurs peut avoir des répercussions sur d'autres. Cette imbrication de conséquences néfastes des facteurs physico-géographiques les uns sur les autres affecte inévitablement les mécanismes de la formation des pluies. La gravité de ce déséquilibre est encore plus alarmante quand on sait que les facteurs de causalité ont tendance à autoentretenir le phénomène. L'exemple qui retrace le mieux l'enchaînement sans fin de ces processus qui endommagent le milieu naturel est fourni par la dégradation des végétaux. Le couvert végétal qui devrait amortir les flux de surface étant de plus en plus inexistant, l'écoulement du vent est facilité.

La désertification exacerbée par l'homme (abattage des arbres, feux de brousses, surexploitation agricole, piétinement par le surplus de bétail, etc.) expose directement les sols déjà épuisés par les aléas climatiques au ruissellement et à l'érosion éolienne.

Ils sont ainsi soumis au lessivage par les eaux de pluie et au déplacement par les flux de surface.

La déflation éolienne facilitée de la désertification, accentue la dénudation des sols et le drainage des particules fines, d'où la création de dunes (les particules fines en déplacement sont parfois déposées autour d'obstacles) de plus en plus alimentées au fur et à mesure que la sécheresse persiste. L'érosion du support pédologique par voie éolienne accentue également la présence des lithométéores ou brumes sèches dans les basses couches de l'atmosphère. Or, cela qui n'est pas sans conséquence sur le rayonnement et partant sur les activités biologiques des plantes (activités physiologiques ralenties ou stoppées, perte d'eau, etc.).

Un autre facteur déstabilisateur de l'équilibre naturel et qui a fait l'objet de rappel tout au long de ce chapitre est la salinisation et l'acidification des sols. Nous avons montré comment la remontée de l'eau de mer, à l'origine de ce phénomène, de plus en plus intense selon la persistance de la sécheresse, est facilitée par la réduction, voire même l'absence, d'activité des cours d'eau mais également par le tarissement des nappes profondes. Ainsi, nous avons mis en évidence l'existence d'une dégradation naturelle aggravée par des effets anthropiques. Puis, il a été question des solutions entreprises par les pays concernées pour lutter contre ce fléau naturel afin de s'assurer une indépendance énergétique et une autosuffisance alimentaire, par la réalisation de projets locaux (programmes de reboisement, sensibilisation, etc.) mais également la construction d'édifices hydrauliques à buts multiples. Mais, chacune de ces ébauches de solution dont le degré de performance et de satisfaction reste discutable, a engendré une multitude de conséquences encore plus difficiles à gérer.

Cette sorte de bilan des impacts de la sécheresse aggravée par une exploitation humaine anarchique ne font que confirmer un fait : un équilibre rompu a tendance à s'autoentretenir. Les échanges entre Sol-Plante-Atmosphère en partie conditionnés par la présence de l'eau et donc par l'efficacité de l'hivernage sont ainsi limités. Le mot efficacité faisant seulement référence au mode de distribution de l'eau précipitée en fonction des besoins naturels des plantes. Saisir les mécanismes qui rythment cette distribution spatio-temporelle de l'eau disponible et la quantifier pour mieux la gérer est l'un des objectifs principaux des spécialistes du climat. C'est ce qui explique en partie leur acharnement à tester, valider, expérimenter différentes méthodes de recherches afin de trouver des solutions adéquates. Décrire quelques méthodes témoignant de la contribution de ces spécialistes sera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV :

APPORTS DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE : ESTIMATION DES PLUIES

Pendant ces vingt dernières années de sécheresse, les recherches visant à mieux appréhender les mécanismes du climat de la bande sahélienne se sont multipliées. À travers diverses approches et avec des méthodes d'applications variées, les chercheurs se sont réunis autour d'un seul et même objectif: comprendre, maîtriser et contrôler la sécheresse. Saisir ses origines (cyclique, anthropiques), évaluer ses impacts (socio-économiques, environnementaux) permet de mieux gérer et de surmonter ses conséquences directes et indirectes.

Les agronomes, les biologistes, les hydrologues, etc., n'ont ménagé aucun effort qui pour la recherche d'espèces adaptées au milieu sahélien, qui pour la maîtrise des activités des cours d'eau existants.

En climatologie, certains spécialistes traitant directement les relevés météorologiques effectués au sol, se sont heurtés à de nombreuses difficultés relatives à la rareté, à l'insuffisance temporelle et à la vétusté des stations de mesures. Le recours aux techniques modernes s'est donc avéré nécessaire, notamment des satellites d'observation de la terre et des outils informatiques permettant de traiter ces données.

Mesurés directement par les satellites, la fiabilité de ces données est incontestable. Cependant, il fallait créer des logiciels susceptibles d'effectuer les opérations de base (corrections géométriques, radiométriques, etc.) permettant de décrypter ces informations brutes afin de les rendre plus accessibles aux utilisateurs. Il fallait également imaginer, puis développer des méthodes de traitements d'images basées sur des modèles mathématiques permettant de combiner des paramètres d'origine diverses. C'est seulement après ces opérations préliminaires que des applications théoriques peuvent être élaborées en vue de validation terrain.

En télédétection, les domaines d'applications sont multiples, les types d'approches sont donc diverses et complexes. En climatologie, la plupart des traitements ont un but prévisionnel. Par conséquent, ils sont effectués soit, en vue d'évaluation des ressources en eau disponibles, soit, en vue d'un suivi régulier et opérationnel des paramètres de l'environnement. Les difficultés, d'ordre matériel, évoquées plus haut, dont l'insuffisance du réseau de stations sol, poussent toutefois les chercheurs à

adopter des méthodes visant à corrélérer les images satellitaires avec les données fournies par le réseau de stations au sol (voir troisième partie).

L'utilisation combinée de ces types de données pour estimer les pluies au Sahel à fait l'objet de nombreux travaux. En France, la plupart sont effectués par des chercheurs de l'ORSTOM, du CNRS, et du LMD souvent en collaboration avec une équipe anglaise de l'Université de Reading.

Seront exposés dans ce chapitre deux types d'approches différentes mais développées dans le même but: estimer les pluies avec l'utilisation combinée de données hétérogènes. La première méthode est avant tout basée sur un suivi opérationnel d'un type de nuages particuliers alors que la seconde est d'un autre ordre elle fait appel à des applications statistiques.

Comme déjà indiqué, les méthodes d'estimation des pluies actuellement en vigueur au CMS de Lannion, ne feront pas l'objet de rappel dans ce chapitre car elles ont servi de référence à notre travail (voir troisième partie). Nous les avons effectivement validées dans notre zone d'étude.

I. EXEMPLE DE SUIVI DES AMAS NUAGEUX

C'est une méthode essentiellement axée sur l'identification puis le suivi de nuages à caractères convectifs répondant à un certain nombre de critères physiques et thermodynamiques.

L'application de cette méthode basée sur le suivi spatio-temporel des amas nuageux suppose dès le départ l'utilisation d'informations d'origines spatiales cohérentes. D'abord parce que l'organisation de ces types de nuages n'a pu être véritablement appréhendée qu'avec l'apparition des satellites météorologiques. Les séries sont donc nécessairement courtes. Ensuite, parce que ces amas nuageux ayant un parcours s'échelonnant souvent sur de vastes étendues géographiques (plusieurs dizaines de degrés) et par conséquent un cycle de vie plus ou moins long, la nécessaire répétitivité des dates et heures de prises de vues, la grande résolution spatiale supposent l'utilisation de satellites météorologiques comme Météosat. Par souci d'une meilleure sélection des amas répertoriés, au préalable, dans des canaux différents, les heures et dates de prise de vue doivent être étalonnées dans des fichiers de base.

Nous allons dans cette partie, citer un exemple précis de suivi d'amas convectifs (il s'agit principalement de lignes de grains) élaboré au LMD et appliqué sur tout le Sahel ouest africain. Ce type d'approche s'effectue en plusieurs phases :

reconnaissance des nuages selon un système de seuillage prédéfini, suivi du nuage identifié (évolution et cycle de vie : naissance, maturité, précipitation) et efficacité du nuage (quantité d'eau précipitée).

1. Identification et cycle de vie des nuages

Un système de seuillage basé sur la température des amas convectifs est prédéfini. Les nuages pluvioènes doivent impérativement avoir un minimum de température de -40° C. Comme déjà souligné, pour un suivi efficace de l'évolution des nuages pluvioènes depuis leur formation jusqu'à leur complète dissipation, une grande résolution et une bonne précision des dates et heures de prises de vue des images de base est indispensable. Cela permet, la réalisation de la première étape du traitement basé essentiellement sur une présélection individuelle des nuages pluvioènes sur les différents canaux de travail. Une comparaison dans un but de vérifier l'exactitude des résultats préliminaires s'avère ensuite nécessaire.

L'identification des nuages pluvioènes est fondée sur l'analyse des teintes de gris redéfinies selon les besoins de chaque utilisateur et qui sont, en quelque sorte le reflet des objets situés en-dessous des radiomètres embarqués à bord des satellites météorologiques. La combinaison des images infrarouges thermique et visibles permet de détecter de manière efficace les nuages pluvioènes. Vu le seuil de référence établi, les amas répertoriés selon leur température ne sont pas tous générateurs de pluie. Certains nuages d'altitude comme les cirrus, remplissent les mêmes conditions thermiques que les nuages pluvioènes $< -40^{\circ}$ C. Ils ont une température inférieure au seuil d'identification prédéfini mais n'en sont pas pour autant pourvoyeurs de pluies. Par conséquent, une deuxième sélection visant à éliminer ces types de nuages des résultats préliminaires s'impose.

- Le spectre visible qui mesure la réponse spectrale des objets sous l'effet de la lumière solaire fournit des renseignements ayant pour unique référence leur luminance. Rappelons que plus un objet est clair, plus sa réflexivité est importante, la reconnaissance des nuages "froids" selon leur blancheur est par conséquent leur brillance devient chose aisée. C'est donc de cette manière que la délimitation du contour des occurrences à température $< -40^{\circ}$ C est effectuée à travers les images du spectre visible. Cela permet, dans un premier temps, d'évaluer à travers l'espace occupé (la taille du pixel étant connu) l'épaisseur et la forme des amas répertoriés mais également de mesurer la distance parcourue. De la couleur et de la luminance des nuages dépend également leur densité. La diffusion de la lumière solaire par les

différentes particules qui composent un nuage est fonction non seulement de leur volume mais aussi de leur compacité. De ce fait, des renseignements plus ou moins précis concernant la densité, l'épaisseur et la forme des amas nuageux peuvent être obtenus grâce aux teintes de gris des images captées dans le spectre visible.

- Le canal infrarouge thermique qui mesure l'émissivité des objets situés en-dessous des satellites fournit, également, à travers leurs couleurs des renseignements concernant leur température et par conséquent leur altitude. D'après le système de grisés généralement adopté pour identifier les nuages, plus les objets apparaissent sombres sur les images infrarouges et plus leur température est élevée. Par conséquent, l'élimination des éléments ne couvrant pas le seuil prédéfini s'effectue aisément. Les nuages froids, d'une blancheur immaculée dans ce canal sont vite sélectionnés. La température des nuages triés grâce à ce procédé, confrontée avec des données de radiosondages, permet d'évaluer leur altitude.

- Après les différentes phases d'identification des amas nuageux à températures $< -40^{\circ}$ C, la troisième étape vise à confronter les différents résultats issus de ces prétraitements, afin d'éliminer les cirrus non pluvio-gènes, mais remplissant les critères de sélection dans les deux canaux pris isolément (froids, blancs et donc brillants). Pour éviter toute confusion et donc pour une analyse parfaite du comportement de chaque amas répertorié, un système d'identification par numérotation est ensuite effectué. Les dates, heures et lieux de naissance sont également relevés dès la première apparition des amas sur les images.

- La phase finale de ce traitement consiste à analyser le type d'organisation des amas entre eux. De cette organisation dépend la durée de vie de chaque groupe. L'itinéraire emprunté tout comme la latitude et l'heure de dissipation fournissent également des renseignements permettant de mieux appréhender les amas observés. Les figures 4 et 5 et le tableau 4 ci-dessous sont issues d'une étude (suivi sur une durée d'un mois) ayant appliquée cette méthode sur l'ensemble du Sahel Ouest africain (Thiaw W., 1988).

Tableau 4 : Lieux et heures d'apparition et de dissipation des amas et durée de vie

N° amas	Formation				Dissipation				Durée (heures)
	Date	H TU	Lat.	Long.	Date	H TU	Lat.	Long.	
1	11/06	18:	14°N 16'	9°E 53'	12/06	07:	12°N 36'	5°E 46'	13
2	13/06	14:	11°N 37'	14°E 2'	14/06	07:	12°N 17'	4°O 13'	17
3	12/06	14:	12°N 24'	1°E 46'	14/06	04:	11°N 33'	15°O 16'	38
4	15/06	23:	14°N 45'	0°E 34'	16/06	21:	9°N 58'	10°O 13'	21
5	16/06	15:	13°N 10'	1°E 21'	17/06	04:	11°N 1'	2°O 5'	13
6	18/06	15:	14°N 41'	6°E 18'	20/06	18:	12°N 30'	15°O 12'	51
7	24/06	12:	17°N 34'	8°E 49'	26/06	15:	10°N 49'	16°O 46'	51
8	27/06	18:	15°N 57'	8°E 55'	28/06	08:	14°N 25'	4°E 48'	14
9	29/06	15:	13°N 18'	5°E 12'	30/06	15:	11°N 27'	0°O 52'	24
10	30/06	12:	11°N 17'	9°E 19'	01/07	05:	10°N 54'	6°O 23'	17
11	02/07	16:	13°N 18'	9°E 48'	03/07	12:	13°N 15'	0°E 46'	20
12	03/07	16:	12°N 42'	3°O 21'	04/07	01:	12°N 20'	6°O 21'	9
13	04/07	03:	12°N 3'	6°E 43'	05/07	10:	11°N 45'	2°E 7'	31
14	06/07	05:	13°N 54'	2°E 44'	07/07	07:	10°N 27'	7°O 15'	26
15	08/07	15:	13°N 49'	6°E 36'	09/07	06:	13°N 31'	1°E 49'	13
16	08/07	15:	13°N 46'	11°E 20'	09/07	07:	12°N 25'	5°E 8'	14
17	08/07	15:	15°N 21'	1°E 49'	09/07	07:	14°N 7'	4°O 5'	13

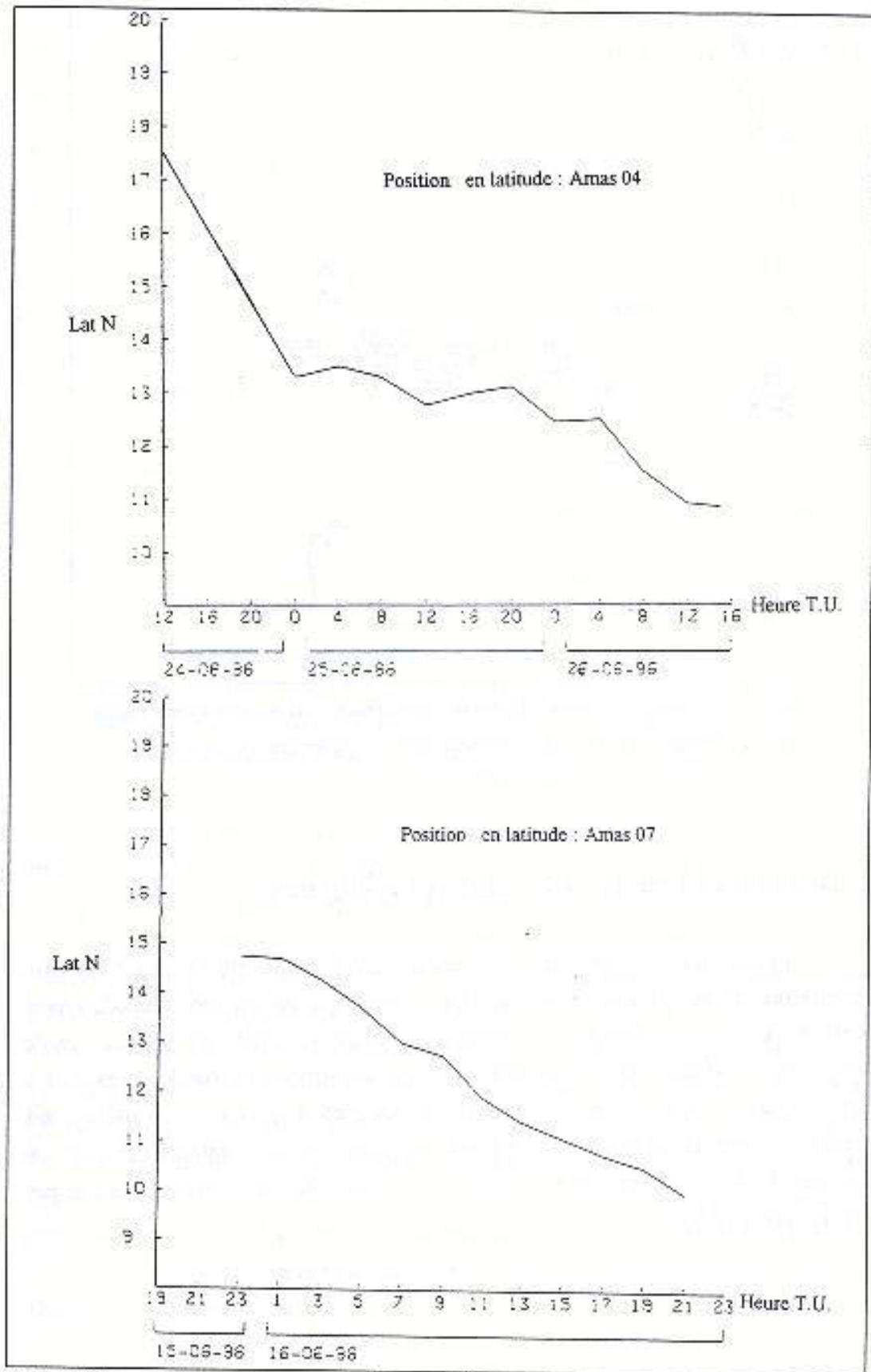


Fig. 4 : Cartographie des zones approximatives d'apparition et de disparition des amas nuageux

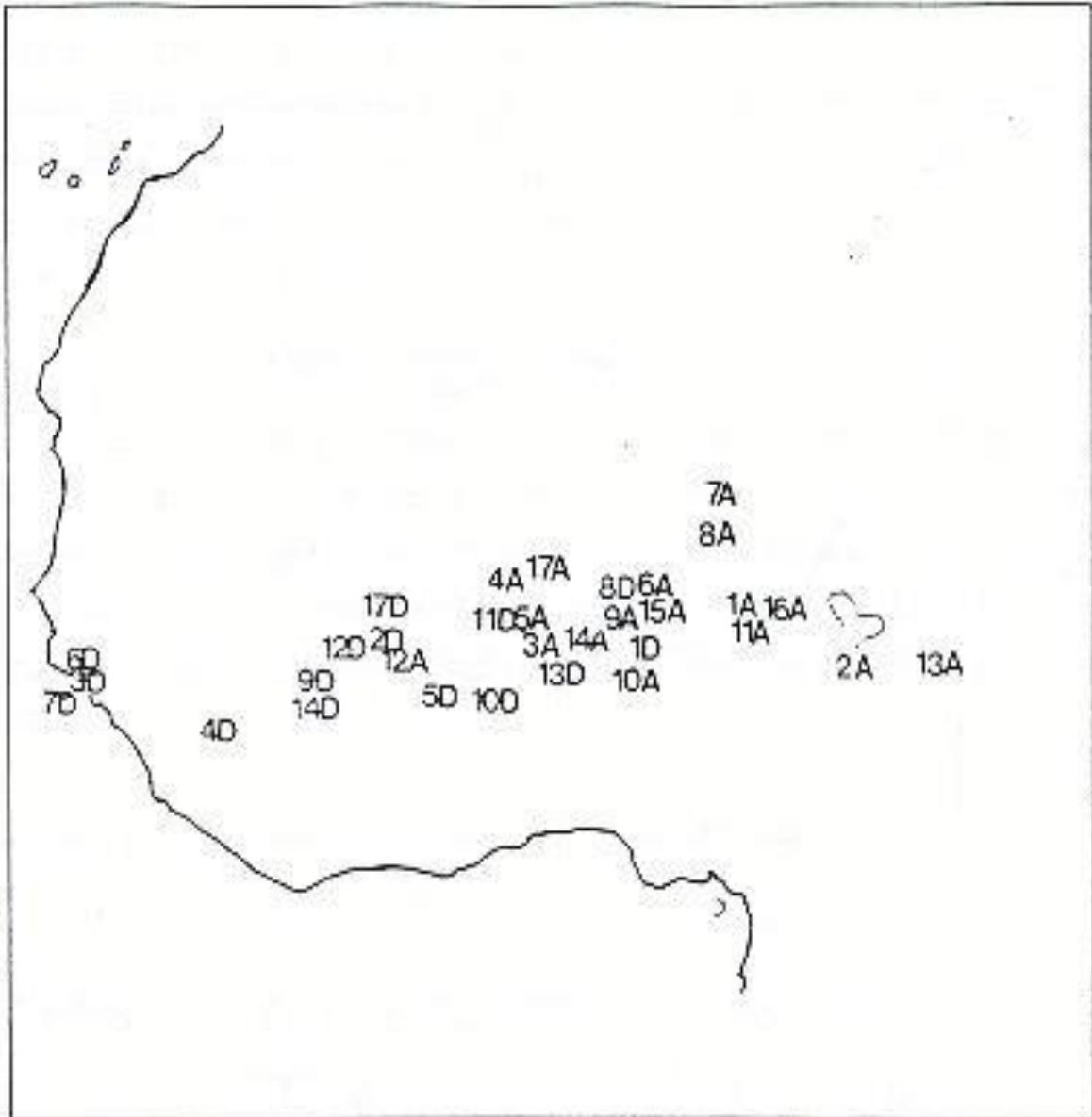


Fig. 5 : Cartographie des zones approximatives d'apparition et de dissipation des amas nuageux. Chaque amas est identifié par un chiffre ; A : apparition, D : disparition (Thiaw, 1988)

2. Degré d'efficacité des nuages pluviogènes

Les amas sélectionnés étant numérotés, un suivi point par point de leur trajectoire est effectué. Ceux qui n'ont fourni aucune précipitation au sol sont immédiatement éliminés. À partir des coordonnées géographiques de la latitude de naissance et de dissipation, le parcours de chaque amas puis la moyenne arithmétique des pluies mesurées sous sa zone de passage sont calculés. Le produit de la hauteur moyenne des précipitations par l'aire de parcours du nuage donne une estimation du volume total des pluies engendrée par chaque amas (fig. 6).

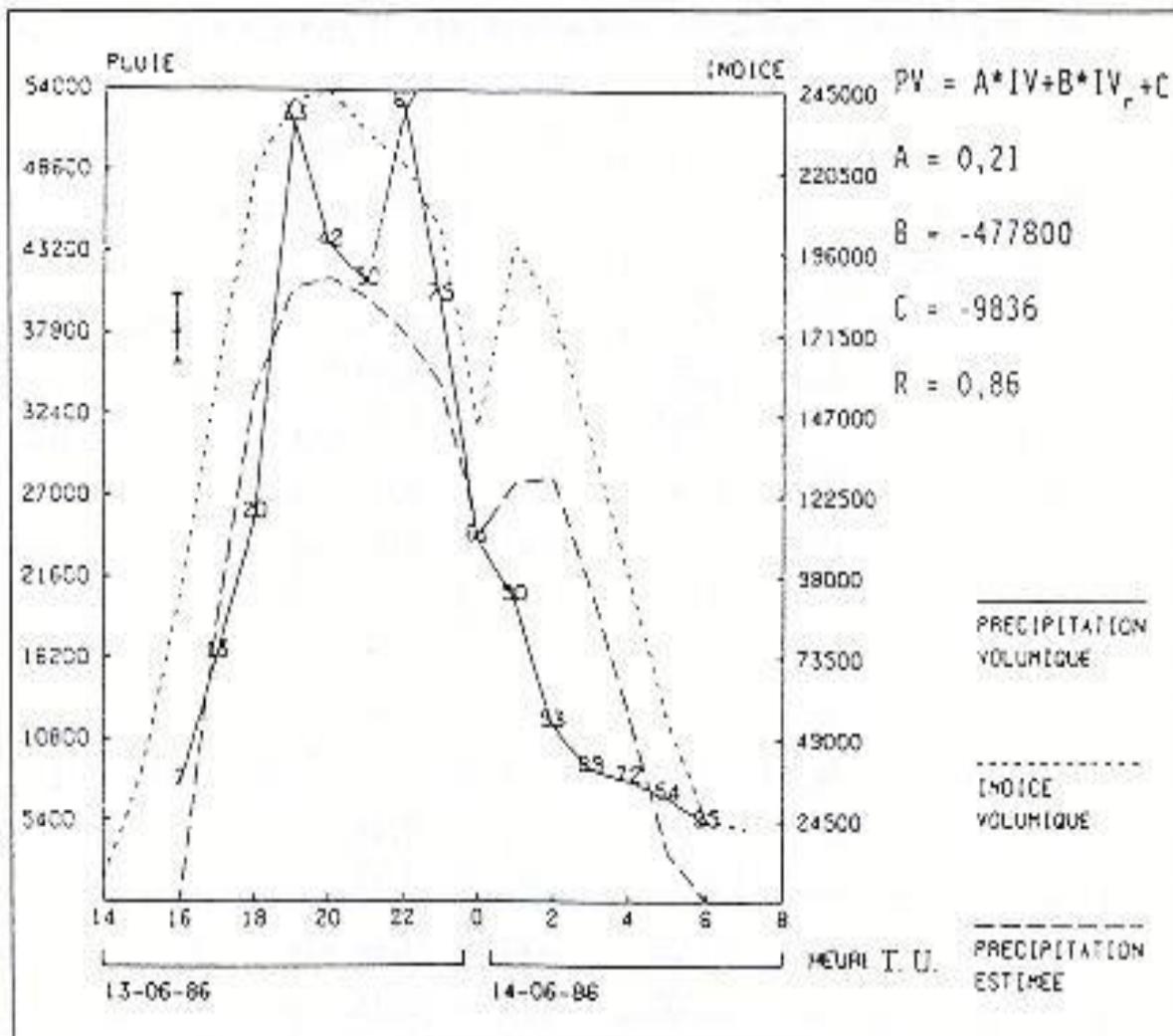


Fig. 6 : Évolution de l'indice de convection (trait plein) et de précipitation (tiret) et de l'indice estimé de précipitation pour l'amas du 13-14 juin 1986. La barre verticale donne l'écart quadratique moyen entre précipitations observées et estimées (Thiaw, 1988)

Pour l'étude précitée, les coefficients de corrélations entre indices volumiques et précipitations observées sont significatifs pour 11 amas sur les 17 suivis (tableau 5). Ce qui témoigne de l'efficacité de cette méthode.

Cependant, estimer la pluie de cette manière ne prend en compte que deux paramètres (aire de parcours du nuage et quantité d'eau précipitée par ce dernier), Aussi, son utilisation met en évidence un certain nombre de questions qui méritent d'être soulignées. Il s'agit notamment de l'environnement atmosphérique dans lequel évoluent les nuages pluvio-gènes, du rôle incontestable du degré de siccité et de la température de l'air. Le pouvoir évaporant de l'atmosphère traversée par la pluie peut inhiber les précipitations et par conséquent fausser les mesures au sol. De même, la vétusté, l'insuffisance et la mauvaise distribution spatiale des stations météorologiques soulèvent le problème de la fiabilité des relevés pluviométriques terrain, d'où la difficulté d'appliquer ce type de méthode sur une échelle spatiale fine, puisque peu de relevés seront effectués dans les stations météorologiques

Tableau 5 : Coefficients de régressions (A, B, C), coefficients de corrélations multiples R entre les précipitations observées et les indices volumiques (Thiaw, 1988)

Coeff. \rightarrow	A	B	C	R
N°amas \downarrow				
1	0,084	12308	853	0,23
2	0,21	-477800	-9836	0,86 *
3	0,088	-492800	10393	0,51 *
4	0,209	-157300	-923	0,5
5	0,105	120049	-369	0,9 *
6	0,005	-246600	12778	0,21
7	-0,001	894300	17264	0,38 *
8	0,200	1663	-2420	0,66 *
9	0,228	-557200	-988	0,95 *
10	-0,149	931300	8574	0,48
11	-0,008	409800	12953	0,41
12	0,099	17885	-1449	0,66 *
13	-0,018	1263000	14413	0,36
14	0,212	9385	-2940	0,73 *
15	0,132	114400	-1371	0,49 *
16	-0,086	263702	2449	0,88 *
17	0,191	8220	-305	0,86 *

Cette méthode s'apparente à celle de Reading qui combine les images satellitaires aux données synoptiques et aérologiques. Selon une classification empirique, un indice est attribué à chaque type de nuage selon sa pluviosité sur une grille de 2,5° de côté. Ce système de maillage semble, cependant, très large pour correspondre aux variables ponctuels prises en compte dans cette méthode (Mahé, 1992) qui est également plus physique que géographique.

Dans la partie suivante, seront présentés des méthodes statistiques développées soit au CIRAD (relation entre pluie cumulée et température de surface cumulée), soit à l'antenne ORSTOM de Lannion (rapport entre pluie mesurée et nuages pluviogènes). Elaborées depuis plusieurs années, ces méthodes ont également fait leurs preuves. Elles n'ont, pas pour autant, cessé d'être restructurées, remodelées dans le but d'une amélioration par la prise en compte d'éléments toujours plus nombreux et précis (voir Chapitre 6).

II. EXEMPLES DE MÉTHODES STATISTIQUES

Les méthodes statistiques d'estimation des pluies que nous allons exposer dans cette partie associent également aux informations satellitaires les données mesurées dans les stations d'observation au sol.

La première de ces méthodes, basée sur les relations entre relevés pluviométriques terrain et températures de surface mesurées par Météosat, a fait l'objet d'un test au Sénégal pendant les hivernages 1985 et 1986 (Séguin et al.). Pour améliorer cette approche statistique, un paramètre correcteur a, par la suite, été pris en compte et intégré dans les calculs de régressions linéaires.

La seconde méthode, appliquée au Niger, confronte quant à elle les nuages pluviogènes avec les données pluviométriques.

1. Relations Pluies-Températures de surface

Des travaux effectués sur les saisons d'hivernage 1984 (saison anormalement sèche) et 1985 (bonne pluviométrie) au Sénégal ont montré l'existence d'une forte corrélation linéaire entre le cumul des précipitations et celui des températures de surface (Assad, 1987). Cette relation entre ces deux paramètres a été confirmée par des recherches réalisées sur une région plus vaste (80 stations du Sénégal, Mali, Niger et Burkina Faso) pour la saison des pluies 1984.

Cette méthode statistique développée au CIRAD, part de l'hypothèse que, plus une région est arrosée et plus, à cause du refroidissement engendré par la pluie et l'évapotranspiration (couvert végétal plus dense) qui s'ensuit, sa température de surface doit impérativement chuter.

Partant de ce principe, des opérations statistiques visant à corrélérer ces deux paramètres aérologiques sont effectuées. Il s'agit d'abord de cumuler les températures de surface (T_s) mesurées par satellite et de faire la somme des précipitations relevées dans les stations d'observation. Cela pendant toute la saison étudiée (hivernage) et pour toutes les stations prises en compte.

La seconde étape consistera à effectuer une régression linéaire simple entre ces deux paramètres (fig. 7).

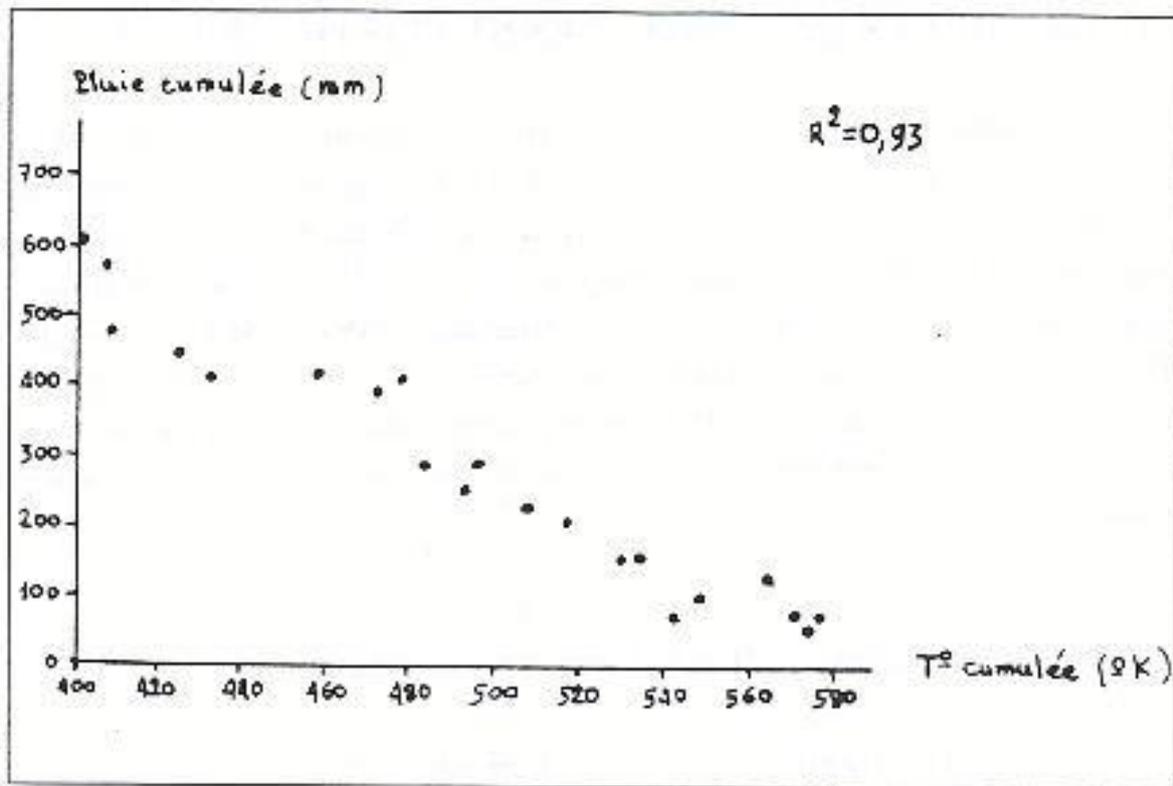


Fig. 7 : Relation Précipitations cumulées-Températures de surface cumulées (Sénégal : juin-sept. 1984) (Séguin et al., 1987)

Le coefficient de corrélation r issu de la régression est significatif avec un coefficient r^2 égal à 0,93. Cela confirme l'existence d'une bonne corrélation entre les deux éléments de l'opération.

De même, en comparant la carte des précipitations (fig. 8) établie à partir des relevés au sol (AGRHIMET) à celle obtenue par cette méthode d'analyse, on s'aperçoit de la concordance des isohyètes des deux graphiques.

L'efficacité de ce type d'approche, confirmée par les travaux réalisés la saison suivante : 1985 (fig. 9), a poussé les auteurs à tenter de l'améliorer en éliminant les impacts des facteurs atmosphériques de type effet de serre sur les valeurs de températures de surface enregistrées par Météosat.

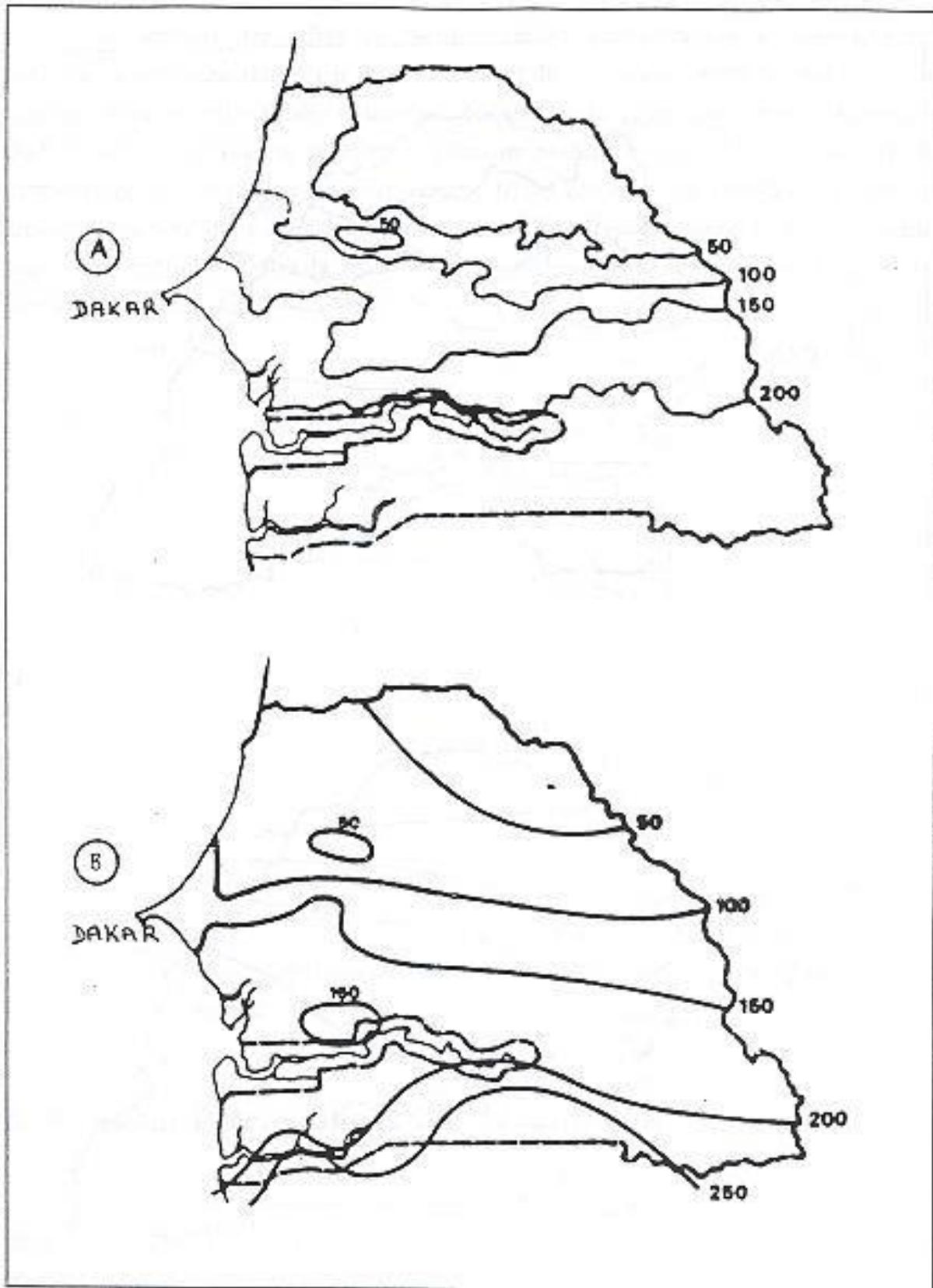


Fig. 8 : Comparaison entre isolignes météosat (A) et DMN Sénégalaise (B), sept. 1984
(Séguin et al., 1987)

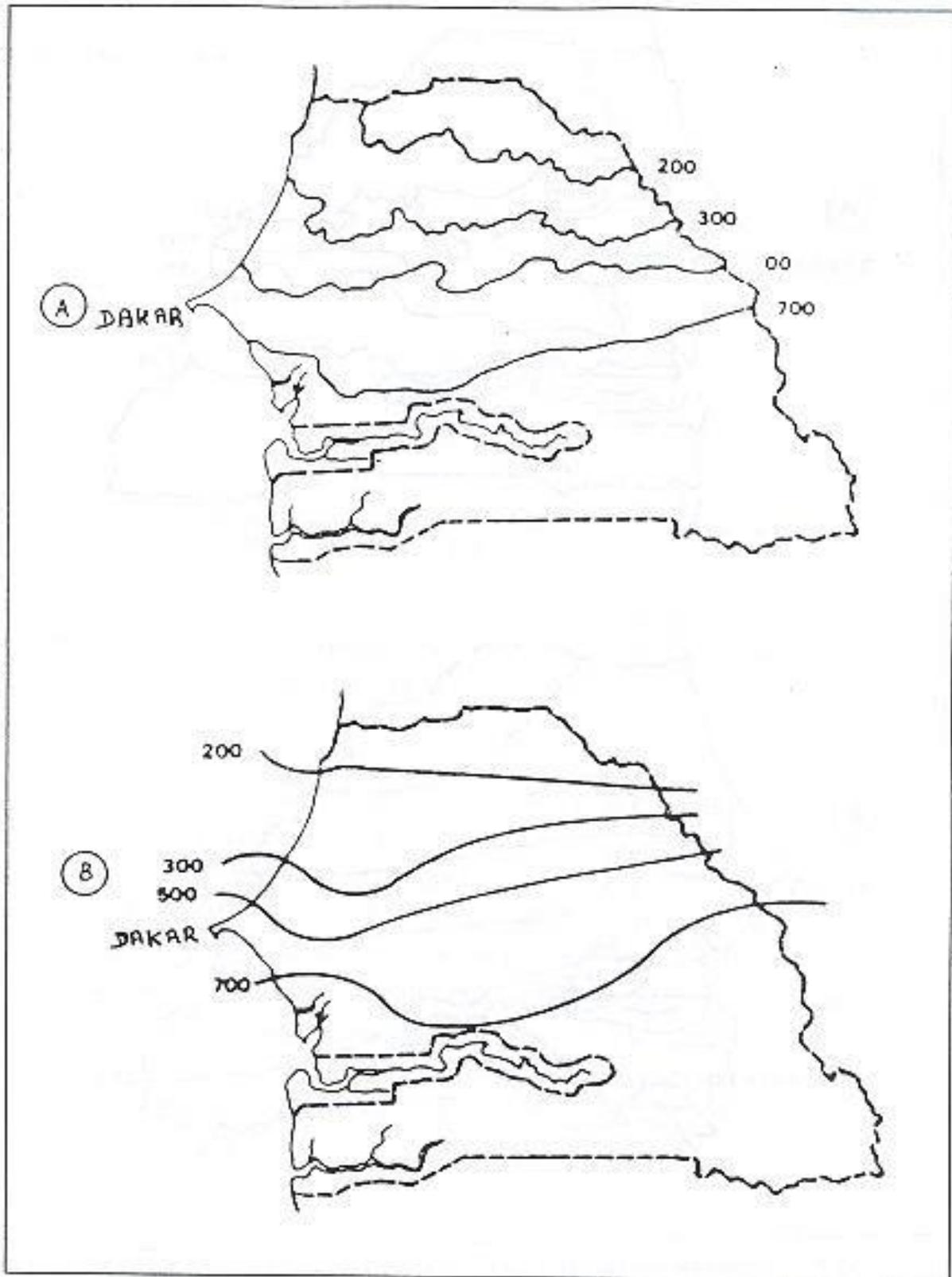


Fig. 9 : Comparaison entre isolignes météosat (A) et DMN Sénégalaise (B), juin-sept. 1985)
(Séguin et al., 1987)

Au Sénégal, les effets de l'environnement atmosphérique sur les mesures satellitaires sont caractérisés par un fort gradient de température entre les stations de la côte atlantique et celles situées à l'intérieur des terres mais également entre les régions du Sud et celles de la zone sahélienne. Pour minimiser cet impact atmosphérique, la température de l'air (T_a) a été prise comme terme correcteur et introduite comme un troisième élément dans les calculs de régression linéaires. La figure 10 issue de cette régression multiple montre la relation significative entre la somme des $T_s - T_a$ et les précipitations.

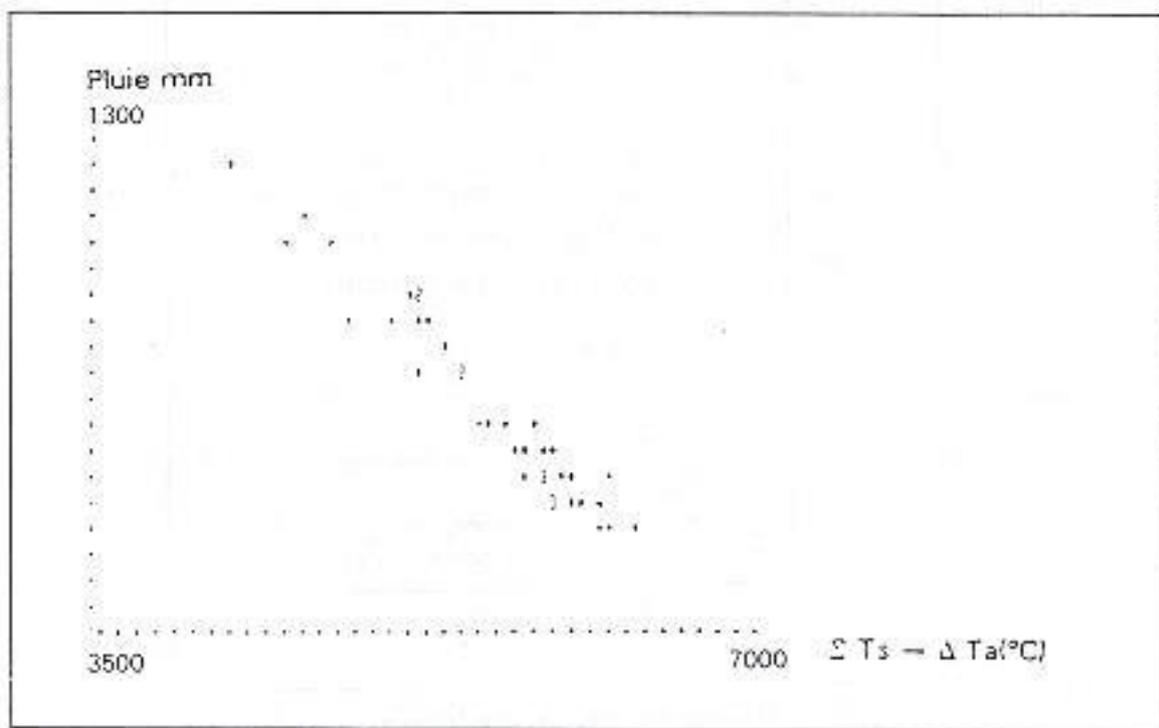


Fig. 10 : Relations Pluies-Températures (Cadet et al., 1991)

2. Relations Précipitations-Nuages pluviogènes

L'exemple qui nous intéresse dans cette partie a été, il y a quelques années, développé au CMS de Lannion. Comme la méthode de suivi des amas nuageux exposée plus haut, le seuil de température -40°C sert de référence de base pour l'identification et la sélection des nuages pluviogènes.

La première phase du traitement consiste à identifier puis à comptabiliser les occurrences de nuages pluviogènes sur les images du canal infrarouge thermique de Météosat. Ensuite, le cumul des pixels, à compte numérique correspondant au seuil

prédéfini, est effectué sur des échelles de temps allant de la décade (10 jours) à la saison (6 mois).

La localisation géographique des aires de nuages pluviogènes comparée aux champs pluviométrique correspondants, met en évidence sur l'ensemble de la saison, une bonne correspondance (fig. 11) entre ces deux paramètres (Lahuec J.P. et al., 1986).

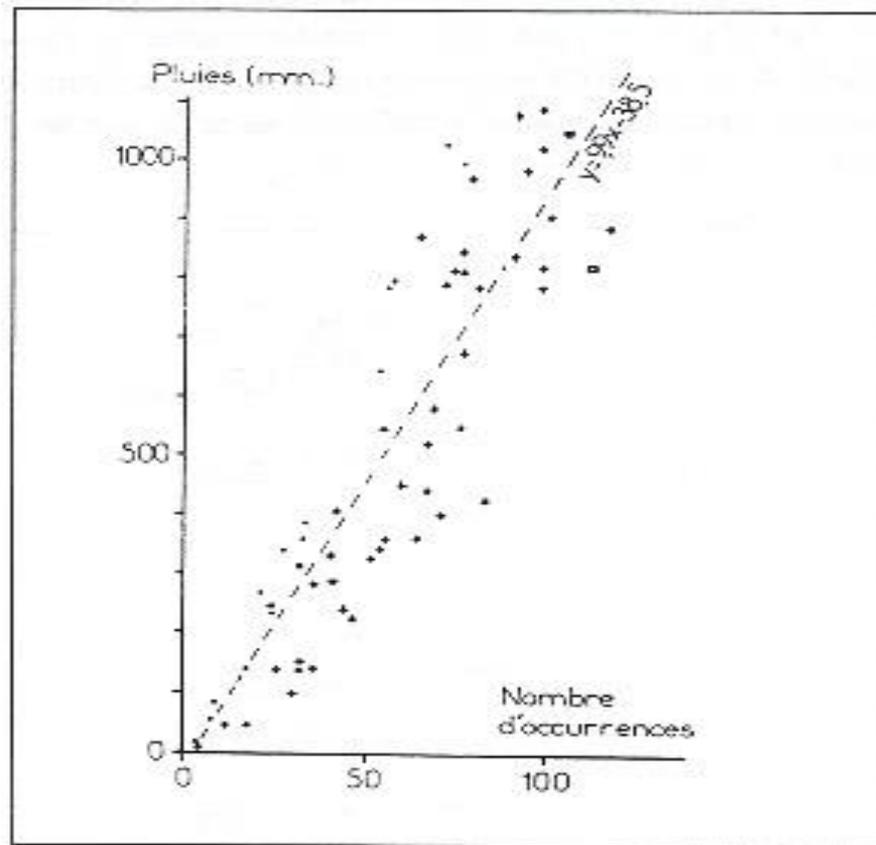


Fig. 11 : Relations Pluies-Nuages pluviogènes (Guillot et al., 1991)

Testée au Niger en 1986, cette méthode "Pcb" basée sur une relation linéaire simple entre pluies et nuages pluviogènes fait apparaître deux zones distinctes (fig. 12). La première située au Sud, reste, sous la trajectoire des lignes de grains, alors que la seconde, localisée au Nord, a une pluviosité en majorité liée à des manifestations orageuses isolées. De ce fait, pour éviter les confusions dans les traitements statistiques visant à corréler les cumuls des paramètres pris en compte dans cette méthode, les opérations se sont effectuées séparément. Toutefois, les coefficients de corrélations sont significatifs pour les deux régions et démontrent une bonne corrélation entre cumul des pluies et somme des occurrences (fig. 13).

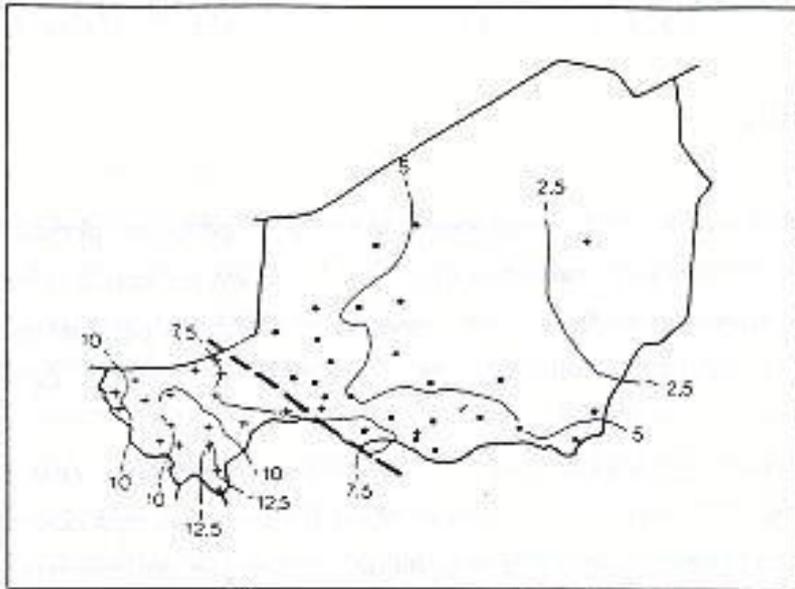


Fig. 12 : Carte des Pcb au Niger, en 1986.

- + stations de la région Sud-Ouest
 - Stations de la région Nord-Est
- (Guillot et al., 1991)

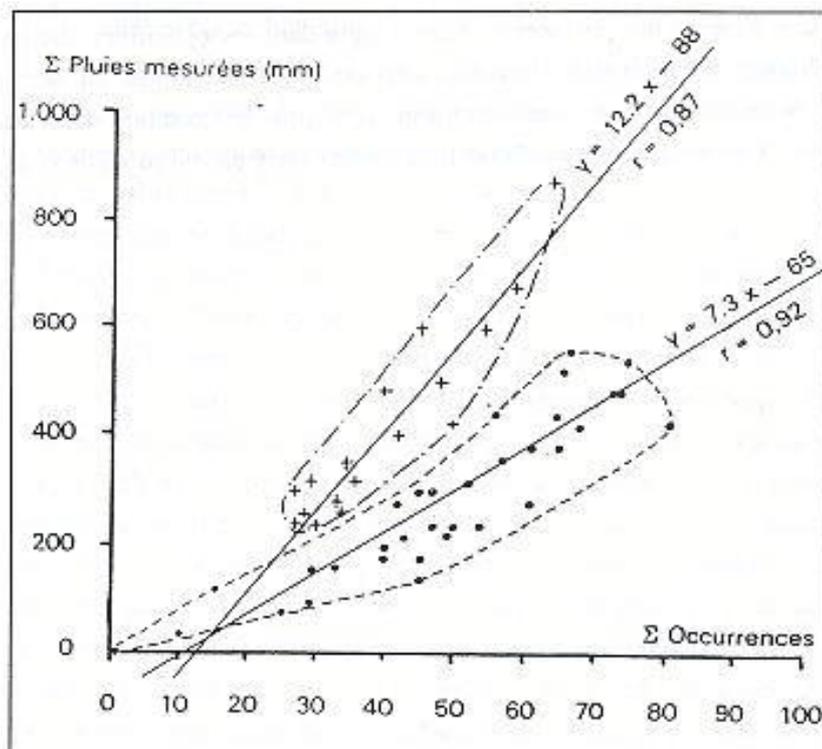


Fig. 13 : Relation pluviométrie-occurrences de nuages à sommet froid

- + Stations de la région Sud-Ouest
 - Stations de la région Nord-Est
- (Guillot et al., 1991)

Conclusion partielle

Les différentes méthodes exposées dans ce chapitre ont depuis quelques années fait l'objet de plusieurs restructurations, dans le but de les améliorer et de les adapter, au mieux, à l'ensemble du Sahel. Par conséquent, différents paramètres dont la latitude, la température de l'air ont été pris en compte et intégrés dans les opérations statistiques.

Cependant, les résultats issus de ces différentes méthodes d'estimation des pluies satisfont selon les zones d'application et selon les pas de temps adoptés. À travers les paramètres de l'environnement "géographique" et, non pas seulement, atmosphérique, on cherche à améliorer les résultats et à minimiser les erreurs dont la récurrence spatiale souligne le poids de l'état de surface du substrat.

Ce besoin d'amélioration apparaît nettement au Sénégal où des facteurs géographiques (océanité, topographie) compliquent les traitements. Nous y avons donc testés les deux plus récentes méthodes développées au CMS de Lannion (voir Chapitre 6).

Malgré la différence des éléments pris en compte dans les opérations statistiques, ces deux méthodes fournissent des résultats plus ou moins identiques sur le Sénégal ou d'autres facteurs devraient nécessairement être pris en compte dans les calculs statistiques. Cela ne fait que conforter les objectifs visés par cette étude (voir chapitre 5).

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE

Nous avons montré tout au long de cette partie comment les impacts de la sécheresse ont engendré la rupture de l'équilibre naturel des espaces géographiques et de l'atmosphère sous-jacente. Cette sécheresse à double origine est d'autant plus alarmante qu'elle a tendance à s'autoentretenir. Les écosystèmes naturels déstabilisés d'une part par la variabilité climatiques et d'autre part par l'action anthropique changent de physionomie. Au Sénégal, la zone semi-désertique gagne en latitude repoussant ainsi la zone humide pluvieuse vers le sud. Le recul du tracé de l'isohyète 100 mm d'environ 100 km vers la zone soudanienne entre les périodes 1931-1960 et 1968-1984 et 1987 en est une preuve incontestable (Le Borgne : 1988). La rupture des écosystèmes naturels a conduit la mobilité des entités géographiques prédéfinies (voir Chapitre 2), translation vers le Sud qui n'est autre que le reflet des conditions climatiques ainsi créées.

Alarmés par cette désarticulation exprimée par preuves “palpables”, les humains ont tenté de réagir efficacement en prenant en main la situation, afin de mieux la comprendre pour la gérer. Cela s'est traduit par la multiplication, à différentes échelles, des tentatives de lutte contre cet aléa persistant. Cependant, il est difficile de mesurer dans l'immédiat la fiabilité de certaines méthodes de lutte. Certaines intervention humaines, inefficaces parce que inadaptées, ont eu des conséquences tendant vers le déséquilibre ; elles ont immédiatement été abandonnées. D'autres, en revanche, à conséquences, sans doute, néfastes mais moins manifestes, parce que latentes, sont plus difficiles à contourner.

Ces démarches contradictoires reflètent bien la difficulté d'appréhension de l'évolution des milieux. Cette difficulté ne constitue cependant pas un handicap insurmontable pour l'homme dans son acharnement à vouloir mieux appréhender le milieu naturel afin de maîtriser les mécanismes qui rythment son évolution. Dans le cadre de la sécheresse sahélienne, cette perpétuelle recherche de compréhension s'est traduite par la multiplicité des travaux scientifiques de tous ordres. D'où l'établissement par les spécialistes du climat de diverses méthodes visant à évaluer les précipitations dans le but de quantifier le potentiel d'eau disponible à chaque saison. Cependant, toutes les approches ne sont pas applicables à toutes les entités géographiques de la bande sahélienne. Une méthode transposée d'une zone à une autre ne donne pas exactement les mêmes résultats, elle perd ou gagne en efficacité selon les influences physico-géographiques locales. Nous allons dans la partie suivante tenter de montrer les facteurs de cette divergence des résultats. Cela permettra de mieux comprendre les motivations premières de cette recherche.

Décrire et expliquer l'approche méthodologique constitueront également des lignes directrices dans la partie suivante.

TROISIÈME PARTIE :
OBJECTIFS, OUTILS ET MÉTHODES DE TRAVAIL

INTRODUCTION DE LA TROISIÈME PARTIE

Notre étude s'articule autour de la quantification et du suivi de l'évolution spatio-temporelle des paramètres géographiques et atmosphériques, cela en vue de définir et d'estimer les contraintes entravant l'évolution normale des processus pluviométriques.

Cette approche est d'autant plus difficile que les paramètres à étudier évoluent dans un environnement "naturel" (climat, morphopédologie, topographie, végétation, activité humaine...) complexe et varié. De ce fait, chacun d'entre eux devrait être appréhendé, d'abord, comme étant un système complexe évoluant dans ce milieu, ensuite, comme étant un maillon indispensable et, par conséquent, contribuant à l'équilibre de ce milieu.

La question que l'on se pose est : pourquoi le maillon précipitation est-il déstabilisé ? Quelles sont les causes et conséquences directes mais également indirectes de ce déséquilibre ? Ces causes sont-elles liées à l'évolution même d'un paramètre sous-estimé dans certaines recherches de solution, ou plus grave encore, à la rupture même d'une étape de l'interconnexion d'ensemble ?...

Devant ces questionnements, il nous a semblé que l'analyse et l'intercomparaison de ces paramètres atmosphériques et géographiques ne pourraient être réalisées que dans le cadre d'un SIG.

Pour rappel, un SIG est un outil ouvert à de nombreux champs d'applications faisant appel à l'utilisation conjointe d'une multitude de données souvent hétérogènes. Il pourrait également être défini comme étant un système informatique de gestion (acquisition, archivage), de traitement (manipulation, intégration) d'analyse (suivi, synthèse, affichage) d'informations géographiques (localisation) de natures, de sources et de structures diverses.

L'insertion de nos documents au sein d'une base de données sous format numérique permettrait, dans un premier temps, de surmonter les contraintes de stockage et de gestion du volume important des informations mais également d'établir, à la fin de nos recherches, des cartes synthétiques regroupant ces informations de manière thématique et relationnelle. Le recours à un tel outil répond parfaitement à notre problématique de recherche dont nous allons faire l'exposé dans le premier chapitre de cette partie.

Aussi, la réalisation d'une telle recherche passe nécessairement par une mise en perspective dans l'espace des informations acquises. Ne disposant que d'un nombre de

stations météorologiques très limité (19 au total) la localisation graphique et par conséquent la globalisation de ces informations dans l'espace fait, inévitablement, appel à des fonctions d'interpolation.

Après un aperçu des données et logiciels utilisés, nous allons, à travers l'exposé de notre méthodologie, expliquer par quelles approches nous avons pu réaliser nos recherches tout en restant fidèle à notre objectif de départ : celui de déterminer la part de chaque paramètre dans le développement de la pluviogenèse et, par conséquent, de distinguer les éléments susceptibles d'améliorer les méthodes d'estimation des pluies préexistantes.

CHAPITRE V :

RAPPEL DE LA PROBLÉMATIQUE ET DONNÉES DISPONIBLES

Nous avons, dans les parties précédentes, présenté notre zone d'étude dans son contexte physico-géographique global. L'évolution actuelle du climat dans cette région sahélienne sous influence océanique a, également, été mise en évidence.

Ces deux parties étaient, par conséquent, une sorte d'entrée en matière qui doit permettre par la suite de comprendre les motivations de cette étude. Ces objectifs déjà définis dans l'introduction générale, méritent, toutefois, d'être développés plus largement. Cela permettra, dans un premier temps, de comprendre certains choix, notamment les échelles temporelles (hivernage 1990 et pas de temps décadaire) adoptées pour cette étude mais aussi, de redéfinir l'apport de la géographie à la climatologie. Ce propos qui explique, également, la diversité des documents exploités dans notre étude sera l'objet de ce chapitre.

I. POURQUOI LE RECOURS À LA TÉLÉDÉTECTION ET À L'ÉLABORATION D'UN SIG

1. La télédétection en climatologie tropicale

Pourquoi avoir recours à la télédétection pour évaluer, estimer, et, par conséquent, spatialiser les précipitations au Sahel ? Est-ce une panacée universelle applicable dans tous les espaces géographiques du globe ?

La difficulté d'accès à certaines zones, l'insuffisance et l'imperfection (erreurs de localisation, mesures souvent peu fiables) des mesures in-situ, ne peuvent conduire à une explication cohérente des processus spatio-temporels régissant la convection.

Seule la télédétection spatiale permet de couvrir, depuis l'espace, de grandes surfaces et d'acquérir, sur une échelle de temps longue une masse de données fiable et homogène. De ce fait, c'est la seule approche qui permet d'effectuer un suivi efficace des divers paramètres d'un milieu, qui chacun évolue à un rythme différent : horaire pour les nuages, saisonnier pour la végétation, millénaire pour la morphologie.

Les résultats satisfaisants obtenus dans diverses régions du globe constituent des preuves que les outils techniques modernes (satellites d'observation de la terre) restent de loin des moyens indispensables pour le suivi et l'évaluation des

phénomènes météorologiques de certaines zones, même si l'exportation des procédures et les changements d'échelle affectent souvent les résultats issus de ces méthodes.

La télédétection est particulièrement utile dans les pays sahéliens, où, non seulement, le suivi des précipitations reste fondamental mais où, paradoxalement, les stations de mesures au sol sont peu denses et mal entretenues.

L'utilisation des mesures acquises par satellite pour substituer les relevés effectués aux stations sol, dans des conditions souvent discutables, fournit, de plus en plus, de résultats jusqu'alors insoupçonnés ; même si l'efficacité des résultats s'avèrent bonne dans certaines régions du globe et beaucoup moins dans d'autres.

Cela est-il lié à l'utilisation de méthodes différentes ? On constate que, la plupart des méthodes de télédétection ne sont pas transférables d'un endroit du globe à un autre. Cela a conduit à la recherche d'améliorations, par de multiples méthodes d'application, de la télédétection totalement différentes mais parfois complémentaires.

Cette tentative d'utilisation, d'appréhension de techniques modernes pour évaluer, estimer et même expliquer certains phénomènes météorologiques s'est grandement accentuée dès lors qu'elle s'est ouverte à diverses sciences.

En effet, les méthodes statistiques, mathématiques, physiques, n'ont cessé de s'accroître au fil des ans. Et la télédétection devient ainsi une base fondamentale mais également un tronc commun à plusieurs disciplines n'ayant ni la même problématique de départ, ni la même démarche mais aboutissant, toutefois, à des résultats plus ou moins complémentaires.

Ayant fait l'objet de nombreux travaux de recherches, l'utilisation de la télédétection quant à l'évaluation de certains phénomènes météorologiques en Afrique de l'ouest a donné quelques bons résultats en fonction des régions. Cependant, la plupart des méthodes appliquées pour évaluer les précipitations ne donnent pas de réponses satisfaisantes au pas de temps décadaire et à une échelle spatiale fine et donc, elles ne répondent pas, complètement, aux besoins des agrométéorologues (Cadet D.L. et Guillot B., 1991).

C'est le cas du Sénégal où ce fait semble exagéré par une certaine originalité climatique. La position de finistère qu'occupe, géographiquement, le pays a-t-elle une influence déterminante sur le climat ? La proximité de l'océan atlantique impose-

t-elle des nuances à certains paramètres atmosphériques, modifiant ainsi le schéma climatique général plus ou moins commun à tous les pays sahéliens ?

Certaines de ces méthodes d'estimations des pluies ont eu recours à la latitude pour reconstituer l'environnement physique des nuages, d'autres à la température de l'air pour stabiliser les variations spatio-temporelles des facteurs thermiques. Ce phénomène est-il donc directement liée aux mécanismes mêmes de la circulation générale, à savoir la remontée du FIT et, par conséquent, à la dynamique des centres d'action ?

2. Introduire plusieurs échelles

Face à toutes ces interrogations, sans véritable réponses, il s'avère impératif de faire un effort pour introduire des corrections dans les zones de non validité de certaines méthodes, en se basant sur d'autres paramètres comme les données pluviométriques du réseau (Nègre T. 1987). Ainsi, nous avons trouvé fort intéressant d'employer des méthodes permettant de faire intervenir, en même temps, plusieurs éléments de l'environnement local qui, jusqu'alors, étaient peu pris en compte.

De ce fait, l'objectif principal de cette thèse est de développer un SIG permettant de relier les paramètres climatiques (températures, précipitations, humidité relative, évaporation, tension de la vapeur d'eau, vitesses et direction du vent), la couverture végétale (indices de végétations), la qualité du substrat (relief : hydrographie et morphopédologie) et le développement de la convection atmosphérique (occurrences de nuages à sommets froids) au Sénégal.

Cette étude se voudrait, également, une contribution aux recherches appliquées pour l'évaluation des précipitations. Elle tient compte, d'une part de l'environnement atmosphérique dans lequel évoluent les nuages pluviogènes en intégrant tous les paramètres météorologiques, et, d'autre part de l'environnement géographique (substratum terrestre et océanique), déterminant quant à l'évolution des paramètres en question. Cela permettrait de déterminer, de manière plus ou moins directe, la part de chacun de ces éléments dans le développement de la pluviogenèse mais, également, de distinguer l'élément le plus pertinent qui, par conséquent, devrait prioritairement être pris en considération dans l'application de certaines méthodes d'estimation des pluies.

L'utilisation combinée de ces divers paramètres atmosphériques et géographiques est d'importance dans la mesure où la part directe de certains éléments dans le

développement de la pluviométrie au Sahel était, soit définie ou illustrée de manière descriptive pour des études essentiellement synoptiques, soit sous-estimée.

En effet, la confrontation des données atmosphériques et géographiques n'a pas souvent fait l'objet de recherches d'interdépendance, d'interconnexion par suite du fait qu'elle se situait à la charnière de différentes échelles (FIT : zonal ; synoptique : régional ; substrat : local ; etc.).

Ainsi, nous nous sommes fixés, comme objectif primordial, le suivi de l'évolution spatio-temporelle de chacun de ces éléments. L'étude du comportement de chaque paramètre dans l'espace et dans le temps permettrait de mieux appréhender le type d'environnement idéal pour l'évolution de chacun, mais également, de définir la place et la part de chaque maillon pour l'autoentretien du milieu.

Cette étude va, également, s'articuler, de façon particulière, autour de recherches de corrélations significatives entre ces divers éléments, dans le but de définir l'importance de l'interconnexion de ces paramètres dans le dynamisme de la pluviogenèse mais aussi de déterminer leurs comportements et leurs réponses face à la carence pluviométrique.

A travers toutes ces tentatives de recherches de causes, d'effets, de réponses des divers paramètres de l'environnement, la démarche essaie de rester fidèle à une perspective finale qui devra consister en l'établissement de cartes synthétiques et la régionalisation des paysages climatiques en fonction de l'efficacité des systèmes convectifs.

3. Variabilité temporelle : choix de l'hivernage 1990

Nos travaux seront cependant limités à l'hivernage 1990 (mai à octobre). Pourquoi l'hivernage 1990 ? Tout simplement parce que cette année particulièrement sèche (Fig. 1) revêt une caractéristique singulière au Sénégal.

En dépit de la siccité qui caractérise cette année 1990 (déficit pluviométrique de 60% de la norme sur l'ensemble du Sahel), au Sénégal, les précipitations ont été "hésitantes" en début de saison (Diagne et al., 1990).

Ce démarrage tardif du cycle pluviométrique suppose déjà un bouleversement du calendrier cultural, cela d'autant que, nous savons que dans ces régions majoritairement rurales et où la population se nourrit, généralement, de sa propre

production agricole, c'est moins le total annuel des précipitations qui importe que leur répartition dans l'année.

Pendant cette saison 1990, on a constaté de fréquentes incursions des alizés provenant de l'anticyclone des Açores sur le Nord-Ouest du Sénégal. De plus ces incursions ont connu une extension méridionale et zonale plus importante même au cœur de l'hivernage et ont constitué, compte tenu des caractères hygrométriques et thermiques des flux ainsi advectés, un facteur contraignant, voire, paralysant à l'activité pluvieuse (Sagna P., 1992).

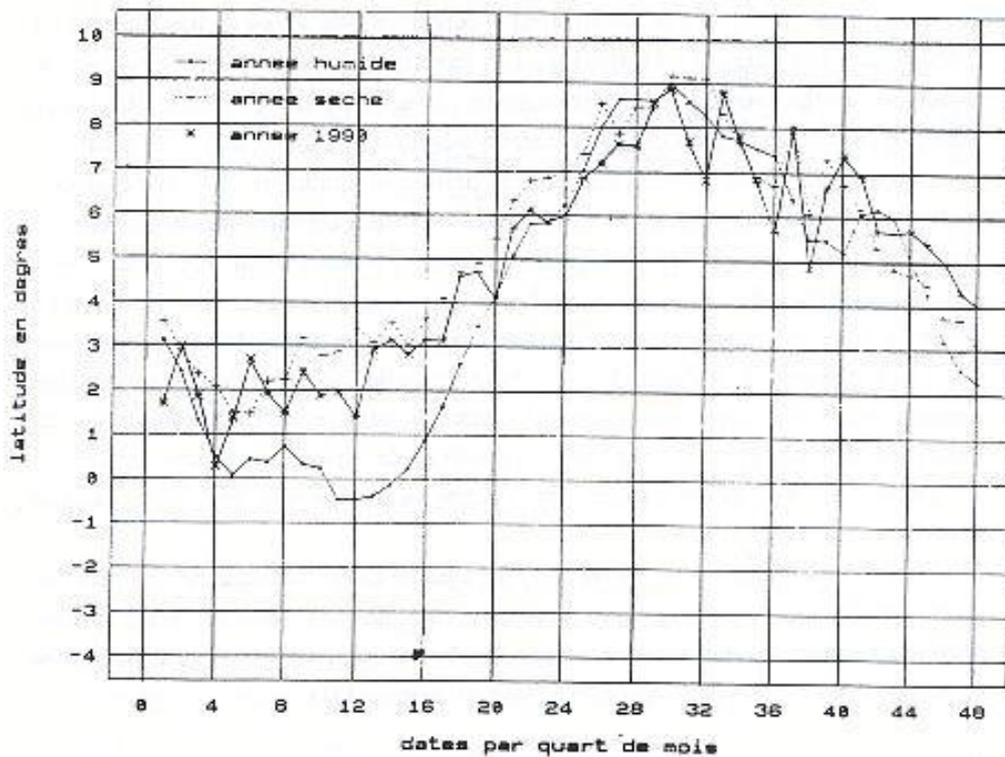


Fig. 1 : Position de la ZITC le long de 28°W (Citeau J. et al., 1990)

Aussi, la comparaison des lames d'eau précipitées sur le bassin du Sénégal au cours des années 1986 à 1992 (fig. 2), démontre que l'année 1990 est loin d'atteindre la pluviosité de la période "humide" : 1950-1965 (Carn M. 1993). Un minimum a été observé dans la région du fleuve avec un cumul atteignant 50% seulement de la norme (Citeau et al., 1990). Pour l'ensemble du Sénégal, ce fait est confirmé par la différence entre les valeurs pluviométriques de l'année 1990 et celle de la période dite "normale" : 1931-1960 (tableau 1).

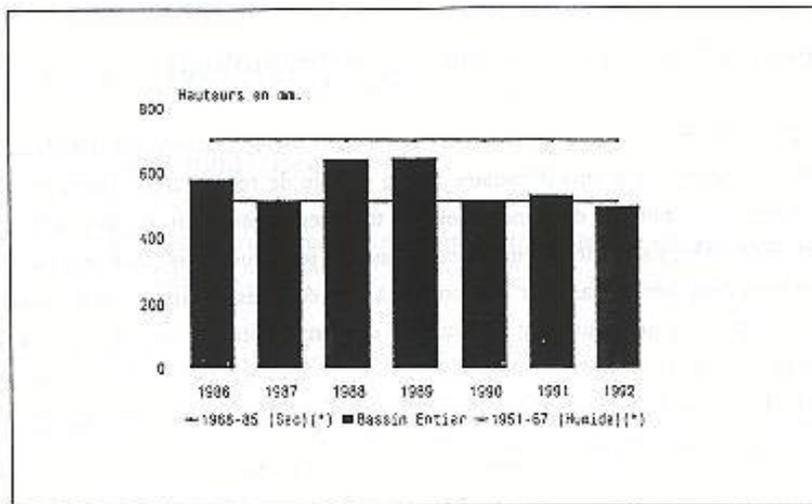


Fig. 2 : Lames d'eau précipitées sur le bassin du Sénégal au cours des saisons des pluies 1986 à 1992 (Cam, 1993)

Tableau 1 : Précipitations annuelles en 1990 et écarts à la période "normale" 1931-1960

stations	p.mes en 1990 (mm)	p.mes en 1931-1960 (mm)	écarts en mm
Bakel	361,3	712,0	- 350,7
Bambey	387,0	684,0	- 297,0
Dakar	261,4	578,0	- 316,6
Diourbel	431,5	700,0	- 268,5
Kaolack	446,8	796,1	-3 49,3
Kédougou	889,9	1263	- 373,1
Kolda	785,2	1269,2	- 484,0
Linguère	327,3	535,0	-207,5
Louga	289,0	421,2	- 132,2
Matam	386,2	536,7	- 150,5
Mbour	413,6	747,0	- 333,4
Nioro du Rip	554,1	924,8	- 370,7
Podor	128,1	333,5	- 205,4
Saint-Louis	194,4	341,4	- 147,0
Tambacounda	723,8	942,2	- 218,4
Thiès	403,9	694,0	- 290,1
Vélingara	681,3	1093,5	- 412,2
Ziguinchor	1115,8	1547,0	- 431,2

Pour appuyer ces travaux descriptifs, il nous a semblé judicieux d'observer, de rechercher à travers l'évolution spatio-temporelle et l'interconnexion des paramètres atmosphériques et terrestres (format numérique : voir chap. 2), les principales causes de ce bouleversement pluviométrique pendant l'hivernage 1990

4. Des résultats au service de l'agroclimatologie

Pour rester fidèle aux besoins des populations locales, l'ensemble des documents exploités est au pas de temps décadaire. Cette échelle de temps, très caractéristique de l'agroclimatologie, nous a, également, semblé très pertinente pour le suivi efficace de certains phénomènes météorologiques, cela d'autant que nous pouvons, par cumul des résultats décadaires, basculer facilement à des échelles de temps plus vastes. Ce choix est déterminé par des raisons de commodité, en rapport avec la masse imposante de cartes issues de nos résultats de synthèses (18 cartes pour chaque paramètre). Leur nombre reste encore maîtrisable si l'on se réfère au temps qui nous a été imparti pour la réalisation de cette recherche.

Mener cette étude à l'échelle journalière serait très intéressant, car ce pas de temps plus fin serait très concluant quant au suivi de l'évolution de certains phénomènes, dont l'évaporation et les occurrences de nuages pluvio-gènes. Cependant, les difficultés en matière de gestion, de stockage des résultats finaux, ajoutées aux problèmes d'acquisition des images satellitaires, de données sol qui pour la plupart restent indisponibles à cette échelle, ont été autant de facteurs dissuasifs. Cela pourrait éventuellement faire l'objet de recherches ultérieures mais sur des périodes courtes, bien ciblées et des espaces restreints considérés comme secteurs tests.

Ainsi, seront exposés dans la deuxième partie de ce chapitre, les divers paramètres analysés, leur rôle et donc la nécessité de les intégrer dans cette étude. Seront également abordées les différentes modes d'acquisitions de ces documents et les difficultés liées à cela.

II. DONNÉES UTILISÉES

1. Paramètres terrestres et aérologiques

1.1. Cartographie numérisée

Nous disposons de trois types de supports cartographiques (tableau 2) numérisés sous Arc Info (voir chapitre 2)

Tableau 2 : Informations relatives aux documents cartographiques de base

Nature du document	Echelle spatiale	Source	Traitements (voir chapitre 2)	Résultats
Relief	1/1 000 000	IGN 1963	numérisation pentes	lignes
Réseau hydrographique	1/1 000 000	IGN 1963	numérisation	lignes
Pédologie	1/500 000	CSE 1994	numérisation	polygones

1.1.1. Topographie

Il s'agit de la carte topographique du Sénégal, réalisée par l'I.G.N. à l'échelle du 1/1 000 000. Dans un premier temps, nous avons procédé à la digitalisation (voir chapitre 2) de ce fond topographique dans le but de représenter, sous format numérique, le relief dans toutes ses unités morphostructurales.

Du fait de la très petite échelle (1/1 000 000) de la carte topographique, cette tâche n'a pas été facile, d'autant plus que, au lieu d'indiquer de manière brève les grands traits dominants du relief, qui, du reste, est relativement plat, nous avons voulu transposer avec précision les détails des formes (pentes exposition) susceptibles de jouer un rôle par rapport à l'ascendance des masses d'air.

Le support topographique numérique, malgré sa très petite échelle nous permet d'avoir, non seulement, un aperçu global du relief mais, également, de mieux appréhender son rôle et les influences plus ou moins directes qu'il joue sur le développement de la convection atmosphérique.

L'exploitation de ces données de relief à une échelle très fine, appliquée dans un système d'informations géographiques, fera également l'objet d'un test, car si les résultats obtenus s'avèrent intéressants, l'exploitation de supports numériques établis à partir de cartes topographiques à échelles très réduites pourrait faire l'objet d'un élargissement dans beaucoup de pays sahéliens, dont le relief est généralement transposé de manière "quasi microscopique".

Pour ce qui est du Sénégal, rechercher le rôle du relief sur le développement de la pluviogenèse semble a priori une affaire aisée, dans la mesure où il est assez monotone (voir partie présentation de la zone d'étude) dans la plupart du pays.

En effet, la courbe de niveau 50 mètres couvre la quasi-totalité du pays. Cependant l'extrême Ouest et le Sud Est qui, en quelque sorte, est un continuum du Fouta-Djalou, ont un relief plus varié. On y constate un resserrement des courbes de niveau lié à un escarpement plus marqué. Il est, par conséquent, très intéressant de suivre l'évolution de la pluviométrie dans ces divers ensembles topographiques.

Ce suivi permet de répondre aux interrogations relatives au démarrage des saisons pluvieuses dans le Sud-Est et au questionnement sur les totaux annuels de cette région qui ne sont jamais les plus élevés. Quelle est donc la part du relief dans le développement et dans la distribution spatiale de la pluviométrie ?

1.1.2. Réseau hydrographique

Il a également fait l'objet d'une numérisation très minutieuse, parce qu'il fallait représenter de façon très précise tous les détails relatifs aux divers cours d'eaux existants. Nous avons, dans un premier temps, selon certains critères physiques et morphologiques, commencé par une segmentation du réseau hydrographique, afin de dresser une sorte de nomenclature où il était possible de distinguer les cours d'eaux pérennes de ceux dont l'activité est étroitement liée au rythme des saisons et qui sont, par conséquent, semi-permanents. La contribution des premiers au démarrage de la saison des pluies n'est pas négligeable, tandis que la contribution des seconds n'intervient qu'après une amorce associable à d'autres facteurs.

Le réseau de drainage, tributaire de la pluviométrie, se manifeste, en réalité, par l'existence de vallées de plus en plus tarées, voire mortes, en fonction de l'aggravation de la sécheresse dans la région. Ainsi nous nous sommes trouvés en présence d'un réseau hydrographique victime de la sécheresse et donc peu actif : caractérisé principalement par les grands fleuves Sénégal, Casamance et Gambie, mais également par quelques bras de mer (avancée de l'eau de mer dans les vallées sèches) et lacs. Ces trois principaux fleuves, bien que, s'adaptant, chacun à sa manière, à la siccité répétitive qui frappe leur bassin-versant, ont bien des fois subi cet aléas climatiques.

Le Sénégal qui est pourtant le plus important, de par sa longueur, sa taille, et son volume (voir partie présentation de la zone d'étude) était totalement à sec par endroits en 1983. Cela surtout dans la partie Nord du pays où les bergers pouvaient, avec ce qui restait de leurs troupeaux, rejoindre les deux rives du Sénégal et de la Mauritanie. Ce phénomène a eu des conséquences néfastes par suite du déferlement des eaux de l'océan atlantique et donc de la salinisation des eaux du fleuve Sénégal (d'où la nécessité de construire le barrage anti-sel de Diama), mais également par la modification de tous les écosystèmes locaux.

Cela confirme une réelle interdépendance entre le réseau hydrographique et l'évolution de certains phénomènes météorologiques. Ces rapports de causes à effets entre hydrographie et précipitations ne sont pas toujours bien connus.

Le passage des pluies au débit s'effectue généralement par l'intermédiaire d'autres phénomènes comme l'évaporation. Or celle-ci est dans une certaine mesure étroitement liée à la vitesse du vent, à l'insolation et à l'humidité de l'air qui est indispensable pour le développement de la convection. Cet ensemble de liaisons causales fait également intervenir la taille du bassin versant (les petits n'ayant pas la même réponse spectrale que les grands sur les images satellitaires) et d'autres paramètres, dont la qualité du substrat (porosité, infiltration, salinisation, érosion, etc.), la localisation (proximité des océans, zone sèche, humide...), l'orientation du lit des cours d'eaux (vallées encaissée, deltas inondables, etc.). Tous ces facteurs plus ou moins complexes soulignent la nécessité de recherches systématiques et concrètes permettant de restituer les relations entre réseau hydrographique et convection locale, et donc les conséquences de ces liens sur la répartition des précipitations.

1.1.3. Morphopédologie

La carte morphopédologique dont nous disposons provient du C.S.E. de Dakar. C'est un organisme sénégalais qui regroupe des locaux européens et canadiens effectuant en collaboration des recherches plus ou moins appliquées. Ils ont pour objet de recherches le développement de plusieurs thèmes concernant l'environnement. La carte morphopédologique que nous avons exploitée est entièrement produite par eux au terme de divers déplacements sur le terrain en vue de vérification, et de multiples opérations mathématiques en vue de transcription numérique.

Cette synthèse finale de la morphopédologie sous format numérique est à l'échelle du 1/500 000 (petite échelle). Néanmoins, elle illustre de manière très complète la typologie, la structure et enfin les différentes caractéristiques de la morphopédologie au Sénégal.

La seule difficulté à laquelle nous avons été confrontée quant à l'exploitation de cette carte a été d'ordre purement technique. Ce document cartographique a été transcrit numériquement sous format Arc Info P.C., tandis que notre laboratoire de recherche est équipé de la version station (voir chapitre 2).

De ce fait, la conversion des données originales vers un nouveau format de lecture nous a causé un certain nombre de tourments à caractère informatique.

L'étude de la texture, de la qualité et enfin de la structure morphopédologique va nous permettre d'abord de situer spatialement les types de sol par rapport à la répartition géographique de la pluviométrie. Cela pourrait, ensuite, nous donner des renseignements concernant la qualité du support sur lequel repose la végétation, dont le rôle reste incontestable dans le développement de la pluviométrie.

La classification des divers types de sol et leur localisation dans l'espace géographique permet également de mieux appréhender leur rôle plus ou moins direct dans la sécheresse. Ces rôles seront différents selon la qualité même des sols. Un sol halomorphe a une réponse spectrale différente d'un sol hydromorphe, ce qui entraîne une différence sur les valeurs de l'albédo, cela d'autant plus qu'ils ne sont pas occupés par le même type de végétation.

De même, la hauteur de la nappe phréatique est beaucoup plus importante sous un support perméable, alors que les sols imperméables seront plus exposés à l'érosion provoquée par l'écoulement des eaux ne pouvant pas s'infiltrer rapidement. Ce phénomène est d'autant plus accentué que, là aussi, la formation végétale ne peut pas être la même. Dans les zones de fort écoulement les sols sont de plus en plus appauvris, la végétation de plus en plus squelettique, ce qui localement n'est guère favorable à l'humidification des masses d'air par phénomènes évapotranspiratoires, par conséquent à l'installation des conditions favorables à la pluviométrie. Cela est exacerbé par la faible densité du couvert végétal dont les rares espèces existantes utilisent de nombreuses méthodes d'adaptation à la sécheresse, souvent au détriment d'autres espèces, pour survivre dans ces milieux difficiles (voir Deuxième Partie).

Une recherche approfondie concernant les rapports entre la structure, la texture, et, par conséquent, la qualité des sols et le type de végétation spécifique à chaque état de surface permet de mesurer les relations plus ou moins directes pouvant exister entre ces divers facteurs et la pluviométrie locale.

1.2. Paramètres aérologiques

L'acquisition des données sol a fait l'objet de plusieurs déplacements à Dakar puis dans l'ensemble du pays. La plupart des données utilisées proviennent de L'ASECNA et de la D.M.N. sénégalaise. Ce sont des mesures relevées à la main et de manière plus ou moins régulière par des météorologistes de terrain appartenant à ces différents organismes. Ces documents existent sous forme d'archives mais sont difficilement exploitables car ils exigent des déplacements en vue de recopier uniquement manuels (pas de photocopieuse pour les utilisateurs potentiels). Sauf

pour la pluviométrie, les mesures sont effectuées à un intervalle tri-horaire ; ce qui revient à 8 relevés par 24 heures pour chaque paramètre climatique (voir annexe). Cela se traduit donc bien vite par une masse assez imposante de données vu le nombre de paramètres exploités.

Après avoir amassé ces documents bruts, nous avons effectué une série d'opérations de calculs adaptés à l'utilisation de chaque paramètre, afin d'obtenir des valeurs décennales qui, après plusieurs étapes de vérification, ont fait l'objet d'une saisie minutieuse sur micro-ordinateur.

Le réseau de stations de mesure à partir duquel nous avons travaillé est très peu fourni par rapport à l'étendue de notre zone d'étude. Il est composé de 19 sites au total. Ce facteur limitant est aggravé par le fait que les stations sont très mal distribuées géographiquement. La bordure océanique est largement couverte alors que l'intérieur du pays reste quasi vide (fig. 3), ce qui suppose un recours à des moyens mathématiques et, ou informatiques pour combler ce manque d'information. Ce phénomène de faible densité et de mauvaise répartition spatiale des stations météorologiques, très fréquent dans nombre de pays du tiers monde, constitue un obstacle majeur auquel sont confrontés la plupart des climatologues opérant sur l'ensemble de la zone sahélienne.

Pour certains paramètres comme la température et la nébulosité, on pourrait éventuellement tenter de pallier ce vide, cette absence de relevés terrain, en se référant uniquement aux données satellitaires, cela d'autant plus que pour la nébulosité, certaines formations nuageuses considérables à plusieurs égards, ont été véritablement découvertes grâce aux satellites (Lamarre D., 1991).

Pour ce qui est des températures et des précipitations, une étude comparative entre cartes établies à partir de relevés sol et cartes réalisées à partir de mesures satellitaires sur la même période pourrait nous fournir des réponses concernant d'abord la qualité de certaines méthodes d'interpolation utilisées pour couvrir les zones dépourvues de stations météorologiques, ensuite la nécessité ou non de substituer ces techniques nouvelles aux méthodes classiques.

A partir des résultats obtenus, on pourrait évaluer l'efficacité des méthodes de substitution et de validation de ces deux types de mesures d'origines diverses. Pour ce qui est des maxima de températures radiatives, on s'aperçoit que cette possibilité s'avère parfois intéressante et par conséquent mérite une attention particulière (voir Quatrième Partie), principalement dans l'intérieur du Sénégal (zone très sèche) alors

que pour la zone un peu plus humide, l'énorme quantité de vapeur d'eau fait que nous sommes souvent en présence d'une atmosphère saturée, ce qui fausse de façon régulière les valeurs de températures radiatives captées directement par les satellites d'environ 50° C. Nous avons éliminé de notre étude tous les paramètres non mesurés de manière assidue dans les 19 stations du réseau, parce que l'exploitation de ce genre de données trop limitées risquerait de fausser toutes tentatives d'interpolation (sous-estimation ou surestimation des valeurs issues des calculs).

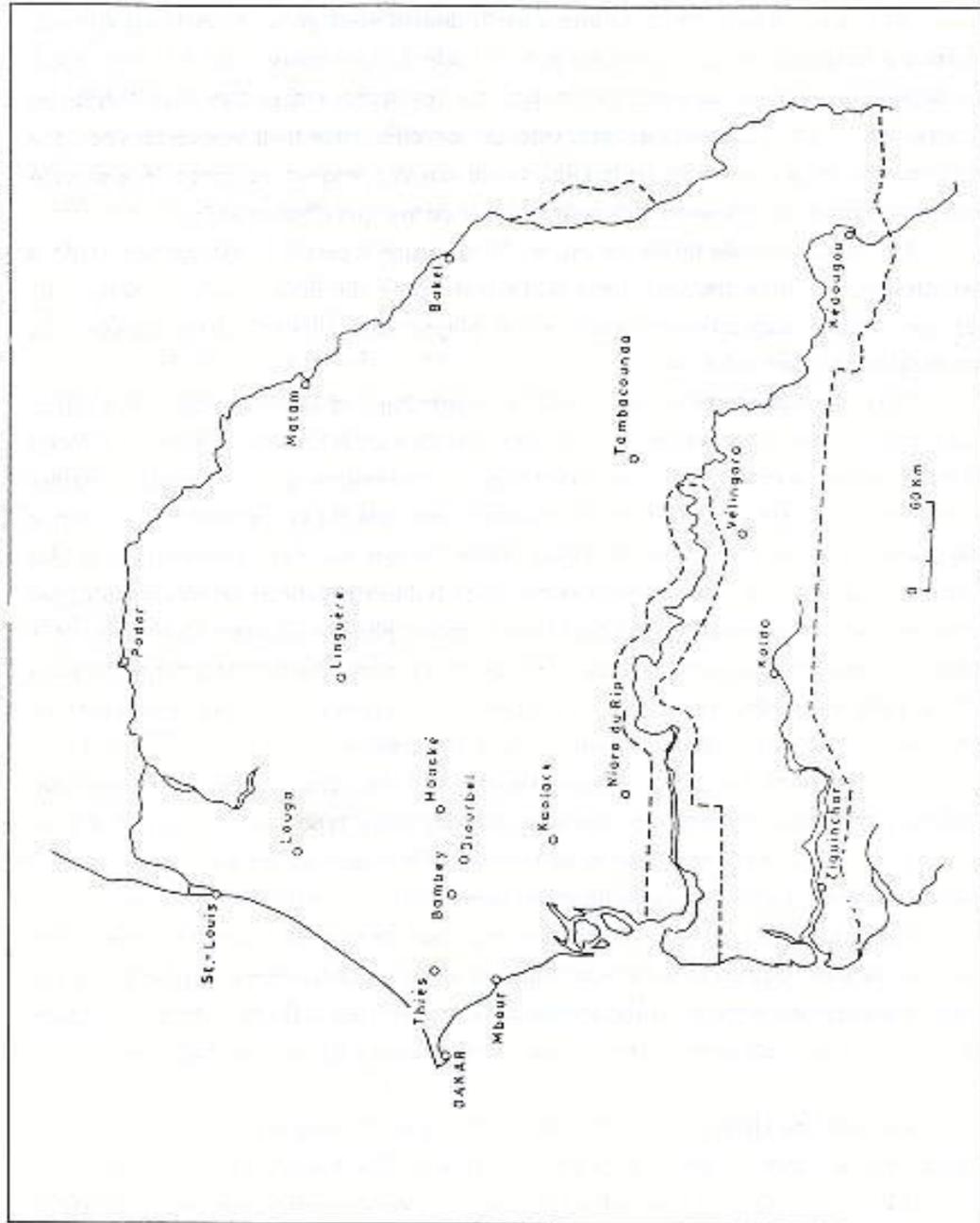


Fig. 3 : Réseau des 19 stations pluviométriques

C'est le cas pour la pression atmosphérique, l'ensoleillement, la nébulosité, qui sont autant de facteurs pertinents pour une étude climatique approfondie mais qui malheureusement ne sont relevés que de manière très sporadique et irrégulière : environ 8 stations sur 19.

Nous avons, involontairement, privilégié certains paramètres au détriment d'autres. Cela est purement lié à la structure de certaines données dont la collecte s'est effectuée de manière sporadique. Ainsi, à défaut de documents complets concernant l'évaporation bac (relevés effectués de façon irrégulière dans seulement 8 stations), nous nous sommes limités à l'exploitation et au traitement de données d'évaporation Piche qui restent, dans une certaine mesure, moins représentatives de la réalité physique.

Les documents météorologiques analysés ont la particularité commune d'être ponctuels et quantitatifs. Egalement, par leur nature très diverse, les relevés sont effectués de façons différentes en fonction de l'unité de mesure adéquate pour chacune d'elles.

1.2.1. Températures

Il s'agit notamment de températures de l'air, sous abri exprimées en degré C. Nous avons commencé par procéder au calcul des moyennes décennales des minima et maxima. L'étude s'est particulièrement attachée aux deux valeurs extrêmes. Cela dans le but d'observer l'évolution spatio-temporelle de chaque type de température mais également en vue de rechercher l'existence d'une éventuelle évolution parallèle entre ces deux phénomènes. Néanmoins, un intérêt particulier a été porté à l'étude des températures maxima, cela dans l'optique d'une tentative de validation et de comparaison avec les températures radiatives relevées par le satellite Météosat.

1.2.2. Précipitations

Il s'agit essentiellement des pluies enregistrées pendant l'hivernage. Elles sont mesurées quotidiennement en lame d'eau millimétrique. Pour obtenir des valeurs décennales, nous avons effectué le cumul des relevés journaliers.

1.2.3. Humidité relative

Comme pour les relevés de températures de l'air, les minima et les maxima d'humidité relative feront l'objet d'une étude d'abord sélective ensuite comparative. Le taux d'humidité relative est exprimé en pourcentage. Nous avons également

effectué le calcul des moyennes décadaires afin d'homogénéiser tous les pas de temps.

1.2.4. Évaporation

En ce qui concerne l'évaporation, les relevés Piche ont été étudiés au détriment des mesures effectuées par bac. Pourtant l'évaporation bac retrace plus objectivement la réalité terrain. Cependant, comme nous l'avons indiqué plus haut, les mesures par bac n'étant opérées que dans peu de stations, il est très difficile de valider les quelques résultats et d'en faire une étude spatiale, d'autant plus que toute tentative d'interpolation afin de combler les zones dépourvues de mesures risquerait de sous-estimer ou d'exagérer l'évaluation de ce phénomène météorologique, très variable, mais capital en milieu sahélien.

Les données bac nous auraient permis d'étudier l'évolution spatiotemporelle de l'évaporation face à la sécheresse, et d'effectuer une évaluation du bilan de l'eau. L'évaporation étant mesurée en millimètres, nous avons, comme pour la pluviométrie fait, le cumul des relevés journaliers afin d'obtenir des données au pas de temps décadaire.

1.2.5. Vitesse et direction du vent

En ce qui concerne les vents, les vitesses sont mesurées en mètres par seconde et les directions en lettres de la rose (360°) dans huit secteurs de 45° chacun. Nous avons calculé les moyennes décadaires pour les vitesses et les médianes décadaires pour la direction.

1.2.6. Tension de la vapeur d'eau

Ce paramètre est mesuré en Hpa. Nous avons également effectué le calcul des moyennes décadaires. La tension de la vapeur d'eau est rarement prise en compte dans les recherches concernant la pluviométrie au profit de la pression atmosphérique (densité de l'air). Pourtant elle a son importance car c'est le seul paramètre permettant de mesurer la densité de l'eau atmosphérique et par conséquent d'évaluer ses mouvements verticaux et ou horizontaux.

Le tableau 3 résume les types de traitements appliqués aux données aérologiques. La méthodologie adaptée ainsi que les résultats obtenus seront exposés dans les chapitres suivants.

Tableau 3 : Informations concernant les relevés des 19 stations météorologiques terrain

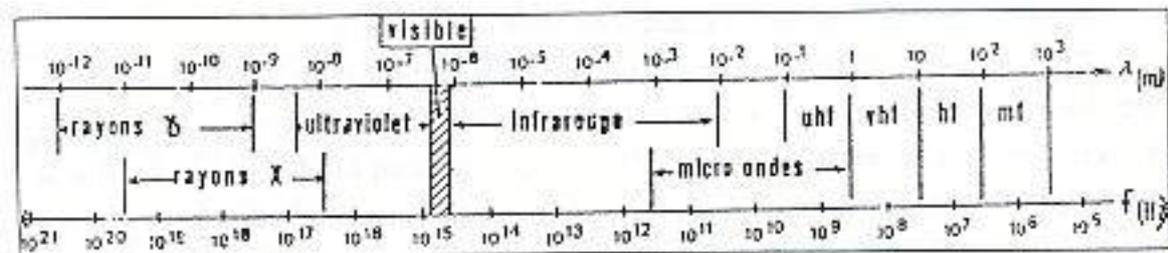
Nature des données	Unité	Traitements	Résultats
Température de l'air (minima et maxima)	° C	moyennes dec interp spline	18 images
Humidité relative (minima et maxima)	%	moyennes dec interp spline	18 images
Vitesse du vent	m s	moyennes dec interp spline	18 images
Direction du vent	0 - 360 °	fréquences décadaires	18 roses
Tension de la vapeur d'eau	Hpa	moyennes dec interp spline	18 images
Evaporation Piche	mm	cumuls dec interp spline	18 images
Précipitation	mm	cumuls dec interp krigeage	18 images

Les données dont nous allons, dans la partie suivante, exposer les caractéristiques liées à leur mode d'acquisition, sont d'un ordre différent. Mesurées depuis l'espace par les satellites d'observation de la terre, les données spatiales se distinguent des relevés aérologiques ponctuels d'une part, par leur continuité géographiques et d'autre part, par leur précision.

2. Notions de télédétection et documents d'origine spatiale

La télédétection est une approche qui, par un ensemble de techniques, permet d'étudier la surface du globe terrestre, des autres planètes et de l'atmosphère en utilisant les propriétés électromagnétiques émises, réfléchies ou diffractées par les différents corps observés (Fontanel et Guy M., 1973). Cela se fait par la mesure du rayonnement électromagnétique qui est un phénomène vibratoire et se transmettant sous forme d'ondes (fig. 4).

L'énergie est donc véhiculée par ces ondes électromagnétiques de longueur et de fréquence différentes. La longueur d'onde est la distance parcourue en une vibration.

**Fig. 4 Classification des ondes électromagnétiques (Cassanet, 1990)**

Certains éléments présents dans l'atmosphère (ozone, gaz carbonique, vapeur d'eau, etc.) constituent des écrans et absorbent une partie de ce rayonnement qui, par conséquent, ne peut être capté qu'à travers des "fenêtres atmosphériques" (fig. 5) c'est-à-dire dans des bandes spectrales où l'atmosphère est plus ou moins transparente.

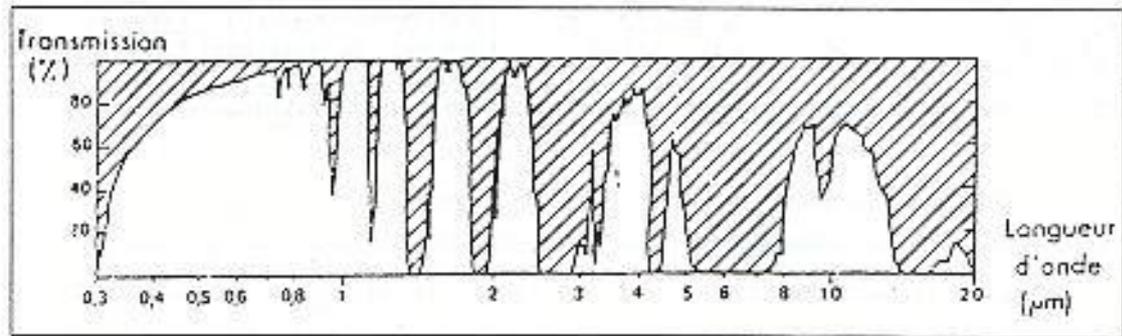


Fig. 5 : Transmission d'une atmosphère standard pour les longueurs d'ondes comprises entre 0,3 et 20 micromètres (Knetzys, 1980)

Les radiomètres embarqués à bord des satellites sont spécifiquement conçus pour capter, de manière séquentielle, les informations à travers ces bandes spectrales où la transmission atmosphérique est suffisante. Ainsi, grâce à eux, on arrive à quantifier l'énergie électromagnétique émise, réfléchi ou diffusée par les divers objets placés en-dessous de ces capteurs. Un objet est caractérisé par sa réponse spectrale qui demeure constante tant qu'il ne subit pas de modification dans sa structure ou dans sa composition physico-chimique ; cela, quelle que soit sa localisation géographique (Gill J.P. et Bildgen P., 1992). Par conséquent, par leurs réponses spectrales, l'identification des objets visés par les capteurs devient une opération aisée car elle correspond au niveau radiométrique enregistré (Dagorne D, 1990). Ainsi, l'analyse des images satellitaires nous permet d'obtenir des informations précises sur la luminance, la température et parfois même la forme des objets situés sous l'angle de visée des satellites.

Dans le spectre visible, qui ne fonctionne que le jour car étant lié à la présence du soleil, les radiomètres mesurent, la réflectivité c'est à dire la lumière du soleil renvoyée par les objets situés en-dessous du satellite. On sait que, plus un objet est brillant, plus sa réflectance est intense; en revanche, plus il est sombre, et moins il réfléchit la lumière solaire. On peut ensuite, par la luminance d'un élément, déterminer sa texture, sa structure et même son épaisseur, particulièrement pour les nuages dont on sait que leur densité dépend de leur charge en cristaux de glace et ou

gouttelettes d'eau par unité de volume. De ce fait, plus ils apparaissent épais et blancs, plus cette charge est importante; en revanche, plus ils apparaîtront sombres et plus ils sont minces (Thiaw W., 1988).

Dans le spectre infrarouge, est mesuré le rayonnement émis par les objets situés en-dessous des radiomètres. On sait également que plus un objet est chaud, plus son rayonnement est intense et qu'au contraire plus un objet est froid, moins il rayonne. De ce fait, pour Météosat, les images infrarouges sont le reflet de la température du substratum (chaud) et des sommets des nuages (froids).

L'identification de certains objet est, cependant, plus ou moins précise en fonction du type de radiomètre, de la résolution spatiale et donc de l'altitude du satellite.

Nos images satellitaires sont des résultats de synthèses établis à partir d'autres images (tableau 4). Ce sont donc des néo-canaux réalisés à partir d'informations multivariées pour un but précis, à savoir des synthèses d'indices de végétation, de fréquence d'occurrences de nuages à sommets froids et de températures de brillances.

Tableau 4 : Informations relatives aux images satellitaires

Nature du document	Pixel	Source	Traitements	Résultats
Nuages Météosat	5 X 5 Km	C.M.S.	Cumul F.oc décade	18 images de synthèse
Température Météosat	5 X 5 Km	C.M.S.	Moyenne Tmax décade	18 images de synthèse
NDVI N.O.A.A.	1.1X 1.1 Km	C.S.E.	N.D.V.I. décade	18 images de synthèse

Cette réorganisation des informations originelles a, en quelque sorte, limité nos perspectives de départ. Par exemple toute tentative de réexploitation de ces résultats de synthèses en vue de recherches concernant le milieu océanique (températures de surface de l'océan, upwelling...) est faussée dès le départ parce que les substratums terrestres et océaniques n'ont pas les mêmes signatures spectrales. Par exemple le néo-canal indices de végétation n'a aucune signification sur le milieu océanique.

Ainsi, les techniques de seuillages effectuées pour la réalisation des synthèses décadaires d'indices de végétation, de température de brillance, d'occurrences de nuages à sommets froids concernent essentiellement le milieu terrestre. Le calcul des températures de surface exige de posséder des données mesurées à la mer. Nous avons donc, pour séparer le milieu terrestre de l'océan (inexploitable sur les images) appliqué un autre type de seuillage afin de masquer l'Atlantique.

2.1. Données N.O.A.A.

Pour le suivi de la végétation, l'exploitation de données Spot aurait été idéale. Car vu la résolution spatiale très fine de ce satellite (20 mètres de côté pour un pixel), son efficacité quant à l'observation de l'état de la végétation est incontestable. Cependant, en comparant la taille des pixels de ce satellite à l'étendue de notre zone d'étude, cette source nous a paru inutilisable vu l'immensité multiplicité des images que nous aurions à traiter.

De surcroît, hormis le frein que constitue le coût élevé des images, allait s'ajouter celui lié aux problèmes de stockage et de gestion d'environnement disque pour les laboratoires qui nous ont accueillis.

Pour ces raisons donc, nous nous sommes repliés, pour l'évaluation et le suivi de la végétation, sur des documents acquis par la NOAA.

Ainsi, pour rappel, un indice de végétation, représente un néo-canal établi à partir d'informations originelles. Il résulte d'une synthèse d'images de base dont la structure même a été réorganisée à l'aide de fonctions mathématiques.

Avant d'évoquer le mode d'acquisition et aussi la nécessité d'utiliser des données concernant la végétation pour notre étude, nous allons d'abord parler brièvement de NOAA de ses spécificités afin de donner un aperçu plus ou moins général de ce satellite météorologique.

2.1.1. Caractéristiques du satellite NOAA

Nos données proviennent de NOAA AVHRR 11 lancé en 1988 et appartenant à la série des satellites météorologiques de la TIROS-N de la NOAA (Fig. 6 et tableau 5). Cette série est actuellement composée de deux plates-formes (numéro pair et numéro impair) en orbite fonctionnant de manière opérationnelle. De ce fait, les données fournies diffèrent entièrement par les heures de passage du satellite en question (l'équateur est traversé nominalement par le numéro pair lors de l'orbite ascendante à 14h 30, par le numéro impair à 2h 30).

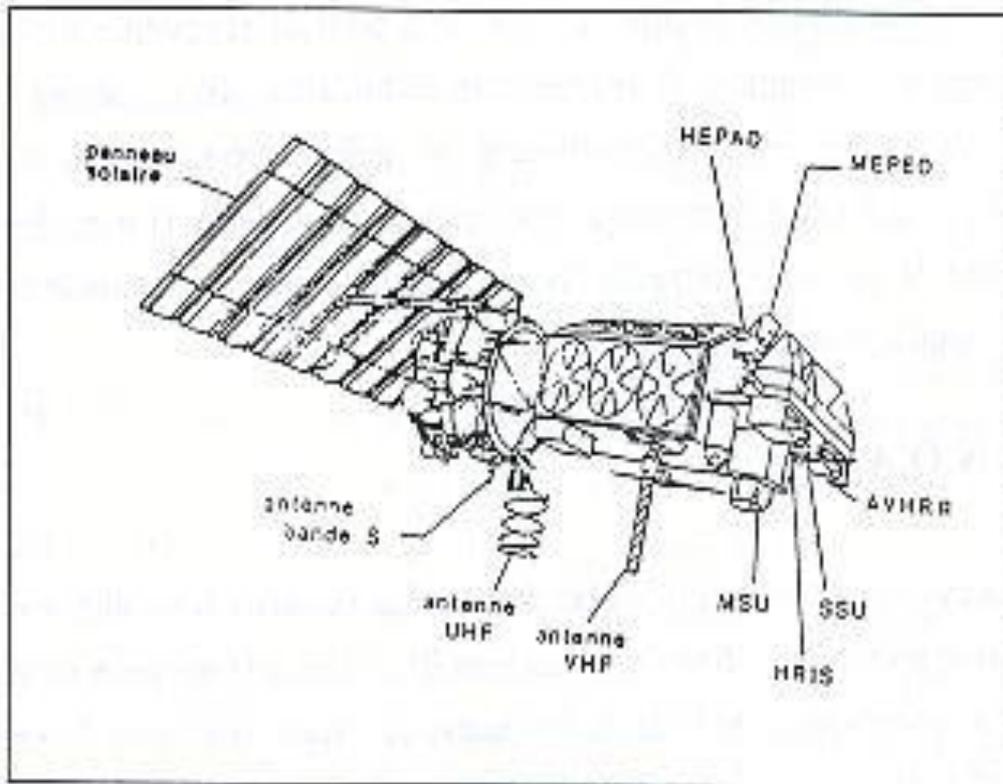


Fig. 6 : Le satellite TIROS N, NOAA 6 à 11 (NASA)

Tableau 5 : Caractéristiques orbitales de NOAA (Cassanel, 1990)

	TIROS N	NOAA 6	NOAA 7	NOAA 8	NOAA 9	NOAA 10	NOAA 11
- Altitude moyenne	856 km	815 km	852 km	815 km	851 km	817 km	870 km
- Altitude de l'apogée	864 km	824 km	861 km	829 km	862 km	826 km	826 km
- Altitude du périogée	849 km	807 km	843 km	806 km	841 km	808 km	808 km
- Inclinaison :	98,9°	98,8°	98,8°	98,9°	98,9°	98,7°	98,7°
- Période :	102,1 min	102,2 min	101,9 min	102 min	102 min	101,2 min	101,2 min
- Espacement à l'équateur entre deux trajectoires consécutives	2760 km	2756 km	2756 km	2760 km	2756 km	2756 km	2756 km
- Heure de passage au nœud descendant	03 h 00	07 h 20	02 h 30	07 h 30	02 h 30	07 h 30	07 h 30

Situé à une altitude moyenne de 870 km avec une période de révolution d'environ 100 minutes, ce satellite à orbite héliosynchrone est quasi-polaire. L'inclinaison de sa trace est d'environ 98,96 degrés par rapport à l'équateur. Sur le plan longitudinal, les deux orbites sont séparées de 25 degrés à l'équateur. Cela suppose un survol quasi constant d'une même entité géographique à peu près à la même heure solaire. Les angles de prise de vues diffèrent cependant d'un jour à l'autre (suivant un cycle de 9 à 10 jours)

Ce satellite est équipé (cela est valable pour toute la série depuis 1979) d'un radiomètre AVHRR. La particularité de ce capteur est qu'il est, non seulement, doté de divers canaux dans les domaines du visible et de l'infrarouge (proche, moyen et thermique) mais également d'un canal infrarouge thermique supplémentaire, ce qui fait un total de cinq canaux en sortie. Le capteur AVHRR est essentiellement un radiomètre à balayage permettant d'observer deux fois par jour (orbite ascendante et orbite descendante) la quasi-totalité du globe terrestre. Les données sont acquises en visée directe sous le format de haute résolution ou HRPT. Elles sont numérisées sur 10 bits, ce qui correspond à 1024 niveaux et sont transmises, en temps réel, aux stations de réceptions placées dans le champ de vue du satellite.

Le CSE de Dakar est actuellement doté d'une station de réception NOAA AVHRR, ce qui élimine un certain nombre de problèmes techniques comme le décalage entre la prise de vue et l'exploitation des données. Cette rapidité dans l'acquisition directe des données facilite, de manière considérable, la réalisation des cartes d'indices de végétation, d'autant plus que l'équipe de recherche du CSE est également équipée du logiciel "CHIPS" conçu par l'Institut de Géographie de l'Université de Copenhague (Danemark) pour cet effet.

2.1.2. Calcul d'indices de végétation

Les images NOAA que nous avons exploitées sont donc des résultats de synthèses d'indices de végétation calculées régulièrement au Centre de Suivi Ecologique (C.S.E.) de Dakar. Ce travail de routine est appliqué dans le but d'établir, chaque année, au terme d'une vaste "campagne de biomasse", une carte de la production végétale résultant de la combinaison des données satellitaires avec des relevés terrain. La méthode de calcul d'indices de végétation fait donc l'objet d'une validation terrain dans une optique de comparaison et de vérification des résultats obtenus.

La réalisation des images d'indices de végétation nécessite donc plusieurs étapes de traitement (pour les différentes procédures de calcul, voir Annexe). Après acquisition des images brutes les quatre meilleures images de la décade sont sélectionnées. Après ce tri préliminaire, sont effectués les traitements classiques concernant les techniques de redressement, de rééchantillonnages, enfin toutes les corrections nécessaires évoquées plus haut.

La végétation joue un rôle fondamental dans la régulation des flux d'eau et de gaz carbonique à l'interface entre le milieu terrestre et l'atmosphère. Elle a donc une importance capitale dans l'équilibre naturel du globe. De ce fait, dans le but de surveiller le comportement de la végétation par la télédétection, diverses méthodes ont été développées. L'Indice de Végétation par la Différence Normalisée (NDVI) définie par la formule :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}}$$

est de loin la plus couramment utilisée.

Cette approche permet à travers les indices de végétation d'estimer de façon globale les indices foliaires, la production de la biomasse, d'évaluer l'état hydrique, sanitaire et énergétique et donc de quantifier la densité de la végétation.

Au CSE, la finalité de ces opérations est toujours la composition d'images décadaires de maxima d'indices, pour un suivi permanent de la végétation à travers les réponses spectrales, afin de retranscrire avec précision la nature et les limites principales des entités végétales connues sur le terrain et également dans le but de visualiser le découpage très net des zones soumises aux fortes interventions anthropiques (déforestations, feux de brousse, etc.). Donc, intégrer la végétation dans notre étude est un fait plus que nécessaire car cela nous permettrait à travers son état, son comportement, de mesurer la mainmise de l'homme sur le milieu naturel. Car, celui-ci, par sa présence en nombre, par son intervention sur le milieu végétal, directe ou indirecte, contribue à remanier l'état de surface des continents, à diminuer l'albédo et à modifier le cycle de l'eau. (Lamarre D., 1991).

Aussi, l'étude de la répartition des diverses entités végétales dans l'espace nous permettrait d'abord de distinguer les principales unités physiologiques (homogénéité, hétérogénéité) à travers la plus ou moins grande importance de leurs réponses spectrales. Ensuite, nous essayerons de voir si cette répartition a un lien avec la distribution spatiale de la pluviométrie et par-delà voir si l'existence de micro

changement d'occupation du sol, malgré une apparente monotonie visuelle du couvert végétal, est favorable aux phénomènes convectifs locaux.

Toutefois quelques problèmes subsistent dans la mesure où certains types de végétation, malgré la différence notoire de leur appartenance morphologiques et biologiques, ont une réponse spectrale quasi identique. Effectuer des contrôles sur le terrain afin de confirmer ou d'infirmier cette réalité image devient donc impératif. Il serait toutefois nécessaire, si on désire un suivi plus efficace, d'envisager une étude faisant appel soit aux images Spot (résolution plus fine et donc images plus précises), soit aux photographies aériennes.

Toutefois, l'analyse des paramètres physiques et biologiques régissant l'implantation de certaines espèces dans un lieu donné serait très intéressante pour expliquer le fait que certaines formations végétales, pour lutter contre la siccité quasi permanente, colonisent de manière spectaculaire un milieu bien déterminé au détriment d'autres espèces.

2.2. Données METEOSAT

2.2.1. Caractéristiques de ce satellite météorologique

Météosat est un satellite météorologique entièrement réalisé par l'Agence Spatiale Européenne (E.S.A.). Il est géostationnaire et se situe à la verticale du Golfe de Guinée à une altitude de 36000 km. De forme cylindrique, (fig. 7) Météosat effectue 100 tours par minute sur lui-même autour d'un axe de direction Nord-Sud parallèle à celui du disque terrestre. Il est équipé d'un radiomètre (fig. 8) à balayage opérant dans le canal visible (0,4 à 1,1 μm) et dans les canaux infrarouges moyen ou canal vapeur d'eau (5,7 à 7,1 μm) et thermique (10,5 à 12,5 μm).

La résolution spatiale (fig. 9) n'est cependant pas la même dans les différents canaux utilisés par le capteur. De 2,5 x 2,5km pour le visible, elle passe à 5 x 5km pour les canaux infrarouges.

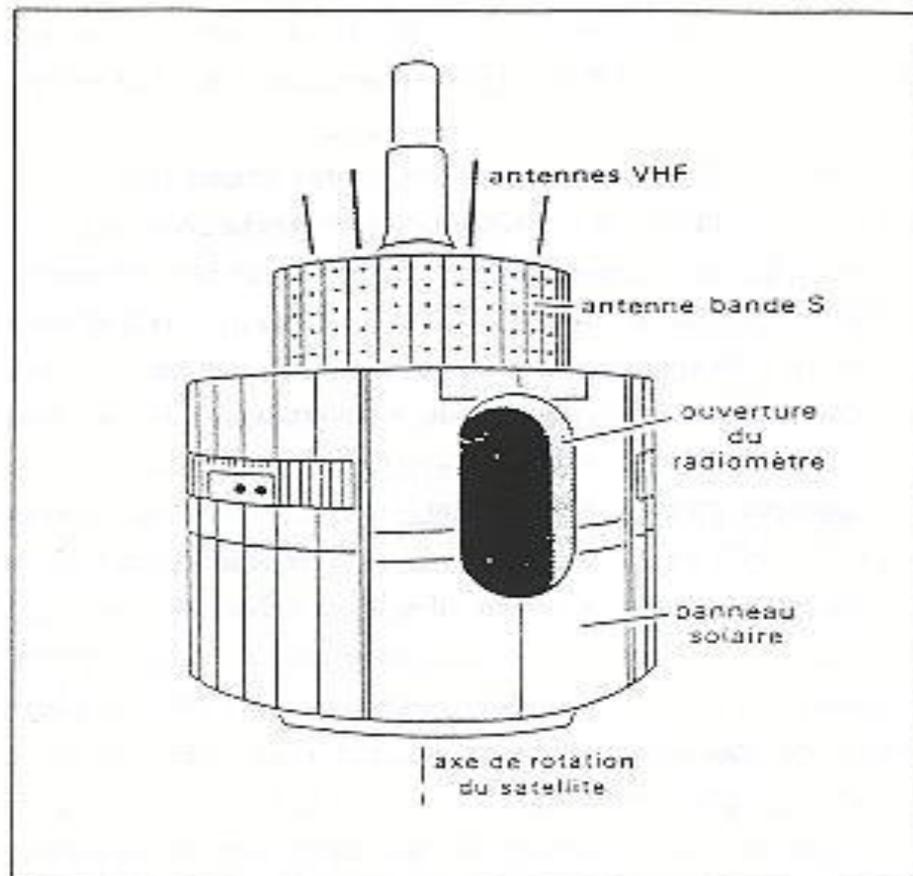


Fig. 7 : Le satellite Météosat 1 (Atlas of Météosat Imagery, ESA)

Cette résolution spatiale diminue légèrement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur, donc de la verticale du satellite, du fait de la courbure du globe par rapport à l'angle de visée du satellite.

Le capteur Météosat fournit, à une cadence semi-horaire, des images globales à haute résolution de la terre. L'acquisition de ces données Météosat se fait prioritairement à l'ESA à Darmstadt en Allemagne mais également au Centre de Météorologie Spatiale (CMS) de Lannion en France.

Sur les données brutes sont appliquées toute une série de prétraitements destinés à les corriger (correction géométrique, calcul des correspondances entre valeurs réelles et comptes numériques, etc.).

Ces opérations de prétraitement sont indispensables et permettent aux utilisateurs de se doter d'images corrigées, nettes et donc directement exploitables pour des travaux scientifiques.

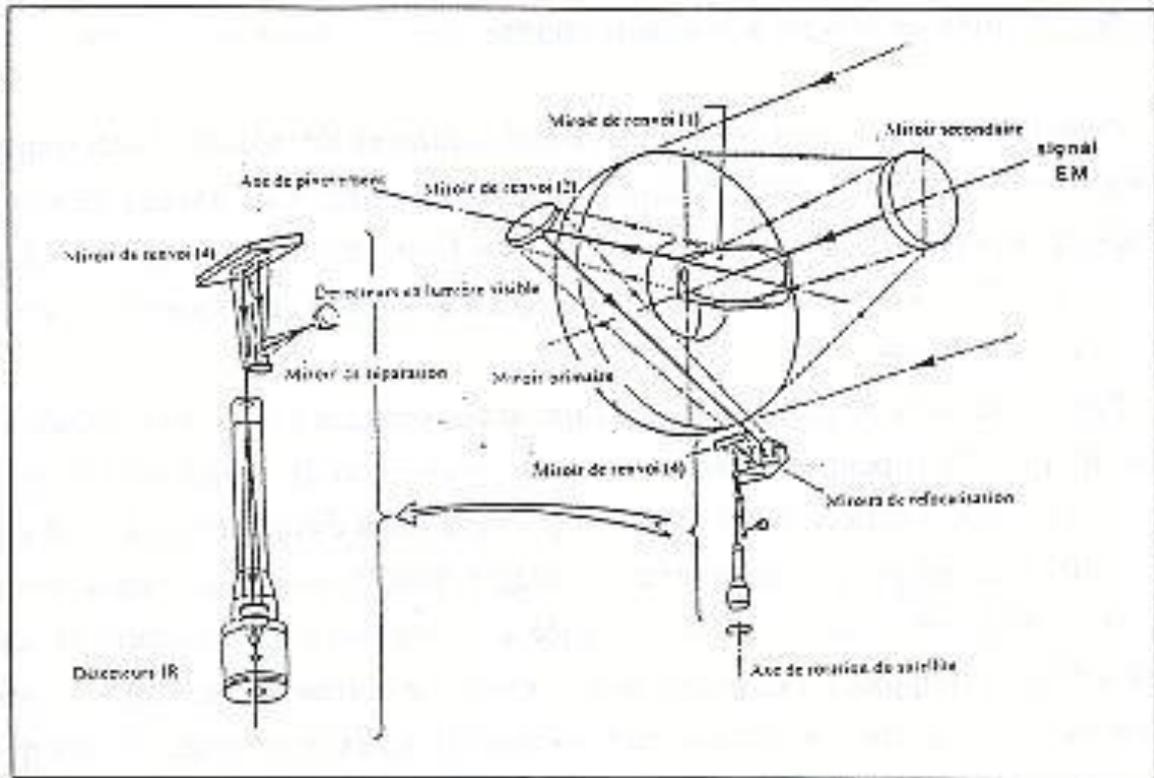


Fig. 8 : Dispositif optique du capteur de Météosat (Atlas of Météosat Imagery, ESA)

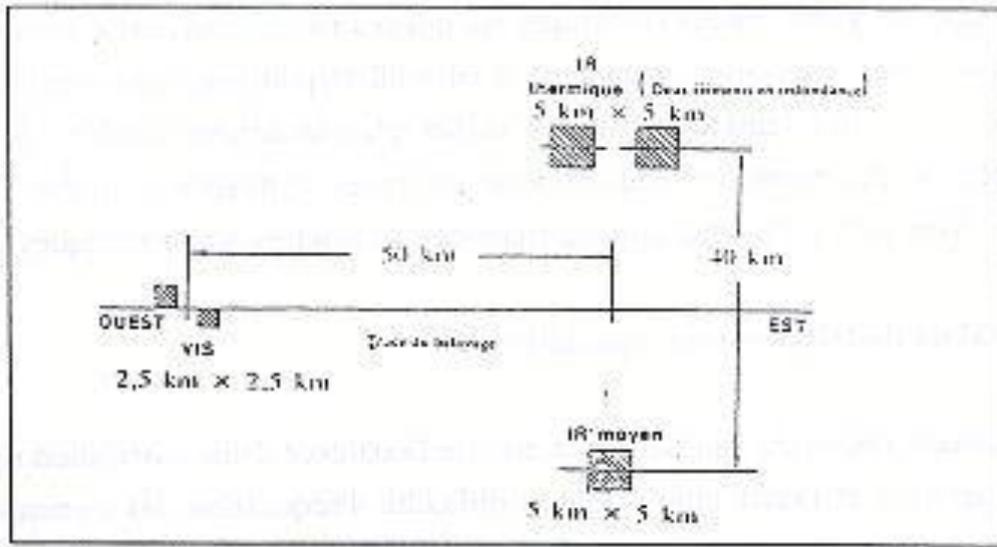


Fig. 9 : Résolution spatiale dans les trois bandes spectrales du capteur de Météosat (Atlas of Météosat Imagery, ESA)

Les données Météosat dont nous disposons ont, non seulement, subi cette première série d'opérations de prétraitements mais ont, également, fait l'objet de travaux de synthèses, permettant d'identifier les occurrences de nuages à sommets froids et les températures maxima de brillance.

2.2.2. Occurrences de nuages à sommets froids

Pour la nébulosité, nous avons utilisé des synthèses décennales d'occurrences de nuages à sommets froids réalisées à partir d'images Météosat. Ces travaux de synthèses de nuages pluvio-gènes sont effectués au CMS de Lannion et englobent toute la zone AGRHYMET. De ce fait, nous avons été amenés à extraire des fenêtres couvrant la partie qui nous intéresse.

Partant du principe que tout nuage dont la température est au moins égale à -40°C (Guillot et al., 1989) peut-être vecteur de précipitations, cette valeur est fixée comme seuil pour leur identification. Ainsi, à partir de programmes développés pour cet effet, il s'agit de trier tous les pixels représentant les nuages dont la température couvre ce seuil de -40°C . Cette opération de tri est appliquée sur les images semihoraires et sur une base de temps de cinq jours. Les pixels dont la valeur ne correspondent pas à ce seuil de température sont, par conséquent, automatiquement éliminés et ne sont retenus que les nuages pluvio-gènes. Le résultat final de cette synthèse est matérialisé par une image décennale obtenue par cumul et représentant

les occurrences de nuages dont la température maximale est inférieure ou égale à -40°C.

Ce seuil de -40° C est jugé représentatif des nuages pluvio-gènes. C'est cependant une référence qui a tendance à surestimer les nuages pluvio-gènes ou à sous-estimer les nuages ayant une température supérieure à ce seuil et pouvant être pourvoyeurs de pluies. Nous avons remarqué sur les cartes pluviométriques établies à partir des mesures terrain, des zones non couvertes par ces types de nuages et où l'on a enregistré de la pluie (voir partie suivi spatio-temporelle des paramètres atmosphériques).

2.2.3. Maxima de températures radiatives (Tmax)

Plusieurs recherches au Sahel ont montré l'existence d'une corrélation significative entre température et précipitations. Vu la difficulté d'acquisition des mesures au sol, il s'est avéré nécessaire d'obtenir les valeurs de températures à partir des satellites. Et Depuis, des synthèses de températures radiatives ont été réalisées afin d'être intégrées dans les calculs d'estimations des pluies.

Ainsi, les images de Tmax de brillances dont nous disposons ont été réalisées à ce titre au CMS de Lannion.

Dans la pratique, il s'agit plus ou moins de la même démarche que pour les calculs d'occurrences de nuages à sommet froids. Sauf que, dans le cas présent, seuls sont retenus les pixels indicateurs de la température la plus élevée.

Ce tri est appliqué sur les images semi-horaires du canal infrarouge de Météosat sur une période de cinq jours. Ensuite, contrairement aux occurrences de nuage à sommet froid, où l'on procède par cumul, la moyenne est calculée pour obtenir l'image décadaire.

Conclusion partielle

Nous avons pu montrer tout au long de ce chapitre combien les paramètres que nous avons utilisés pour réaliser notre étude étaient complexes et divers. Tout en formant un ensemble global, chacun d'entre eux constitue un élément indispensable à l'équilibre du milieu naturel, sans que le poids de chacun des éléments soit bien connu dans le système. Cette diversité d'origine, de nature de mode d'acquisition, fait qu'une analyse comparée ou combinée de ces données n'est envisageable que dans le cadre d'un SIG.

En effet, seul un SIG nous permet une exploitation efficace de ces documents au sein d'une base de données tout en contournant les problèmes de gestion et de stockage liés à leur nombre imposant et à leur échelle différente.

Nous disposons des mêmes séries de données pour la période 1986-1991. Au départ, nous avons envisagé d'effectuer cette étude sur une période plus longue pour individualiser l'année 1990 afin de mieux la cerner, l'analyser, la comparer avec les autres saisons. Devant l'immensité des données et le peu de temps disponible à la réalisation de cette étude, nous avons choisi de nous limiter à la saison 1990 et par conséquent de reporter les comparaisons avec les autres hivernages espaces dans des travaux ultérieurs.

CHAPITRE VI :

OUTILS INFORMATIQUES ET MÉTHODE DE TRAVAIL

Dans ce chapitre, seront exposées les différentes méthodes appliquées pour la réalisation de nos recherches. Comme nous avons envisagé d'effectuer notre étude dans le cadre d'un SIG, l'application de notre méthodologie fait inévitablement appel à des outils informatiques. Par conséquent, dans ce chapitre, nous allons également donner un aperçu des logiciels utilisés, de leurs principales caractéristiques, leur spécificité, mais aussi de leur complémentarité. Dans la dernière partie de ce chapitre, seront exposées les étapes nécessaires à la création d'un nouveau modèle d'estimation des pluies pour le Sénégal.

I. OUTILS INFORMATIQUES

Nous avons été accueillis par différents laboratoires pour la réalisation de nos recherches. Il s'agit, notamment, du CAMS (Centre d'Analyse de Mathématiques Sociales) et du L.I.S.H. (Laboratoire Informatique des Sciences de l'Homme) deux laboratoires de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales à Paris ; de l'antenne ORSTOM de Lannion, du laboratoire Géosystèmes Brest et du C.S.E (Centre de suivi écologique) de Dakar. Les outils informatiques auxquels nous avons fait appel pour les différentes étapes de nos travaux, depuis la simple saisie aux sorties des résultats, sont nombreux et divers. Mais, nous avons effectué de nombreux travaux grâce à l'exploitation de Triskel (à l'antenne ORSTOM de Lannion) et de Arc/Info (au LISH de Paris).

1. Arc/Info : Logiciel d'Information Géographique

Développé aux Etats-Unis par ESRI (Environmental Systems Research Institute) en 1968, Arc Info est un logiciel plurifonctionnel. Il est en permanence remodelé, réactualisé par des spécialistes de l'analyse spatiale et de l'informatique. Développé sur un modèle géo-relationnel qui associe des objets géographiques (lignes, points et polygones) avec des tables d'attributs thématiques, il possède un module de base composé de deux ensembles Arc (pour le traitement de l'information spatiale) et Info (pour celui de l'information thématique).

Outre ces deux éléments de base (Arc et Info) qui constituent l'ossature même du logiciel, il est constitué de divers modules, plus ou moins, complémentaires en fonction des thèmes de recherches :

- Arcedit : éditeur interactif permettant de numériser ou corriger les objets géographiques et de les visualiser ;
- Arcplot : éditeur cartographique interactif ;
- Network : module d'analyse spatiale de réseaux ;
- Tin : module d'interpolation par triangulation ou krigeage et d'analyse de surfaces 3D ;
- Grid : module d'analyse spatiale en mode raster.

Arc Info se veut un logiciel d'analyse cartographique de l'espace dont la structuration de l'information spatiale repose sur un modèle mathématique (le modèle topologique) tandis que celle de l'information thématique repose sur un modèle relationnel (Saint-Gérand T. et al., 1991)

Cet outil informatique est constitué d'une masse de commandes, d'une multitude de mots techniques, et d'une documentation imposante composée de 14 volumes. Cependant, en mode interactif sur l'écran de travail, il est possible de consulter une syntaxe explicative qui permet, non seulement, de connaître la définition et les fonctions de chaque commande, mais, également, à partir d'exemples précis de mieux saisir son utilité.

Vu qu'il est constamment perfectionné, Arc Info existe en différentes versions et à notre connaissance, la plus récente est la 7.0.1.

Nous avons commencé nos travaux sous la version 6.0.1 qui permet d'effectuer une spatialisation de phénomènes en vue de superposition et d'analyse thématique. En plus de ces fonctions, la version 7.0.1 permet également d'effectuer du traitement d'images satellitaires par la télédétection.

Le logiciel Arc Info existe sous deux formats : le format P.C. et le format station. Ce dernier est utilisé dans les grands laboratoires de recherches équipés d'une station SUN, à l'image de ceux qui nous ont accueillis.

2. Triskel : Plus simple à manipuler

C'est un logiciel à fonction multiple développé à l'Antenne ORSTOM de Lannion, depuis plusieurs années. C'est, tout d'abord, un outil informatique d'une performance considérable pour la maîtrise et l'exploitation des données de télédétection satellitaire. Il permet d'effectuer des manipulations statistiques allant des simples calculs de base (moyennes, écart-types, médianes, sommes, histogrammes, etc.) aux opérations plus complexes (croisements de données, combinaisons linéaires, classifications, A.C.P., etc.).

De ce fait, Triskel propose des méthodes pratiques et efficaces permettant aux utilisateurs la transformation et la manipulation préliminaire de documents brutes : (corrections géométriques, radiométriques, calibration). Il permet, également, dans le but de superposition géométrique d'informations de projections et d'origines variées, de résoudre avec une approche simple les problèmes de changement d'échelles (cf. Chapitre méthode de travail) auxquels sont souvent confrontés certains utilisateurs combinant des données d'origines diverses. Il est aussi doté de programmes de visualisation accompagnés d'une gamme de procédures nécessaires pour une bonne sortie des résultats finaux.

Dans Triskel, la disposition des données de base s'effectue de la manière suivante :

Tableau 6 : La direction du vent dans les 19 stations de mesure

	SENEGAL	DVENT 1 ^{ère} décade Mai 1990	
19	16.61 12.33 -12.21 -17.48	36 0	
14.90	-12.46	27	Bakel
14.70	-16.46	32	Bambey
12.33	-16.75	32	Cap-Skiring
14.73	-17.48	32	Dakar-Yoff
16.65	-16.23	36	Diourbel
14.13	-16.06	24	Kaolack
12.56	-12.21	32	Kédougou
12.88	-14.96	24	Kolda
15.38	-15.11	32	Linguère
15.61	-16.20	32	Louga
15.63	-13.25	34	Matam
14.42	-16.97	32	Mbour
13.73	-15.78	32	Nioro-du-Rip
16.61	-14.93	32	Podor
16.05	-16.45	36	Saint-Louis
13.76	-13.68	26	Tambacounda
14.80	-16.95	36	Thiès
13.09	-14.06	27	Vélingara
12.55	-16.26	28	Ziguinchor

Chaque paramètre est décrit par ses valeurs réelles associées à une liste de coordonnées géographiques selon la latitude, la longitude (en degrés décimaux) et le nom des différentes stations de travail (19 en ce qui nous concerne).

Ces tableaux statistiques sont également dotés d'un entête permettant à toutes les étapes du traitement d'identifier rapidement et efficacement le paramètre en question.

Cette localisation spatiale des coordonnées géographiques des stations constitue en quelque sorte un tronc commun à tous les documents traités.

L'utilisation de ces deux outils informatiques dans le cadre de notre étude a répondu à un souci de complémentarité. Avec Arc/Info, nous avons pu transposer le support terrestre sous format numérique et donc représenter aussi bien le relief que le réseau hydrographique avec leurs principales caractéristiques. Nous avons pu effectuer des traitements de télédétection pour les données satellitaires, transformer les relevés stations en image dans le but de superposer tous ces documents en fin de travaux. Cela grâce à Triskel qui est un outil méthodologique conçu pour répondre à la superposition géométrique de données de résolution et de couverture différentes (Dagorne D., 1990).

Les données classiques n'étant pas homogène dans l'ensemble de la zone d'étude, il s'avère nécessaire de procéder par des opérations qui font appel à des traitements statistiques permettant une extension spatiale de ces mesures ponctuelles. La première opération consiste à créer des points de grilles calculés à partir des données terrain. Le maillage séparant les différents points de ces grilles dépend toutefois du logiciel utilisé, et par conséquent de la disposition des données mais, également, de la méthode d'interpolation de calcul choisie au préalable. Ce sont donc les différentes procédures concernant la globalisation des données, et la concordance des différentes échelles spatiales, à travers lesquelles elles sont représentées, que nous allons aborder dans la partie suivante.

II. METHODOLOGIE

1. Spatialisation de l'information

1.1. Interpolation des paramètres aérologiques

Triskel a été utilisé comme outil informatique pour le traitement et la reconstitution géographique des données atmosphériques. Cette généralisation de l'information

recueillie sur le terrain est d'importance dans la mesure où, comme pour la plupart des pays sahéliens, le Sénégal ne fait pas exception et est donc doté d'un réseau de station de mesure très peu fourni. Par conséquent, étendre le peu de données existant afin de combler les zones vides devient une opération nécessaire mais périlleuse. Cela suppose un recours à l'utilisation de méthodes mathématiques pour pallier ce manque d'informations. Car, la spatialisation de phénomènes hétérogènes fait inévitablement appel à des méthodes d'interpolations

L'interpolation par fonction spline a été appliquée pour l'ensemble des phénomènes étudiés. Cependant, pour la pluviométrie, nous avons utilisé le krigeage qui reste de loin la méthode la plus couramment utilisée pour ce phénomène. Cela dans le but d'effectuer une comparaison avec les études déjà établies avec cette même méthode pour un nombre de station plus important.

La principale caractéristique de ces deux méthodes d'interpolations est qu'elles sont purement numériques. Elles sont essentiellement statistiques et permettent la reconstitution de valeurs d'événements mesurés en des points non connu. Partant de relevés ponctuels, elles permettent d'appliquer une réalisation spatiale du phénomène. Cependant, les critères d'analyse et d'interpolation des phénomènes ne sont pas identiques pour ces deux approches appliquées à la climatologie.

1.1.1. Krigeage

Cette méthode permet d'appliquer une réalisation spatiale de phénomènes, par l'intégration de valeurs ponctuelles connues, représentées géographiquement de manière aléatoire. Cette reconstitution de phénomènes par l'intermédiaire de valeurs connues se fait, cependant, au moyen de calculs minimisant, le plus possible, la variance spatiale des erreurs commises.

1.1.2. Fonction spline

C'est également, une forme de krigeage universel utilisant, systématiquement, une fonction de covariance généralisée donnée afin de garantir certaines propriétés géométriques aux surfaces d'interpolations produites (Creutin, 1979). A partir d'une série de points représentés spatialement selon leurs coordonnées géographiques, la méthode spline permet, dans un premier temps, par interpolation, de créer d'autres points entre ces valeurs ponctuels. Ensuite par l'intermédiaire de courbes (fig. 10), elle assure un tracé reliant, de la manière la plus lisse possible, en minimisant la

courbure et l'oscillation des éléments de base, l'ensemble des valeurs représentées dans l'espace.

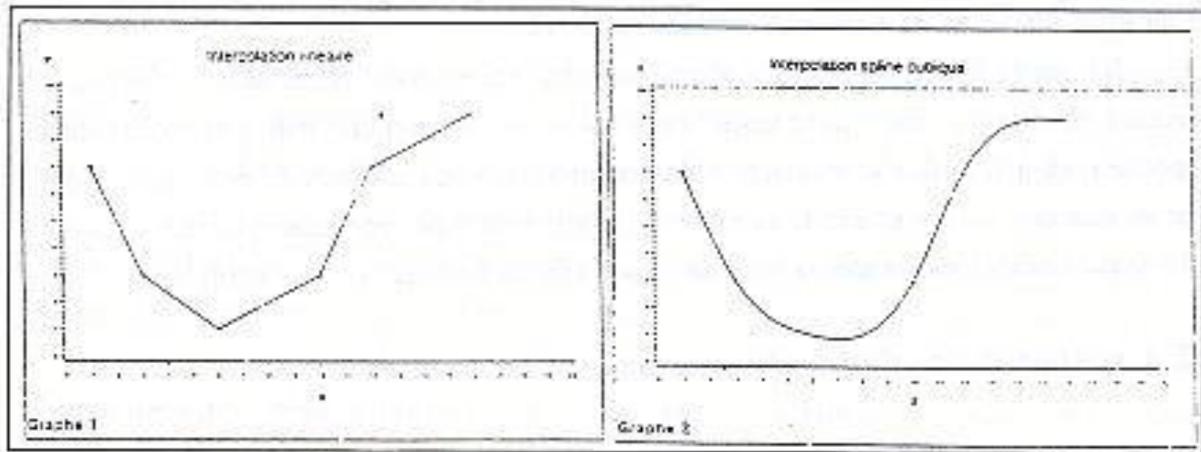


Fig. 10 : Exemple d'interpolation linéaire (graphe 1), et d'une interpolation par fonction spline (graphe 2) (Thauvin, 1992)

Toutefois, un des problèmes propres à l'utilisation de la méthode spline réside dans le fait qu'on ne peut pas contrôler visuellement le pourcentage d'erreurs commis.

1.1.3. Données sols-points de grilles-images

A partir des fichiers statistiques préalablement établies (voir tableaux 2), nous avons entrepris la création de points de grilles qui imposent des valeurs aux zones dépourvues de mesures ponctuelles. Le procédé est très utilisé en climatologie globale; l'opération de généralisation vaut uniquement dans le sens local-global (Lamarre D., 1991). Toutefois, la généralisation des points ponctuels sur l'ensemble de la zone d'étude s'effectue en fonction de plusieurs facteurs. Autrement dit, ce calcul des points fictifs ne se fait pas au hasard mais fait intervenir tous les éléments qui constituent le fichier statistique de base. Cela, par un rapport statistique et géométrique entre les valeurs réelles relevées sur le terrain, les coordonnées géographiques des stations et, par conséquent, les distances séparant ces différents points de mesures. Ces grilles devront servir, par la suite, à homogénéiser l'information par les fonctions d'interpolation définies plus haut en lissant de la manière la plus fine possible les courbes reliant les points imposés.

Toutefois, les résultats de ces opérations de calcul reliant les points de grilles peuvent être transcrits de plusieurs façons, soit sous forme de graphiques (courbes ou isolignes) reliant les différents points, soit sous forme d'images caractérisées par des

comptes numériques qui représentent, en quelque sorte, une correspondance entre les mesures terrain et les valeurs observées sur l'écran.

La phase finale de ces opérations consiste, après avoir visualisé ces images, à effectuer une sortie sur imprimante. Pour cela, vu le nombre d'images dont nous disposons, et donc pour une question de commodité, nous avons créé des "mires" qui sont, en quelque sorte, des supports communs, permettant de regrouper plusieurs images (18 par paramètre) sur un même fond de papier afin de faciliter la sortie finale.

1.2. Création d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le but de nos travaux étant d'intégrer les différentes images créées aux cartes du support terrestre, la création d'un MNT nous a paru efficace. Car Un MNT permet de multiplier les découpages de l'espace géographique afin de localiser, de la manière la plus fine possible, les résultats de synthèse issus des combinaisons des phénomènes étudiés.

Avant d'expliquer comment nous avons procédé pour créer le MNT, nous allons d'abord présenter le matériel utilisé pour la réalisation de cette opération, ensuite donner des précisions concernant la numérisation des supports cartographiques sous Arc/Info.

1.2.1. Configuration matérielle

Le matériel relatif à la transcription numérique de l'information cartographique est, généralement, constitué de quatre éléments. Mais sa plus ou moins grande performance dépend de chaque laboratoire et donc de la place qu'occupent les S.I.G dans les thèmes de recherche. Dans notre laboratoire d'accueil, le LISH, le matériel de digitalisation est composé :

- d'une table à digitaliser (calcomp 2500)
- d'une souris à digitaliser (calcomp 2500)
- d'un écran de travail SPARC (relié à une station SUN)
- d'une imprimante laser CANON pour la restitution couleur des résultats

Les supports cartographiques à numériser (relief, réseau hydrographique, morphopédologie, végétation, etc.) dépendent du thème de recherche de chaque utilisateur. Une manière, entre autres, d'organisation de travail afin de maîtriser la

masse de commandes et, par conséquent, d'éviter les confusions et les mauvaises manipulations souvent irréversibles est la création d'un fichier "carnet de bord".

1.2.2. Notion de couverture et numérisation

La matérialisation des points de calage et la définition des seuils de tolérances (distances minimales entre éléments graphiques) constituent les étapes préliminaires avant chaque opération de saisie. Avant d'entamer la digitalisation d'un support topographique le choix des TIC qui représentent les points d'amer devient impératif. Ces points de calage constituent les liens entre les coordonnées de la table à numériser et les coordonnées géographiques du document. Ils sont d'importance car étant les clés de la mise en relation directe entre l'écran de travail et la carte à numériser via la table à digitaliser. Le choix de ces tics se fait, de manière délibérée, selon l'inspiration de chaque utilisateur. Mais ils doivent être, impérativement, quatre au minimum pour chaque carte et considérablement différents selon le genre d'espace pris en compte (ville, montagne, etc.).

Après ce choix préliminaire des points d'amer, il est indispensable, pour être le plus précis possible dans la transposition des cartes sur l'écran, d'utiliser des coordonnées géographiques très fines. Pour cela, il est conseillé de convertir les coordonnées géographiques des cartes IGN (ou autres) en degrés décimaux avec la formule : degrés décimaux = degrés + (minutes 60) + (secondes 3 600).

Partant du principe qu'un support cartographique décrit une réalité complexe, la deuxième étape des travaux préalables consiste, à segmenter les thèmes développés sur le document. Cette segmentation selon la thématique à étudier fait intervenir la notion de "couvertures" (fig. 11). Nous avons pour notre analyse deux couches thématiques : le relief et le réseau hydrographique.

La segmentation du document en diverses couches thématiques consiste à ne pas transcrire littéralement la carte topographique telle qu'elle existe avec ses différentes composantes mais à la décomposer en sous thèmes: courbes de niveaux, villes, réseau hydrographique, points côtés, etc. La gestion de ces différentes couvertures devient par conséquent plus aisée. Des traitements statistiques séparés ainsi que des corrections peuvent être effectués pour chaque thème. Cela sans pour autant avoir à gérer une multitude de données en même temps.

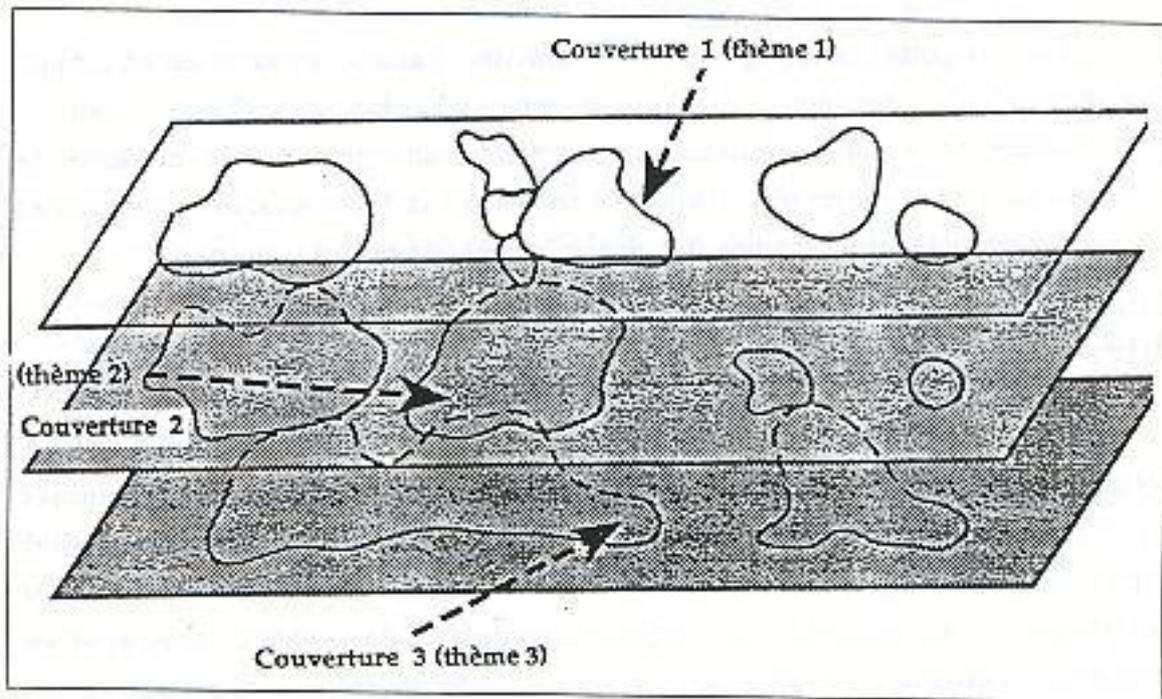


Fig. 11 : Schématisation de différentes couvertures

Cette opération est d'autant plus efficace qu'on s'est donné la possibilité de reconstituer la carte d'origine en superposant ces différents documents afin de les regrouper dans une seule et même couverture

La transcription dès le départ des divers thèmes sur une seule et même couverture aurait entraîné une manipulation lourde de beaucoup de chiffres en même temps (ne pas oublier que le support est numérique). Contourner cela exige une organisation parfaite afin d'éviter certaines confusions quant-aux interprétations finales.

La création de plusieurs supports est d'autant plus importante qu'elle permettra à un futur utilisateur de choisir aisément le document qui l'intéresse sans avoir à récupérer l'ensemble des cartes (par exemple, un géomorphologue qui aurait seulement besoin de la couche courbes de niveau pourrait facilement extraire les informations relatives à la couverture concernée). Cela d'autant plus que chaque thème va constituer une couche d'information stockée séparément avec ses identifiants.

Après ces préambules, la digitalisation peut s'effectuer avec, tout d'abord, la matérialisation des tics, préalablement, définis en fonction des coordonnées géographiques qui leur sont attribuées. Cette opération, si la digitalisation s'effectue en plusieurs étapes, est renouvelable à chaque fois, car comme nous l'avons expliqué

plus haut, il s'agit d'une mise en relation, grâce à leur identificateur, de points de calage repérés en coordonnées table avec des points de calage connus en coordonnées géographiques. Il est, par conséquent, indispensable de les ressaisir à chaque fois que l'on reprend le travail car c'est eux qui permettent à l'ordinateur de se remémorer les coordonnées géographiques du support à numériser, de refixer les parties déjà digitalisées de la carte, ce qui facilite la poursuite du travail.

Le pourcentage d'erreur de numérisation de ces tics peut être vérifié par affichage interactif sur l'écran de travail. A partir de 0.00, vu que les coordonnées sont en degrés décimaux, l'erreur est à la seconde près et par conséquent devient "insignifiante".

Les couvertures thématiques sont enregistrées en mode vectoriel. Les phénomènes représentés de manière continue sur la carte (courbes de niveau, réseau hydrographique, etc.) sont graphiquement représentées par des lignes (arc) et les phénomènes ponctuels comme les villes, les points cotés en points (fig. 12). La pédologie, relevant d'un aspect plutôt surfacique est généralement représentée par des polygones (entités spatiales communes aux éléments identiques). Cependant, rien n'empêche d'utiliser l'un ou l'autre des modes de représentation pour transcrire les phénomènes à étudier. Cela d'autant plus qu'on peut, par certaines commandes, basculer facilement des points aux arcs et vice versa.

Nous avons, de ce fait, digitalisé le réseau hydrographique qui était moins dense en arc et transcrit le relief en points, ce qui a, en quelque sorte, facilité la création du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Cela nous a économisé le passage à une étape intermédiaire qui consiste à retransformer les courbes de niveau en semis de points ponctuels (rappelons toutefois qu'une ligne est un ensemble de points) pour la création du MNT.

Après la transcription numérique des documents relatifs au substrat topographique, il s'avère indispensable d'effectuer une série de vérification et de corrections des erreurs de précision : débordements d'arc, polygones non fermés, etc. (fig. 13).

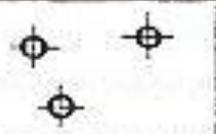
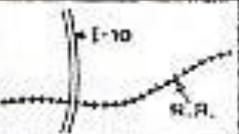
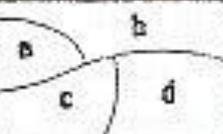
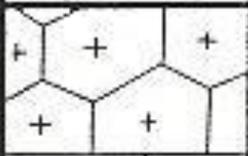
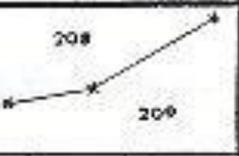
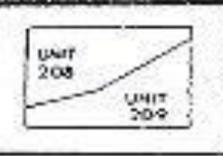
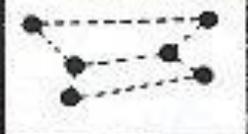
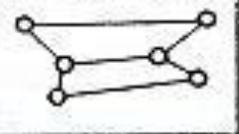
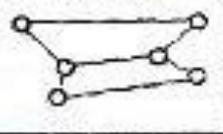
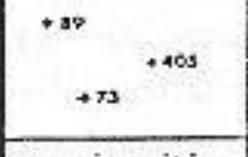
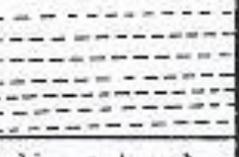
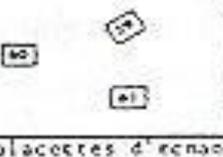
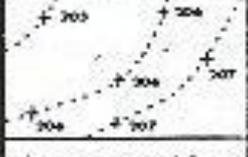
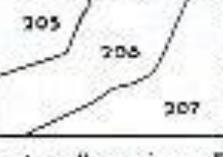
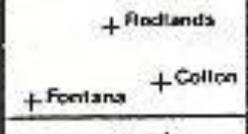
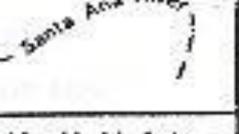
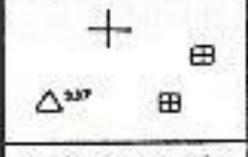
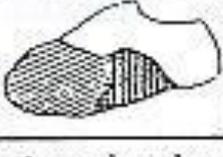
	points	traits	polygones
données sur les détails			
	détail ponctuel (site archéolog.)	détails linéaires (routes)	polygones homogènes (sols)
unités de surface			
	centroïdes de polygones	lin. administr. polygonales	unité de surface finière d'invent.)
topologie des réseaux			
	nœuds (intersections)	arcs (rues)	polygones (blocs)
données d'échantillonnage			
	station météo	lignes de voi	placettes d'échantillon. s/certain
données de surface			
	alt. topographique	courbes de niveau	polyg. "proxiaux"
données sur les écritures			
	noms de lieu	détail linéaire	nom de polygone
données sur les symboles graphiques			
	symb. ponctuels	symb. linéaires	estomp. de polyg.

Fig. 12 : Types de constituants représentant les objets géographiques en mode vectoriel sous-Arc Info (Dangermond J., 1982)

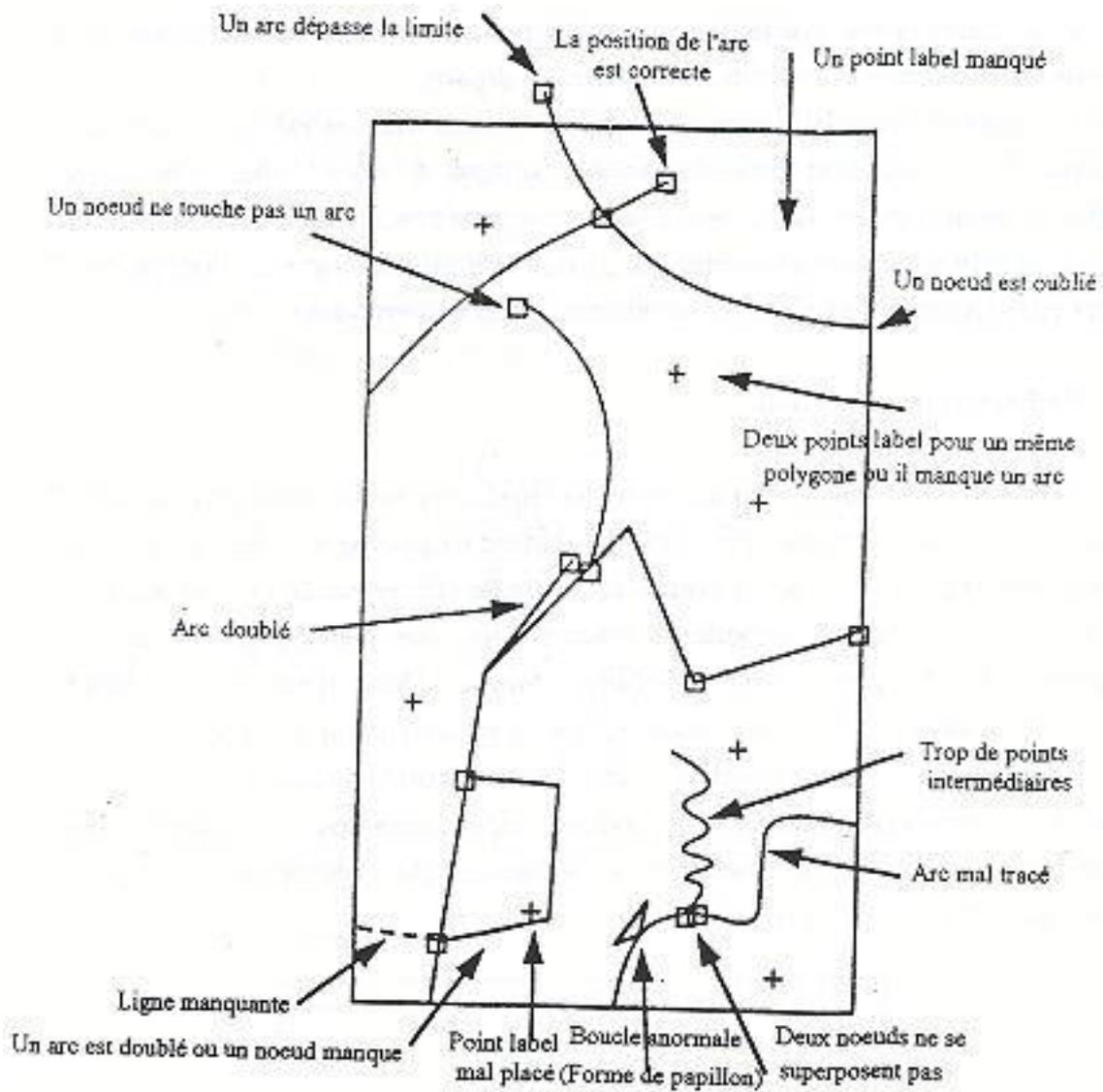


Fig. 13 Types d'erreurs de numérisation sous Arc/Info (Thompson et al., 1992)

Pour des problèmes d'ordre matériel à savoir l'utilisation d'une table à digitaliser A1, nous avons été contraints de "couper" nos cartes topographiques en "morceaux". De ce fait, il nous a fallu créer plusieurs couvertures représentant chaque morceau de carte, leur choisir au moins quatre tics (à ressaisir à chaque reprise de travail), ce qui, par la suite a nécessité un long travail de corrections afin de restituer le plus finement possible l'originalité des documents transcrits. Toutefois, avec certaines commandes (notamment Map-join) qui ont pour principale fonction l'assemblage de tous les éléments et attributs de diverses couvertures sur une seule, nous avons pu sans trop de difficultés mais avec beaucoup de minuties, reconstituer la carte topographique de départ.

La dernière phase de la saisie des supports cartographiques est la création de la topologie. Cette opération géo-relationnelle consiste à établir pour une même couverture, un lien spatial entre les éléments enregistrés séparément. Elle fournit, en outre, un groupe d'attributs géométriques (surface, périmètre, longueur, direction, etc.) calculés en fonction du type d'objets composant la couche thématique.

1.2.3. Maillage et triangulation

Créer un MNT revient à représenter le relief sous forme d'une grille à maille régulière à l'aide d'une méthode d'interpolation et donc, de pouvoir calculer, entre autres variables morphopédologiques, les pentes. La méthode utilisée par le logiciel Arc Info pour généraliser certains phénomènes ponctuels sur une étendue plus vaste est l'interpolation polynomiale de degré 5, linéaire et bivariée. La création d'un MNT passe donc inévitablement par la triangulation qui est la caractéristique principale de cette méthode d'interpolation. Cela consiste à généraliser l'information discrète représentée par un semis de points (donc mesures ponctuels représentées par des coordonnées géographiques : x = latitude, y = longitude et z = hauteur) afin d'obtenir une information continue dans l'espace d'étude (fig. 14).

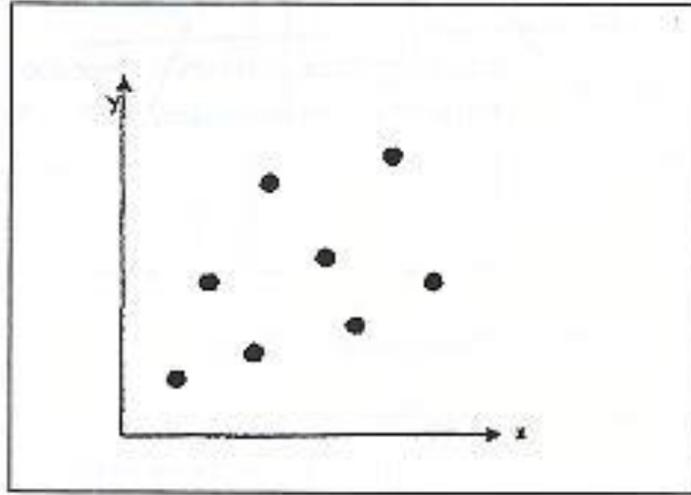


Fig. 14 : Localisation en x et y du semis irrégulier de points

Cette spatialisation par interpolation mathématique et ou statistique s'effectue d'abord par la création d'un maillage plus ou moins régulier à partir des points connus (fig. 15). Les courbes de niveau sont discrétisées selon une fréquence spatiale définie et associée aux points cotés. On calcule ensuite le réseau de triangulation établissant un lien thématique (en z) et topologique entre les points. La triangulation s'effectue par le calcul des valeurs manquantes qui intègrent les relations entre les points et leurs plus proches voisins (Saint-Gérand T. et al., 1991). Les triangles résultant du calcul sont équilatéraux mais pas équidistants car reliant des coordonnées d'altitudes diverses. Afin de respecter la réalité du terrain, le réseau hydrographique est introduit comme terme correcteur lors du calcul d'interpolation, en tant que minimum local. Cela permet de reconstituer sur le MNT les lits des cours d'eau. La dernière étape consiste à calculer, par interpolation, la surface ajustée à partir de cette triangulation (fig. 16) : après recherche d'un nombre de points voisins donné. On utilise une fonction mathématique (fonction linéaire, bi-linéaire, spline, etc.) permettant d'obtenir la valeur recherchée à partir de ces points d'altitude connue.

63 : valeur connue
80 : valeur calculée

61	65	72	74	80	82
60	63	50	55	57	59
85	70	71	80	100	210
120	140	150	160	200	215
110	120	150	160	180	200
100	110	122	180	185	190

Fig. 15 : Matrice régulière de l'information localisée en x et y, connue ou calculée en z

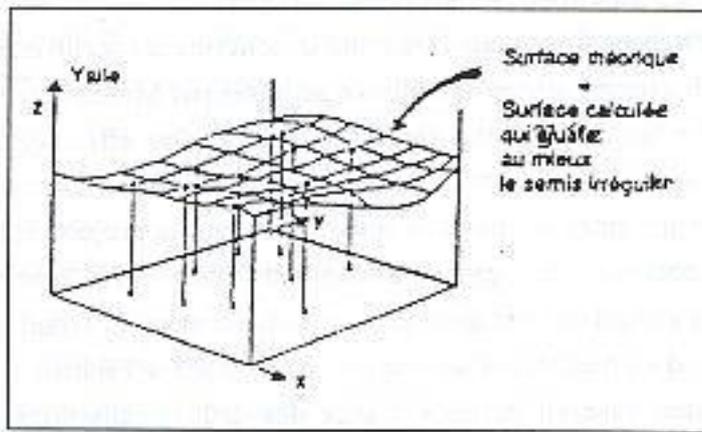


Fig. 16 : Représentation graphique de la surface théorique connue en x, y, z .

2. Conversion des documents selon la projection Météosat

Le choix de l'échelle spatiale des documents à exploiter est fonction des types de données de base, des thèmes à étudier, mais également de la problématique de recherche.

Une bonne représentation spatiale des éléments à étudier passe, inévitablement, par ce choix d'échelle qui constitue une étape capitale lorsqu'on veut par la suite procéder par superposition de documents. Cela permet d'éviter les problèmes de débordements de contours propres aux changements d'échelles.

Le choix de l'échelle spatiale, et donc du mode de projection et de représentation (petite échelle, grande échelle), est une étape aussi fondamentale que celle concernant les échelles de temps. La question incontournable est : peut-on convertir une échelle vers une autre sans pour autant perdre ou modifier les informations d'origine ? Face au nombre important de données dont nous disposons, et suite à la complexité de leur modes de représentations (Météosat : pixel 5 x 5km, NOAA : 1.1 x 1.1km, degrés décimaux pour les supports cartographiques et les données sol) nous n'avons pas pu échapper à cette délicate question concernant le choix de l'échelle adéquate permettant de représenter toutes les informations sans pour autant les déformer ou en perdre une partie préjudiciable à la résolution de la problématique initiale.

Mais, on sait que pour valider et interpréter les données satellitaires à des échelles locales, régionales, zonales ou globales, il est nécessaire de mettre en relation les points de mesures ponctuelles, avec ceux qui sont issus de la télédétection et

distribués spatiotemporellement. Deux voies sont possibles pour y arriver, soit augmenter la taille de la mesure ponctuelle jusqu'à la résolution du paramètres mesuré, soit dégrader celui-ci jusqu'à une échelle locale (Dagorne D., 1990)

Par conséquent, le choix de la plus petite échelle, c'est à dire celle de Météosat s'est avéré plus judicieux. Car opter pour la projection cartographique (plane) ou pour celle de NOAA (pixels de 1 x 1km) entraînerait une déformation et par conséquent une perte irrémédiable d'informations pour l'étude de la convection (occurrences de nuages à sommets froids) et des températures de brillance acquises par Météosat.

La conversion des documents à l'échelle Météosat s'est effectuée avec le logiciel Triskel. Cet outil informatique est doté d'un module permettant de créer géométriquement un lien entre des points d'amer choisis dans la projection Météosat et les coordonnées géographiques des cartes à convertir dans cette nouvelle forme de représentation. Cette conversion est appliquée individuellement à chacun des documents. Cette reconstitution du document à la projection, et donc à l'échelle Météosat passe inévitablement par une mise en correspondance des deux localisations. Cela s'obtient d'abord par le calcul de la déformation, ensuite par l'application du schéma de ré-échantillonnage des pixels. Cette approche autorise la superposition géométrique dans un même référentiel d'informations d'origines très différentes (Dagorne D, 1990). Ainsi, l'une des principales caractéristiques de notre méthode de travail est que nous avons ramené toutes nos images à l'échelle Météosat. Et Cela nous a permis de contourner, dans un premier temps, l'aberration que constituerait la superposition de documents ayant des échelles différentes mais également, d'éviter les débordements de contours et les pertes d'informations qui auraient pu en résulter.

3. Méthodes appliquées d'estimation des pluies

Les méthodes d'estimation des pluies au Sahel n'ont pas cessé de se multiplier depuis que cette région est frappée par la sécheresse. Différentes méthodes statistiques ou de suivi du cycle de vie des nuages ont été appliquées, améliorées, en vue de comparaison pour l'adoption de celle plus représentative de la réalité (cf. Troisième Partie).

Dans notre étude, pour estimer les précipitations au Sénégal, nous avons adopté deux méthodes. Ces deux approches différentes ont été développées à Lannion, depuis

plusieurs années, dans le cadre d'EPSAT. Elles font toutes les deux appel aux données satellitaires et aux relevés stations et s'appuient sur une validation terrain.

3.1. La méthode TAIR

Cette méthode repose sur l'utilisation combinée d'une information sur la source des pluies (occurrences des nuages à sommets froids) et de la signature de ces pluies sur la cible (températures radiatives maxima de la surface) corrigée par la température de l'air en surface (Guillot B. et al., 1991). Une régression linéaire multiple est ensuite réalisée à l'aide d'une calibration de ces paramètres par les données pluviométriques mesurées au sol, ce qui revient à la formule suivante :

$$Pe = a FOC + b (Ts - Ta) + cte$$

Pe = Précipitations estimées

FOC = Fréquences d'Occurrences de nuages à sommets froids (réalisées avec des images Météosat)

Ts = Températures radiatives maxima de surface (mesurées par Météosat)

Ta = Température de l'air (mesurée aux stations)

Cte = Constante

La température de l'air est utilisée comme terme correcteur pour tenir compte des effets de l'évaporation des gouttes d'eau précipitées par les nuages. Comme déjà expliqué, l'énorme quantité de vapeur d'eau témoignant d'une atmosphère saturée, fausse par phénomène d'effet de serre (d'environ 5°C et de façon régulière) les valeurs de températures radiatives captées directement par les satellites.

Dans la pratique, cet algorithme s'effectue en deux temps. Il s'agit dans une première étape de créer un fichier d'exploitation regroupant tous les éléments qui vont être pris en compte dans le traitement statistique (voir Annexe). Ces divers paramètres doivent, par conséquent, appartenir à la même décennie mais également aux mêmes stations. Pour le calcul des précipitations estimées, une régression linéaire multiple est appliquée avec ces divers paramètres. Cette opération est traduite par un fichier statistique décrivant toutes les étapes nécessaires à sa réalisation : calcul des moyennes, variances, écart-type, matrices des variances et des corrélations, et enfin le coefficient r^2 issue de la régression multiple.

Ensuite pour la validation de ces résultats, est effectuée une dernière opération prenant en compte les précipitations estimées et les précipitations mesurées sur le terrain en vue d'une comparaison.

3.2. La méthode LATIT

Cette méthode est également utilisée à l'U.T.I.S. (Unité de Traitement d'Images Satellitaires) qui est une section de l'ORSTOM de Dakar. Mais pour être fidèle à notre perspective de départ (rappelons que les paramètres météorologiques dont nous disposons ont été mesurés sur seulement 19 stations), nous l'avons quand même appliquée en vue de comparaisons, dans un premier temps, avec la méthode TAIR, ensuite, avec les autres résultats issus de nos recherches. Cela dans le but de tester celle qui s'avère la plus efficace pour notre zone d'étude, et dans une perspective d'application locale au pas de temps décadaire.

Une régression linéaire multiple à quatre variables prenant en compte la variable expliquée (précipitations estimées), les températures au sol, les occurrences de nuages à sommets froids et la latitude est réalisée à partir de cette formule :

$$Pe = a.Oc + b. Tmax + c.Lat + d$$

- Pe = Précipitations estimées
 FOc = Fréquences d'Occurrences de nuages à sommets froids (réalisées avec des images Météosat)
 Tmax = Températures radiatives maxima de surface (mesurées par Météosat)
 Lat = Latitude des stations de mesures
 a, b, c, d, = Termes constants issus de la régression

Dans cette méthode, le recours à la latitude permet de prendre en compte l'environnement physique des nuages. Il a cependant le défaut de ne pas refléter les variations locales dans le temps des paramètres comme la température ou l'humidité de l'air (Cadet D.L. et Guillot B., 1991).

Cette méthode est donc complémentaire de la précédente qui, elle, ne prend en compte que ces deux paramètres. Cependant, les résultats issus de leur application s'avèrent plus ou moins identiques, même si une différence nette caractérise une décade particulière (voir partie présentation des résultats). La comparaison des valeurs de pluies estimées et de pluies mesurées aux stations nous permet d'avancer que ces deux méthodes, malgré le recours à des éléments correcteurs ont tendance à surestimer les précipitations, et cela toujours dans certaines régions. Nous avons, également, constaté en comparant les coefficients de corrélations, que les estimations réalisées au pas de temps mensuel sont plus significatives que celles opérées au niveau de la décade. Les

commentaires et comparaisons concernant ces divers résultats seront développés, de manière plus large, dans la quatrième partie.

4. Recherche de corrélations entre les paramètres

4.1. Croisement des données : régressions linéaires simples et multiples

Rappelons que l'une des lignes directrices de cette étude est de rechercher au travers des paramètres physico-géographiques pris en compte, celui (ou ceux) susceptible (s) d'améliorer les méthodes d'estimation des pluies préexistantes. Les types d'interdépendance pouvant exister entre certains de ces paramètres sont indiscutables et par conséquent, évidents à priori. Pour certains facteurs thermodynamiques dont la vitesse du vent avec l'évaporation, la température avec l'humidité relative, divers travaux ont déjà confirmé les relations de cause à effet pouvant les concerner. Cependant, pour d'autres, il s'avère nécessaire pour affiner certaines hypothèses relevant, pour la plupart, de "pressentiments" ou basées sur de simples observations, d'établir une série de calculs statistiques afin de confirmer ou d'infirmer les relations d'interdépendances existantes. Pour cela, nous avons déroulé une suite d'opérations de croisement des éléments deux à deux, puis trois à trois... afin de mesurer les types de corrélations possibles.

Dans un premier temps, nous avons effectué une série de régressions linéaires simples en croisant les paramètres deux à deux. La formule appliquée pour réaliser cette opération est la suivante :

$$y = m.x + b$$

y = variable expliquée

x = variable explicative

m et b = termes constants de la régression

La seconde étape de ces calculs de corrélation a consisté à établir des régressions linéaires multiples en croisant les paramètres trois à trois, puis quatre à quatre, etc. La formule appliquée pour la réalisation de ces opérations est la suivante :

$$y = (m1.x1) + (m2.x2) + \dots(mn.xn) + b$$

y = variable expliquée

x = variable explicative

m1,... mn, b = termes constants de la régression

Après ces diverses combinaisons deux à deux, puis trois à trois... entre variables explicatives (x) et variable expliquée (y), nous avons procédé à une vérification sur table de Fisher, de la fiabilité et de l'adaptabilité des coefficients de corrélations issus de ces calculs. Les valeurs de r^2 supérieures à 50 pour un risque d'erreur de 5% ont ainsi été retenues.

La phase finale concernant ces traitements statistiques a consisté à comparer les coefficients de corrélations retenus afin de sélectionner, selon la régularité des résultats au cours des 13 décades test, les paramètres qui, par la suite, devraient être intégrés dans les formules appliquées pour l'estimation des pluies.

4.2. Création d'un nouveau modèle d'estimation des pluies pour le Sénégal :

Latit + dmer

Trois situations ont résulté de ces opérations statistiques. Trois paramètres (deux, puis trois) ont en effet retenu notre attention quant à leur potentialité d'améliorer la méthode Latit pour estimer les pluies. Il s'agit notamment de la longitude et de la direction du vent, déterminants en début de saison. Malheureusement, au fur et à mesure que l'on avance dans la saison des pluies, ces deux variables explicatives perdent de leur importance et sont relayées par d'autres paramètres : les indices de végétation et les minima de température de l'air. Cela confirme la présence d'une atmosphère humide et l'apparition des premières pousses d'herbacées (réponses spectrales observables dans les synthèses de NDVI des scènes NOAA), liées aux manifestations pluvieuses.

Le troisième scénario issu de ces traitements statistiques est relatif à un paramètre qui, à priori paraît aléatoire. Il s'agit principalement de la distance des stations météorologiques par rapport à l'océan atlantique (dmer). Cet élément s'est révélé remarquablement pertinent comme variable explicative pour estimer les pluies ; ce qui n'est pas surprenant car la distance des stations à l'océan regroupe plus ou moins globalement tous les éléments d'origine physico-géographique. **Les coefficients r^2 issus des calculs de corrélations entre la variable dmer et les autres éléments de la méthode Latit ont été significatifs tout au long de la saison des pluies sans la moindre discontinuité.** Cette singularité a conforté notre **choix pour ce paramètre comme terme correcteur.** Nous l'avons intégré dans les calculs afin de **créer un nouveau modèle d'estimation des pluies pour le Sénégal.**

Conclusion partielle

Dans ce chapitre, sont décrites les différentes méthodes des traitements appliquées à l'étude. L'utilisation du logiciel Arc/Info a permis d'obtenir une cartographie numérisée du substrat : pédologie, relief et réseau hydrographique. Le logiciel Triskel a permis l'utilisation de méthodes d'interpolations pour généraliser l'information mesurée de manière ponctuelle dans les stations météorologiques mais aussi, la résolution des difficultés liées aux échelles spatiales. La troisième phase des traitements a consisté à croiser, dans un premier temps, les paramètres aérologiques entre eux, et dans une seconde phase, avec les pluies, dans le but de rechercher les relations entre ces paramètres afin d'intégrer les éléments pertinents dans le modèle d'estimation des pluies que nous proposons. La plupart des paramètres tendent à améliorer la méthode Latit pris comme référence et ont donc retenu notre attention. La distance des stations par rapport à la mer est, cependant, l'élément qui améliore de façon durable cette méthode et par conséquent a été retenue comme terme correcteur.

CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE

Notre objectif était d'intégrer des données exogènes, d'origines diverses, aux images satellitaires afin d'obtenir une vision plus globale de plusieurs phénomènes traités simultanément et de déterminer leurs rôles dans le développement des mécanismes régissant la pluviométrie.

Les principaux obstacles auxquels nous avons été confrontés sont : la masse de données, les différentes modes de représentations géométriques, et le changement d'échelle.

Nous savons, toutefois, que toute réduction d'échelle est un mouvement comparable à une élévation en altitude. Et de ce fait, les plus petits détails ne peuvent plus apparaître parce que l'information zonale devient si petite qu'elle se transforme en une donnée ponctuelle, mais aussi parce que l'échelle employée ne justifie pas que l'on se perde dans ce qui devient accessoire (Cambrezy L., 1990)

Face à la question, quelle mode de représentation choisir afin de contourner les problèmes liés à ce choix et qui, dans tous les cas reste réelle, nous avons opté pour la plus petite des échelles représentées, c'est-à-dire, celle du satellite Météosat, celle des nuages pluviogènes. Car cela permet de conserver les phénomènes essentiels tout en évitant de perdre les informations originelles.

L'originalité de notre méthode de travail réside, à la fois, dans le fait que nous avons reconstitué l'environnement aérologique dans lequel évoluent les nuages, en les confrontant avec les paramètres du substrat et ceux des relevés météorologiques stationnels. Seconde singularité, tous les supports utilisés sont numériques, ce qui, non seulement, constitue une base de données disponible pour de futurs utilisateurs, mais devrait également servir d'exemple quant à l'élaboration de ce type de documents (dont l'exploitation est plus aisée pour des recherches ultérieures) sur le même espace ou d'autres régions comparables.

Toutefois, cette étude constitue un "prélude" et, par conséquent, nécessite un approfondissement à l'échelle climatologique. Il serait, en effet, intéressant d'appliquer l'analyse sur une échelle de type trentenaire (norme climatologique) afin d'évaluer les résultats sur un pas de temps plus long permettant des interprétations de type série statistique. Enfin, il serait pertinent de pouvoir élargir le champs de travail en intégrant l'ensemble de la bande côtière sahélienne afin de vérifier si les résultats adoptent le schéma classique zonal (Nord-Sud) ou si une distinction linéaire marquée entre la côte et l'intérieur des terres doit être prise en considération.

QUATRIÈME PARTIE :
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET
PERSPECTIVES

INTRODUCTION DE LA QUATRIÈME PARTIE

Dans cette dernière partie de la thèse, également composée de deux chapitres, seront exposés les résultats issus des traitements. Nous allons, dans un premier temps, à travers le suivi des paramètres pris en compte, cerner leur évolution spatiotemporelle. Ensuite, sera menée afin de vérifier l'existence d'un comportement commun, une étude comparative des différents facteurs climatiques. Un même graphique d'évolution des paramètres concernés, permettra de vérifier à travers l'allure des courbes la régularité des écarts enregistrés.

Quatre stations météorologiques sélectionnées pour leur position géographique représentant bien la double transition climatique observée au Sénégal sont prises comme sites test, afin d'étudier le comportement des paramètres aérologiques et de vérifier la véracité de la réalité climatique souvent décrite.

Les résultats obtenus grâce aux différentes méthodes d'estimation des pluies seront exposés dans le dernier chapitre. De même, les pluies mesurées pendant la saison 1990 seront comparées avec celles enregistrées au cours de la période "normale" 1931-1960.

Pour confirmer la nécessité d'établir une nouvelle méthode d'estimation des pluies pour le Sénégal, les écarts entre valeurs de pluies mesurées et pluies estimées par les types d'approches adoptées dans cette étude seront traduits sous forme de graphiques et de tableaux afin de mieux les visualiser.

L'étude des relations pluies/relief permettra enfin de justifier l'emploi éventuel d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). S'il existe une corrélation significative entre ces deux éléments, le relief et la pédologie feront l'objet d'une superposition en vue de déterminer les relations entre substrat terrestre et pluviosité, voire pluviométrie. Le maillage régulier du MNT prévu à cet effet permettra d'effectuer à travers la zonation régulière une classification aux différents espaces communs au sol, au relief et à la pluviométrie.

CHAPITRE VII :

COMPORTEMENT SPATIO-TEMPOREL DES PARAMÈTRES DE L'ENVIRONNEMENT

C'est dans la perspective d'une bonne interprétation que nous avons regroupé sur une même "mire" les 18 cartes de chaque thème étudié. Ce support commun facilite le suivi spatio-temporel et la comparaison des paramètres pris en compte.

Par conséquent, dans ce chapitre, chacun des éléments étudiés fera l'objet d'un suivi individuel. Cela revient à indiquer la place et le rôle de chacun à travers son évolution. Cerner la manière dont chaque élément s'insère dans le milieu à travers son comportement spatio-temporel permettra également de justifier son utilisation dans le cadre de cette étude.

Seront également exposés, dans une perspective de comparaison, les écarts observés entre certains éléments aérologiques dont l'évolution aurait pu à priori sembler concordante. Cela permettra de vérifier et donc de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une évolution d'ensemble.

I. DOCUMENTS D'ORIGINE SPATIALE

1. La nébulosité : occurrences de nuages à sommets froids et pluviosité

Au Sénégal, la nébulosité se présente sous différents aspects. Les valeurs de nébulosité relativement élevées lors des périodes de "heug" (masses nuageuses liées à l'incursion d'air polaire ou aux fronts d'alizés) se distinguent de celles des nuages d'hivernage pouvant dépasser 5 octats. Également, les formations nuageuses pendant ces deux périodes diffèrent par leur origine et leur évolution.

Pendant l'hivernage, les nuages sont liés à l'évolution des flux d'Est d'altitude mais aussi et surtout, au dynamisme de la mousson de basses couches. Par conséquent, plus cette dernière, est instable et épaisse cas rare au Sahel, et plus, les nuages sont importants et significatifs.

Mesurer l'efficacité d'un nuage s'avère cependant délicat. Cela d'autant plus qu'il n'existe qu'un seul élément pouvant en témoigner : la pluviométrie enregistrée après

son passage. Parler des conditions de mesures de la pluie dans les stations d'observation conduit à un autre débat: celui de la fiabilité du réseau au sol.

Afin de vérifier l'existence d'une évolution cohérente entre occurrences de nuages à sommets froids et pluies mesurées, les cartes relatives à ces deux paramètres feront l'objet de comparaison.

Si les occurrences de nuages (température inférieure ou égale à -40° C) dits pluviogènes (fig. 1) répondent exactement à cette définition, leur évolution spatiotemporelle devrait normalement correspondre à celle des pluies mesurées dans les stations météorologiques affectées. Or, sur certaines cartes établies à partir des nuages pluviogènes, on constate des zones couvertes par ces types d'occurrences et n'ayant pas nécessairement provoqué de la pluie.

En comparant les cartes de précipitations mesurées à celles des nuages pluviogènes, on constate que les 5% d'occurrences de nuages observés pendant la troisième décennie de mai n'ont engendrée aucune pluie sous leur passage, du moins si l'on se réfère uniquement aux mesures effectuées dans les stations concernées, seules preuves “visuelles” et “palpables” de la pluviosité d'un nuage.

Cette discordance dans les valeurs obtenues peut-elle confirmer un pouvoir évaporant intense de l'atmosphère pouvant constituer un facteur entravant l'arrivée de la pluie jusqu'au sol ; phénomène dont nous avons déjà parlé ?

Aussi, ces 5% d'occurrences à sommets froids sont-ils uniquement composés de nuages cirriformes à température inférieure à -40° C, remplissant par conséquent les conditions établies pour l'identification des nuages pluviogènes, mais non pourvoyeurs de pluie ? Cela expliquerait leur présence dans les images de synthèse.

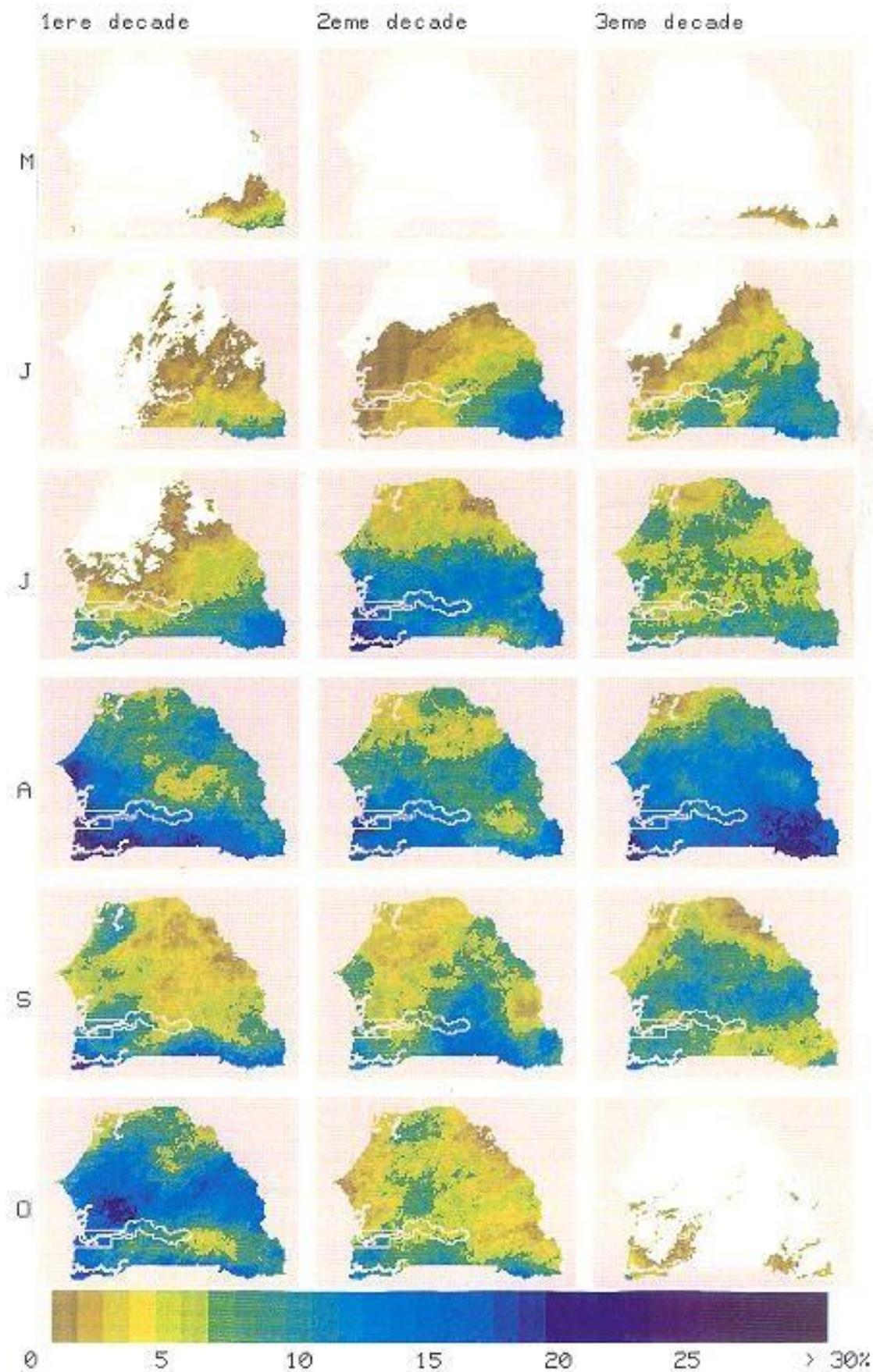


Fig. 1 : Occurrences de nuages à sommet froid, en % du nombre d'images traitées, $T < -40^{\circ} \text{C}$
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE

La troisième question que l'on se pose est d'ordre technique. Cette incohérence entre relevés pluviométrique et occurrences de nuages à sommets froids peut-elle être attribuée uniquement à la dispersion des stations de mesures au sol ? Etant donné que la pluie n'arrive presque jamais verticalement au sol, une turbulence des flux atmosphériques pourrait en imprimant une déviation aux particules d'eau, être à l'origine de ces écarts. Le pluviomètre peut même nuire à la précision de la lame d'eau précipitée, par la turbulence qu'il crée lui-même. Souvent, la pluie tombe obliquement par rapport au pluviomètre et des difficultés de précision dans l'enregistrement peuvent expliquer cette discordance entre données satellitaires et relevés au sol.

L'hypothèse est d'autant plus plausible que les pluies relèvent de zones de turbulence et que, de plus, dans le Sud-Est du pays - région où l'on enregistre les toutes premières manifestations pluvieuses au Sénégal - les ascendances orographiques participent activement aux mécanismes pluviogènes.

Un autre point d'ordre technique mérite également d'être souligné. L'absence et/ou le manque de personnel de surveillance installés en permanence dans les postes d'observation pourrait être à l'origine d'une discontinuité de relevés et qu'alors valeurs nulles et manquantes soient confondues. Enfin, vu le maillage des sites d'observations, il est toujours possible qu'un nuage de petite taille n'affecte une station que sur sa marge. Dans le même ordre d'idée concernant la recherche d'une évolution d'ensemble entre occurrences de nuages à sommets froids et précipitations mesurées, nous avons parfois observé le phénomène inverse de celui que nous venons d'évoquer. Dans cette même région Sud-Est, la pluie a fait l'objet d'un enregistrement dans des zones "sans" nuages pluviogènes, en particulier au cours de deux décades : la seconde de juin et la troisième d'octobre. Ces précipitations mesurées dans des zones dépourvues d'occurrences de nuages à sommets froids ont-elles été engendrées par d'autres types de formations nuageuses ? S'agit-il de nuages pluviogènes à températures supérieures au seuil d'identification prédéfini pour la sélection des nuages pluviogènes (ce qui signifierait que dans certaines circonstances le seuil est à revoir) dans les synthèses d'occurrences de nuages à sommets et qui n'ont pu être pris en compte.

Toutefois, le suivi des occurrences de nuages à sommets froids met en évidence la double transition climatique évoquée tout au long de notre exposé. On note, selon la disposition des occurrences, une évolution distincte entre régions septentrionales et méridionales, mais également entre la côte et l'intérieur des terres.

En début de saison des pluies, excepté pendant les trois décades évoquées plus haut, les nuages pluviogènes suivent le tracé des pluies mesurées. Ils font leur apparition à l'Est du pays dès la première décade de mai, jusqu'en mi- juillet, période pendant laquelle ils couvrent la totalité du pays. On note une évolution plus ou moins méridienne. Cela avec un tracé Nord-Est/Sud-Ouest reflétant une forte occurrence sur le Sénégal oriental. Ce tracé oblique témoigne d'une pénétration encore faible de la mousson par le Sud-Est, mais également d'un blocage engendré par la vigueur des flux originaires de l'Atlantique Nord.

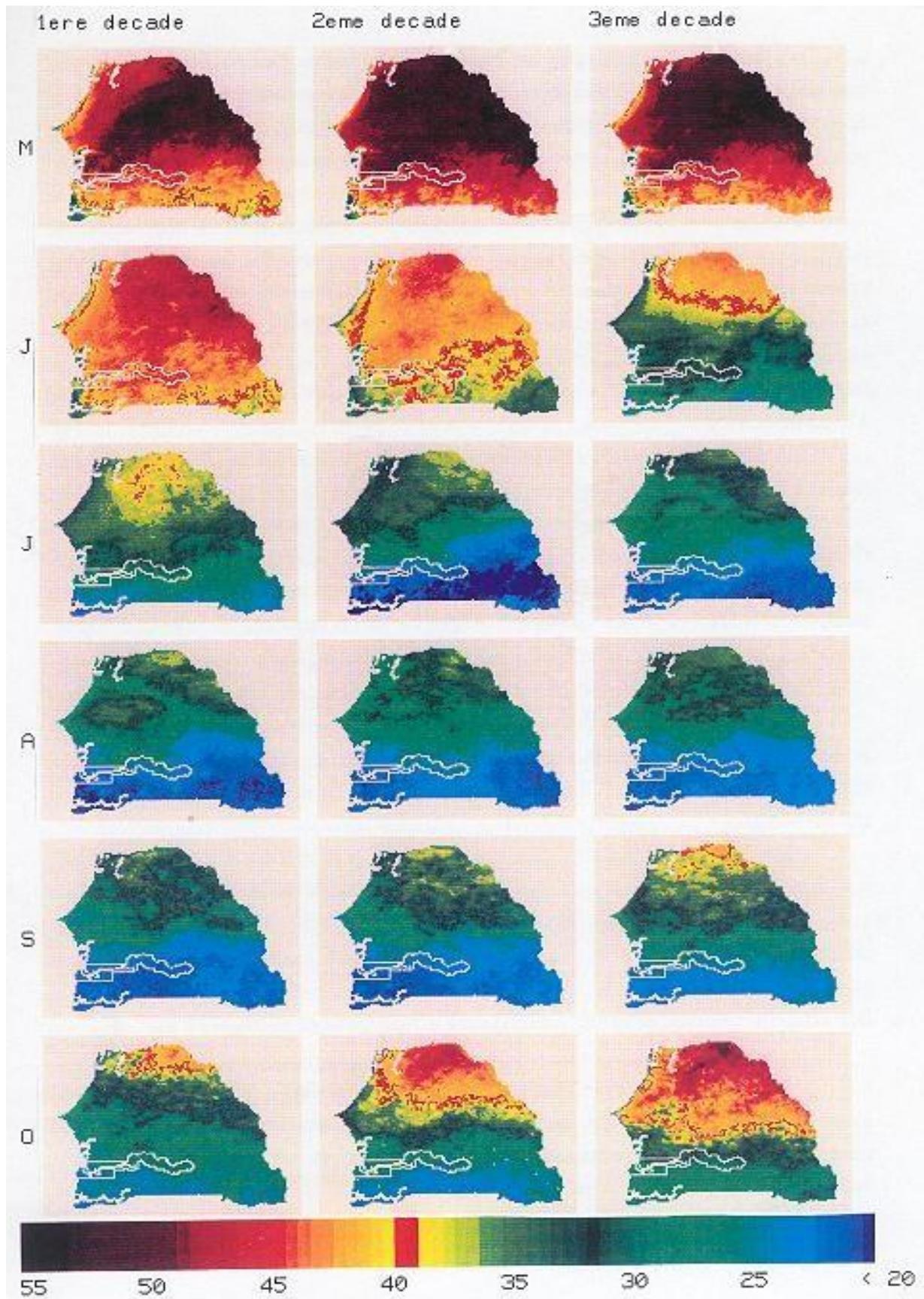
Hormis la première décade d'août durant laquelle on constate une évolution méridienne des occurrences, le tracé reste zonal pendant l'ensemble de l'hivernage. Les valeurs les plus élevées concernent, cependant, les régions méridionales. Cela s'explique par le fait que cette région est, non seulement sous l'influence directe de la mousson mais est également située sur la ligne de passage des lignes de grains. Cette disposition méridienne des occurrences observées pendant la première décade d'août, résulte de la vigueur du flux de mousson chargé d'humidité et pénétrant, cette fois, par le Sud-Ouest. Les fortes valeurs d'occurrences enregistrées dans cette région (entre 20 et 30%) confirment cette hypothèse.

Étant donné qu'une distinction des types de nuages identifiés à partir du seuil de -40° C s'avère impossible sur les cartes, la forme seule des amas observés pourrait fournir des indications sur leur origine. La présence de lignes de grains, souvent organisés en amas, et matérialisées par un fort pourcentage d'occurrences auréolés par d'autres types d'occurrences à valeurs plus faibles, pourrait ainsi être distinguée.

2. Maxima de température radiatives

2.1. Évolution spatio-temporelle des tmax radiatives : IR Météosat

Les cartes de maxima de température radiatives (fig. 2) reconduisent la distinction régionale caractéristique du climat sénégalais. En début de saison des pluies, alors que l'air est encore très sec dans la plupart des régions, le gradient de températures entre régions littorales et l'intérieur des terres dépasse quasiment les 20° C. La présence d'une atmosphère humide explique largement cette différence entre les valeurs de températures enregistrées par Météosat. À l'intérieur des terres, où la siccité de l'air favorise la transparence de l'atmosphère, les radiomètres embarqués à bord du satellite captent toutes les réponses spectrales du substratum terrestre réchauffé pendant cette période. Ce réchauffement est exacerbé par la rareté ou l'absence de végétation dans ces régions où les sols sont presque nus et les valeurs d'albédo très élevées.



**Fig. 2 : Températures maxima radiatives ; Infrarouge METEOSAT
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**

En revanche, sur la côte occidentale, l'influence océanique, issue des brises matinales, favorise l'installation d'une couche d'humidité atmosphérique plus ou moins épaisse. La présence de cette vapeur d'eau dans l'atmosphère perturbe les valeurs de températures captées par le satellite car l'eau exerce un effet de serre.

Le fort gradient de température, entre les régions Ouest et les régions Est, reste matérialisé par la disposition des isothermes à direction méridienne. La disposition des isolignes du Nord vers le Sud est plus marquée encore avec l'isotherme 39° C pris comme référence pour délimiter les zones sèches - chaudes - et humides - fraîches - (Guillot B., 1991). En prenant l'isotherme 39° C comme référence pour appliquer cette régionalisation à l'hivernage 1990, nous pouvons dire que la sécheresse a concerné 11 décades sur 18. Les 7 décades humides se situant au cœur de l'hivernage : de la mi-juillet à la mi- septembre.

La seconde distinction régionale est bien sûr perpendiculaire. L'alignement zonal des isothermes apparaît à partir de juillet et s'étend tout au long de l'hivernage. Les régions septentrionales à températures comprises entre 25 et 39° C se distinguent des régions Sud plus arrosées avec des valeurs souvent inférieures à 20° C. Toutefois, on note sur l'ensemble du Sénégal une chute des températures pendant cette période.

Au Nord, cela est dû en partie à l'installation d'un tapis herbacé couvrant les sols et réduisant les valeurs d'albédo. L'humidification des sols avec l'installation de l'hivernage (après les premières pluies) contribue même à l'abaissement des températures même dans les régions septentrionales. Les faibles valeurs de températures enregistrées dans les régions méridionales ne sont que le reflet d'une végétation plus ou moins revigorée et dont les échanges actifs par transpiration avec le milieu environnant conduisent à la saturation des masses d'air atmosphériques.

Dans une perspective de validation des températures radiatives, et afin de mesurer les impacts des composants atmosphériques, notamment la vapeur d'eau, nous avons confronté ces températures aux maxima mesurées dans l'air par les stations météorologiques.

2.2. Écarts Températures radiatives/Températures mesurées au sol

Vu l'altitude du satellite Météosat, on comprend aisément que certaines mesures soient fortement perturbées par des effets atmosphériques (nuages, humidité, poussières, etc.). La couche atmosphérique à traverser est très étendue, ce qui

inéluçtablement fait intervenir les éléments qui composent l'espace séparant le satellite et les objets visés au sol et cela d'autant plus que les basses couches de l'atmosphère peuvent se composer de corps non gazeux fort absorbant ou réfléchant.

Par conséquent en comparant les maxima de températures radiatives fournies par le satellite Météosat aux valeurs relevées dans les stations, on note d'énormes écarts pouvant dépasser 10° C. Ces écarts de températures représentées sur la figure 3 (a, b, c) mettent en évidence trois situations.

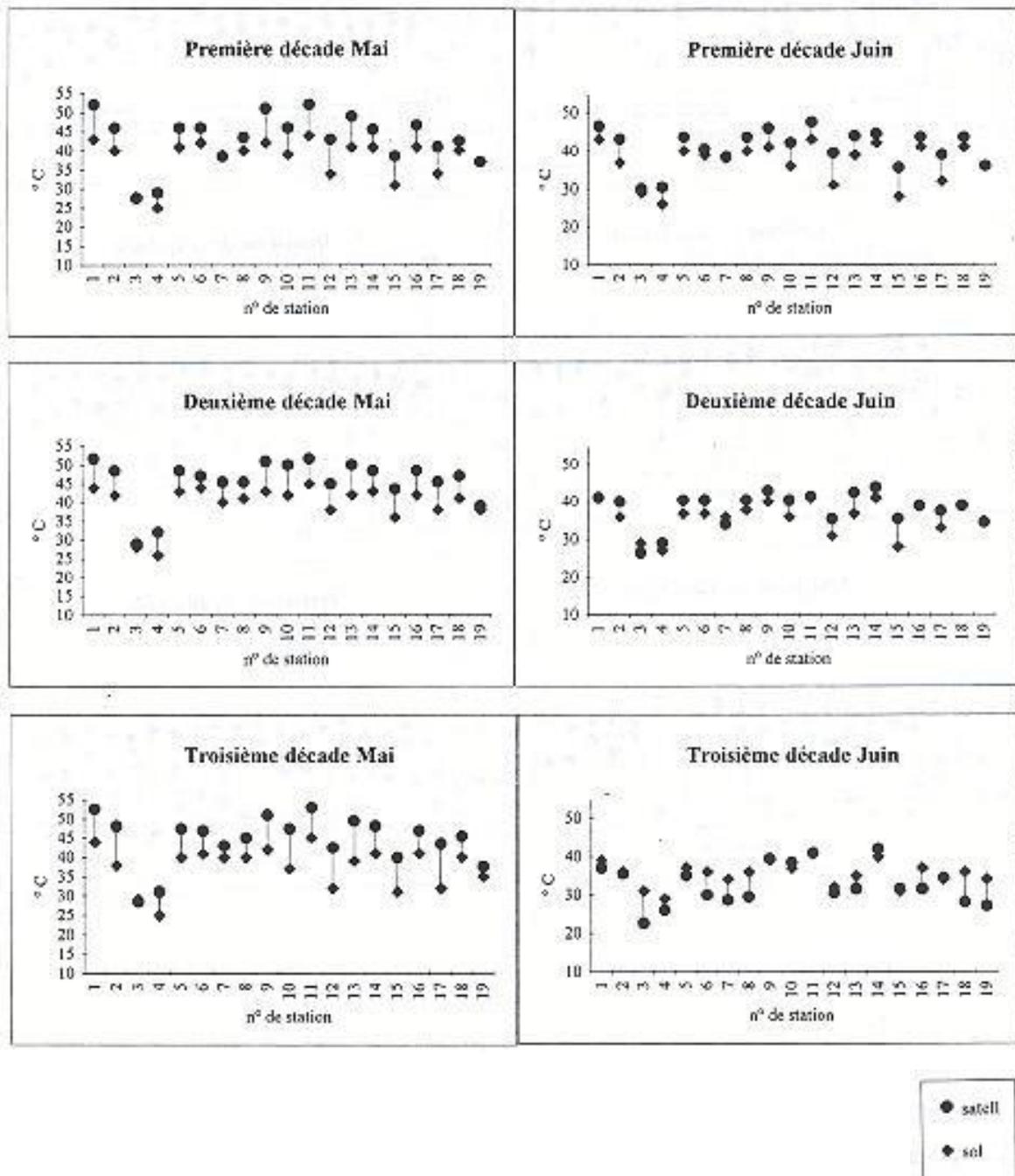


Fig. 3 a
 Fig. 3 (a, b, c) Évolution comparée tmax satellite/tmax sol

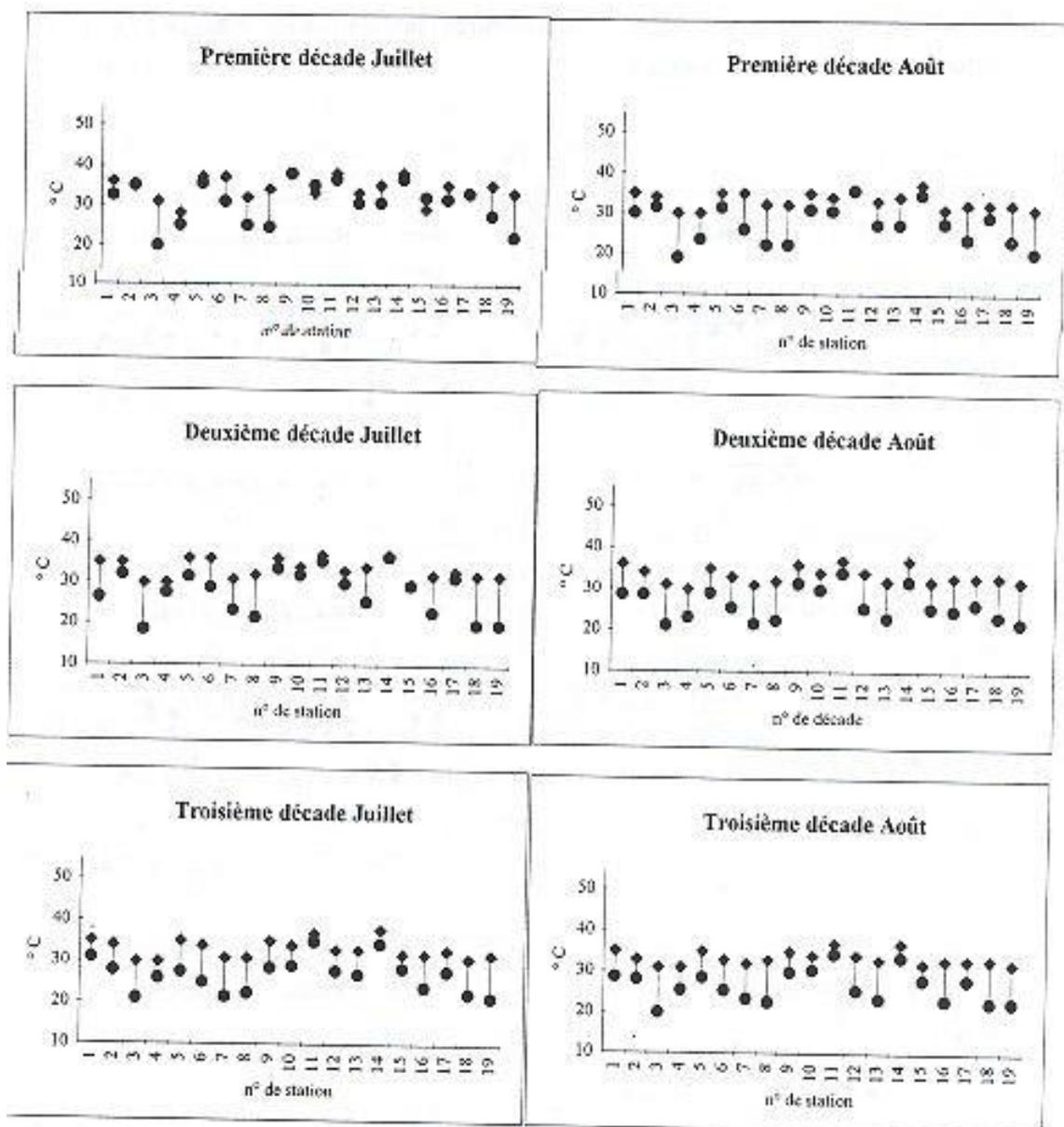


Fig. 3 b

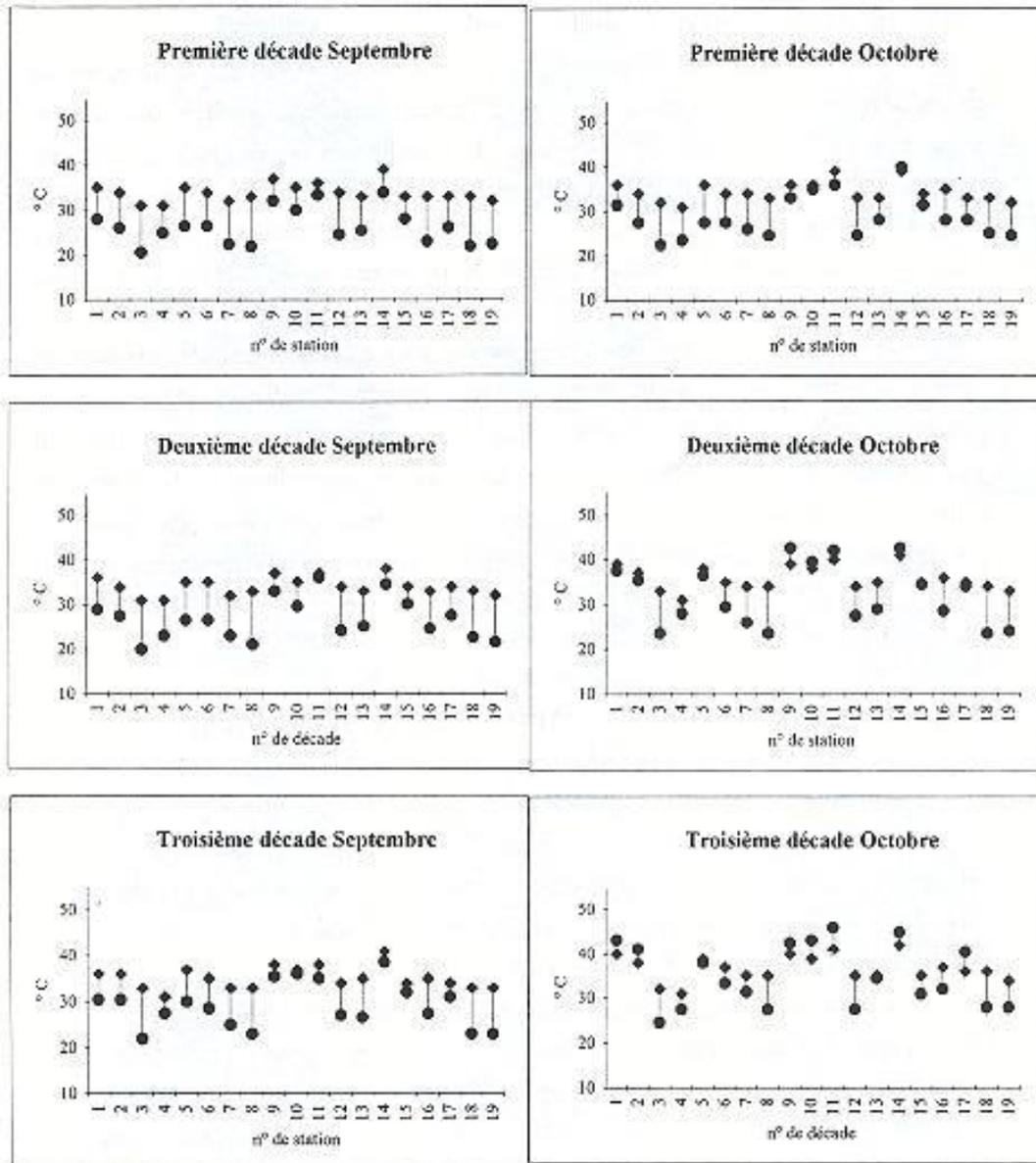


Fig. 3 c

En début d'hivernage, pendant les mois de mai et de juin, et sur l'ensemble des stations, les valeurs fournies par le satellite sont nettement supérieures aux relevés sol. Cela confirme la présence d'une atmosphère sèche partout dans le pays ; les régions côtières n'étant surmontées que par des brises matinales s'évaporant avec le lever du soleil.

À partir de juillet, cette situation est en partie bouleversée par la nette distinction des stations côtières où les relevés sols dépassent largement les mesures satellitaires. Cela témoigne d'une saturation des masses d'air influencée par la proximité océanique.

Dès la mi-juillet, cette situation se généralise à l'ensemble du pays et les relevés stations sont partout supérieurs aux mesures satellitaires. Cet état de fait a perduré jusqu'à la mi-octobre où l'on constate un nouveau bouleversement avec des mesures satellitaires dépassant largement, les valeurs recueillies au sol, et cela sur la quasi-totalité des stations.

Également, et en suivant l'évolution de l'isotherme 39° C (représenté en rouge sur les cartes de maxima de température de la figure 2), nous constatons un écart considérable entre celle de l'air et celle captée Météosat. Les isothermes représentées sur les deux cartes se distinguent d'abord par leur épaisseur, par conséquent par l'étendue de l'espace occupé. Cela témoigne encore une fois, de la présence d'éléments perturbants dans l'atmosphère dont l'effet se reflète à travers les écarts entre mesures satellitaires et relevés sol.

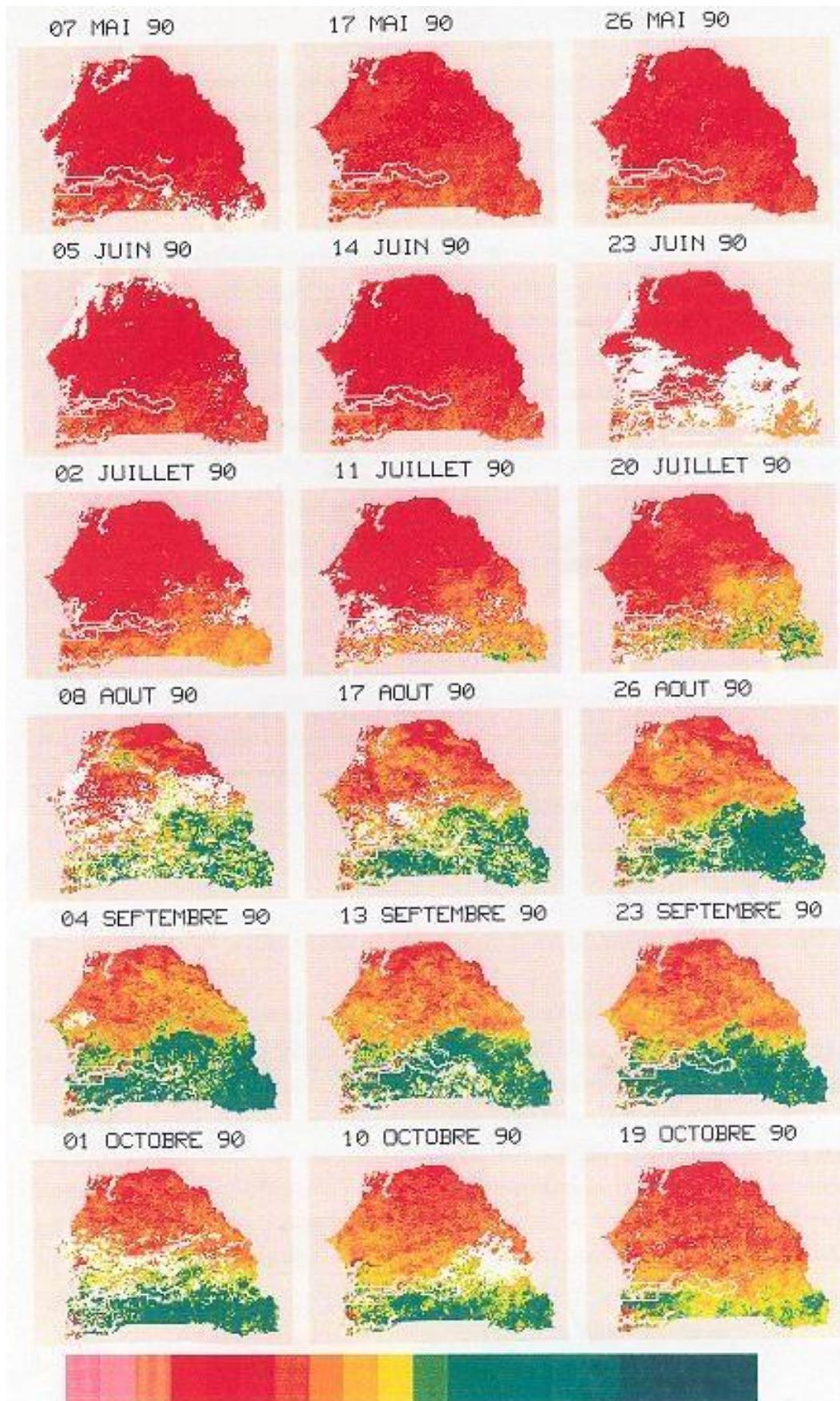
De même, dans la mesure où il existe une étroite relation entre température du substrat et évapotranspiration, les écarts entre les températures radiatives et celles de l'air peuvent fournir des indications sur les bilans énergétiques et hydriques (Séguin et al., 1982). Intégrer des indices de végétation caractéristiques de l'état thermohydrique des plantes pourrait donc compléter une étude basée sur cette hypothèse. Elle permettrait la distinction entre les sols nus et les espaces recouverts par un couvert végétal.

3. Évolution cyclique des plantes à travers les valeurs de NDVI

Les indices de végétations calculées à partir de scènes NOAA (fig. 4) nous permettent d'effectuer un suivi de l'évolution spatiale de la végétation pendant l'hivernage 1990. Ces indices traduisent les valeurs combinées de la réflectance du couvert végétal dans les canaux rouge et proche infrarouge de NOAA.

La présence des nuages, représentés en blanc, sur les cartes de NDVI, constitue cependant un obstacle énorme notamment pendant certaines décades. Leur localisation entre les mois de mai et juin, le long de la grande côte Nord, permet toutefois de confirmer la concentration de vapeur d'eau atmosphérique d'origine océanique. Cette présence de vapeur explique les incohérences observées entre les valeurs des paramètres relevées au sol et celles mesurées depuis l'espace par les satellites, comme nous l'avons vu plus haut.

Une autre difficulté relative à l'exploitation des indices de végétation concerne principalement les régions méridionales à végétations plus ou moins fournies pendant l'hivernage. Ces difficultés à comparer le comportement des cultures, du tapis herbacé à celui de la savane herbeuse en zone soudanienne ont été largement mises en évidence par de multiples travaux dont Achard et al., 1990.



**Fig. 4 : Indice Normalisé de Végétation, traitements NOAA/AVHRR (Source CSE de Dakar)
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**

Rappelons qu'au Sénégal, le couvert végétal revêt une double caractéristique. L'hétérogénéité des espèces existantes s'oppose à l'homogénéité des paysages qui, en outre, ne reflètent que partiellement la division climatique de type zonal entre régions septentrionales et régions situées plus au Sud. La résolution de NOAA ne permet cependant pas une distinction entre espèces existantes.

La double caractéristique de la végétation complique l'analyse en télédétection des images captées par satellites et conduit à deux types de réponses spectrales sur les scènes NOAA ; d'une part, une forte diversité des réponses spectrales selon les espèces et les types de végétations (ce qui facilite le traitement des données par télédétection et d'autre part, une apparente monotonie visuelle confondant entité et espèce végétal ; cas plus complexe nous permettant d'avancer que la seule référence aux images satellitaires, sans aucune connaissance ni vérification de la réalité terrain entraîne une certaine ambiguïté quant aux interprétations finales.

Après le suivi des paramètres d'origine spatiale pris en compte dans notre étude, nous allons cerner l'évolution spatio-temporelle des facteurs climatiques mesurés dans les stations météorologiques.

L'évolution de certains paramètres dans des zones climatiques différentes fera l'objet d'une étude comparative. Il s'agit de quatre stations très représentatives : Bakel (à l'Est) et Dakar (à l'Ouest) situés à peu près sur la même latitude, mais aussi Podor (au Nord) et Kolda (au Sud) quasiment localisés sur le même méridien. Ces transects Nord/Sud et Est/Ouest vont nous permettre de confirmer ou d'infirmer la véracité de la transition climatique caractéristique du Sénégal sur une échelle spatiale très fine.

II. SUIVI DES PARAMÈTRES AÉROLOGIQUES

L'évolution des paramètres facteurs de la pluviogenèse sur une aire plus ou moins vaste pourrait nous fournir plus de renseignements permettant de mieux appréhender le comportement spatial des manifestations pluvieuses.

Nous allons procéder dans cette partie à une analyse spatiale des paramètres clés de la pluviogenèse afin de dégager à travers leurs différentes caractéristiques, leurs traits originaux. L'analyse spatio-temporelle des paramètres atmosphériques nous permettra également de mesurer avec précision l'ampleur de leur rôle sur le comportement des précipitations qui feront l'objet d'une étude détaillée dans le dernier chapitre

1. Température de l'air : minima et maxima

1.1. Évolution dans l'espace et dans le temps

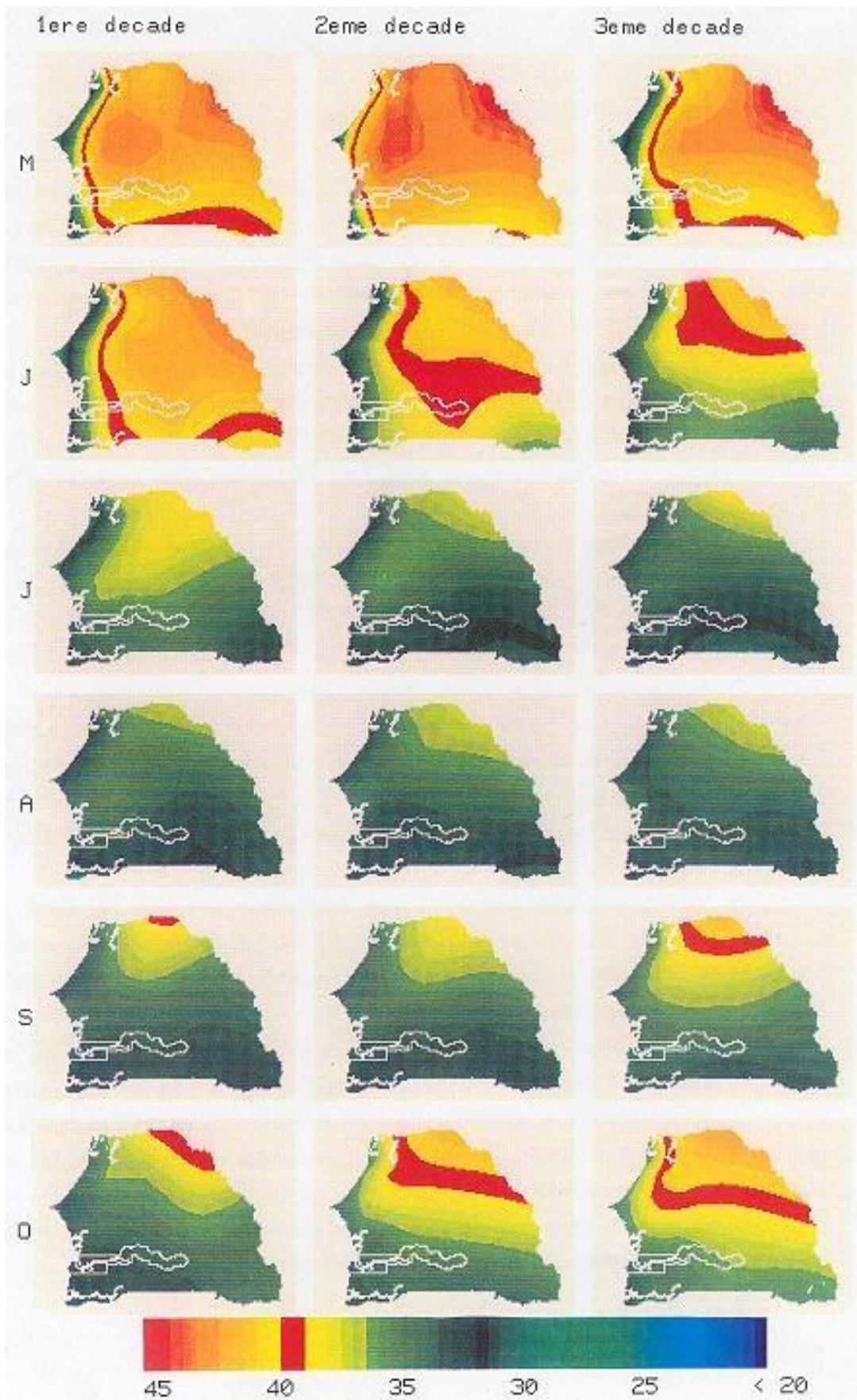
Au Sénégal, le régime des températures de l'air est bimodal. Il est caractérisé par deux minima en décembre et au cœur de l'hivernage (en août) et par deux maxima au début et à la fin de celle-ci (mai et octobre). Existe-t-il une différence de température entre années pluvieuses et années sèches? L'évolution des températures est-elle peu affectée par cette distinction avant tout basée sur la pluviométrie ?

Sachant que la température de l'air détermine l'état de l'eau atmosphérique dans la mesure où c'est elle qui régit (avec la pression) le rythme de certains phénomènes physiques comme l'évaporation et la condensation, ces interrogations méritent d'être soulevées. Un suivi annuel des températures sur une échelle de temps plus vaste serait donc nécessaire.

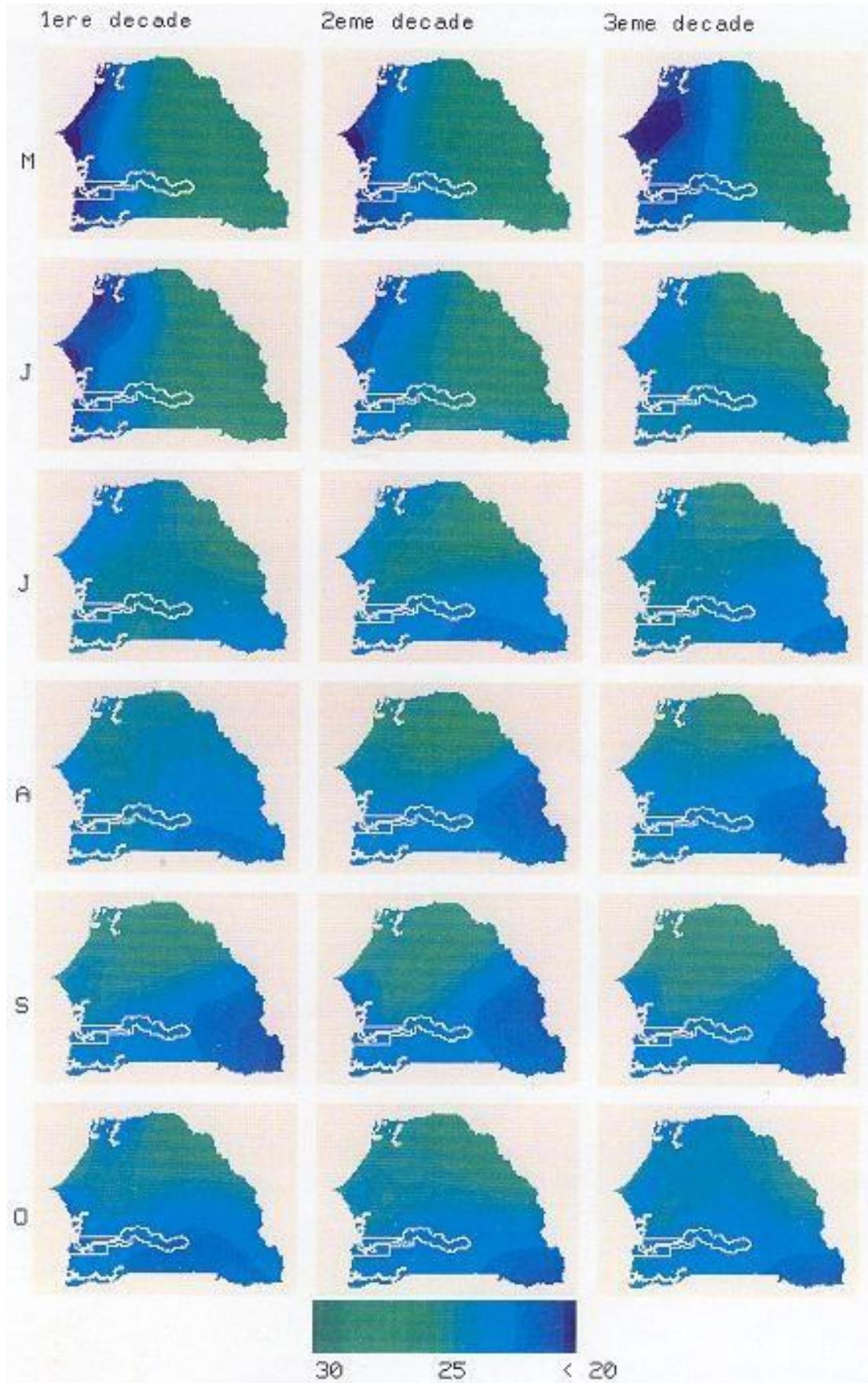
Sur les cartes réalisées à partir des relevés stations (fig. 5 et 6), on note une accentuation des températures minimales et maximales de la côte vers l'intérieur des terres mais aussi du Sud, plus humide vers le Nord plus sec. Les distinctions côte/intérieur et Sud/Nord très marquées en début de saison, tendent cependant à se relativiser avec l'installation de l'hivernage, soit vers la mi-juillet. On note, également, l'apparition de 'poches' de températures à fortes valeurs, notamment dans la région du Ferlo. L'apparition de ces phénomènes locaux explique-t-elle l'existence de microclimats ? La répétitivité et la fréquence d'apparition de ces phénomènes s'inscrivent-elles dans une logique permettant de classer les années sèches des années humides ?

Les valeurs, mais aussi les variations de températures s'atténuent au fur et à mesure de l'avancée dans la saison des pluies. L'humidité des sols résultant des manifestations pluvieuses et de la présence de la végétation permet l'existence d'un "tampon" entre substrat et atmosphère.

De toute évidence, la température est un témoin des précipitations. La pluie en conditionnant et en maintenant l'humidité du sol et de l'air influe nécessairement sur les valeurs de températures. Cela se traduit par une chute des températures après un épisode pluvieux et une augmentation de celles-ci en période sèche, accentuée par le dessèchement de surface (Cadet et al., 1991). A partir de la mi-septembre, les températures commencent à s'élever à nouveau pour atteindre des valeurs maximales à partir d'octobre (second maximum annuel).



**Fig. 5 : Températures maxima de l'air en ° C (Source : DMN sénégalaise)
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**



**Fig. 6 : Températures minima de l'air en ° C (Source : DMN sénégalaise)
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**

Par ailleurs, l'isotherme 39° C pris comme référence pour délimiter les zones chaudes des zones humides (Guillot et al., 1992) a un tracé pratiquement méridien pendant la quasi-totalité de la saison. Il ne disparaît de l'ensemble du pays que pendant les mois de juillet et août, ce qui définit seulement deux mois humides pour cet hivernage 1990.

1.2. Évolution comparée des valeurs extrêmes de température de l'air

Comme nous l'avons déjà vu, la trace au sol de l'isotherme 39° C permet la délimitation entre zones sèches et humides. Elle met en évidence un décalage plus ou moins important, entre mesures d'origines satellitaires et relevés stations, qui est conditionné par le degré de saturation de l'atmosphère.

Par ailleurs, l'écart entre les minima et maxima de température de l'air obéit-il aux mêmes règles ? Ou encore existe-t-il une évolution concordante, cohérente entre ces deux valeurs extrêmes de températures ?

Les courbes d'évolution (fig. 7 a, b, c) comparée retracent trois situations différentes selon le degré d'installation de l'hivernage.

En début de saison pluvieuse, les écarts entre valeurs de températures extrêmes concernent notamment les régions côtières. Cela s'explique par l'apparition de brumes matinales dues à l'influence océanique.

On constate toutefois que les deux courbes évoluent de manière quasi identique avec des "creux" dans les régions côtières et méridionales et des "bosses" dans les régions plus exposées à la sécheresse de l'air.

Au cœur de la saison des pluies, notamment entre juillet et août, on note une évolution séparée des valeurs extrêmes de températures avec une légère homogénéisation des minima autour de 25° C.

À la mi-septembre, l'évolution d'ensemble, caractérisée par des "creux" en zones Ouest et Sud et des "bosses" en zone Nord et Est, réapparaît et perdure pendant les quatre dernières décades de la saison.

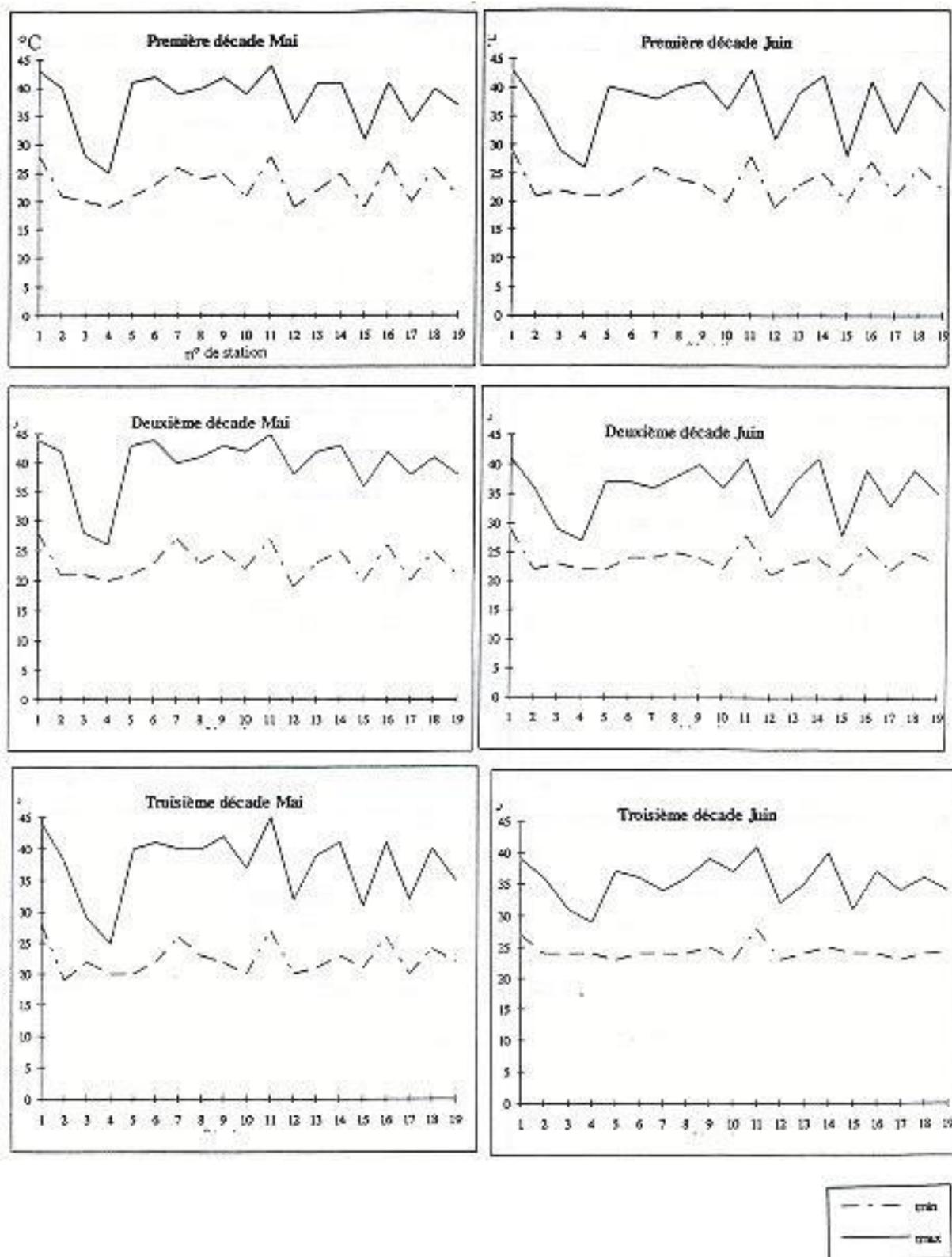


Fig. 7 a

Fig. 7 (a, b, c), Évolution comparée des valeurs extrêmes de température de l'air

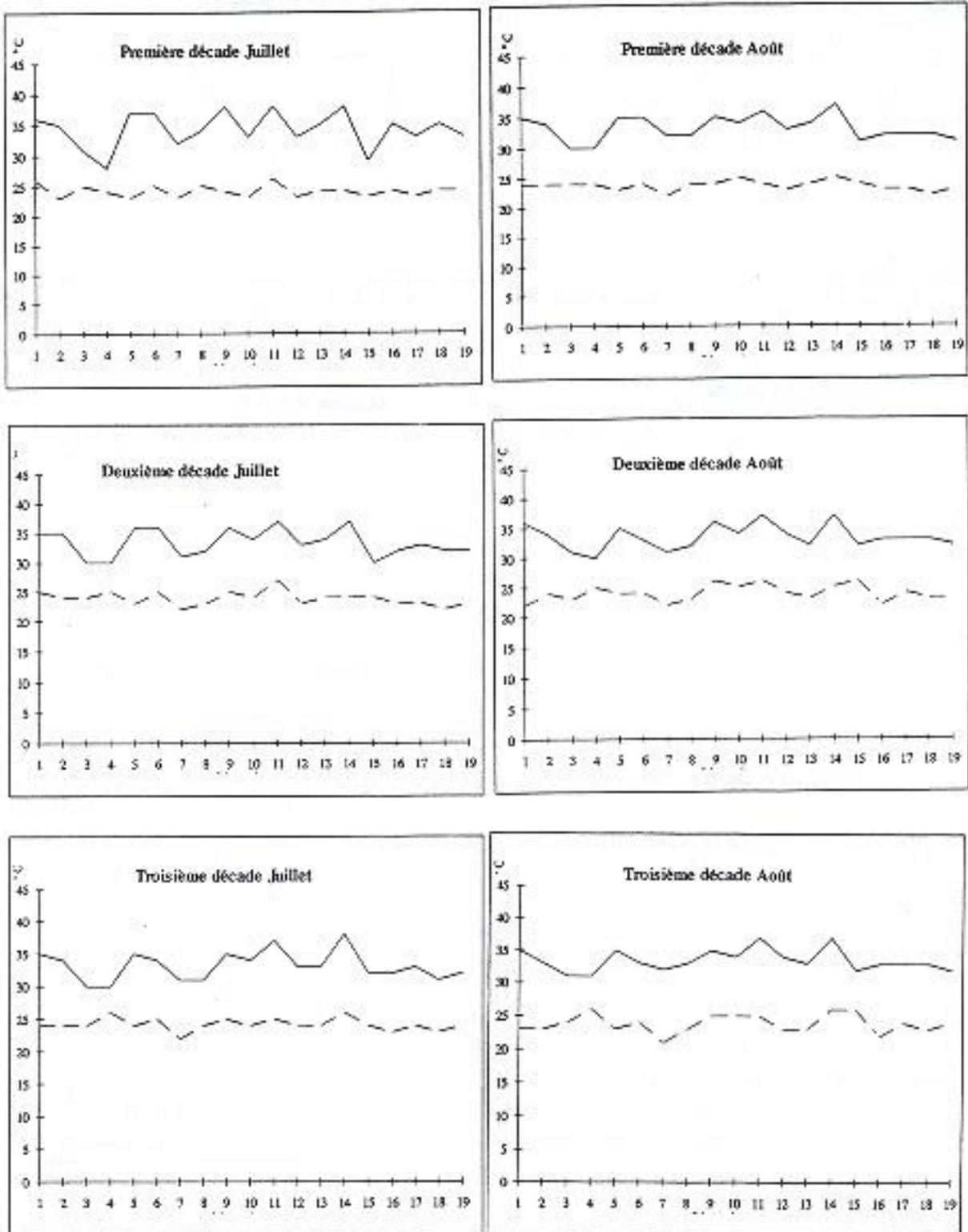


Fig. 7 b

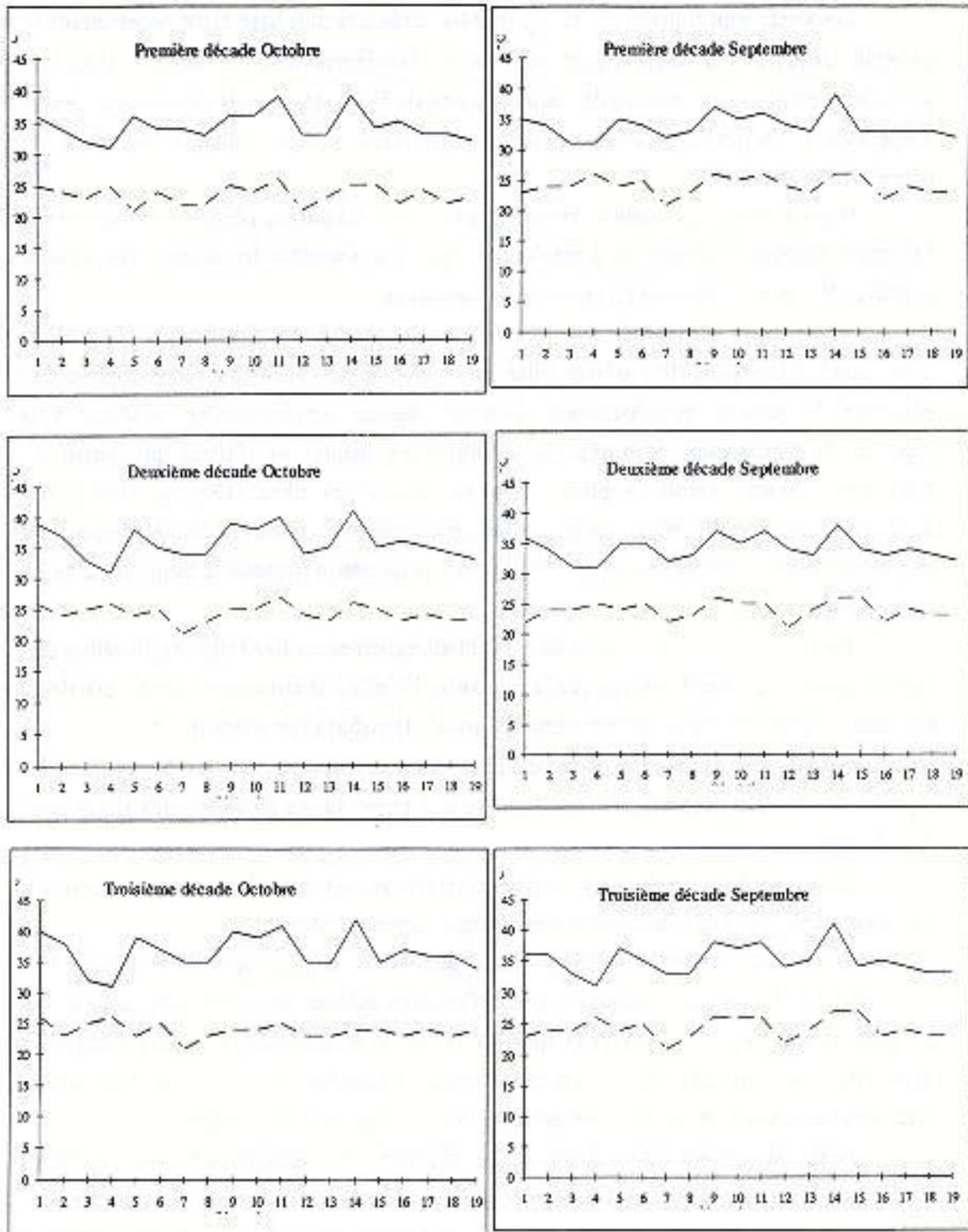


Fig. 7 c

2. Vents : Évolution comparée avec le géopotential en altitude

Les vents sont fonction de la rugosité (la surface la plus lisse étant nécessairement un plan d'eau) et du degré hygrométrique de l'environnement au-dessus duquel ils s'écoulent. Et donc, on observe des modifications de force selon qu'ils circulent au-dessus d'une zone à topographie accidentée (relief ou végétation), d'une plaine, d'une vallée, ou même d'un plan d'eau.

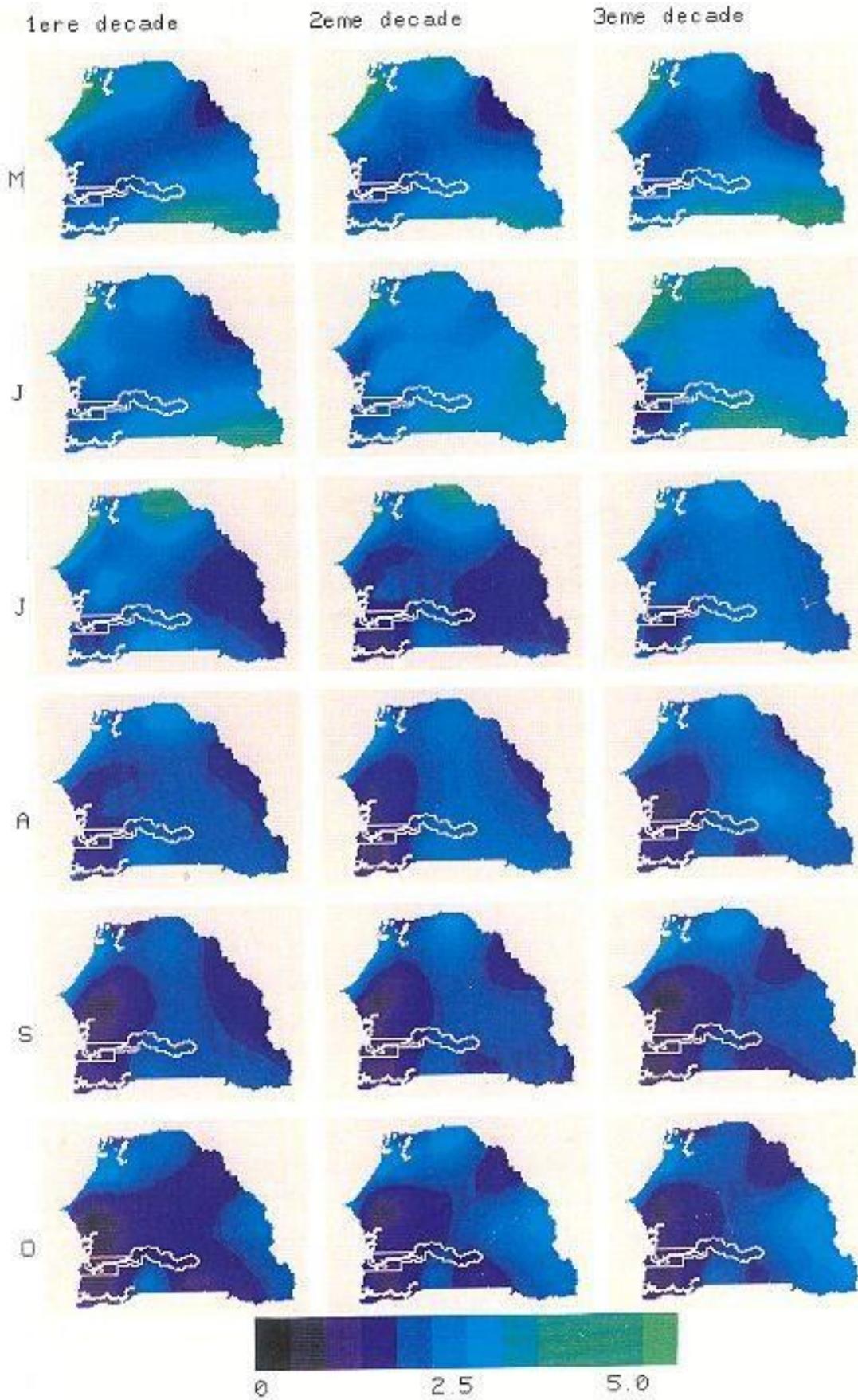
Nous avons déjà expliqué comment la mobilité des flux de plus en plus facilité par l'absence d'obstacles contribue à éroder les sols et à alimenter les dunes mais aussi à aggraver les feux de brousse (voir Troisième Partie).

Au Sénégal, la platitude du relief et la monotonie du couvert végétal contribuent à la mobilité des flux de surface, mise en évidence par plusieurs recherches. Cette platitude du substrat, principalement, dans les régions septentrionales, associée à la vigueur de l'anticyclone des Açores, explique les incursions d'alizés provenant de l'Atlantique Nord, même en plein cœur de saison des pluies (Sagna, 1990). Les différences de vitesses entre stations sont cependant très faibles. Elles se produisent exceptionnellement en saison des pluies, lorsque la mousson n'atteint le Sénégal qu'en fin de parcours.

En ce qui concerne les vitesses de vent enregistrées en 1990 (fig. 8), le calme règne dans le Sud-Ouest balayé par la mousson. La convection locale privilégie les mouvements verticaux au détriment des grands transferts horizontaux.

Jusqu'à la deuxième décennie de juillet, les valeurs dépassent les 6 m/s dans les régions Nord. Cela confirme le rôle d'entrave aux phénomènes pluvieux, des alizés issus des Açores. Des vents forts au Sud-Est du pays caractérisent les mois de mai et juin. Le relief, par ascendance forcée, y favorise le démarrage des précipitations.

Il aurait été intéressant de pouvoir établir une étude du géopotential en altitude. Les données de radiosondages auraient pu apporter plus d'éclairage sur les mouvements et les caractéristiques des flux, à savoir la position, la vitesse et la direction des jets d'altitudes dans les différentes couches de la troposphère. Cependant l'absence de ces types de données nous oblige à limiter notre analyse sur les vents de surface. Grâce aux relevés de vitesses et de directions de vents au sol, il est toutefois possible d'avoir un aperçu global du comportement des flux et compléter ces informations par l'analyse d'une étude sur le géopotential d'altitude pendant la saison 1990.



**Fig. 8 : Vitesse du vent en m/s (Source : DMN sénégalaise)
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**

Il s'agit notamment de recherches (Fongang et al., 1994) qui mettent en relation les vents de surface avec le géopotentiel en altitude afin de déterminer la trajectoire et la vitesse de déplacement des lignes de grains. Rappelons que ce mécanisme au Sénégal, apporte plus de 80 % des précipitations. Or, l'efficacité des lignes de grains est déterminée par leur dynamisme et, par conséquent, par leur vitesse de déplacement. À partir des relevés de géopotentiel au sol sur une période de 11 ans, la vitesse moyenne des lignes de grains entre les différentes stations a été calculée, afin d'établir une relation permettant de déterminer les vitesses V le long des trajectoires ainsi que leurs composantes zonales V_z et méridiennes V_m . La vitesse moyenne V est partout supérieure à 60 km/h, quel que soit le couple de stations. La vitesse moyenne le long de la trajectoire faiblement influencée par la distance séparant les stations dépend cependant de la direction de la ligne de grain. Toutefois, elle est d'autant plus grande que sa composante méridienne est faible.

Des relevés de radiosondage et des images Météosat correspondantes ont été utilisés pour déterminer, par "la méthode suivi du centre de gravité" la vitesse de déplacement des amas nuageux associés aux lignes de grains pendant la saison 1990. Par cette méthode, les résultats finaux montrent une parfaite concordance entre les vitesses obtenues avec ces deux types d'approches. Ces résultats complètent les études caractérisant la sécheresse de l'hivernage 1990. Si la faiblesse du vent en surface, à l'image de la saison 1990, s'accompagne en altitude d'une vigueur des lignes de grains, cela n'entraîne pas une dissipation immédiate de ces dernières car leur vitesse de déplacement peut facilement dépasser 2000 km/h en 24 heures. Elles progressent alors, soit vers les latitudes méridionales où la mousson plus épaisse favorise l'évolution de ces systèmes nuageux, soit vers l'océan.

La direction du vent (fig. 9 a, b, c) oppose les stations méridionales où l'on note un changement de trajectoire (240°) dès le mois de mai et stations localisées plus au Nord. Aux latitudes septentrionales, les flux provenant du Sud-Ouest ne sont réellement installés qu'à partir de Juillet. À Saint-Louis, Thiès et Louga stations n° 15, 17 et 10, la direction des vents a stagné aux alentours de 280° (WNW) pendant toute la durée de l'hivernage. Les vents provenant de l'Atlantique Nord ($300-360^\circ$) se sont manifestés à plusieurs reprises sur quelques stations (15, 17 et 10), même au cœur de l'hivernage. Cela confirme la vigueur de l'anticyclone des Açores pendant cette période entraînant une fréquence d'incursions alizéennes. On note également pour les stations septentrionales une amorce de retour des vents de secteur Nord dès la fin septembre, qui s'est généralisée, sauf pour certaines stations (Ziguinchor, Kolda et Cap-Skiring), à l'ensemble du pays à partir de la mi-octobre.

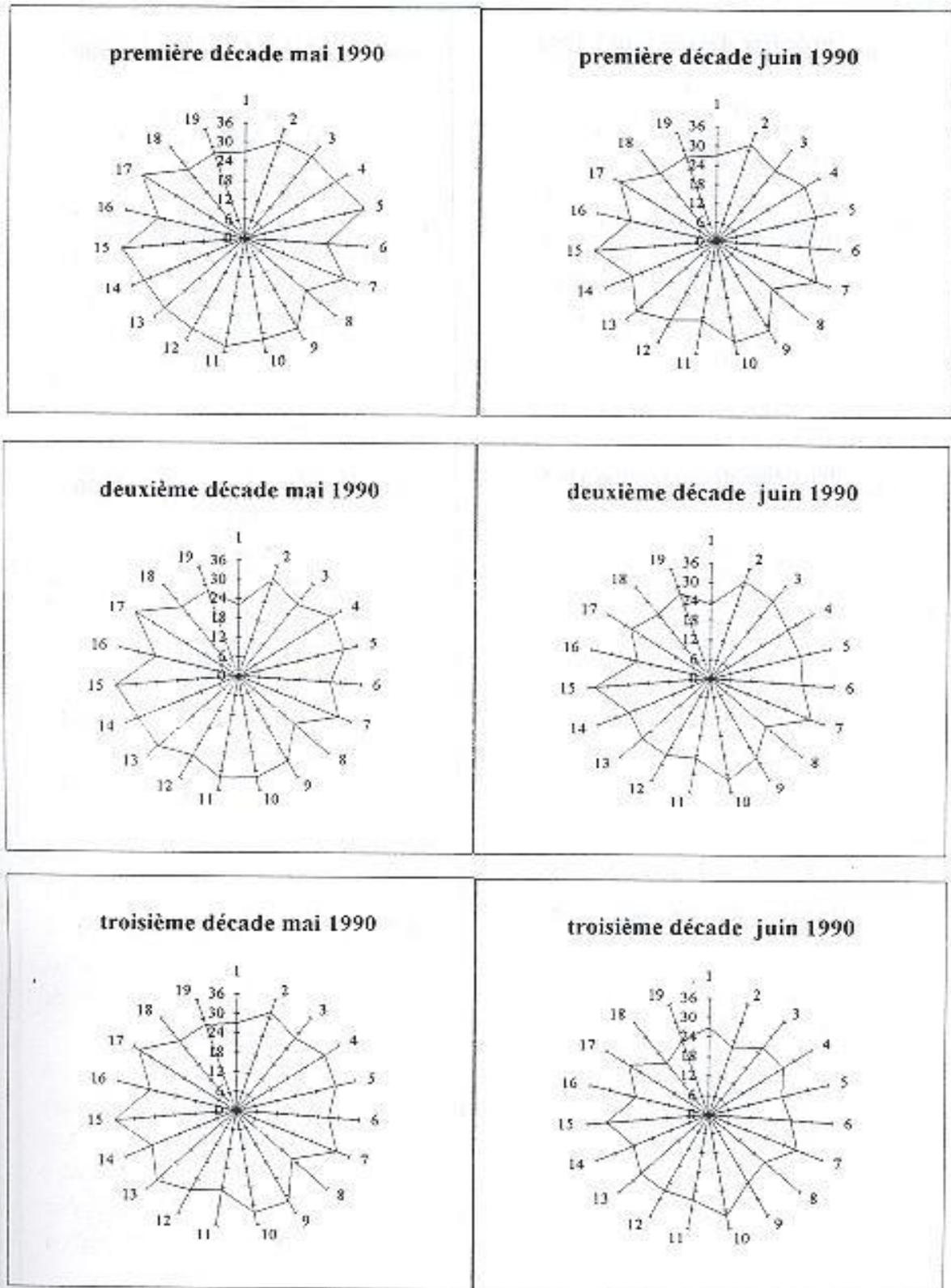


Fig. 9 a

Fig. 9 (a, b, c), Direction du vent / 19 stations / (0-36).10°

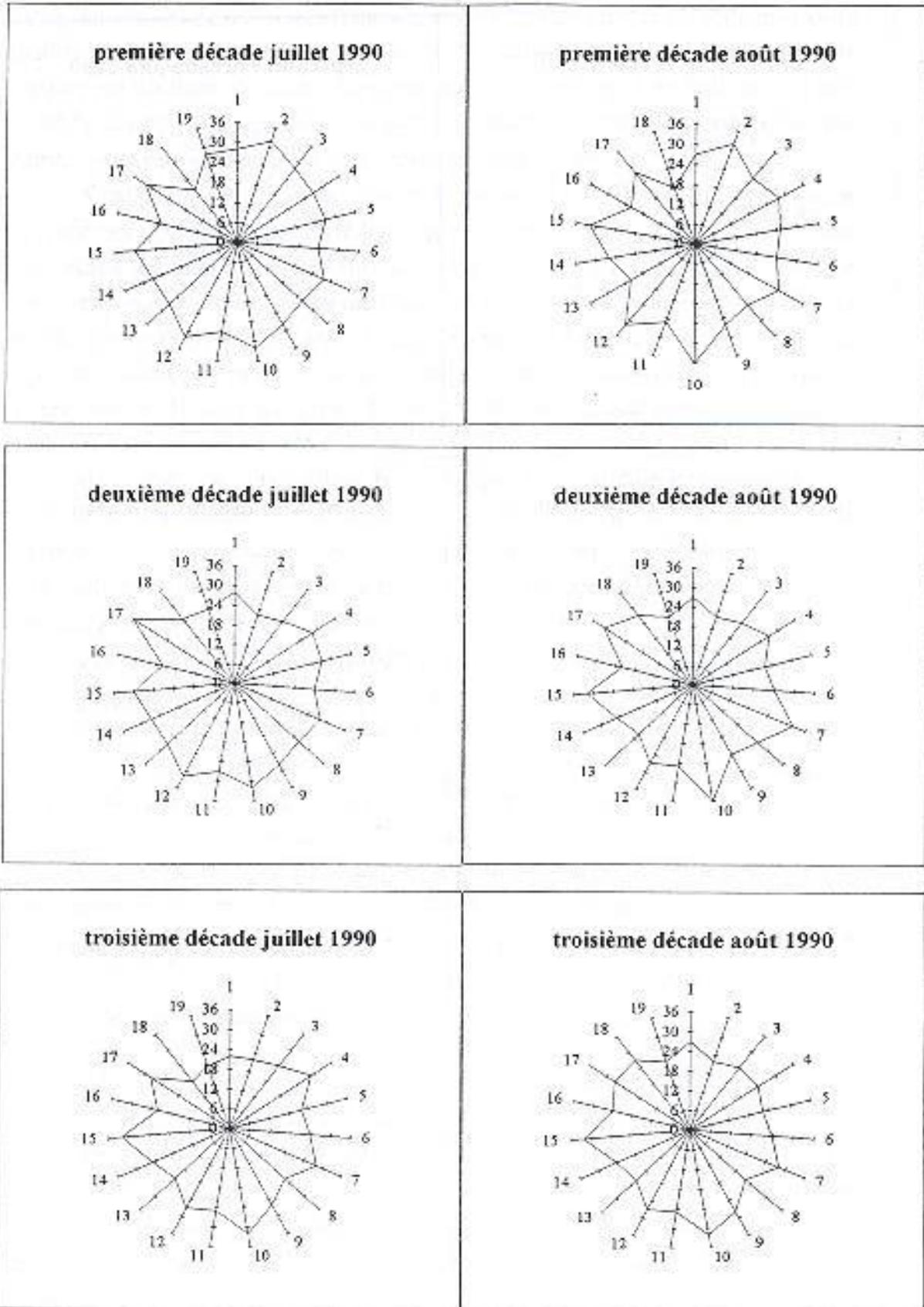


Fig. 9 b

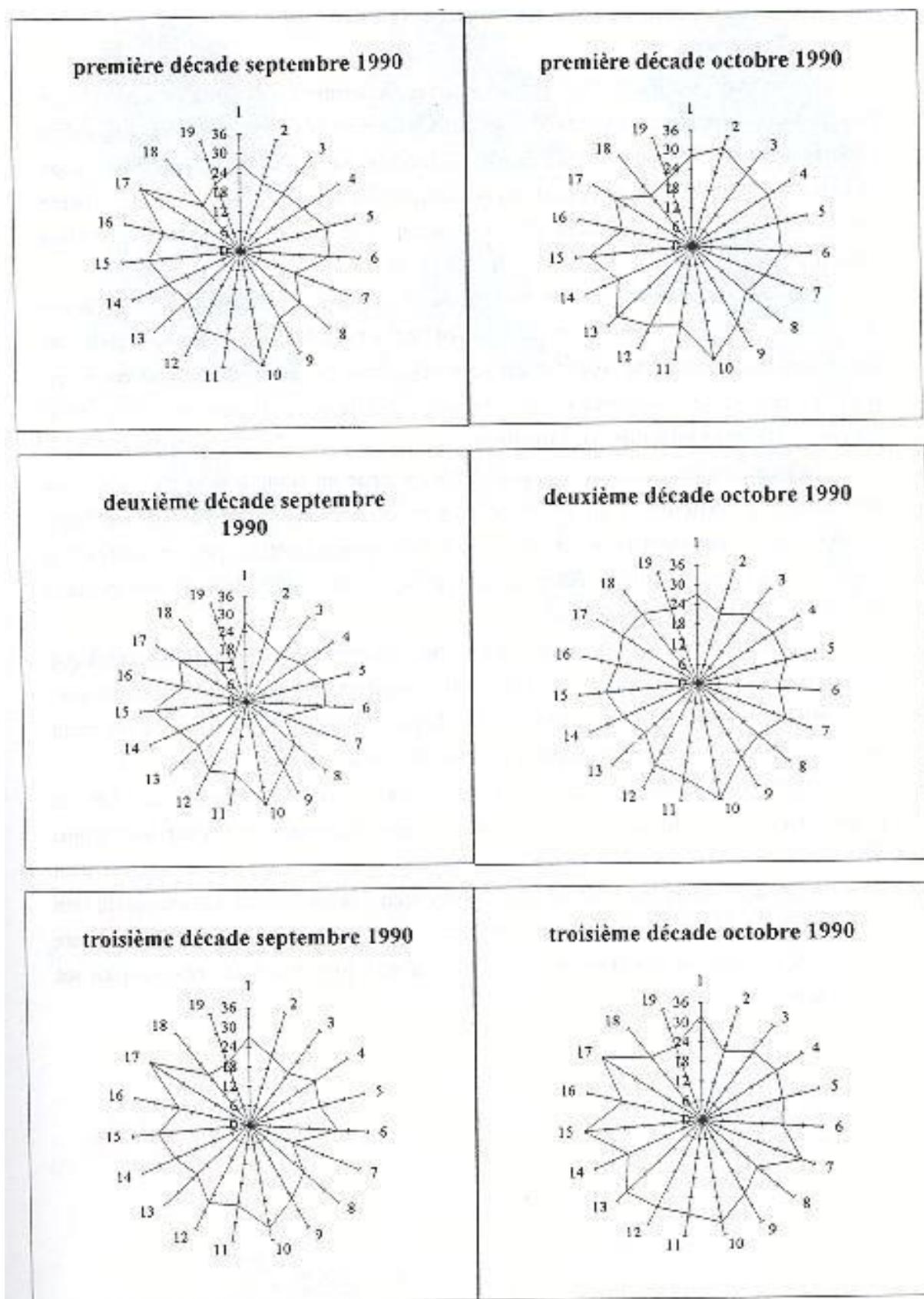


Fig. 9 c

3. Suivi de la tension de la vapeur d'eau

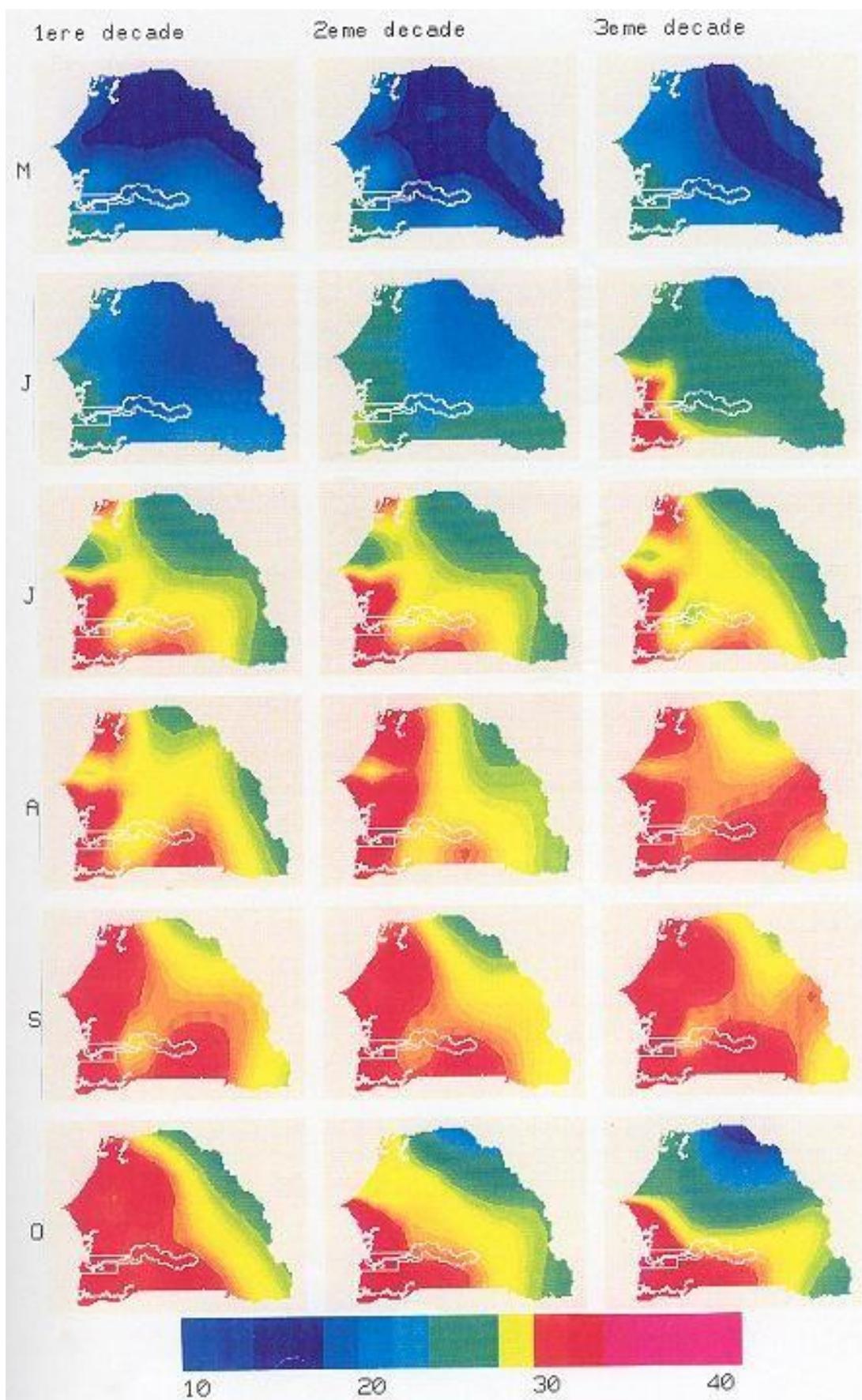
Nous avons évoqué précédemment, les zones sources de la vapeur d'eau observée en Afrique de l'Ouest (voir : Première Partie). Il s'agit principalement des océans atlantique et indien (Fontaine, 1988 ; Tabeaud, 1988) et de la forêt équatoriale par évapotranspiration (Chamard, 1986). En plus des domaines océaniques, les échanges végétation-atmosphère contribuent au maintien et à l'équilibre de la vapeur d'eau dans les basses couches.

Nous avons également évoqué tout au long du chapitre concerné, le rôle de la vapeur d'eau dans la conservation de la chaleur latente atmosphérique. Cela s'effectue par absorption d'une partie du rayonnement infrarouge émis par le substratum terrestre, qui joue le rôle de filtre conduisant au phénomène "d'effet de serre" et qui perturbe par-delà même, les enregistrements effectués par satellite.

La tension de la vapeur d'eau est rarement prise en compte dans les recherches concernant la pluviométrie au profit de la pression atmosphérique (densité de l'air). Pourtant elle a son importance car c'est le seul paramètre permettant par densité, d'évaluer les mouvements verticaux et/ou horizontaux de l'eau ; plus la tension de la vapeur d'eau est élevée et plus l'air est saturé.

Les cartes de tension de vapeur d'eau (fig. 10) reconduisent le même schéma que celui qui a été mis en évidence avec la plupart des paramètres aérologiques. On retrouve l'opposition, d'une part entre régions situées en bordure océanique et régions de l'intérieur et, d'autre part, entre zones méridionales et septentrionales.

À partir de la troisième décennie de juin, de fortes valeurs (>30 Hpa) caractérisent le Sud-Ouest. Les courbes matérialisant ce paramètre s'apparentent à celles des maxima d'humidité relative. La teneur en vapeur d'eau dans la région du fleuve Gambie peut provenir de sources locales, mais ailleurs elle représente la masse d'air. On enregistre bien évidemment, une forte augmentation de la tension de la vapeur d'eau quand l'atmosphère est saturée (régions côtière et Sud-Ouest) et des valeurs quasi nulles en présence d'air sec (Nord-Est).

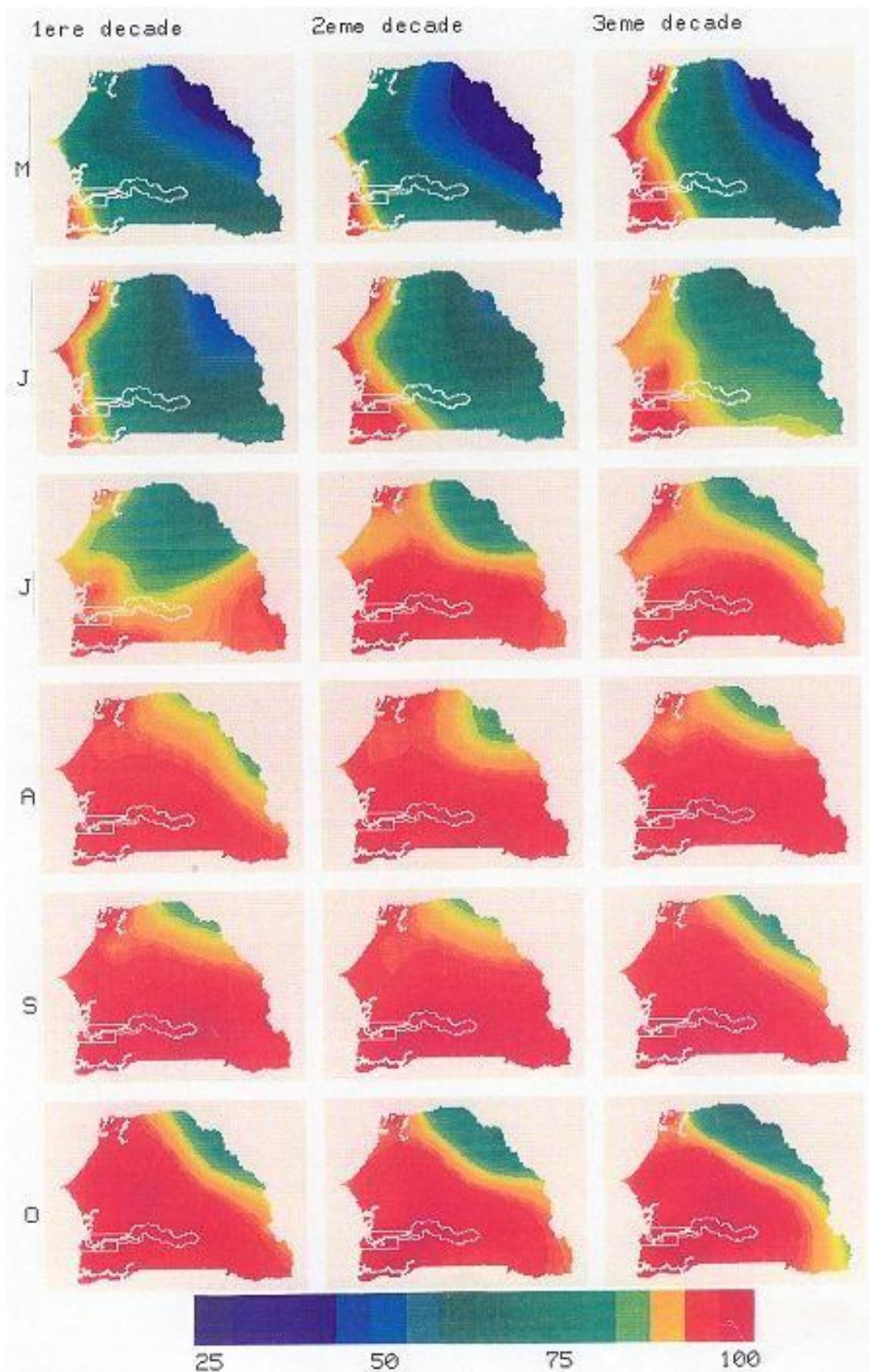


**Fig. 10 : Tension de vapeur d'eau en Hpa (Source : DMN sénégalaise)
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**

4. Humidité relative : évolution comparée des minima et maxima

Nous avons déjà évoqué le rôle joué par ce paramètre dans les différences enregistrées entre les valeurs de températures de l'air et celles mesurées par Météosat, en particulier dans la région côtière où l'atmosphère est saturée pendant presque toute la saison. Sur les cartes réalisées à partir des relevés terrain (fig. 11), on constate que, dès le début du mois de juillet, les maxima d'humidité dépassent partout 75%.

La saturation est totale au Sud-Ouest. Cependant, pendant toute la saison, des valeurs minimales inférieures à 15% caractérisent le Nord-Est du pays, en relation avec les fortes températures et le fort pouvoir évaporant de l'air déjà observé dans cette région.



**Fig. 11 : Humidité relative en % (Source : DMN sénégalaise)
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**

L'évolution comparée des minima et maxima d'humidité (fig. 12 a, b, c) démontre contrairement aux températures la bonne cohérence entre valeurs minimales et maximales. Sauf pour les stations de Matam et Podor les deux courbes ont un tracé quasi identique pendant toute la durée de l'hivernage.

Les stations 11 et 14 se distinguent surtout par la faiblesse des valeurs d'humidité maximales entraînant un faible écart entre les deux valeurs extrêmes. À Matam, où les taux maxima d'humidité sont les plus faibles, les valeurs dépassent rarement 40% en début d'hivernage. Cette situation s'améliore au cœur de l'hivernage pour chuter à nouveau à partir d'octobre. C'est alors que les plus faibles pourcentages sont enregistrés à Podor (station la plus septentrionale du réseau d'observation).

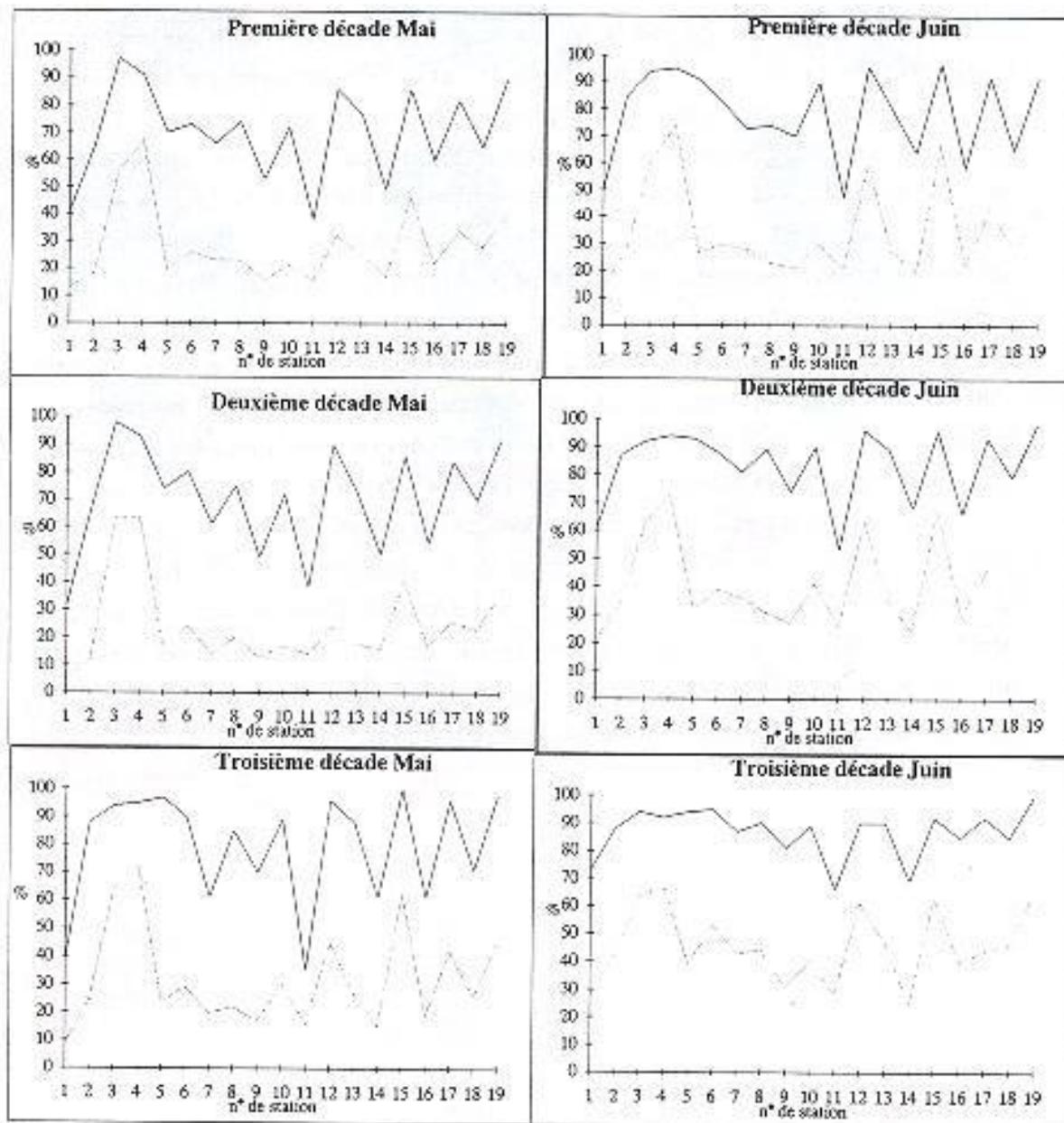


Fig. 12 a

Fig. 12 (a, b, c), Évolution comparée des minima et maxima d'humidité relative

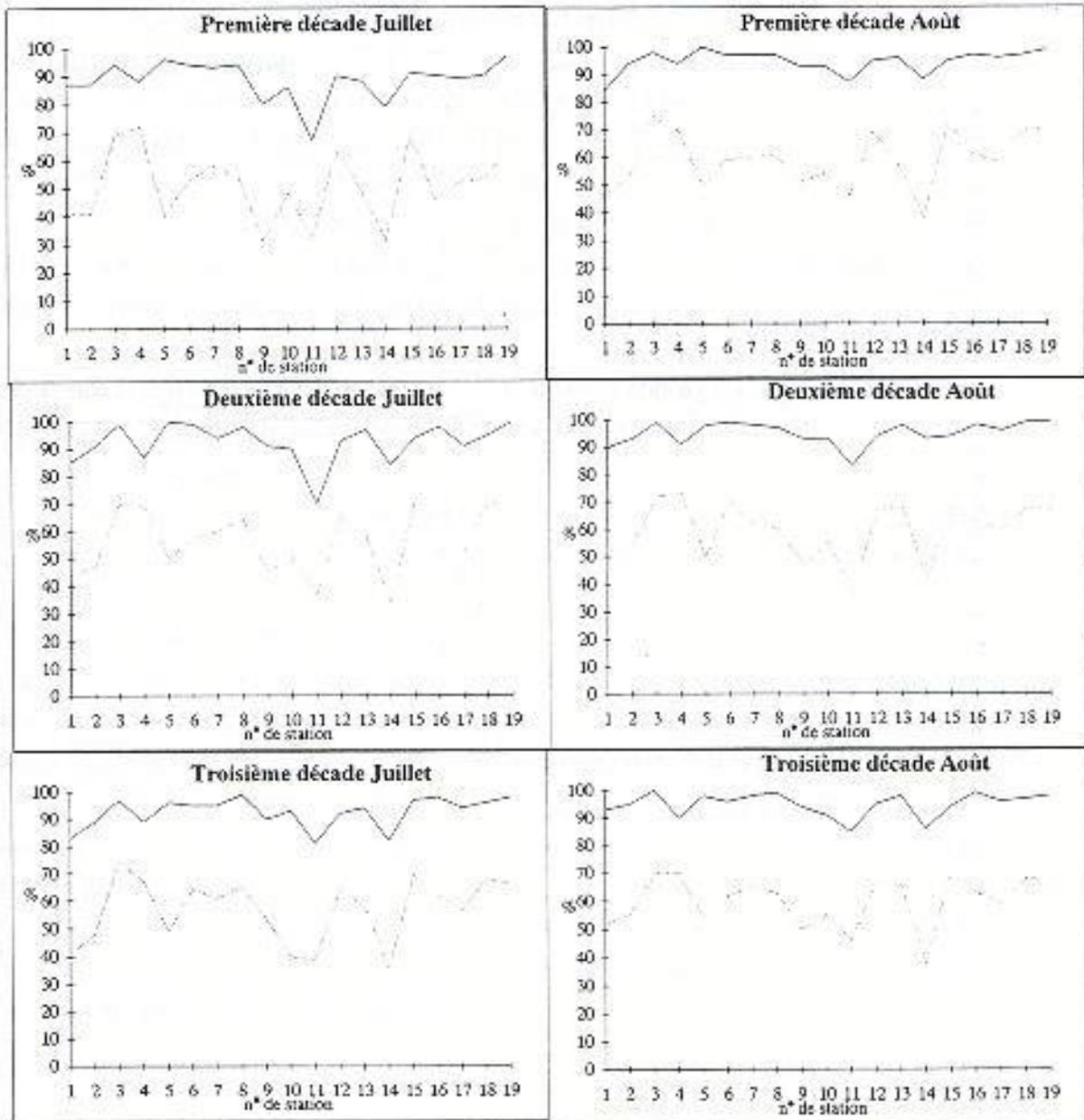


Fig. 12 b

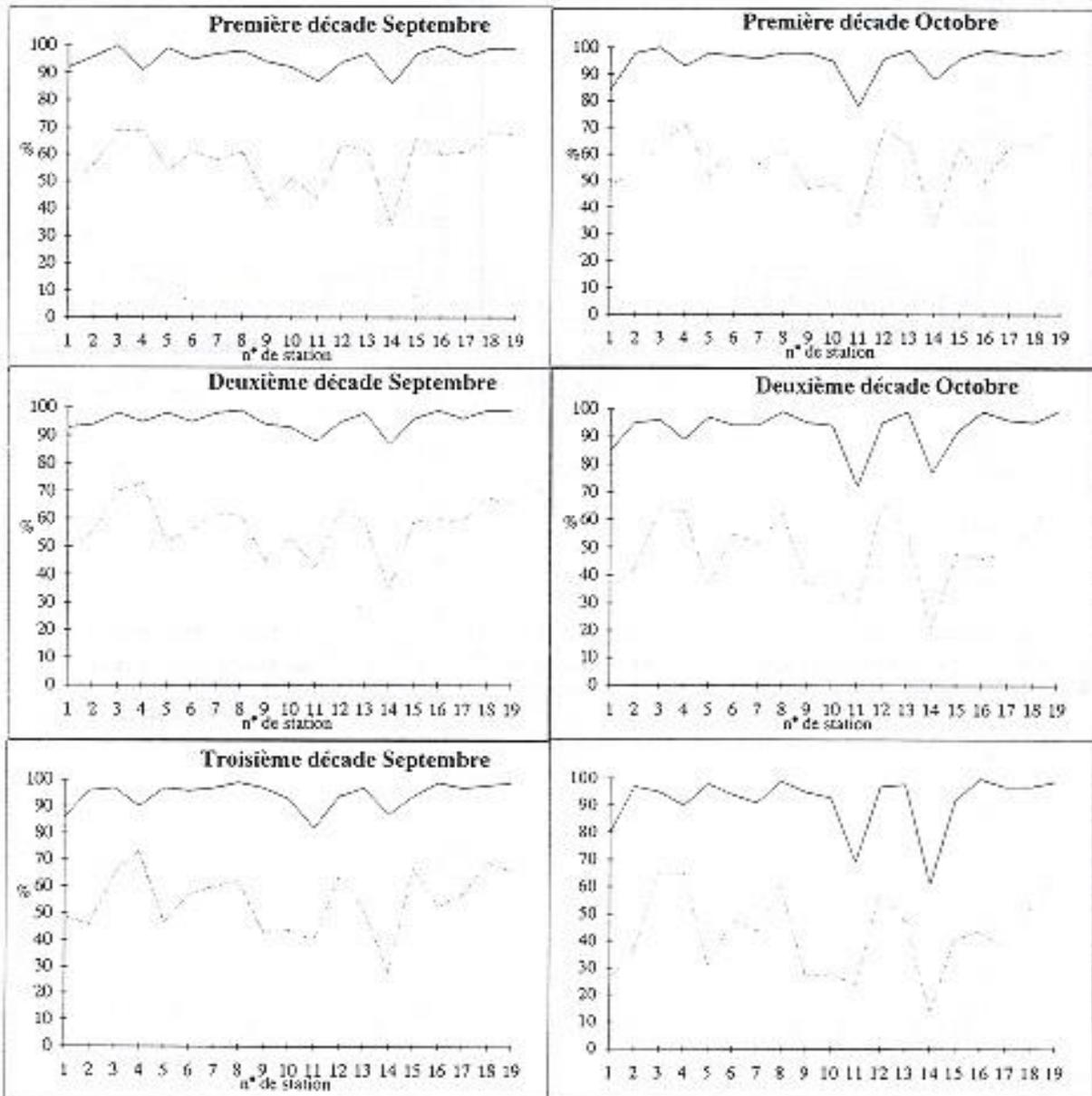


Fig. 12 c

5. Évaporation Piche : évolution et écart à la pluie

Phénomène physique de transformation de l'eau de l'état liquide en gaz ou en vapeur, l'évaporation est d'importance pour la convection. Ce processus exige une énorme quantité d'énergie surtout en présence de vents forts ou desséchants. Tout comme les précipitations, la condensation et l'infiltration, l'évaporation participe au cycle de l'eau (phénomènes transpiratoires, transformation de l'état de l'eau, etc.) à des échelles variables mais à l'origine de multiples rétroactions.

Les courbes d'évaporation (fig. 13) suivent exactement le tracé des isothermes. L'apparition de "poches" d'intense évaporation (région Louga et extrême Est du pays) correspond aux conditions locales de températures de l'air.

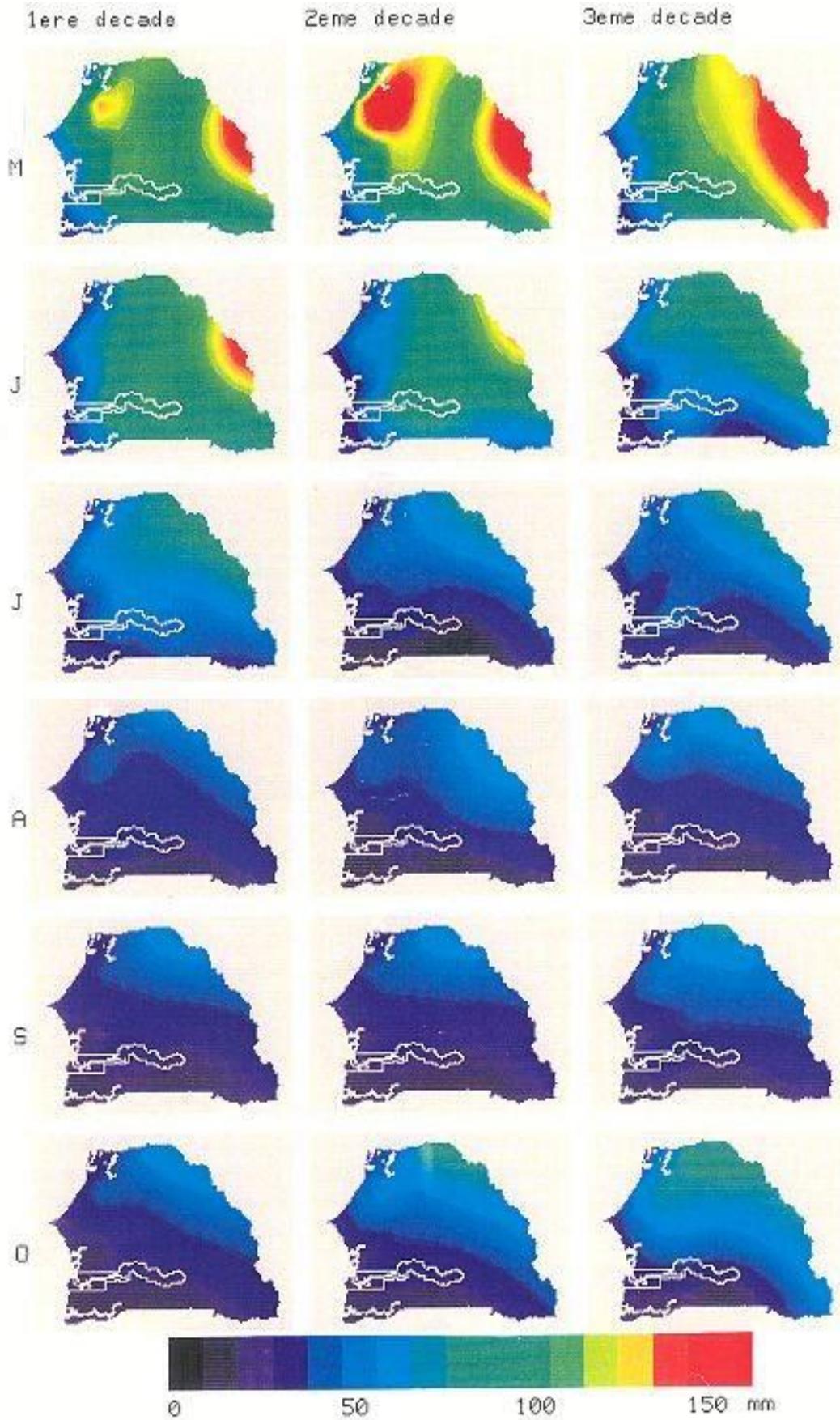
L'isoligne 100mm n'est absente de la totalité du pays que pendant 5 décades sur 18. Pendant ces mêmes décades, exceptées la bordure côtière et la région de Casamance (>50mm), l'ensemble du pays a connu de fortes évaporations avec des valeurs dépassant 150mm au Nord-Est.

Bien que l'évaporation Piche soit moins représentative de la réalité terrain que celle mesurée par bac, nous l'avons comparée avec la pluviométrie afin d'évaluer la perte directe en eau.

Les valeurs d'évaporation (fig. 14 a, b, c) dépassent partout celles des précipitations, du début mai à la deuxième décade de Juin. À partir de cette période les stations de Kolda, Vélingara et Ziguinchor (8, 18 et 19) se distinguent de ce schéma et enregistrent des valeurs de pluies légèrement supérieures à celles de l'évaporation.

À partir de la seconde décade de juillet, le schéma zonal, opposant régions septentrionales et régions méridionales, réapparaît avec des valeurs de pluies dépassant nettement celles de l'évaporation.

Nous constatons cependant que pour la plupart des stations situées au Nord (9, 10, 11, 12, 14, et 15), les valeurs de précipitations ne dépassent celles de l'évaporation que pendant une à trois décades de la saison.



**Fig. 13 : Évaporation Piche en mm (Source : DMN sénégalaise)
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**

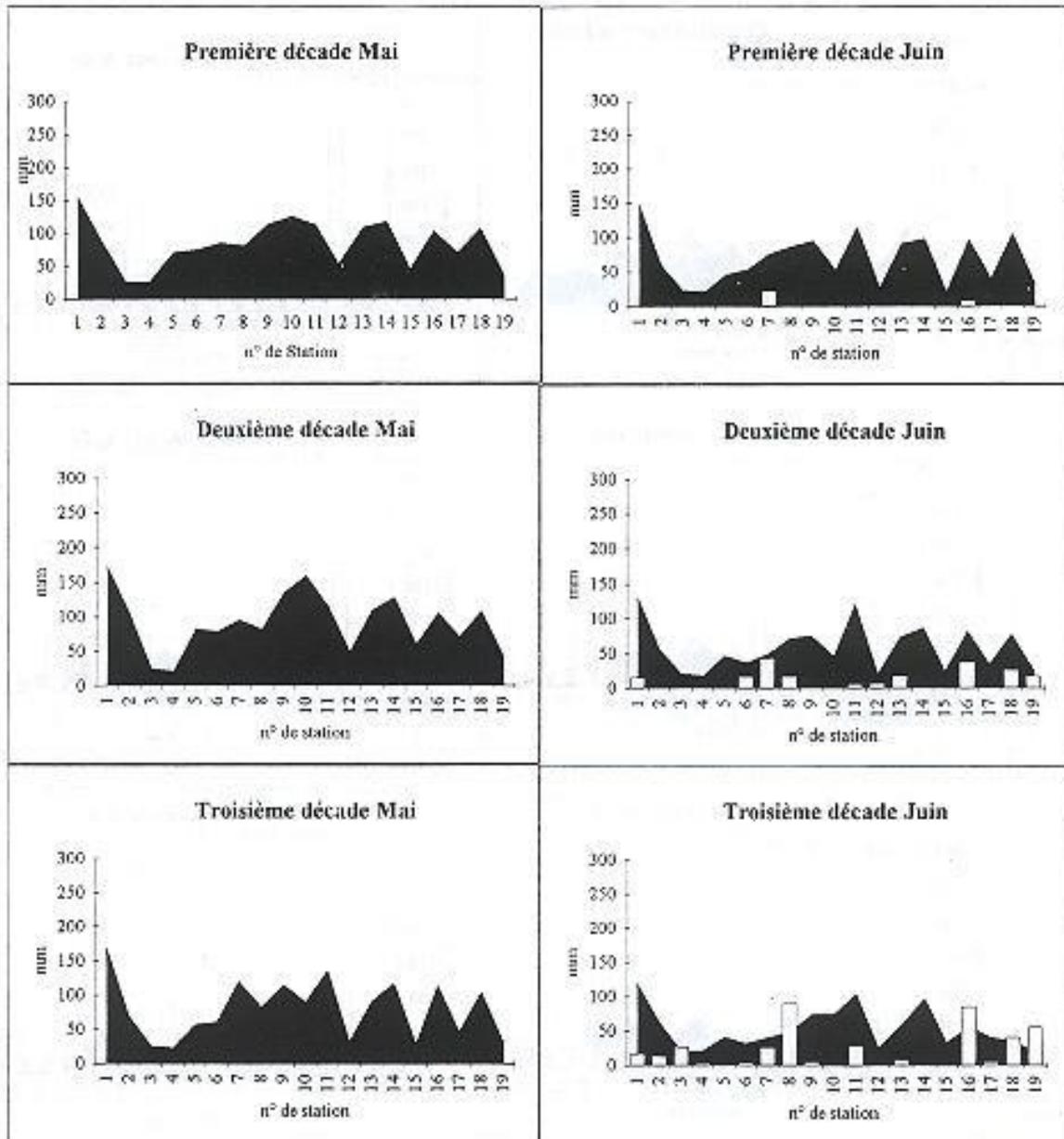


Fig. 14 a

Fig. 14 (a, b, c), Écarts Pluies-Évaporation Piche



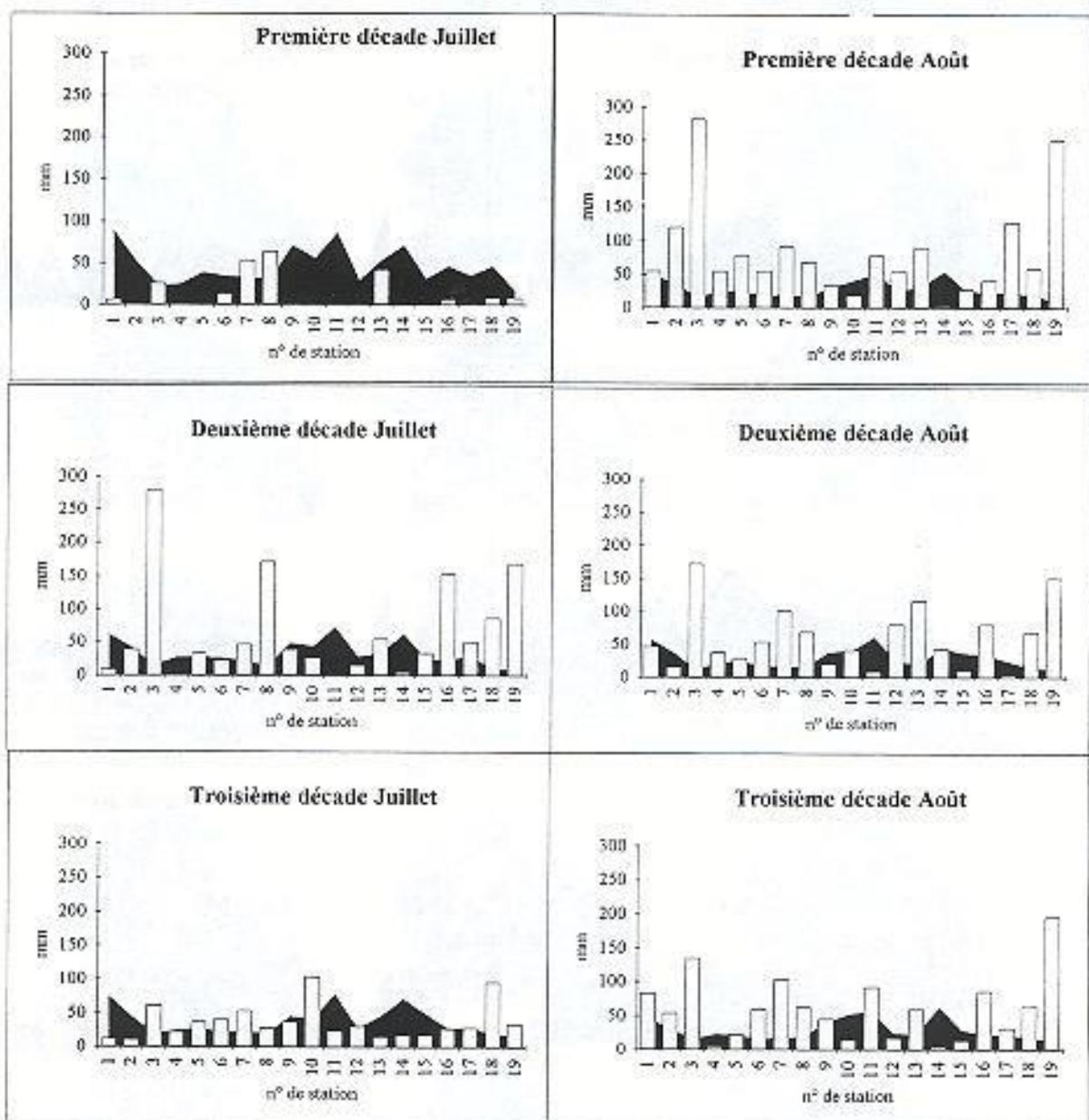


Fig. 14 b

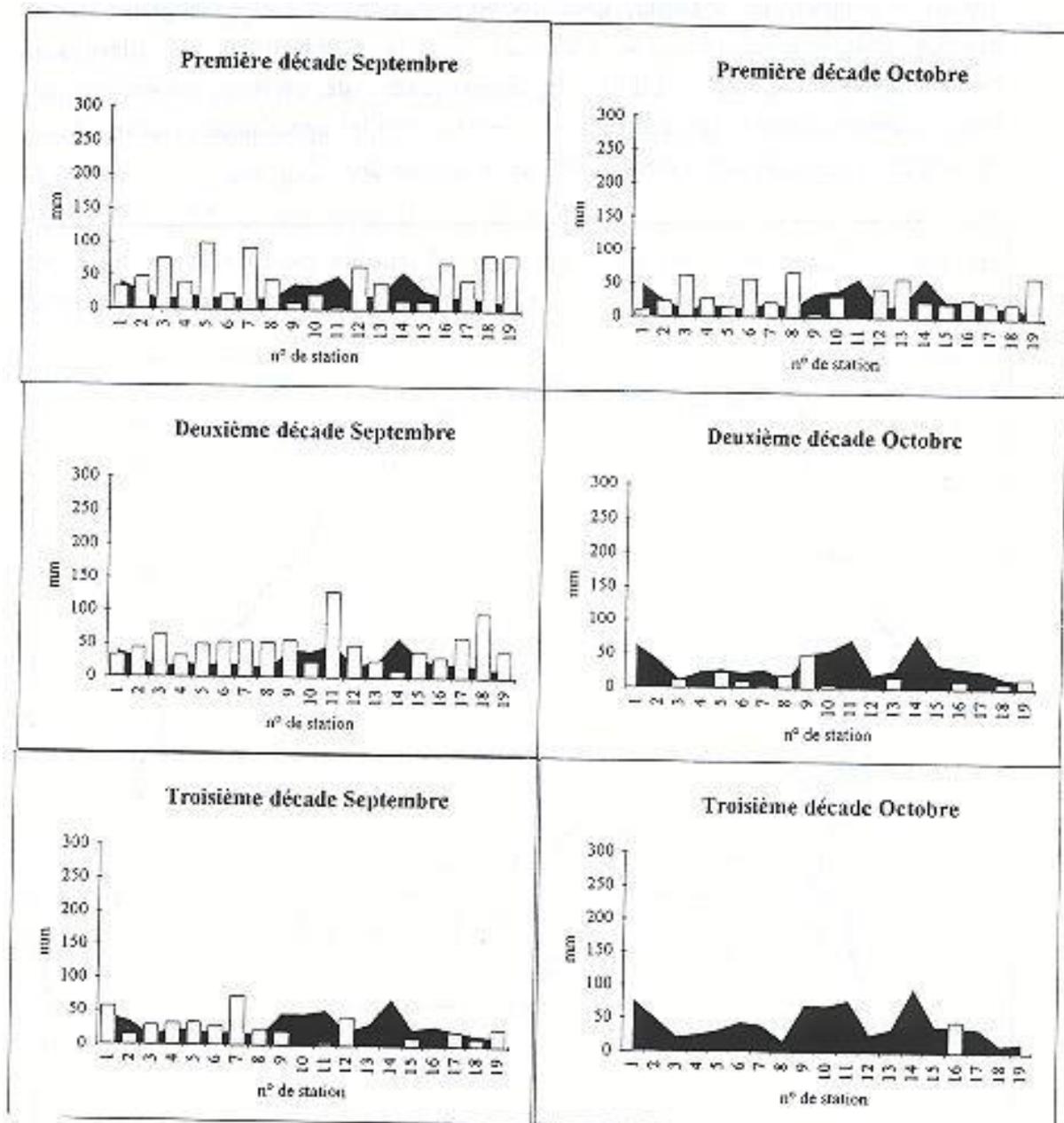


Fig. 14 c

6. Comportement des facteurs climatiques lors de transect Nord/Sud et Est/Ouest

Les stations de Bakel, Dakar-Yoff, Podor et Kolda ont été sélectionnées pour une étude comparée de l'évolution spatio-temporelle des paramètres aérologiques. Leur position géographique (fig. 15) traduisant bien la double transition climatique caractéristique du Sénégal, étudier le comportement de certains paramètres de l'environnement dans ces stations permettra de vérifier si les oppositions observées tout au long de notre étude s'appliquent à une échelle spatiale fine.

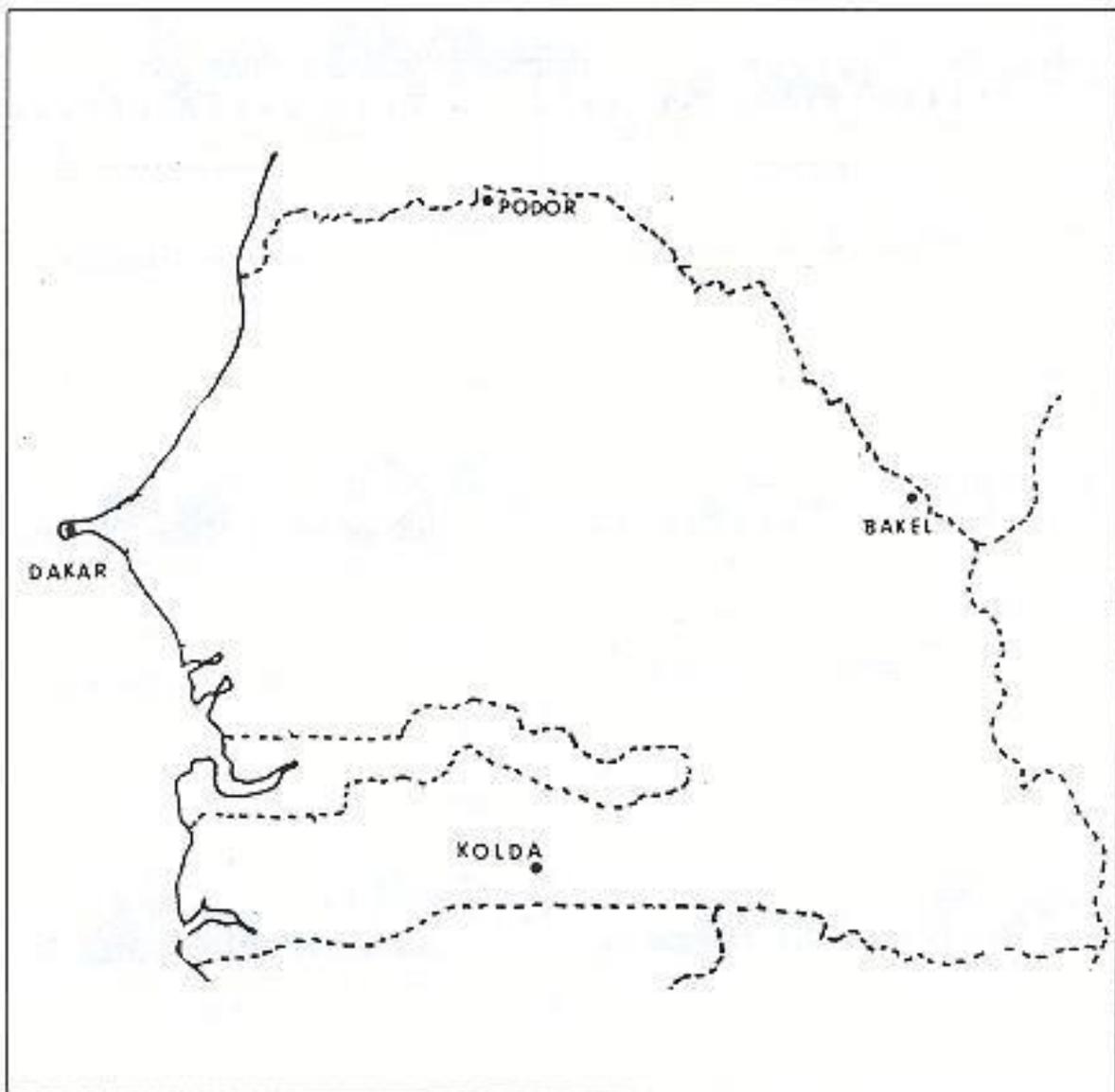


Fig. 15 : Localisation géographique des quatre stations test

• Les courbes de maxima de température de l'air (fig. 16) montrent une nette opposition entre les quatre stations test. Les stations situées au Nord et à l'Est s'opposent à celles de la région côtière et de la zone Sud par les fortes valeurs de températures enregistrées tout au long de l'hivernage. En début d'hivernage, la station de Dakar-Yoff se distingue des autres avec des valeurs maximales comprises entre 25 et 28°C. Kolda située en latitude méridionale enregistre de fortes valeurs (40°C pendant la première décade de mai) de températures qui s'estompent au cœur de l'hivernage (28° C pendant la deuxième décade de juillet). Toutefois, pendant cette période d'installation des pluies qui entraînent une humidification du substrat, les températures s'atténuent d'environ 5 à 10°C, sauf pour la station de Dakar qui enregistre les plus basses valeurs des quatre stations test et voit paradoxalement sa température augmenter d'environ 5°C entre mai et fin octobre.

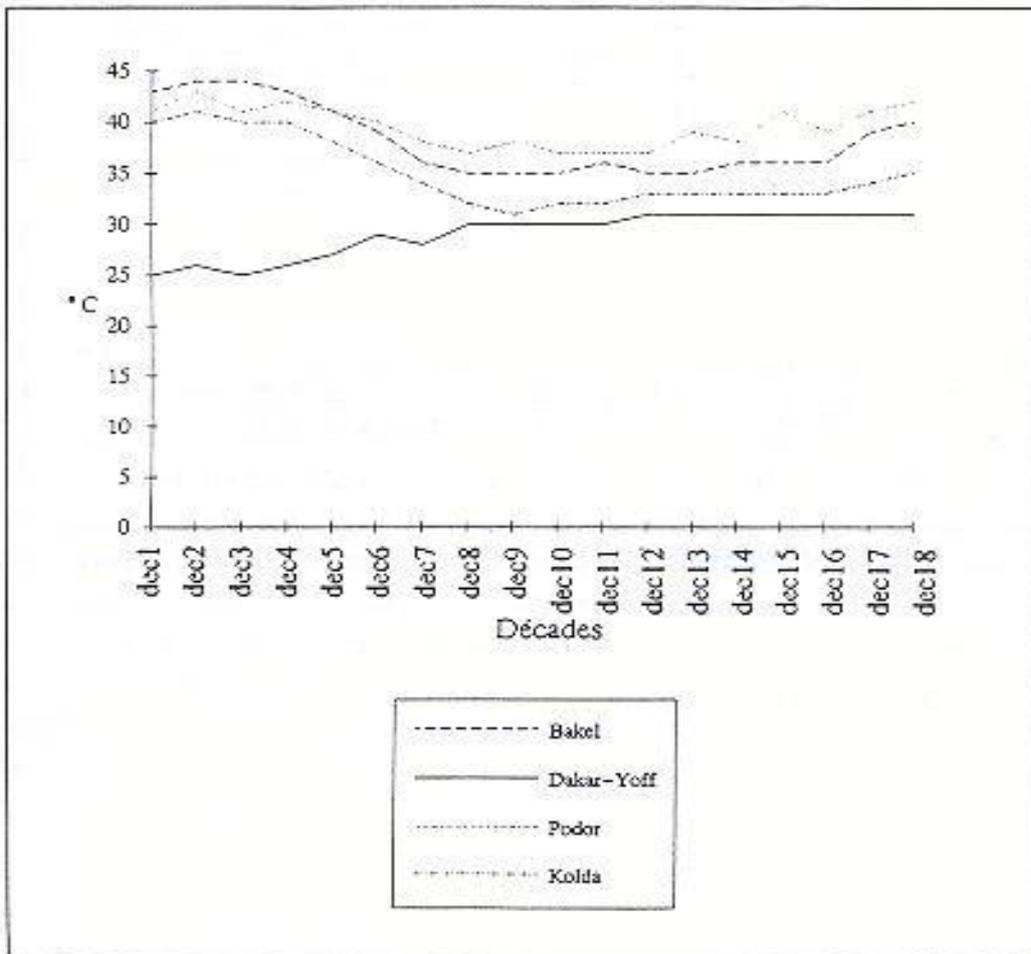


Fig. 16 : Évolution de la température de l'air dans les quatre stations test (décade)

- Contrairement aux maxima de température de l'air, la tension de la vapeur (fig. 17) d'eau est plus élevée dans les stations situées à l'Ouest et au Sud. À part la troisième décades d'août durant laquelle Bakel enregistre les plus fortes valeurs de tension de vapeur d'eau, cette station et celle de Podor située en zone sahélienne, caractérisent les espaces où la densité de l'eau atmosphérique est la plus faible. Toutefois, pendant les 18 décades de l'hivernage, les valeurs de tension de vapeur d'eau progressent. Mais, dès la première décade de Septembre, une chute s'amorce à Bakel et Podor.

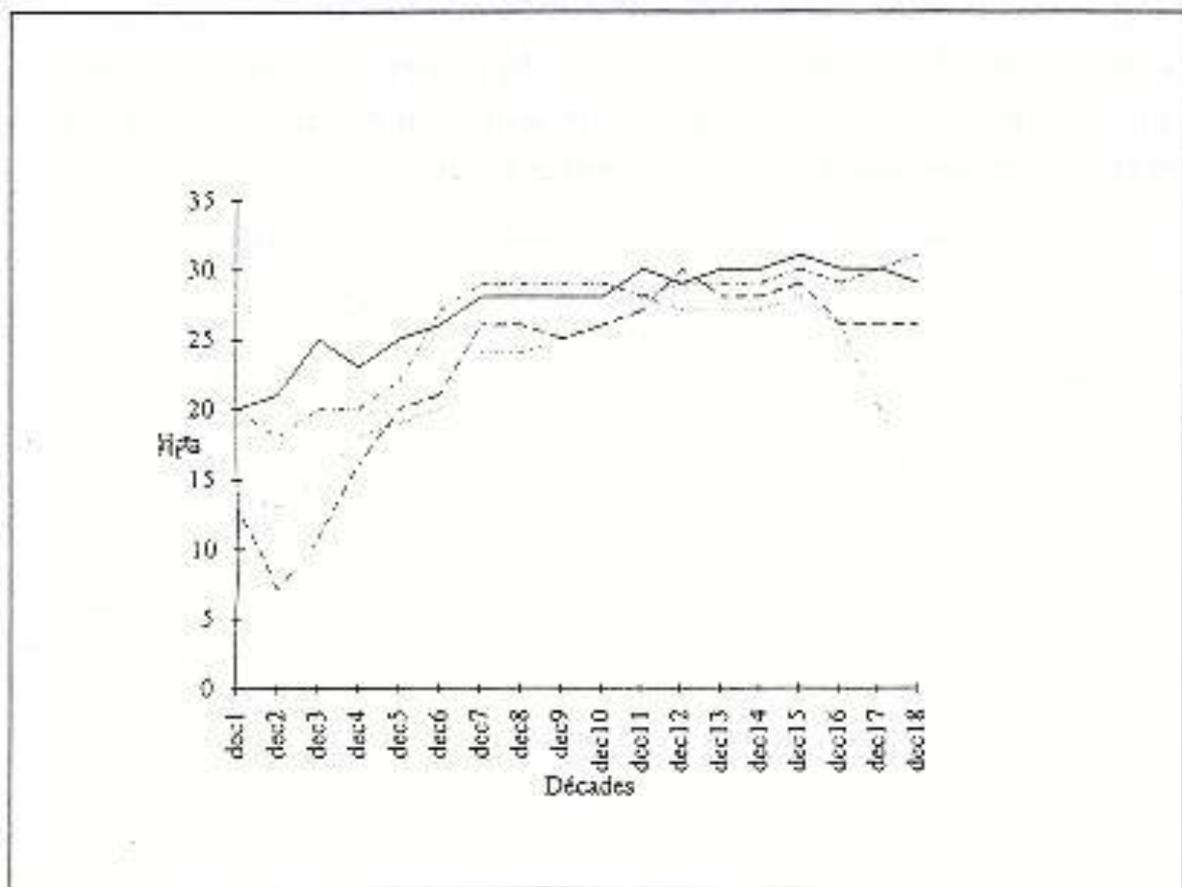


Fig. 17 : Évolution de la tension de la vapeur d'eau dans les quatre stations test (décade)

- Les courbes d'humidité relative (fig. 18) confirment également la distinction régionale mise en évidence par les autres paramètres. Dakar-Yoff et Kolda se distinguent par leurs forts taux d'humidité. En début de saison, Dakar-Yoff située en bordure océanique enregistre des valeurs dépassant 90%. À partir de la troisième décade de Juin, Kolda (qui enregistre déjà plus de 80mm de pluie pendant cette même décade) voit son taux d'humidité dépasser de loin celui de Dakar- Yoff (3mm de pluie) Cette hausse des pourcentages d'humidité concerne

trois stations sur quatre. La courbe représentant la station de Dakar-Yoff témoigne par des “creux” et des “bosses” d'une instabilité de l'humidité relative. À la fin Septembre, les valeurs d'humidité amorcent également une chute mais avec toutefois des taux nettement supérieurs à ceux enregistrés en début d'hivernage.

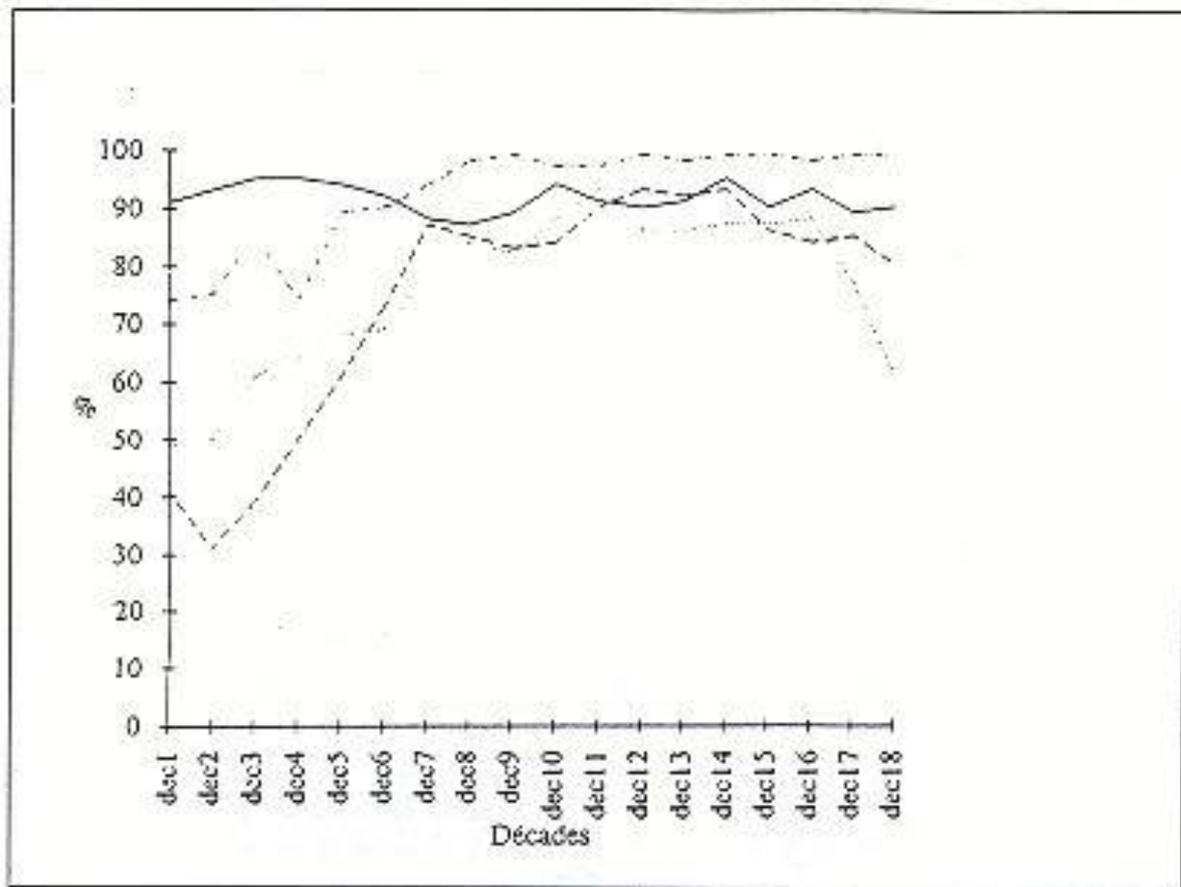


Fig. 18 : Évolution de l'humidité relative dans les quatre stations test (décade)

- Les valeurs d'évaporation Piche (fig. 19) restent également tout au long de l'année plus élevées dans les stations de Bakel et Podor par opposition à celles de Dakar et Kolda. Dans cette dernière station, l'évaporation dépassant 80mm en début de saison descend jusqu'à 20mm en début Juillet (valeurs plus faibles que celles enregistrées à Dakar-Yoff). Ce bouleversement concernant les stations de Bakel et Dakar-Yoff est également observé pendant cette même période pour la tension de la vapeur d'eau et l'humidité relative.

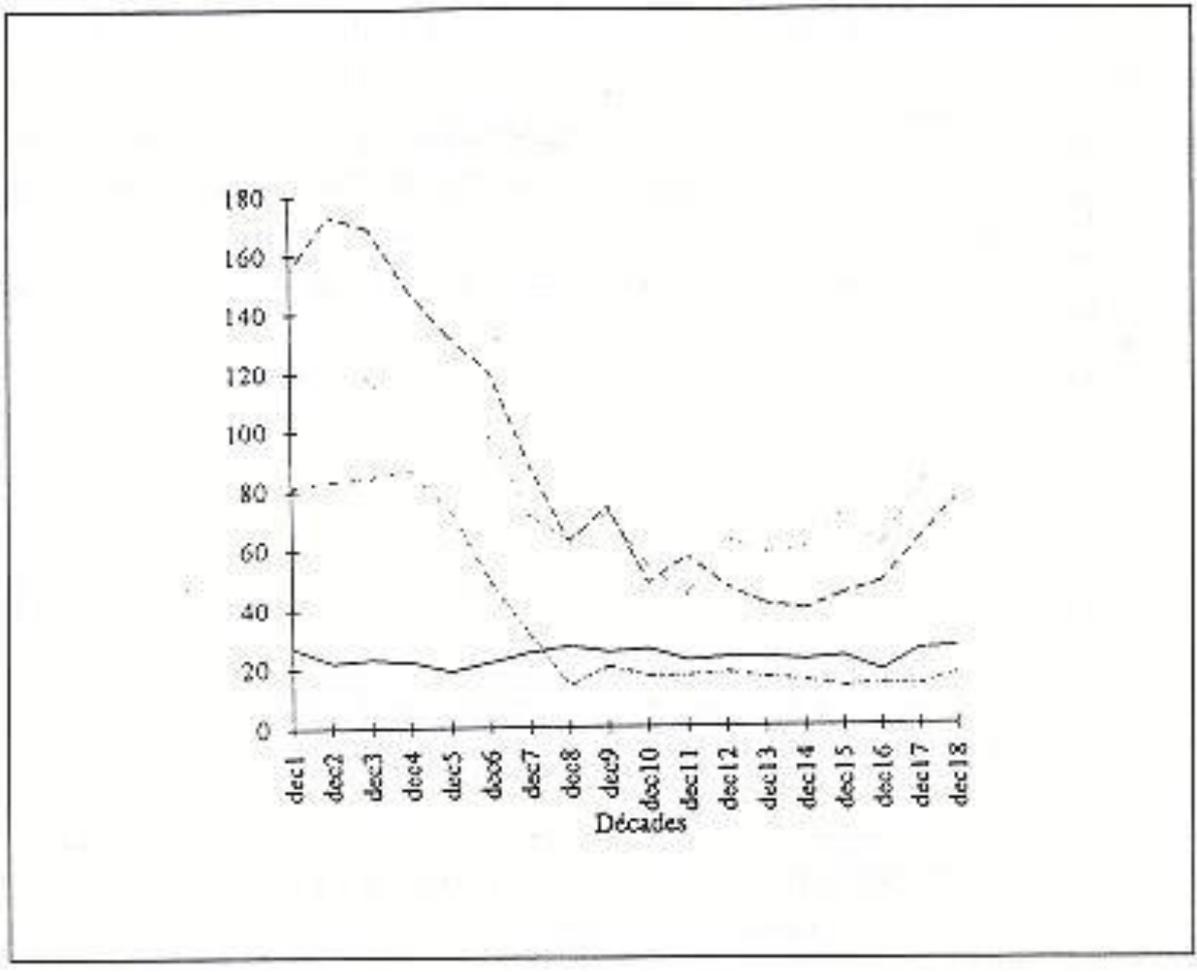


Fig. 19 : Évolution de l'évaporation Piche dans les quatre stations test (décade)

Tout comme les maxima de température et contrairement à l'humidité relative, l'évaporation a tendance à baisser avec l'installation de l'hivernage, Cela pour toutes les stations sauf celle de Dakar-Yoff où les valeurs stagnent entre 25 et 30mm. À partir de la fin août, on constate une intensification de l'évaporation dans les stations situées à l'Est et au Nord.

- L'évolution pluviométrique (fig. 20) confirme également la double transition climatique entre ces différentes régions. Elle est cependant plus nuancée car on note parfois un rapprochement entre la situation observée à Dakar et Podor et à celle de Kolda et Bakel. La situation pluviométrique présente, sauf en milieu d'hivernage, une configuration plutôt méridienne avec des isolignes reliant la zone Est au Sud-Ouest. Les incursions d'alizés (précoces en 1990) provenant de l'anticyclone des Açores expliquent cette disposition des isohyètes. Cependant, on constate une certaine zonalité au cœur de l'hivernage.

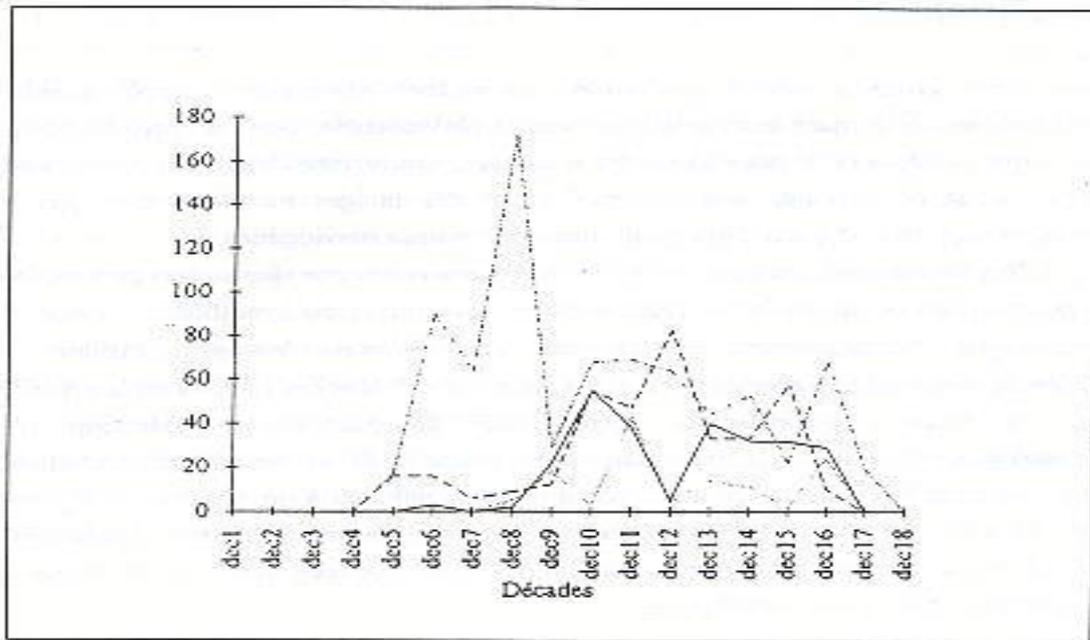


Fig. 20 : Évolution des pluies mesurées dans les quatre stations test (décade)

Conclusion partielle

Nous avons à travers l'évolution des nuages pluviogènes, décelé quelques contradictions concernant leurs relations avec la pluviométrie. Dans un premier temps, nous avons constaté de la pluie dans des zones sans couverture de nuages pluviogènes. Il s'agit donc de précipitations engendrées par des nuages ne remplissant pas les conditions de sélection préétablies pour identifier les amas pluviogènes.

Plus banalement, des zones couvertes par des nuages pluviogènes non pourvoyeurs de pluies sont observées. Nous avons avancé, à leur sujet, trois hypothèses. Il s'agit soit d'un manque d'enregistrement lié à un problème technique (manque d'assiduité ou absence de météorologiste terrain), ce qui serait étonnant dans ces régions où la première pluie est souvent qualifiée de "sacrée" ; soit de phénomènes beaucoup plus "climatologiques" comme la traversée d'une masse d'air sèche et par conséquent l'évaporation de l'eau précipitée avant son arrivée au sol ; ou à un degré de complexité encore plus élevé, l'existence d'une turbulence d'origine thermodynamique conduisant à modifier la trajectoire des gouttes de pluies. Une nouvelle fois, le problème de l'enregistrement des données est posé.

Les écarts entre valeurs de températures mesurées dans les stations météorologiques et celles fournies par Météosat ne font que confirmer la présence d'une atmosphère

trouble, ce qui entraîne une sous-estimation des valeurs d'origine spatiale en présence d'énorme quantité de vapeur d'eau. La particularisation des régions côtières influencées par l'Atlantique et des régions méridionales plus arrosées traduit nettement cette incursion. Les écarts considérables entre mesures satellitaires et relevés stations sont moins marqués en zone sahélienne. Elles sont en revanche, plus importantes sur la bordure océanique mais aussi dans les régions méridionales où l'atmosphère est quasi saturée pendant l'hivernage. Dans ces régions, l'énorme quantité de vapeur d'eau en permanence dans l'atmosphère fausse, par suite de l'effet de serre, les valeurs de températures radiatives captées directement par les satellites. Par conséquent, elles sont moins représentatives de la réalité dans ces régions.

Le suivi de l'évolution cyclique des couvertures végétales est effectué grâce aux indices de végétation calculés. Cependant, distinguer les types de plantes s'avère délicat à partir des seules réponses spectrales du couvert végétal. La réflectance du support terrestre tapissé d'herbacés en fin de saison des pluies explique, toutefois, l'étroite relation existant entre la pluviométrie et les indices calculés (voir : huitième chapitre).

Le suivi des paramètres aérologiques démontre une nette disparité entre, d'une part, régions côtières et régions situées à l'Est et, d'autre part, entre zone sahélienne et soudanienne. Cette double transition climatique retracée par le comportement spatiotemporel des éléments atmosphériques se reflète également à une échelle spatiale fine. L'évolution comparée des paramètres aérologiques dans les quatre stations test (Bakel, Dakar-Yoff, Podor et Kolda) sélectionnées pour leur position géographique, confirme, en effet, cette double opposition climatique méridienne et zonale dont l'existence est liée, à la fois, à la proximité océanique et à la disposition topographique du Sénégal.

Appréhender la pluviométrie à travers son évolution, ses différentes manifestations et sa distribution spatiale, constitue la ligne directrice de cette thèse. Ainsi donc, le dernier chapitre concerne uniquement l'analyse de ce paramètre. Ses relations avec le substrat mais aussi avec certains paramètres aérologiques permettent de discuter la nécessité d'introduire des éléments correcteurs dans les méthodes d'estimation appliquées au Sénégal. Avant d'exposer les résultats issus de ces différentes approches, nous analysons l'évolution de la pluviométrie pendant l'hivernage 1990. Une étude comparée entre la saison 1990 et la normale 1931-1960, souvent prise comme référence, pour déterminer l'efficacité pluviométrique de la saison des pluies, permet ensuite de bien situer cet hivernage dans un plus large contexte.

CHAPITRE VIII :

RELATIONS PLUIES/AUTRES PARAMÈTRES

L'analyse des nuances climatiques régionales au travers du comportement des éléments du climat montre qu'il est indispensable, dans le cas du Sénégal, d'introduire des paramètres correcteurs pour améliorer la précision de l'estimation des pluies par satellite. L'analyse de l'évolution spatio-temporelle des paramètres aérologiques a permis de décrire l'environnement atmosphérique des nuages pluvio-gènes. Cela facilite, en conséquence, la recherche d'éléments pertinents susceptibles d'améliorer les modèles d'estimation préexistants ; il faut, en outre, tenir compte des facteurs géographiques ayant une influence déterminante sur le mécanisme des pluies afin de comprendre pourquoi et à quel stade de leur évolution, ces mécanismes sont déstabilisés.

Sachant que la pluviométrie est la phase finale de divers processus qui se manifestent de manière plus ou moins interactive, nous avons étudié à travers différentes approches les relations pouvant exister entre les paramètres de l'environnement et les précipitations. À l'issue de ces recherches de corrélations basées sur des opérations statistiques, certains paramètres se sont avérés plus pertinents que d'autres, même si la plupart d'entre eux satisfont, au moins pendant une décade, nos objectifs. Certains sont cependant plus ou moins déterminants en fonction de la période de l'hivernage. En d'autres termes, la plupart des paramètres n'améliorent les résultats d'estimation des pluies que pendant une courte durée tandis que d'autres ont une réponse plus durable.

Cette diversité des résultats prouve encore la relation étroite qui lie tous ces paramètres ; la pluviométrie ne constituant, ponctuellement, que l'aboutissement de nombreux mécanismes. Les réactions différentes en fonction de l'avancée dans l'hivernage laissent également supposer la nécessité d'une validation de toute méthode d'estimation des pluies sur une vaste échelle temporelle. Pour être opérationnelle, les approches doivent être soumises à l'épreuve test d'années différentes : hivernages déficitaires, hivernages excédentaires et saisons des pluies "normales". Les réactions des paramètres étudiés ne sont pas les mêmes selon le contexte climatique saisonnier. Par conséquent, estimer les pluies sur uniquement l'hivernage 1990, limite l'interprétabilité de la méthode qui devra encore faire ses preuves. Toutefois, pour placer l'hivernage 1990 dans un contexte plus global, nous allons au travers d'un suivi spatio-temporel, la comparer avec la période dite "normale" 1931-1960. Les résultats issus des méthodes d'estimation des pluies ainsi que les relations entre la pluviosité et le substrat sont également exposés dans ce dernier chapitre.

I. PARAMÈTRES INDICATEURS DE LA PLUIE

1. Peut-on intégrer le substrat dans un modèle d'estimation des pluies ?

Une série d'opérations intégrant le support topographique et la pluviométrie a été effectuée afin de cerner les rapports de causalité entre ces deux éléments, pour ensuite mesurer les influences thermiques et hygrométriques du relief sur les mécanismes régissant la convection "utile". Cette recherche de relations nécessite plusieurs phases : tout d'abord, croiser le relief comme variable explicative et la pluie comme variable expliquée ; ensuite, via le modèle numérique de terrain présenté dans le sixième chapitre, intégrer d'autres éléments relatifs à la qualité du substrat (réseau hydrographique, types de sols, etc.) pour une classification visant à effectuer un zonage régional prenant en compte tous les paramètres. Cette classification permettrait d'effectuer une régionalisation climatique en fonction de l'importance de la pluviométrie qui, en quelque sorte, règle la vie de la population occupée majoritairement par l'agriculture. Une sorte de bilan global pourrait être effectué afin de distinguer les régions qui devraient prioritairement être prises en charge des régions où une mise en valeur d'autres types de ressources serait nécessaire (ressources halieutiques, tourisme, énergie solaire, énergie éolienne, etc.).

Cependant, malgré les tentatives répétées, l'échelle spatiale fine de la carte topographique ne nous a pas permis de vérifier la véracité de la relation, pourtant bien fondée, entre substrat et pluviosité. Les résultats des corrélations, exprimés sur le tableau 1, montrent des coefficients de corrélations très faibles qui excluent toute adaptation de la variable relief dans le modèle d'estimation des pluies.

Les mauvais résultats issus des recherches de corrélations poussent encore une fois à croire que l'échelle spatiale de la carte topographique utilisée est trop petite pour établir une quelconque relation entre ces deux éléments, fait déjà constaté quand nous avons essayé de calculer les pentes. Les résultats n'ont montré que l'allure de la pente générale alors que le but était de distinguer les différentes structures afin d'étudier leur influence sur la dynamique des masses d'air les parcourant.

Tableau 1 : Analyse des relations Pluies-Relief (décades)

	relief	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Variance	60	193	337	11820	133	16354	12786	8418	4250	3032	2795	2747	228	691
Écart-type	7,7	13,9	108,3	108,7	11,5	127,8	113	91,75	65,2	55	52,8	52,4	15,1	26,3
Coef. r		0,24	0,4	0,13	0,36	0,16	0,14	0,16	0,16	0,13	0,11	0,09	0,24	-0,01

Pour s'assurer de l'inadéquation de l'échelle, nous avons essayé, toujours sans succès, d'effectuer la même relation en croisant, cette fois, le relief à la somme des précipitations par deux, puis trois décades..., jusqu'au cumul annuel.

Le tableau 2 confirme, une fois de plus, l'impertinence de l'échelle du 1/1.000.000^{ème}. Il serait, toutefois, intéressant de combiner la pluie et le substrat en utilisant une échelle spatiale plus grande : 1/25.000^{ème} par exemple. Car il est évident que la platitude du littoral et l'agencement des vallées le long de la côte influent sur les vitesses et direction du vent.

De même, les premières pluies enregistrées à l'Est du pays ne peuvent être attribuées qu'à un phénomène thermodynamique en rapport à la topographie ou l'exposition du relief dans cette région.

La plupart des SIG prennent comme support ce type de document spatial à grande échelle car il restitue mieux la réalité terrain et, par conséquent, permet une analyse plus discriminante.

Cependant, l'absence de carte de ce type (grande échelle) et les difficultés d'acquisition de l'information de base n'ont pas altéré notre acharnement à vouloir intégrer la topographie à cette étude.

Car, comme nous l'avons déjà expliqué dans le sixième chapitre, de meilleurs résultats auraient pu permettre la généralisation de ce genre d'approche dans beaucoup de pays africains dont le fond topographique n'est malheureusement transcrit qu'à l'échelle du 1/1.000.000^{ème}.

Tableau 2 : Analyse des relations Pluies - Relief (cumul x+1, x+1+1... x+12)

	relief	cum2	cum3	cum4	cum5	cum6	cum7	cum8	cum9	cuml0	cuml1	cuml2	cuml3
Var	60,3	968,3	18851	21069	70055	139259	214908	278031	337553	394256	460515	474881	505753
E-typee	7,7	31,1	137,3	145,1	264,6	373,1	463,5	527,2	580,9	627,9	678,6	698	711,1
Coef. r		0,35	0,18	0,2	0,19	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16

2. Trois paramètres indicateurs de la pluviométrie

Les résultats des régressions linéaires multiples (tableau 3) établies pour améliorer la méthode Latit, prise comme référence, sont plus ou moins satisfaisants selon les paramètres intégrés dans les calculs mais également selon la période : début, milieu ou fin d'hivernage (fig. 21 a, b, c, d). Sur les 11 décades test (3 décades de juin, juillet et août, premières de septembre et octobre, les autres n'étant pas prises en compte du fait de la faiblesse des valeurs de pluies enregistrées), trois paramètres ont retenu l'attention par leur pertinence.

Tableau 3 : Coefficients r² issus des calculs de régressions multiples

	latit	dv	hn	hx	lg	tmax	mer	tmin	ndvi	pic	vap	w
Jun-01	0.84	0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.85	0.85	0.84	0.84	0.85	0.85
Jun-02	0.87	0.90	0.88	0.88	0.88	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
Jun-03	0.64	0.73	0.64	0.64	0.72	0.67	0.73	0.64	0.64	0.65	0.66	0.64
Jul-01	0.44	0.44	0.47	0.44	0.48	0.45	0.46	0.44	0.44	0.44	0.45	0.44
Jul-02	0.73	0.73	0.74	0.73	0.73	0.73	0.73	0.74	0.79	0.73	0.75	0.75
Jul-03	0.44	0.44	0.47	0.44	0.48	0.45	0.49	0.44	0.46	0.49	0.47	0.45
Aou-01	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	0.64	0.66	0.61	0.63	0.62
Aou-02	0.68	0.69	0.69	0.69	0.68	0.70	0.70	0.68	0.72	0.68	0.71	0.70
Aou-03	0.68	0.69	0.69	0.68	0.69	0.69	0.70	0.75	0.69	0.69	0.69	0.68
Sep-01	0.67	0.72	0.79	0.67	0.75	0.75	0.76	0.79	0.67	0.67	0.77	0.73
Sep-02	0.32	0.32	0.38	0.33	0.35	0.32	0.34	0.34	0.35	0.52	0.32	0.35
Sep-03	0.14	0.16	0.15	0.20	0.23	0.16	0.29	0.39	0.15	0.16	0.16	0.15
Oct-01	0.51	0.53	0.64	0.54	0.74	0.61	0.77	0.51	0.51	0.58	0.58	0.61

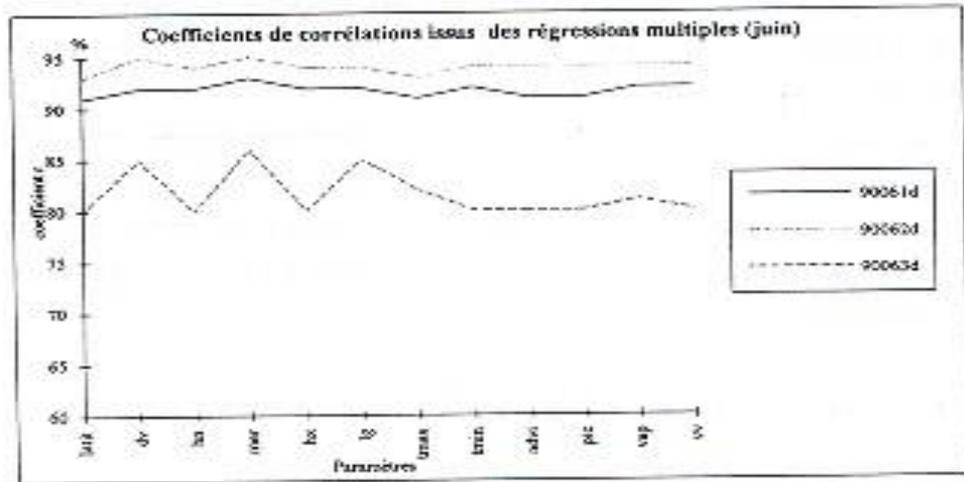


Fig. 21 a

Fig. 21 (a, b, c, d) Évolution des coefficients de corrélations r issus des calculs de régressions multiples (en pourcentage)

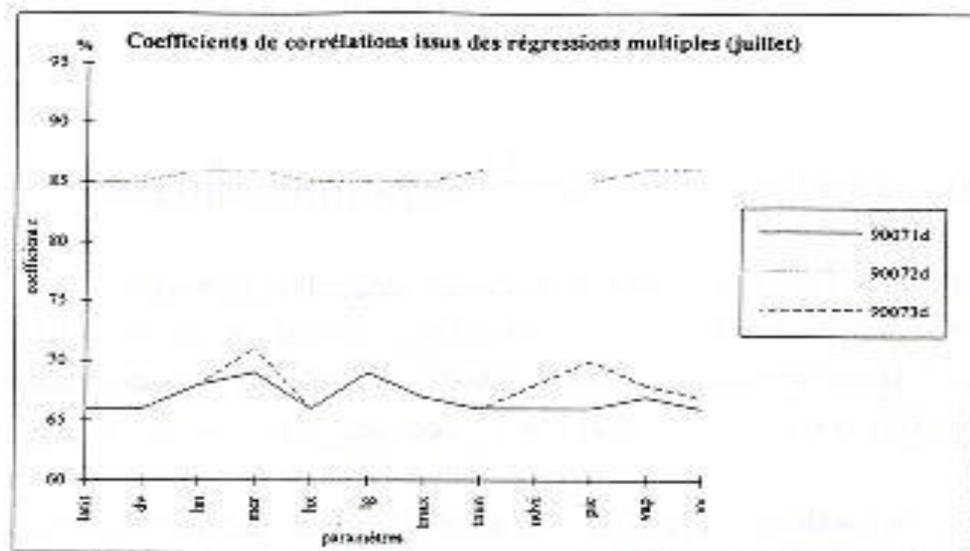


Fig. 21 b

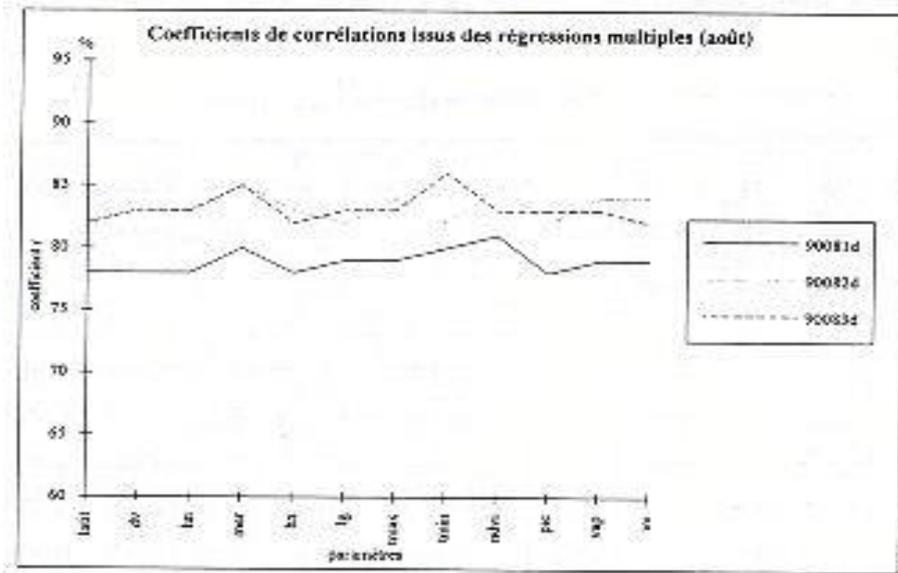


Fig. 21 c

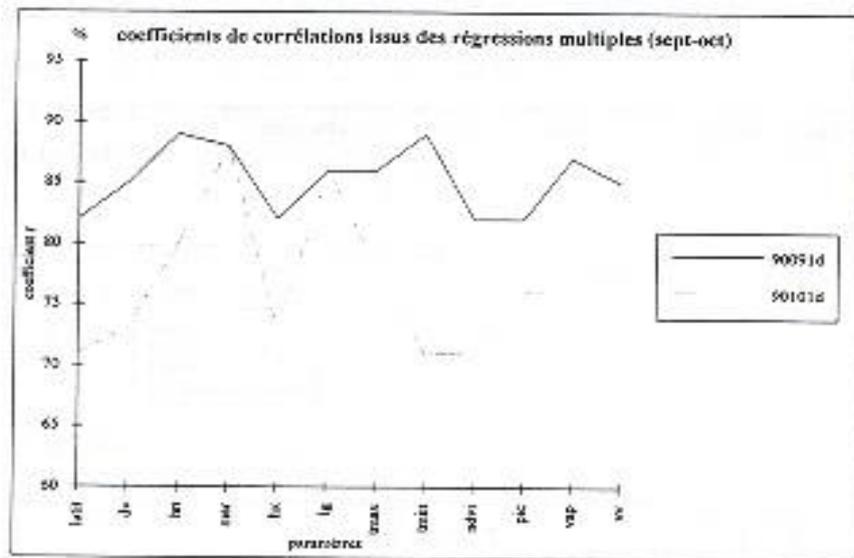


Fig. 21 d

D'autres, avec un coefficient de corrélation r^2 moins significatif, ont cependant confirmé l'existence d'une interdépendance entre éléments de l'environnement car ils ont, au moins pendant une décade, correspondu à l'objectif visé d'amélioration de la méthode Latit. Parmi les paramètres à effet temporaire, on note l'évaporation Piche et la tension de la vapeur en milieu de saison.

Le NDVI, la direction du vent et la distance des stations par rapport à la mer améliorent nettement les résultats.

2.1. Le NDVI : bon indicateur en mi saison des pluies

Pour l'intérêt de travaux où il est question de recherche, à travers divers éléments de l'environnement, d'indicateurs de la pluviométrie, nous avons seulement mis en évidence la distribution spatiale des indices de végétation. Cependant, les images obtenues à partir des calculs d'indices peuvent être intégrées dans d'autres opérations notamment dans les modèles appliqués pour l'estimation de la biomasse.

Dans la perspective de recherche d'éléments correcteurs pour l'amélioration des méthodes d'estimation des pluies, les résultats ont montré que les indices de végétation sont de pertinents indicateurs pour la pluie. Le NDVI est très déterminant, notamment, au cœur de l'hivernage. Cela n'est pas tout à fait surprenant dans la mesure où il existe une relation étroite de cause à effet entre pluviosité et couverture végétale. Les sols nus de saison sèche, recouverts en saison des pluies par un tapis herbacé, ont une réponse spectrale différente pendant ces deux périodes de l'année. La pertinence des résultats, à partir de la période où l'installation du tapis herbacé devient homogène sur l'ensemble des régions, amène toutefois à se poser la question de savoir lequel des deux éléments influe sur l'autre, malgré le fait que le NDVI soit pris comme paramètre explicatif et la pluie comme variable expliquée dans les calculs de régressions. Cette question est d'autant plus pertinente que les températures minimales donnent à peu près les mêmes résultats que les indices de végétation. Or, on sait que tout épisode pluvieux entraîne immédiatement une chute des températures (Séguin et al. 1987).

2.2. Rôle efficace de la direction du vent en début d'hivernage

Contrairement aux paramètres décrits ci-dessus, la direction du vent intervient de manière efficace sur les méthodes d'estimation des pluies dès le début de l'hivernage. Cela relève d'une logique évidente dans la mesure où, à cette période, les pluies sont engendrées par les flux de mousson. L'importance des flux zonaux s'explique par le fait que la mousson n'est pas encore bien installée et que, en conséquence, le

développement des systèmes convectifs ne concerne que les basses couches. Le rôle de la direction du vent perd de sa vigueur au cœur de l'hivernage du fait que l'épaisseur de la mousson favorise les échanges verticaux entre les différentes couches de l'atmosphère. En effet, à cette période, la convection est liée à l'activité des lignes de grains et, par conséquent, au dynamisme des échanges méridiens entre flux d'Est d'altitude et épaisseur de la mousson.

2.3. Pertinence de la distance par rapport à l'océan

La distance des stations météorologiques par rapport à l'Océan Atlantique, intégrée comme terme correcteur a donné de bons résultats pour améliorer la méthode Latit. Contrairement aux autres éléments, ce paramètre est déterminant au cours des 11 décades test. Moins important que la direction du vent en début de saison et le NDVI au cœur de l'hivernage, ce paramètre a été retenu du fait qu'il améliore les résultats de manière continue.

Il faut toutefois noter que ce fait relève d'une logique évidente dans la mesure où la méthode combine différents éléments visant à corriger les effets de la double transition climatique observée au Sénégal. La latitude reflète la zonalité et la distance par rapport à la mer traduit les influences de l'océan en restituant la réalité sur le terrain.

II. LA PLUIE EN 1990

1. Évolution et écart à la normale 1931-1960

- En 1990, le démarrage des pluies (<20mm) s'est effectué au Sud-Est du Sénégal, dès le mois de mai, pour se généraliser à l'ensemble du pays (<20mm au Nord-Est), seulement à partir de la deuxième décade de juillet (fig. 22).

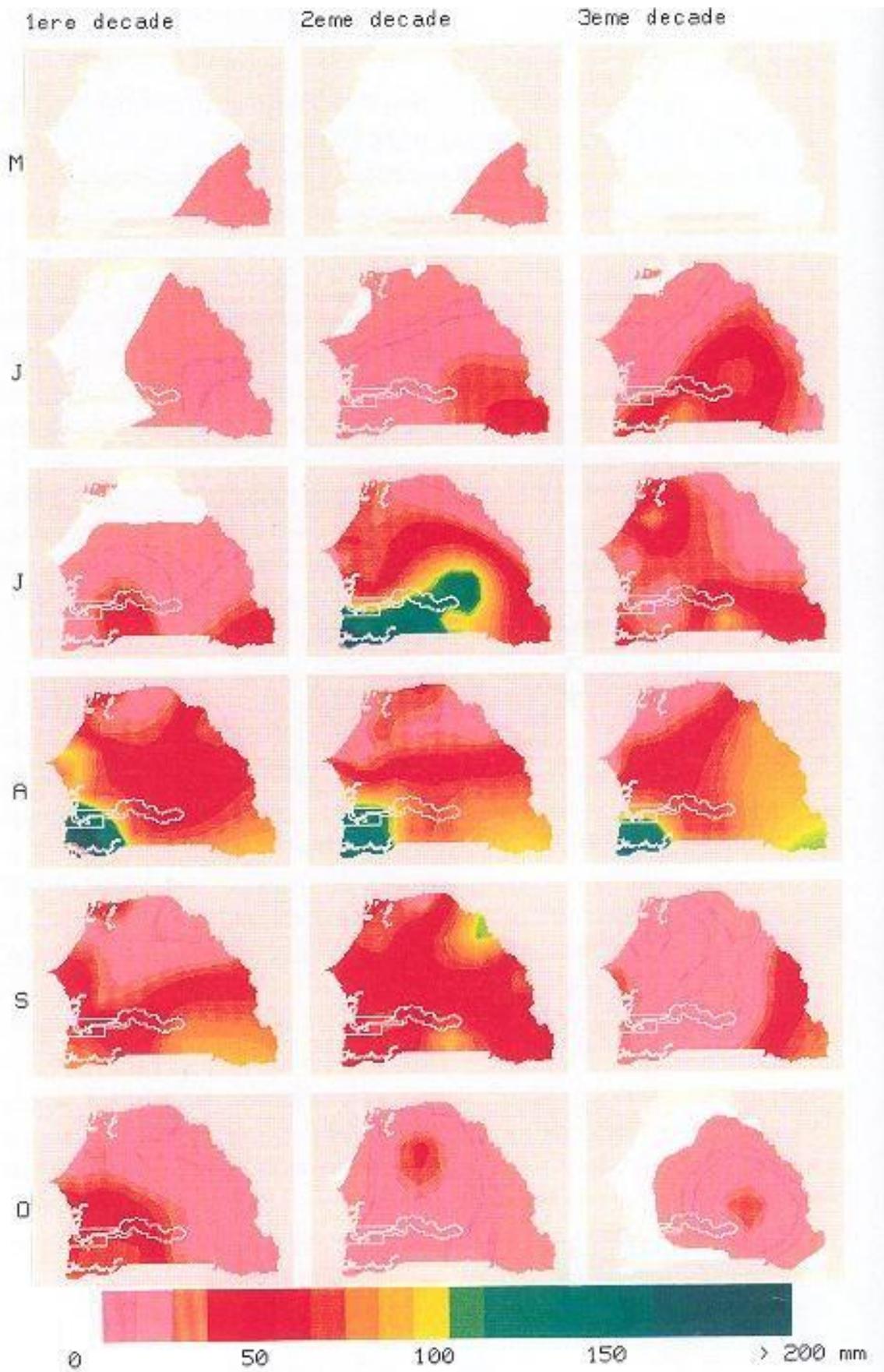
La disposition des isohyètes selon un transect Nord-Est Sud-Ouest, confirme le blocage imposé par l'incursion des alizés provenant de l'anticyclone des Açores. Par conséquent, les fortes pluies liées à l'épaisseur de la mousson (<200mm) n'ont concerné que l'extrême Sud-Ouest notamment en août avec une poussée dépassant le Nord-Est du fleuve Gambie pendant la deuxième décade de juillet.

La partie Sud-Ouest qui a enregistré le plus fort cumul annuel pendant l'hivernage 1990 n'a cependant, pas été la plus concernée par le passage des lignes de grains (voir : deuxième chapitre, fig. 25). On note 44 passages à Ziguinchor, contre 55 à

Kédougou, 24 à Dakar et seulement 21 à Podor. Le retrait des précipitations s'est effectué de manière rapide et a commencé par la région de la Grande Côte. L'orientation des isohyètes témoigne du rôle joué par le retour précoce des alizés, provenant de l'Atlantique Nord, repoussant le FIT vers le Sud.

- Les déficits nettement mis en évidence dans les régions septentrionales concernent cependant toutes les latitudes. En comparant les totaux pluviométriques mensuels enregistrés dans 18 des 19 stations météorologiques (absence de données de la période 1931-1960 pour la station de Cap-Skiring) pendant le période dite "normale" et 1990, on note des écarts importants dans toutes les stations et même au cœur de l'hivernage. Cela rejoint ce qui se produit partout ailleurs dans la zone sahélienne où la translation des saisonnières repousse plus activement tout le système vers le Sud, faisant que le FIT est plus rapide dans sa descente en direction des régions méridionales que dans sa remontée vers le nord en début d'hivernage.

La translation de l'isohyète 100mm (située au centre de la Mauritanie en période normale) vers le Sud, d'environ 250 à 300km a été mise en évidence par de nombreux travaux dont Le Borgne, 1988 (fig. 23). En 1984, cette isohyète, qui sépare le Sahara du domaine semi désertique, était repérée entre Saint-Louis et Nouakchott. Peut-on dire que cette progression vers le Sud a persisté quand on sait qu'en 1990, le cumul annuel des pluies enregistrées à Podor (station la plus septentrionale) n'est que de 128mm ? L'isohyète 100mm n'a atteint les régions de Dakar et du centre Est que pendant une seule décade.



**Fig. 22 : Précipitations mesurées en mm (Source : DMN sénégalaise)
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL/DAGORNE**

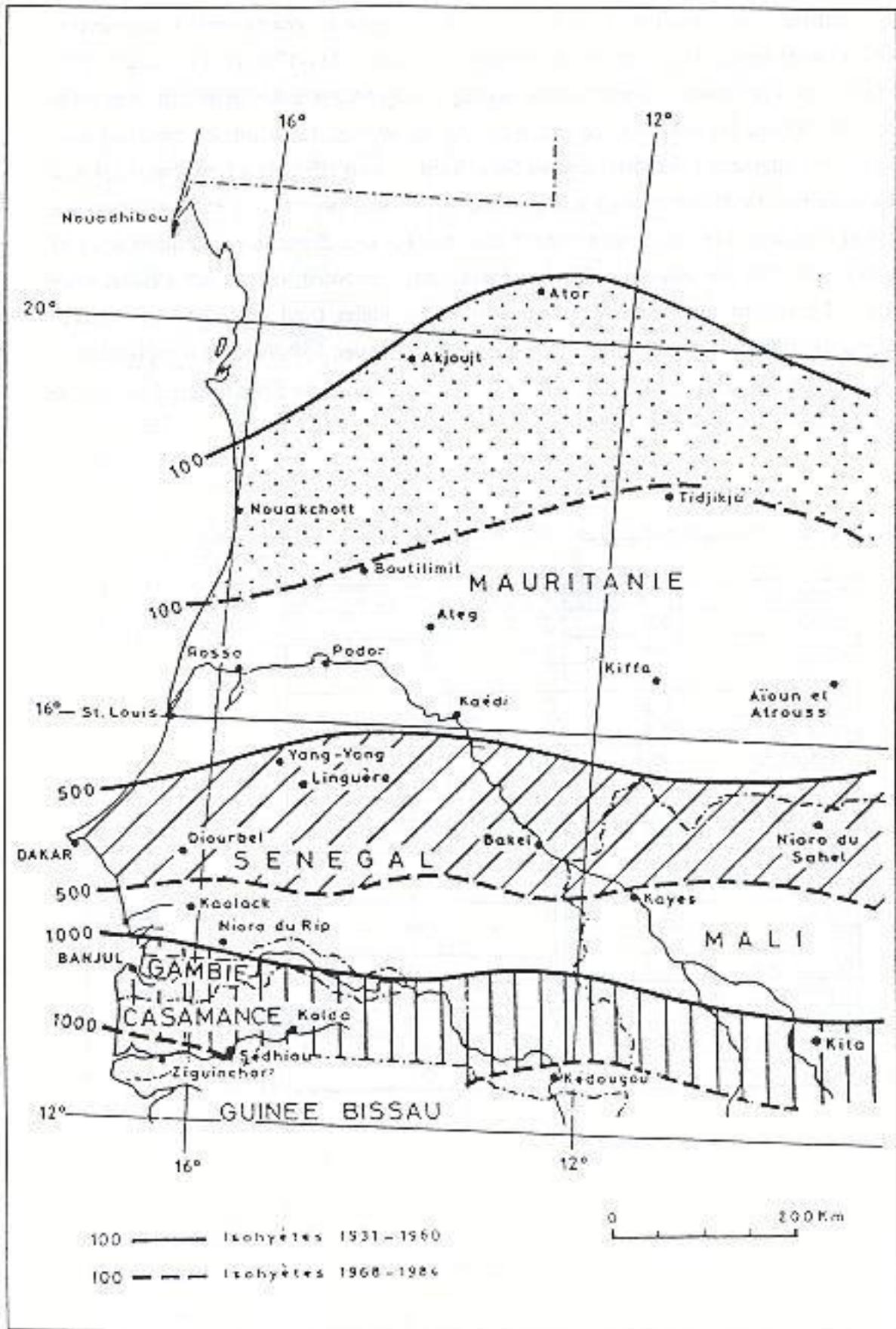


Fig. 23 : Translation des isohyètes (100, 500 et 1 000 mm) de 1968 à 1984 (Le Borgne, 1988)

Sur les tableaux suivants (4, 5, 6, 7, 8, 9), on note les écarts parfois surprenants entre les pluies enregistrées pendant la période “normale” 1931-1960 et l'hivernage 1990. Pendant la période de référence, on enregistre dès le mois de mai de la pluie dans toutes les stations, ce qui n'est pas le cas en 1990 où les précipitations concernent seulement 1 station située au Sud-Est. Il a plu à Kédougou 5,3 mm au mois de mai 1990 contre 46,6mm pendant la période “normale”. Cet écart se creuse au fur et à mesure que l'on avance dans la saison des pluies. Il dépasse largement les 100mm dans certaines stations (-100,8mm à Matam, -147,9mm à Bakel). Le record des écarts pendant le mois de juillet (au cœur de l'hivernage) concerne la station de Ziguinchor, située au Sud-Ouest avec 150,5mm. En septembre et octobre, les écarts sont les plus importants pour toutes les stations. Le déficit record de -210,6mm à Ziguinchor est enregistré en septembre.

Tableau 4 : Écarts entre pluies en 1990 et moyenne de la “normale” 1931-1960 (mois de mai)

Stations	mai 31-60	mai 90	écarts en mm
Bakel	9,6	0	-9,6
Bambey	4,9	0	-4,9
Dakar	1,4	0	-1,4
Diourbel	6,3	0	-6,3
Kaolack	7,8	0	-7,8
Kédougou	46,6	5,3	-41,3
Kolda	19,6	0	-19,6
Linguère	3,6	0	-3,6
Louga	2,8	0	-2,8
Matam	4	0	-4
Mbour	22	0	-22
Nioro	8,7	0	-8,7
Podor	32	0	-32
Saint-Louis	1,3	0	-1,3
Tambacounda	19,8	0	-19,8
Thiès	1,6	0	-1,6
Vélingara	28,1	0	-28,1
Ziguinchor	9,7	0	-9,7

Tableau 5 : Écarts entre pluies en 1990 et moyenne de la “normale” 1931-1960 (mois de juin)

Stations	juin 31-60	90 juin	écarts en mm
Bakel	68,1	33,1	-35
Bambey	30,1	15,9	-14,2
Dakar	14,6	3,4	-11,2
Diourbel	40,2	5,8	-34,4
Kaolack	61,1	22,2	-38,9
Kédougou	170,9	92	-78,9
Kolda	149,2	108,2	-41
Linguère	31,4	7,9	-23,5
Louga	14	0	-14
Matam	50,4	37,2	-13,2
Mbour	28,9	7,8	-21,1
Nioro	76,9	26	-50,9
Podor	16,2	0	-16,2
Saint-Louis	7,2	0	-7,2
Tambacounda	130,9	132,3	-1,4
Thiès	24,2	5,8	-18,4
Vélingara	137,2	68,3	-68,9
Ziguinchor	125,1	75,2	-49,9

Tableau 6 : Écarts entre pluies en 1990 et moyenne de la “normale” 1931-1960 (mois de juillet)

Stations	juillet 31-60	90 juillet	écarts en mm
Bakel	176,6	28,7	-147,9
Bambey	127,8	50,3	-77,5
Dakar	88,1	24,4	-63,7
Diourbel	139,5	74,6	-64,9
Kaolack	160,2	79,1	-81,1
Kédougou	257,9	155	-102,9
Kolda	244,7	265,7	21
Linguère	100,7	77,8	-22,9
Louga	94,8	131,4	36,6
Matam	128,8	28	-100,8
Mbour	125,7	46,5	-79,2
Nioro	185,6	113,9	-71,7
Podor	67,6	23,8	-43,8
Saint-Louis	44,2	53,3	9,1
Tambacounda	196,2	188,9	-7,3
Thiès	121,9	80	-41,9
Vélingara	223,6	192,5	-31,1
Ziguinchor	362,7	212,2	-150,5

Tableau 7 : Écarts entre pluies en 1990 et moyenne de la “normale” 1931-1960 (mois d’août)

Stations	août 31-60	90 août	écarts en mm
Bakel	234,2	186,3	-47,9
Bambey	252,2	189,5	-62,7
Dakar	248,6	99,5	-149,1
Diourbel	259,3	131,7	-127,6
Kaolack	295,7	170,5	-125,2
Kédougou	320,1	298,4	-21,7
Kolda	398,6	202,6	-196
Linguère	209	100,9	-108,1
Louga	176,5	75,5	-101
Matam	202,3	179,7	-22,6
Mbour	295,5	155,8	-139,7
Nioro	354,9	269,1	-85,8
Podor	133,3	51,5	-81,8
Saint-Louis	160,9	54,2	-106,7
Tambacounda	288,8	209,8	-79
Thiès	273	163,9	-109,1
Vélingara	327,4	195,7	-131,7
Ziguinchor	532,4	599,4	67

Tableau 8 : Écart entre pluies en 1990 et moyenne de la “normale” 1931-1960 (septembre)

Stations	sep 31-60	90 sep	écarts en mm
Bakel	178,1	126	-52,1
Bambey	199,4	107,2	-92,2
Dakar	163	105,1	-57,9
Diourbel	189	184,3	-4,7
Kaolack	200,7	107,7	-93
Kédougou	307,2	221,8	-85,4
Kolda	302,7	121,1	-181,6
Linguère	135,5	86,4	-49,1
Louga	136,2	46,9	-89,3
Matam	122	136,9	-14,9
Mbour	220	158,1	-61,9
Nioro	221,2	68	-153,2
Podor	83,9	28,4	-55,5
Saint-Louis	96,7	65,5	31,2
Tambacounda	231,2	104,9	-126,3
Thiès	206,3	128,9	-77,4
Vélingara	275,8	193,7	-82,1
Ziguinchor	361	150,4	-210,6

Tableau 9 : Écarts entre pluies en 1990 et moyenne de la “normale” 1931-1960 (octobre)

Stations	oct 31-60	90 oct	écarts en mm
Bakel	38,4	10,4	-28
Bambey	57,5	23,8	-33,7
Dakar	49,3	29	-20,3
Diourbel	55	37,2	-17,8
Kaolack	63,8	67,3	3,5
Kédougou	129	25,4	-103,6
Kolda	115,6	87,6	-28
Linguère	45	54,3	9,3
Louga	40,8	35,2	-5,6
Matam	22,4	4,4	-18
Mbour	62	45,3	-16,7
Nioro	72,5	77,1	4,6
Podor	23,2	24,4	12
Saint-Louis	28,5	21,4	-7,1
Tambacounda	70	87,9	17,9
Thiès	57,1	25,3	-31,8
Vélingara	98,1	31,1	-67
Ziguinchor	146	78,6	-67,4

De ces tableaux, on peut retenir que les déficits pluviométriques concernent aussi bien la zone sahélienne que la zone soudanienne où elle est encore plus marquée.

En effet, les tableaux montrent que toutes les latitudes sont affectées par la baisse des pluies ; cela se reflète davantage pour le Nord, dans les cumuls annuels.

Les stations situées au Nord attirent beaucoup plus l'attention des observateurs par la baisse qui touche des valeurs infimes de pluies. Dans les stations méridionales, la baisse existe également même si les cumuls annuels masquent la réalité en permettant tout de même aux paysans d'avoir une récolte “décente”.

2. Modèles appliqués d'estimation des pluies

Comme nous l'avons expliqué dans la méthodologie, la méthode Latit a servi de référence. Ce choix est déterminé par le fait qu'elle donne un meilleur résultat par rapport à la méthode Tair ; des écarts importants caractérisent les résultats issus de l'application de ces deux méthodes.

2.1. Écarts Latit-Tair

Ces écarts sont en grande partie dus à l'incohérence de certains facteurs de base pris en compte dans les procédés de calcul, notamment les écarts entre t_{max} et t_{air} . L'océan fausse les valeurs car il y a une forte variation du signal due à l'absorption effectuée par la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère.

Avec un pas de temps plus long (mois, année), ces écarts disparaissent et on observe des résultats quasi identiques. Il s'opère probablement un lissage dans les modes de calcul des irrégularités induites par certains composants de l'atmosphère, ce qui n'est pas le cas à l'échelle décadaire

Dans la partie Sud-Est du pays, où la présence du relief engendre des pluies orographiques (valeurs plus importantes par rapport aux stations situées aux mêmes latitudes) en début d'hivernage, les pluies sont sous-estimées car la topographie n'est pas incluse dans les méthodes de calcul qui ne prennent en compte que la zonalité traduite par la latitude ou la température de l'air.

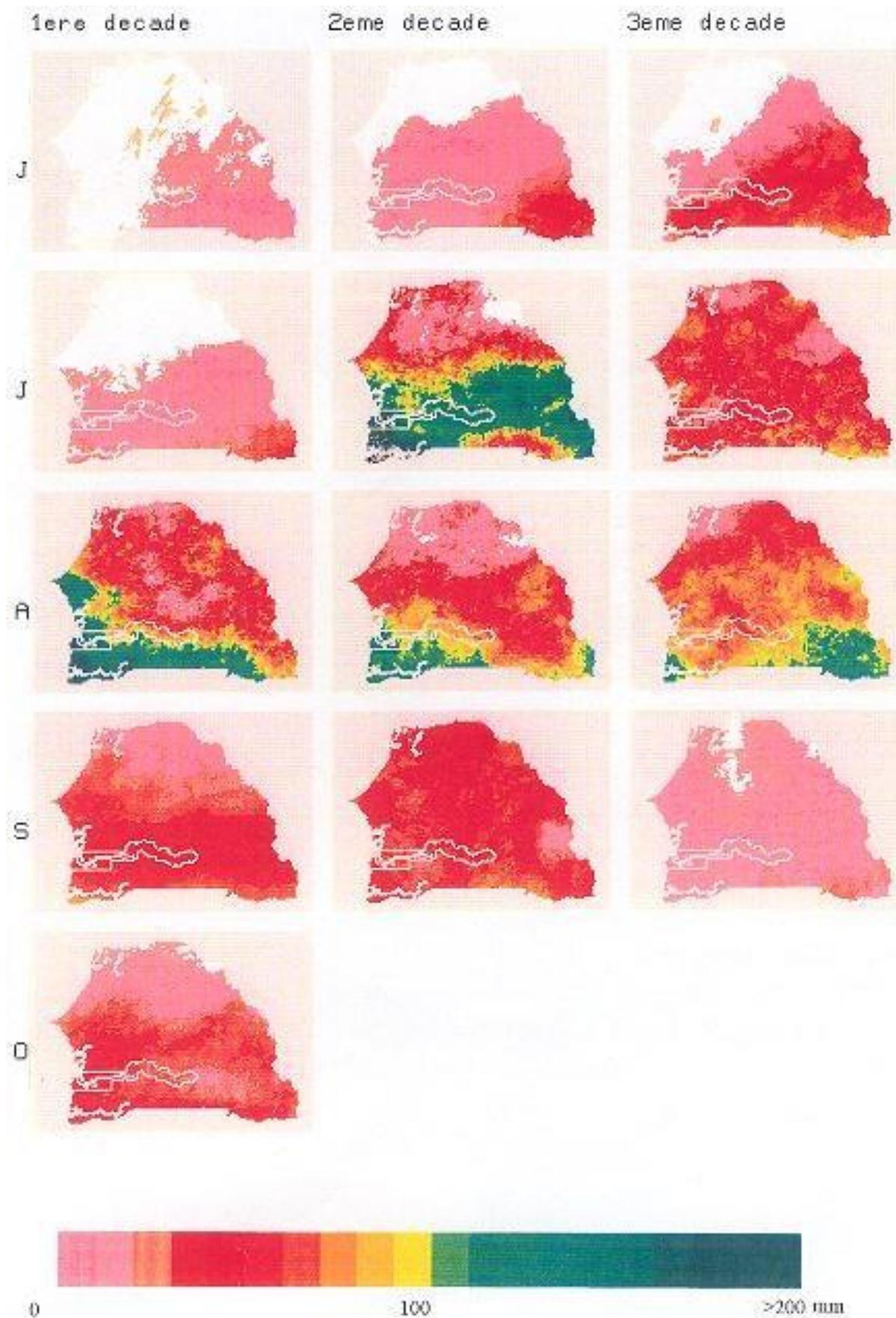
2.2. Écarts Latit-Latit + dmer

Nous avons dans deux graphiques (fig. 24 et 25) schématisé sur les “mires” la part d'inertie expliquée par les deux méthodes d'estimation des pluies. Sur

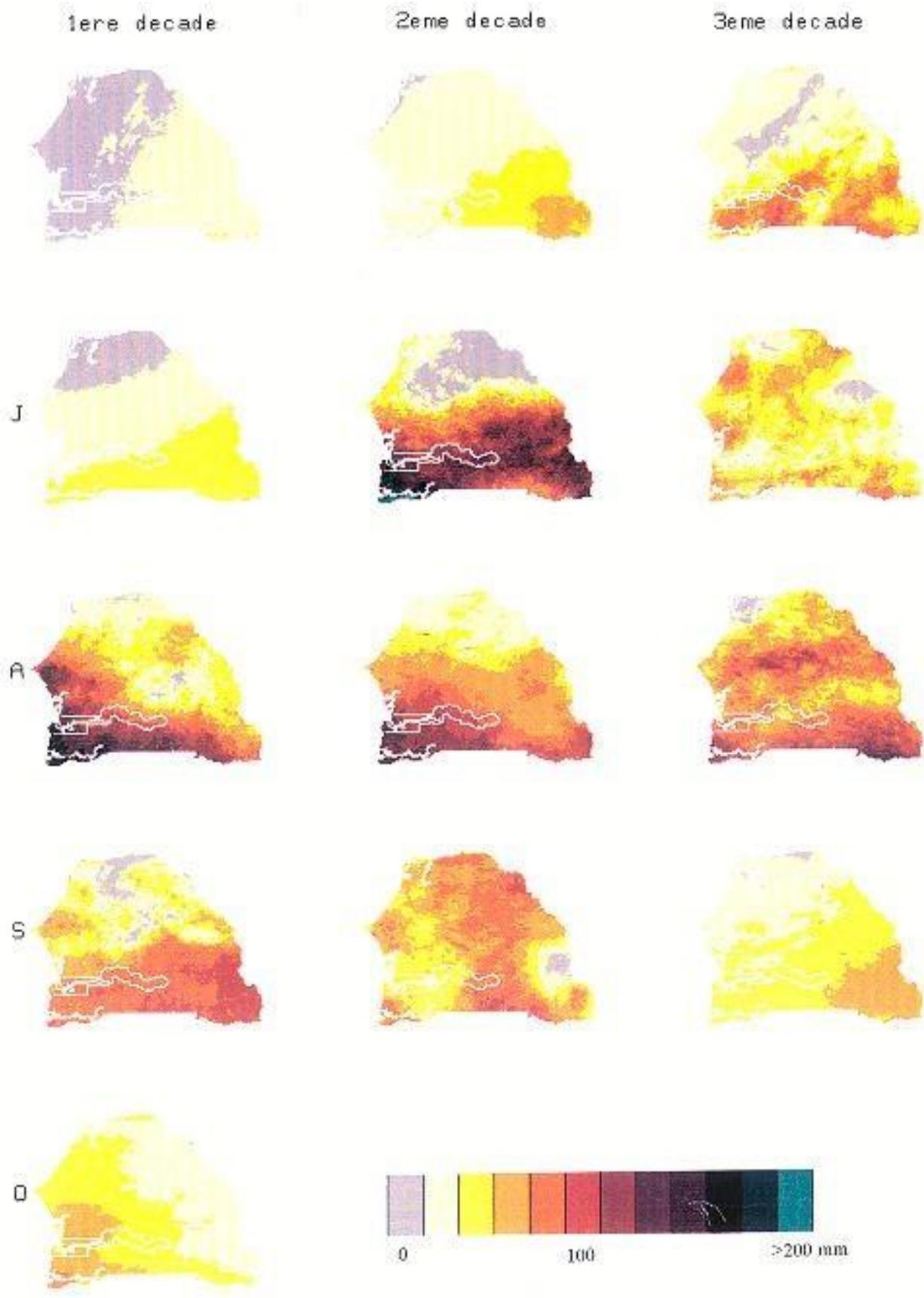
l'ensemble des 13 décades représentées, les isohyètes reproduisent un tracé plus ou moins identique avec cependant quelques nuances.

La disposition méridienne des isolignes, mise en évidence par la plupart des paramètres étudiés, est plus marquée sur les cartes réalisées à partir du modèle Latit + dmer. Cela confirme l'efficacité de cette méthode très représentative de la réalité. Par conséquent, elle devrait être testée sur plusieurs hivernages en vue de validation.

En comparant les cartes réalisées à partir de ces deux méthodes, on remarque également que la méthode Latit tend à sous-estimer les valeurs de précipitation en période pluvieuse et à les surestimer en début d'hivernage.



**Fig. 24 : Précipitations estimées en mm à partir du modèle Latit
Antenne ORSTOM de Lannion/Logiciel TRISKEL, 1994**



**Fig. 25 : Précipitations estimées en mm à partir du modèle Latit + dmer
Laboratoire Géosystèmes/CNRS/UBO, Brest, logiciel Arc/Info, 1994**

La figure 26 et le tableau 10, qui comparent l'évolution du cumul décadaire des pluies mesurées et estimées sur l'ensemble du Sénégal, montrent la validité de ce nouveau modèle. La courbe des pluies estimées par cette méthode Latit + dmer est presque confondue avec celle des précipitations mesurées.

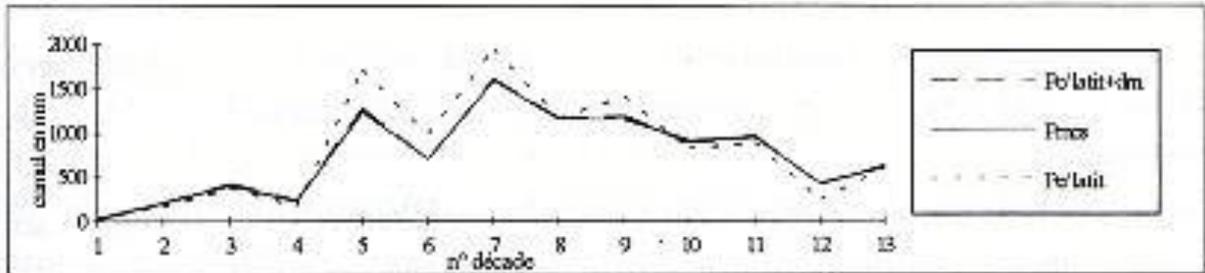


Fig. 26 : Pluies estimées-Pluies mesurées : cumul décadaire des 19 stations

Tableau 10 : Écarts Pluies mesurées-Pluies estimées/Latit + dmer/(mm) décennie sur l'ensemble des stations

	Juin 1	Juin 2	Juin 3	Juillet 1	Juillet 2	Juillet 3	Août 1	Août 2	Août 3	Sept. 1	Sept. 2	Sept. 3	Oct. 1
Cumul/Pm/dec	32	215	410	228	1241	706	1592	1152	1155	908	946	431	605
Cumul/Pe/latit + dm	24	211	432	236	1286	706	1613	1169	1189	883	967	416	632
Ecarts/Pm-Pe	8	4	-22	-8	-45	0	-21	-17	-34	25	-21	15	-27

En revanche, la figure 27 et le tableau 11 montrent les limites du modèle quant à sa validation de manière individuelle au niveau des stations. Toutefois, on s'aperçoit que la courbe issue de l'application de la méthode Latit + dmer améliore nettement la méthode Latit.

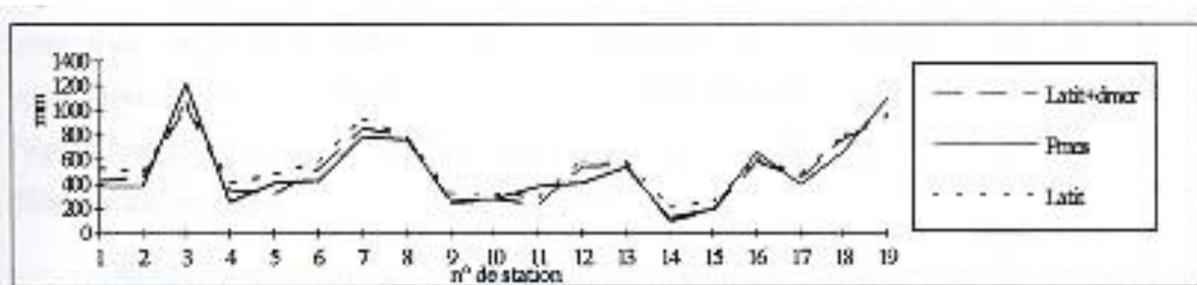


Fig. 27 : Pluies estimées-Pluies mesurées : cumul annuel par stations

Tableau 11 : Écarts du cumul annuel Pluies mesurées-Pluies estimées/Latit + dmer (en mm)

Stations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Pmes	318	383	1218	258	407	430	784	760	273	280	380	408	532	124	190	657	399	666	1094
Pe/latit + dmer	427	464	1028	357	335	531	851	792	243	279	269	540	563	130	209	578	448	770	944
Ecarts	-49	-81	190	-99	72	-101	-67	-32	30	1	111	-132	-31	-6	-19	79	-49	-104	150

Conclusion partielle

Les résultats issus des estimations ont l'avantage de couvrir les zones dépourvues de stations pluviométriques et permettent donc une spatialisation meilleure de l'information.

La méthode Latit + dmer, ayant donné de bons résultats en 1990, doit faire ses preuves sur plusieurs hivernages pour être adoptée ultérieurement. Les saisons des pluies sont diverses dans leurs manifestations et leur durée, le contexte dans lequel elles se produisent étant lui-même “mouvant”. De ce fait, toute méthode d'estimation devrait subir un test de validation sur plusieurs hivernages.

Cette attente de validation complique encore davantage les travaux des chercheurs dans la mesure où une méthode peut être efficace sur une année donnée et inapplicable sur d'autres. Cela suppose encore bien des travaux de recherche, y compris avec d'autres types de modèles. Cela retarde également le travail des agroclimatologues et agronomes, situés en aval de la chaîne, qui ont, par conséquent, besoin des résultats d'estimation des pluies pour les expérimentations en laboratoire. Tout cela amène à se poser la question de savoir quel serait le regard du “petit paysan” par rapport à ces investissements humains et financiers souvent élaborés en laboratoire, donc en dehors de son optique d'analyse et dont les résultats tardent ou ne le satisfont guère !

CONCLUSION DE LA QUATRIEME PARTIE

La comparaison entre la saison des pluies 1990 et la "normale" 1931-1960 a confirmé la siccité caractéristique de cet hivernage. Cela rend bien sûr nécessaire la multiplication des périodes tests en particulier sur toutes les années déficitaires, dans la mesure où, pendant les années excédentaires, surtout en cas de bonne répartition des pluies, le paysan est beaucoup moins gêné et se préoccupe peu de la pluviogenèse.

Également, sachant que les méthodes d'estimation des pluies ont tendance à intégrer plusieurs paramètres aérologiques et satellitaires et que ces éléments physico-géographiques mesurés changent en fonction de plusieurs facteurs climatiques, tester ces méthodes pour une année à pluviométrie déficitaire a plus de sens.

Les différences entre côte/intérieur, relief/plaines, sont apparues à travers l'évolution spatio-temporelle de tous les paramètres étudiés. L'étude comparée de quatre stations météorologiques représentant bien cette double opposition climatique a également confirmé l'existence de ces transitions caractéristiques du Sénégal. Elles ne sont que le reflet de la position géographique du pays, entre océan et continent et aussi entre un climat soudano-sahélien et un climat typiquement sahélien. De ce fait, le climat est caractérisé par les échanges entre ces deux milieux, via l'atmosphère.

Les basses couches sont situées à l'interface du système géosphère/atmosphère. De ce fait, les interactions y sont très fortes et l'influence des milieux océaniques et terrestres agit directement sur les phénomènes convectifs. Du fait de cette interdépendance, la déstabilisation d'un seul maillon entraîne une rupture dans l'équilibre général qui, à son tour, a des conséquences plus ou moins directes sur chaque élément du système.

Notre approche a, par conséquent, tenu compte, à la fois, des facteurs géographiques et aérologiques, ce qui a permis, dans un premier temps, de recréer l'environnement atmosphérique dans lequel évoluent les nuages pluviogènes, mais également, d'évaluer les influences diverses intervenant sur les mécanismes des précipitations.

CONCLUSION GÉNÉRALE

On note le grand intérêt de la zone sahélienne pour la communauté scientifique au sein de programmes pluridisciplinaires (climatologie, hydrologie, etc.). Cela s'explique, d'une part, par la rigueur et la persistance de la sécheresse qui dégrade les écosystèmes actuels (déficits pluviométriques, épuisement des nappes souterraines, systèmes édaphiques et végétation affectés) et, d'autre part, par la population en accroissement rapide qui, dans ces pays, est souvent soumise aux "caprices" du temps.

Divers travaux expliquent cette sécheresse comme étant une conjonction de plusieurs phénomènes : origine climatique et anthropique, milieu fragilisé et donc autoentretien.

Dans le but de rechercher les causes dynamiques de la déstabilisation des mécanismes régissant les pluies dans la zone sahélienne, la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, notamment par des climatologues ou des physiciens de l'atmosphère. Analyser cette composante de la circulation atmosphérique générale permet de mieux appréhender les relations et échanges Terre-Océan-Atmosphère dans cette zone et de situer l'origine naturelle de l'aléa climatique.

Dans cette étude visant à améliorer les méthodes d'estimation des pluies au Sénégal, l'analyse du substrat en même temps que des facteurs aérologiques s'est avérée nécessaire dans la mesure où cela permet de recréer l'environnement d'évolution des nuages pluviogènes.

Les analyses ont confirmé le schéma climatique caractéristique du Sénégal, c'est-à-dire la double opposition régions septentrionales/régions méridionales, côte/intérieur. Le pouvoir absorbant de l'atmosphère, qui dépend de son déficit hygrométrique et qui, par conséquent, conditionne la convection, reste nul dans l'intérieur du pays alors que la présence d'une atmosphère saturée en permanence caractérise le littoral. La partie Nord de la côte n'en est pas pour autant pluvieuse du fait de la forte poussée des flux venant de l'Atlantique Nord retardant ou repoussant de manière précoce les flux de mousson.

La différence climatique entre les régions Nord et les régions Sud se manifeste, quant à elle, non seulement, au niveau des écarts pluviométriques enregistrés, mais également au niveau de la végétation. Au Nord, la siccité de l'air et les fortes températures exposent les espèces à utiliser leur énergie pour lutter contre les rudes conditions alors qu'au Sud, le surplus d'énergie est rejeté vers l'atmosphère, d'où les "fausses" valeurs de températures radiatives en milieu de saison des pluies.

Notre optique était, dans un premier temps, de présenter, d'analyser et de définir tous les aspects de l'hivernage 1990 au travers d'un suivi spatio-temporel des différents facteurs climatiques. Ensuite, en vue de placer cette saison 1990 dans un contexte pluviométrique plus global, nous l'avons comparé avec la période dite "normale" : 1931-1960.

De cette analyse, on constate que le déficit pluviométrique, souvent attribué aux seules régions Nord, touche également, et de manière très significative les régions méridionales où les cumuls annuels masquent partiellement les déficits.

Notons toutefois, que la carence pluviométrique est plus alarmante dans les régions sahéliennes. Toujours est-il qu'il est important de tenir compte des régions situées aux latitudes plus méridionales dans les études et stratégies de lutte contre la sécheresse afin d'éviter une extension plus dramatique du phénomène par une détérioration du milieu naturel au travers d'actions anthropiques néfastes. Cela pourrait se faire par des campagnes d'information. Par exemple, rappeler aux populations démunies et qui ont généralement recours à l'exploitation des ressources végétales pour survivre en cas d'hivernage déficitaire, que les végétaux tout comme les humains contribuent au maintien de l'équilibre "naturel". Cette stratégie pourrait certainement constituer un moyen efficace pour une prise de conscience, dans la mesure où chacun se sentirait concerné.

Comme souligné auparavant, la distribution dans le temps des précipitations selon un calendrier respectant les périodes de semis, de maturité, de floraison des cultures a plus d'importance que la quantité d'eau précipitée. Nous avons, par conséquent, essayé d'adopter pour le Sénégal, une nouvelle méthode d'estimation des pluies qui, en intégrant la distance des stations météorologiques par rapport à l'Atlantique améliore nettement celle adoptée, depuis quelques années, dans beaucoup de pays sahéliens. Cependant, une seule année ne suffit pas pour juger de l'efficacité d'une approche. Une validation sur de nombreuses saisons différentes est d'autant plus nécessaire que, la plupart des paramètres intégrés dans les calculs, ne coïncident peut-être pas d'une année à l'autre. Une autre validation consisterait, également, à tester cette méthode sur d'autres pays sahéliens en bordure océanique.

Toutefois, pour le Sénégal, on peut dire que certaines plantes cultivées ne sont pas adaptées à cette succession d'années sèches et humides. D'autres le sont encore moins dans la mesure où elles détruisent le substrat pédologique (cas de l'acidification des sols par l'arachide). Par conséquent, les méthodes d'estimation des pluies développées

depuis plusieurs années devraient tenter de répondre aux besoins des recherches visant à trouver des cultures plus adaptées à la variabilité des saisons.

Le climat étant déterminant pour l'homme, les impacts de la sécheresse sur le mode de vie des sahéliens a mérité un rappel. Ce phénomène est à l'origine de mouvements de populations vers des pays étrangers mais également à l'intérieur des pays concernés (exode rural) entraînant à leur tour d'énormes problèmes encore plus difficiles à gérer : macrocéphalies des capitales, urbanisation anarchique, villes champignons, etc.

Cet aspect humain de la question vient compléter cette étude qui se veut avant tout géographique et, par conséquent, tente de relier l'approche physique au volet concernant la vie des populations locales.

Résoudre ces problèmes humains implique, cependant, une recherche de solutions particulière pour chaque région. Certaines ressources naturelles (énergie éolienne, solaire, hydroélectricité, tourisme, pêche) restent sous ou mal exploitées et donc méritent un regard particulier. On peut également se permettre d'espérer que les totaux pluviométriques enregistrés pendant l'hivernage 1994 annoncent l'amorce d'un retour de la pluviométrie comme l'avaient prédits Faure et Gac en 1981.

Il est également nécessaire de souligner les limites de cette étude. Nous n'avons pu intégrer comme prévu le substrat dans les approches établies afin de mesurer ses rapports plus ou moins directs avec la pluviométrie. Cette lacune est, tout simplement liée à l'utilisation de la très petite échelle du 1/1000.000^{ème}. Toutefois, grâce à ce support topographique, nous avons pu montrer que le relief du Sénégal peut expliquer, par sa monotonie, les influences océaniques, même en période de mousson.

ANNEXES

TENSION DE LA VAPEUR D'EAU ET HUMIDITÉ RELATIVE

Station :

Mois :

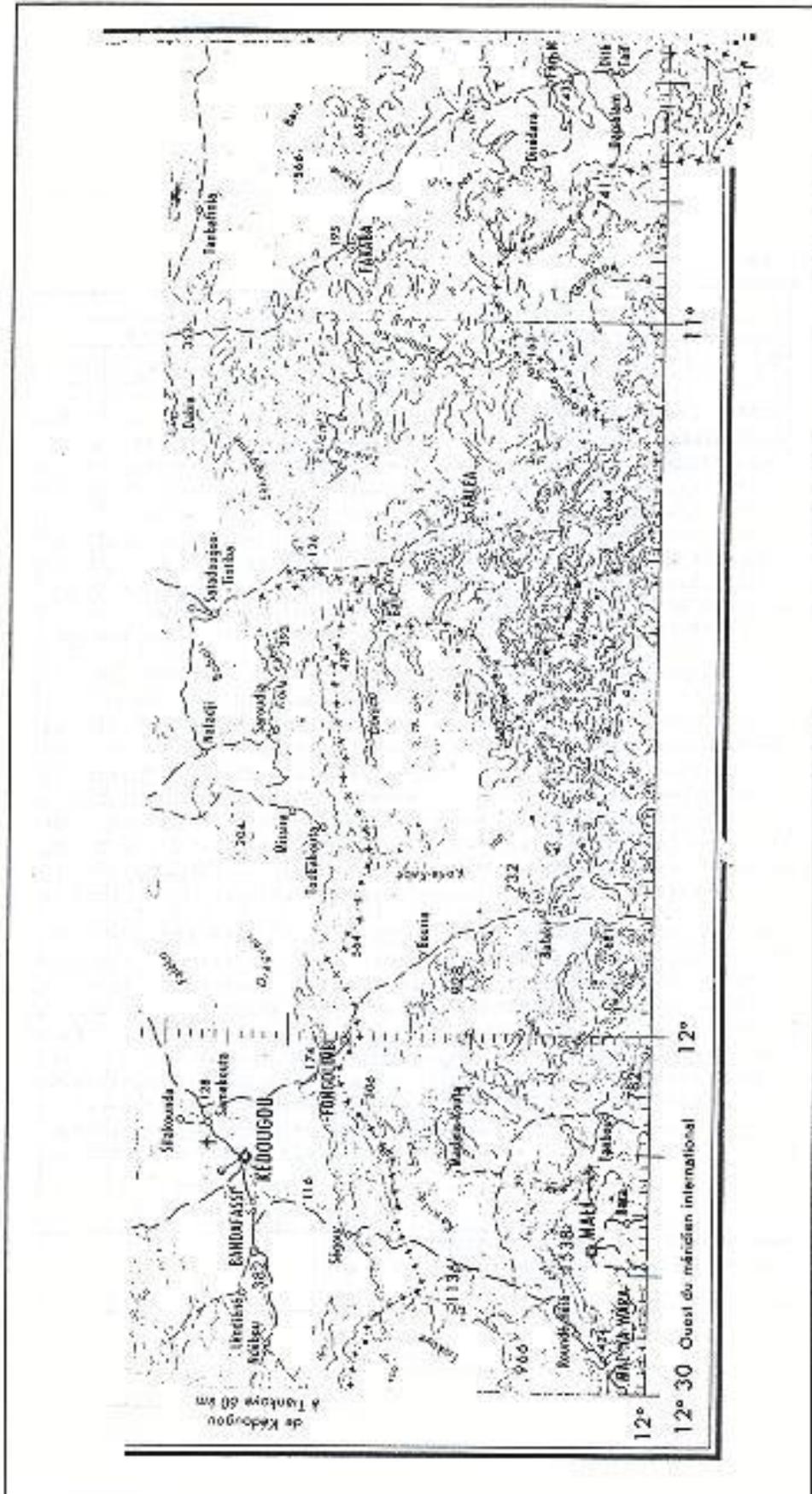
DATES	TENSION DE LA VAPEUR D'EAU en millibars et décimas											HUMIDITÉ RELATIVE en %				PRESSION ATMOSPHÉRIQUE en mm de la mer en millibars et en décimas					
	0	3	6	9	12	15	18	21	Total	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	4	8	12	16	Total	Max.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
3	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
4	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
5	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
6	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
7	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
8	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
9	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
10	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
11	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
12	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
13	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
14	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
15	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
16	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
17	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
18	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
19	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
20	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
21	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
22	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
23	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
24	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
25	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
26	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
27	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
28	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
29	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
30	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
31	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	
TOTAL	630.5	621.5	616.5	611.5	606.5	601.5	596.5	591.5	586.5	581.5	576.5	571.5	566.5	561.5	556.5	551.5	546.5	541.5	536.5	531.5	
MOYENNE	20.34	20.05	19.88	19.73	19.55	19.38	19.21	19.04	18.87	18.70	18.53	18.36	18.19	18.02	17.85	17.68	17.51	17.34	17.17	17.00	

PRÉCIPITATIONS

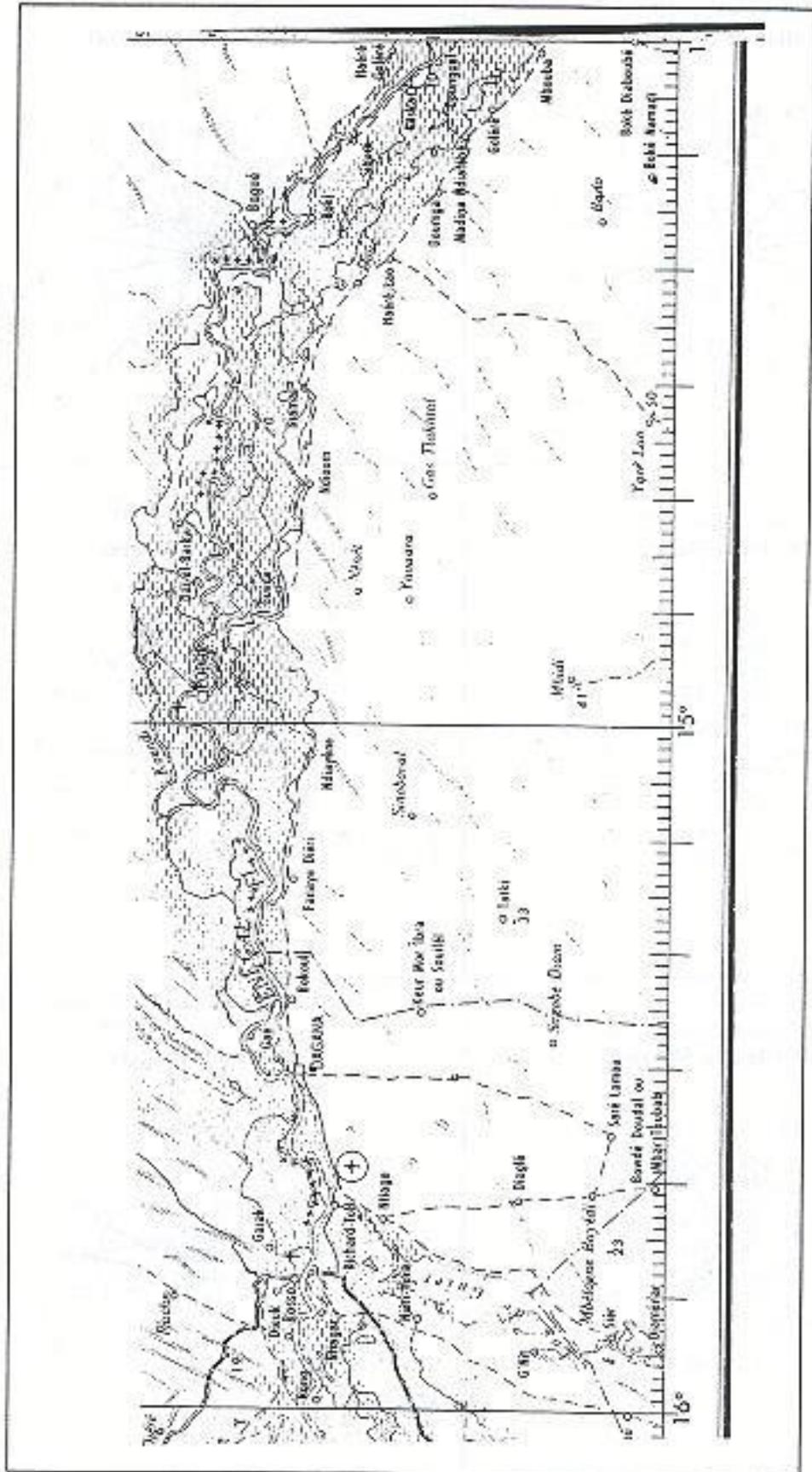
Station : DAKAR 16FF Mois : MAI 1985

DATES	PRÉCIPITATIONS					ÉVAPORATION			DATES	TROUBLES DE LA VÉGÉTATION : bruyants, brume, etc. (nature et importance, jours et durée de la nuit) (nature, hauteur, durée, etc.)
	QUANTITÉ en mm (ou en l/ha)		HAUTEUR en mètres (ou en l/ha)			MOYENNE en mm (ou en l/ha)	S-E			
	de 0h à 12h	de 12h à 24h	de 0h à 12h	de 12h à 24h	de 0h à 24h		de 0h à 12h	de 12h à 24h		
1						2.0				
2						5.4				
3						1.0				
4						1.1				
5						2.1				
6						2.3				
7						2.4				
8						5.8				
9						2.1				
10						2.8				
11						2.1				
12						1.8				
13						2.1				
14						2.0				
15						2.5				
16						2.2				
17						1.9				
18						2.0			DATES	ORAGES ou CANONS (nature de l'orage et de la pluie, hauteur, durée, etc.)
19						1.1				
20						2.1				
21						2.0				
22						3.4				
23						1.1				
24						1.1				
25						1.1				
26						1.1				
27						1.1				
28						1.1				
29						1.1				
30						1.1				
31						1.5				
TOTAL						244				
Remarques	Valeurs en mm par heure									
	Date									
	Date									

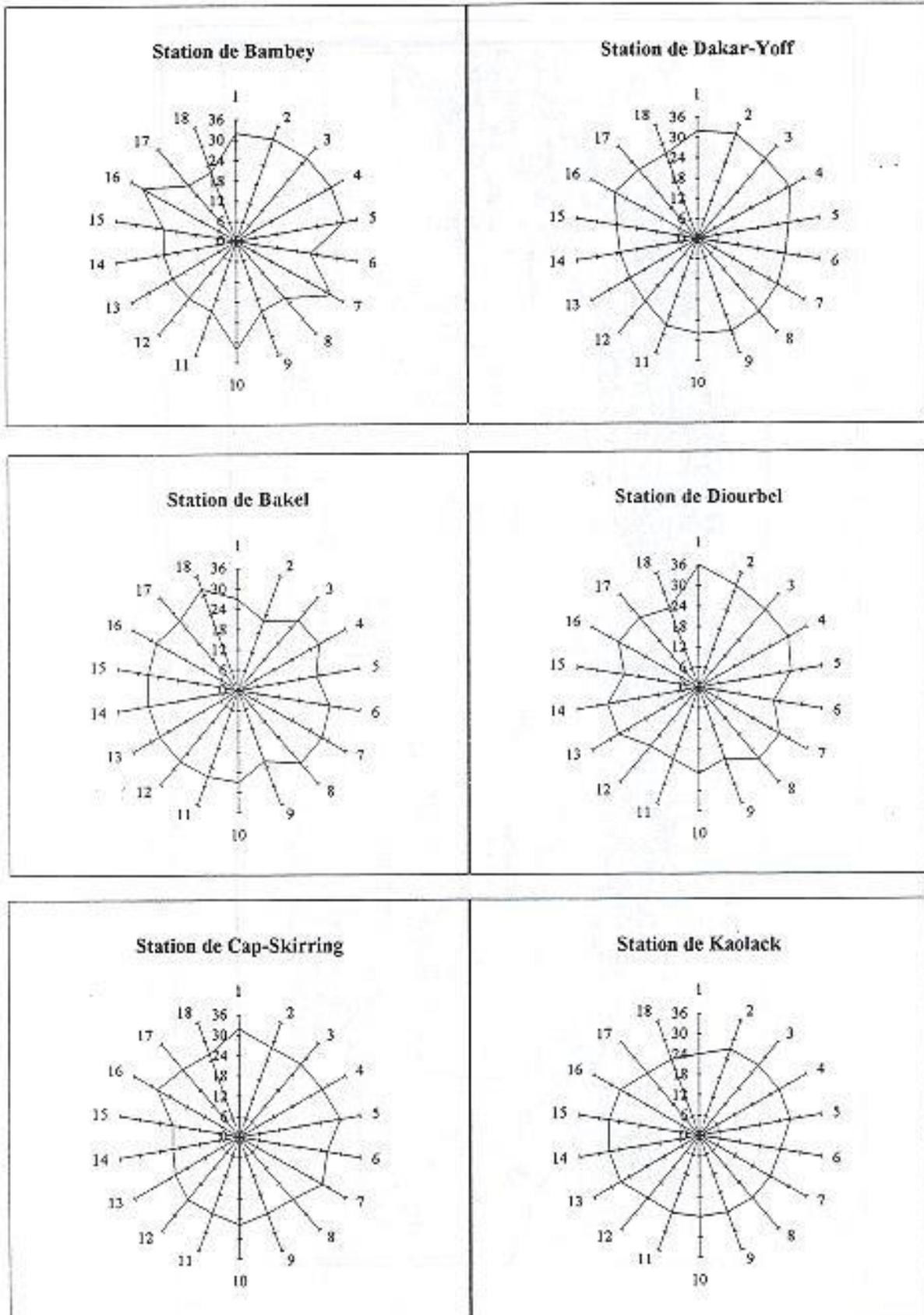
MORCEAU DE LA CARTE TOPOGRAPHIQUE DU SUD-EST
 (Carte IGN, 1964 ; + = frontière avec le Mali et la Guinée)



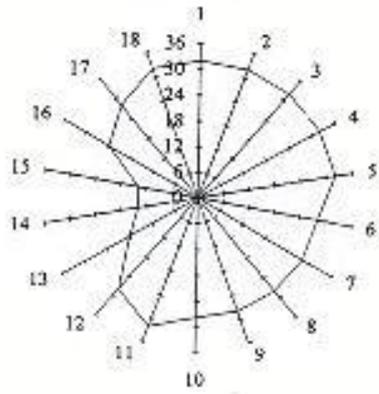
MORCEAU DE LA CARTE TOPOGRAPHIQUE DU NORD
(Carte IGN, 1964 ; + = frontière avec la Mauritanie)



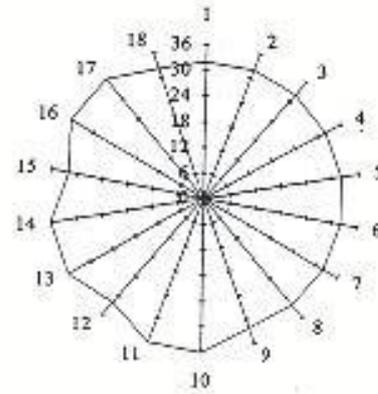
Annexe 2 : Direction du vent/décade/station



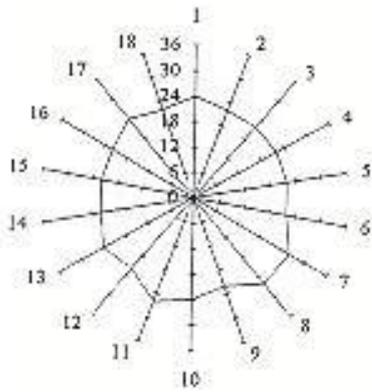
Station de Kédougou



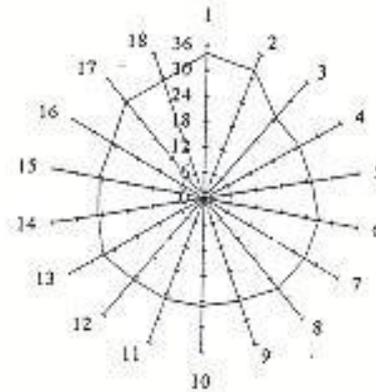
Station de Louga



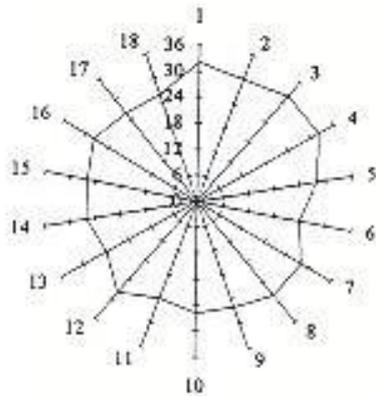
Station de Kolda



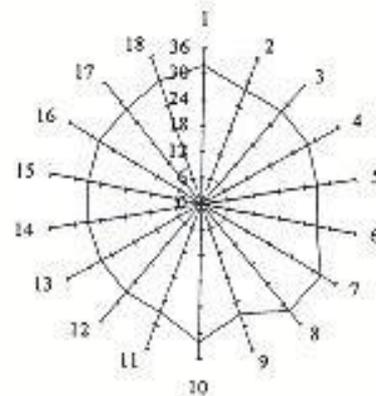
Station de Matam

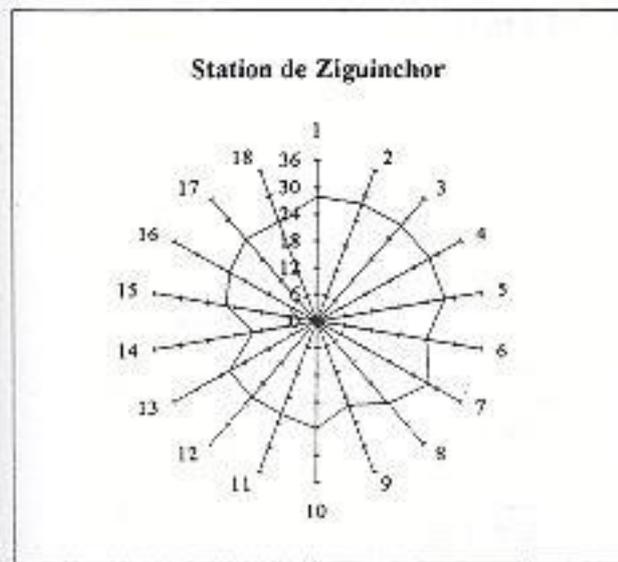


Station de Linguère

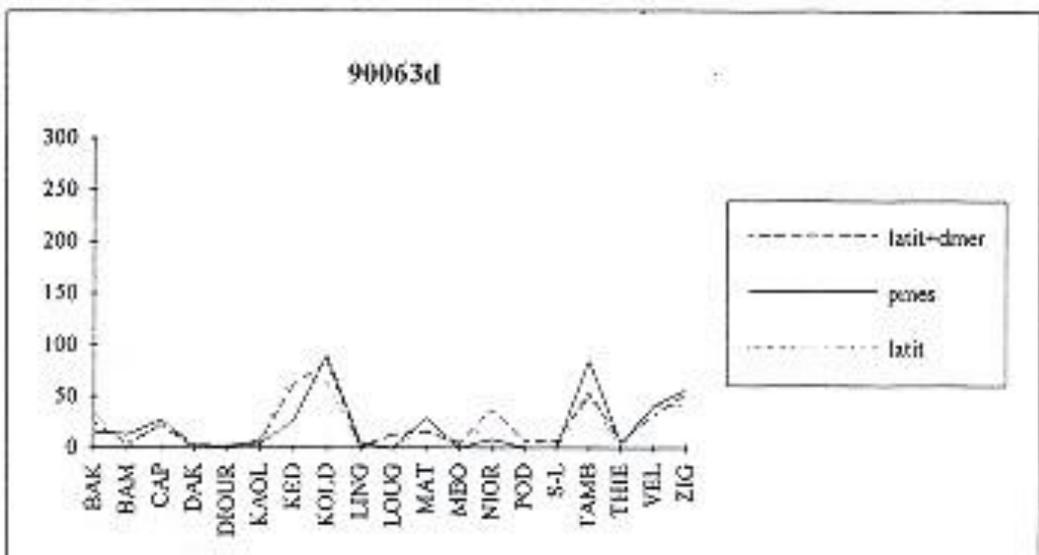
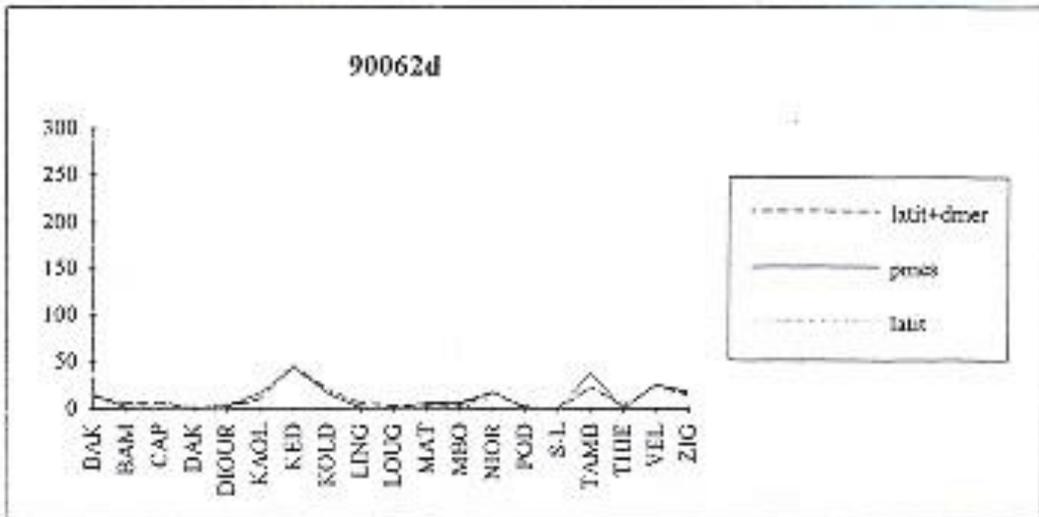
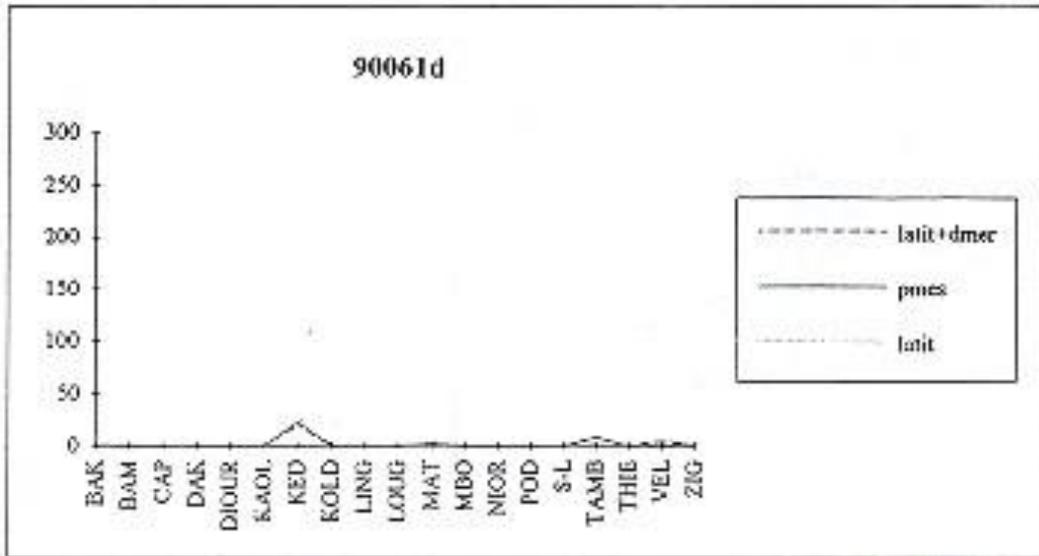


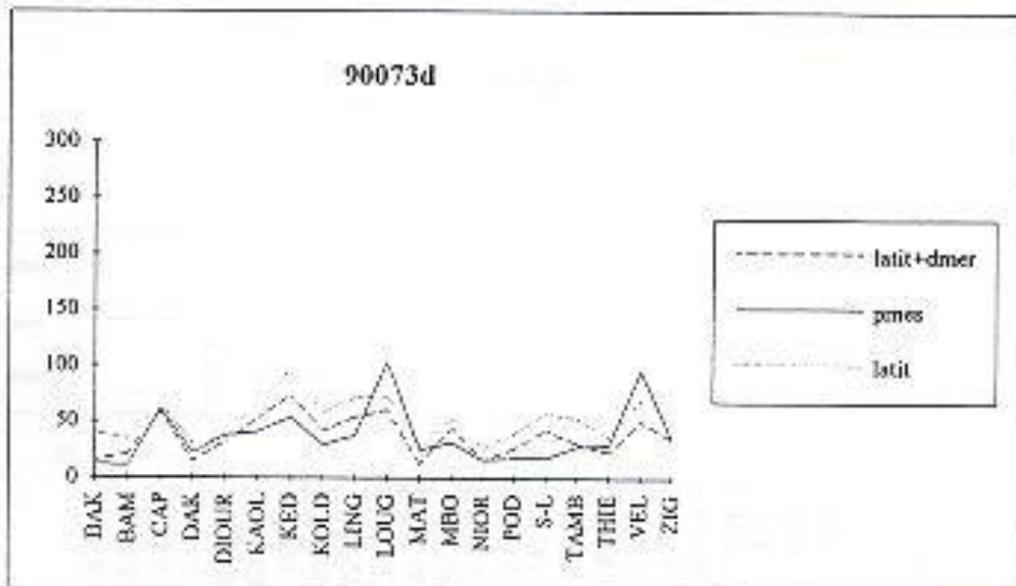
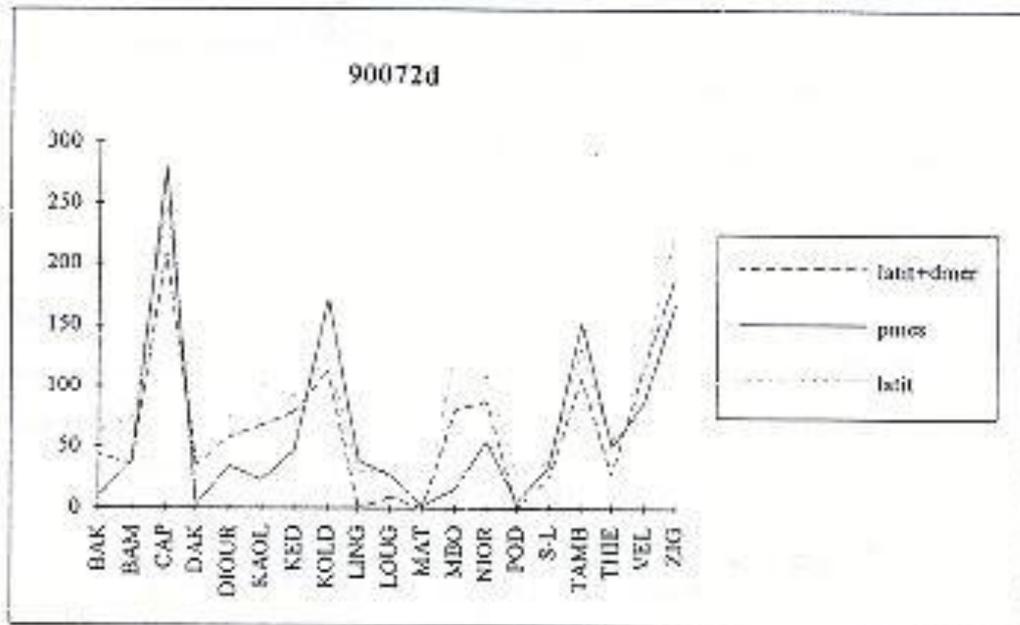
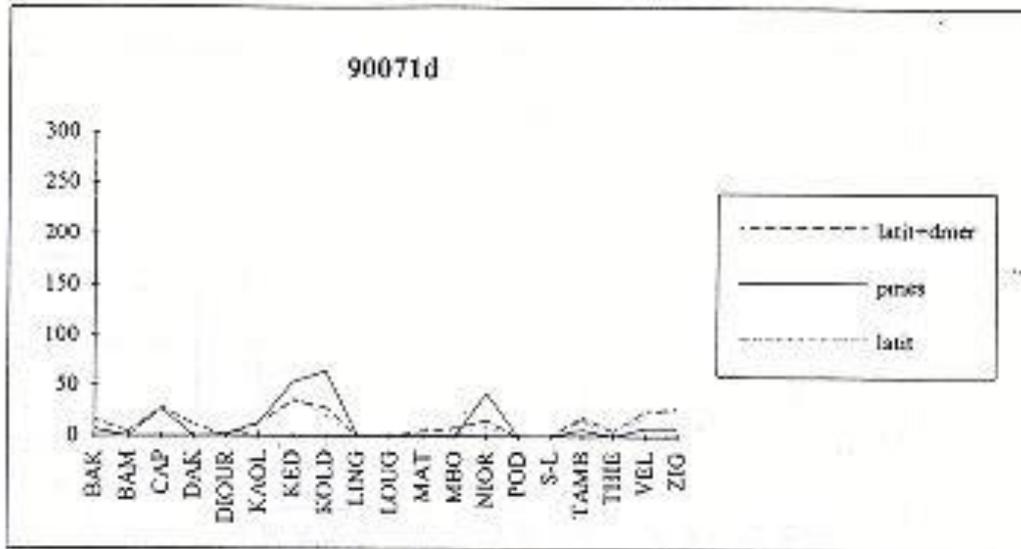
Station de Mbour

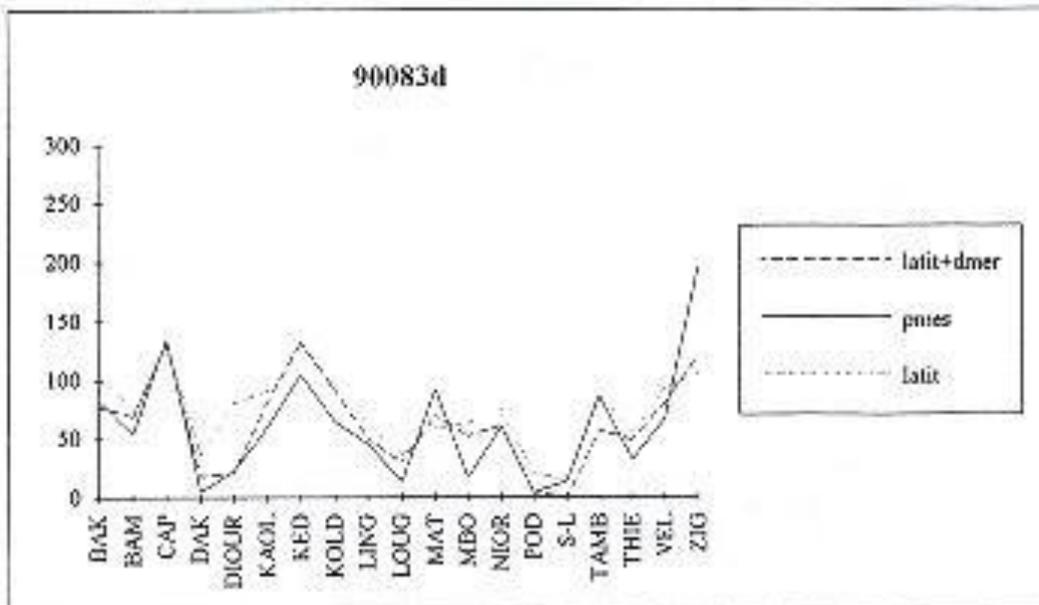
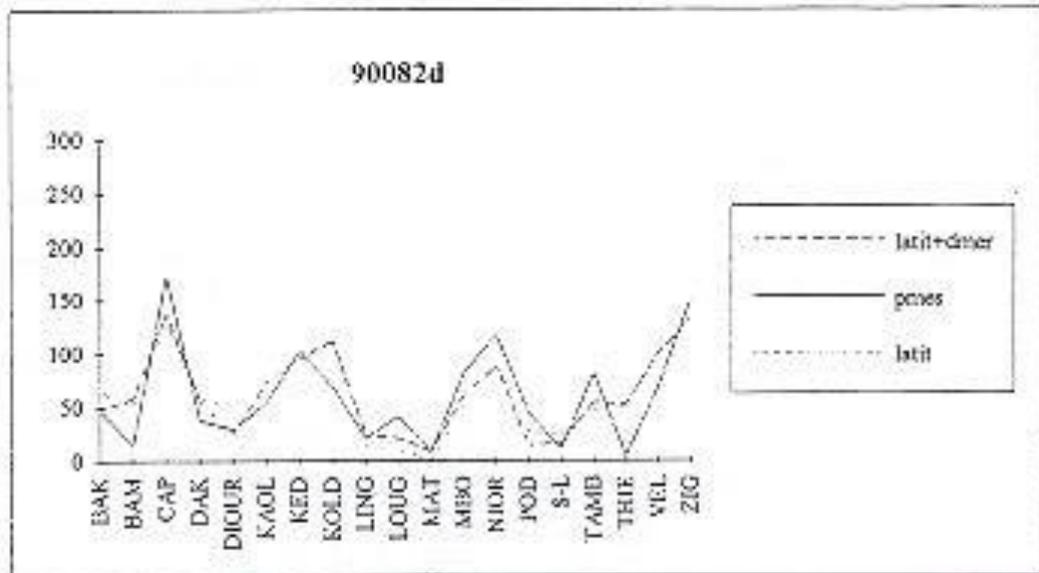
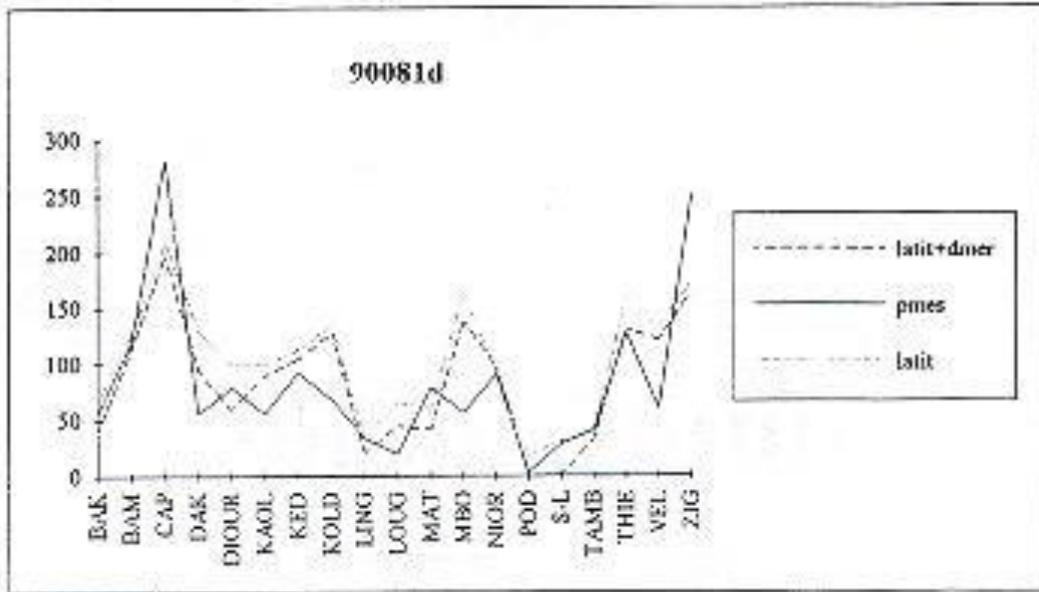


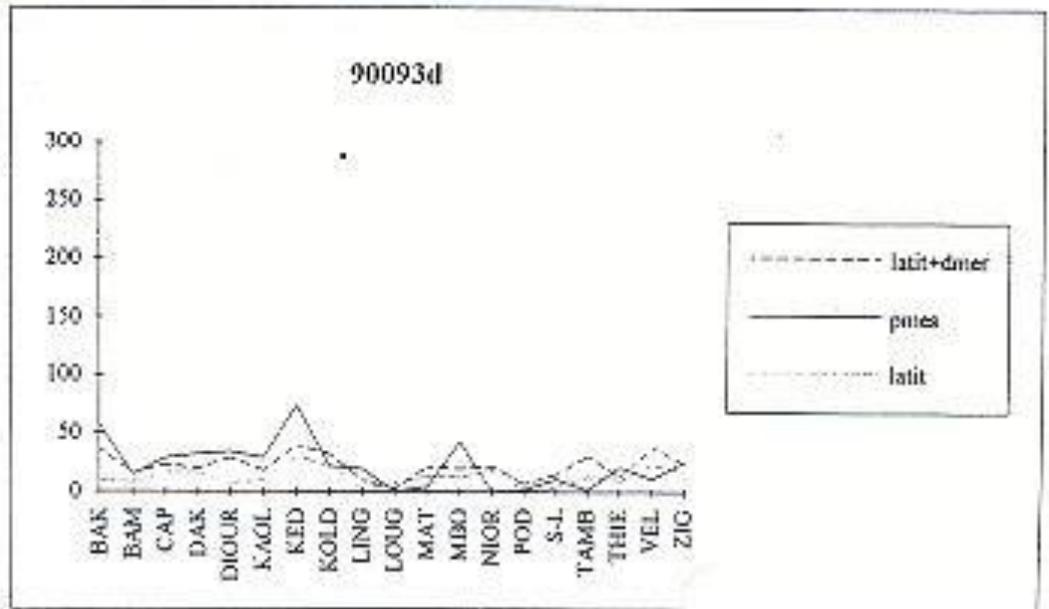
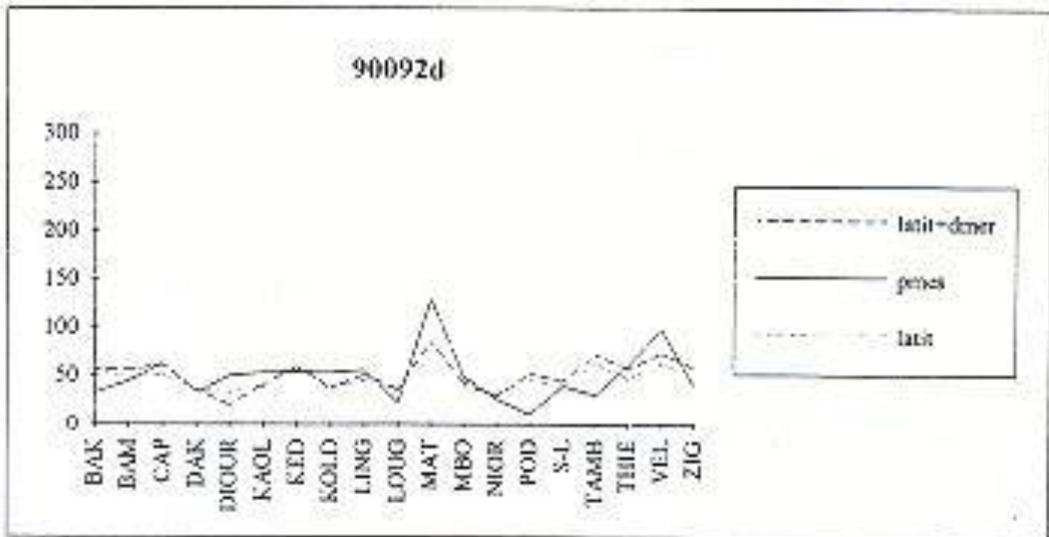
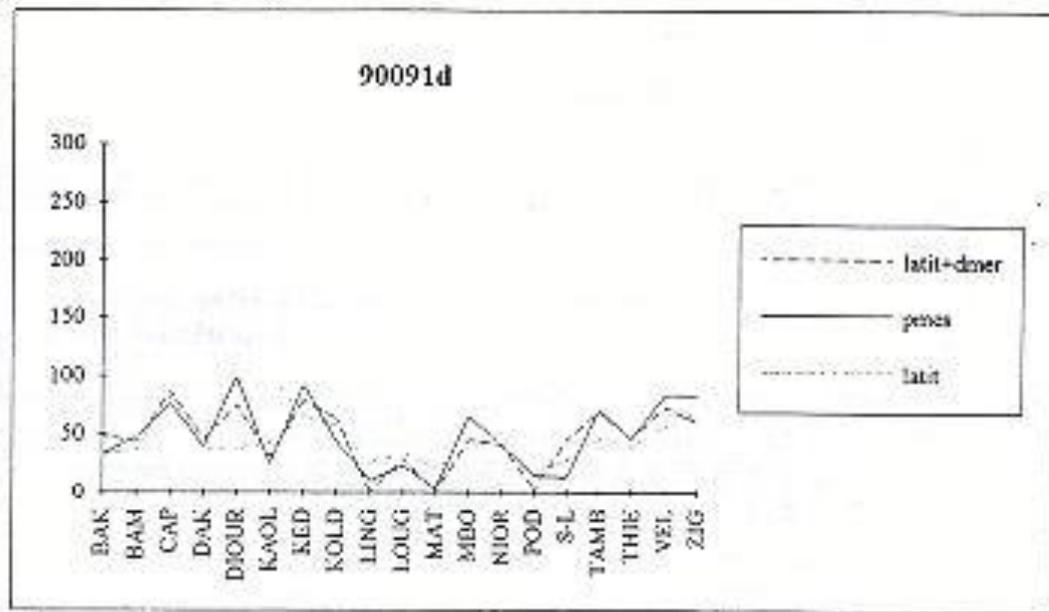


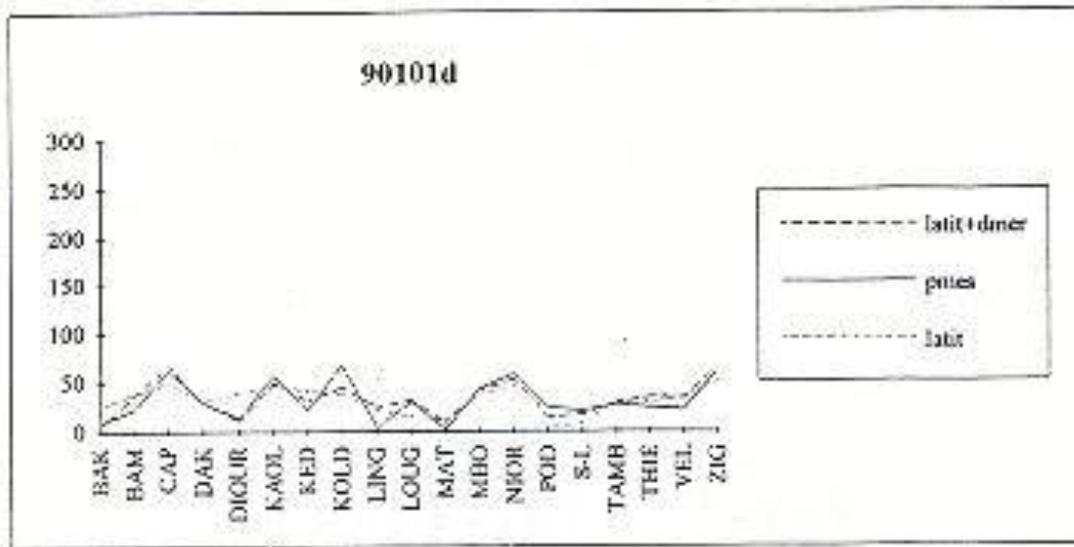
Annexe 3 : Écarts pluies mesurées-pluies estimées par les méthodes Latit et Latit + dmer par station (13 décades test)











Annexe 4 : MNT : formule et carte

FORMULE DE CALCUL D'UN MNT (Cuq et al. 1990)

L'analyse du MNT de la topographie et le calcul de variables géomorphométriques

L'analyse du MNT est fondée sur une hypothèse de modélisation du terrain à l'aide d'un développement polynomial de Taylor à l'ordre 3 (Dupéret, 1989). À partir de ce modèle, on calcule les dérivées premières et secondes par rapport à x et y :

$$a = H'x, b = H'y, c = H'xx, d = H'xy, e = H'yy.$$

À partir de ces cinq coefficients, on peut calculer les variables morphométriques suivantes :

- la pente :

$$\rho = \text{arc ctg} \sqrt{a^2 + b^2}$$

- l'orientation :

$$\theta = \text{arc cos} \frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{si } b < 0$$

$$\theta = -\text{arc cos} \frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{si } b > 0$$

- la courbure horizontale des lignes de niveau :

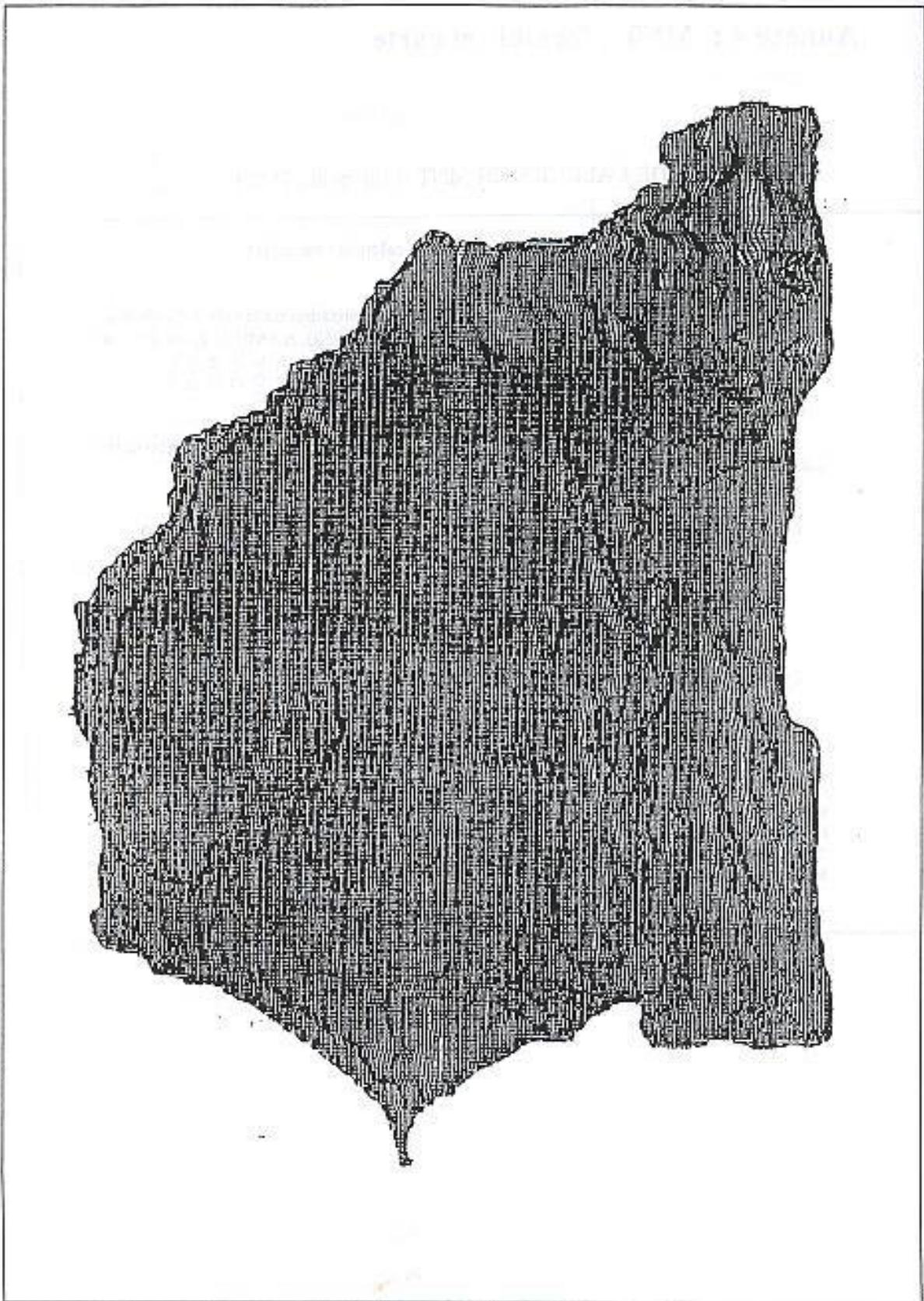
$$T_n = \frac{2abd - cb^2 - ea^2}{(a^2 + b^2)^{3/2}}$$

Ces variables sont utilisées pour décrire la déformation topographique de la surface.

Une méthode d'amincissement en trois dimensions appliquée sur le MNT après suppression des cuvettes parasites permet d'extraire le réseau des interfluves et le réseau des thalwegs. Cette méthode est fondée sur l'emploi d'une séquence de squelettisation et d'ébarbulage réitérée jusqu'à idempotence. À partir du réseau d'interfluves, on peut segmenter le MNT en « méso bassins versants » et installer dans ces bassins le réseau d'écoulement.

MNT (MALLAGE : 5 KM)

(Cartes IGN ; 1/1.000.000^{ème} : 1964 ; Feuilles : Bamako, Saint-Louis et Dakar)



LISTE DES SIGLES ET SYMBOLES

AGHRIMET : AGHronomie-HYdrologie-METéorologie

ASECNA : Agence pour la SECurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar

AVHRR : Advanced Very Hight Resolution Radiometer

CAMS : Centre d'Analyse de Mathématiques Sociales

CILSS : Comité Inter-États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

CMS : Centre de Météorologie spatiale

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CSE : Centre de Suivie Écologique de Dakar

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

EPSAT : Estimation des Précipitations par SATellite

ESA : European Spatial Agency

ESRI : Environmental Systems Research Institute

HRPT : High Resolution Picture Transmission

IGN : Institut Géographique National

LISH : Laboratoire Informatique des Sciences de l'Homme

LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NOAA : National Oceanographic and Atmospheric Administration

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer

TIC : Table Identily Coordinate

UNESCO : United Nations for Education Science and Culture Organisation

UTIS : Unité de Traitement d'Images Satellitaires

BIBLIOGRAPHIE

1. ACHARD F., 1990, Rythme saisonnier de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 1-14.
2. ALBERGEL J., BADER J.C., LAMAGAT J.P., SEGUIS L., 1993, Crues et sécheresses sur un grand fleuve tropical de l'Ouest africain, application à la gestion de la crue du fleuve Sénégal, Sécheresse, vol 4, n°3, pp. 14-23.
3. AMOUS S., 1993, Les émissions anthropiques à effet de serre, cas du Sénégal et de la Côte d'Ivoire, Sécheresse, n°4, pp. 245-255.
4. ASSAD E., 1987, Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures. Cas du Sénégal, Thèse, Montpellier, 260 p.
5. BARRET E.C., 1981, Climatology from satellites, Methuen & Co LTD, London, 418 p.
6. BARTOLOME E., 1990, Suivi par télédétection des productions céréalières pluviales en pays sahéliens, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 15-28.
7. BENCHETRIT M., CABOT J., DURAND-DASTES F., 1971, Géographie zonale des régions chaudes. Nathan, 270 p.
8. BEN MEHREZ M., 1992, Végétation et espace, Géoobservateur, n°2, pp. 7-21.
9. BERROIR A., 1976, La météorologie, QSJ, PUF, 127 p.
10. B.N.U.D. 1991, Inventaire des dispositifs d'observation, Observatoire du Sahara et du Sahel, 246 p.
11. BRUNET B., 1994, Un aménagement hydrologique simple pour la réhabilitation des sols salés, la riziculture en Basse, Sécheresse vol. 5, n°1, pp. 37-44.
12. CADET D.L., GUILLOT B., 1991, Estimation des précipitations par satellite, EPSAT, 63 p.
13. CAMBREZY L., 1990, Le système d'information géographique de l'État de Veracruz (Mexique), positions de recherche et options méthodologiques, Séminfor 3, ORSTOM, pp. 319-331.
14. CAMBREZY L., 1991, Transfert d'échelle et organisation spatiale, Séminfor 4, ORSTOM, pp. 281-293.

15. CARN M., 1992, Logiciel de traitement d'images pour l'estimation de la pluviométrie à partir de l'imagerie IR-Météosat. EPSAT, 56 p.
16. CARN M., 1993, Apports de la télédétection satellitaire à la pluviométrie du bassin du Sénégal, Equensen-EPSAT, 30 p.
17. CHAUME R., 1983, Évolutions saisonnières comparées des signatures spectrales de divers milieux pérennes (forêt, prairie, sols nus) à partir de documents Landsat, Paris, ORSTOM, 200 p.
18. CHAUVALIER F., 1975, Étude de climatologie tropicale, Centre d'Étude de Géographie Tropicale, Talence, 230 p.
19. CHEYLAN J.P., 1992, Fonctionnalités spécifiques des SIG pour les sciences sociales ?, Revue de l'information géographique et de l'analyse spatiale, vol. 2, n°1, pp. 57-67.
20. CISSE A. M., 1986, Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud sahéenne, PPS, 211 p.
21. CITEAU J., FINAUD L., CAMMAS J.P., DEMARQ H., 1989, Questions relatives to ITCZ migrations over the tropical Atlantic ocean, sea surface temperature and Senegal river runoff, Meteorology and Atmospheric Physics, 41, pp. 180-190.
22. COGELS F.X., THIAM A., GAC J. Y., 1993, Premiers effets des barrages du fleuve Sénégal sur le lac de Guiers, Hydrobiologie Tropicale, vol 2, n°26, pp. 107-117.
23. CORMIER-SALEM M.C., 1989, Contribution à l'étude géographique des espaces aquatiques : la Casamance, Paris, 200 p.
24. COUREL M.F., 1984, Étude de l'évolution récente des milieux sahéens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse d'État ès-lettres et sciences humaines. Université de Paris 1, 409 p.
25. CREUTIN J.D., 1987, Validation et étalonnage d'images de télédétection à l'aide de mesures ponctuelles selon une approche géostatistique. Application à la mesure des précipitations et de l'insolation, Thèse, Université Scientifique, Technologique et Médicale - Institut National Polytechnique de Grenoble, 350 p.
26. CUQ F., 1983, Traitement informatique d'images par télédétection : application à la géographie du littoral, Paris, 250 p.

27. CUQ F., 1983, L'exploitation des données SPOT simulées en domaine littoral tropical "Les îles du Saloum". TECASEN, Département de Géographie, Dakar - ENSJF, Montrouge, 95 p.
28. CUQ F., 1990, Étude intégrée des écosystèmes pastoraux du Sahel malien, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 55-62.
29. DAGORNE D., 1988, Remote sensing software for meteorological satellite. Proceeding of the 7th Meteosat Scientific Users's Meeting. Madrid, pp. 387-391.
30. DAGORNE D., 1988, Traitement des données satellitaires à l'antenne ORSTOM de Lannion. Le logiciel TRISKEL, Veille Climatique Satellitaire, n° 34, pp. 17-42.
31. DAUPHINE A., 1987, Les modèles de simulation en géographie. Economica. 160 p.
32. DESBOIS M., KAYIRANGA T., GNAMIEN M.S., GUESSOU S. and, PICON L., 1988, Characterization of some elements of the sahelian climate and their interannual variations for july 1983, 84 and 85 from the analysis of METEOSAT ISCPP data, Journal of Climate, Vol 1, n°9, pp. 867-904.
33. DE LAGARD J., 1983, Initiation à l'analyse des données, Dunod, 190 p.
34. DERRIEN B., FARKI H., LEGLEAU and SAIROUNI, 1992, vegetation cover mapping over France using NOAA-11/AVHRR, Remote Sensing, vol 13, n°9, pp. 1787-1795
35. DEFOURNY P., 1990 Méthode d'évaluation quantitative de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir de données Landsat TM (Burkina Faso), Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 63-74.
36. DHONNEUR G., 1974, Nouvelle approche des réalités météorologiques de l'Afrique occidentale et centrale, Thèse de docteur-ingénieur, Université de Dakar, Faculté des Sciences, tome 1, 354 p., tome 2, 472 p.
37. DIAGNE M., 1980, Recherches sur la physionomie des pluies des espaces forestiers guinéo-libériens et guyanais, étude comparée. Thèse de 3e cycle, Université de Dijon, 287 p.

38. DIAGNE M., LAMMARE D., PAGNEY P., 1984, remarque sur la convergence intertropicale, l'exemple de l'Atlantique, Le courrier du CNRS, Paris, n°57, pp. 64-67.
39. DIAGNE M., SONKO P.N., 1991, Remarques sur la convergence intertropicale, l'exemple de l'Atlantique, la Géographie, images des sciences de l'homme, supplément au n°57 du courrier du CNRS, pp. 64-67.
40. DIAW A.T., 1980, Télédétection et analyse thématique de milieux littoraux et continentaux sénégalais, TECASEN, Département de Géographie, Université de Dakar - ENSJF, Montrouge, 79 p.
41. DIOP E.S., 1979, Télédétection de quelques géosystèmes littoraux sénégalais, TECASEN, Département de Géographie, Université de - ENSJF, Montrouge, 81 p.
42. DOMAIN F., 1979, Le Satellite Météosat et L'Océanographie, Étude des températures de la mer au voisinage des côtes de Mauritanie et du Sénégal, Télédétection 3, Cahier de L'ORSTOM, 4 p.
43. DOMINGO J., 1993, formes d'adaptation et de réorganisation, Espaces africains en crise, Reims : ERIGUR U.F.R. Lettres et Sciences Humaines, 140 p.
44. DUBRESSON A., MARCHAL J.Y., RAISON J.P., 1994, Les Afrique au Sud du Sahara, Belin-Reclus, 480 p.
45. DUPLESSY, J.C., 1990, Gros temps sur la planète, Paris, Odile Jacob, 230 p.
46. DURAND-DASTES F., 1962, Géographie des airs, Paris, P.U.F., 210 p.
47. ESCOURROU G., 1978, Climatologie pratique, Masson, Géographie, 171 p.
48. FISCHER H., EINGENWILLIG N., MÜLLER H., 1981, Information content of METEOSAT and Nimbus/THIR Water Vapor Channel Data, Altitude Association of Observed Phenomena, Journal of Applied Meteorology, pp. 1344-1352.
49. FLETCHER R.D., 1945, The general circulation of the tropical and equatorial atmosphere, Journal of Meteorology, vol 2, 3, pp. 167-174.
50. FONTAINE B., 1989, Les moussons pluvieuses dans l'espace africano-asiatique, Afrique Occidentale et Inde, Thèse d'État, Université de Bourgogne, 2 tomes, textes et tableaux, 414 p., figures, 227 p.

51. FREDERICKSEN P., 1990, Le suivi intégré de l'environnement sénégalais, pp. 75-80, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 1-14.
52. GALAIS J., 1991, Sahel - Nordeste Amazonie, Politiques d'aménagement en milieux fragiles, UNESCO, L'Harmattan, 233 p.
53. GILD J.P., BILGEN P., 1990, Les signatures spectrales des objets, leur interprétation géochimique et leur contrôle en télédétection spatiale, Formation permanente CNRS, Télédétection, 30 p.
54. GIRARD M.C., GIRARD C.M., 1989, Télédétection appliquée. Zones tempérées et intertropicales. Sciences Agronomiques, 310 p.
55. GODARD A., TABEAUD M., 1993, Les climats, Mécanismes et répartitions, Armand Colin, 191 p.
56. GREGEOIRE J. M., 1990, Suivi par télédétection des champs d'état de surface sur les bassins versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et de Rio Corubal (novembre 1987-décembre 1988), Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF -UREF, pp. 81-94.
57. GREGOIRE R 1990, L'expérience communautaire en matière d'utilisation de la télédétection dans la lutte contre la sécheresse et la désertification en Afrique de l'Ouest, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 95-114.
58. GUILLOT B., 1990, Champs thermiques de surfaces en Afrique de l'Ouest d'août à octobre 1990, Veille Climatique Satellitaire, n°35, pp. 15-19.
59. GUILLOT B., 1990, Naissance de nuages convectifs en Afrique de l'Ouest, deux exemples remarquables, Veille Climatique Satellitaire, n°35, pp. 49-52.
60. HAMMOUCHE R., 1990, Atlas du vent de l'Algérie, Office National de la Météorologie, Alger, 130 p.
61. I.N.R.A., 1970, Techniques d'études des facteurs physiques de la biosphère, 544 p.
62. I.N.R.A., 1989, Études sur les transferts d'eau dans le système Sol-Plante-Atmosphère, Compte rendu des travaux effectués dans le cadre de l'Action Thématique "Eau", 362 p.

63. IRO A., 1990, Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole du Sahel, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF -UREF, pp. 121-128.
64. JACQUEMINET C., 1990, Des indicateurs morphologiques pour mesurer les changements des milieux sahéliens à partir des images à haute résolution, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF -UREF, pp. 129-144.
65. JANICOT S., 1990, Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulations quasi stationnaires durant une phase de transition climatique, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, 178 p.
66. KARIMOUNE S., 1990, Les modèles éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 145-162.
67. KAYIRANGA T., 1988, Contribution à l'étude du cycle diurne des nuages convectifs au moyen de l'imagerie satellitaire au-dessus de l'Afrique tropicale, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, 132 p.
68. LAHUEC J.P., CARN M., 1990, Convergence Intertropicale. L'intensité de la convection en octobre-novembre 1990, Veille Climatique satellitaire, n°35, pp. 9-14.
69. LAMB P., PEPLER RA., HASTENRALLI S., 1986, Interannual variability in the tropical Atlantic, Nature, n°332, pp. 238-240.
70. LAURINI R., THOMPSON D., 1992, Fundamentals of spatial information systems, Academic Press, New York, 190 p.
71. LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPPFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B., HUBERT P., 1991, Estimation des précipitations au Sahel, l'expérience EPSAT-Niger, Hydrologie Continentale, vol 6, n°2, pp. 133-143.
72. LE BORGNE J., 1986, Les cyclones, Q.S.J., P.U.F., 121 p.
73. LE BORGNE J., 1987, Climatologie du sud-ouest de l'Océan Indien, Le cas de l'Île Maurice, ORSTOM, 676 p.

74. LE BORGNE J., 1988, La pluviométrie au Sénégal et en Gambie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 94 p.
75. LEMARTRET H., BEAUDOU A., 1990, proposition d'un schéma de collecte de l'information pour le milieu physique. Approche en langage orienté objet, Séminfor 3, ORSTOM, pp. 331-341.
76. LENORMAND E. 1993, Télédétection et Système d'information Géographique. Rapport de D.E.A. Géographie de L'Environnement Global, Paris 1 – Paris 4 Muséum. Météo France, 56 p.
77. LEO O., Télédétection : Techniques et applications cartographiques. FORHOM Paris, 110 p.
78. LEROUX M., 1973, Les alizés, Bulletin de l'Association des Géographes Français, n°410, pp. 627-635.
79. LEROUX M., 1980 (édition 1983), Le climat de l'Afrique Tropicale, tome I, 633 p. (textes), tome II, 250 p. (atlas).
80. LORTC B., 1990, Intégration d'imagerie satellitaire dans un système d'information géographique, Séminfor 3, ORSTOM, pp. 101-109.
81. MAHE G., 1993, Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes extrêmes, ORSTOM, 438 p.
82. MERZOUK A. et al., 1990, Essai méthodologique de classement et cartographie des terres en vue de la conservation des sols et des eaux en zone semi-arides. Apport de la télédétection, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 173-180.
83. MICHEL I., 1989, Pertinence de l'imagerie satellitaire pour l'étude de la végétation spontanée en marais maritimes (France), Photo Interprétation, n°3 et 4 pp. 1-8.
84. MICHEL P., 1973, Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Étude géomorphologique, Thèse, Université de Strasbourg, ORSTOM, 3 tomes, 753 p.
85. MICHEL P., SALL M., 1994, Conséquences de la sécheresse et de la construction de barrages, les dynamiques actuelles dans la vallée du Sénégal, les milieux arides et semi arides, héritage et dynamique actuelle, colloque en l'honneur du Professeur R. COQUE, pp. 541-555.

86. MOREAU N., 1991, Contribution de la télédétection à l'étude de l'évolution des paysages de mangroves de l'Afrique de l'Ouest, Bordeaux, 276 p.
87. MOUGENOT B. et al., 1990, Détection et évolution des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal, par imagerie satellitaire, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 181-196.
88. M.R.T. 1990, La Géographie, situer, évaluer, modéliser, grands colloques de perspective, Affiches de la Géographie, 216 p.
89. MÜLLER J.C., 1992, Sémiologie graphique dans et pour les SIG, revue de l'information géographique et de l'analyse spatiale, vol. 2, n° 1, pp. 53-56.
90. NDIAYE A., 1990, Analyse des doubles zones intertropicales de convergence, anomalie climatique ou structure pérenne de la circulation générale, mémoire de Maîtrise, Université de Paris IV, Sorbonne, 93 p.
91. NDIAYE A., 1991, Vapeur d'eau et précipitations en Afrique de l'Ouest pendant l'hivernage 90, mémoire de DEA, Université de Paris IV, Sorbonne, 78 p.
92. NDIAYE P., 1986, Les données NOAA et l'inventaire des superficies inondées et des cultures de décrue dans la vallée du Sénégal (crue 1985-1986), TECASEN, Département de Géographie, Dakar - ENSJF, Montrouge, 55 p.
93. NEGRE T., IMBERNON J., GUINOT J.P., SEGUIN B., BERGES J.C., GUILLOT B., 1988, Estimation et suivi de la pluviométrie au Sénégal par satellite Météosat, L'Agronomie Tropicale, vol 43, n°4, pp. 279-288.
94. NEGRE T., 1987, Estimation et suivi de la pluviométrie au Sénégal par utilisation du canal infrarouge thermique du satellite Météosat, INRA, 70 p.
95. ORSTOM 1990, Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides, Deuxièmes Journées de Télédétection, 290 p.
96. OUADBA J. M., 1990, Un exemple de suivi diachronique de milieux soudano-sahéliens au Burkina Faso par télédétection, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 209-218.
97. PAGNEY P., 1976, Les climats de la terre, Masson, 151 p.
98. PAGNEY P. et NIEUWLOT S., 1986, Études de climatologie tropicale. Masson, Paris, 206 p.

99. PECH P., REGNAULD H., 1992, Géographie physique, PUF, 432 p.
100. PEDELABORDE P., 1970, Introduction à l'étude scientifique du climat, SEDES, 244 p.
101. PEGUY, C.P., 1989, Jeux et enjeux du climat, Paris, Masson 254 p.
102. PION J.C., 1990, Essai de caractérisation géométrique des différentes unités d'un erg actif à l'aide des données satellitaires panchromatiques SPOT, application à l'erg Akchar (Mauritanie occidentale), Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 229-240.
103. PREVOST Y., 1990, Analyse spatiale de la pression animale comme facteur de désertification dans le nord du Sénégal, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 241-252.
104. PRINCE S.D., 1990, A review of the current status and future prospects, Remote Sensing of the Sahelian Environment, TCTA, Van Ruys, Bruxelles, 128 p.
105. PY B. 1988, Statistique descriptive. Economica, 325 p.
106. ROSENBAUM M., 1980, La Télédétection par Satellite : Un nouvel outil d'inventaire de l'occupation de l'espace : Essai méthodique et d'application en milieu tropical : Le contact forêt-savane en Côte d'Ivoire, Paris, 2 volumes, 350 p.
107. SAGNA P., 1993, Étude des saisons des pluies 1989 et 1990 au Sénégal, Veille Climatique Satellitaire, n°44, pp. 55-71
108. SAGNA P., 1988, Perturbations cycloniques en Afrique de l'Ouest et précipitations enregistrées en Ségambie, Veille Climatique Satellitaire, n°25, pp. 39-46.
109. SAINT-GERAND T., PIROT F., COULIER J.P., GOSSET J.P., 1991, S.I.G., L'information géographique, Structure logique d'un système sémantique, (Programme de formation Arc/Info). LISH Paris, 90 p.
110. SANDERS L., 1989, L'analyse statistique des données en géographie, Reclus, 230 p.
111. SARR B. 1988, La variabilité des précipitations au Sénégal et ses relations avec les champs atmosphériques atlantiques et africaines, mémoire de Maîtrise, C.R.C. de Dijon. Université de Bourgogne, 110 p.

112. SAVANE M., 1990, Utilisation des satellites météorologiques pour la suivi du bilan hydrique à l'échelle régionale, application à la France, Thèse, Université de Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 170 p.
113. SCOT-CONSEIL, 1991, Système d'Information Géographique dans les pays de l'Observatoire du Sahel et du Sahara, Compte rendu de la journée d'étude, Toulouse, 150 p.
114. SEGUIN B. 1984, Estimation de l'évapotranspiration dans l'infrarouge, Les colloques de l'INRA, n°23, Bordeaux, pp. 427-446.
115. SEGUIN B., BAELTZ B., FAVARD J.C., MONGET J.C., 1981, Signification de la thermographie infrarouge par satellite en agroclimatologie dans le Sud-Est de la France, Actes du colloque. Signature Spectrale d'Objets en Télédétection, Avignon, pp. 467-476.
116. SENEGAL, 1976, Annales des précipitations journalières de la République du Sénégal de l'origine des stations à 1965, CIEN -ASECNA - ORSTOM, 872 p
117. SENEGAL, 1990, Annales des précipitations journalières de 1966 à 1980, Ministère de l'Hydraulique - Dakar, CIEN - ASECNA - ORSTOM, 675 p.
118. SOW A.A., 1984, Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. Contribution à l'hydrologie fluviale en domaine tropical humide africain, Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Nancy, 442 p.
119. TABEAUD M. 1981, Climatologie descriptive et imagerie satellitaire : Contribution à la recherche d'une méthode d'analyse avec application aux basses latitudes. Thèse 3^{ème} cycle : géographie, Université de Dijon, tome I, 131 p. (texte), tome II, 116 p. (atlas).
120. TABEAUD M., 1984, Interprétation de la circulation atmosphérique d'après les images des satellites géostationnaires Goes-est et Météosat. Revue Géographique de l'Est, tome XXIV, n°1, pp. 89-99.
121. TABEAUD M., LAMARRE D. 1986, Approche des inter-relations atmosphère/océan sur l'atlantique tropicale en 1978 et 1979 à partir des images Météosat et Goesest. Veille Climatologique Satellitaire, n°14, pp. 25-39.
122. TABEAUD M., 1989, L'Afrique tropicale australe, Thèse d'État, Université de Paris IV, 439 p.

123. TABEAUD M., 1992, Contribution des images du satellite Météosat à la connaissance de l'influence des îles sur les formations nuageuses, Exemple de l'Archipel des Canaries, *Norois*, n°116, pp. 527-553.
124. TABEAUD M. SIMON L. et al., 1994, Le Néguev : originalité bioclimatique et mise en valeur, les milieux arides et semi arides. Héritage et dynamique actuelle, colloque en l'honneur du Professeur R. COQUE, pp. 761-781.
125. THIAM S. 1993, Essai de caractérisation des unités paysagères à l'aide des images satellitaires : la vallée du Sénégal entre Boghé et Diorbivol (Sénégal-Mauritanie), mémoire de Maîtrise, Université de Paris I, 87 p.
126. THIAW W. 1988, Contribution à l'estimation des précipitations au Sahel par l'imagerie satellitaire. Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, 191 p.
127. THAO W., CADET D.L., DESBOIS M., 1990, A Note on Estimation of Rainfall due to Squall Lines over West Africa Using Meteosat Imagery, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 42, pp. 69-76.
128. THOMSON K. et al., 1990, Évaluation des images TM et SPOT pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger (Mali) dans une perspective d'aménagement hydroagricole, Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. *Actualités Scientifiques*, AUPELF-UREF, pp. 273-282.
129. TRICART J., Méthode de cartographie au 1/1.000.000 du contexte hydrologique, Centre de Géographie Appliquée, Université de Strasbourg, 110 p.
130. TOUPET C., 1992, Le Sahel, Géographie, Nathan, 130 p.
131. TOURAND J.F. et al., 1994, Aménagements hydrologiques et développement au Sénégal, *Nature Sciences et Société*, (Recherches et Débats Interdisciplinaires), n°3, vol. 2, Dunod, pp. 212-228.
132. VERGER F., 1982, L'observation de la terre par les satellites, QSJ, PUF, 127 p.
133. VIERS G., 1987, Éléments de climatologie, Paris Nathan, 223 p.
134. VON MAYDEL H.J., 1983, Arbres et arbustes du Sahel, leurs caractéristiques et leurs illustrations, GTZ Eschborn, 531 p.

135. WANIEZ P., DANDOY G., 1990, À propos des Cerrados du Brésil, de l'information de recherche aux systèmes d'information. Séminfor 3, ORSTOM, pp. 159-171.
136. YARGEAU M., 1990, Inventaire et aménagement des ressources au Sahel, un exemple de transfert de technologie en télédétection. Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Actualités Scientifiques, AUPELF-UREF, pp. 283-294.
137. YATTARA M., THIAW M., 1986, Note sur les pluies hors saison du 15 au 21 décembre 1985 au Sénégal, Veille climatique Satellitaire, n°II, pp. 17-21.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

(Numérotation par partie)

Illustrations de la première partie

Figure 1 : Distribution globale du rayonnement net entrant au sommet de l'atmosphère (moyenne annuelle) watt/m², CAMPBELL et al., 1980.

Figure 2 : Représentation de la circulation générale de l'atmosphère selon Palmen (1950), DHONNEUR, 1985.

Figure 3 : Schéma de la circulation dans la zone intertropicale en janvier et juillet, LE BORGNE, 1988.

Figure 4 : Situation d'alizé maritime continentalisé, LE BORGNE, 1988.

Figure 5 : Illustration des composantes de l'inversion d'alizé, LEROUX, 1980.

Figure 6 : Situation d'harmattan, LE BORGNE, 1988.

Figure 7 : Schémas présentant la configuration type de la circulation zonale Ouest africaine, FONTAINE, 1986.

Figure 8 : Représentation de la fréquence d'apparition des doubles ZITC (année 1984 : cumul) LAMMARE et TABEAUD, 1986.

Figure 9 : Position des amas convectifs observés à 280 W en 1984, NDIAYE, 1990.

Figure 10 : Flux de discontinuités sur l'Afrique : Équateur Météorologique, Confluence Inter-Océanique, Discontinuité d'alizé, LEROUX, 1983.

Figure 11 : Flux horizontaux de vapeur d'eau en août 1979 entre le sol et 300 mb. la longueur de la flèche est proportionnelle au flux, DE FELICE et al., 1982.

Figure 12 : Coupe verticale Schématique d'une ligne de grains, LEROUX, 1983.

Figure 13 : Apport pluviométrique des lignes de grains au Sénégal en 1990, SAGNA, 1992.

Figure 14 : Coupe schématique de la troposphère Ouest africaine, DHONNEUR, 1985.

Figure 15 : Carte altimétrique du Sénégal (convertie selon la projection des images Météosat) Antenne ORSTOM/TRISKEL/DAGORNE, 1994.

Figure 16 : Structure du relief de la presqu'île du Cap-Vert (massif de Ndiass et falaise de Thiès) DUBRESSON et al., 1978.

Figure 17 : Carte morphopédologique du Sénégal (source CSE de Dakar), LISH/CNRS, 1994.

Figure 18 : Topographie et nature des fonds du plateau continental du Sénégal DOMAIN, 1977.

Figure 19 : TSM observées au Sénégal lors de la campagne CAP, PRIV2 et al., 1977.

Figure 20 : Réseau hydrographique du Sénégal (Source IGN, 1964) Arc/Info/LISH/CNRS, 1994.

Figure 21 : Bassin du Fleuve Sénégal, ALBERGEL et al., 1993.

Figure 22 : Carte du lac de Guiers, GAC et al., 1993.

Figure 23 : Aménagement hydroélectrique de la vallée du fleuve Sénégal DUBRESSON et al., 1994.

Figure 24 : Carte de la végétation du Sénégal en 1992, biomasse estimée à partir des indices de végétations calculées (Source : CSE).

Figure 25 : Régions climatiques du Sénégal, DUBRESSON et al., 1978.

Figure 26 : Lignes de grains enregistrées au Sénégal en 1990 SAGNA, 1992.

Figure 27 : Densité de la population du Sénégal en 1990 (Source : DUBRESSON et al., 1994)

Figure 28 : Carte des activités régionales du Sénégal (Source DUBRESSON et al., 1994)

Photo n° 1 : Végétation sahélienne (Sud de Saint-Louis, Grande Côte) RIEUCAU, juillet 1983/INTERGEO.

Photo n° 2 : Végétation de mangrove (Sokone, Saloum) PIRAZZOLI, décembre 1976/INTERGEO.

Tableau 1 : Caractéristiques hydrologiques du bassin du Sénégal (période 1951-1989), ALBERGEL et al., 1993.

Tableau 2 : Caractéristiques morphométriques du lac de Guiers, à la côte l.m IGN, GAC et al., 1993.

Illustrations de la deuxième partie

Figure 1 : Indice de pression animale en 1987-1988 et 1988-1989 dans le Nord du Sénégal. Utilisation sur 365 jours, 30 % de la végétation accessible (Source : PREVOST, 1990).

Figure 2 Déficit de la période 1969-1991 par rapport à la moyenne 1951-1980 dans le bassin versant du Sénégal (Source : ALBERGEL et al., 1993).

Figure 3 : Scénario de déficit pour la navigation (valeurs atteintes ou dépassées (Dn) pendant n jours dans l'année), ALBERGEL et al., 1993.

Figure 4 : Cartographie des zones approximatives d'apparition et de dissipation des amas nuageux, THIAW et al., 1988.

Figure 5 : Cartographie des zones approximatives d'apparition et de dissipation des amas nuageux, chaque amas est identifié par un chiffre, A : apparition, D : dissipation, THIAW et al., 1988.

Figure 6 : Évolution de l'indice de convection (trait plein) et de précipitation (tiret) et de l'indice estimée de précipitation pour l'amas du 13-14 juin 1986. La barre verticale donne l'écart quadratique moyen entre précipitations observées et estimées, THIAW, 1988.

Figure 7 : Relations Précipitations cumulées-Températures de surface cumulées (Sénégal : juin-sept, 1984), SEGUIN et al., 1987.

Figure 8 : Comparaison entre isolignes Météosat (A) et DMN sénégalaise (B), sept. 1984, SEGUIN et al., 1987.

Figure 9 : Comparaison entre isolignes Météosat (A) et DMN sénégalaise (B), juin-sept. 1985, SEGUIN et al., 1987.

Figure 10 : Relations Pluies-Températures, CADET et al., 1991.

Figure 11 : Relations Pluies-Nuages pluvio-gènes, GUILLOT et al., 1991.

Figure 12 : Carte des Pcb au Niger, en 1986, GUILLOT et al., 1991.

Figure 13 : Relation d'occurrences de nuages à sommet froid, GUILLOT et al., 1991.

Photo n° 1 : Plaque de sel (Kaolack, Saloum) MAHE, 1986/INTERGEO.

Photo n° 2 : Détail de végétation dans les dunes (Langue de Barbarie, Grande côte), PIRAZZOLI, décembre 1976/INTERGEO.

Photo n° 3 : Feu de brousse (Niokolo-Koba, Boundou) MAHE, 1976/ INTERGEO.

Photo n° 4 : Après feu de brousse (région de Kaolack, Saloum) MAHE, 1976/INTERGEO.

Tableau 1 : Bilan des émissions de gaz à effet de serre au Sénégal par source d'émission et par type de gaz (x 1000 tonnes) AMOUS, 1993.

Tableau 2 : Perte de production électrique due au soutien de la crue, ALBERGEL et al., 1993.

Tableau 3 : Qualité des eaux des régions Nord et Sud du Guiers (meq/l) et minéralisation globale des eaux (mg/l) avant (P1) et après (P2) la mise en fonction du barrage de Diama, GAC et al., 1993.

Tableau 4 : Lieux et heures d'apparition et de dissipation des amas nuageux et durée de vie, THIAW et al., 1988.

Tableau 5 : Coefficients de régressions (A, B, C), coefficients de corrélations multiples R entre les précipitations observées et les indices volumiques, THIAW, 1988.

Illustrations de la troisième partie

Figure 1 : Position de la ZITC le long de 28°W, CITEAU et al., 1990.

Figure 2 : Lames d'eau précipitées sur le bassin du Sénégal au cours des saisons des pluies, 1986-1992, CARN et al., 1993

Figure 3 : Réseau des 19 stations pluviométriques

Figure 4 : Classification des ondes électromagnétiques, CASSANET, 1990.

Figure 5 : Transmission d'une atmosphère standard pour les longueurs d'ondes comprises entre 0,3 et 20 micromètres KNETZYS, 1980.

Figure 6 : Le satellite TIROS N, NOAA 6 à 11, NASA.

Figure 7 : Le satellite Météosat 1, Atlas of Meteosat imagery, ESA.

Figure 8 : Dispositif optique du capteur de Météosat, Atlas of Meteosat imagery, ESA.

Figure 9 : Résolution spatiale dans les trois bandes spectrales du capteur de Météosat, Atlas of Meteosat imagery, ESA.

Figure 10 : Exemple d'une interpolation linéaire (graphe 1), et d'une interpolation par fonction spline (graphe 2) THAUVIN et al., 1992.

Figure 11 : Schématisation de différentes couvertures.

Figure 12 : Types de constituants représentant les objets géographiques en mode vectoriel sous Arc/Info, DANGERMOND, 1982.

Figure 13 : Types d'erreurs de numérisation sous Arc/info, THOMPSON et al., 1992.

Figure 14 : Localisation en x et y du semis irrégulier de points.

Figure 15 : Matrice régulière de l'Information localisée en x, y, connue ou calculée en z.

Figure 16 : Représentation cartographique de la surface théorique connue en x, y, z.

Tableau 1 : Précipitations annuelles en 1990 et écarts à la période "normale" 1931-1960.

Tableau 2 : Informations relatives aux documents cartographiques de base.

Tableau 3 : Informations concernant les relevés des 19 stations météorologiques terrain.

Tableau 4 : Informations relatives aux images satellitaires.

Tableau 5 : Caractéristiques orbitales de NOAA, CASSANET, 1990.

Tableau 6 : La direction du vent dans les 19 stations de mesure.

Illustrations de la quatrième partie

Figure 1 : Occurrences de nuages à sommet froid, en % du nombre d'images traitées $T < -40^{\circ} \text{C}$, Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, Dagorne, 1994.

Figure 2 : Températures maxima radiatives, infrarouge Météosat, Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, Dagorne, 1994.

Figure 3 (a, b, c) : Évolution comparée $t_{\text{max}} \text{ satellite} - t_{\text{max}} \text{ sol}$.

Figure 4 : Indices de végétation par la Différence Normalisée (Source : CSE de Dakar), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, 1994.

Figure 5 : Températures maxima de l'air en $^{\circ} \text{C}$ (Source : DMN Sénégalaise), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, 1994.

Figure 6 : Températures minima de l'air en $^{\circ} \text{C}$ (Source : DMN Sénégalaise), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, 1994.

Figure 7 (a, b, c) : Évolution comparée des valeurs extrêmes de température de l'air.

Figure 8 : Vitesse du vent en m/s (Source : DMN Sénégalaise), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, 1994.

Figure 9 (a, b, c) : Direction du vent au niveau des 19 stations météorologiques ($0-360^{\circ}$)

Figure 10 : Tension de la vapeur d'eau en HPA (Source : DMN Sénégalaise), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, 1994.

Figure 11 : Humidité relative maximale en % (Source : DMN Sénégalaise), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, 1994.

Figure 12 (a, b, c) : Évolution comparée des minima et maxima d'humidité relative.

Figure 13 : Évaporation Piche en mm (Source : DMN Sénégalaise), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, 1994.

Figure 14 (a, b, c) : Écarts Pluies-Évaporation Piche.

Figure 15 : Localisation géographique des quatre stations test.

Figure 16 : Évolution de température de l'air dans les quatre stations test.

Figure 17 : Évolution de la tension de la vapeur d'eau dans les quatre stations test.

Figure 18 : Évolution de l'humidité relative dans les quatre stations test.

Figure 19 : Évolution de l'évaporation Piche dans les quatre stations test.

Figure 20 : Évolution des pluies mesurées dans les quatre stations test.

Figure 21 (a, b, c, d) : Évolution en pourcentage des coefficients de corrélations issus des calculs de régressions multiples.

Figure 22 : Précipitations mesurées en mm (Source : DMN Sénégalaise), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triskel, 1994.

Figure 23 : Translation des isohyètes (100, 500 et 1000 mm de 1968 à 1984, LE BORGNE, 1988.

Figure 24 : Précipitations estimées à partir du modèle Latit (13 stations test), Antenne ORSTOM de Lannion, logiciel Triske1, 1994.

Figure 25 : Précipitations estimées à partir du modèle Latit + dmer (13 stations test), Laboratoire Géosystèmes/CNRS/UBO, Brest, logiciel Arc/Info, 1994.

Figure 26 : Pluies estimées - Pluies mesurées : cumul décadaire des 19 stations.

Figure 27 : Pluies estimées - Pluies mesurées : cumul annuel par station.

Tableau 1 : Analyse des relations Pluies -Relief.

Tableau 2 : Analyse des relations Pluie - Relief (cumul $x + 1, x + 1 + 1 \dots x + 12$).

Tableau 3 : Coefficients r^2 issus des calculs de régressions multiples.

Tableau 4 : Écarts entre pluies mesurées et moyenne de la “normale” 19311960 (mai).

Tableau 5 : Écarts entre pluies mesurées et moyenne de la “normale” 19311960 (juin).

Tableau 6 : Écarts entre pluies mesurées et moyenne de la “normale” 19311960 (juillet).

Tableau 7 : Écarts entre pluies mesurées et moyenne de la “normale” 19311960 (août).

Tableau 8 : Écarts entre pluies mesurées et moyenne de la “normale” 19311960 (septembre).

Tableau 9 : Écarts entre pluies mesurées et moyenne de la “normale” 19311960 (octobre).

Tableau 10 : Écarts Pluies estimées-Pluies mesurées/Latit + dmer ('mm) sur l'ensemble des stations

Tableau 11 : Écarts Pluies estimées-Pluies mesurées/Latit + dmer ('mm) au niveau des 19 stations

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	4
REMERCIEMENTS	5
INTRODUCTION GÉNÉRALE	7
PREMIERE PARTIE: LE SÉNÉGAL : UN CLIMAT SAHÉLIEN MARITIME ?	10
INTRODUCTION DE LA PREMIÈRE PARTIE	11
CHAPITRE I : MECANISMES DU CLIMAT DU AFRIQUE DE L'OUEST	12
I. DYNAMIQUE DES CENTRES D'ACTION	14
1. Origine dynamique	14
2. Origine thermique	16
2.1. La cellule libyenne	17
2.2. La dépression saharienne	17
II. MASSES D'AIR ET FLUX	17
1. Dans les basses couches	17
1.1. L'alizé maritime	19
1.2. L'harmattan	23
1.3. La mousson	23
2. En Altitude	23
2.1. Le Jet d'Est Africain (J.E.A.)	24
2.2. Le Jet Tropical d'Est (J.T.E.).....	25
III. LA ZITC ET LES FLUX DE DISCONTINUITÉ	26
1. La ZITC.....	26
2. Les fronts de discontinuité	28
2.1. Le Front InterTropical (FIT).....	29
2.2. Le Front d'Alizé (F.A.L.)	31
IV. MANIFESTATIONS PLUVIEUSES	31
1. Dynamique pluviométrique.....	31
1.1. La vapeur d'eau	32
1.2. Types de convection	33
1.2.1. Convection diurne	33
1.2.2. Lignes de grains	33
2. Précipitations et types de temps	35
2.1. Pluies de "heug" en hiver boréal	36
2.2. Pluies d'hivernage	37
2.2.1. Zone A	37
2.2.2. Zone B	37
2.2.3. Zone C1	38

2.2.4. Zone C2	37
2.2.5. Zone D	37
Conclusion partielle.....	39
CHAPITRE II : SENEGAL : “FINISTERRE OUEST AFRICAIN”	40
I. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU MILIEU	42
1. Basses altitudes et pentes faibles dominant la topographie.....	42
2. Un bassin sédimentaire facteur de variabilité	48
2.1. Le socle Birrimien	49
2.2. Les séries du Primaire	49
2.3. Les formations sédimentaires d'âge Secondaire-Tertiaire	49
2.4. Dépôts sédimentaires et volcanisme au Quaternaire	50
3. Des sols variés	49
4. Un océan bordier caractérisé par des upwellings	53
4.1. Deux sortes d'upwellings	54
4.2. Le proche océan: les Températures de Surface de la Mer (TSM).....	56
5. Une densité du réseau hydrographique trompeuse.....	57
5.1. Un réseau hydrographique disproportionné	60
5.2. Le fleuve Sénégal	61
5.3. Le lac de Guiers	65
II. COMPOSANTES BIOTIQUES DES PAYSAGES.....	67
1. Homogénéité spatiale et hétérogénéité des formations végétales	69
2. Adaptation à la sécheresse	71
III. LES REGIONS CLIMATIQUES ET L'OCCUPATION HUMAINE TRADITIONNELLE	73
1. Des régions climatiques croisant les effets de la zonalité et de l'océanité	73
1.1. Le Ferlo	76
1.2. La Grande Côte	76
1.3. Le Fouladou	78
1.4. Le Saloum	78
1.5. Le Boundou	78
1.6. La Basse Casamance	79
2. Des régions urbaines prédatrices de leur espace	78
Conclusion partielle.....	81
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE.....	82
DEUXIEME PARTIE: IMPACTS DE LA SÉCHERESSE ET RECHERCHES DE SOLUTIONS.....	84
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	85
CHAPITRE III : DESTABILISATION DE L'ÉQUILIBRE ACTUEL : BILAN ET CONSÉQUENCES	88
I. RAPPEL DE QUELQUES PROCESSUS FONDAMENTAUX	87

1. Echanges Sol-Plante-Atmosphère	87
2. Activités physiologiques de la biosphère	88
2.1. La photosynthèse	90
2.2. La respiration	90
2.3. La transpiration	90
2.4. Rôle moteur des paramètres étudiés sur la vie des végétaux	91
3. Les mécanismes de la convection	94
II. IMPACTS DE LA SÉCHERESSE SUR LE MILIEU	97
1. La déflation éolienne et la salinisation	97
2. Le ruissellement et l'évaporation	103
III. ACTIONS ET RÉACTIONS ANTHROPIQUES À EFFET GÉNÉRALEMENT NÉGATIF.....	104
1. Contribution de l'homme à la déstabilisation du milieu	104
2. Exemples de solutions socio-économiques régionales et conséquences.....	111
2.1. Moyens de lutte à l'échelle locale	113
2.2. Tentatives à l'échelle sous-régionale	114
2.3. Quelques actions positives pour la population	117
Conclusion partielle.....	116
CHAPITRE IV : APPORTS DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE : ESTIMATION DES PLUIES	118
I. EXEMPLE DE SUIVI DES AMAS NUAGEUX	119
1. Identification et cycle de vie des nuages	120
2. Degré d'efficacité des nuages pluvio-gènes	125
II. EXEMPLES DE MÉTHODES STATISTIQUES.....	127
1. Relations Pluies-Températures de surface	127
2. Relations Précipitations-Nuages pluvio-gènes	132
Conclusion partielle.....	135
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	136
TROISIÈME PARTIE: OBJECTIFS, OUTILS ET MÉTHODES DE TRAVAIL	137
INTRODUCTION DE LA TROISIÈME PARTIE.....	138
CHAPITRE V : RAPPEL DE LA PROBLÉMATIQUE ET DONNÉES UTILISÉES.....	140
I. POURQUOI LE RECOURS À LA TÉLÉDÉTECTION ET À L'ÉLABORATION D'UN SIG	140
1. La télédétection en climatologie tropicale	140
2. Introduire plusieurs échelles.....	142
3. Variabilité temporelle : choix de l'hivernage 1990	143
4. Des résultats au service de l'agroclimatologie.....	146
II. DONNÉES UTILISÉES	146
1. Paramètres terrestres et aérologiques	146

1.1. Cartographie numérisée	146
1.1.1. Topographie	147
1.1.2. Réseau hydrographique	148
1.1.3. Morphopédologie	149
1.2. Paramètres aérologiques	150
1.2.1. Températures	154
1.2.2. Précipitations	154
1.2.3. Humidité relative	154
1.2.4. Évaporation	155
1.2.5. Vitesse et direction du vent	155
1.2.6. Tension de la vapeur d'eau	155
2. Notions de télédétection et documents d'origine spatiale.....	156
2.1. Données N.O.A.A.	159
2.1.1. Caractéristiques du satellite NOAA.....	159
2.1.2. Calcul d'indices de végétation	161
2.2. Données METEOSAT	163
2.2.1. Caractéristiques de ce satellite météorologique	163
2.2.2. Occurrences de nuages à sommets froids.....	166
2.2.3. Maxima de températures radiatives (Tmax)	167
Conclusion partielle.....	167
CHAPITRE VI : OUTILS INFORMATIQUES ET MÉTHODE DE TRAVAIL	169
I. OUTILS INFORMATIQUES.....	169
1. Arc/Info : Logiciel d'Information Géographique	169
2. Triskel : Plus simple à manipuler	171
II. METHODOLOGIE	172
1. Spatialisation de l'information.....	172
1.1. Interpolation des paramètres aérologiques	172
1.1.1. Krigeage.....	173
1.1.2. Fonction spline	173
1.1.3. Données sols-points de grilles-images	174
1.2. Création d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)	175
1.2.1. Configuration matérielle.....	175
1.2.2. Notion de couverture et numérisation	176
1.2.3. Maillage et triangulation	181
2. Conversion des documents selon la projection Météosat.....	183
3. Méthodes appliquées d'estimation des pluies	184
3.1. La méthode TAIR	185
3.2. La méthode LATIT	186

4. Recherche de corrélations entre les paramètres	187
4.1. Croisement des données : régressions linéaires simples et multiples	87
4.2. Création d'un nouveau modèle d'estimation des pluies pour le Sénégal : <i>Latit + dmer</i>	188
Conclusion partielle.....	189
CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE	190
QUATRIÈME PARTIE: PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET PERSPECTIVES ...	191
INTRODUCTION DE LA QUATRIÈME PARTIE	192
CHAPITRE VII : COMPORTEMENT SPATIO-TEMPOREL DES PARAMÈTRES DE L'ENVIRONNEMENT	193
I. DOCUMENTS D'ORIGINE SPATIALE.....	193
1. La nébulosité : occurrences de nuages à sommets froids et pluviosité	193
2. Maxima de température radiatives	197
2.1. Évolution spatio-temporelle des tmax radiatives : IR Météosat	197
2.2. Écarts Températures radiatives/Températures mesurées au sol	199
3. Évolution cyclique des plantes à travers les valeurs de NDVI	204
II. SUIVI DES PARAMÈTRES AÉROLOGIQUES.....	207
1. Température de l'air : minima et maxima.....	208
1.1. Évolution dans l'espace et dans le temps	208
1.2. Évolution comparée des valeurs extrêmes de température de l'air	211
2. Vents : Évolution comparée avec le géopotentiel en altitude	215
3. Suivi de la tension de la vapeur d'eau	221
4. Humidité relative : évolution comparée des minima et maxima.....	223
5. Évaporation Piche : évolution et écart à la pluie	229
6. Comportement des facteurs climatiques lors de transect Nord/Sud et Est/Ouest	234
Conclusion partielle.....	239
CHAPITRE VIII : RELATIONS PLUIES/AUTRES PARAMÈTRES	241
I. PARAMÈTRES INDICATEURS DE LA PLUIE	242
1. Peut-on intégrer le substrat dans un modèle d'estimation des pluies ?	243
2. Trois paramètres indicateurs de la pluviométrie	244
2.1. Le NDVI : bon indicateur en mi saison des pluies	248
2.2. Rôle efficace de la direction du vent en début d'hivernage	248
2.3. Pertinence de la distance par rapport à l'océan	249
II. LA PLUIE EN 1990	248
1. Évolution et écart à la normale 1931-1960	248
2. Modèles appliqués d'estimation des pluies.....	259
2.1. Écarts Latit-Tair	260
2.2. Écarts Latit-Latit + dmer	260

Conclusion partielle.....	264
CONCLUSION DE LA QUATRIEME PARTIE	265
CONCLUSION GÉNÉRALE	266
ANNEXES	269
Annexe 1 : Configuration des données de base.....	270
Annexe 2 : Direction du vent/décade/station	276
Annexe 3 : Écarts pluies mesurées-pluies estimées par les méthodes Latit et Latit + dmer par station (13 décades test)	280
Annexe 4 : MNT : formule et carte	285
LISTE DES SIGLES ET SYMBOLES	287
BIBLIOGRAPHIE	288
TABLE DES ILLUSTRATIONS	300
Illustrations de la deuxième partie	302
Illustrations de la troisième partie	304
Illustrations de la quatrième partie	305
TABLE DES MATIERES	308