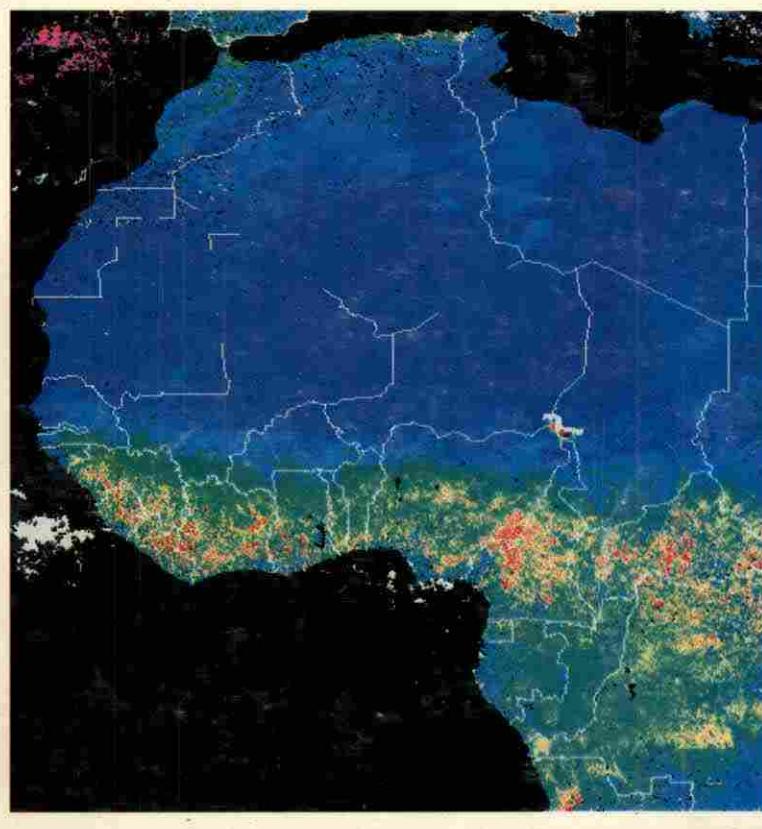


4460



ATLAS AGROCLIMATIQUE DES PAYS DE LA ZONE DU CILSS

1

NOTICE ET COMMENTAIRE



PROGRAMME AGRHYMET





ATLAS AGROCLIMATIQUE DES PAYS DE LA ZONE DU CILSS

NOTICE

Robert MOREL



PROGRAMME AGRHYMET



PREFACE



L'ATLAS AGROCLIMATIQUE DES PAYS DE LA ZONE DU CILSS est l'aboutissement de plus de 6 années de travail dans le cadre du programme AGRHYMET. Il va constituer une référence, à la fois comme source de données validées et corrigées, et comme analyse de l'évolution climatique des dernières décennies au Sahel.

Lorsque la sécheresse s'est abattue sur les pays du Sahel dans la période 1968-1973, on a d'abord cru à une catastrophe naturelle de courte durée. Pour permettre à cette région de panser ses plaies, l'aide internationale s'est mobilisée, et on espérait un retour progressif à la normale. Mais au fil des années, force a été de constater que la sécheresse persistait, et que c'est toute l'économie des pays sahéliens qui se trouvait durablement affectée. Pour mettre en place des politiques de développement agricole adaptées, il faut désormais compter avec cette modification du climat, et en analyser toutes les conséquences.

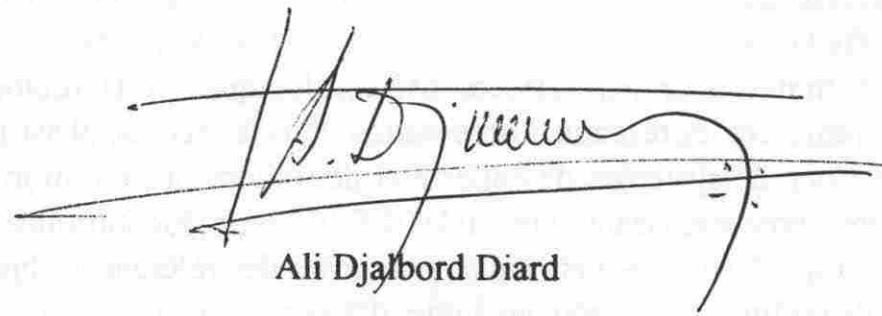
C'est pour faire face à ces problèmes qu'est né le Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) en 1973 et que son programme AGRHYMET a été lancé. La première priorité (phase I d'AGRHYMET) avait été de former des hommes pour les Services Météorologiques et Hydrologiques Nationaux, et de renforcer les réseaux d'observation. Puis la seconde phase (1983-1986), a mis en place de systèmes de collecte et de traitement de l'information nécessaires à l'alerte précoce, visant à prévoir les déficits de production alimentaire. C'est à ce moment que l'ATLAS a été lancé, pour avoir des références objectives dans le domaine de la climatologie pour les études d'aménagement, ou pour orienter rationnellement les politiques de développement agricoles. Ce projet ATLAS s'est ensuite poursuivi durant toute la phase III d'AGRHYMET (1987-1992).

Les moyens très importants qui ont été engagés, avec le soutien de la Coopération Française, ont été à la mesure de la difficulté de la tâche. Mais il aura fallu toute la persévérance de M. Robert MOREL, agroclimatologue détaché par la Coopération Française auprès du Centre AGRHYMET, pour conduire cette première édition à son terme à travers les nombreuses difficultés qui se présentaient. Dans ce travail de longue haleine, il n'a bien sûr pas été seul, mais tous savent à quel point il s'est investi personnellement, avec enthousiasme et compétence.

Le Centre AGRHYMET se voit maintenant confié la tâche de poursuivre la mise à jour permanente de la banque de données opérationnelle, en étroite collaboration avec les Services Météorologiques Nationaux des pays du CILSS qui collectent les données de base. C'est aussi le Centre qui assurera les mises à jour et rééditions de l'ATLAS, ainsi que la distribution des données sous forme numérique pour les utilisateurs désireux de réaliser d'autres analyses.

Le CILSS exprime sa gratitude à la COOPERATION FRANCAISE pour le soutien apporté, et félicite M. Robert MOREL pour la réalisation de ce magnifique travail. Je suis fier de présenter cet ATLAS qui était attendu par tous les experts et décideurs travaillant pour le SAHEL. Je suis persuadé qu'ils sauront en tirer le meilleur parti.

Le Secrétaire exécutif du CILSS,



A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ali Djalbord Diard". The signature is fluid and cursive, with "Ali" and "Djalbord" on the top line and "Diard" on the bottom line.

Ali Djalbord Diard

AVERTISSEMENT

Dans cette première édition, l'ATLAS AGROCLIMATIQUE DU SAHEL couvre la période 1950-1985. Il apporte sa contribution à la connaissance de l'environnement climatique dans les pays du CILSS, mais il ne présente pas seulement un inventaire statistique des paramètres du climat: il tente aussi d'évaluer les modifications apparues dans ce domaine à partir de la fin des années 60. Nombre de questions liées aux problèmes climatiques n'ont pu être traitées en profondeur, mais l'ATLAS a nécessité la constitution d'une banque opérationnelle de données dont la mise à jour est à la charge du Centre AGRHYMET, et ceci doit permettre le développement d'autres études dans l'avenir pour mieux appréhender l'impact des fluctuations météorologiques sur l'agriculture et l'élevage.

La présente publication consiste en un ensemble de onze volumes au format A4:

-Un tome de synthèse à rôle de notice explicative.

-Six tomes de statistiques pluviométriques couvrant la période humide 1950-1967, la période sèche 1968-1985 et la période normale de durée trentenaire 1951-1980.

-Un tome de statistiques climatiques donnant les températures, la tension de vapeur, la durée d'insolation, la vitesse du vent à 2 mètres, l'évapotranspiration potentielle.

-Trois pochettes de cartes A3 pliées en deux : une pour la pluviométrie, une pour les cartes climatiques et l'ETP, la dernière pour l'agroclimatologie des principales cultures du Sahel.

L'ensemble des documents présentés doit remettre en question un certain nombre d'idées reçues notamment sur les processus de désertification et sur le caractère fluctuant de la dégradation des pâturages. L'étude montre la persistance de la sécheresse, ce qui en fait une norme à retenir pour les plans de développement à venir.

Les probabilités calculées et éditées sur support papier permettent de formuler les fourchettes d'hypothèses hautes et basses pour encadrer les prévisions des campagnes en cours.

L'ATLAS ne se limite pas à l'ensemble imprimé mais se présente aussi sous forme de fichiers informatiques. Le tout constitue une référence opérationnelle couvrant 30 années de valeurs journalières, au minimum, pour chacun des paramètres climatiques étudiés. Ces données concernent la pluviométrie, les températures sous abri maximales, minimales et moyennes, les tensions de vapeur d'eau moyennes, les durées d'ensoleillement, la vitesse moyenne du vent à 2 mètres et enfin l'évapotranspiration potentielle Penman.

Six années de travail ont été nécessaires à l'acquisition informatique et surtout au contrôle des mesures recueillies par les Directions Météorologique Nationales. Des tests d'homogénéité ont permis de déceler les erreurs de transcription ou de saisie et de mettre en évidence les éventuelles dérives instrumentales. L'élaboration de programmes d'interpolations spatiales à rendu possible l'évaluation des données manquantes et la correction des valeurs jugées aberrantes. Le résultat est l'obtention de séries journalières continues mises à la disposition des utilisateurs potentiels pour alimenter par exemple des modèles agroclimatologiques.

La confection des cartes a demandé le calcul des champs pour chacun des paramètres. Ces champs, calculés par krigeage avec une dérive linéaire, couvrent l'espace avec 16 points par degré carré, donnant des mailles d'environ 28 kilomètres ce qui est semblable au modèle français Péridot. Les grilles résultantes existent pour les valeurs normales de tous les paramètres étudiés aux pas de temps décadaires et mensuels. Les fichiers correspondants doivent permettre le calibrage moyen des mesures satellitaires.

J'ai pu mener ce travail à terme grâce à l'environnement technique du Centre AGRHYMET de NIAMEY. La micro-informatique a été l'outil privilégié des calculs de probabilités et de la cartographie. La collaboration des Directions Nationales de la Météorologie m'a été très précieuse. Le travail de synthèse final a été facilité en coordonnant les activités des VSN (Volontaires du Service National français) et éventuellement de leurs épouses. Les renouvellements successifs an après an n'ont pratiquement pas posé de problèmes pour l'intégration dans le cadre du travail en cours.

Philippe CAILLE rédigea les premiers programmes de dépouillement des bandes magnétiques
Maryvonne KERDONCUF-CAILLE débute les recueils climatiques

Cyrille HONORE signa les traitements graphiques pour la compréhension des pluies

Françoise HONORE a contrôlé les pluies

Thierry DESPONTS par programmes d'interpolations contrôla et corrigea les pluies

Bruno MORNET a vérifié tous les paramètres climatiques

Jean Marie WILLEMET a complété les fichiers pour le calcul des ETP

En outre, le stage de fin d'études d'ingénieur des travaux en météorologie d'Eric BERTRAND a permis l'analyse des jours de pluie

Enfin des assistants africains, Egah KODJO puis Ibrahim DAN SANDA ont dépouillé les microfiches du projet Belgique-OMM de sauvegarde des données.

Epinay sous Sénart, le 2 Août 1991

Robert MOREL Agroclimatologue

NOTICE DE L'ATLAS AGROCLIMATIQUE DU SAHEL

La base de l'Atlas est l'ensemble des données recueillies pour toutes les stations des pays du CILSS. Ces données ont été représentées sous deux formes distinctes: des tableaux statistiques et des cartes. Si l'ouvrage semble concerner l'ensemble de l'agroclimatologie ouest africaine c'est parce que les aspects régionaux contribuent à la compréhension de la variabilité climatique. Mais le schéma global doit être considéré comme une ébauche entourant la représentation précise des phénomènes dans la zone du CILSS. Pour bien marquer l'aspect sahélien du travail les cartes sont souvent tronquées vers le sud et généralement limitées au 5ème parallèle.

Il était nécessaire de joindre aux travaux statistiques et cartographiques une notice mettant en évidence le cadre général dans lequel s'est fait le travail ainsi que les commentaires sur l'évolution climatique. Cette notice est le présent document. Elle montre la complexité de la réflexion méthodologique qui s'est imposée en permanence au cours de la confection de l'Atlas. Un chapitre de synthèse résume les problèmes posés et les solutions adoptées. Pour ces dernières l'emploi de micro-ordinateurs a été nécessaire. Il a donné lieu au développement d'un ensemble logiciel qui répond aux principaux besoins des climatologues.

L'analyse du climat, aussi bien pour la pluie que pour les autres paramètres, ne prétend pas se substituer aux ouvrages spécialisés en climatologie et en météorologie. L'évolution de la pluviométrie a retenu particulièrement notre attention. Les grands traits intéressants les applications agropastorales ont été dégagés ainsi que les aspects originaux de certains résultats obtenus. L'influence des fluctuations climatiques sur l'agriculture a été mise en évidence. Mais le travail présenté n'est qu'une première proposition de l'utilisation des documents et données mis en forme dans la base opérationnelle numérique. Il offre des applications immédiates et peut orienter les recherches futures.

Cet atlas apporte sa contribution à une meilleure compréhension de l'écologie sahélienne et des relations entre climat et cultures. La sécheresse actuelle est une situation maintenant permanente qui doit être considérée comme la nouvelle norme. Il faut dire que l'inquiétude résultant de la permanence des déficits pluviométriques doit être tempérée par l'évolution parallèle des productions du secteur rural. En effet, bien que pénalisées par l'irrégularité et la faiblesse des pluies, elles ne se sont pas effondrées complètement montrant une adaptation des paysans aux nouvelles conditions écologiques.

La notice ne comprend pas d'annexe mais possède une bibliographie sommaire qui renvoie à des ouvrages ou articles généralement bien pourvus en références. Ce tome est divisé en quatre chapitres:

chapitre 1 Méthodologie

L'analyse des sources introduit les problèmes de la vérification des données et les solutions adoptées. L'emploi de l'informatique n'a été qu'une aide laissant à l'homme le contrôle des opérations.

chapitre 2 La pluviométrie

Son analyse est succincte et ne prétend pas se substituer à des ouvrages spécialisés. La sécheresse actuelle a fait l'objet d'un développement particulier à cause de sa persistance qui en fait la norme à retenir.

chapitre 3 Les paramètres climatiques

Leur évolution spatio-temporelle est importante pour ses conséquences sur l'écologie de la région, en particulier sur les valeurs de l'évapotranspiration potentielle. Cette dernière qui met en jeu un grand nombre de paramètres est un bon indicateur synthétique du climat.

chapitre 4 Agroclimatologie

Les relations sol-plante-climat sont étudiées par le biais des bilans hydriques qui suivent pas à pas l'apport de la pluviométrie face à la demande évaporative du climat. Les besoins particuliers de chaque culture modulent le bilan en permettant d'évaluer l'effet sur la production.

Bibliographie

Chapitre 1

METHODOLOGIE

Une base de données a été constituée en rassemblant tous les paramètres disponibles ce qui nous a conduit à concevoir la philosophie d'une banque de données climatologiques autour des activités suivantes :

- l'acquisition à la fois en temps réel pour la mise à jour mais surtout en différé pour la fiabilité de la base chronologique indispensable à l'atlas,
- le stockage sous une forme qui soit compacte pour un encombrement minimum mais aussi accessible à la fois facilement et rapidement,
- le contrôle et la validation des données autour d'un maximum de vraisemblance,
- les méthodes d'interrogation et d'extraction des données suivant les desiderata des utilisateurs.

1.1. SOURCES.

1.1.1. DOCUMENTS.

1.1.1.1. LES DOCUMENTS DE SYNTHÈSE.

Il était nécessaire de consulter tous les écrits concernant les problèmes climatologiques et agroclimatologiques de la région. Les principales synthèses régionales étant l'Etude agroclimatologique de l'Afrique au sud du Sahara de COCHEME et FRANQUIN (1967) et le Climat de l'Afrique tropicale de M. LEROUX (1983). L'UICN a édité un remarquable document synthétique sur le Sahel (1989) comprenant les aspects climatiques, le milieu végétal, les ressources agricoles et humaines. Pour sa part l'ICRISAT a publié des synthèses pour certains pays: Burkina-Faso (1987), Mali (1984), Niger (1982). Des études locales sont nombreuses ainsi que celles concernant des paramètres climatiques particuliers. La bibliographie cite tous les documents qui ont pu orienter notre travail. Notre propos n'était pas de réécrire ce qui existait mais d'analyser la situation actuelle au travers d'une collecte, la plus exhaustive possible, des données de toute la région et des zones voisines. L'évolution du climat décrite au passage montre que la situation actuelle présente une stabilité et doit servir de norme. Ce travail effectué pour la plus longue période possible permet de proposer des références pour les statistiques des principaux paramètres climatiques intéressant l'agriculture et l'élevage.

1.1.1.2. DESCRIPTION DES SOURCES DE DONNÉES.

La situation de départ nous donnait deux types de documents, soit des séries de données sur support informatique, soit des relevés sous forme écrite. Ces derniers pouvant être, soit des Tableaux Climatologiques Mensuels (TCM) avec tous les paramètres observés à des pas de temps souvent trihoraires, soit des fiches annuelles des pluies journalières par station.

a - Les documents informatiques.

Le Centre AGRHYMET de Niamey disposait de bandes magnétiques d'origines diverses supportant toutes les informations disponibles pour les pays du CILSS. Les bandes de la Météorologie Nationale Française apportaient les TCM des stations synoptiques saisis de l'origine à 1965. Les données tri-horaires de ces mêmes stations étaient sous forme de bandes annuelles fournies par l'ASECNA couvrant la période 1967-1978. La pluviométrie journalière de tous les postes pluviométriques provenait des bandes ORSTOM CIEH de l'origine à 1965. Le Centre de Reading nous a fourni quelques données sur le Nigéria de 1950 à 1975 et aussi une duplication de certains relevés ORSTOM. En fin d'étude nous avons bénéficié des bandes magnétiques du projet Belgique-OMM. Ces bandes résultent de la consolidation des fichiers informatiques existants qui ont été fusionnés. Un complément partiel a pu être ajouté par le dépouillement des postes Climatologiques et Agroclimatiques. Des données de l'Université d'East-Anglia ont mis à notre disposition les pluviométries mensuelles des pays anglophones et du Soudan.

b - Les documents écrits.

La consultation des TCM a posé des problèmes car il fallait des extraits au Centre. Les photocopies des documents étaient longues et onéreuses tout en nécessitant un volume de papier considérable. Le projet Belgique-OMM de sauvegarde des données a fort heureusement fourni les TCM sur support microformé. Les microfiches réalisées concernent non seulement les stations synoptiques mais aussi tous les postes climatiques et agroclimatiques de l'origine à 1983 pour la Gambie et les pays francophones, à 1984 pour le Cap Vert, à 1986 pour la Guinée Bissau. Malheureusement la rapidité d'exécution de ce programme a fait que la qualité des prises de vues n'a pu être contrôlée qu'au tirage en Europe et certains clichés sont voilés. Mais l'ensemble de la publication a été irremplaçable et nous n'aurions pas pu achever le travail sans cette aide précieuse.

Les publications sont de bonnes source de références. Il faut citer notamment les relevés pluviométriques journaliers édité par l'ORSTOM avec l'ASECNA pour le CIEH et qui sont la transcription écrite de leur base de données pluviométriques. Il y a aussi les annuaires météorologiques réalisés par certains états. Ces documents, ayant été contrôlés par les organismes éditeurs, donnent une bonne base pour constituer les "fichiers originaux" de données. En fin d'étude nous

avons reçu les données climatiques et pluviométriques mensuelles des stations algériennes du Sahara jusqu'à l'année 1990. Les éditions de tableaux récapitulatifs moyens (FAO, Hargreaves,..) ont été inutilisables pour compléter la base historique. Mais elles ont rendu service pour l'élaboration des champs à cartographier en fournissant des valeurs pour les zones hors CILSS et en permettant de vérifier les erreurs éventuelles.

1.1.1.3. DISCUSSION À PROPOS DES DOCUMENTS "ORIGINAUX"

a - Fiabilité

Les diverses origines des fichiers ou des données transcris sur supports lisibles traduisent des cheminements variés entre la mesure, le relevé de l'observation et son archivage dans un dossier ou une banque de données. Des circuits sont tels que les données peuvent passer dans une dizaine, voire une douzaine d'organismes avant d'être stockées dans une série chronologique. Généralement l'organisme intermédiaire sert uniquement de boîte à lettre et transmet au suivant sans modifier ni oublier de documents. Il en va tout autrement s'il y a eu saisie, transcription, voire critique et correction partielle car chacune de ces opérations peut être la cause d'erreurs involontaires.

b - Années couvertes par les documents informatiques

La situation de départ des documents informatiques présentait de nombreux trous. En particulier pour les pays non francophones du CILSS comme la Gambie et la Guinée-Bissau, il n'existe aucun document informatique. Le Cap-Vert bénéficiait d'enregistrements pluviométriques faits par l'ORSTOM jusqu'à 1977. Pour les autres pays, la situation était la suivante:

-Pour les données climatiques et pour les stations synoptiques il manquait l'année 1966 et l'ensemble des années 1979 à 1985 ainsi que les relevés antérieurs au classement synoptique des stations. Rien n'existe concernant les stations climatologiques ou agroclimatologiques. En résumé il y avait, au moins, absence de 8 ans d'information sur le climat de la phase de sécheresse des dernières années, soit un trou supérieur à 40% des relevés synoptiques.

-Pour les pluies la situation semblait meilleure du moins pour les stations synoptiques. Mais les fichiers journaliers présentaient les mêmes lacunes que les fichiers climatologiques. Comme l'étude de l'Atlas se faisait au pas de temps décadaire, les fichiers correspondants paraissaient plus complets étant saisis en temps réel pendant les suivis de campagne. Ce mode d'acquisition avec ses erreurs de transmission ou les informations erronées nous a fait abandonner ces fichiers qui avaient des valeurs de pluies souvent très éloignées de celles figurant a posteriori dans les annuaires des Directions Nationales. Quant aux simples postes pluviométriques, ils ne présentaient par année, dans cette base, que quelques décades éparses, le reste étant manquant. L'utilisation de ces fichiers de campagne a donc été abandonnée.

c - Données sur les pays limitrophes du CILSS

Le climat ne s'arrête pas aux frontières et pour une bonne compréhension des fluctuations régionales il est indispensable d'utiliser les valeurs des paramètres observés dans les pays limitrophes. Or pratiquement rien n'était à notre disposition au Centre AGRHYMET. Le petit atlas d'Alexandre KAWALEC pour la Guinée a été complété grâce au Centre d'Etudes de la CEE à Ispra qui nous a communiqué les pluies journalières de Guinée. L'ORSTOM a pu nous fournir les pluies journalières des pays francophones au Sud du CILSS jusqu'à 1980. Les Directions Nationales du Togo et du Bénin ont donné des documents informatiques ou écrits pour compléter les pluviométries au terme de 1985. Les pays anglophones : Sierra Leone, Ghana, Nigéria et Soudan ont pu être couverts grâce à Graham FARMER de l'Université d'East Anglia qui nous a adressé les fichiers mensuels de pluie.

1.1.2. QUALITÉ DES DONNÉES

La plupart des problèmes concernent les données manquantes, non seulement dans les fichiers du Centre AGRHYMET, mais également sur les TCM ou leur reproduction microformée. Mais si les valeurs sont présentes elles doivent être vraisemblables. Des contrôles sont indispensables en les comparant, d'une part à l'ensemble de la série et d'autre part aux stations voisines.

1.1.2.1. QUALITÉ DES DONNÉES MESURÉES.

La pluviométrie fait l'objet de développements dans le chapitre sur le Contrôle et l'homogénéisation des données. On ne traitera ici que la qualité des mesures et des valeurs des paramètres nécessaires au calcul de l'évapotranspiration. Ce sont les données de températures (maximales, minimales et moyennes), d'humidité de l'air, de la durée d'insolation et celles de la vitesse moyenne du vent mesurée ou rapportée à 2 mètres au dessus du sol. Ce qui suit n'est pas l'inventaire exhaustif des erreurs et de leurs causes mais récapitule celles que nous avons rencontré le plus fréquemment.

a - Les températures sous abri

Les erreurs de lecture sont peu importantes avec des thermomètres en bon état et la variabilité des mesures dépend peu du type d'abri utilisé. Mais un changement d'emplacement peut entraîner des écarts importants: ainsi un écart de l'ordre de deux degrés Celsius a pu être observé entre deux séries consécutives de la même station mais correspondant à un déplacement du poste d'observation; heureusement que ce cas est rare.

Les sources d'erreurs peuvent résulter du mauvais positionnement du bulbe des thermomètres qui doit être situé vers le centre de l'abri pour éviter les effets de paroi. Les

thermomètres à minima peuvent avoir la colonne d'alcool brisée et si la lecture est faite au niveau de la première discontinuité le minimum sera largement sous estimé de plusieurs degrés. Inversement si la correction de colonne n'est pas faite en diminuant la lecture de la somme des discontinuités on peut surestimer le minimum d'une dizaine de degrés. Avec les observateurs moins bien formés dans les postes climatologiques ou agroclimatologiques les erreurs de lectures consistant à observer la mauvaise extrémité de l'index sont les plus fréquentes.

Au niveau des températures moyennes une source d'écart provient de leur méthode de calcul. L'idéal serait d'intégrer l'observation continue dans la journée, c'est le cas si on utilise les 8 observations trihoraires des stations synoptiques dont la moyenne fournit une bonne estimation de la température journalière. Malheureusement les stations climatiques et agroclimatiques ne font que trois mesures par jour et on doit y estimer la moyenne par la demi somme des extrêmes. Ceci entraîne un biais surtout lorsqu'il y a des pics de courte durée pour les extrêmes: pic minimal quand l'humidité de l'air est relativement élevée au lever du jour en saison sèche. Ces biais peuvent atteindre 0,6 à 0,8° C par jour. On peut recalculer l'enveloppe des cinq données en incluant les deux extrêmes et on se rapproche ainsi du système synoptique. Mais cette méthode nécessite la saisie des 5 valeurs et devient trop longue. Dans un souci de rapidité la méthode de la demi somme a été retenue pour le calcul des températures moyennes sur l'ensemble des pays du CILSS. Tous les résultats sont alors comparables ce qui permet ainsi d'utiliser tous les points de mesure et de ne pas perdre d'information.

b - L'humidité de l'air.

L'humidité de l'air et la tension de vapeur sont estimées avec un psychromètre ventilé qui donne la température sèche et celle d'un thermomètre mouillé. Les erreurs de lecture thermométriques entraînent peu de variations sur les estimations surtout pour les températures généralement élevées de la zone étudiée. Une mauvaise ventilation de l'abri peut au contraire entraîner des erreurs importantes. Mais il y a plus grave quand l'humectation du thermomètre mouillé est déficiente : manque d'eau dans le réservoir, mousseline pas assez souvent changée et se salissant soit avec une gangue de sel, soit avec un dépôt colloïdal provoquant toujours une diminution de la capillarité de la mousseline d'où une valeur trop élevée de la température du thermomètre humide et donc une surestimation de l'humidité de l'air. A cela s'ajoutent les erreurs de mesures thermométriques évoquées ci-dessus.

c - La radiation solaire incidente.

Elle est évaluée à partir de l'insolation généralement mesurée avec un héliographe de Campbell. Malgré les règles précises édictées pour la lecture des brûlures sur les bandes de carton il peut y avoir des écarts importants de l'ordre d'une heure par jour en changeant d'observateur car l'estimation des parties roussies peut varier. Elle n'est pas toujours prise en compte et il est

parfois difficile d'évaluer la durée d'ensoleillement correspondant à chacun de tous les stades de roussi.

Les mesures directes par des radiomètres seraient meilleures mais le nombre d'appareils en place est trop peu élevé et d'une mise en service trop récente pour une utilisation valable dans notre étude régionale car les séries sont fragmentaires et peu longues. Par ailleurs l'étalonnage des radiomètres n'a pas été fait systématiquement depuis leur installation et d'autres causes de déviations des mesures apparaissent.

d - Le vent.

Il est souvent difficile d'avoir des anémomètres bien étalonnés sur le terrain. Les coupelles peuvent s'encrasser et acquérir une inertie plus élevée. Le matériel vieillissant ou mal entretenu présente des rotations moins aisées. Toutes ces causes demandent des couples de démarrage de plus en plus importants. Avec le temps il y a souvent un accroissement apparemment de la fréquences des vents faibles ou calmes. Une correction s'impose une fois calculée la droite de régression qui caractérise la décroissance des valeurs de vent due aux causes matérielles.

L'absence de normalisation des hauteurs de mesure demande une correction afin de pouvoir comparer et étudier les vitesses moyennes journalières collectées. Une erreur est malheureusement commise en rapportant le vent à 2 mètres à partir de mesures faites à plus haute élévation car les profils de vitesse sont mal connus et il n'est pas sûr qu'il y a neutralité thermique entre les hauteurs différentes. Parmi les paramètres climatiques mesurés le vent est sans conteste celui qui pose le plus de problèmes quant à la certitude de sa mesure. Il faut donc critiquer avec grand soin les séries de relevés d'autant plus que le vent est un facteur amplificateur important de l'ETP en zone sahélienne. Diverses formules de correction existent. Plus ou moins complexes elles peuvent tenir compte de la température, de la viscosité de l'air, de la rugosité du milieu. Tous ces paramètres apportent leurs propres erreurs d'estimation. Il en résulte que toutes ces formules donnent des écarts importants entre elles. Nous en avons retenu une qui ne tient compte que du seul paramètre de hauteur:

$$V2 = 2 * V / \log (50 * H) \text{ avec}$$

H : Hauteur de l'anémomètre en mètres

V2 : Vitesse du vent à 2 mètres

V : Vitesse du vent mesurée à H mètres

1.1.2.2. LES PARAMÈTRES ESTIMÉS.

En l'absence de mesures suffisamment nombreuses et de durée suffisante il faut bien estimer les paramètre d'albédo et les coefficients d'Angstroem nécessaires au calcul de la radiation absorbée facteur important du niveau d'Evapotranspiration potentielle. Ces paramètres concernent essentiellement l'Agroclimatologie mais nous évoquerons ici les aspects méthodologiques.

a - L'albédo.

La réflectance du sol dépend de sa nature et de son couvert. Nous avons pris une valeur moyenne constante de 0,25 correspondant à l'albédo d'un couvert végétal. On observe de grandes variations d'un couvert à l'autre. A la mise en culture d'un champ il est certain que l'albédo d'un sol nuserait le meilleur choix tant que le développement de la culture ne permet pas une occupation significative du terrain. Mais dans ce cas, suivant la réflectance du sol, l'albédo varie entre 0,05 et 0,20. On peut penser qu'une grande amélioration consisterait à réaliser des cartes moyennes d'albédo à divers pas de temps, en compilant toutes les données existantes, notamment les mesures faites avec METEOSAT. Disposant ainsi des réflectances observées on aurait une meilleure approche du rayonnement d'origine solaire et on pourrait réaliser de meilleures cartes d'ETP. Il suffirait de calculer les champs d'albédo décadiques et de rajouter ce paramètre comme une variable dans le mode de calcul à la place de la constante retenue. Cette dernière n'est actuellement qu'un pis aller puisqu'identique du sud au nord.

b - Les coefficients d'Angstroem.

Ce sont les coefficients a et b de la formule d'Angstroem permettant de calculer le rayonnement global à partir de l'insolation. Les estimations par mesures sont peu nombreuses et souvent contradictoires ce qui conduit à prendre des valeurs théoriques. Rappelons d'abord la formule et ses paramètres:

$$RG = RGo (a + b * h / H) \text{ avec}$$

RG : Rayonnement global

RGo : Rayonnement de courte longueur d'onde à la limite de l'atmosphère

h : Durée de l'insolation journalière mesurée

H : Durée astronomique du jour

Des cartes donnent les valeurs moyennes des coefficients suivant un zonage climatique qui coupe l'ensemble du CILSS en deux :

- une zone sud où $a = 0,29$ et $b = 0,42$
- une zone nord où $a = 0,25$ et $b = 0,45$

Deux stations peu distantes peuvent alors se trouver de part et d'autre de la limite, par exemple sur chacune des rives du fleuve Sénégal. Mais pour une étude régionale il est nécessaire d'avoir une variation spatiale continue des coefficients a et b d'Angstroem pour éviter les discordances en passant d'une valeur à une autre. En fonction de la Latitude, nous avons adopté en accord avec le C.I.E.H. la formule de GLOVER et MAC CULLOCH modifiée comme suit :

$$RG = RGo (0,29 \cos L + (0,42 + 0,0015 L) h / H)$$

où L : Latitude en degrés et dixièmes

1.2. CONTROLE ET HOMOGENEISATION DES DONNEES.

Trois tâches successives sont mises en oeuvre ici : la vérification, la reconstitution et la saisie. La vérification des données a pour objet de contrôler la conformité spatiale et temporelle des valeurs de chacun des paramètres climatiques. Les observations manquantes ou aberrantes seront ensuite reconstituées pour être finalement saisies afin d'avoir des séries homogènes et complètes.

1.2.1. NÉCESSITÉ D'UNE BASE OPÉRATIONNELLE DE DONNÉES

Lorsqu'on a besoin de travailler avec une série de données, on peut ou bien utiliser un mode de traitement qui tient compte des trous d'observation, ou bien on comble le hiatus par une valeur reconstituée de manière raisonnée. Pour la base opérationnelle nécessaire à la confection de l'Atlas on a considéré qu'il valait mieux remplacer les valeurs manquantes de même que les valeurs paraissant suspectes. Cette manière de faire évite les problèmes de décalages dans les moyennes sur des phénomènes très fluctuants tels que les pluies: ainsi l'absence de quelques années sèches relève intempestivement la valeur moyenne, alors qu'un mois pluvieux manquant, si on n'y prend pas garde, donnera un total annuel qui sera incomplet avec une valeur trop faible.

Les séries de données doivent être complètes, et bien critiquées afin de présenter une bonne homogénéité du champ climatique. Pour faire fonctionner les modèles agroclimatiques simulant le développement des plantes, il est nécessaire d'avoir des fichiers de données complets sans hiatus, sinon les calculs s'arrêtent dès qu'une donnée manque. Ceci est valable non seulement pour les modèles de bilan hydriques utilisant les pluies et l'ETP de façon impérative, mais également pour étudier l'impact énergétique sur la croissance (modèles de G. ROBERTSON (1983), modèles de W. BAIER et G. ROBERTSON (1983)) avec emploi de données de températures et d'ensoleillement. Il en est de même avec les modèles testant l'influence du photopériodisme et du thermopériodisme.

La comparaison statistique de données ne peut valablement se faire qu'avec des séries de même longueur de temps et couvrant les mêmes périodes si on veut bien appréhender les modifications climatiques éventuelles. Voilà encore un motif pour compléter les données si on veut utiliser tout l'existant des mesures qui sinon seraient rejetées comme incomplètes.

En définitive on dispose de deux bases de données. Une première série de fichiers contient les données "en l'état", c'est à dire contenant les valeurs brutes des mesures transcrrites. A partir de cette base brute a été élaborée une série de "fichiers opérationnels" stockés comme tels. Pour ce faire une critique des données existantes a été faite au pas de temps journalier en comparant les stations voisines. Ceci a permis de déceler les valeurs aberrantes ainsi que les données absentes et de les reconstituer. On a ainsi constitué une base opérationnelle de données sur laquelle ont été effectués les calculs statistiques pour la rédaction correcte de l'Atlas agroclimatologique du Sahel.

1.2.2. ORIGINE DES DONNÉES MANQUANTES.

Les paramètres nécessaires au calcul de l'ETP sont placés côte à côte, pour chaque station, dans un fichier séquentiel ASCII. Un programme analyse ce fichier pour y déceler les valeurs nulles ou manquantes en donnant la nature des données concernées et les dates où on rencontre ces valeurs. Par exemple :

***** NOM DU FICHIER : 30001J2 ***** KAEDI

TEMP. MOY. MANQUANTE OU NULLE LE : 5/ 1/ 71
TEMP. MAX. MANQUANTE OU NULLE LE : 5/ 1/ 71
TENS. VAP. MANQUANTE OU NULLE DU 7/ 1/ 71 AU 31/ 3/ 71
HUMI. REL. MANQUANTE OU NULLE DU 28/ 12/ 69 AU 31/ 5/ 71
INSOLATION MANQUANTE OU NULLE LE : 15/ 6/ 71
TEMP. MOY. MANQUANTE OU NULLE DU 1/ 6/ 71 AU 12/ 7/ 71
TEMP. MIN. MANQUANTE OU NULLE DU 1/ 6/ 71 AU 12/ 7/ 71
VENT A 2 m MANQUANTE OU NULLE LE : 12/ 1/ 72

.....

Les données manquantes peuvent être structurelles. Elles résultent d'une organisation trop lâche des réseaux d'observation, il s'agit alors d'un maillage trop grand, entraînant une faible densité de points connus pour les interpolations géographiques. Les véritables données manquantes sont celles qui n'ont pas été transmises ou qui n'ont pas été mises dans les fichiers de la base de donnée et, plus grave, celles qui n'ont pas été enregistrées par défaut d'observation.

1.2.2.1. STRUCTURE DES RÉSEAUX D'OBSERVATION.

Il y a peu de choses à faire sinon en corriger les défauts dans un avenir le plus proche possible. La structure des réseaux donne la densité des mesures régionales et leur validité suivant que le point d'observation est censé représenter une partie plus ou moins grande du champ climatique.

a - Densité des stations d'observations.

L'idéal serait au moins une station climatologique qui ferait des enregistrements synoptiques pour chaque degré carré de territoire. Ceci est presque réalisé au Sénégal, en Gambie, au Burkina Faso, dans le Sud du Mali et du Niger. Le réseau synoptique est également complété par des stations climatologiques qui peuvent d'ailleurs poser des problèmes propres

à ce genre de station. La répartition actuelle montre une couverture spatiale hétérogène mais sa densité suit celle du peuplement et les zones désertiques ont peu de mesures.

b - Fréquences des observations.

Il s'agit ici du pas de temps séparant deux séries d'observations consécutives et il faut distinguer les observations climatiques des observations pluviométriques.

Les stations synoptiques enregistrent la plupart des phénomènes toutes les trois heures. Les problèmes apparaissent avec les stations climatologiques qui ne font plus que trois observations par jour. Théoriquement, ces observations ont lieu à 6, 12 et 18 heures. Une confusion apparaît souvent entre les temps universel (TU), l'heure locale et le temps astronomique ou heure solaire vraie. En outre l'heure d'observation du matin varie entre 6 et 9 heures, celle du milieu de journée oscille entre 11 et 13 heures, tandis que la dernière se place entre 16 et 18 h 30. L'exploitation de ces séries et leur comparaison mérite donc une réflexion et une attention toute particulière. Il paraît souhaitable de reconstituer les données pour évaluer les valeurs aux heures théoriques d'observation ou de recalculer l'évolution tri-horaire. Mais la démarche est longue et nécessite la saisie préalables de toutes les mesures avec leurs heures d'observation.

Les pluies doivent être relevées deux fois par jour à 18 heures et à 6 heures le lendemain. La vérification se fait en comparant par exemple les postes pluviométriques qui entourent une station synoptique prise comme référence. Cette comparaison laisse apparaître deux types de différences: le nombre de jours de pluies est souvent plus grand sur la station de référence et en conséquence la seconde différence est une hauteur de pluie mesurée plus forte que celles des postes pluviométriques. Il est donc vraisemblable qu'il y a des observations manquantes correspondant aux jours de faible pluviométrie non relevés.

1.2.2.2. TROUS D'ENREGISTREMENT.

Les hiatus dans les fichiers peuvent être dus à l'arrêt des observations ou à des oubli de report des données.

a -Absence d'observation.

Ce défaut d'observation peut être dû à la détérioration de certains instruments, à l'arrêt provisoire de la station par manque de personnel, à un oubli ou à une perte de documents. Toutes ces causes ont pour résultat des discontinuités dans les séries de données ce qui peut être préjudiciable à des analyses fines à pas de temps continu.

b - Non transmission de données.

Ce type de manquement est théoriquement le moins grave puisqu'il devrait facilement être corrigé par un envoi ultérieur qui permettrait de compléter la base de données. Encore faut-il que les valeurs manquantes ne soient pas perdues ou détruites.

1.2.3. CAS DES DONNÉES ABERRANTES.

Une série de tests est utilisée pour vérifier la validité des données et pour déceler les valeurs suspectes. L'origine de ces données aberrantes est variable. Elles peuvent résulter souvent de mauvaises mesures, d'erreur de transmission ou de report.

1.2.3.1. LES TÂCHES DE VÉRIFICATION.

Un premier niveau de vérification sera opéré sur les moyennes décadiques ou mensuelles pour déceler les déviations de longues durées. Le second niveau consiste à contrôler les données une par une pour rechercher les valeurs anormales ou bien pour déceler les changements brusques. On affine ensuite avec un troisième niveau qui est la comparaison des variations dans le temps des valeurs de stations voisines. Pour ce faire nous avons tenu compte des variations des champs spatiaux de chacun des paramètres afin d'employer les stations les plus voisines de l'isocourbe passant par le point à reconstituer. Ceci a été possible grâce à une première cartographie sommaire à partir des données connues pour les paramètres à étudier. L'affichage éventuel à l'écran des valeurs de ces stations donne une vision rapide de l'homogénéité des mesures. Pour les paramètres variant avec l'altitude tels que températures ou tension de vapeur la comparaison doit de préférence être faite avec les valeurs rapportées au niveau de la mer. La technique des doubles cumuls permet quel que soit le paramètre de mettre en évidence les divergences entre deux séries. Un exemple en est donné plus loin dans la partie consacrée à la pluviométrie.

L'automatisation du contrôle peut s'envisager et les programmes existent mais, comme ils ne constituent pas un système expert, il est préférable de conserver une intervention humaine par souci de vraisemblance.

a - Pour les températures :

Il faut vérifier que les moyennes sont bien comprises entre les deux extrêmes, qu'il n'y a pas inversion entre maximum et minimum et que les extrêmes ont des valeurs différentes avec un écart suffisant. L'édition des valeurs mensuelles permet de voir si une déviation des mesures s'est produite et sur quel intervalle de mois. Les températures minimales présentent parfois des niveaux subitement bas qui résultent certainement d'une faute de lecture quand la colonne du thermomètre est tronquée. Les maxima trop élevés correspondent à un mauvais emplace-

ment dans l'abri ou a une confusion au report entre la mesure au sol et la mesure sous abri ventilé.

b - Pour l'humidité relative et la tension de vapeur :

On contrôle la validité des valeurs élaborées à partir des mesures des températures du psychromètre. On vérifie que la valeur moyenne est bien représentative de la situation journalière, surtout dans les stations climatiques ou agroclimatiques dans lesquelles on ne relève pas les extrêmes et où le nombre de mesures est inférieur à 8 par jour. Un calcul de vérification peut être réalisé avec l'humidité relative et la température moyenne. De toutes façons une bonne vérification est de contrôler, au minimum, que la tension de vapeur à stocker dans la base de données correspond à une humidité relative inférieure ou égale à 100% pour la température moyenne relevée.

c - Pour l'insolation :

Il ne doit pas y avoir confusion avec la nébulosité et les valeurs relevées ne peuvent être qu'au plus égales à la durée théorique du jour diminuée du temps pendant lequel le soleil est bas sur l'horizon. Un programme effectue ce contrôle et peut écrêter les valeurs trop élevées. Mais l'automatisme est encore un risque car la donnée trop forte peut simplement résulter d'une erreur de saisie et l'écrêtage donne alors l'insolation maximale pour le jour considéré.

d - Pour la vitesse du vent :

Les hauteurs d'observation doivent bien être notées pour contrôler la vitesse. Les unités de mesure, très variables, seront converties en mètres par secondes : degrés Beaufort, km/h, miles par jour, noeuds, parcours du vent en km/jour. Il faut bien vérifier que l'unité de vitesse correspond bien à celle qui figure sur l'imprimé. Après les avoir ramenées à 2 mètres, l'édition des séries mensuelles d'une station montre s'il y a eu déviation ou dégradation de la mesure et pendant quel laps de temps.

e - Pour la pluie :

Une première vérification de l'homogénéité de données se fait avec les graphiques simples des cumuls des valeurs annuelles de chacune des stations pluviométriques. Il y a de telles divergences qu'il est difficile de distinguer les "bonnes" séries des "mauvaises". La déviation de la plupart des postes par rapport aux stations synoptiques donne une idée de l'importance des défauts d'observations dans la majorité des cas. La seconde étape consiste à faire des doubles cumuls annuels en prenant comme référence quelques stations synoptiques. Les anomalies détectées sont souvent dues à des erreurs d'éprouvettes, des changements d'emplacement du pluviomètre mais il faut aller plus loin.

La comparaison avec les postes voisins permet de rejeter certaines valeurs ou certaines dates incompatibles avec les données recueillies alentour. Par exemple on voit si le jour de la pluie n'a pas été décalé à l'enregistrement, si le nombre de jours de pluies est valable ou s'il laisse supposer une absence de relevé, si la hauteur d'eau est vraisemblable. On vérifie alors facilement si le relevé correspond à un total pentadaire, décadaire ou mensuel. Si c'est le cas on peut faire une répartition vraisemblable de ce total entre les jours de pluie observés dans les stations voisines.

1.2.3.2. LES ERREURS DE TRANSMISSION.

C'est l'acquisition en temps réel qui en rencontre le plus fréquemment, généralement sous forme de fautes de frappe, d'erreurs dyslexiques, de données transmises de mémoire qui se révéleront non conformes à l'enregistrement qui a été effectué sur place. Plus rarement pour des causes de défectuosité des réseaux de transmission. Une série de contrôles successifs permet généralement les corrections mais il faut apporter beaucoup de soins et de rigueur dans ce travail de vérifications successives.

Il peut arriver malgré tout que des valeurs semblent rester aberrantes. On ne sait plus la part entre les erreurs de transmission ou de mesures. On peut alors traiter les "anomalies" comme des données manquantes et en refaire une estimation plus vraisemblable.

Les acquisitions en temps réel sont certes nécessaires pour le suivi de campagne, mais il est préférable de travailler en différé pour constituer une base de données. Cela évite les vérifications à répétition et simplifie le travail.

1.2.3.3. LES ERREURS DE REPORT.

Une valeur nulle peut laisser planer le doute d'une confusion entre donnée manquante et mesure nulle. Ceci est surtout vrai pour les paramètres dont l'échelle de mesures peut valablement enregistrer un zéro. Ce sont essentiellement la pluie, l'insolation et le vent et il faut faire attention quand on trouve des zéros dans les fichiers concernant ces paramètres. Les valeurs nulles restent invraisemblables dans les fichiers d'humidités ou de tensions de vapeur et elles sont rarement correctes pour les températures.

a - Pour la Pluie.

Les plus courantes sont l'inscription de la pluie du dernier jour du mois sur la ligne 31 même si le mois ne comporte que 30 jours. Ceci est assez fréquent pour les pluies des mois de juin et septembre. Des erreurs sont également dues à l'application de la règle d'enregistrement des pluies: la pluie du jour étant celle mesurée entre 6 heures et 18 heures, plus celle relevée le lendemain à 6 heures du matin. Il peut y avoir confusion de dates et la pluie est alors

notée le jour suivant. La comparaison jour par jour des pluies pour une série de postes voisins permet de déceler ces décalages et d'y remédier dans le fichier opérationnel. On peut aussi trouver, comme quantité de pluie notée, les mêmes chiffres que ceux du numéro du jour.

b - Pour les autres paramètres climatiques.

Les colonnes des températures minimales et maximales étant côté à côté sur les imprimés de TCM, il est possible que l'observateur inscrive une valeur de maximum égale au minimum ou commençant par le même chiffre des dizaines. Dans ce cas on peut prendre comme maximum la plus forte valeur enregistrée dans la journée ou estimer le maximum par interpolation.

Les problèmes d'unités sont fréquents pour le vent et la tension de vapeur. Les vitesses du vent évaluées en Degrés Beaufort peuvent être transcrrites en mètres/secondes ou simplement reportées telles quelles dans le tableau bien que celui-ci indique m/s comme unité. Il faut toujours contrôler les unités pour le vent. Attention avec la tension de vapeur qui peut être exprimée en millimètres de mercure dans les pays non francophones. D'une façon générale on doit vérifier soigneusement la transcription des unités anglo-saxonnes surtout pendant les périodes de changement d'unités. Dans ce dernier cas on peut trouver des mélanges et des conversions fantaisistes sur des TCM qui sont malencontreusement surchargés parfois à la limite de la lisibilité.

1.2.4. ESTIMATION DES DONNÉES MANQUANTES.

Ici les valeurs aberrantes peuvent être considérées comme manquantes. Pour reconstituer des données deux voies d'approche sont possibles: l'estimation par calcul en utilisant les mesures existantes de paramètres voisins, l'interpolation. Cette dernière voie offrant le calcul par interpolation temporelle, ou l'interpolation spatiale à partir des stations voisines complètes.

1.2.4.1. CALCULS A PARTIR DES MESURES EXISTANTES.

Ces calculs sont basés sur les relations existant entre les diverses données. Ces relations peuvent être physiques et donner un résultat équivalent à celui de la mesure comme par exemple: tension de vapeur et humidité relative, température et heure de mesure. Si on travaille avec des relations statistiques la précision de la valeur obtenue dépend du coefficient de corrélation et n'atteindra jamais 100%. C'est le cas pour les relations entre insolation et nébulosité ou pour l'emploi de régressions statistiques.

a - Température moyenne

Comme on ne dispose pas toujours d'intégrateur ou de mesures trihoraires on se rabat sur le calcul de la demi somme des températures extrêmes maximales et minimales.

b - Insolation à partir de la nébulosité en octas.

L'insolation peut être estimée avec une régression polynomiale prenant la nébulosité, exprimée en octas comme variable indépendante. Il ne faut pas prendre les valeurs moyennes, qu'elles soit décadiques ou mensuelles, pour étudier la régression car cela masquerait les variabilités fines. Aussi l'équation a-t-elle été calculée avec des couples de données journalières, sur plusieurs années et pour diverses stations de la zone d'étude. La régression multiple explique 97,5% de la variance totale avec le coefficient de corrélation $r = 0,984$. L'erreur faite est généralement inférieure à 5%. Toutefois il peut y avoir surestimation de l'ensoleillement en saison sèche dans le cas de brumes sèches qui n'apparaissent pas dans la nébulosité. Inversement certains observateurs notent dans ce cas une nébulosité de 8 et il en résultera une estimation de l'ensoleillement trop faible. La sécurité demande alors de doubler cette estimation par l'interpolation spatiale et de comparer les résultats.

La formule retenue pour estimer les données d'insolation manquantes est la suivante:

$$I = DJT * (Cte + A * NEB + B * NEB^2 + C * NEB^3)$$

avec I = Insolation

DJT = durée astronomique du jour en heures décimales

NEB = Nébulosité moyenne du jour en octas

$Cte = 93,38$

$A = 0,040456$

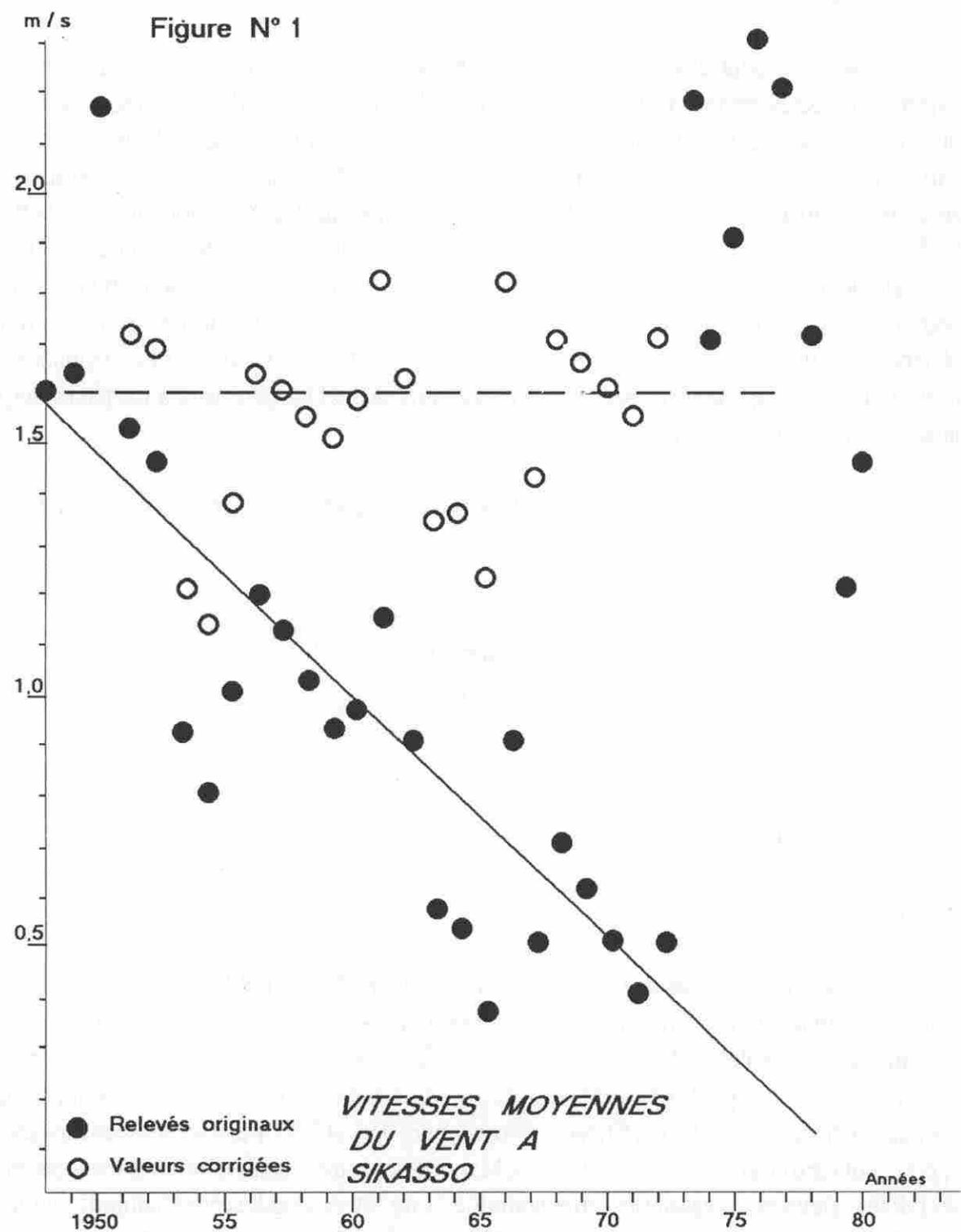
$B = 0,0087653$

$C = 0,18518$

c - L'humidité de l'air.

Souvent on ne dispose que des extrêmes journaliers de l'humidité relative. On doit donc calculer l'humidité relative moyenne à partir de ces données. La FAO préconise l'emploi de la demi somme dans son Bulletin d'irrigation et de drainage N°24. Si on compare les résultats avec la valeur réelle obtenue par le pourcentage des tensions de vapeurs on peut mettre en évidence une corrélation linéaire avec des coefficients compris entre 0,91 et 0,98. Dans le plus mauvais des cas le pourcentage d'erreur reste inférieur à 10%. Mais la demi somme sous-estime systématiquement les faibles valeurs et sur-estime les fortes humidités. En effet en période sèche l'humidité minimale du milieu de journée est très basse par rapport à la moyenne. Inversement une valeur extrême trop élevée, correspondant souvent à une pluie, va provoquer une estimation trop forte.

En utilisant les relations thermodynamiques la tension de vapeur Ed peut être estimée avec la température moyenne et l'humidité relative moyenne par emploi de la formule qui donne Ea , la tension de vapeur saturante en fonction de la température. Le calcul peut être effectué dans l'autre sens une humidité relative étant calculée en connaissant la tension de vapeur et la



Le principe de la correction est de remplacer la droite de régression de la période de "dégradation" des données, soit suivant la droite de tendance des autres données, soit comme sur la figure suivant une horizontale correspondant à une valeur moyenne. Ensuite il faut corriger les valeurs journalières par rapport à cette nouvelle droite. Le choix est entre une correction géométrique en multipliant les données par le rapport entre l'ordonnée de la droite corrigée et celle de la droite de régression pour une année donnée et une correction arithmétique en ajoutant la différence d'ordonnées.

température. La formule est $\text{Humidité relative} = 100 \times (\text{Ed} / \text{Ea})$. En fait il s'agit souvent de vérifier les calculs faits sur les TCM.

d - La correction des mesures à 3 observations par jour.

Les stations climatologiques et agroclimatologiques généralement, ne font que trois séries d'observations par jour. Les heures de ces observations sont théoriquement bien codifiées mais il arrive qu'il y ait des différences d'une station à l'autre. Dans un pays très étendu d'est en ouest deux stations situées à chaque extrémités ont pour la même heure locale des heures solaires très différentes. Pour utiliser au mieux ces observations il faut les replacer à l'heure astronomique vraie. De plus on reconstitue la courbe de variation des températures sèches et humides en admettant qu'elle s'accorde à deux branches sinusoïdales: l'une entre le minimum de température au lever du soleil et le maximum à 13 heures solaires, l'autre entre le maximum et le minimum du jour suivant. C'est d'ailleurs la méthode employée pour calculer les moyennes de températures diurnes et nocturnes. Ce procédé est intéressant s'il manque des points pour la cartographie mais il nécessite un gros travail de saisie car si on souhaite calculer également l'humidité de l'air il faut pour chaque journée entrer dans le programme les 5 températures sèches et les 3 humides.

e - L'emploi des régressions.

Quand on observe une série de mesures qui se "dégradent", par exemple des mesures de vent, qui diminuent d'année en année, jusqu'au renouvellement de l'appareillage, il est recommandé de rétablir des valeurs vraisemblables pour ces données. Il suffit de calculer la régression des observations en fonction du temps, pendant la phase évolutive des mesures. Ensuite on fait pivoter la droite de régression pour la rendre horizontale à un niveau correspondant à la moyenne des autres mesures. Les valeurs doivent toujours conserver les mêmes écarts par rapport à la droite qui est revenues à un niveau vraisemblable. La figure N° 1 qui représente les vents moyens mesurés à Sikasso illustre la méthode employée. Les données ainsi normalisées sont homogènes avec le reste de la série. Dans certains cas, en bordure de mer il est impossible de faire des interpolations car il n'y a pas de stations de part et d'autre du point à reconstituer. On peut alors faire une régression multiple avec les stations avoisinantes pour estimer les valeurs manquantes. Dans ce cas il faut porter une très grande attention aux valeurs extrêmes qui résultent du calcul car elles peuvent être anormales.

1.2.4.2. ESTIMATIONS PAR INTERPOLATIONS

Ici on ne reconstitue pas les données à partir de valeurs d'autres paramètres qui leur sont liés par des relations physiques ou statistiques. Au contraire on utilise les données connues du paramètre à condition qu'elles encadrent la valeur manquante soit dans le temps ou soit dans l'espace.

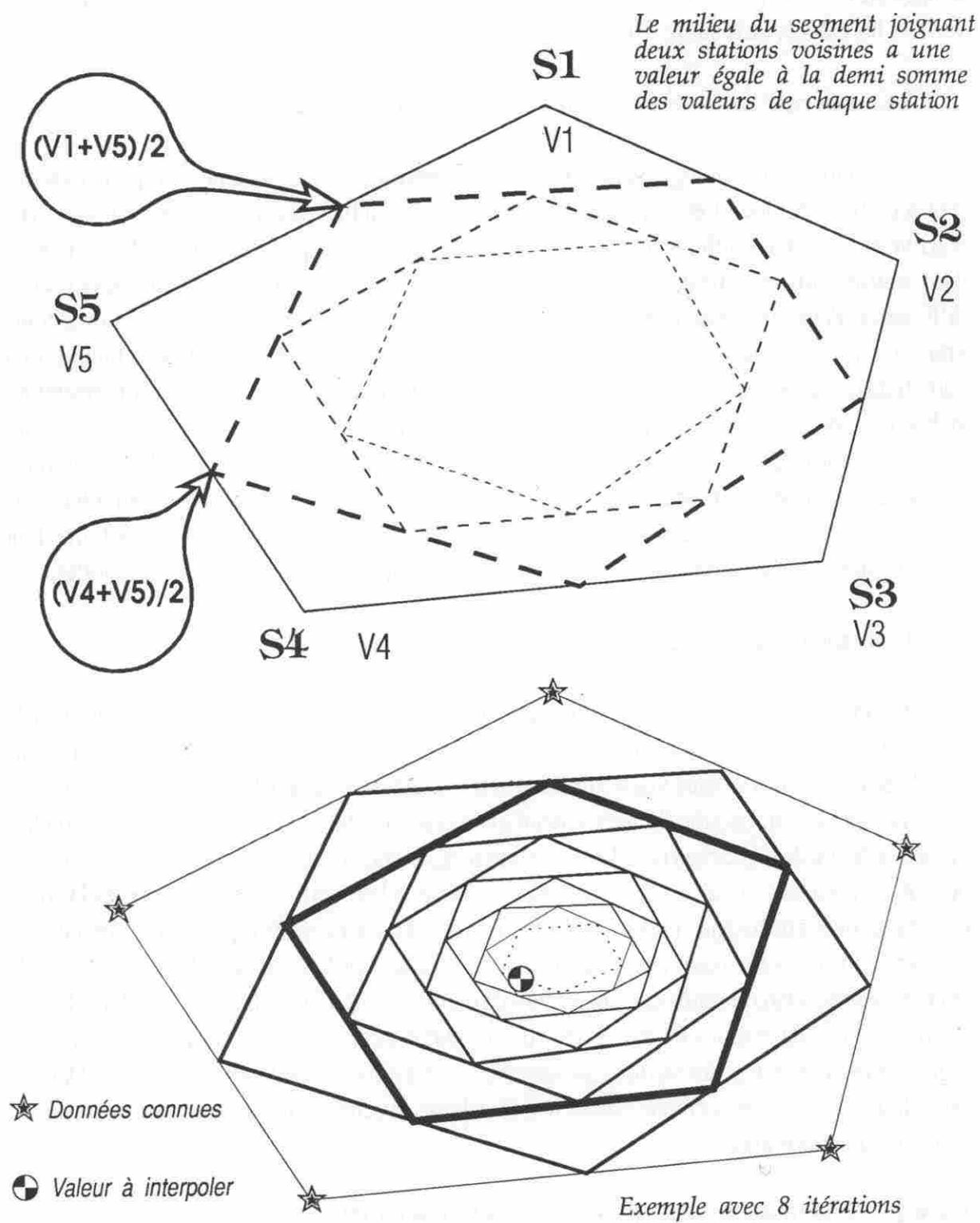


Figure N° 2

Quand le dernier polygone dépasse le point à calculer la valeur du sommet le plus proche est prise comme résultat de l'interpolation. Si on calculait la valeur exacte en utilisant les trois sommets les plus proches entourant le point la précision ne serait plus grande que de quelques centièmes d'unité de mesure.

a - L'interpolation temporelle.

Il s'agit en fait de calculer la moyenne des deux valeurs encadrant la valeur manquante en admettant que la variation a été linéaire. Cette méthode également testée par le CIEH donne souvent des erreurs importantes en particulier pour la tension de vapeur, le vent et les températures extrêmes. Si le paramètre recherché évolue de façon linéaire dans le temps, la valeur interpolée sera très proche de la donnée réelle. Au contraire, si la variabilité du phénomène étudié est importante la valeur interpolée risque de s'écarte de la mesure réelle mais restera très proche de la valeur moyenne sur la période de temps considérée. Cela montre la prudence avec laquelle on utilisera cette méthode pour des valeurs journalière alors qu'elle devient convenable au niveau décadaire et bonne au niveau mensuel.

Dans l'interpolation temporelle on fait l'estimation des données manquantes en formulant l'hypothèse que les variations se font toujours sensiblement dans le même sens d'une année à l'autre. Cette hypothèse est déjà retenue pour faire des interpolations décadiques à partir de données mensuelles. A ce moment le calcul des données manquantes se pratique comme dans un essai agronomique en blocs de Fisher. Dans cette optique, les années doivent être considérées comme des répétitions et les valeurs suivant le pas de temps requis (mensuel, décadaire) sont autant d'objets variant aléatoirement d'une année à l'autre mais toujours proportionnellement.

b - L'interpolation spatiale.

A une date donnée, on travaille dans l'espace géographique à partir des données connues sur les stations voisines. Diverses méthodes sont utilisables pour faire les estimations: les polygones de Thiessen, le krigeage, la méthode des polygones itératifs, etc. Pour toutes ces méthodes, des poids relatifs sont calculés pour la contribution des stations connues à l'évaluation de la donnée recherchée. Une précaution est à prendre: éviter l'influence souvent importante de la géographie. Ceci est possible nous l'avons vu pour les températures et la tension de vapeur. Pour les insolations il faut choisir les stations voisines le plus près possible du parallèle de localisation de la station à interpoler.

L'interpolation par polygones itératifs (figure N° 2) permet de déterminer la valeur d'un paramètre à partir des données connues des stations voisines à la même date. Les stations voisines sont les sommets d'un polygone qui entoure le point à estimer. A chaque sommet on attribue la valeur du paramètre mesuré à la station correspondante. On calcule les coordonnées du milieu de chaque côté auquel il est affecté la demi somme des valeurs des extrémités du segment. Chaque milieu devient le sommet d'un polygone plus petit inscrit dans le premier. On continue ainsi de suite jusqu'à la rencontre du point recherché auquel est attribuée la valeur du sommet le plus proche. La méthode est automatisée et le module de calcul est décrit plus loin dans le chapitre sur les outils informatiques.

L'amplitude d'erreur est souvent grande pour les températures maximales ou minimales qui sont très dépendantes de leur localisation géographique. Une amélioration de la méthode consiste à utiliser un modèle numérique de terrain. Un fichier des altitudes moyennes a été constitué à la maille employée pour les calculs des cartes de l'atlas. Pour les températures maximales et minimales, ainsi que pour les tensions de vapeur on pratique au préalable une correction d'altitude en rapportant leurs valeurs au niveau de la mer avec les formules topoclimatiques. L'interpolation est ensuite faite à l'altitude zéro en ne tenant plus compte que de la seule variabilité dans l'espace. On remet alors les valeurs à leur altitude réelle par le calcul inverse. Cette précaution diminue encore le pourcentage de l'erreur.

c - La comparaison des deux méthodes d'interpolation

Les paramètres ayant naturellement de forts coefficients de variation sont les plus difficiles à interpoler. Ainsi le vent qui résulte d'un grand nombre de conditions géographiques locales doit être interpolé avec prudence. Il faut bien veiller à ce que les mesures de vitesse entrant dans le calcul d'interpolation soient rapportées à la même hauteur de 2 mètres. La validité des interpolations a été testée selon un processus proposé par le CIEH en calculant des valeurs manquantes fictives qui, en fait, étaient connues. Les tests ont été faits à la fois pour des interpolations décadiques et des interpolations quotidiennes. Les couples obtenus, composés d'une valeur réelle et d'une valeur interpolée ont permis les tests d'erreur. Les deux méthodes ont été employées ainsi que la variante avec correction d'altitude. Les écarts entre les valeurs interpolées et les réelles sont exprimés à la fois en valeur algébrique pour estimer l'écart moyen et pour le calcul d'erreur en valeur absolue. Dans les tableaux les résultats sont calculés en pourcentages des valeurs moyennes des paramètres.

Il était évident que les erreurs seraient plus faibles dans le cas des interpolations décadiques qui par leur nature éliminent les fluctuations journalières. Les deux méthodes donnent des résultats identiques et acceptables pour les températures moyennes. Pour les températures extrêmes l'interpolation temporelle donne une amplitude d'erreur plus importante. Dans l'ensemble l'interpolation spatiale est la plus fiable et la correction d'altitude apporte un gain de précision appréciable.

METHODE D' INTERPOLATION	INTERPOLATION TEMPORELLE	INTERPOLATION SPATIALE		
		SANS CORRECTION	AVEC CORRECTION d'altitude	
TESTS	ϵ %	$ \epsilon $ %	ϵ %	$ \epsilon $ %

Interpolations décennales

T. MOYENNE	1,95	3,8	1,6	3,6	1,25	2,9
T. MAXIMALE	2,6	7,53	0,1	4,4	,9	3,1
T. MINIMALE	4,8	6,1	-1,6	5,9	1,1	3,5
H. RELATIVE	8,7	11,2	-1,99	6,8	-	-
TENS. VAPEUR	7,8	13,45	-1,48	5,4	-0,74	4,5
INSOLATION,	1,8	7,5	-1,46	6,2	-	-
VENT MOYEN	7,2	12,0	15,2	25,2	-	-

Interpolations journalières

T. MOYENNE	2,19	8,3	3,6	7,3	2,5	6,4
T. MAXIMALE	12,8	17,5	-2,1	14,4	,9	8,3
T. MINIMALE	14,4	16,31	3,16	15,9	3,1	9,3
H. RELATIVE	10,7	21,12	-9,9	16,8	-	-
TENS. VAPEUR	12,8	24,5	8,4	15,4	7,4	6,5
INSOLATION,	9,8	15,7	4,6	6,2	-	-
VENT MOYEN	27,1	31,0	18,1	25,2	-	-

1.3. UTILISATION DES DONNEES.

Les données peuvent être employées de deux façons, soit ponctuellement station par station pour faire des analyses statistiques, soit globalement pour calculer des champs sources de représentations graphiques.

1.3.1. TABLEAUX DE DONNÉES.

Par station chaque paramètre peut faire l'objet du calcul de tableaux statistiques, soit par quantiles, soit par ajustement à une loi de distribution. Une série de tableaux fait partie de la publication de l'Atlas. Ce sont pour la plupart des récapitulatifs statistiques décadiques présentés en colonnes par niveaux de probabilités de dépassement qui encadrent les moyennes ou les médianes. Attention au fait que les hydrologues travaillent en probabilités de non dépassement; ici c'est le contraire ou plutôt le complément à 1. Les probabilités retenues présentent des occurrences annuelles simples:

- la médiane ou la moyenne (P=0,50)	soit 1 an sur 2
- les tierciles (P=0,33 et P=0,66)	soit 1 an sur 3 et 2 ans sur 3
- les quartiles (P=0,25 et P=0,75)	soit 1 an sur 4 et 3 ans sur 4
- les quintiles (P=0,20 et P=0,80)	soit 1 an sur 5 et 4 ans sur 5
- les déciles (P=0,10 et P=0,90)	soit 1 an sur 10 et 9 ans sur 10
- les vingtiles (P=0,05 et P=0,95)	soit 1 an sur 20 et 19 ans sur 20
- les centiles (P=0,01 et P=0,99)	soit 1 an sur 100, 99 ans sur 100

Ces tableaux devraient être une aide à la prise de décision puisqu'ils fournissent une évaluation du risque pour les paramètres concernés. En effet on peut estimer la probabilité d'une valeur en admettant qu'entre deux seuils de probabilité la variation est approximativement linéaire. Ainsi on peut, par exemple, obtenir la probabilité d'obtenir 20 millimètres de pluie en début de campagne, ou bien de dépasser une température moyenne de 25°C, ou encore d'être en dessous d'une température minimale de 15°C. Il suffit pour cela d'interpoler entre les probabilités des valeurs encadrant le seuil souhaité. D'une façon générale les tableaux statistiques donnent une vue de l'amplitude des variations des paramètres climatiques. Il faut simplement faire attention à l'indépendance statistique des valeurs et ne pas additionner ou soustraire les valeurs de deux décades consécutives si la nature du tableau ne le permet pas. Des logiciels informatiques écrits pour éditer divers tableaux de données sont décrits plus loin.

D'autres tableaux de présentation des données sont possibles, selon les souhaits des utilisateurs. Ce sont, par exemple, des tableaux récapitulatifs décadiques ou mensuels. Mais des traitements numériques peuvent être effectués pour estimer les divers seuils de probabilité, pour répartir les valeurs en classes, pour rechercher les valeurs extrêmes et leurs statistiques. Des calculs spéciaux permettent par exemple d'avoir les températures nocturnes et diurnes afin d'obtenir les différences nyctémérales utiles pour connaître le développement de

certaines plantes. L'usage le plus significatif des données est le calcul de l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Penman modifiée. En effet ce calcul combine les températures moyennes, la tension de vapeur, l'insolation, l'altitude du lieu et emploie un coefficient de correction dû au vent en fonction d'un seuil d'amplitude thermique.

1.3.2. PROBLÈMES POSÉS PAR LA CARTOGRAPHIE.

Si nous voulons une bonne précision cartographique il faut prendre en compte le plus grand nombre possible de stations pluviométriques ou climatiques suivant les cas. En effet les interpolations, pour le calcul des champs, ont plus de signification entre points rapprochés qu'entre points éloignés. Le problème est de savoir si les facteurs locaux interfèrent sur la variabilité spatiale des champs de valeurs. Si c'est le cas on doit identifier le facteur causal, proposer sa loi d'intervention et calculer son champ de variation. Le premier facteur local est l'orographie. Pour bien comprendre les variations spatiales des paramètres agroclimatiques il faut observer le relief de l'Afrique de l'Ouest. On voit notamment que la République du Niger est barrée au Nord par un axe Hoggar-Aïr, que le Tchad est un bassin bordé par le Tibesti, le Darfour, l'Ennedi, les Monts des Bongo et les Monts du Cameroun. La mousson qui pénètre dans le bassin du Congo est déviée vers le Nord au contact du Kivu et remonte le long des Monts situés à l'Ouest du Soudan ce qui explique la remontée des isohyètes à la frontière tchado-soudanienne. L'influence de l'altitude est importante sur presque tous les paramètres climatiques et vient s'ajouter aux influences de la mer et de la continentalité.

1.3.2.1. LA MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE.

Les cartes ne sont pas dessinées manuellement mais automatiquement avec le logiciel SURFER de Golden Software Inc., Colorado. C'est un logiciel qui permet de calculer les interpolations spatiales de données irrégulièrement distribuées sur le terrain. Le résultat du calcul est une grille de valeurs espacées à des intervalles réguliers et permettant le tracé de courbes d'isovaleurs. Le logiciel produit des interpolations acceptables si on tient compte d'un certain nombre de règles d'utilisation. La méthode d'interpolation à retenir est le krigage qui emploie une formulation statistique tenant compte de la variabilité des données. Le calcul n'est pas le plus rapide mais donne des résultats paraissant plus réalistes qu'avec les méthodes simples d'interpolation triangulaire ou par polynômes. Les méthodes utilisant une fonction fixe de la distance du point à interpoler aux observations, généralement l'inverse de la distance à la puissance 1 ou 2, supposent que l'atmosphère se comporte suivant des règles uniquement géométriques. Eric BERTRAND (1991) a testé toutes les méthodes pour voir celles qui créaient des points aberrants.

Le système de références peut apporter des distorsions. En effet SURFER utilise des données qui sont supposées linéarisées dans un système orthogonal XY. Or si le degré de latitude reste constant avec une distance de 111,11 km, le degré de longitude diminue en allant

vers le nord. On prend alors une projection plate carrée qui admet des longitudes constantes et égales aux latitudes. Ceci est sensiblement exact tant qu'on ne s'éloigne pas trop de l'équateur. Une fois le calcul effectué on devrait refaire une projection, avec ses règles propres, pour replacer les données dans leur position originelle et ne pas garder les distorsions qui dilatent les longitudes.

Un second point faible du logiciel est son comportement de boîte noire dans les calculs de krigage. On sait que la dérive retenue est une dérive linéaire mais le calcul du variogramme échappe à l'utilisateur. Or le variogramme est la courbe qui décrit la variance des données en fonction de leurs distances entre elles. Il serait judicieux de choisir les paramètres de la dérive suivant le type de donnée à cartographier. Ce n'est pas possible actuellement.

L'analyse des erreurs d'estimation ne nous est pas permise. L'accès à ces résultats serait précieux pour modifier éventuellement l'implantation des points d'observation. On parle de stations automatiques, leur emplacement pourrait être raisonné avec une carte des erreurs théoriques actuelles.

Malgré ces quelques défauts SURFER est un logiciel puissant avec des menus explicites très faciles à comprendre. Le traitement par lot (BATCH) permet de lancer des calculs pendant la nuit ou les heures creuses d'utilisation des micro-ordinateurs. La sélection des points pour le calcul d'interpolation doit être faite par octant : le plan est divisé en 8 parties et les valeurs les plus proches du point à interpoler sont cherchées successivement dans chaque octant. Ceci est plus long mais donne de meilleurs résultats dans les zones marginales où le nombre d'observations est peu important.

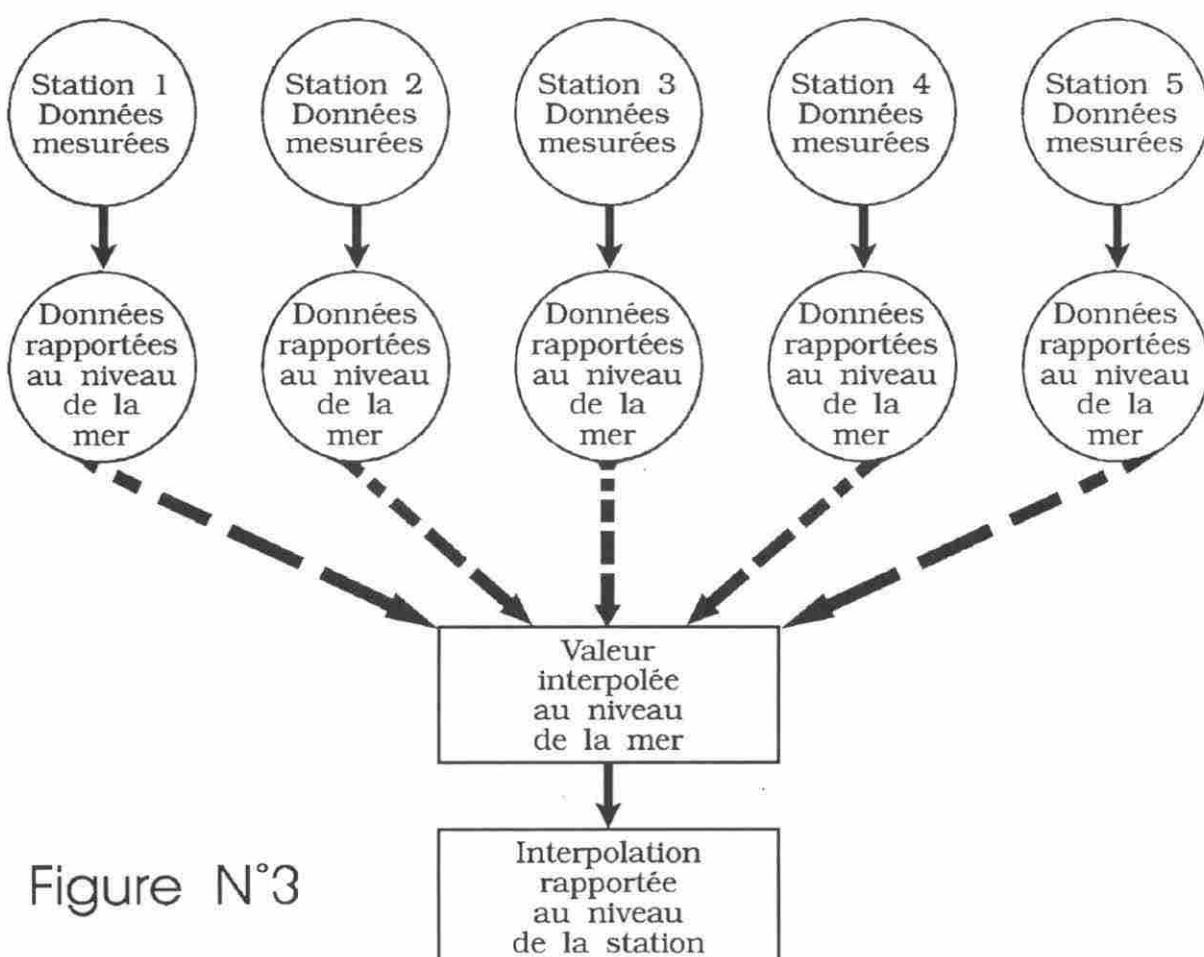
1.3.2.2. LE SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE.

Nous avons retenu une grille de calcul contenant 16 point par degré carré. Cette grille permet d'une part d'obtenir une bitmap en considérant chaque point calculé comme un pixel, mais d'autre part elle est la base de détermination des isolignes représentant le champ climatique pour le paramètre considéré. Il serait vain d'augmenter le nombre de points calculés car la précision résultant de la densité du réseau pluviométrique avec ses quelques 1200 points ne permet pas d'aller au delà. Le même type de grille est utilisé pour la topographie bien que dans ce cas la précision soit un peu faible et entraîne une simplification qui conserve malgré tout une bonne représentation des reliefs. Nous avons adopté le même système de grille pour chaque facteur climatique afin de pouvoir les comparer et les combiner correctement. La taille du pixel représente 27,8 kilomètres dans la direction Nord-Sud. Cette taille est d'ailleurs très voisine de celle du modèle français Péridot (Prévisions à échéances rapprochées intégrant des données observées et télédéetectées). On peut donc penser que l'estimation des champs est suffisamment précise avec ce choix méthodologique. Les champs peuvent être combinés point par point ou par juxtaposition de vecteurs. Les deux options

permettent l'obtention de cartes composites mettant en relation différents types d'informations. Les systèmes GRIB et BUFR préconisés par l'OMM pour stocker et manipuler les champs de données peuvent également être alimentés par nos grilles de paramètres avec éventuellement quelques opérations d'interpolation ou de compression des données.

1.3.2.3. TOPOGRAPHIE ET PRÉSENTATION DES PARAMÈTRES.

Les paramètres climatiques qui varient en fonction de l'altitude ne sont pas mesurés avec une densité suffisante de stations pour permettre une interpolation cartographique directe qui représenterait correctement l'influence de l'altitude. Ainsi aucune mesure n'existe sur le Tibesti et les stations d'altitude comme Tamanrasset, Djanet dans le Hoggar ou Jos sur son plateau et les stations d'altitude du Cameroun et du Soudan dans les pays frontaliers créent des gradients isotropes non conformes au relief. Ces stations sont hors CILSS mais on ne peut cartographier les phénomènes climatiques sans tenir compte des observations au delà des frontières. Pour tenir compte de la topographie la méthode retenue se décompose en deux phases (figure N° 3). Dans un premier temps on rapporte les données au niveau de la mer pour calculer une grille d'interpolation spatiale en gommant les effets de l'orographie. Dans un second temps on combine cette grille avec la grille des altitudes topographiques en mètres pour recalculer les valeurs



vraisemblables en fonction du relief. Le problème qui se pose est celui des gradients d'altitude à employer car les gradients varient en fonction de la localisation et de certains facteurs locaux. Des valeurs moyennes ont été retenues dans un soucis de simplification et les cartes obtenues dans les différentes étapes restent vraisemblables sans faire apparaître d'anomalies flagrantes. Cette vérification pas à pas montre que la méthode est applicable. Les facteurs climatiques concernés par cette méthode sont principalement les températures et la tension de vapeur bien que l'insolation puisse avoir le même traitement mais sa variabilité est surtout due à sa localisation géographique.

On rapporte la tension de vapeur au niveau de la mer, et inversement, en tenant compte de la variation de pression atmosphérique avec l'altitude, la pression de vapeur d'eau étant une pression partielle de celle-ci. On utilise la formule empirique proposée par Hann en 1915 :

$$e / e_0 = 10^{(-H / 6300)}$$
 où

e_0 : Tension de vapeur au niveau de la mer

e : Tension de vapeur à l'altitude H mètres

H : Altitude en mètres

Pour les températures on prend la formule proposée par l'ICAN en 1924 pour des altitudes comprises entre 0 et 11 000 mètres:

$$T = T_0 - 0,0065 H \quad \text{avec}$$

T_0 : Température au niveau de la mer

T : Température à l'altitude H

H : Altitude en mètres

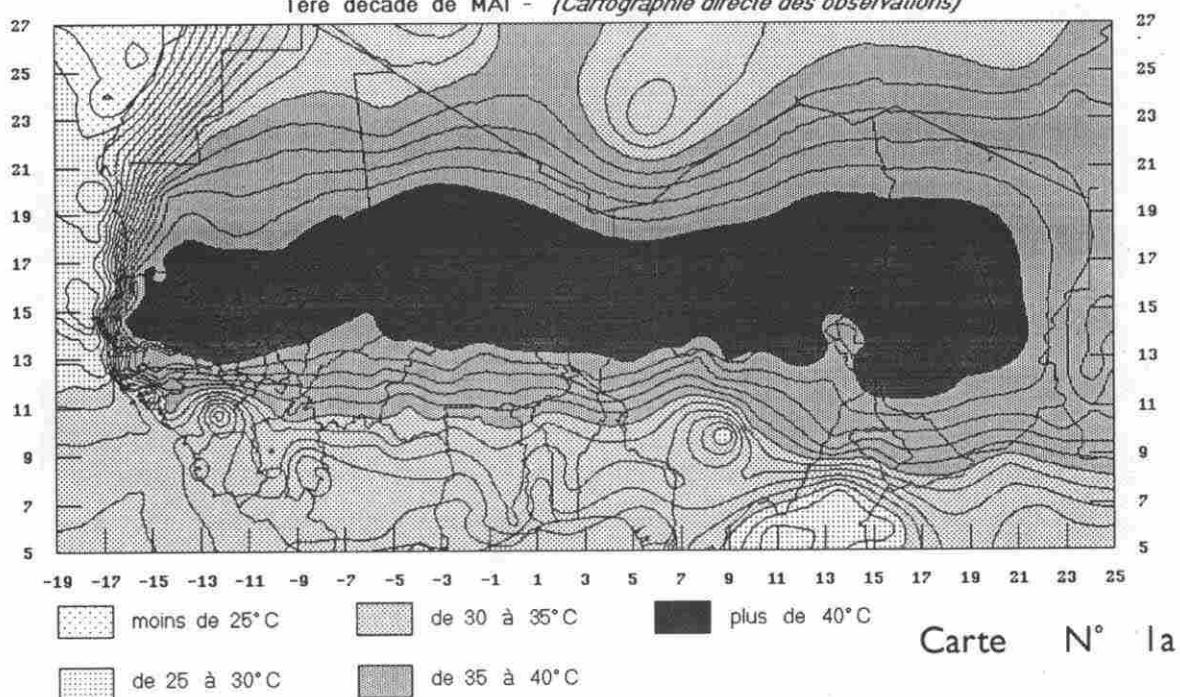
Le gradient normal moyen de $6,5^\circ C$ pour 1000 mètres a été retenu. En fait les conditions de variation adiabatiques sont liées au niveau d'humidité de l'air et le coefficient de correction est compris entre $1^\circ C$ pour 100 mètres, en air sec et $0,5^\circ$ par 100 m en air saturé mais une étude complète topoclimatologique devrait être entreprise pour reformuler le problème.

Pour les évapotranspirations le problème est plus complexe car sont fonction de l'altitude, non seulement les paramètres de température et de tension de vapeur mais également la radiation reçue. Dans ces conditions une cartographie directe à partir des points de calcul de l'ETP entraîne des biais qui sont évités en travaillant point par point sur les grilles de champs climatiques décadiques. Pour chaque point de la grille d'ETP à calculer on lit les valeurs correspondantes du même point dans les fichiers de températures moyennes, maximales, minimales, de tension de vapeur, d'insolation, de vitesse du vent, d'altitude. La valeur de l'ETP est alors calculée puis stockée dans le fichier grille qui est ainsi constitué en fin d'opération.

A titre d'exemple les cartes suivantes montrent le cheminement de la cartographie de la température avec ou sans emploi du modèle numérique de terrain. Toutes les étapes sont représentées

TEMPÉRATURES maximales moyennes - Période 1951-1980

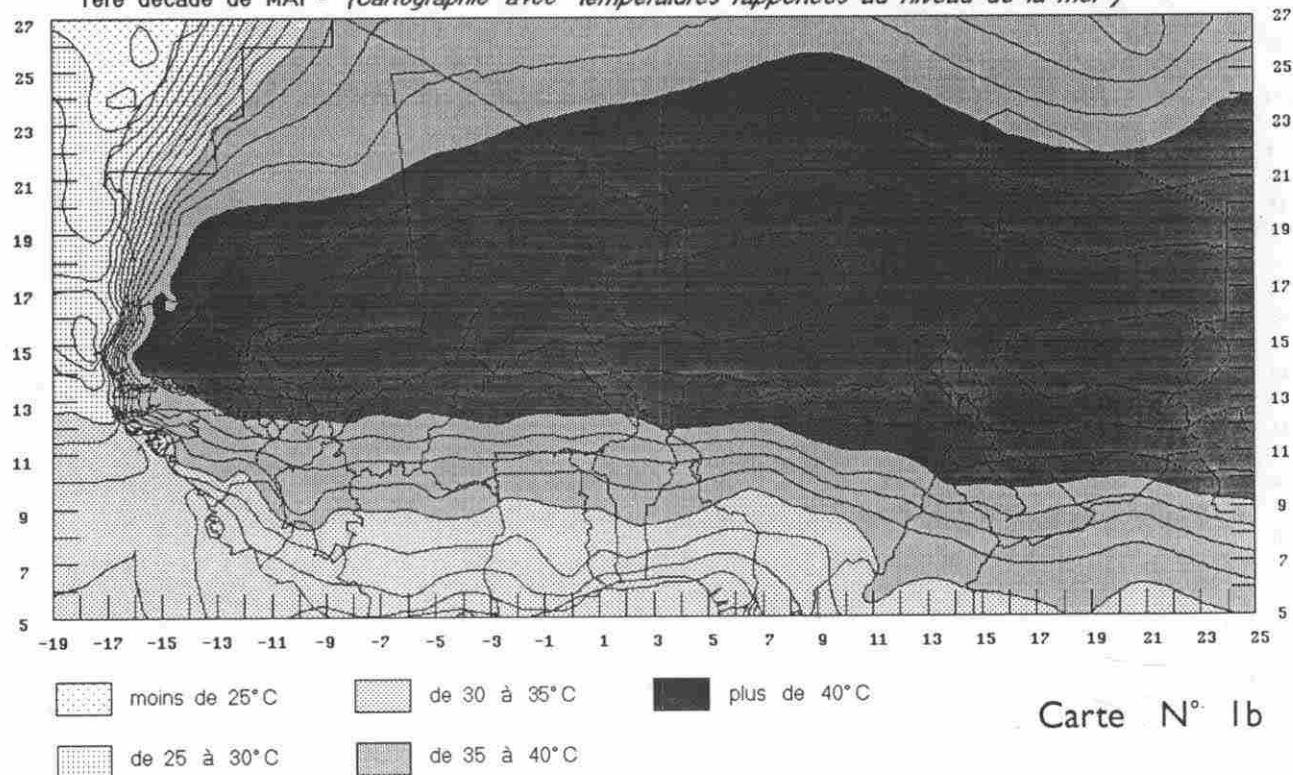
1ère décennie de MAI - (Cartographie directe des observations)



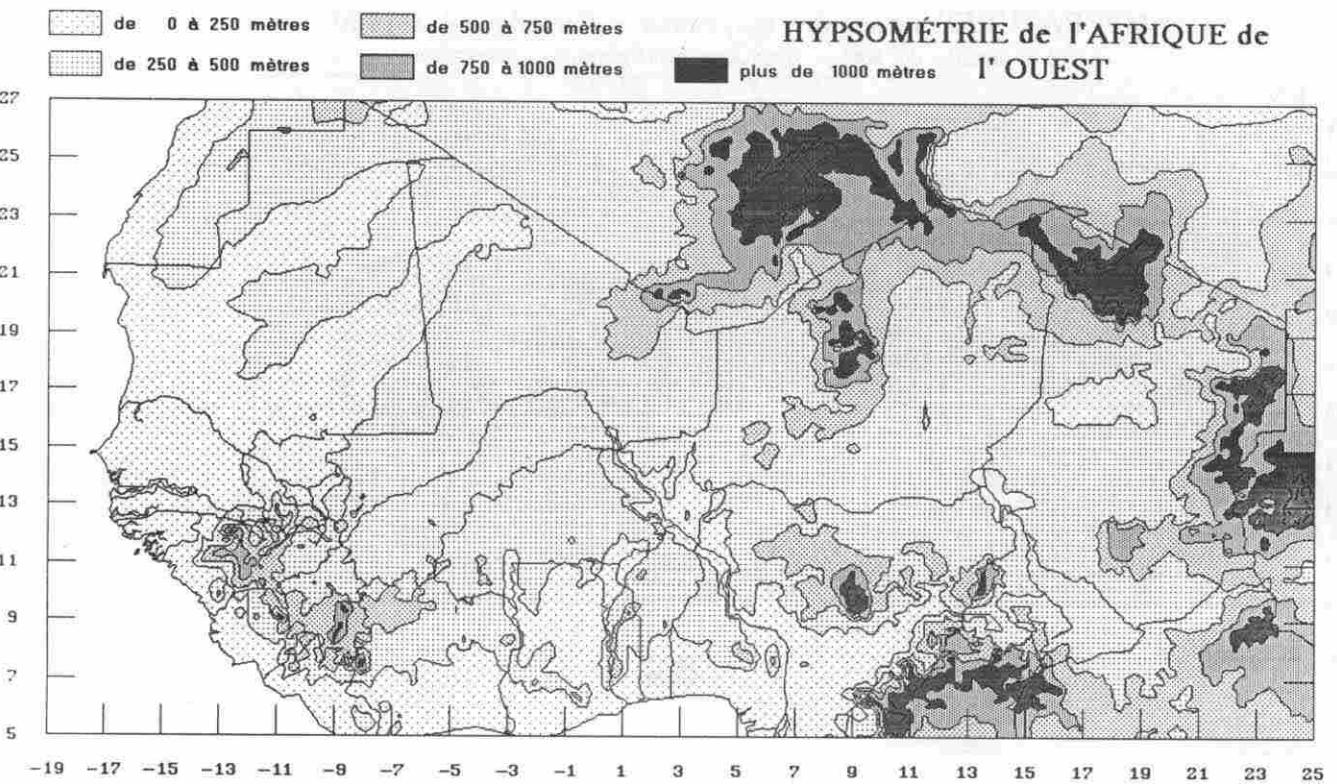
Tamanrasset et Jos induisent des gradients homogènes sans rapport avec la réalité. Les zones de l'Aïr et du Tibesti sont absentes.

TEMPERATURES maximales moyennes - Période 1951-1980

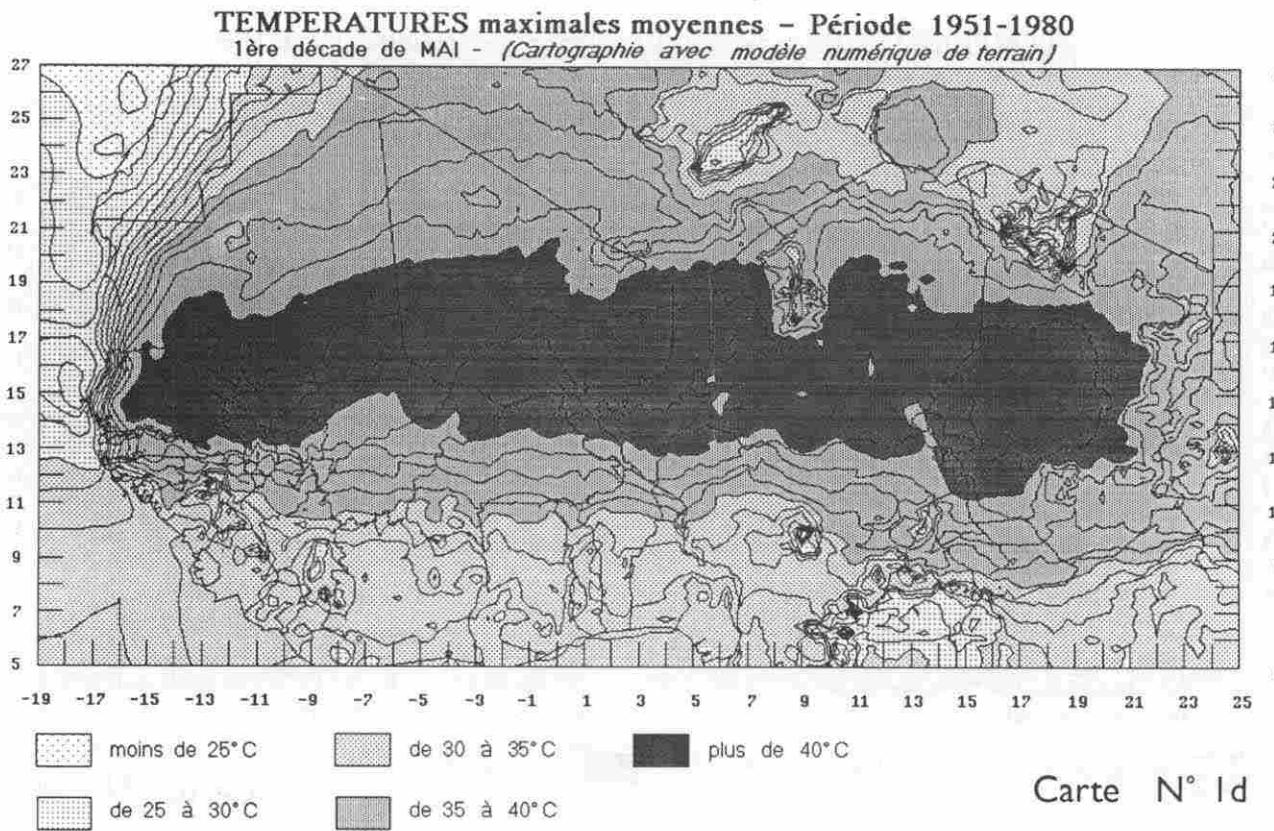
1ère décennie de MAI - (Cartographie avec températures rapportées au niveau de la mer)



La carte au niveau de la mer est simplifiée et montre l'allure zonale des températures maximales. L'emplacement de l'Équateur thermique apparaît nettement. Il faut noter l'accroissement de la plage des températures supérieures à 40° Celsius et la disparition des zones d'altitude. L'influence océanique se manifeste toujours sur la côte ouest.



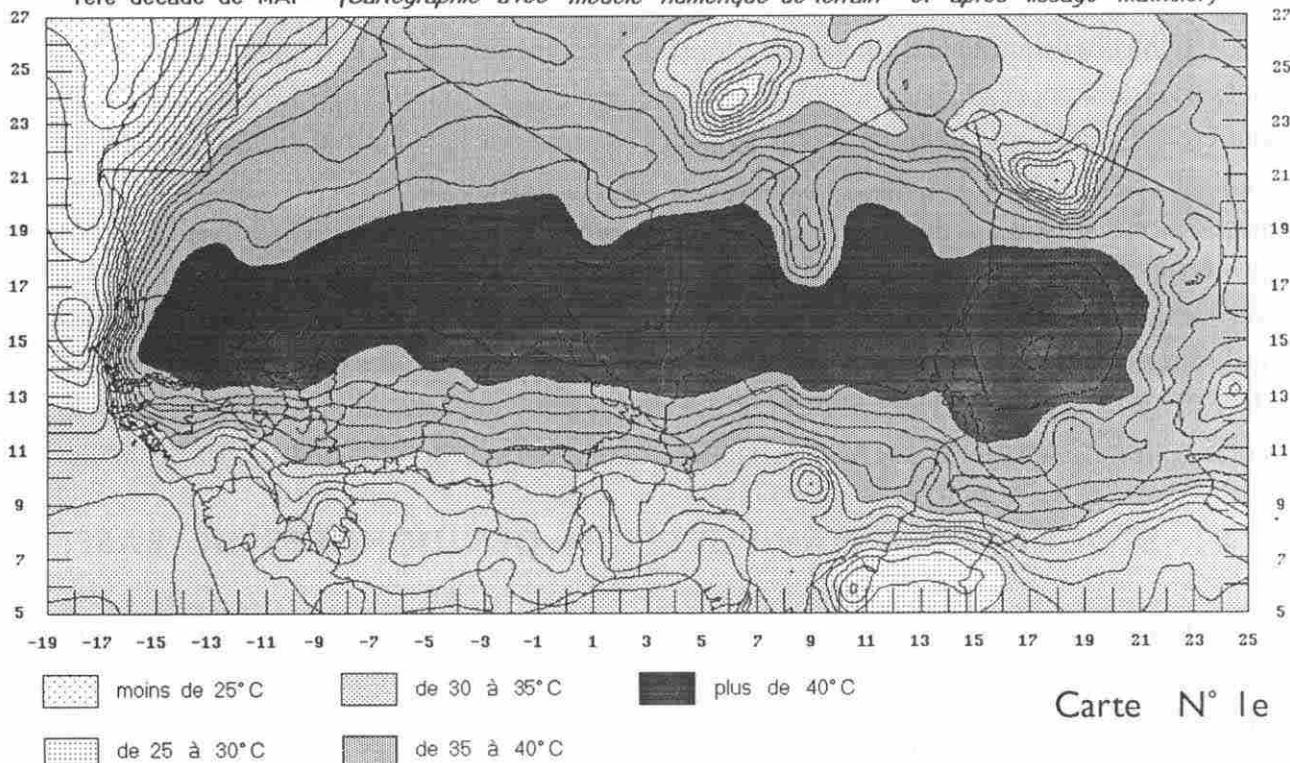
La carte montre bien les reliefs qui entourent le Tchad et l'est du Niger. **Carte N° 1c**



Les températures du Hoggar sont corrigées et le Tassili des Iforas est bien marqué. Il en est de même pour les autres massifs montagneux qui n'apparaissaient pas sur la carte N° 1a: le Tibesti, les Monts Kirdi du nord Cameroun, le Darfour, l'Ennedi, l'Aïr au Niger.

TEMPERATURES maximales moyennes - Période 1951-1980

1ère décennie de MAI - (Cartographie avec modèle numérique de terrain et après lissage matriciel)



La carte N° 1e représente la température dessinée à partir du fichier résultant de la correction du fichier au niveau de la mer par le fichier des altitudes. Ce fichier des températures adaptées à la topographie est utilisé ensuite pour le calcul de l'ETP. Il contient les valeurs vraisemblables du champ des températures. Mais le tracé des isothermes qui en découle est un peu compliqué pour une représentation synthétique. Aussi avons nous fait un lissage matriciel pour simplifier le dessin. On peut comparer le résultat à la carte N° 1a obtenue par la cartographie directe des valeurs de températures connues dans la zone. Les différences les plus sensibles sont d'une part la mise en évidence des massifs montagneux bien que simplifiés par le lissage, d'autre part la région du Lac Tchad est remise en conformité avec l'ensemble de la carte. En effet dans cette région le poids des six stations qui entourent le lac provoquait une distorsion des isothermes d'autant plus forte qu'il y a peu de stations au nord et à de grandes distances (Bilma et Faya).

1.4. LES OUTILS INFORMATIQUES.

L'informatique a été d'un grand secours. Les mini-ordinateurs PDP puis VAX de DEC ont servi de support aux gros fichiers informatiques de base. Mais très rapidement ces fichiers ont été segmentés par paramètre et par poste pour faciliter les manipulations de saisie, de contrôle et d'édition. Les micro-ordinateurs étaient alors capables d'effectuer les tâches nécessaires. Nous avons déjà cité des logiciels du commerce mais avec des besoins spécifiques il a fallu développer toute une batterie de programmes pour la saisie, les corrections, les vérifications. Ensuite pour répondre aux demandes des utilisateurs nous avons écrit des utilitaires de conversion de formats, des routines d'interprétation des données, des modules de calculs statistiques. L'ensemble représente un outil cohérent non seulement pour la constitution et la gestion d'une base de données, mais aussi pour son exploitation à la demande.

1.4.1. STOCKAGE ET MANIPULATION DES DONNÉES DE BASE.

Les données sont converties en entiers et stockées sous forme binaire. Chaque valeur occupe 2 octets. Un système d'indexation permet de saisir les années dans un ordre quelconque et la taille du fichier dépend uniquement du nombre d'années saisies. Les fichiers créés sont petits puisqu'un paramètre avec cent ans de mesures journalières n'occupe que 80 Ko. Dans un second temps les fichiers vérifiés et peuvent être compressés avec PKZIP et même stockés sous une forme autodécompressible. Le gain de place est encore accru de 2 à 10 fois suivant les paramètres et les stations d'observations. Le reformatage des fichiers sous une forme ASCII permet leur portabilité vers des utilisateurs qui n'utilisent pas nos programmes.

1.4.2. MENU ET APPEL DES PROGRAMMES.

Le menu général, lancé en tapant CLIMAT, donne accès à des sous menus qui regroupent les modules logiciels par nature de problèmes à traiter. Les programmes sont directement exécutables sous MS-DOS à l'appel de leur nom et ne nécessitent pas de runtime. Ils utilisent généralement, en lecture, les fichiers dans lesquels les données sont stockées au format indexé binaire, mais certaines routines acceptent d'autres formats. Si on dispose de valeurs il faut s'assurer qu'elles sont au format compatible avec le module à activer. Dans le cas contraire il faut au préalable convertir les fichiers en binaire ou sous une forme utilisable par nos programmes.

L'achèvement de l'exécution de chaque routine appelée va entraîner le retour au menu général qui est réaffiché à l'écran tel qu'il figure ci-après. Pour sortir il suffit de taper T comme terminé. Les modules peuvent également être activés directement, sans passer par le menu général. A l'appel de leur nom tapé au clavier ils sont chargés en mémoire vive, prêts à démarrer.

L'affichage du menu est le suivant:

PROGRAMMES AGROCLIMATIQUES

Version du 28 Janvier 1992

-
- 1 SAISIE, MISE A JOUR ET EDITION
 - 2 CALCUL DES PARAMETRES CLIMATIQUES
 - 3 CONTROLES ET CORRECTIONS
 - 4 INTERPOLATIONS
 - 5 GESTION ET ECHANGE DE FICHIERS
 - 6 TABLEAUX STATISTIQUES
 - 7 BILANS HYDRIQUES

LEQUEL

1.4.3. DESCRIPTION DES MODULES INFORMATIQUES.

Avec la présentation du menu affiché à l'écran une analyse rapide de chaque module du groupe est donnée. Elle présente son but, renseigne sur ses conditions d'emploi et décrit les résultats attendus. Eventuellement la ou les références méthodologiques sont rappelées pour justifier le choix de la procédure retenue. Les logiciels sont conversationnels et nous avons tenté de supprimer toute ambiguïté dans les réponses à faire aux invitations du programme. De nombreux modules sont prévus pour fonctionner en traitement par lot ce qui permet de lancer un grand nombre d'opérations hors de la présence de l'utilisateur.

1.4.3.1. SAISIE, ÉDITION ET MISE À JOUR

***** MENU DES PROGRAMMES DE SAISIE

Version du 28 Janvier 1992

-
- 1 SAISIE
 - 2 SAISIE A PARTIR DE 3 OBSERVATIONS PAR JOUR
 - 3 MISE A JOUR ET EDITION

LEQUEL

Saisie

Les fichiers sont d'abord créés avec le descriptif complet de la station: son nom, son numéro de code, son altitude en mètres et ses coordonnées. La latitude et la longitude sont exprimées en degrés, minutes et éventuellement en secondes. Conventionnellement les latitudes au sud de l'Equateur et les longitudes à l'ouest du méridien d'origine sont négatives. Les valeurs sont saisies à volonté suivant trois pas de temps: journalier, décadaire ou mensuel. Si on dispose des valeurs quotidiennes le module de mise à jour permet de faire le calcul automatique des fichiers décadaires puis mensuels. Le module nécessite la saisie complète des données pour toute l'année. S'il manque des valeurs elles sont notées -999. Pour les pluies quotidiennes il est possible de créer directement un fichier vide qui sera complété ultérieurement par la mise à jour.

Le masque de saisie des références station est le suivant:

ANALYSES CLIMATIQUES		SAISIE DES DONNEES CLIMATIQUES
====	NOM DE LA STATION	*****
		CODE AGRHYMET *****
LATITUDE	*** *** ***	
LONGITUDE	*** *** ***	
ALTITUDE	*****	

Les écrans de saisie sont adaptés au pas de temps des données quotidiennes, décadaires ou mensuelles. Voici celui pour des valeurs décadaires:

ANALYSES CLIMATIQUES		SAISIE DES DONNEES CLIMATIQUES
NOM DE LA STATION	MAO METEO	NOM DU FICHIER 460008 DECADES
ANNEE 1990		1 2 3
	1 - JANVIER	
	2 - FEVRIER	
	3 - MARS	
	4 - AVRIL	
	5 - MAI	
	6 - JUIN	
	7 - JUILLET	
----- etc -----		

Saisie à partir de 3 observations par jour

Pour chaque paramètre, la saisie des trois données avec leurs heures d'observation permet en fait de reconstituer la courbe d'évolution journalière du paramètre et d'en reconstituer la moyenne. Le calcul de la courbe est amélioré si on dispose des mesures extrêmes minimum et maximum. En saisissant pour chaque observation les températures du thermomètre sec et du thermomètre mouillé le programme calcule l'humidité de l'air moyenne. Le programme calcule l'heure solaire des observations compte tenu de la longitude et il reconstitue les huit données trihoraires. Ces valeurs sont affichées à l'écran et les moyennes écrites dans un fichier servant de base pour un calcul d'ETP postérieur. Le fichier ainsi créé est en ASCII avec une ligne par jour. Si les résultats sont vraisemblables ils pourront être transférés dans un fichier binaire indexé par la module de reformatage.

Mise à jour et édition

Ce programme travaille avec les fichiers binaires indexés dont il affiche les valeurs à l'écran. En tapant le numéro de la case on peut modifier les valeurs en remplaçant une donnée absente par son estimation ou dans le cas des pluies en substituant la valeur mesurée à la donnée nulle résultant de la création d'une année vide proposée ci dessus. L'édition permet d'imprimer les données année par année et d'en calculer les moyennes qui seront imprimées seules ou précédées par l'ensemble des années utilisées pour le calcul. L'impression peut se faire au choix au pas de temps journalier, décadaire ou mensuel à la condition que les fichiers correspondants aient été constitués. Une autre option intéressante permet de créer le fichier au pas de temps inférieur. Ainsi les valeurs quotidiennes peuvent être condensées en valeurs décadiques et ensuite les valeurs décadiques servent à constituer le fichier mensuel.

1.4.3.2. CALCULS DE PARAMÈTRES CLIMATIQUES

***** MENU DES CALCULS DE PARAMETRES

Version du 28 Janvier 1992

- # 1 CALCULS : INSOLATION A PARTIR DE LA NEBULOSITE

2 TENSION DE VAPEUR OU HUMIDITE RELATIVE

3 CALCUL DE L'ETP PENMAN

4 CORRECTION D'ALTITUDE

LEQUEL

Insolation à partir de la nébulosité

Comme l'a proposé R.A.GOMMES (1983) dans sa publication de la FAO (pp 97-98) une estimation de l'ensoleillement peut être faite à partir de la nébulosité. Ce dernier paramètre étant plus souvent observé que l'insolation un tel programme est bien utile. Il utilise le nombre total d'octas observés dans la journée modulé par le nombre d'observations. Une formule polynomiale a été établie dans la région d'étude par régression multiple entre les mesures de nébulosité et d'ensoleillement pour plusieurs stations et sur plusieurs années. Le programme calcule la fraction d'ensoleillement qu'il rapporte à la durée astronomique du jour, à la latitude de la station, diminuée de 0,75 heure pour le temps pendant lequel le soleil est proche de l'horizon à l'aube et au crépuscule. Le programme est interactif mais il peut utiliser automatiquement un fichier binaire comprenant les valeurs totales de nébulosités qu'il transforme alors en durées d'insolation.

Tension de vapeur et humidité relative

Ici on utilise les formules classiques pour calculer l'humidité relative et la tension de vapeur en fonction des températures de thermomètres sec et mouillé. Nous avons retenu les formules proposées par le Smithsonian Institute pour le calcul de la tension de vapeur saturante à une température donnée. Les résultats sont affichés à l'écran et servent surtout à vérifier des données paraissant aberrantes. Le même programme peut calculer l'humidité relative en fonction de la température moyenne et de la tension de vapeur. Inversement il donne la tension de vapeur comme fraction de la pression de vapeur saturante à une température donnée en fonction de l'humidité relative. Il permet également de calculer l'humidité relative à partir de la tension de vapeur mesurée ou moyenne en fonction de la température du thermomètre sec ou de la température moyenne.

Calcul de l'évapotranspiration potentielle Penman

C'est un paramètre fondamental en agroclimatologie. On pourrait prendre l'évaporation Bac pour l'estimer mais les agronomes préfèrent le calculer ce qui permet d'en contrôler les paramètres et de voir leur influence respective. La formule retenue est celle de Penman modifiée par la FAO pour tenir compte de l'action du vent en fonction de l'écart des températures extrêmes. Le module interactif calcule les valeurs de l'ETP ou d'une nappe d'eau libre en entrant au clavier la latitude et altitude de la station puis tous les paramètres nécessaires: températures moyenne, maximale et minimale, humidité relative de l'atmosphère ou tension de vapeur d'eau, insolation et vitesse du vent à deux mètres. L'ETP calculée peut être exprimée soit en valeur journalière soit en total décadaire ou mensuel. Une option automatique lit un fichier ASCII contenant tous les paramètres et écrit directement le fichier indexé binaire avec les résultats. Ce fichier pourra ensuite être utilisé pour faire des statistiques d'ETP ou pour calculer des bilans hydriques. Rappelons ici le programme, spécialement

adapté aux fichiers grilles de SURFER écrits en ASCII, qui calcule et crée directement une grille de cartographie pour l'ETP.

1.4.3.3. LES VÉRIFICATIONS ET CORRECTIONS

***** VERIFICATIONS ET CORRECTIONS
Version du 28 Janvier 1992

1 CONTROLES : RECHERCHE DES DONNEES MANQUANTES
2 VÉRIFICATION DUREES D'INSOLATION
3 VÉRIFICATION DONNEES D'HUMIDITE DE L'AIR
4 CONTROLE DES TEMPERATURES

LEQUEL

Les programmes de contrôle fonctionnent en deux passes. La première fait l'analyse de l'ensemble des données du fichier et fournit un rapport sur les valeurs non conformes aux tests avec leur date. Après vérification et mise à jour éventuelle en cas d'erreur de saisie une deuxième passe de contrôle peut être demandée ou la passe ultime de correction automatique.

Recherche des données manquantes

C'est l'opération fondamentale pour établir une base de donnée opérationnelle continue. On place d'abord tous les paramètres dans un fichier ASCII servant de base au calcul de l'ETP. La sortie peut être dirigée vers un fichier ou sur une imprimante. Les résultats ont été présentés au paragraphe traitant des données manquantes. Un exemple de sortie a été donné plus haut à propos des problèmes posés par les données manquantes.

Vérification des durées d'insolation

Le programme décèle les erreurs de saisie ou de transcription en comparant les valeurs du fichier à la durée astronomique du jour calculée à la latitude de la station et diminuée de la période des positions basses du soleil au dessus de l'horizon. Le format des fichiers d'insolation à vérifier est le binaire indexé.

Vérification de l'humidité de l'air

Les tensions de vapeur ne doivent pas correspondre à une humidité relative supérieure à 100% car cet état n'existe pas au sol dans notre zone. C'est un fichier séquentiel de base ETP en ASCII qui est employé. Eventuellement la tension de vapeur moyenne peut être calculée en fonction de l'humidité relative et de la température moyenne ou inversement.

Contrôle des températures

Les maxima doivent être supérieurs aux minima. Des valeurs limites extrêmes servent à tester les bornes des mesures. Une option permet d'estimer les moyennes absentes par la demi somme des extrêmes, la possibilité de forcer ce calcul remplacera les moyennes par cette demi somme.

1.4.3.4. INTERPOLATIONS

Les programmes sont des utilitaires permettant soit d'estimer les valeurs à des pas de temps plus petits que celles connues: par exemple les valeurs décadaires à partir d'un fichier mensuel, soit d'estimer les valeurs à partir de données connues dans des stations qui encadrent le point à calculer. Ces derniers utilitaires sont interactifs.

***** PROGRAMMES D'INTERPOLATION
Version du 28 Janvier 1992

-
- 1 INTERPOLATIONS : DE MENSUEL A DECADAIRE
 - 2 POLYGONALES JOURNALIERES
 - 3 POLYGONALES DECADAIRE
 - 4 POLYGONALES MENSUELLES

LEQUEL

Interpolation de périodes plus courtes

Souvent, pour des raisons pratiques, les publications des données annuelles ou des moyennes interannuelles sont présentées au pas de temps mensuel. Or souvent le pas de temps employé dans les opérations agrométéorologiques est la pentade, la semaine ou la décade. Si on ne dispose que des valeurs mensuelles il est indispensable d'interpoler les normales sur de plus

courtes périodes. L'erreur ne sera pas trop grande pour les paramètres climatiques autres que la pluie mais cette dernière très fluctuante doit être traitée avec précautions. Le principe consiste à cumuler les données sur l'année, éventuellement en les multipliant par le nombre de jours du mois. Les valeurs interpolées correspondent aux surfaces déterminées par les dates de début et de fin et la courbe des cumuls. Le module opère soit par saisie des 12 valeurs mensuelles au clavier, soit par lecture d'un fichier mensuel ASCII ou indexé. Les résultats sont écrits dans un fichier de sortie provisoire qui pourra être contrôlé avant usage définitif.

Interpolation spatiale journalière

On suppose que dans un faible rayon géographique le champ des paramètres climatiques est isotrope. Le calcul se fait par polygones itératifs à partir de stations entourant le point à calculer comme il a été expliqué précédemment. Le programme fonctionne en lisant les fichiers binaires des stations de référence. Les interpolations se font mois par mois. Le nombre d'itérations nécessaires pour l'estimation de la valeur est indiqué. Le résultat mensuel s'affiche sur trois lignes qui peuvent être imprimées ou non, enregistrées ou non. Pour les pluies ce module qui peut utiliser un maximum de 6 stations permet la vérification du nombre moyen de jours de pluie et de contrôler les dates d'enregistrement des précipitations. En effet un épisode pluvieux a souvent lieu le même jour pour des stations voisines mais à des heures différentes dépendant du mouvement des masses nuageuses. En général les pluies devraient être alignées sur l'écran pour une date données. La possibilité de déplacer une ou plusieurs valeurs sur l'écran permet de procéder au réalignement quand celui-ci paraît indubitable.

Interpolation spatiale décadaire

Le même principe permet d'employer des fichiers binaires décadiques. Ici on ne peut plus déplacer les valeurs. Pour le calcul on a le choix entre l'interpolation mois par mois ou pour l'ensemble de l'année. Les possibilités ou non d'impression et d'enregistrement subsistent ce qui est commode si on cherche la valeur d'une seule décennie. Dans ce cas l'impression permet de conserver le résultat et d'effectuer le remplacement par le module de mise à jour.

Interpolation spatiale mensuelle

On utilise ici les fichiers binaires mensuels avec les mêmes options que pour les fichiers décadiques mais on travaille uniquement par année. Généralement ce module est inutile pour les stations du CILSS puisqu'on dispose des valeurs journalières mais il a pu être employé pour évaluer une valeur manquante dans les pays périphériques pour lesquels seules les données mensuelles sont à notre disposition.

1.4.3.5. ECHANGES ET COPIES DE FICHIERS

C'est un groupe de programmes extrêmement important puisqu'il permet la portabilité des données quel que soit leur format d'enregistrement. En effet ces modules facilitent l'importation ou l'exportation des fichiers en les convertissant à différents formats. Ces programmes offrent la possibilité de compléter des fichiers à partir d'autres plus complémentaires par insertions partielles par années. Des extractions sont possibles pour créer des fichiers limités dans le temps ou géographiquement. Toutes ces manipulations sont interactives mais si on est certain de ne pas faire d'erreur les programmes peuvent être exécutés en traitement par lots avec des fichiers de commande appropriés.

***** REFORMATAGE ET COPIE DE FICHIERS

Version du 28 Janvier 1992

-
- 1 GESTION DE FICHIERS : CONVERSION ET REFORMATAGE
 - 2 FICHIERS JOURNALIERS CLICOM
 - 3 COPIE OU EDITION DE FICHIERS ASCII PLUIES
 - 4 DE BASE ETP

LEQUEL

Conversion et reformatage de fichiers

Cet utilitaire permet de passer des fichiers séquentiels ASCII aux fichiers indexés binaires et inversement puisque toutes les conversions proposées peuvent se faire dans un sens ou l'autre. La conversion peut se faire en binaire soit à partir de fichiers séquentiels d'extension DAT qui sont les formats AGRHYMET antérieurs à 1986, soit à partir de fichiers d'extension PLU ou équivalents qui sont les anciens formats ORSTOM sur 80 colonnes, soit avec les fichiers d'extension CLI qui servent de base au calcul de l'ETP. Ces derniers fichiers ASCII peuvent être générés à partir des fichiers binaires. Les fichiers ASCII sont formatés depuis les indexés binaires: les fichiers de pluies décadiques avec le nombre de jours et les hauteurs sont calculés avec les fichiers journaliers ainsi que les fichiers journaliers type AGRHYMET ou DHC. Des fichiers mensuels ASCII peuvent être créés. Les traitements se font de façon interactive ou automatiquement par lots.

Conversion de fichiers CLICOM ASCII délimité

Des fichiers CLICOM en ASCII délimité peuvent être créés à partir de fichiers séquentiels ASCII non délimité ou de fichiers binaires indexés. L'inverse peut également s'effectuer. L'emploi du système CLICOM étant plus récent ce module n'a pas été intégré dans le précédent car il a un usage spécifique. Toutes les opérations sont réalisables soit en mode interactif, soit en traitement par lots avec un fichier de commande.

Manipulations de fichiers pluviométriques en ASCII

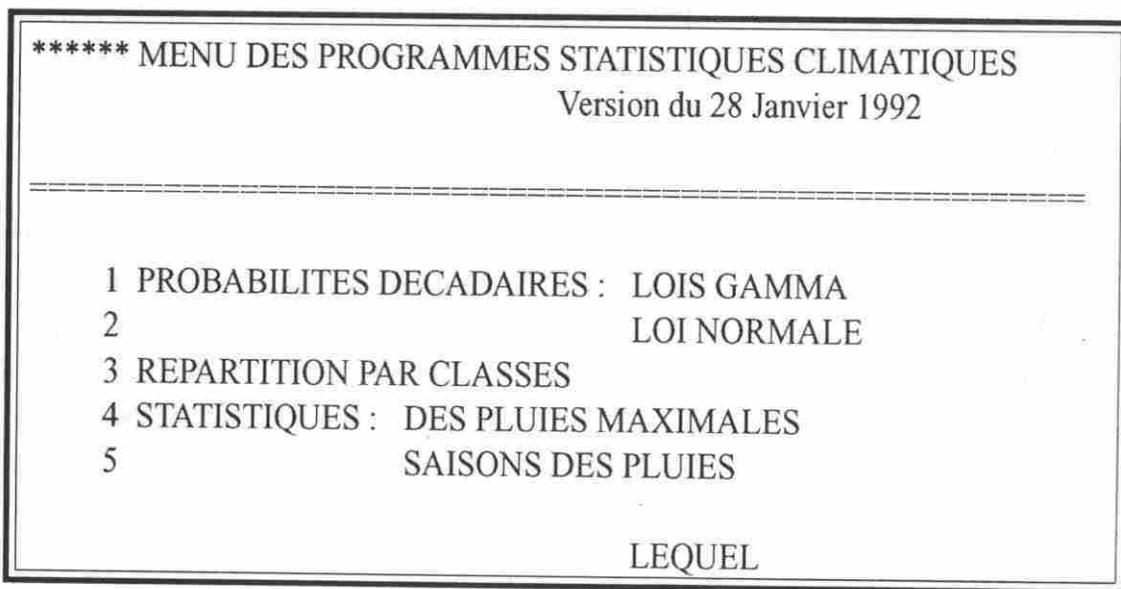
Les gros fichiers originaux faisaient 3 à 6 Megaoctets. Ils sont écrits en ASCII non délimité. Leur lecture séquentielles demandait beaucoup de temps. Leur taille importante rendait leur stockage difficile sur micro-ordinateur. Ce module uniquement interactif permet de les tronçonner par station et pour un groupe d'années défini par l'utilisateur, et de les copier en fichiers de même nature mais plus petits. L'impression possible rend le contrôle visuel aisément qu'il ne s'agisse pas d'un format d'édition du type annuaire. Les extraits peuvent facilement être convertis en fichiers binaires.

Copie, extraction ou impression de fichiers de base ETP en ASCII

Ce module comme le précédent est interactif. Il offre le choix entre l'impression ou la création de fichiers séquentiels partiels par station et pour un groupe d'années. Ces fichiers sont très importants car ils permettent le calcul automatique des ETP d'une station.

1.4.3.6. LES TABLEAUX STATISTIQUES

Les routines suivantes permettent d'analyser la variabilité des paramètres et d'en connaître les occurrences pour diverses fréquences.



Les fichiers nécessaires doivent être en binaire indexé. Le choix reste encore entre le traitement interactif et celui par lots. Les tableaux calculés sortent soit sur imprimante, soit en fichiers texte susceptibles d'insertion dans un traitement de texte. Ces programmes constituent l'exploitation de la base de données. Certaines statistiques sont exprimées en quantiles calculés sur les distributions observées, d'autre résultent de l'ajustement à des lois statistiques classiques: loi normale, loi gamma. L'utilisateur peut donc choisir la méthode qui lui convient le mieux. Il lui est également possible d'utiliser le programme DIXLOIS de l'ORSTOM pour rechercher la meilleure distribution théorique et pour avoir accès à la loi des fuites qui n'a pas fait l'objet de programmes dans ceux qui sont proposés.

Probabilités suivant une loi gamma tronquée

Les travaux de BRUNET MORET ont montré que les pluies ont une distribution dissymétrique et que la loi gamma s'ajustait bien. Il faut utiliser une loi gamma incomplète car les distributions sont souvent tronquées dans le Sahel surtout pour les mois de démarrage ou de fin des pluies. Mais on ne peut descendre sous la décade. Les hydrologues proposent des ajustements décadiques glissant de 5 en 5 jours pour appréhender la variabilité des pluies. Le programme utilise des fichiers décadiques pour obtenir les probabilités indépendantes par décade, les probabilités par mois et celles par décades cumulées. Ces dernières étant des probabilités résultantes peuvent donner l'estimation d'une campagne de pluie à divers niveaux de probabilités. Les tableaux des tomes 2 à 7 montrent les types de sorties sur imprimante de ce programme. Une option permet de calculer les distributions à partir des fichiers mensuels quand on ne dispose pas de données plus détaillées.

Probabilités suivant une loi normale

Les paramètres comme les températures, l'humidité relative ou la tension de vapeur, l'insolation et l'ETP s'ajustent très bien à une loi de Gauss. Des fichiers de données décadiques indexés sont utilisés et une option permet également le traitement des fichiers mensuels binaires. Le tome 8 a été réalisé avec ce programme et illustre les sorties possibles.

Répartition fréquentielle en classes

Il est souvent intéressant de classer les paramètres et de compter les effectifs de chaque classe. Les fichiers quotidiens indexés servent de bases à ces calculs. On peut ainsi, soit comptabiliser les journées de pluie par classes d'intensités journalières éditées année par années pour observer la variabilité interannuelle, soit par moyennes suivant des intervalles définis par l'utilisateur. Les classes de vent pour différentes hauteurs sont imprimables. Le programme peut également répartir les températures par classes. Exemple de classes de pluies:

CENTRE AGRHYMET *** 03-11-1990 12:58:42
POSTE DE OUAHIGOUYA 200035

LATITUDE : 13° 35' N LONGITUDE : 2° 26' W ALTITUDE : 329 mètres

STATISTIQUES du NOMBRE de JOURS DE PLUIES ANNUELLES

CLASSES

ANNEES	0/5	5/10	10/20	20/30	30/40	40/50	50/60	60 et +	TOTAL
--------	-----	------	-------	-------	-------	-------	-------	---------	-------

MOYENNE 1950 - 1967

MOYENNE	18.6	10.8	11.7	6.6	3.3	1.8	0.8	0.7	54.2
%	34.4	19.8	21.6	12.2	6.1	3.3	1.4	1.3	100.0%

MOYENNE 1951 - 1980

MOYENNE	23.1	10.6	11.6	5.8	2.7	1.5	0.7	0.5	56.5
%	40.9	18.8	20.5	10.2	4.8	2.6	1.3	0.9	100.0%

Statistiques des valeurs extrêmes annuelles

Les statistiques les plus fréquemment demandées sont celle des pluies maximales. Elles sont éditées en colonnes avec moyenne, écart type, probabilité de 75% et 90%. Ce type de tableau est indispensable pour dimensionner les ouvrages évacuateurs d'eau dans les périmètres irrigués mais peut être employé en urbanisme pour les assainissements. La connaissance des pluies minimales est également nécessaire pour estimer les besoins en eau à l'étiage, ce paramètre est utilisé par les hydrologues. La même opération, de calculs statistiques, peut être faite pour les températures extrêmes. En effet, les maxima peuvent entraîner des chutes de production par échaudage ou blocage des transferts alimentaires dans les fructifications. Pour leur part, les minima favorisent certaines cultures comme le blé s'ils descendent au dessous d'un certain seuil.

Le tableau suivant donne un exemple des statistiques de pluies maximales, sur quinze ans pour six postes pluviométriques nigériens avec les probabilités de non dépassement et l'écart type de la distribution.

PLUIES MAXIMALES JOURNALIERES

POSTES	TAHOUA 320023	KONNI 320025	MARADI 320047	TANOUT 320060	ZINDER 320062	MAGARIA 320064
ANS						
1976	33.7	48.3	51.7	28.5	44.5	74.0
1977	49.3	59.4	75.1	47.1	28.0	77.8
1978	80.0	60.8	42.8	108.8	72.8	130.8
1979	44.2	49.0	69.5	74.4	45.8	66.9
1980	42.4	42.5	58.0	45.6	48.2	87.3
1981	48.6*	45.1	35.1	31.2	74.1	45.7
1982	28.0	39.0	70.7	37.1	50.7	52.7
1983	39.4	45.0	29.2	19.0	37.9	59.6
1984	33.9	42.8	38.1	23.0	62.9	46.1
1985	35.5	37.4	59.7	49.0	56.4	62.9
1986	28.8	62.4	64.1	23.0	45.7	58.8
1987	38.0	51.0	44.4	45.7	51.9	37.4
1988	41.6	54.6	70.2	56.0	77.9	126.1
1989	37.1	69.9	73.7	56.0	45.8	45.9
1990	30.8	87.2	47.4	26.2	49.3	37.7
MEDIANE	40.8	53.0	55.3	44.7	52.8	67.3
E. TYPE	12.654	13.283	15.192	23.481	13.866	28.727
P 75%	49.2	61.8	65.4	60.4	62.0	86.5
P 90%	56.5	69.4	74.2	73.8	70.0	103.0

Statistiques sur les saisons des pluies

Les règles de détermination de la saison des pluies sont variables suivant les auteurs. A la suite de PFRANQUIN, la FAO préconise l'utilisation de bilans hydriques. D'autres comme STERN se basent sur des règles d'apparition des pluies en donnant la quantité de pluie minimum requise, le nombre de jours secs tolérés et sur quelle durée de temps, etc. Le module propose une règle par défaut mais l'utilisateur reste libre d'en modifier les paramètres. Des fichiers journaliers indexés sont nécessaires pour lancer le programme. Deux fichiers de sortie sont créés un pour les valeurs annuelles des dates de début et de fin ainsi que la durée de la saison des pluies. Les valeurs

des quantiles sont stockées et peuvent être imprimées. Elles indiquent les dates où la saison est déjà commencée, celles où elle est déjà finie et la durée minimale pour une occurrence. Par exemple:

Poste de ZINDER AERO 320062

STATISTIQUES DE 1961 -1990

OCCURRENCES	DATE de DEBUT	DATE de FIN	DUREE
1 an sur 10	4/ 6	12/10	118 jours
1 an sur 5	10/ 6	8/10	106 jours
1 an sur 4	13/ 6	6/10	105 jours
1 an sur 3	28/ 6	27/ 9	101 jours
1 an sur 2	5/ 7	20/ 9	80 jours
2 ans sur 3	11/ 7	14/ 9	64 jours
3 ans sur 4	14/ 7	3/ 9	52 jours
4 ans sur 5	19/ 7	31/ 8	51 jours
9 ans sur 10	3/ 8	27/ 8	37 jours

1.4.3.7. LES BILANS HYDRIQUES

***** CALCULS DE BILANS HYDRIQUES

Version du 28 Janvier 1992

-
- 1 EDITION DES PARAMETRES CULTURAUX
 - 2 BILANS HYDRIQUES : CALCULS DECADAIRE
 - 3 CALCULS PREVISIONNELS

LEQUEL

Le pas de temps retenu pour ces calculs est la décennie. Cette unité de durée est facilement accessible pour la pluie et l'ETP avec les routines précédentes qui créent les fichiers en indexé binaire. Par ailleurs la décennie est un laps de temps suffisamment court pour admettre que les plantes puissent tamponner les agressions climatiques temporaires. Bien sûr des étapes de dix jours peuvent gommer certains aspects extrêmes de la saison tels que pluies journalières très fortes dont les excédents ne seront rapportés qu'à la moyenne décennale. Le programme travaille avec

les caractéristiques globales de la décade: pluie, évapotranspiration potentielle, coefficients culturaux de la plante ainsi que ses coefficients de réponse aux stress hydriques éventuels. Si on veut travailler par pentades il faut utiliser les programmes de la Division suivi des cultures après conversion des données aux formats employés par ces logiciels. Mais pour une approche globale régionale nous nous sommes contentés du pas de temps décadaire.

Edition des paramètres culturaux

Pour un certain nombre de cultures et leurs cultivars de durées différentes les coefficients culturaux de besoins en eau décadaires K_c et les coefficients d'affectation du rendement par les stress hydriques K_y sont placés dans des fichiers permettant d'accéder automatiquement à ces valeurs à partir d'un fichier séquentiel comprenant les noms et durées de cycle des cultures. Le programme permet la visualisation et l'impression de ces paramètres, la modification éventuelle de leurs valeurs et l'entrée de nouvelles cultures avec les coefficients correspondants. L'ensemble des paramètres est présenté, plus bas, dans la partie agroclimatologique.

Calcul des bilans hydriques décadaires

Les bilans hydriques donnent lieu à deux types de sortie. La première est le détail décade par décade, avec une page par année, de l'évolutions des termes du bilan hydrique: ressources en eau, humidité du sol totale et relative par rapport à la réserve utile, stockage de l'eau, déficit en mm et relatif, évapotranspiration potentielle, maximale théorique pour la plante et réelle, ruissellement et drainage par décade et en cumul, évolution de l'indice de rendement espéré (IRESP), variations de la réserve utile du sol. La seconde sortie, par le calcul systématique de neuf dates de semis possibles à partir d'une décade donnée fournit un tableau des indices de rendement espérés pour chaque décade et par année avec un récapitulatif par quantiles. Cette présentation par année est reprise pour faire des calculs prévisionnels du niveau de réussite culturelle. Les quantiles qui sont calculés pour les IRESP ainsi que la médiane des dates de semis optimales peuvent, à la demande, être imprimés seuls sans le détail des années et des décades. Un fichier de sortie peut stocker ces résultats pour les reprendre éventuellement dans un tableur d'où ils permettront la constitution de fichiers de base pour la cartographie. L'étude des aspects agroclimatologiques est grandement facilité par cette semi automatisation, pour plus de détails voir plus bas la quatrième partie de la notice consacrée aux aspects agronomiques. Le programme fonctionne de façon interactive ou en traitement par lots.

Les exemples suivants montrent, d'une part, la variabilité des indices de rendement espérés selon les décades de semis et les années, d'autre part les statistiques proposées par le programme sur les IRESP et la date de semis optimale.

BILANS HYDRIQUES DECADAIRE A TILLABERY

320004

RESERVE MAXIMUM EN EAU UTILE = 60 mm
 INDICES DE RENDEMENT pour MIL 90 jours

: DECADE SEMIS :	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1964	59 %	69 %	72 %	74 %	84 %	94 %	88 %	50 %	22 %
1965	31 %	37 %	53 %	57 %	86 %	96 %	98 %	69 %	40 %
1966	3 %	31 %	35 %	51 %	62 %	82 %	85 %	73 %	67 %
1967	15 %	16 %	49 %	60 %	92 %	88 %	96 %	100 %	96 %
1968	0 %	4 %	39 %	59 %	70 %	77 %	53 %	40 %	20 %
1969	5 %	12 %	25 %	42 %	73 %	87 %	85 %	77 %	70 %
1970	7 %	21 %	52 %	57 %	49 %	48 %	39 %	25 %	3 %
1971	2 %	12 %	26 %	42 %	70 %	53 %	43 %	15 %	4 %
1972	5 %	13 %	41 %	49 %	47 %	61 %	67 %	52 %	30 %
1973	0 %	18 %	38 %	48 %	63 %	77 %	58 %	41 %	19 %
1974	38 %	61 %	60 %	78 %	82 %	86 %	79 %	58 %	38 %
1975	14 %	32 %	38 %	53 %	41 %	36 %	48 %	31 %	11 %
1976	50 %	42 %	72 %	67 %	63 %	51 %	83 %	89 %	81 %
1977	32 %	57 %	53 %	54 %	77 %	89 %	90 %	69 %	49 %
1978	29 %	29 %	59 %	87 %	92 %	80 %	75 %	68 %	49 %
1979	53 %	59 %	59 %	74 %	78 %	88 %	93 %	82 %	73 %
1980	34 %	52 %	69 %	94 %	88 %	87 %	57 %	30 %	7 %
1981	0 %	0 %	6 %	0 %	15 %	29 %	57 %	22 %	25 %
1982	14 %	31 %	36 %	57 %	40 %	39 %	19 %	23 %	6 %
1983	17 %	31 %	37 %	66 %	81 %	59 %	41 %	37 %	19 %
1984	0 %	25 %	29 %	10 %	5 %	2 %	9 %	24 %	52 %
1985	0 %	5 %	23 %	49 %	61 %	56 %	36 %	18 %	10 %

BILANS HYDRIQUES DECADAIRE A BIRNI N'KONNI

320025

RESERVE MAXIMUM EN EAU UTILE = 60 mm
 INDICES DE RENDEMENT pour MIL 120 jours

OCCURRENCES 1 an/2 2 ans/3 3 ans/4 4 ans/5 DECADE de SEMIS

MOYENNE 1968 - 1985

92.0 % 82.0 % 73.0 % 71.4 % 15.6

Calculs prévisionnels de bilans hydriques

Connaissant la fourchette de prévision des pluies entre une hypothèse basse et une hypothèse haute on peut comparer les deux scénarios en bilan hydrique. Au fur et à mesure que la saison des pluies se déroule on substitue aux hauteurs de pluies prévues les valeurs réellement observées et progressivement les deux scénarios tendent l'un vers l'autre. L'avantage de ce calcul et d'arriver à une estimation des résultats de la campagne bien avant son terme avec deux indices de rendement qui convergent et encadrent assez tôt la situation finale comme montre clairement l'exemple ci après établi pour la campagne 1987. Les variations des hypothèses sur la pluviométrie ne sont pas données complètement, seule la première étape de progression de la pluviométrie observée est montrée. Les deux hypothèses de départ sont tirées des tomes 6 et 7 fournissant les probabilités des pluies décadiques cumulées. Les valeurs portées dans le tableau sont obtenues par différences entre deux cumuls successifs relevés dans la colonne de la probabilité correspondant à l'hypothèse formulée. Les distributions de pluies sont reprises dans des calculs de bilans hydriques qui sont regroupés dans la tableau final. On peut voir que la fourchette des meilleurs IRESP de trouve dans la colonne de la 15ème décade de semis et que fin août l'écart entre les deux hypothèse n'est que de 4%.

CENTRE AGRHYMET *** 14-11-1987 08:28:58

POSTE DE TAHOUA 320023													
LATITUDE	14° 54 N			LONGITUDE			5° 18 E			ALTITUDE : 386 mètres			
PLUVIOMETRIES DECADAIRIES													
ANNEES	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	TOTAL
Hypothèse haute (25% ou 1 an sur 4) au début de campagne													
1	9.9	17.9	22.9	38.0	23.4	4.7	.	.	
2	0.6	3.8	36.3	33.5	39.1	15.8	3.0	.	
3	1.7	12.0	19.6	56.0	29.6	10.1	2.7	.	
MOIS	.	.	.	2.3	25.7	73.8	112.4	106.7	49.2	10.4	.	380.6	
Hypothèse basse (75% ou 3 ans sur 4) au début de campagne													
1	5.1	28.8	34.1	18.4	4.9	.	.	.	
2	13.9	24.0	36.6	5.9	2.0	.	.	.	
3	3.3	12.4	22.6	32.4	12.9	0.3	.	.	
MOIS	.	.	.	3.3	31.4	75.4	103.1	37.2	7.2	.	.	257.6	

Hypothèse haute au 30 juin 1987

Hypothèse basse au 30 juin 1987

BILANS HYDRIQUES DECADAIRE A TAHOUA 320023

RESERVE MAXIMUM EN EAU UTILE = 60 mm

INDICES DE RENDEMENT pour MIL 120 jours

: DECADE SEMIS : 13 14 15 16 17 18 19 20 21

Début de campagne

hypothèse P=.25	50 %	54 %	61 %	63 %	56 %	53 %	39 %	24 %	8 %
hypothèse P=.75	18 %	31 %	37 %	39 %	44 %	32 %	18 %	7 %	3 %

Prévisions au 30 juin 1987

hyp. forte (25 %)	29 %	45 %	62 %	58 %	44 %	44 %	35 %	24 %	8 %
hyp. basse (75 %)	22 %	36 %	50 %	47 %	38 %	29 %	18 %	7 %	3 %

Prévisions au 31 juillet 1987

hyp. forte	16 %	31 %	55 %	49 %	39 %	33 %	14 %	21 %	8 %
hyp. basse	14 %	29 %	50 %	44 %	35 %	22 %	3 %	10 %	5 %

Prévisions au 31 août 1987

hyp. forte	14 %	31 %	57 %	50 %	40 %	36 %	15 %	22 %	11 %
hyp. basse	14 %	31 %	53 %	47 %	38 %	25 %	5 %	12 %	7 %

Prévisions au 30 septembre 1987

hyp. forte	14 %	31 %	54 %	44 %	31 %	26 %	4 %	11 %	0 %
hyp. basse	14 %	31 %	54 %	44 %	31 %	23 %	4 %	10 %	0 %

Situation finale 1987

1987 14 % 31 % 54 % 44 % 28 % 17 % 1 % 8 % 0 %

1.4.4. LIMITES DES PROGRAMMES

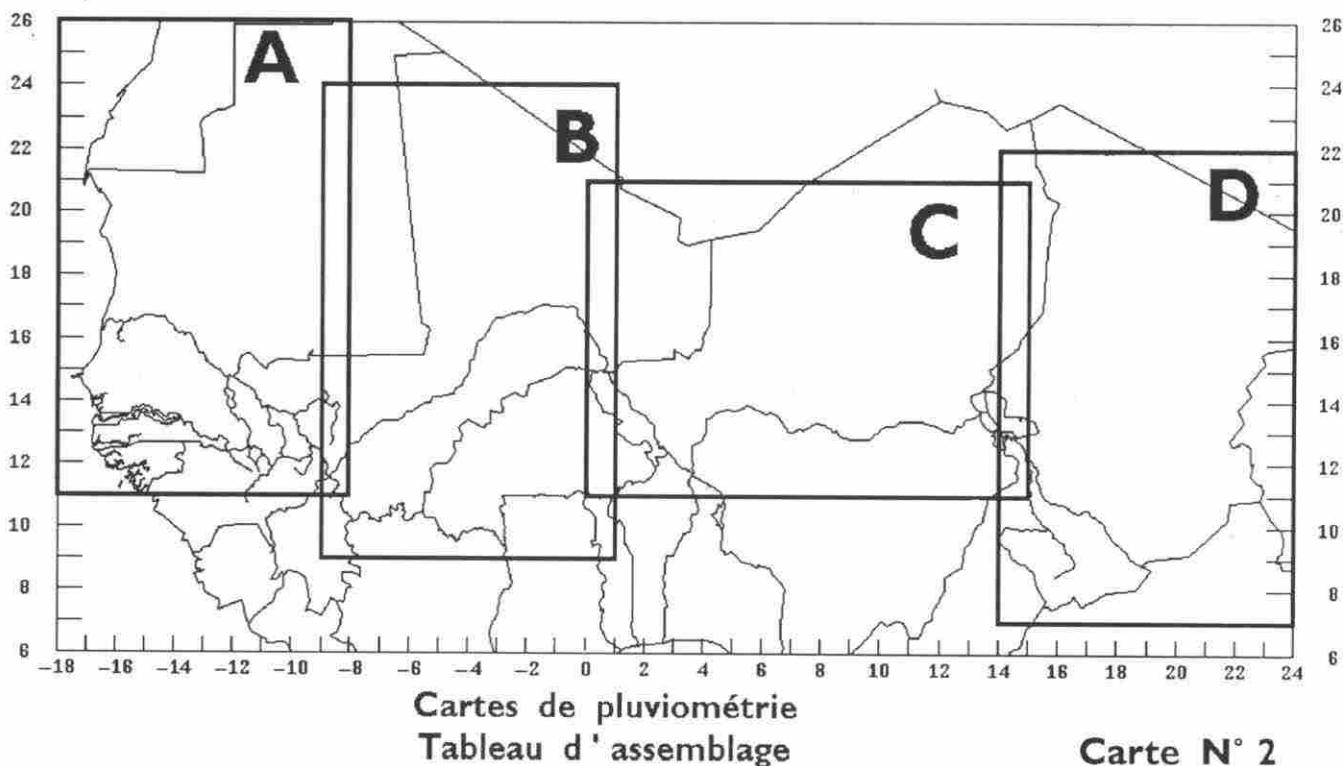
Des modules externes à nos programmes peuvent être insérés dans le dispositif en respectant toujours le format d'écriture et de lecture des fichiers de données. D'autres séries de modules à usages statistiques ont été développées. Mais ils sont très simples et largement concurrencés par d'autres programmes statistiques du commerce. C'est pourquoi leur description n'est pas faite dans cette notice. Il faut savoir qu'un module d'extraction des données crée des fichiers ASCII délimités à partir des fichiers de données binaires. Les fichiers séquentiels ainsi écrits peuvent être repris facilement par tous les programmes statistiques, y compris les nôtres.

Nos programmes travaillent sur de petits fichiers qui sont ouverts séquentiellement et nous n'avons jamais rencontré de problèmes de dépassement en mémoire. Pour un usage rapide des modules de calcul: probabilités gamma, bilans hydriques il est recommandé d'employer des machines équipées de coprocesseur arithmétique.

Chapitre 2

La PLUIE

La cartographie des pluies est présentée en pochettes selon quatre coupures qui recouvrent la majeure partie de la zone du CILSS. Quelques régions septentrionales sans pluies notables ne figurent pas sur ces cartes mais sont représentées sur les cartes de synthèses du présent tome. Les cartes du Cap Vert se limitent aux trois îles méridionales: Santiago, Fogo, Brava, la densité des observations à long terme n'étant pas suffisante pour faire une bonne représentation de la répartition des pluies sur les autres îles. La carte ci-après est le tableau d'assemblage des coupures représentant les isohyètes.



La cartographie représente les isohyètes avec leur valeur médiane en millimètres sur les traits pleins. L'espacement entre ces valeurs est variable suivant la localisation géographique. Par exemple il est de 25 mm jusqu'à 100 mm, puis de 50 jusqu'à 500 mm et de 100 mm au delà. Les lignes intermédiaires en trait interrompu court suivent le tracé de la valeur moyenne des deux isohyètes qui l'encadrent en traits continus. L'utilisateur doit bien faire attention aux valeurs imprimées quand il consulte les cartes. Les coupures se chevauchent pour faciliter le repérage entre elles. C'est également pour cela que figurent des stations hors du cadre de la carte. Par exemple pour la coupure C qui concerne le Niger on trouve hors du cadre les stations de Gao, Dori, N'djamena, Mao météo.

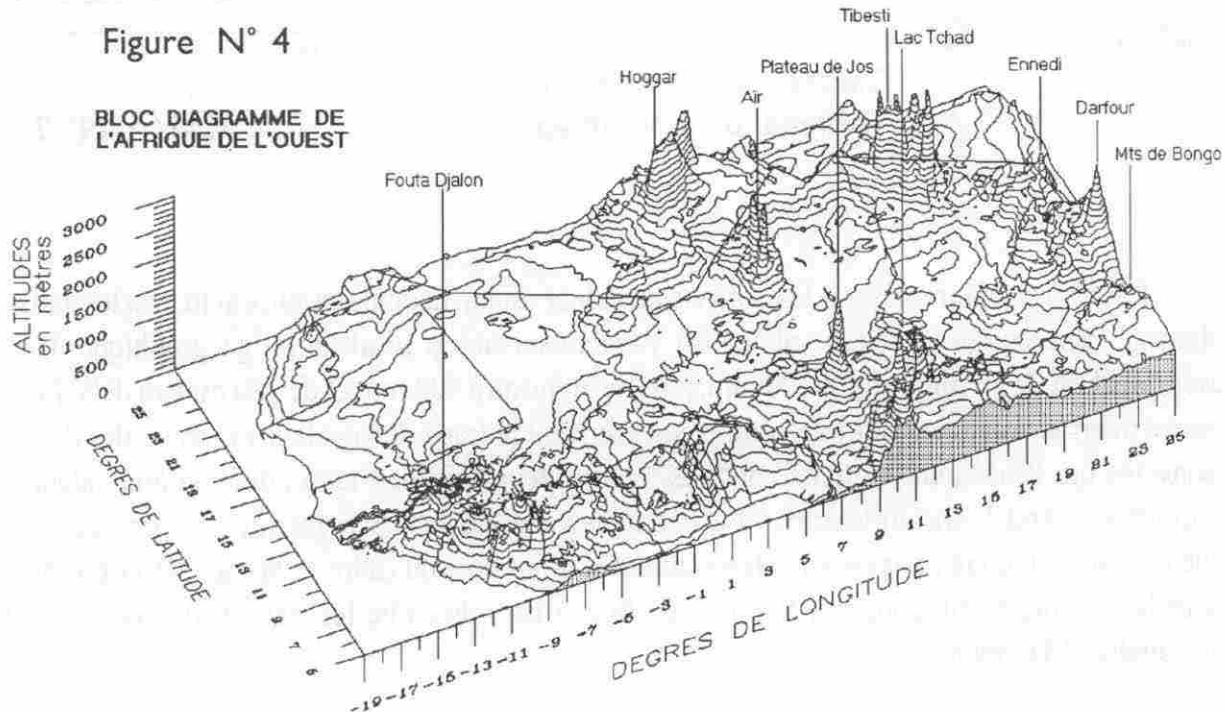
2.1. L'ENVIRONNEMENT GÉOGRAPHIQUE

Le domaine géographique de la zone de l'étude entraîne sa stratification climatique qui est zonale en général sauf sur la façade atlantique.

2.1.1. L'AFRIQUE DE L'OUEST.

Les masses d'air humide équatoriales suivent avec un certain décalage le mouvement apparent du soleil et poussées par l'anticyclone de Sainte Hélène elles vont pénétrer, pendant l'été boréal, sur l'Afrique de l'ouest. Cette partie du continent africain est une pénéplaine d'altitude comprise entre 300 et 500 mètres d'altitude. A l'ouest les reliefs guinéens dépassent 1000 mètres tandis qu'à l'est le Tchad et le Niger oriental sont entourés de massifs pouvant dépasser 2000 et même 3000 mètres: l'Aïr, le Hoggar, le Tibesti, l'Ennedi, le Darfour, les Monts des Bongo en Centrafrique, les Monts et plateaux du Cameroun septentrional, les plateaux de Bauchi et de Jos au Nigéria (figure N° 4). Ces reliefs ont une influence sur la circulation des basses couches. Des zones, comme le lac Tchad ou le delta intérieur et la vallée du Niger, sont relativement plus humides au sol et entraînent une certaine fraîcheur atmosphérique. Avec une plus grande inertie thermique elles ont une influence sur la répartition géographique des pluies. Les masses d'air provenant de régions plus chaudes voient leurs basses couches se stabiliser en arrivant dans une zone plus froide. Les convections diminuent et ces zones sont moins pluvieuses. Inversement, en sortant des zones fraîches, les masses d'air se déplaçant vers une région plus chaude subissent un réchauffement par la base ce qui fait naître puis augmente l'instabilité dans les basses couches. Les bordures atlantiques influencent les paramètres climatiques et la pluviométrie. Les upwellings fréquents le long de la Mauritanie et du Sénégal contribuent à la diminution de la pluviosité.

Figure N° 4



2.1.2. PLUIES ET RELIEF.

Les vallées et les dépressions ne favorisent pas les ascendances thermiques et souvent entraînent des affaissements des masses d'air. Les pluies étant essentiellement d'origine convective n'y prennent pas naissance, ce qui permet d'observer une diminution relative de la pluviométrie dans ces zones. Cette faiblesse des précipitations dans les fonds de vallées apparaît nettement quand on compare les périodes sèches avec les périodes plus humides. La règle permanente étant des apports moindres d'eau dans les vallées la sécheresse y semble relativement moins sensible. Les versants et les bords de plateau sont souvent plus arrosés surtout s'ils sont exposés aux vents d'est qui déplacent les masses nuageuses, ou du sud-ouest qui apportent l'air humide de "Mousson". Le relief, même faible, entraîne des déformations de l'écoulement des masses d'air. L'effet le plus fréquent est le soulèvement qui, favorisant les ascendances, se manifestera par des nuages convectifs. Un effet thermique peut s'additionner et dans ces conditions on comprend pourquoi une petite hauteur provoque un supplément relatif de pluviométrie. Les ondulations observables dans le tracé des isohyètes s'expliquent par ces structures de la topographie. On peut regarder par exemple l'influence de l'Ader Doutchi au Niger qui produit une remontée des isohyètes..

2.2. LES CARACTERISTIQUES DE LA PLUVIOMETRIE

Les pluies tropicales et encore plus les pluies sahéliennes se caractérisent par une grande variabilité interannuelle et intermensuelles

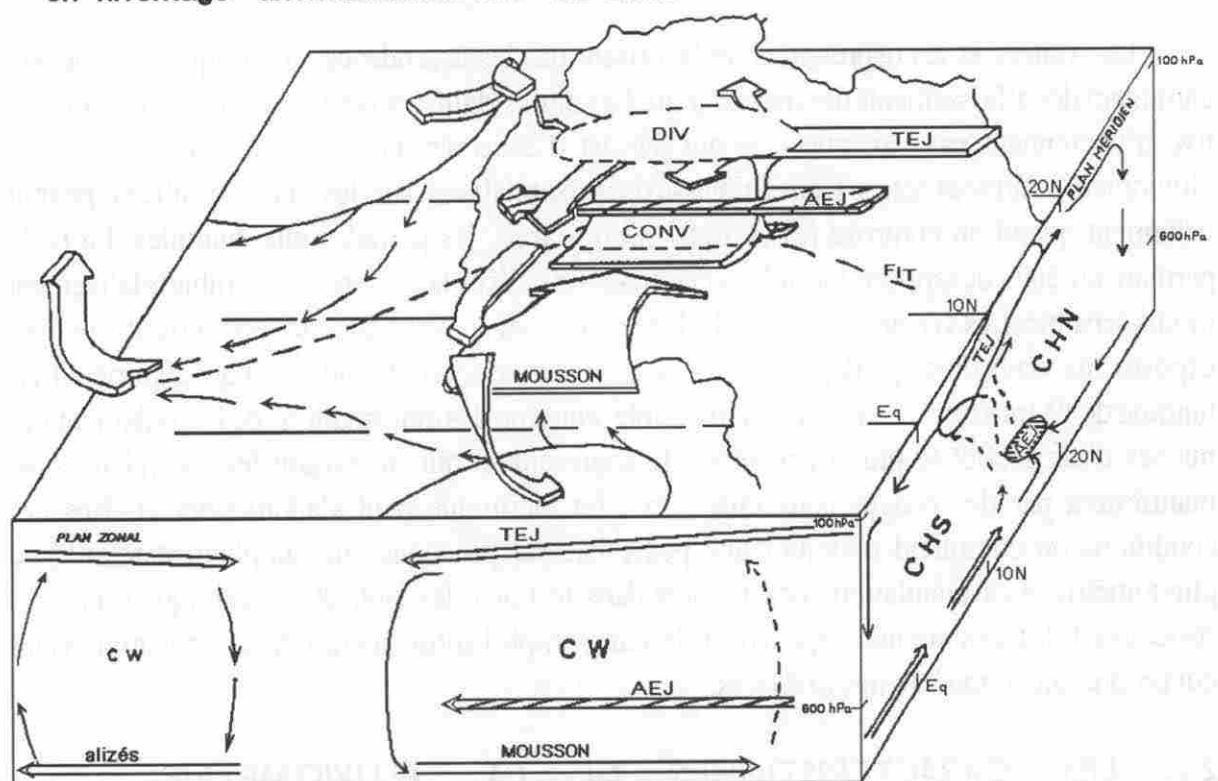
2.2.1. LES FACTEURS EXPLICATIFS DE LA PLUVIOMETRIE

La seule analyse statistique des pluies met en évidence leur variabilité mais ne peut en déterminer les causes. Il n'y a pas de cycle ni de 18 ans, ni de 30 ans. L'étude physique du phénomène s'impose à commencer par celle de la circulation atmosphérique.

2.2.1.1. LA CONVERGENCE INTERTROPICALE.

De part et d'autre de l'équateur se trouvent deux masses d'air quasi stationnaires avec des vents convergents au sol et divergents en altitude. Ce sont les cellules de Hadley. Les ceintures anticycloniques intertropicales poussent ces masses d'air vers l'équateur. La rotation de la terre dévie le mouvement vers l'ouest à cause de l'accélération de Coriolis. Ce déplacement se manifeste par des vents, dans les basses couches, qui sont les alizés. En provenance du nord-est dans l'hémisphère boréal le vent dirige vers le sud-ouest un air continental sec et chaud, issu de l'anticyclone de Lybie, c'est l'harmattan. En provenance du sud-est dans l'hémisphère austral le vent déplace des masses d'air océaniques issues de l'anticyclone de Sainte Hélène, humides et plus fraîches improprement appelées "mousson". Ces deux masses d'air vont se rencontrer non loin de l'équateur dans une région appelée Zone Intertropicale de Convergence (ZITC) où se manifeste

SYSTEME DE CIRCULATION MOYENNE SUR L'AFRIQUE DE L'OUEST
en hivernage anormalement sec au Sahel



(S. JANICOT - 1990)

- CHN : cellule de type Hadley nord
- CHS : cellule de type Hadley sud
- CW : cellule de type Walker
- TEJ : tropical easterly jet
- AEJ : African easterly jet
- DIV : zone de divergence d' altitude
- CONV : zone de convergence de basses couches
- FIT : front intertropical
- : flux renforcé par rapport à la normale

Figure N° 5

une ascendance commune aux deux circulations de Hadley. La ligne de rencontre des deux flux est l'équateur météorologique. La surface de contact entre l'air sec et l'air humide donne naissance à une structure atmosphérique : le front intertropical (FIT). La structure FIT est une zone étroite ayant entre 50 et 250 km de large sur le continent, quasiment verticale sur l'océan. Cette structure inactive est la séparation entre l'air boréal sec et l'air austral humide. Souvent le terme de FIT est seulement appliqué à la trace au sol de cette surface de convergence.

Dans la ZITC les pressions sont assez faibles et l'air humide qui y est attiré peut se comparer à un flux de mousson d'autant plus que le phénomène est saisonnier. Les formations nuageuses sont déterminées par les variations diurnes importantes de la température. L'énergie solaire échauffe l'air qui va s'élever. Une détente va se produire entraînant une condensation

de la vapeur d'eau et la formation de nuages. Les masses d'air sont dans un état d'instabilité convective sur une grande épaisseur de la troposphère. La région de convergence se caractérise alors par une ceinture nuageuse qui suit le déplacement du soleil selon les saisons puisque sa position zénithale apporte le maximum d'énergie. La ceinture nuageuse progresse vers le Nord jusqu'au mois d'Août puis se déplace vers le Sud jusqu'en Janvier. L'amplitude des mouvements saisonniers de la ZITC varie d'une année à l'autre et on peut penser que ses anomalies sont en relation avec les fluctuations pluviométriques.

2.2.1.2. LA CIRCULATION ZONALE

Le long des parallèles apparaissent des cellules de Walker indiquant les zones de subsidence et d'ascendance liées aux sources d'énergie atmosphériques. Ces cellules sont individualisées entre les zones chaudes et les zones froides. Sur l'Afrique, au nord de l'équateur, une cellule de Walker existe avec son ascendance vers l'Océan Indien et sa branche subsidente sur l'Atlantique créant en altitude le Jet tropical d'est. Au niveau de pression 600 hPa existe le Jet africain d'est. Si ces vents d'altitude changent de force il peut y avoir augmentation de la subsidence sur le Sahel par dispersion de la chaleur latente nécessaire à l'entretien de la circulation vivergente et diminution des pluies. La variation dans la force des alizés atlantiques peut être modulée par la circulation de Walker et créer des phénomènes du genre "El nino" quand les alizés diminuent comme en 1984 après une année 1983 de vents forts.

2.2.1.3. LES MOUVEMENTS LOCAUX

Sur le continent l'air humide va pénétrer comme un coin dans l'air sec. Au contact de cette masse continentale l'air océanique va s'élever et pourra engendrer des précipitations par condensation de sa vapeur d'eau. ce qui se produit quand l'épaisseur du FIT est assez grande pour créer des mouvements de convection. Pour qu'il y ait précipitation il faut à la fois une convergence de la vapeur d'eau dans les basses couches et des mouvements ascendants assez puissants pour éléver cette vapeur d'eau pour qu'elle puisse se condenser en altitude. L'épaisseur du flux de mousson et son humidité spécifique n'explique pas les années sèches mais plutôt la mobilisation de la vapeur d'eau par convergences et flux verticaux dans les basses couches. Les quatre cinquièmes des précipitations sahariennes proviennent d'orages isolés ou en lignes de grains avec des déplacements de 10 à 15 m/s vers l'ouest. Le développement de ce type de convection demande une divergence en altitude, une convection aux altitudes moyennes liée aux ondes d'est avec cisaillement dû au Jet africain d'est. Il faut y associer une convergence d'humidité dans les basses couches et le rôle de la structure du sol.

2.2.1.4. CONCLUSION

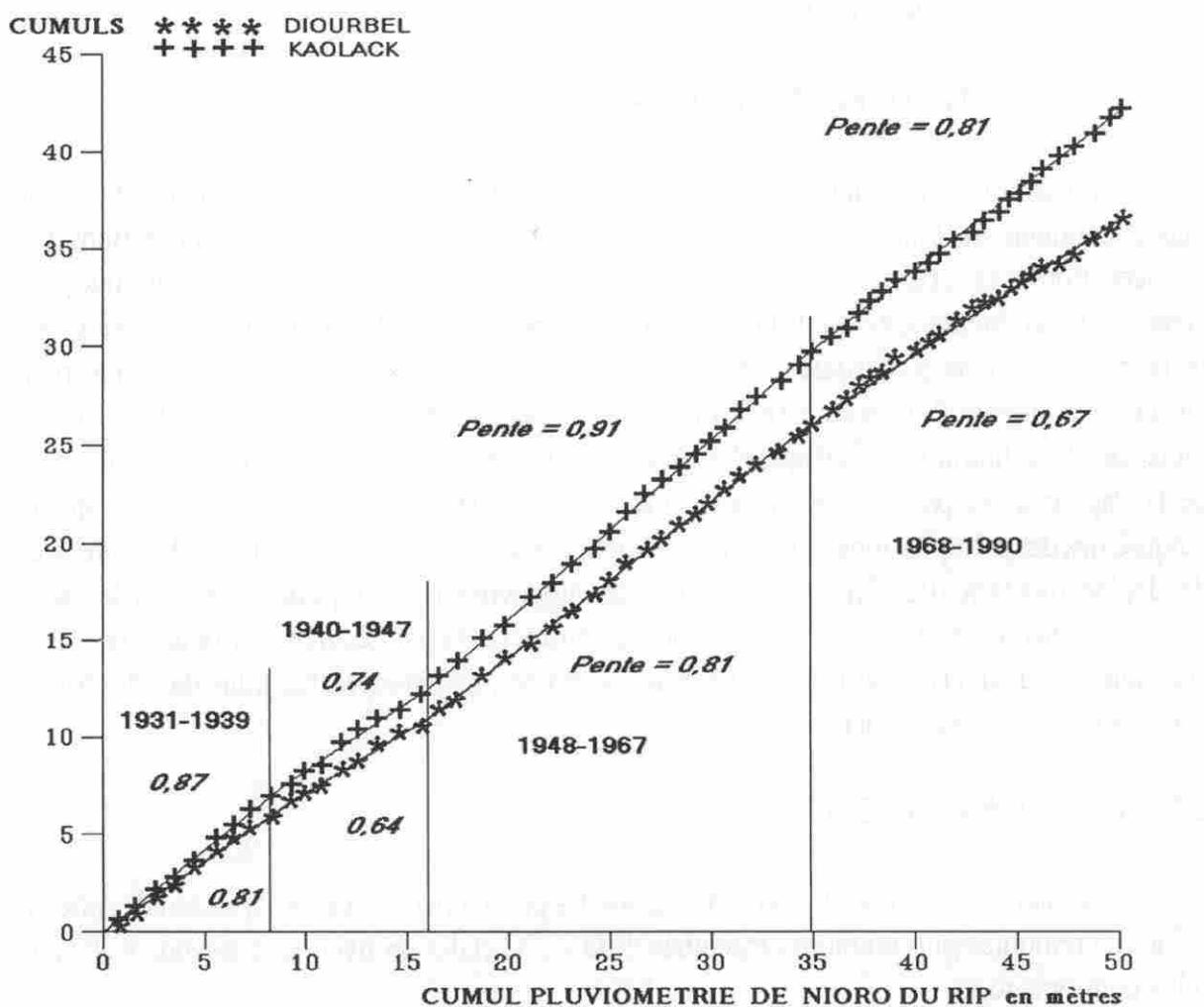
Les variations dans les pluviométries annuelles proviennent de la combinaison des phénomènes de remontée plus ou moins accentuée de la ZITC et des mouvements ascendants locaux 'plus ou moins forts.

2.2.2. LA VALEUR DES DONNÉES DE PRÉCIPITATION.

Nous avons vu les problèmes méthodologiques posés pour l'homogénéisation des données sur 36 années consécutives couvrant la période 1950-1985. La qualité des observations pluviométriques a été discutée à ce propos. Le réseau pluviométrique compte plus de 1300 postes sur l'ensemble des pays du CILSS. Mais de nombreux points de mesure sont récents et le fichier opérationnel est à jour jusqu'en 1990. En fait il a été retenu seulement 900 stations aux relevés de longue durée permettant de suivre l'évolution depuis 1950. La qualité de ce fichier montre qu'il y a, en gros, 80% de valeurs observées d'origine; 10% des données ont été corrigées, souvent par segmentations si le nombre de jours de pluie est insuffisant, et enfin on trouve 10% de compléments estimés pour les mois manquants. Les analyses en doubles cumuls ont permis de constater des changements de pente dans les droites de cumuls imputables aux diminutions de pluviométrie qui ne sont pas isotropes dans l'espace. La figure N° 6 est un exemple de doubles cumuls entre trois stations du Sénégal. Il est remarquable que la méthode de critique des données ait permis de mettre en évidences les alternances de périodes "sèches" et de périodes "humides".

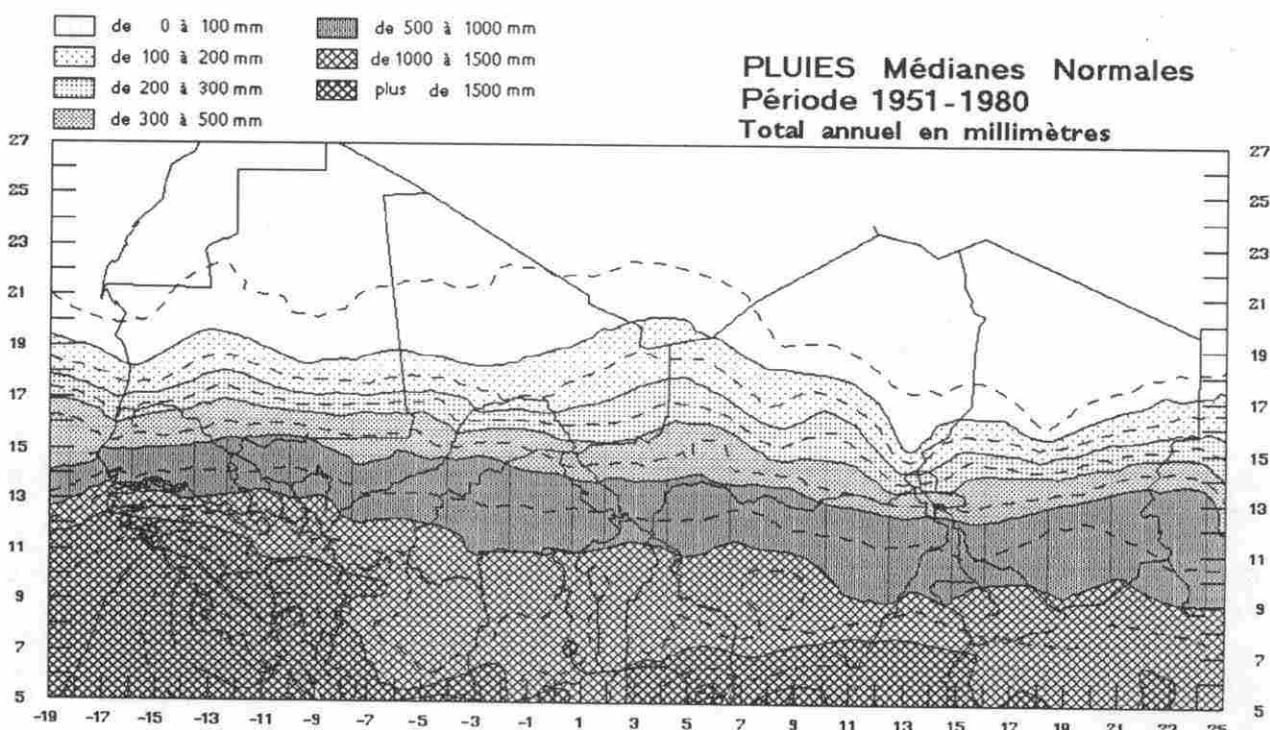
**DOUBLES CUMULS sur 60 ANS
1931 - 1990**

Figure N° 6



2.2.3. LES PRÉCIPITATIONS ANNUELLES.

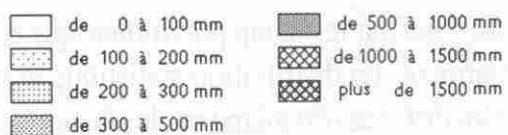
Elles se traduisent par des cartes d'isohyètes sur lesquelles on peut faire un certain nombre d'observations. La pluviométrie décroît du Sud vers le Nord d'un façon zonale. Mais des ondulations des isohyètes montrent l'influence positive du relief sur le champ pluviométrique et le rôle négatif des zones humides dans l'intérieur du continent. La distribution statistique des pluies peut être appréciée dans un premier temps par une loi de Gauss ou même par les quantiles observés, pour définir rapidement les variations interannuelles de pluviométrie. Pour les récurrences de 10 ans ou de 20 ans les résultats sont corrects pour les maxima mais les minima sont surévalués par rapport aux observations. Cette divergence s'accentue en montant vers le Nord où les pluies s'affaiblissent et les médianes s'éloignent de plus en plus des moyennes. La distribution devient très dissymétrique et il faut changer de loi d'ajustement. Au nord du 13° de latitude la variabilité est forte avec un coefficient de variation supérieur à 20%. Pour des raisons d'homogénéité nous avons adopté pour l'ensemble des stations le calcul des probabilités en ajustant les distributions à une loi gamma tronquée. Représenter les pluies par les seules médianes ne permet pas de rendre compte des variations très grandes d'une année à l'autre. Mais la distribution dans l'espace peut être appréhendée par cette cartographie. En général il y a décroissance du sud au nord et les isohyètes sont grossièrement orientées suivant les parallèles. Toutefois on observe des particularités locales comme le maximum pluviométrique sur la côte atlantique sud-ouest et un autre maximum sur le golfe du Biafra. Les ondulations des isohyètes sont dues à des facteurs locaux, soit de reliefs, soit de nappes d'eau plus ou moins permanentes ou affleurantes. La normale représentée contient une douzaine d'années, les dernières, bien autocorrélées, qui montre la permanence du régime actuel.



Carte N° 3a

Atlas Agroclimatologique du Sahel

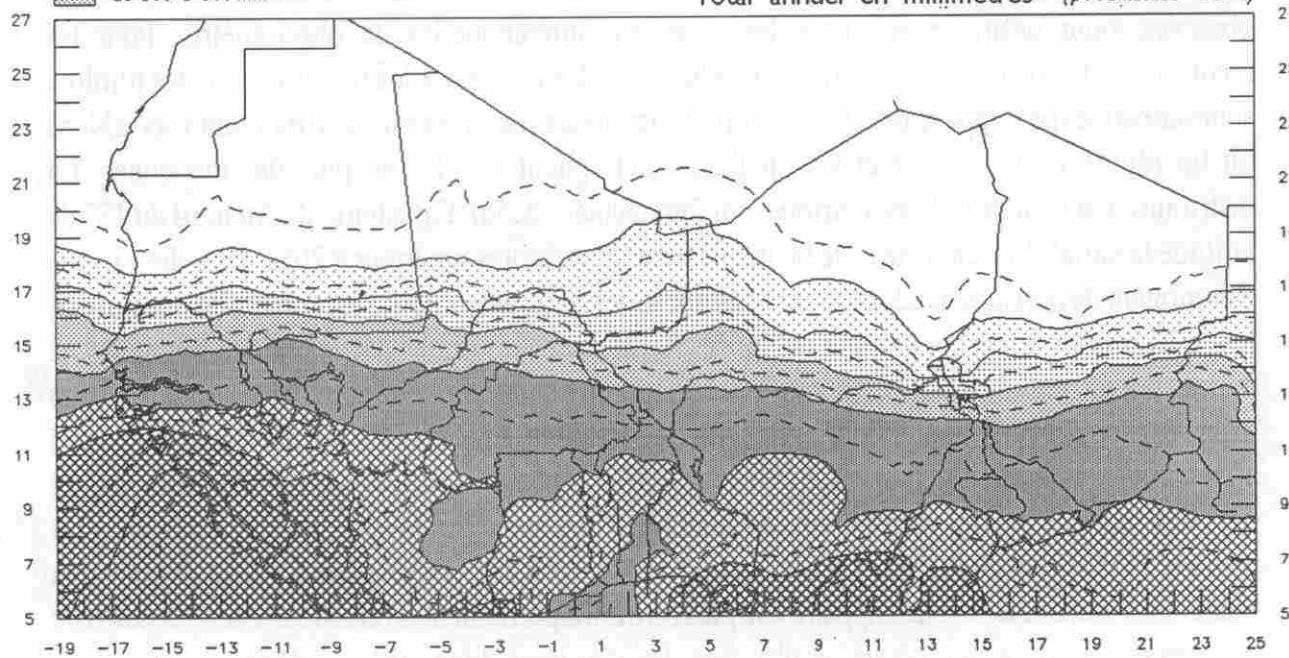
A cause de la grande variabilité interannuelle des pluies et pour avoir une certaine sécurité dans la réalisation des programmes de cultures nous proposons de considérer non seulement la médiane mais aussi deux séries de cartes aux seuils de probabilité de 75% et 90%. Les pluies représentées sont respectivement dépassées trois ans sur quatre et neuf ans sur dix (cartes 3b et 3c).



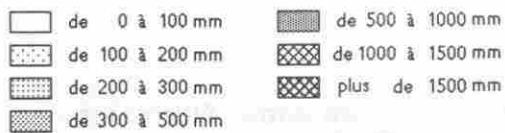
PLUIES quadriennales

Période 1951 - 1980

Total annuel en millimètres (probabilité 75%)



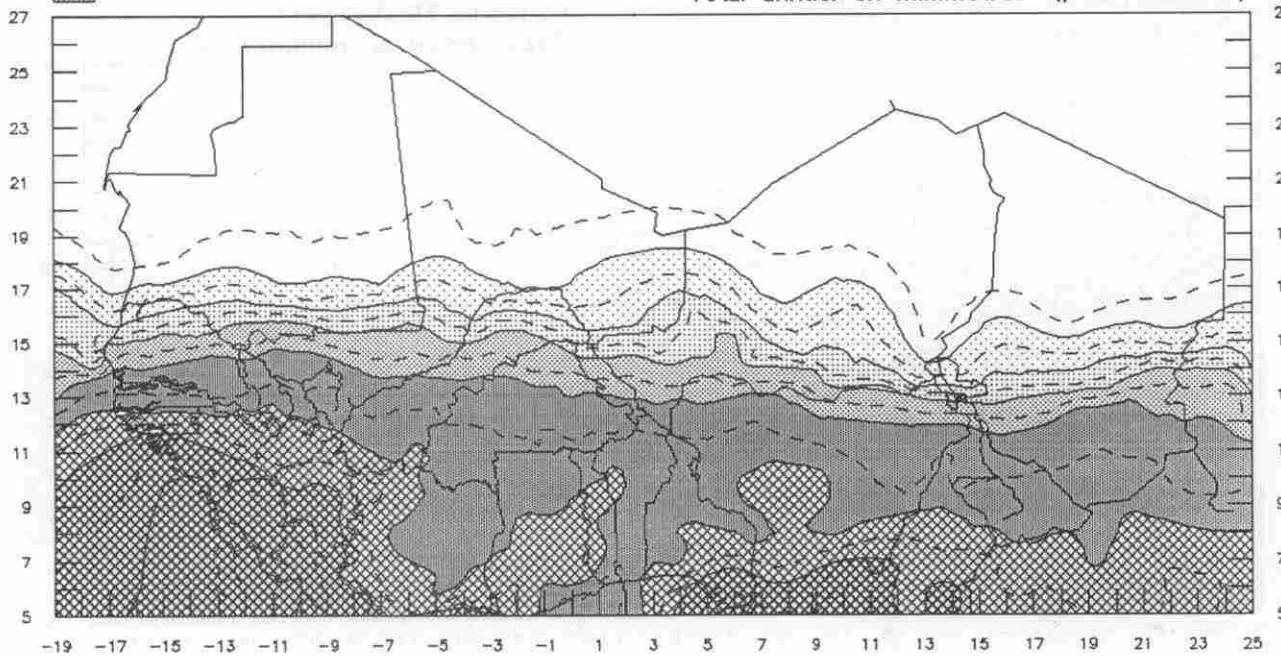
Carte N° 3b



PLUIES décennales

Période 1951 - 1980

Total annuel en millimètres (probabilité 90%)

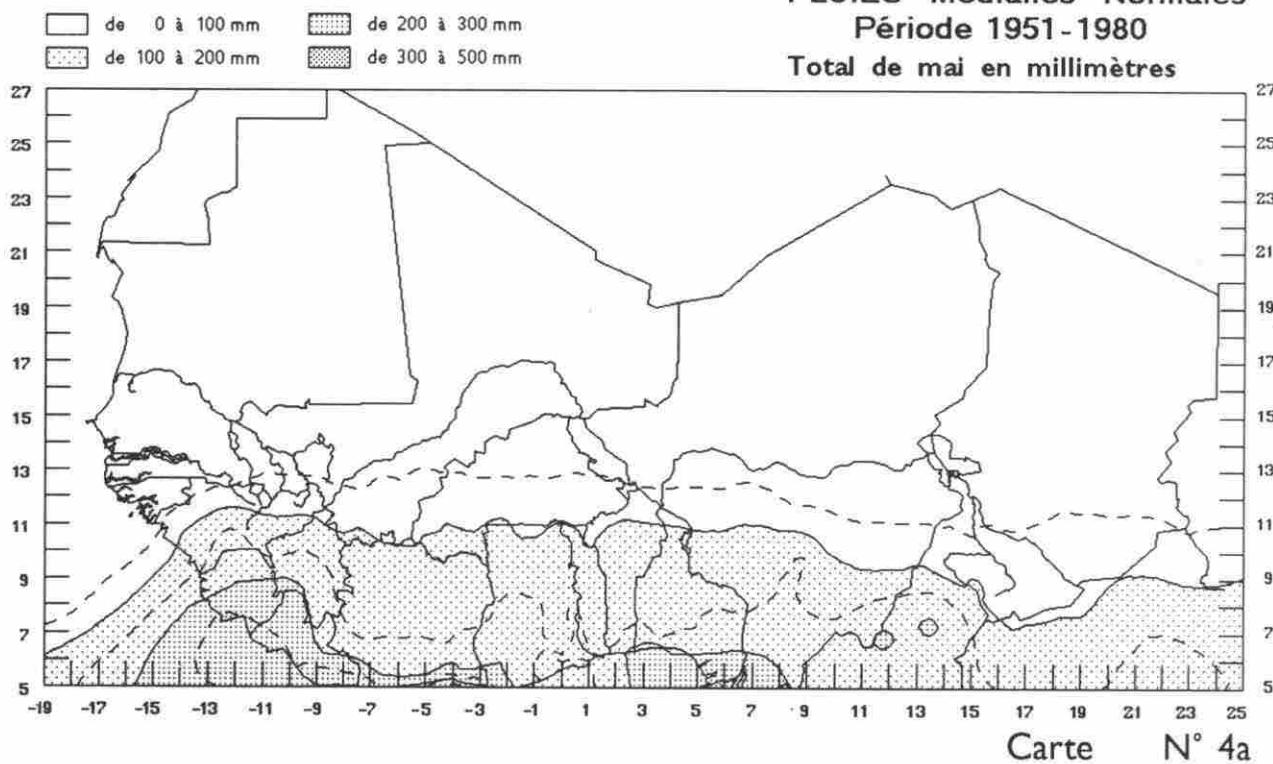


Carte N° 3c

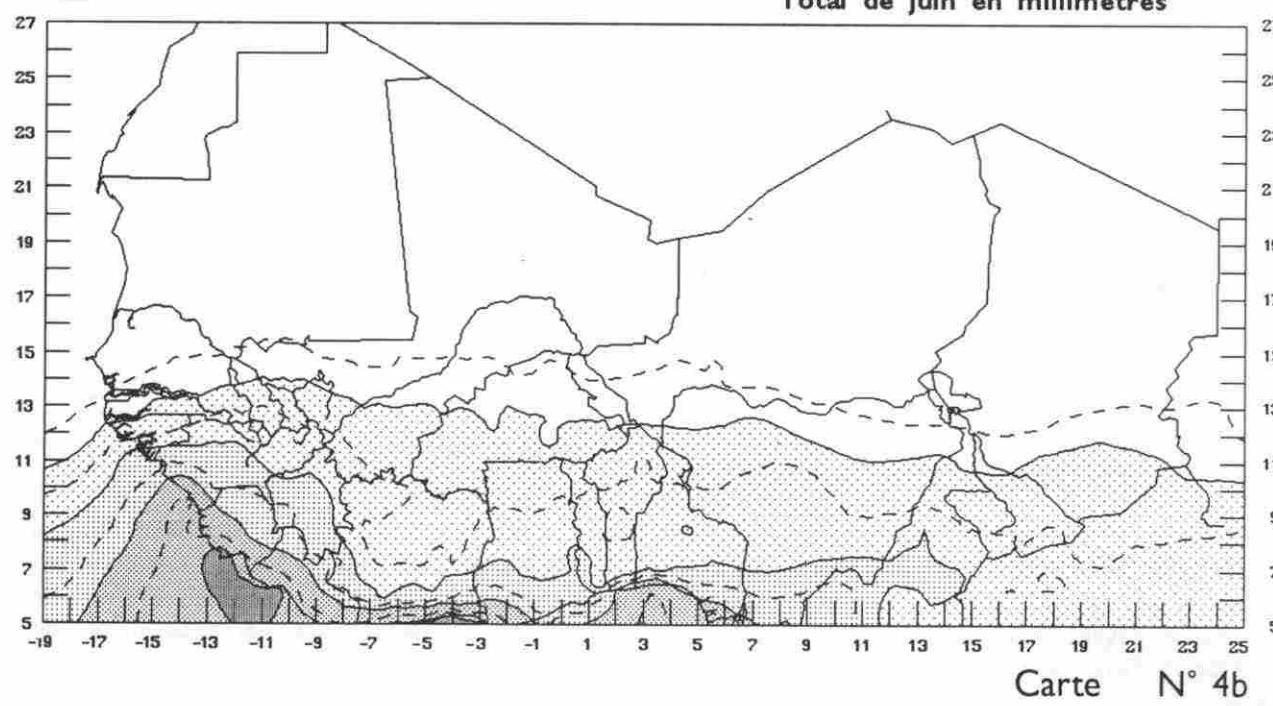
2.2.4. LA VARIABILITÉ SAISONNIÈRE DES PRÉCIPITATIONS.

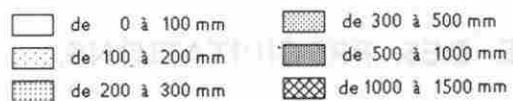
Dans toute la zone du Sahel la distribution des pluies dans le temps, que ce soit par mois ou par décade et unimodale. Il n'y a qu'une seule saison des pluies qui passe par un maximum généralement en août. Les cartes suivantes montrent l'évolution mensuelle des précipitations.

PLUIES Médianes Normales
Période 1951-1980
Total de mai en millimètres

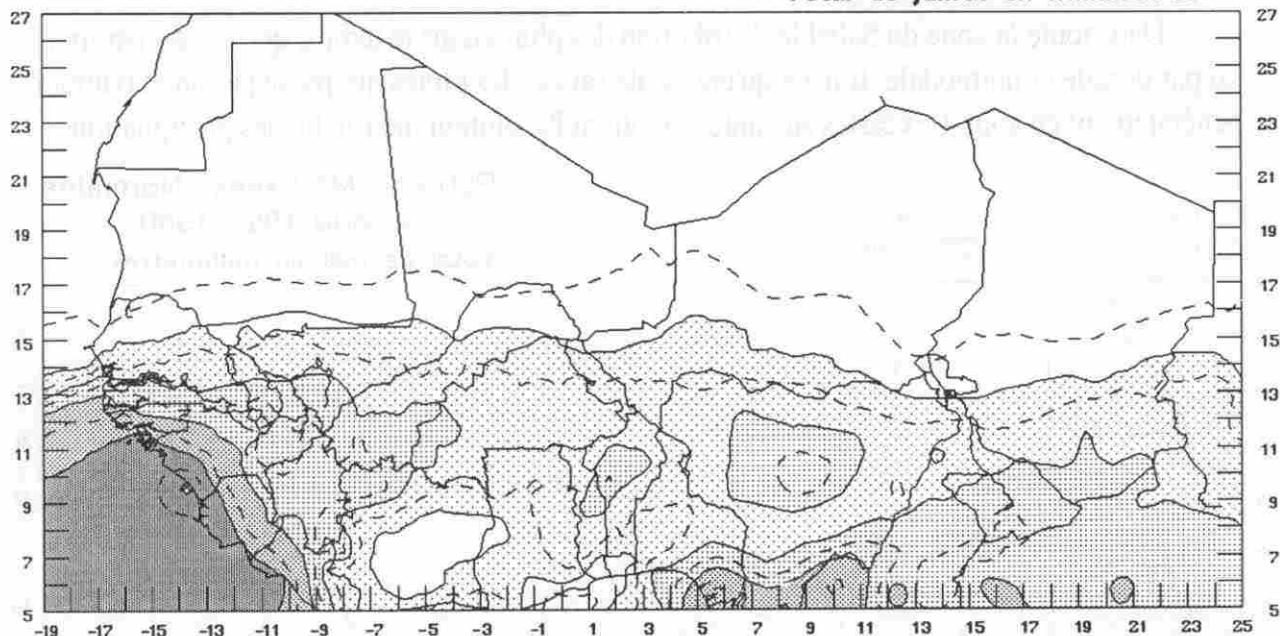


PLUIES Médianes Normales
Période 1951-1980
Total de juin en millimètres



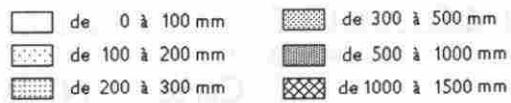


PLUIES Médianes Normales
Période 1951-1980
Total de juillet en millimètres

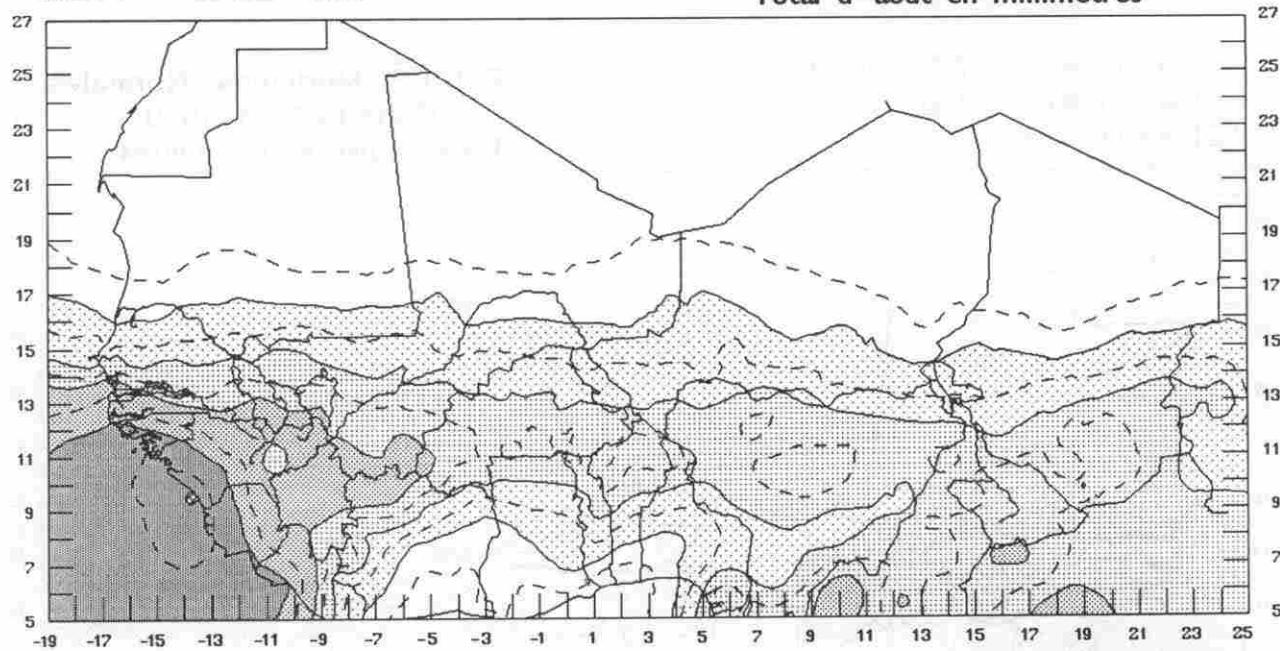


Carte N° 4c

En juillet, il faut remarquer la diminution des pluies vers la côte du Golfe de Guinée

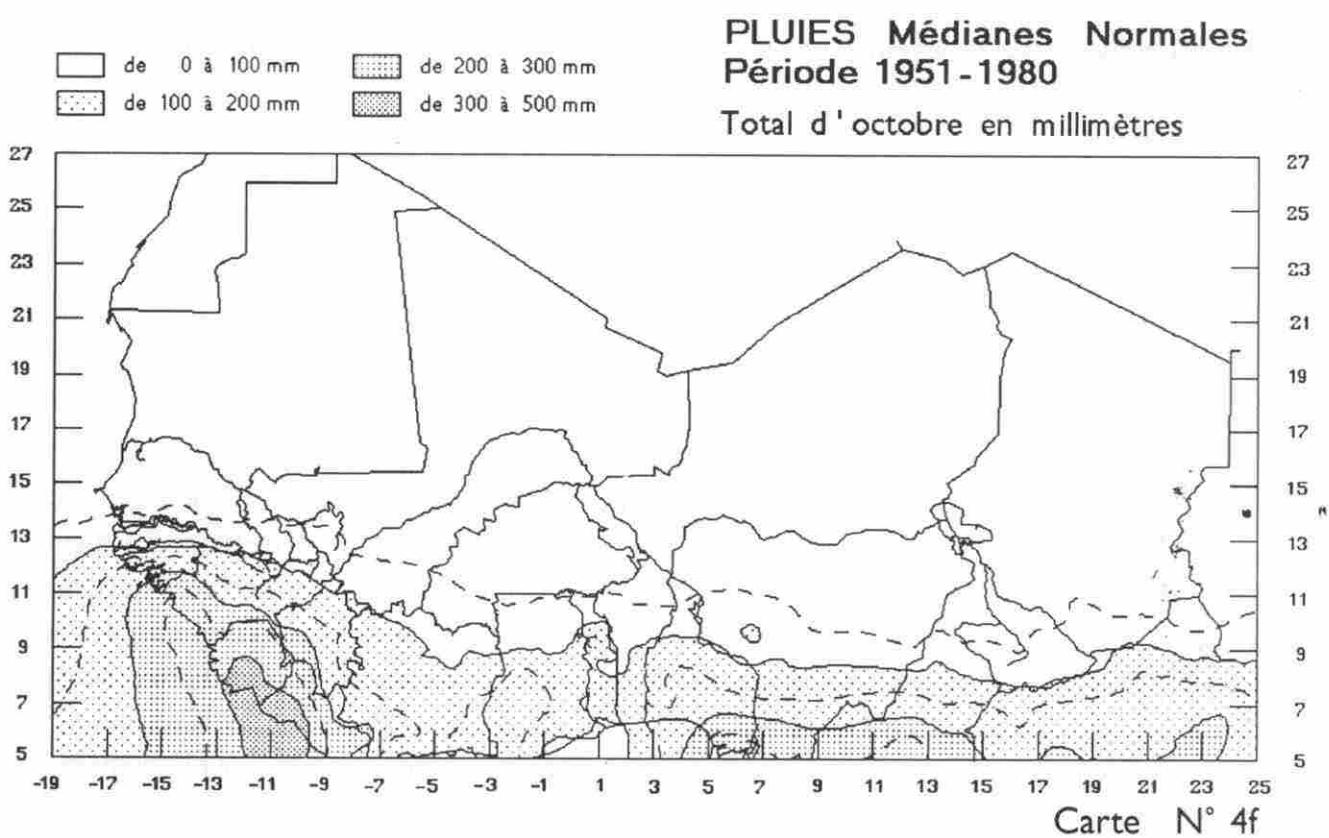
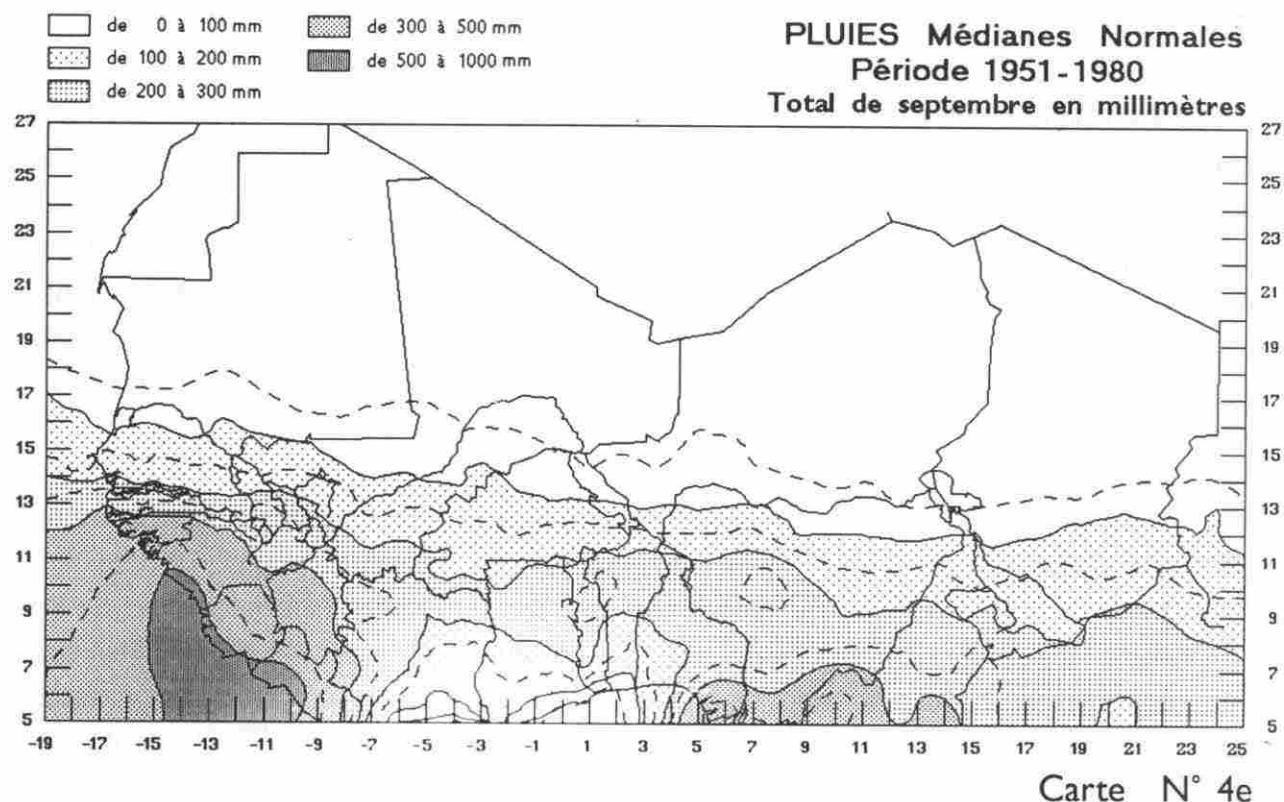


PLUIES Médianes Normales
Période 1951-1980
Total d'août en millimètres



Carte N° 4d

En août, le maximum de pluviosité est axé sur le 11ème parallèle tandis que la faiblesse des pluies sur la côte entre le Bénin et la Côte d'Ivoire s'accentue. L'isohyète 100 mm est vers le 15ème degré de latitude nord. La bordure atlantique des Guinée, de la Sierra Leone et du Libéria reste très arrosée.



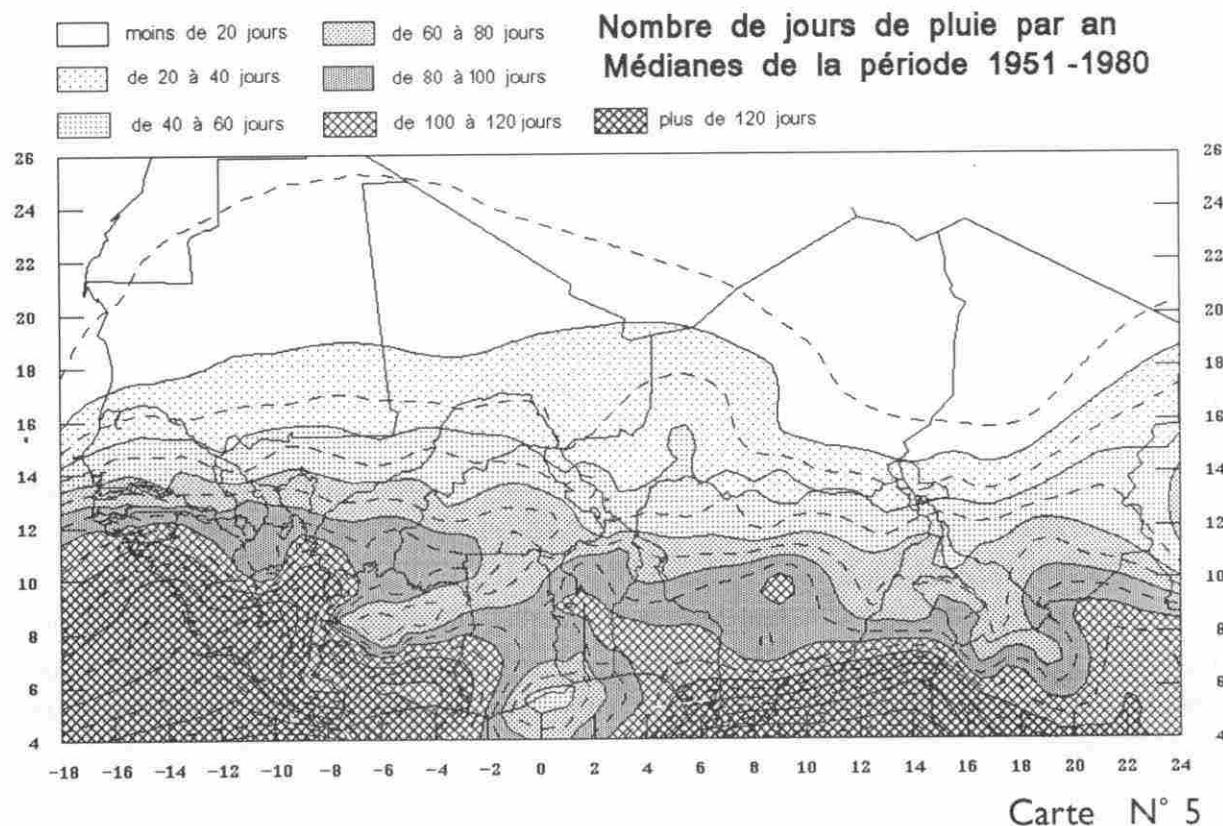
2.2.4.1. LA SAISON DES PLUIES.

La saison des pluies est une donnée de temps délimitée entre le démarrage et la fin des précipitations. Tout le problème est de définir ces bornes car les pluies sont irrégulières dans le temps et en quantités. Il y a des intervalles très variables entre deux jours de pluie. La difficulté réside dans le fait que la zone géographique de notre étude reçoit des pluies extrêmement contrastées allant de la sécheresse saharienne à des pluies tropicales de 2 mètres en Guinée-Bissau. Différents systèmes ont été proposés par de nombreux auteurs et s'appuient soit sur des concepts agroclimatiques, soit sur des bilans hydriques climatiques, soit sur la fixation, suivant des règles bien définies, de seuils pluviométriques.

Nous avons choisi une méthode qui propose à l'utilisateur des conditions par défaut pouvant être changées avant le calcul. Implicitement la saison des pluies commence avec 20 millimètres d'eau tombés en 1 ou 2 jours sans qu'une période sèche de 10 jours soit observée dans les 30 jours qui suivent. La période sèche est comptabilisée pour des pluies inférieures à un seuil de référence qui peut être fixé au dessus de 0,1 millimètre (seuil par défaut). La saison finit le premier jour après le 15 Août pour lequel le bilan hydrique annule une réserve d'eau de 60 millimètres avec une évapotranspiration de 5 millimètres par jour. On peut aussi estimer la fin de saison dix ou quinze jours après la dernière pluie égale ou supérieure à 5 millimètres. Une première observation montre que la variabilité est beaucoup plus forte pour le début de saison que pour la fin des pluies qui est généralement brutale. Les aléas du démarrage expliquent la pratique des dates de semis répétées pour diminuer le risque des faux départs suivis par une période sèche compromettant la levée des cultures.

2.2.4.2. LE NOMBRE DE JOURS DE PLUIES

Le nombre annuel de jours de pluie varie en décroissant du sud vers le nord en relation avec les hauteurs d'eau (carte N° 5). Dans la zone sahélienne la nombre d'événements pluvieux est souvent inférieur à 80 jours sauf en Guinée Bissau, au sud ouest du Burkina-Faso et au sud est du Mali. Les particularités de Côte d'Ivoire et de la côte du Golfe du Bénin apparaissent bien. Deux zones reçoivent plus de 200 jours de pluies: la côte du Libéria au sud ouest, le Golfe du Biafra au Nigéria et les hauteurs du Cameroun. Les jours de pluies apportent en moyenne moins d'eau au fur et à mesure que l'on s'élève en latitude. Une dorsale supérieure à 15 millimètres par événement pluvieux est axée sur le 10ème parallèle qui est le niveau moyen d'avancée de l'équateur météorologique vers le nord. Dans la zone sahélienne les apports d'eau sont en moyenne de 7 à 10 mm par jour de pluie entre le 14ème et le 15ème degré de latitude nord. Le nombre de jours pluvieux varie énormément d'une année à l'autre. Les minima ont été observés en 1984 sur presque tout l'ensemble du Sahel. Les maxima correspondent généralement aux années de pluviométrie abondante en quantité.



2.2.4.3. LES CARACTÉRISTIQUES MENSUELLES.

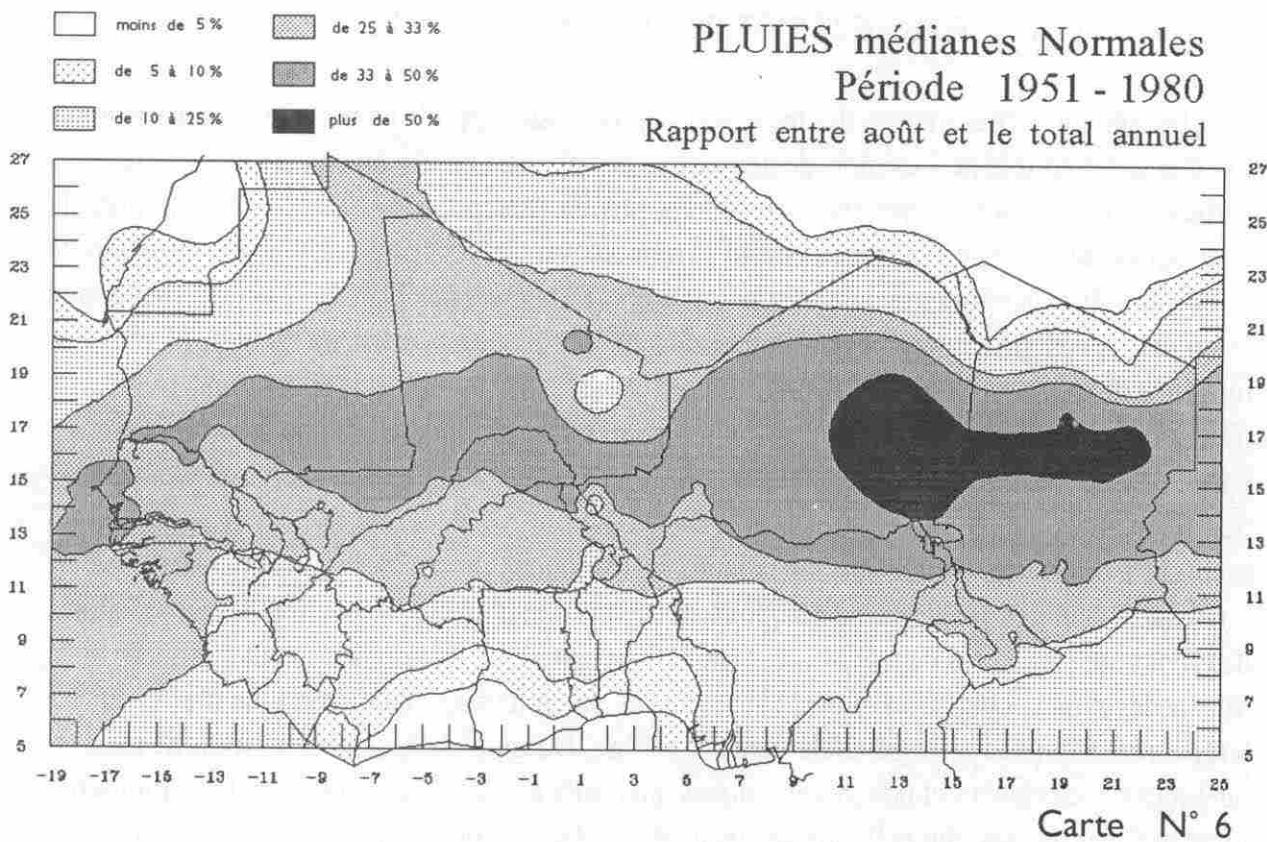
Les pluviométries mensuelles traduisent la progression, puis le recul de l'équateur météorologique sur le continent. Les mois de démarrage des pluies, mai et juin en général, sont les plus variables et certaines années ils ne reçoivent pas de précipitations. Dans ces conditions la distribution des pluies est tronquée surtout en montant vers le Nord plus sec. C'est ce qui explique la surestimation des pluies de la moyenne par rapport à la médiane. Dans les cas extrêmes quand les pluies ne sont présentes que dans moins de 50% des années, la médiane est nulle alors que la moyenne donne une estimation supérieure à zéro. Pour les autres mois on constate une irrégularité d'autant plus forte que les quantités médianes reçues sont plus basses. D'une façon générale les zones situées en dessous de l'isohyète 100 mm sont soumises à des pluies fantasques aux dates très fluctuantes et aux successions non assurées. L'effet zonal se retrouve ici et la répartition mensuelle des pluies évolue suivant la latitude. Toujours à propos des pluies mensuelles il est intéressant de noter que l'arrivée des pluies porte un coup d'arrêt à l'élévation des températures d'avril à juin. Les cartes de températures radiatives sont donc un bon indicateur d'avancée de la saison des pluies. Quand les pluies s'arrêtent les précipitations n'ont déjà plus d'effet sur les températures qui s'élèvent généralement en octobre. Du mois de décembre au mois de mai, les quelques pluies éparses et non systématiques qui tombent sur le Sahel sont appelées "pluies des mangues" car les manguiers fleurissent généralement en saison sèche. Elles sont soit dues à des invasions d'air polaire, soit à des remontées temporaires d'air humide atlantique.

Le mois de mai (Carte 4a) arrose en abondance la côte du Golfe de Guinée et le sud du Nigéria. Il apporte quelques pluies de semis dans les régions les plus méridionales du Sahel centre, à

l'extrême sud du Mali et au sud-ouest du Burkina Faso. Le Tchad reçoit quelques précipitations sur sa bordure sud-ouest. L'isohyète 100 mm plafonne vers 11° N et s'incurve vers le sud en Guinée. Il y a un démarrage plus tardif des pluies sur la façade atlantique ouest. Le mois de juin (Carte 4b) est généralement le mois de démarrage des pluies sur le Sahel. Elles commencent brutalement en Guinée Bissau et au sud-est du Sénégal. L'isohyète 100 mm plafonne à 13° N au sud-ouest malien et descend doucement vers 10° N au Soudan. Toutes les régions sud des pays du CILSS reçoivent leurs pluies de semis, même l'extrême sud-ouest du Niger. L'isohyète 200 mm est au 7° N, le golfe de Guinée est très arrosé ainsi que la façade sud-ouest de la Guinée.

Le mois de juillet (Carte 4c) est le premier mois régulier qui permet d'assurer les semis tardifs. L'isohyète 100 mm est au 15° N. Mais sur la côte de la Côte d'Ivoire à la frontière du Nigéria une diminution nette des pluies se manifeste avec petite saison sèche dans le centre ivoirien.

Le mois d'Août (Carte 4d) est généralement le plus pluvieux. Il représente une fraction importante de la pluviométrie annuelle comme le montre la carte N° 6. L'isohyète 100 mm oscille entre 15 et 17 degrés de latitude nord. C'est le mois qui présente le plus de constance dans les pluies dont la distribution est semblable à celles des pluies annuelles. Tous les autres mois ont une variabilité plus grande. L'arrêt des pluies est général sur la côte sud



Le mois de septembre (Carte 4e) voit l'isohyète 100mm descendre du Sénégal (16° N) au Tchad (12° N). De la Gambie au sud Burkina Faso plus de 200 mm tombent encore. Le mois d'octobre (Carte 4f) apporte encore quelques pluies en Casamance et au sud du Tchad. La Guinée Bissau reçoit encore 100 à 200 mm de pluies et plus.

2.3. LA VARIATION DES PLUIES ANNUELLES DEPUIS 1950.

La récente évolution des conditions pluviométriques au Sahel a, depuis 1968, diminué en quantité les apports d'eau par les précipitations. Mais la sécheresse au Sahel n'est qu'une partie d'un phénomène qui intéresse l'ensemble de l'Afrique de l'ouest. Des années sèches catastrophiques apparaissent fréquemment avec leurs conséquences néfastes sur l'agriculture de la région. Une comparaison entre la période plus humide 1950-1967 et la période suivante 1968-1985 caractérisée par des années de grande sécheresses est possible grâce à un échantillon de données pluviométriques de bonne dimension. Nous disposons de 900 postes pluviométriques observés depuis 1950 sur le Sahel et les pays avoisinants. Dans cette étude le début de la sécheresse a été fixé en 1968 et nous avons coupé nos séries de relevés en deux périodes consécutives et de même longueur, chacune de 18 ans. Les deux familles d'échantillons ont été comparées statistiquement et les moyennes, dans les deux tiers des cas, sont différentes au seuil de signification de 1%. Seules sept stations ne sont pas différentes d'un période à l'autre. A partir des relevés journaliers disponibles ont été calculées les médianes pluviométriques mensuelles et annuelles. Ce sont ces valeurs qui ont été retenues pour l'étude plutôt que les moyennes car nous avons vu que la distribution des pluies est dissymétrique dans la région. L'analyse des deux périodes précise l'amplitude du phénomène au pas de temps annuel et permet de montrer la variabilité de la sécheresse mois par mois. Même si la phase plus humide peut être considérée comme exceptionnelle elle n'en constitue pas moins la référence des états du CILSS face aux mauvaises années pluvieuses de ces vingt dernières années. La diminution des pluies est maximale sur une bande axée entre les parallèles 12 et 14 et avec une intensité plus forte à l'ouest.

Une méthode de comparaison simple consiste à prendre toutes les valeurs de pluviométrie annuelles ou mensuelles d'une série chronologique et de les classer en ordre décroissant. En agissant ainsi on gomme les fluctuations interannuelles tout en conservant la distribution observée dans une population de pluies. Si on dessine sur le même graphique les séries "sèche" et "humide" on peut voir si les distributions sont identiques ou différentes. En abscisse on fait figurer les fréquences observées en terme de dépassement. A titre de démonstration la figure N° 7 représente les pluies annuelles, traitées par cette méthode, pour les neuf capitales des pays du CILSS. Nouakchott a pratiquement perdu les deux tiers de ses pluies. Praia et Dakar ont maintenant une pluviiosité inférieure de la moitié. Les stations les moins touchées sont Ouagadougou et Bamako. Et si Bissau n'est affecté que de 20% cela représente une lame d'eau de près de 600 mm. Banjul à non seulement une forte diminution mais a une irrégularité beaucoup plus grande. Les mêmes graphiques seront employés plus loin pour montrer les variations mensuelles observées. Cette représentation simple montre, pour une série, l'amplitude des variations observée qui est d'autant plus grande que la courbe est plus inclinée. L'écart entre les courbes des deux séries indique le changement éventuel dans la pluviométrie. Si elles se recoupent en plusieurs points on peut dire qu'il n'y a pas de modification. Au contraire deux courbes bien distinctes appartiennent à deux populations vraisemblablement différentes. L'usage de ces courbes fréquentielles peut être appliqué à d'autres considérations telles que le démarrage ou la fin des pluies et permet de vérifier

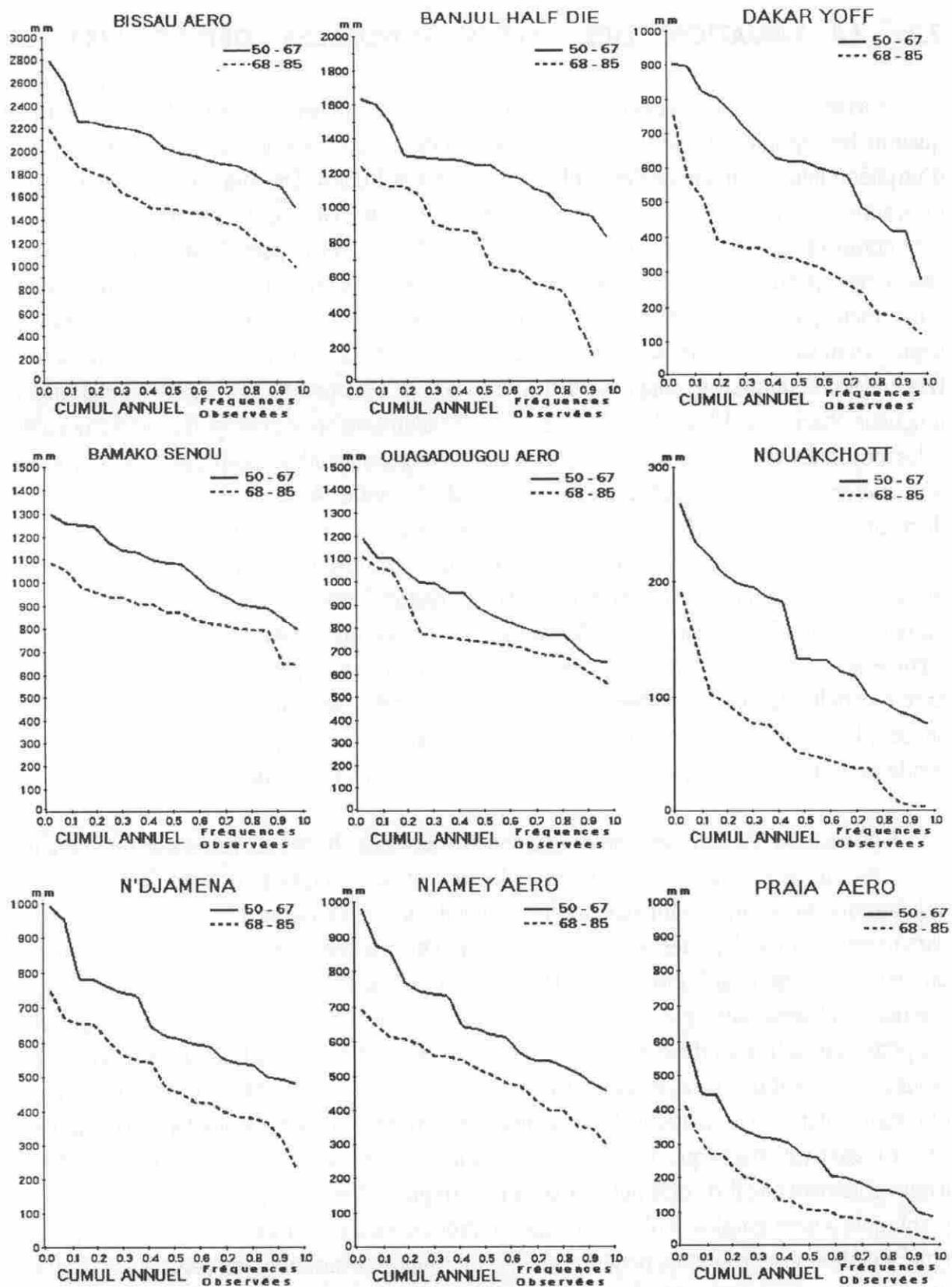


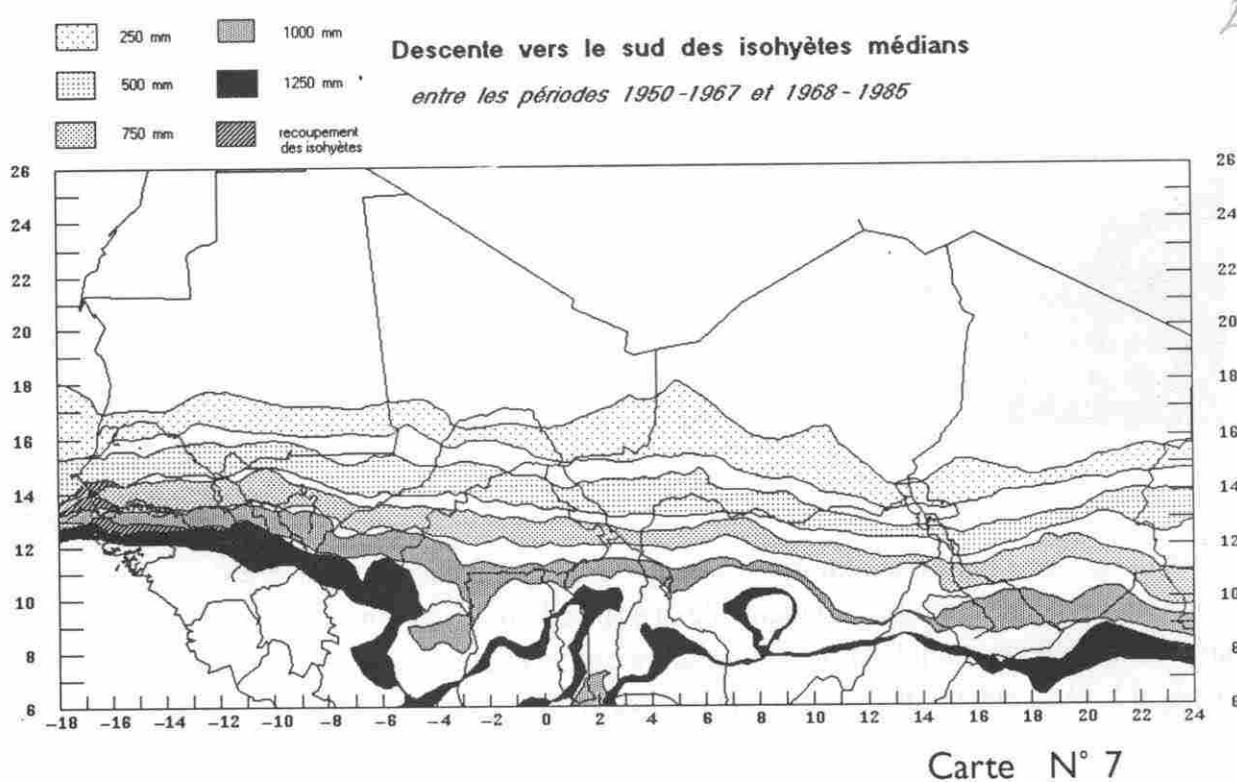
Figure N° 7

s'il y a simultanéité ou décalage de ces épisodes pour diverses stations. Mais cette façon d'opérer ne donne que des résultats points par points. Si ses renseignements sont intéressants il faut envisager d'autres méthodes pour faire une analyse régionale.

La façon la plus traditionnelle de représenter les variations de pluviométrie est de tracer soit des isohyètes, soit des courbes de diminution (ou d'augmentation des pluies). Toutes ces méthodes sont associées ici pour bien étudier le phénomène de changement climatique.

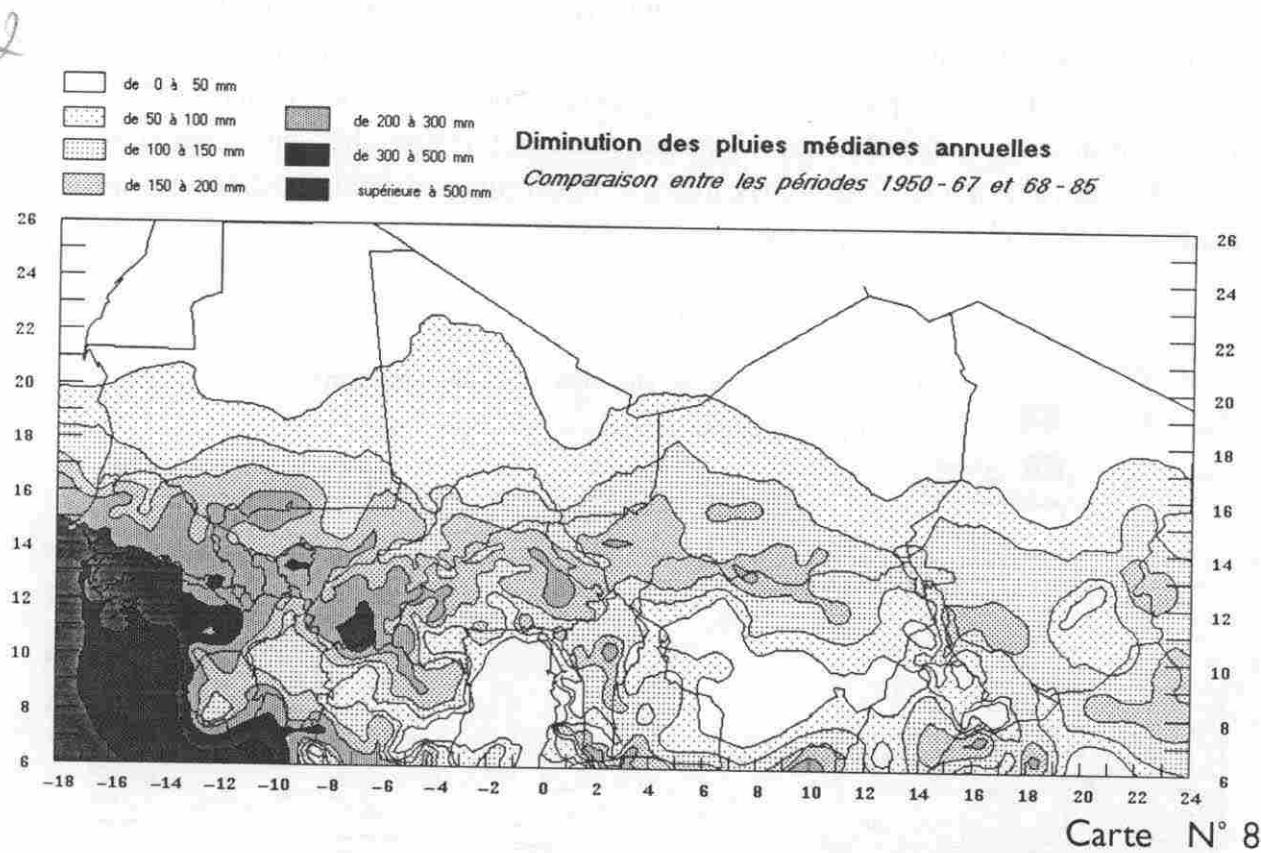
2.3.1. L'ÉVOLUTION DES ISOHYÈTES

On peut apprécier l'ampleur régionale du changement des pluviométries annuelles en observant le déplacement vers le sud des isohyètes. La carte N°7 présente l'évolution des isohyètes annuelles au pas de 250 mm. Cette descente n'est pas homogène, elle dépend à la fois de la valeur de l'isohyète et de sa localisation géographique. Les conséquences sont dramatiques pour l'agriculture des régions sahéliennes et soudanaises. Ainsi la limite Nord des cultures caractérisée par l'isohyète 250 mm a reculé de 300 kilomètres vers le Sud au droit de Tahoua au Niger. Au Sénégal, dans la moitié nord du pays les isohyètes ont reculé d'environ 110 kilomètres vers le sud au cours des vingt dernières années. Les zones de cultures avec une bonne probabilité de réussite rétrécissent comme une peau de chagrin. Elles correspondent à l'isohyète 500 mm. La Mauritanie en est maintenant quasiment dépourvue, le bassin arachidier et la façade maritime du Sénégal sont gravement touchés avec environ 50% de perte des pluies, le Niger n'a plus que deux petits triangles favorables à la culture au Sud, le Mali utile au sud reste sans trop de problèmes d'alimentation en eau, la région sahélienne du Burkina Faso tend à couvrir la moitié Nord du pays, même le Tchad qui est le moins touché subit une dégradation de ses conditions de production.



2.3.2. SPATIALISATION DE LA BAISSE DE PLUVIOMÉTRIE

Pour décrire ce qui s'est passé, la cartographie des pertes médianes en eau est très intéressante (Carte N° 8). C'est la valeur absolue des pertes pluviométriques médianes qui a été retenue plutôt que leur valeur relative par rapport au total initial. En effet si dans le désert on trouve des pertes de 100% sur des très petites pluies de quelques millimètres ou dixièmes de mm, le pourcentage régressera vers le sud où les pluies totales sont abondantes et dépassent les 3000 mm. Les valeurs réelles des déficits donnent l'amplitude du phénomène de diminution des apports d'eau par les pluies. On constate dans une première analyse qu'il y a un affaiblissement des pluies plus important en allant vers l'ouest. La représentation d'une partie de la carte par un bloc diagramme en trois dimensions vu de la Lybie à une allure exponentielle (Figure N° 8). Cette répartition indique que la partie ouest est plus touchée bien qu'elle soit plus proche du potentiel précipitable. Ceci ne montrerait-il pas l'importance de la réalimentation locale par le jeu de l'évaporation rapide d'une partie de l'eau qui tombe? En effet, une petite diminution des pluies au Tchad entraîne un



léger déficit de l'humidité atmosphérique qui avec la circulation d'est des nuages va venir s'ajouter, vers l'ouest, aux pertes potentielles d'un flux de mousson venant du sud ouest. De proche en proche l'effet se cumule et prend une allure exponentielle en arrivant vers la côte. Ainsi au Sénégal la carte montre un recouplement des isohyètes.

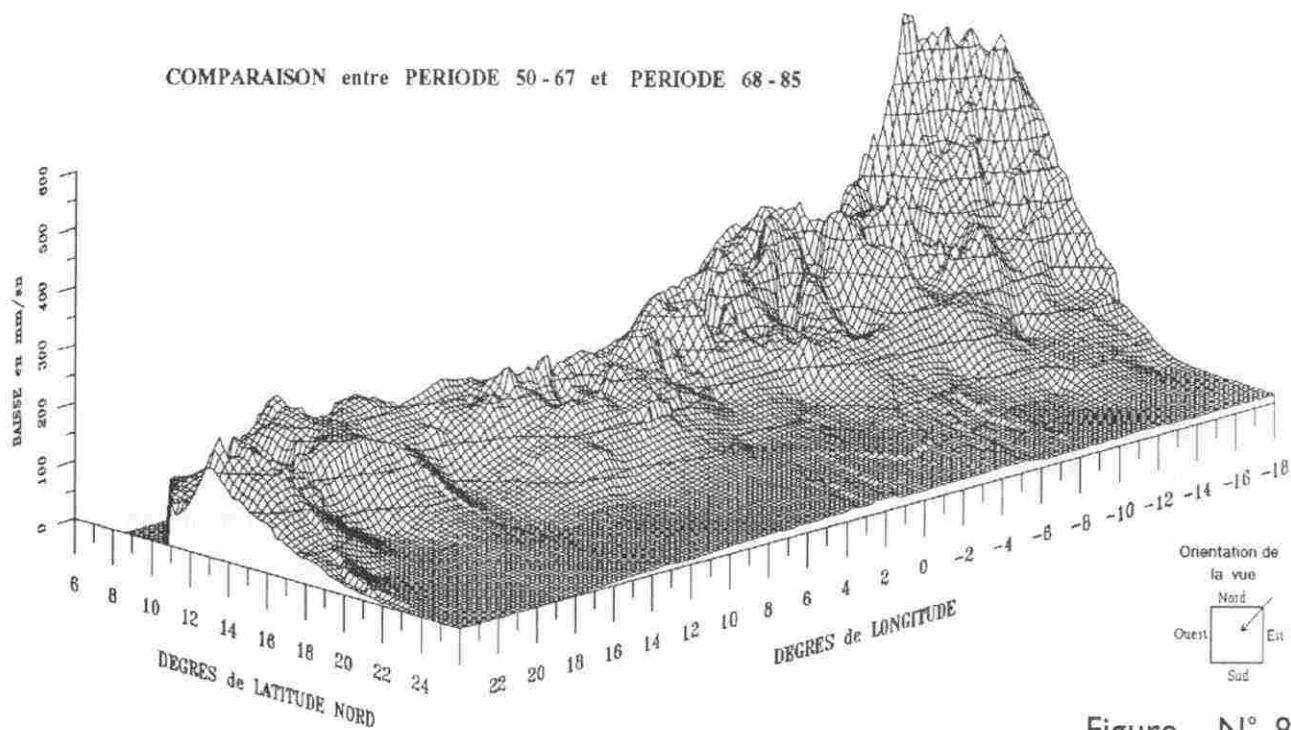


Figure N° 8

Le deuxième aspect du déficit est qu'il présente une dorsale maximale axée d'est en ouest entre le 12ème et le 14ème parallèle. Ce qui montre que la Zone Intertropicale de Convergence ne remonte plus aussi loin vers le Nord apportant un plus faible potentiel de formations pluviogènes. Les pluies, au nord du 12ème parallèle, sont maintenant presque toujours d'origine convective, créées dans la structure FIT, les systèmes nuageux importants donnant des pluies presque continues ont pratiquement disparu de la zone et restent au sud.

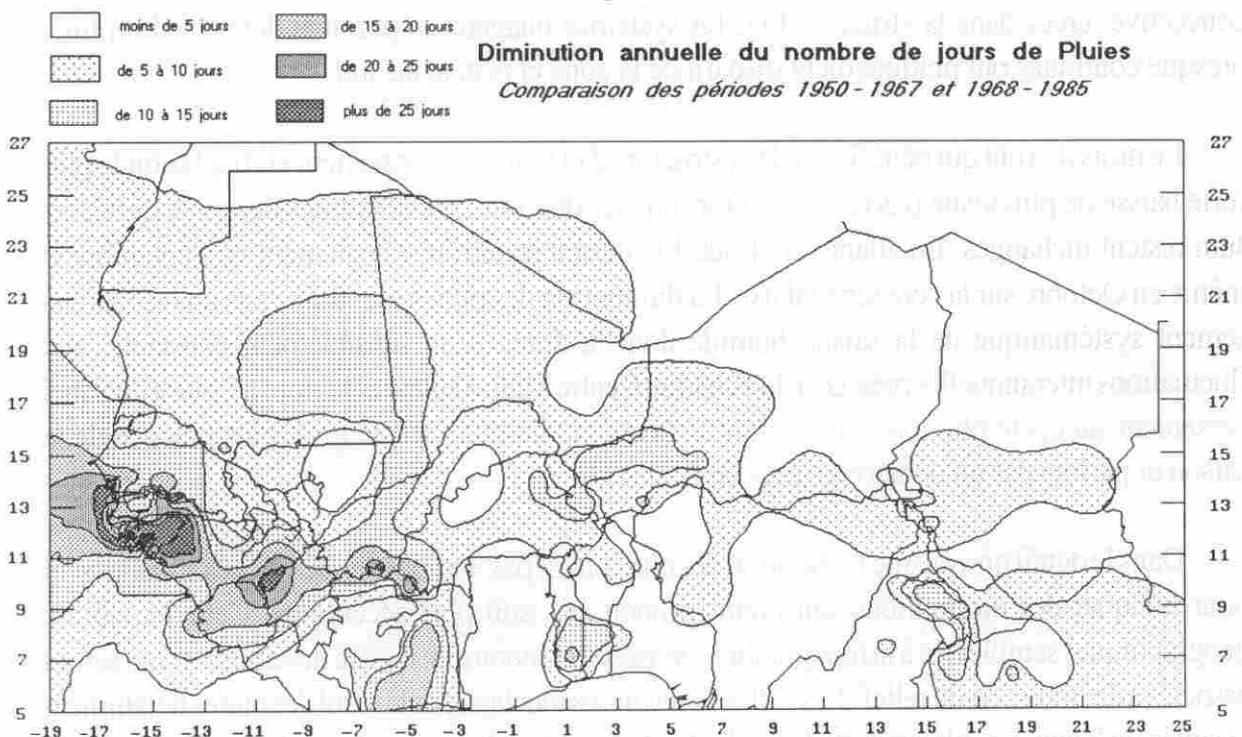
Le mois d'Août qui bénéficiait de la structure ZITC au développement vertical subit la plus forte baisse de pluviosité (carte N° 11), alors que les distributions des pluies des mois de Mai et Juin restent inchangés. En allant vers l'ouest le déficit se retrouve également en Septembre et même en Octobre sur la côte sénégalaise. La diminution des pluies n'entraîne pas un raccourcissement systématique de la saison humide dont la durée reste sensiblement constante, aux fluctuations interannuelles près, ceci du Tchad au Centre Mali. Seules les régions à l'ouest du Sahel présentent un cycle pluviométrique significativement amputé par un arrêt plus précoce de la saison et parfois par un démarrage plus tardif des pluies.

Dans le détail on voit que la variation des pluies n'est pas homogène. Des tâches apparaissent pour indiquer des diminutions soit moins prononcées, soit plus accentuées. Cette variabilité géographique semble liée à la topographie comme on le montre en faisant des transects qui seront associés à des transects du relief. Les vallées sont moins touchées par le recul des pluies notamment la vallée du Niger. Les plateaux ou de faibles hauteurs ont vu diminuer plus fortement leurs pluies. La même relation existe entre les occurrences de nuages pluviogènes à sommets froids et la variabilité du relief.

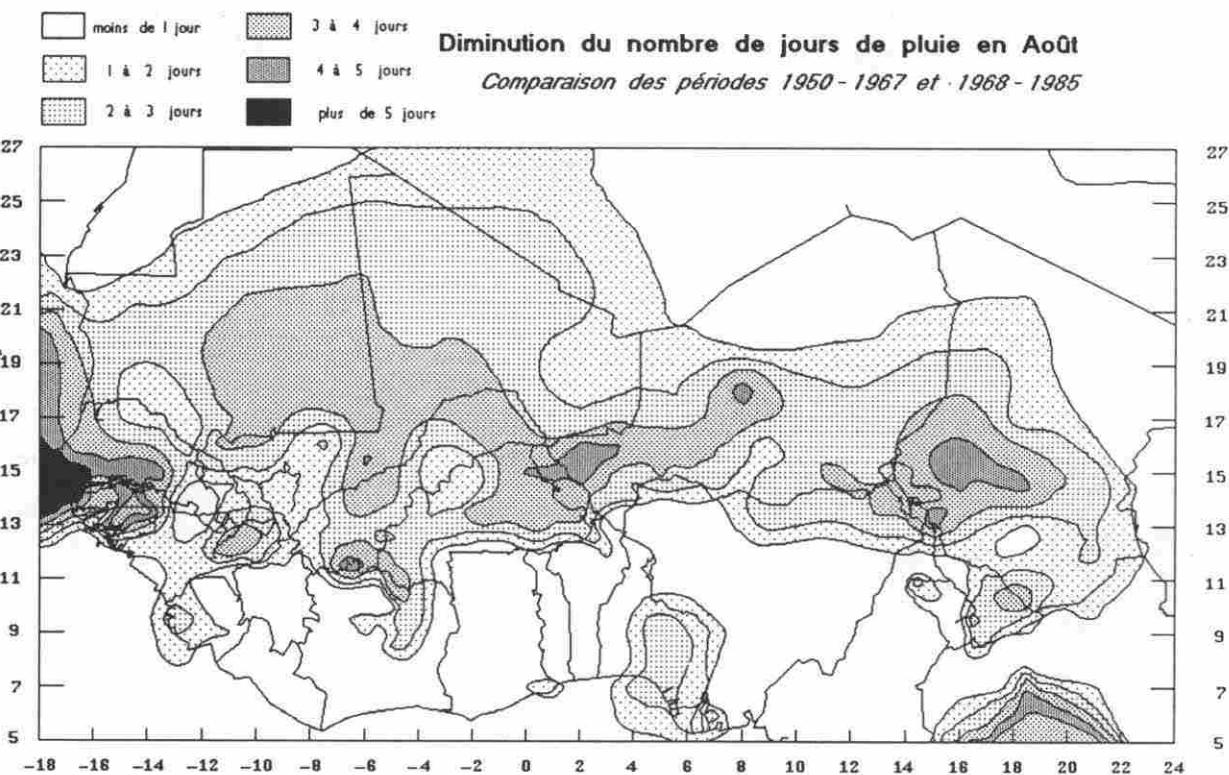
2.3.3. LE NOMBRE DE JOURS DE PLUIE

Pour vérifier si avec la diminution des pluies il y a variation consécutive du nombre de jours de pluies, les traces n'ont pas été prises en compte car elles ne sont pas toujours relevées. En revanche les petites pluies de quelques dixièmes ont été conservées puisqu'elles correspondent à une situation pluvieuse comme on peut le vérifier sur les postes voisins par des hauteurs de précipitation plus conséquentes. Le nombre de jours de pluies est extrêmement variable d'une année à l'autre mais dans l'ensemble on peut dire que l'ordre de grandeur de la diminution observée est de 10% en moyenne. Statistiquement le changement n'est pas toujours significatif à cause de la grande hétérogénéité due aux conditions de collecte des mesures de pluviométrie. La modification est toujours plus sensible vers l'ouest car on y observe une diminution supérieure à 25 jours en Guinée-Bissau (carte n° 9). Dix jours de pluies ont disparus dans l'Est mauritanien et le Mali occidental mais il s'agit là de pluies faibles de quelques dixièmes de millimètres remplacées par des traces. L'étude mensuelle des jours de pluies montre que le mois d'août contribue entre un tiers et la moitié à la diminution annuelle (carte N° 10). Nous verrons que ce mois subit la plus forte baisse de pluviométrie.

Un indicateur intéressant est la pluviosité moyenne par événement pluvieux. C'est le rapport des hauteurs totales de précipitation médianes au nombre de jours de pluie observés. La valeur obtenue montre que l'évolution des quantités de pluies est différente de celles du nombre d'événements pluvieux.



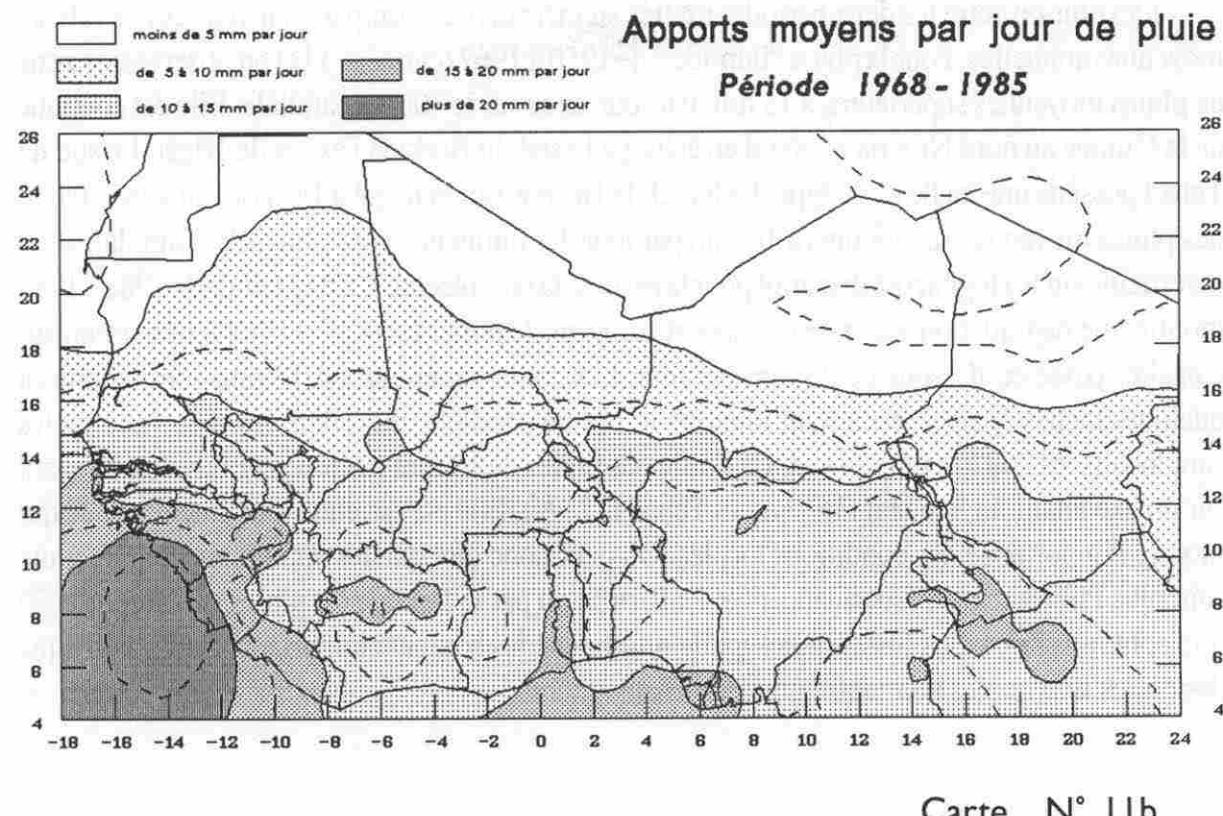
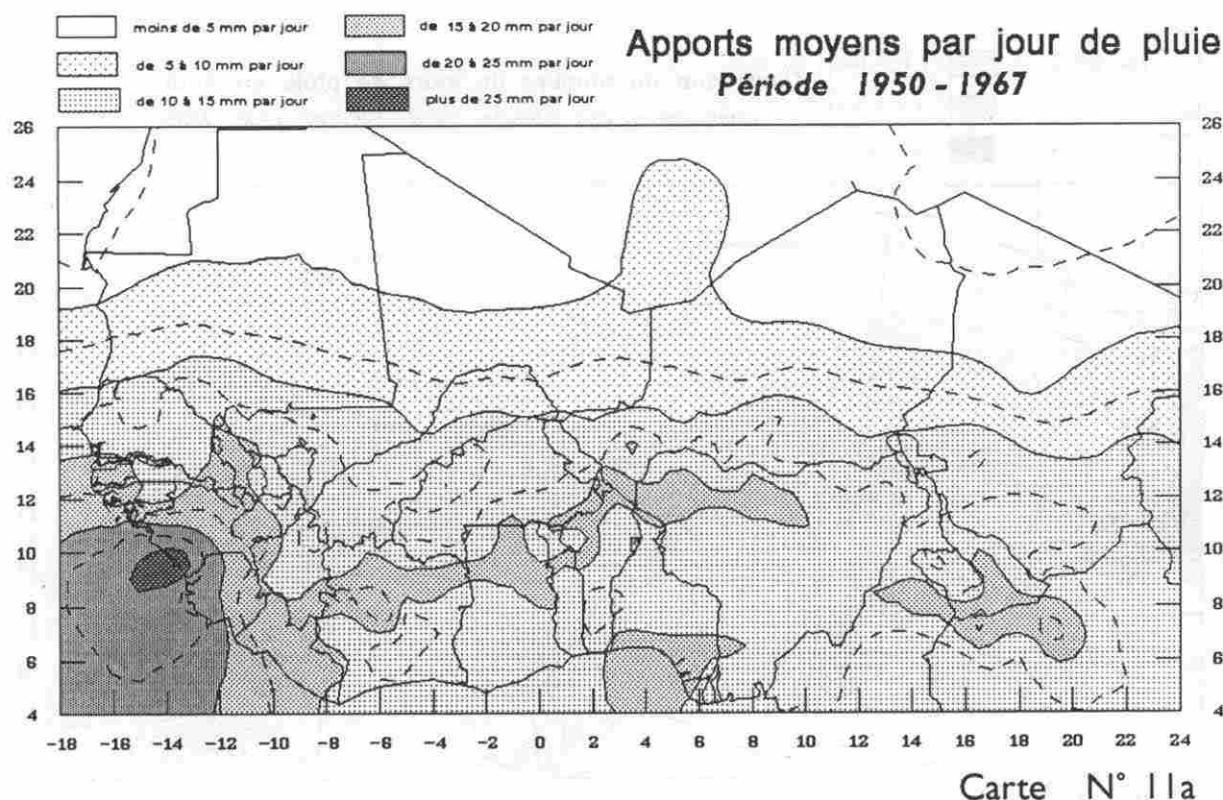
Carte N° 9



Carte N° 10



L'évolution entre les deux périodes est très significative en comparant les cartes des valeurs moyennes annuelles. Pour la phase "humide" de 1950 à 1967 (carte N° 11a) on observe une zone de pluies moyennes supérieures à 15 mm par jour, axée sur le 10ème parallèle. Elle est continue de la Guinée au nord Nigéria et prend en écharpe le sud du Burkina Faso et du Niger. Le sud du Tchad possède une tache de ce type. Le Sahel de 16° nord au Sénégal à 14° nord au Tchad reçoit des pluies moyennes supérieures à 10 mm par jour. La limite nord des pluies de 5 mm laisse un diverticule sur le Hoggar qui disparaît pour la période la plus récente. Cette période de 1968 à 1985 montre une dégradation générale des apports moyens de pluie (carte N° 11b). Le maximum sur Conakry passe en dessous de 25 mm par jour. Les zones supérieures à 15 mm sont réduites à quelques taches éparses, encadrant toujours le 10ème parallèle, mais dont les plus importantes sont localisées 200 km plus au sud. La limite des pluies de 10 mm par jour se trouve maintenant sur un axe allant du Sénégal (15° N) au Tchad (12° N). Elle est devenue plus fluctuante ce qui montre l'importance des conditions locales. On peut donc dire que les apports moyens de pluie sont plus faibles mais il faut nuancer cette affirmation par le fait que les pluies supérieures à 20 mm sont plus rares. Les fortes pluies gardent toujours des hauteurs importantes et la statistique des pluies maximales ne montre guère de changement.



2.4. VARIATIONS des PLUIES MENSUELLES .

2.4.1. DESCRIPTION DES MODIFICATIONS

Nous négligerons les mois de mai et de juin (figure N° 9), lesquels, au démarrage des pluies, apportent de très faibles quantités de précipitations sur le Sahel, sans présenter de variations significatives. Les deux distributions de pluies sont semblables. On voit que Dakar reçoit beaucoup moins de pluies en juin que Niamey et N'djamena.

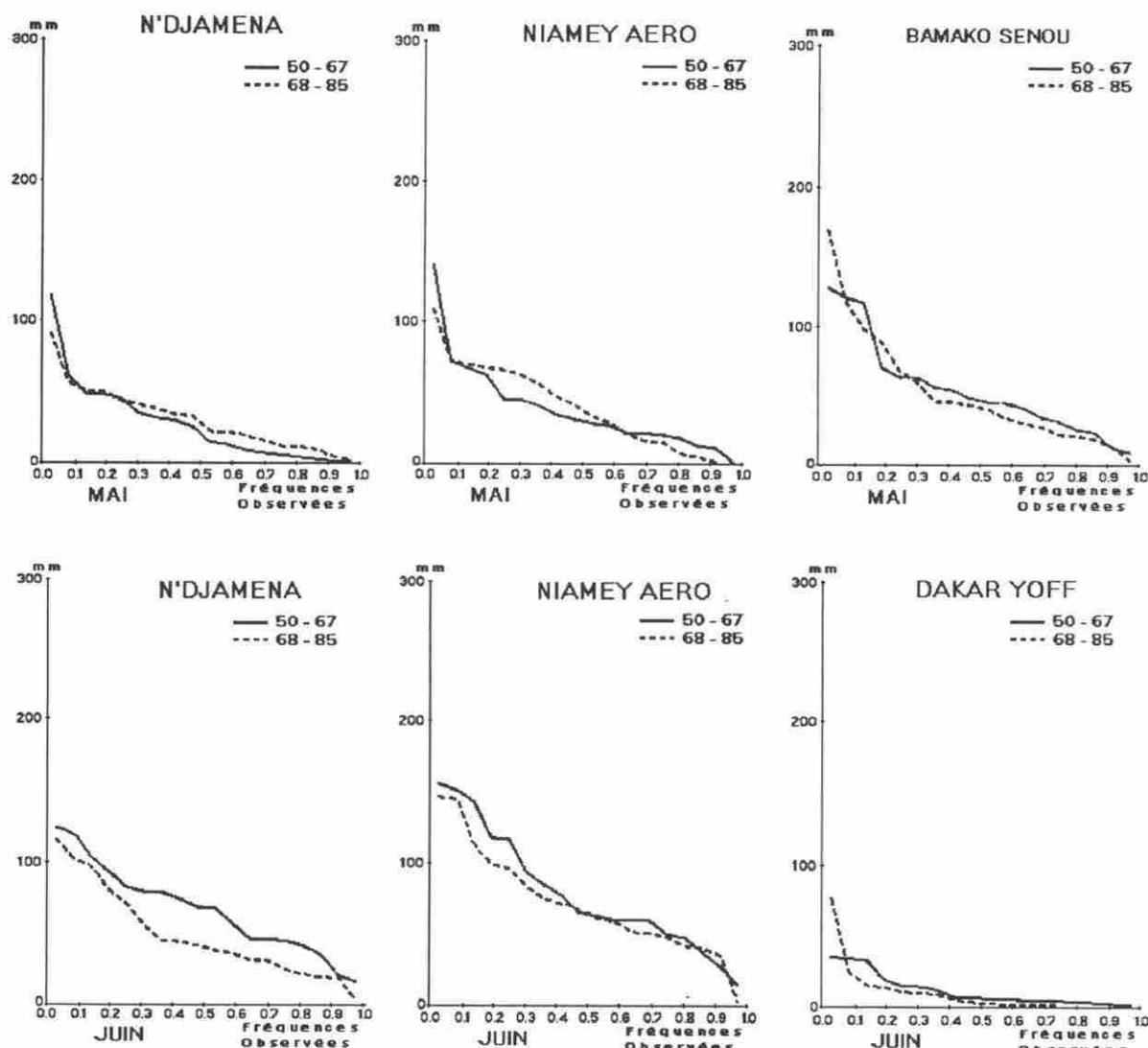


Figure N° 9 : Distributions des pluies des mois de mai et de juin

Les premières différences notables entre les deux périodes apparaissent au mois de juillet. La montée des masses nuageuses avec la pénétration de l'air de mousson semble se faire avec un retard qui se traduit par un léger déficit en juillet (carte n° 12a), axé sur le 14ème parallèle. Mais il n'est pas encore statistiquement significatif à cause des grandes fluctuations observées ce mois là qui entraîne une très grande variance. Le nombre de jours de pluie y reste stable et correspond à l'isochrone de 10 jours. Seule, à l'ouest, la côte entre la Gambie et la Guinée est très touchée

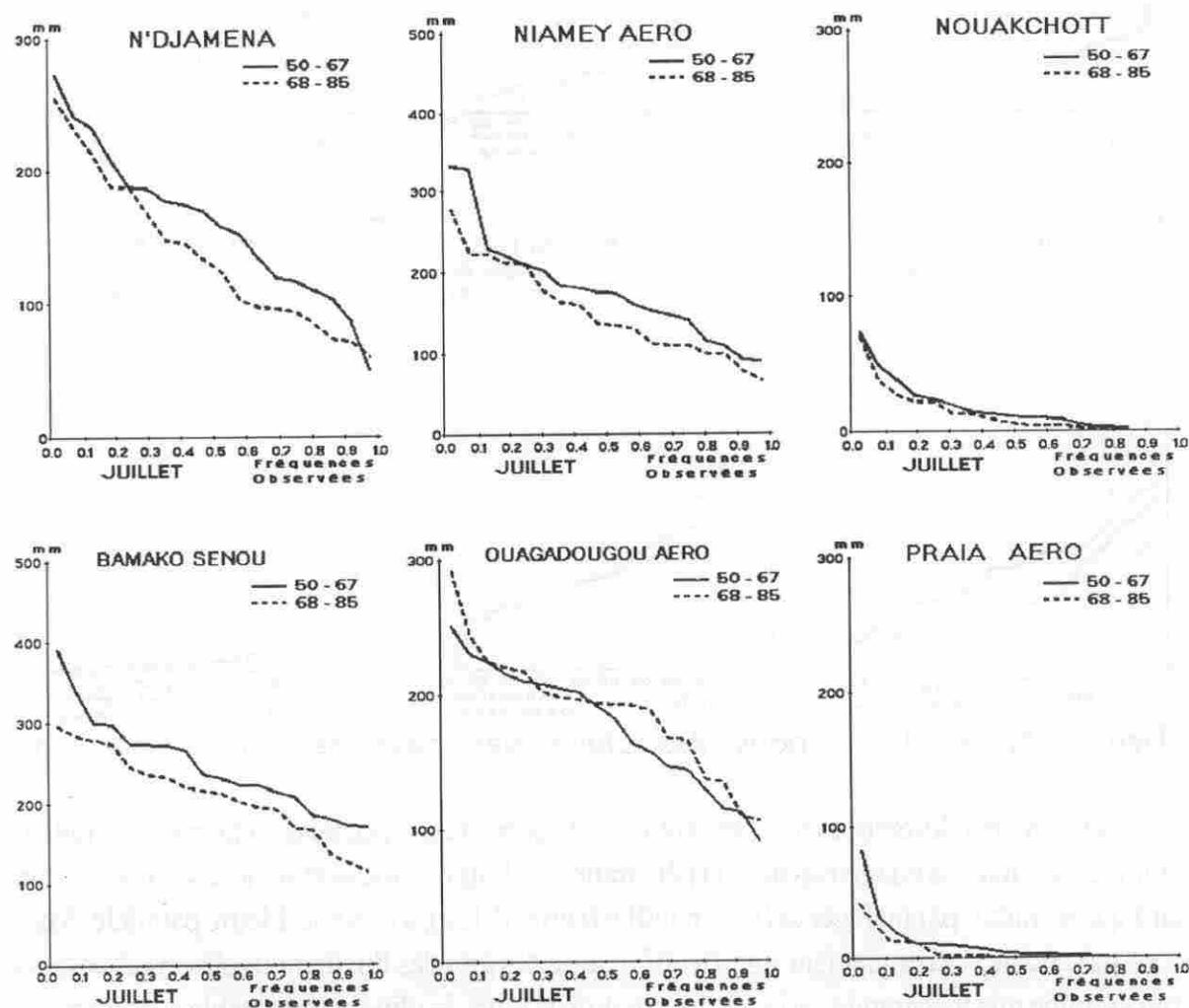
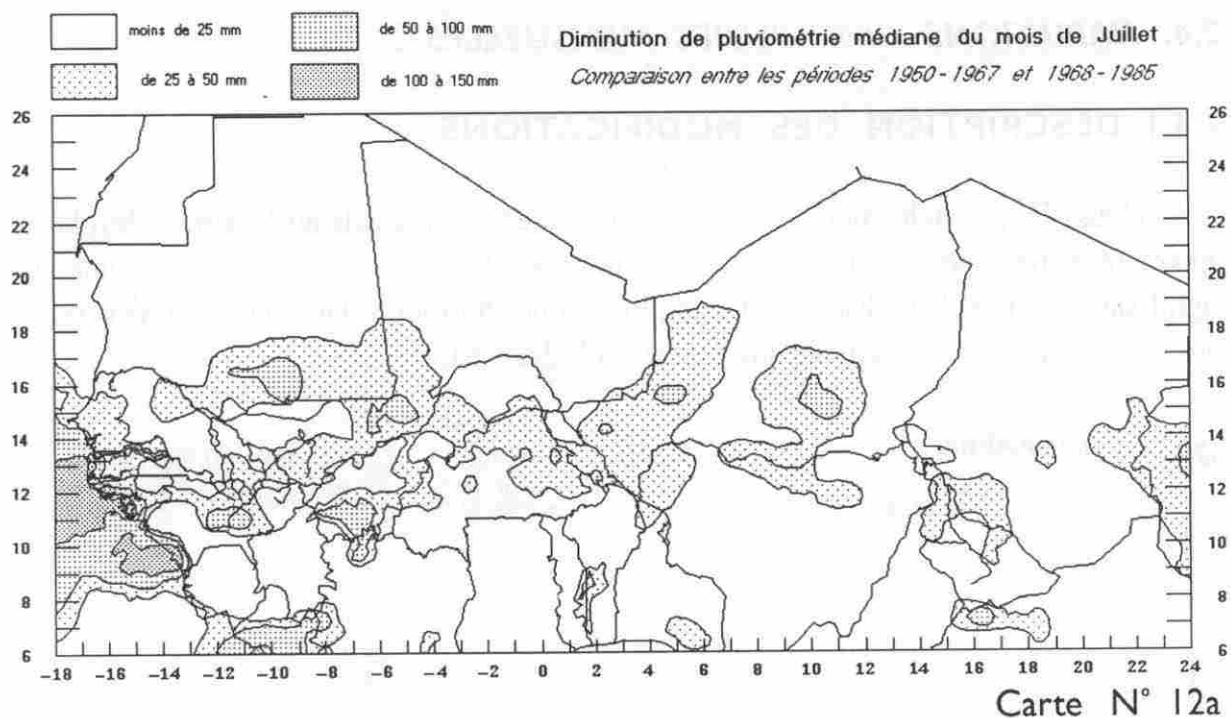
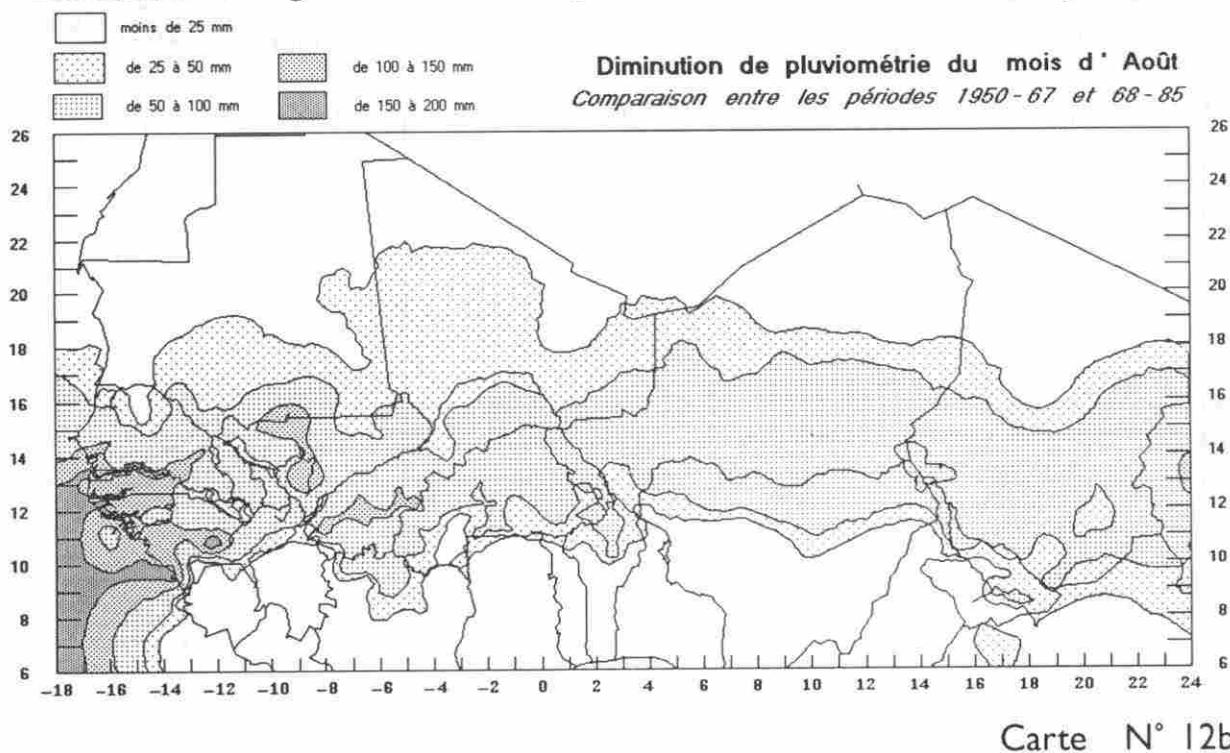


Figure N° 10a : Distributions des pluies du mois de juillet

par une baisse de pluviométrie résultant de la difficulté de pénétration de l'air de mousson dans cette zone comme l'indique la trace au sol du FIT qui reste souvent très méridionale. La figure 10a montre que la pluie est peu abondante à Nouakchott et au Cap Vert.

Le maximum mensuel d'apports de pluies est toujours en août. Mais c'est ce mois qui subit la plus forte modification de pluviométrie à la fois en hauteur d'eau et en nombre de jours de précipitations (carte n° 12b). Du centre Mali au Tchad les fluctuations du mois d'août représentent, à elles seules, 80% de la baisse totale des pluies. Au moins 3 jours de pluies ont disparu entre le 13ème et le 16ème parallèle. Au nord du domaine, la carte n° 10 montre que l'isochrone de 5 jours présente un fort recul vers le sud pouvant atteindre 40 km. La valeur moyenne du jour de pluie a considérablement régressé mais au sud la petite saison sèche semble moins marquée.



Le déficit très marqué en août a des implications importantes sur le déroulement des campagnes agricoles car les plantes sont à ce moment au stade d'épiaison ou de floraison avec des besoins maximaux en eau. Cette connaissance du mécanisme mensuel de la sécheresse doit orienter la recherche agronomique vers des cultivars (souvent appelés improprement "variétés cultivées") moins exigeants en eau durant le mois d'août et moins sensibles à de légers déficits, plutôt que vers des variétés à cycle végétatif plus court.

La figure N° 10b montre que les deux distributions de pluies sont bien différenciées et généralement bien écartées l'une de l'autre en fonction de la diminution de pluviométrie. Dakar et Nouakchott sont les plus touchés par la baisse de pluviométrie de ce mois. Les distributions des pluies mensuelles de la période sèche ont tendance à se resserrer avec des fluctuations moins grandes que pendant la période 1950-1967.

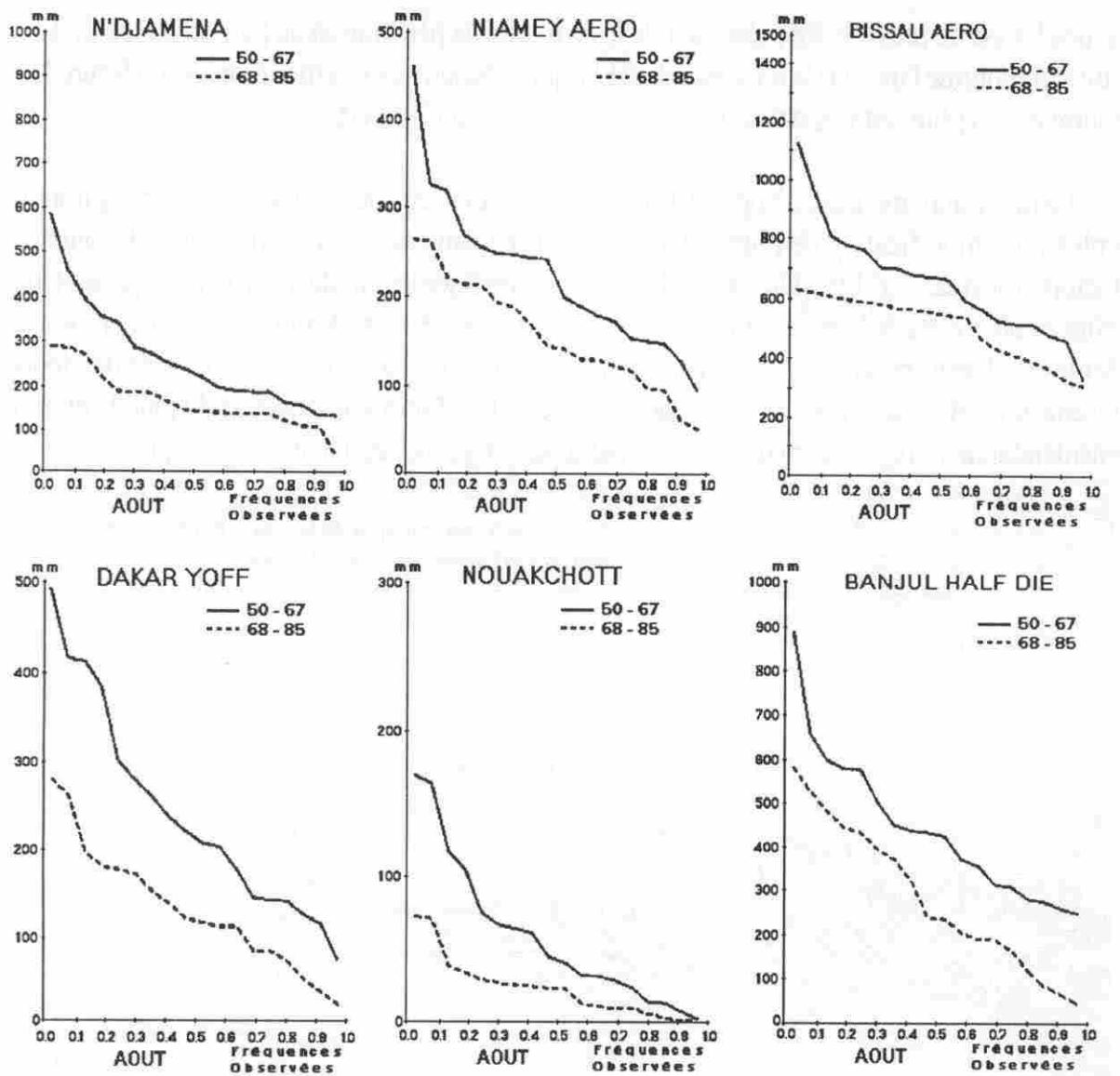


Figure N° 10b : Distributions des pluies du mois d'août

Au déclin des pluies (carte n° 12c), on observe dès le mois de septembre de forts noyaux déficitaires allant en écharpe de 14° N au Sénégal à 9° N au Tchad. Mais le reste du sahel, de Tombouctou à Abéché, est pratiquement indemne. Toutes les courbes, isohyètes, isochrones du nombre de jours de pluie, valeur médiane de chaque pluie, présentent une orientation avec une pente vers le sud-est.

La figure 10c qui inclut des stations comprises toutes dans la zone déficitaire montre une diminution des plus fortes pluies à Niamey et Nouakchott. Ailleurs il y a décalage à peu près parallèles entre les deux distributions. Le Cap vert, à Praia, est peu touché. Banjul et Bissau perdent environ 200 mm. Cela représente pour la Gambie la moitié des hauteurs de pluies de la période humide.

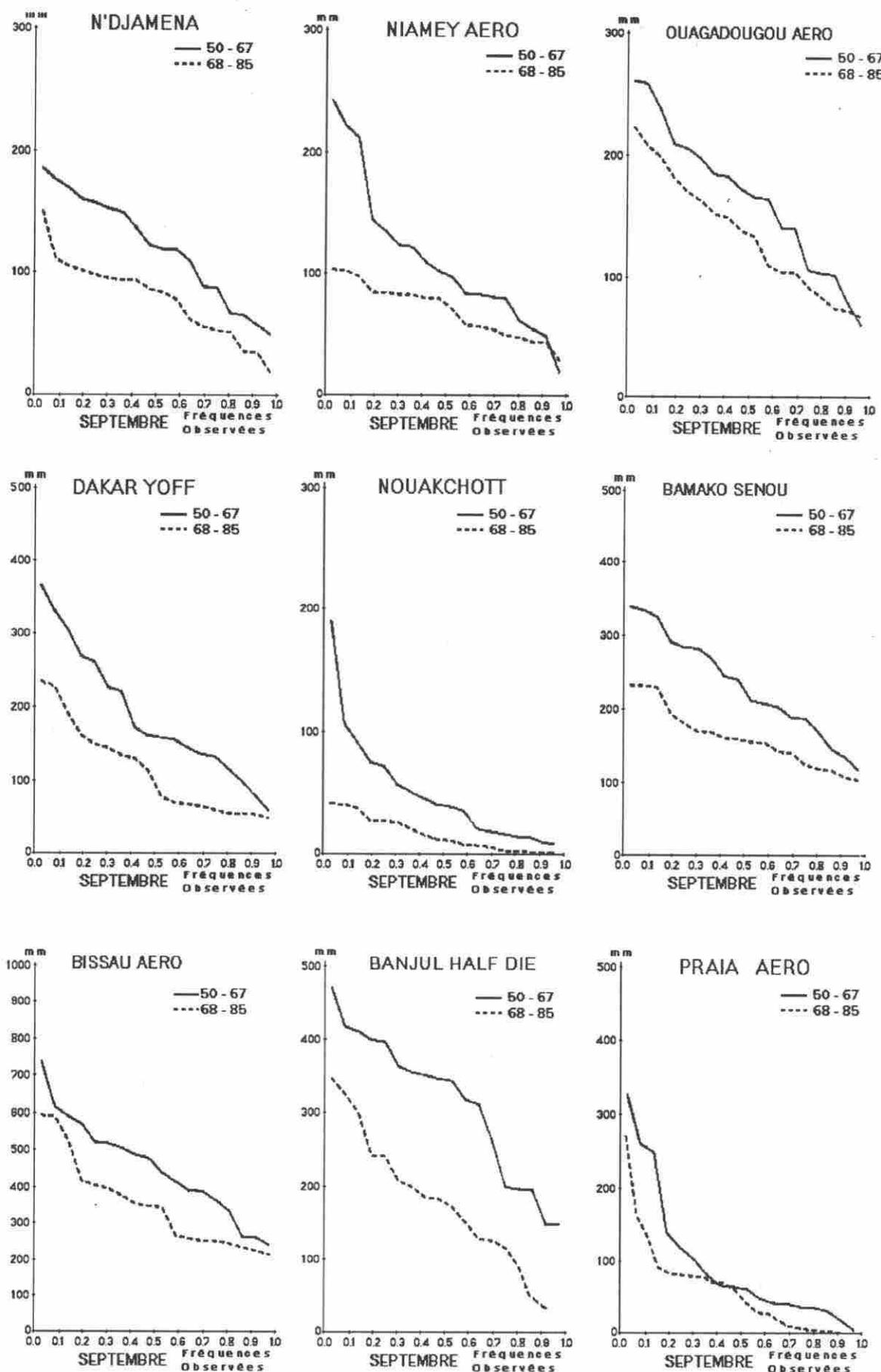
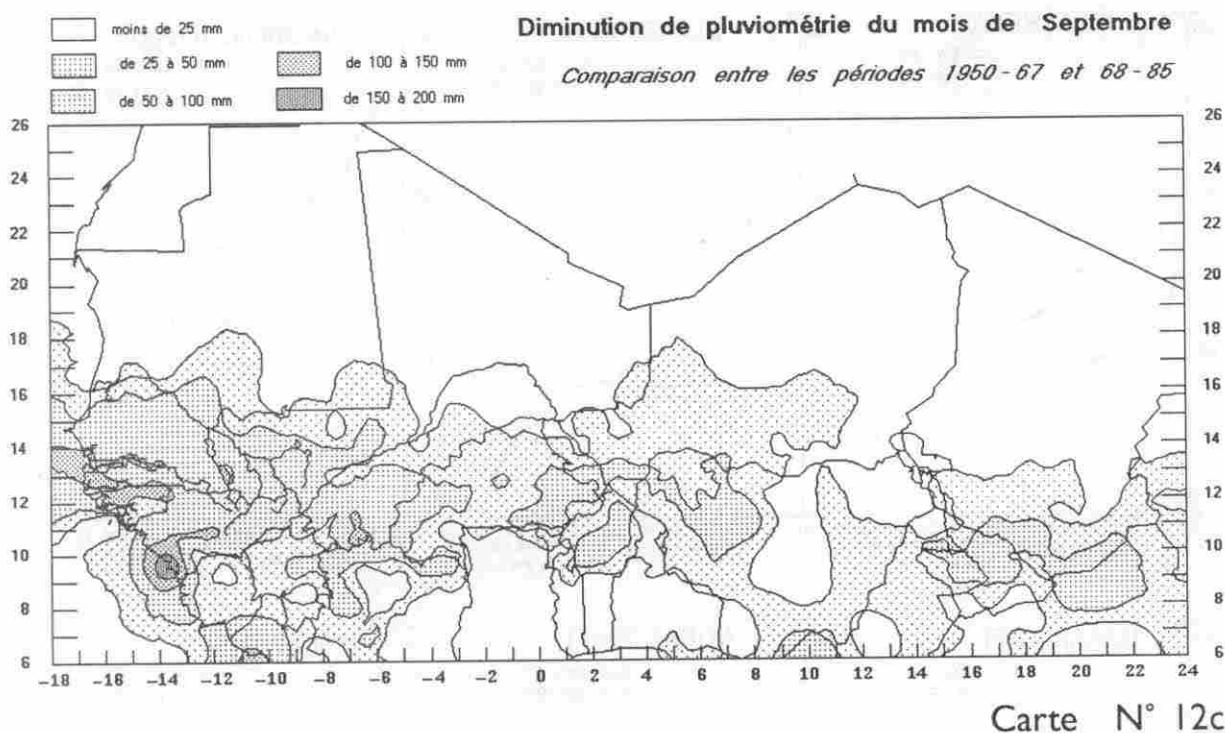
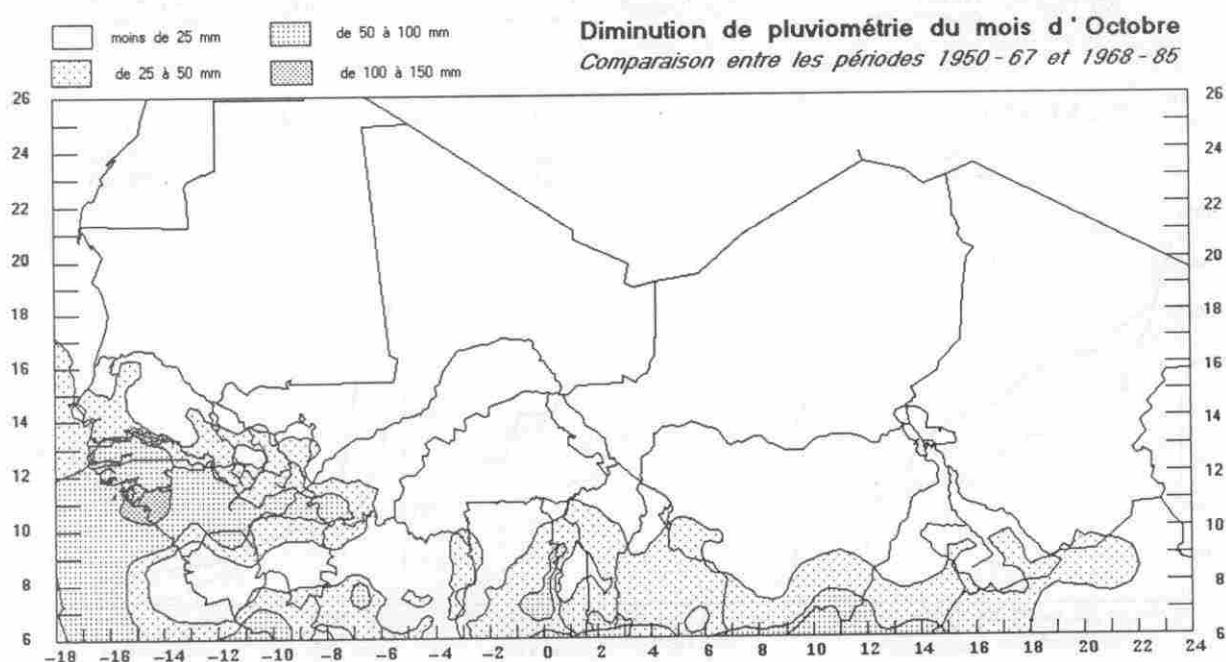


Figure N° 10c : Distributions des pluies du mois de septembre

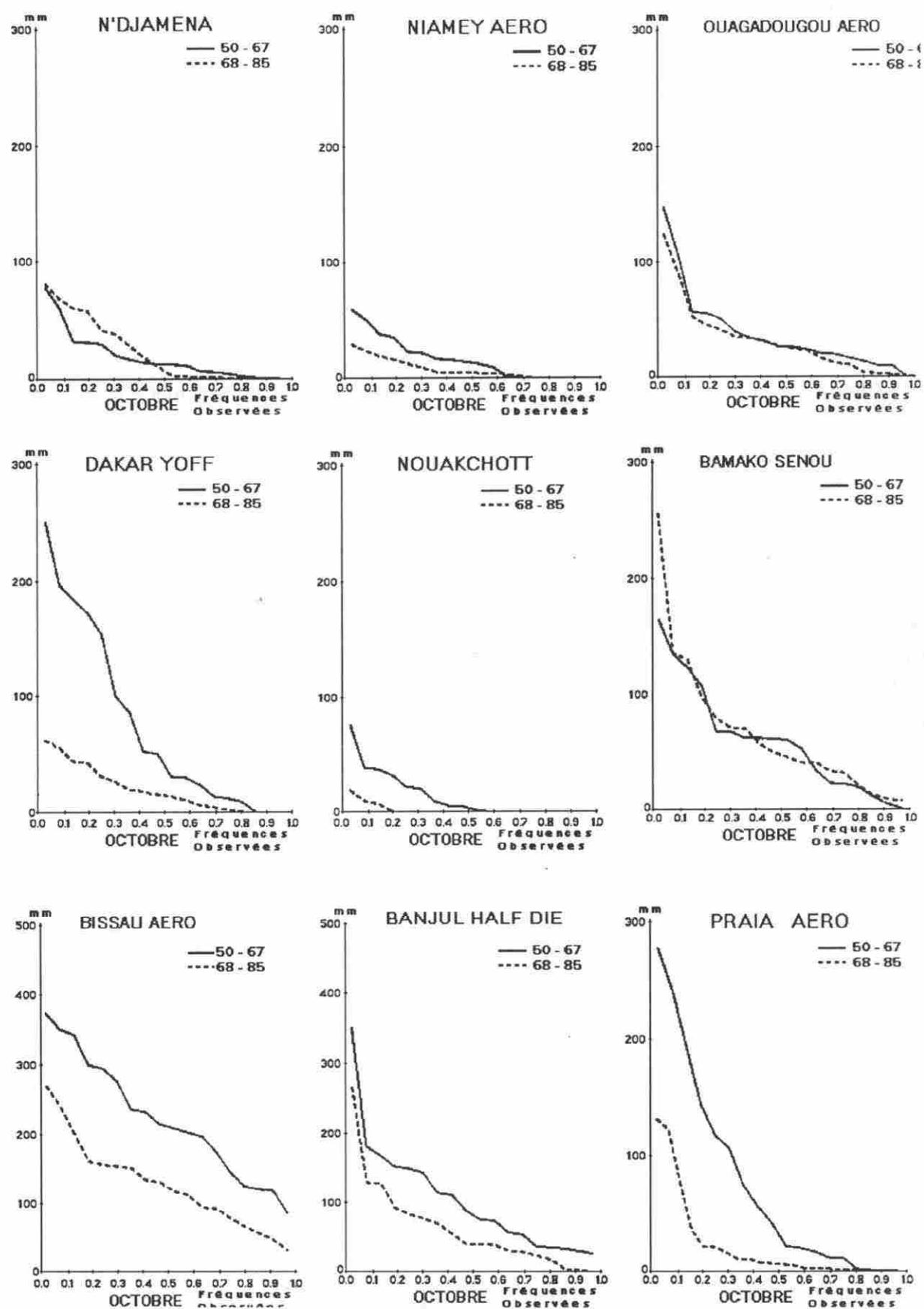


Carte N° 12c

Enfin en octobre (carte n° 12d), on retrouve une diminution des pluies, à l'ouest sur les deux Guinée, sur la frange côtière du Golfe de Guinée et sur le Sud Cameroun. D'après la figure 10d il n'y a pas de changement à Bamako et Ouagadougou. Banjul et Bissau perdent entre un tiers et la moitié de leurs pluies. Les stations les plus gravement touchées sont Dakar, Praia et Nouakchott. Les régions qui avoisinent ces villes ont donc une fin de saison brutale et peu d'espoir de mener des semis tardifs à leur terme sauf l'emploi éventuel d'une irrigation d'appoint comme cela se fait au Cap Vert.



Carte N° 12d

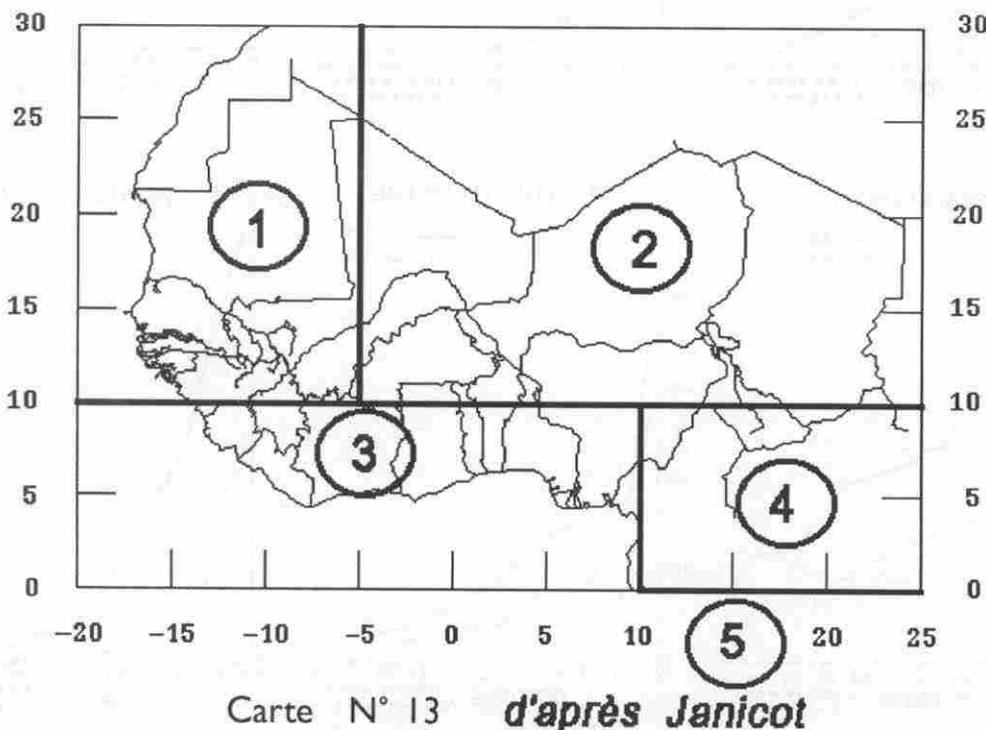


2.4.2. REFLEXIONS SUR LES CAUSES DE LA SECHERESSE

L'analyse statistique montre qu'il y a bien dégradation de la pluviométrie mais nous avons vu qu'elle n'était pas homogène dans l'espace. Pour tenter de donner quelques explications au phénomène il était nécessaire de réaliser une typologie des années afin d'avoir plus de chance de trouver des causes communes aux changements de pluviométrie.

2.4.2.1. CLASSIFICATION DES ANOMALIES PLUVIOMETRIQUES

L'espace est subdivisé en petites régions géographiques déterminées par leurs coordonnées: Nicholson (1981) prend des rectangles de 10° en longitude et 2,5° en latitude; Janicot (1990) utilise des zones de 4° en longitude sur 1° en latitude. On recherche année par année les champs d'anomalies pluviométriques puis par classification automatique on regroupe les zones élémentaires pour arriver à une régionalisation de l'Afrique de l'ouest. Le résultat fait apparaître une limite sur le 10ème parallèle nord. Le Sahel est au nord de cette limite dans une région assez homogène où passent les ondes d'est et des lignes de grains pendant les pluies boréales. Une sous région peut se distinguer, certaines années, à l'ouest du 5ème méridien O à la fois sous l'influence océanique et de l'anticyclone des Açores. Au sud du 10ème parallèle, jusqu'à la côte et jusqu'au delta du Niger on a une zone homogène avec des pluies de mousson et une petite saison sèche d'été boréal. Au sud de l'équateur la région gabonaise est sous l'influence de la circulation de l'hémisphère sud. Enfin la région du Cameroun est de comportement variable peut être sous l'influence des reliefs bien accusés.



Carte schématique du zonage des anomalies pluviométriques

Les types d'anomalies peuvent être groupés en classes plus ou moins nombreuses et comme il y a combinaison d'années humides (+) et d'années sèches (-) on peut concevoir deux, quatre ou huit classes pour l'Afrique de l'ouest.

Le schéma le plus simple est deux classes d'anomalies considérant la région au nord du 10ème parallèle N, elle est soit sèche, soit humide (figure N° 11a).

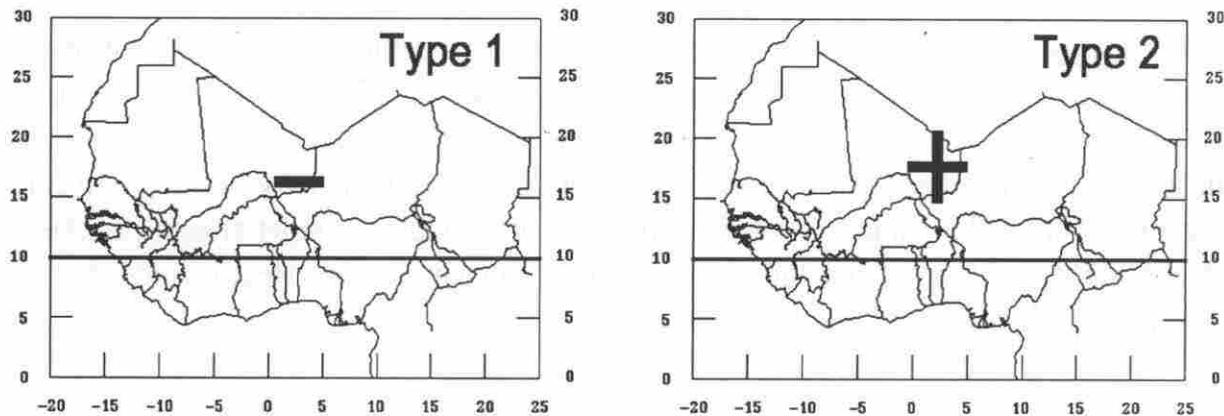


Figure N° 11a : Classement en deux types d'anomalies

En tenant compte des anomalies observées au sud du 10ème parallèle N on réalise un classement en quatre types qui tient compte d'une différenciation méridienne des phénomènes pluviométriques. Il y a d'ailleurs une bonne cohérence entre les excédents au sud de les déficits au Sahel et inversement. Ce classement permet de mettre en évidence les déplacements de l'équateur météorologique

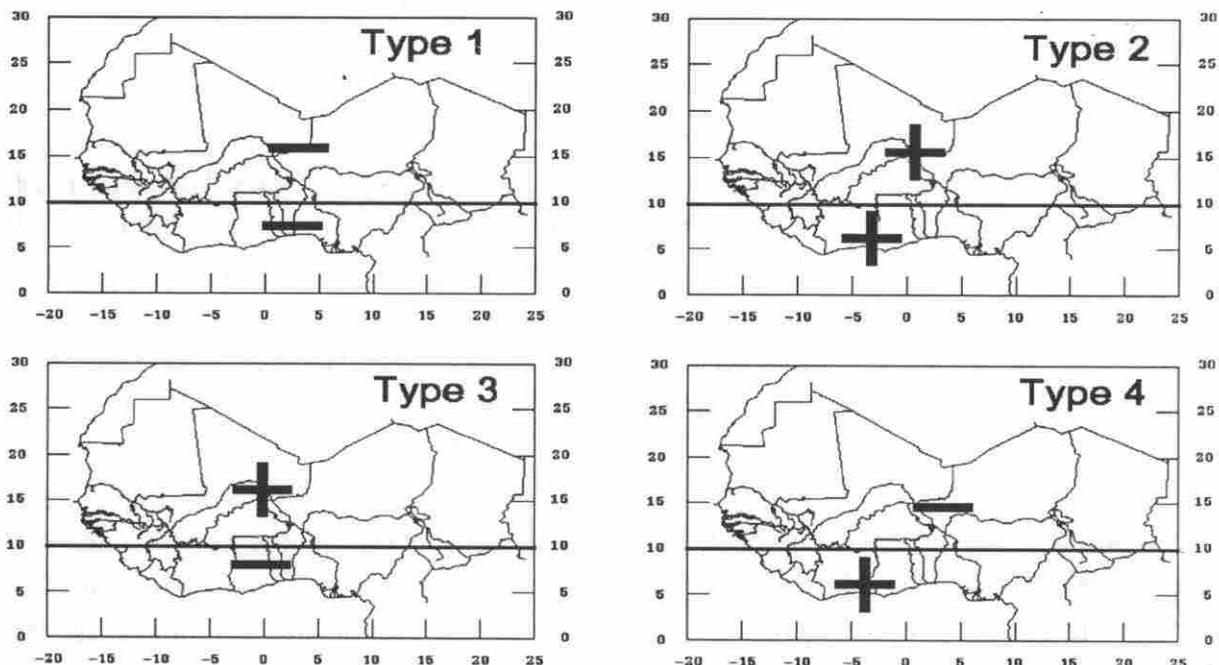


Figure N° 11b : Classement en quatre types d'anomalies

Une classification en huit types peut être faite en tenant compte des anomalies de la région sous influence océanique, située à l'ouest du méridien 5° E. Cette zone englobe l'ouest du Mali, la Mauritanie et le Sénégal. Toutes les anomalies sont mises en évidence par rapport à la pluviométrie normale calculée sur 30 ans.

2.4.2.2. FACTEURS EXPLICATIFS

L'analyse des anomalies doit se faire non seulement pas année mais aussi au niveau mensuel si on ne veut pas risquer une simplification qui masquerait certains phénomènes. En se basant sur la typologie annuelle, Nicholson (1981) n'a pas réussi à montrer le déplacement de l'équateur météorologique hors de sa position normale. Il faut prendre toutes les stations voisines d'un même méridien et tracer les cumuls moyens des pluies pour les mois de juillet et août par classe d'anomalie et par latitude. Sur les profils méridiens ainsi obtenus on prend le maximum observé pour localiser l'équateur météorologique.

a. Le déplacement de la ZITC et le classement des anomalies

On peut penser que le mauvais fonctionnement de la saison des pluies au Sahel montre le déplacement plus hésitant et plus limité de la structure ZITC vers le Nord. L'étude des anomalies permet de vérifier la position de la ZITC en fonction du type de pluviométrie rencontré chaque année et de sa structure spatiale.

- Avec un classement à deux types d'anomalies on schématise trop et la distribution des anomalies montre une faible variation. Une forte pluviométrie au sud accompagne une sécheresse au Sahel et inversement. Mais la position de la ZITC reste à sa latitude normale autour du 11ème parallèle N.

- Avec un classement à quatre types d'anomalies on arrive à mettre en évidence le déplacement de l'équateur météorologique en fonction des types d'anomalies pluvieuses. Une sécheresse généralisée sur l'Afrique de l'ouest montre une ZITC en position normale avec un potentiel pluviogène plus faible. De même une humidité générale sur la zone laisse la ZITC à sa position normale mais avec l'extension de la pluviométrie. Des pluies abondantes au Sahel et plus rares au sud s'accompagnent d'une avancée de la ZITC vers le nord. A l'inverse la sécheresse au Sahel avec des pluies plus abondantes au sud montrent une position de la ZITC au sud de sa normale.

- Le classement à huit types d'anomalies est peut satisfaisant car les effectifs de chaque classe d'anomalie sont très variables et les quatre dernières classes sont très faibles, ne permettant pas une analyse statistique correcte. Les trois quart des observations montrent l'identité des anomalies de part et d'autre du 5ème méridien ouest. Il reste 25% de cas où l'influence de l'anticyclone des Açores et de l'océan marquent la partie ouest.

b. Les paramètres influant la pluviométrie.

Comme la pluviométrie tropicale est un phénomène saisonnier au mécanisme annuel il est intéressant de chercher les facteurs qui viennent perturber le fonctionnement de ces circulations. Les paramètres physiques doivent être étudiés non pas au pas de temps annuel mais au moins au pas de temps mensuel. L'équilibre des champs de pression au niveau de la mer devrait conditionner les mouvements de la ZITC et être en relation avec les vents en surface qui véhiculent l'humidité. Le thalweg dû à la dépression thermique saharienne marque la zone de convergence. Les températures de surface de l'océan jouent un rôle puisque l'humidité de l'air a des valeurs maximales sur les eaux les plus chaudes. Il y a des corrélations entre tous ces paramètres et les types d'anomalies pluviométriques répertoriés. Mais il faut se garder de transformer les relations statistiques en relations causales. Il faut poursuivre le travail d'analyse pour arriver à une approche déterministe des fonctionnements climatiques et arriver à concevoir un véritable modèle numérique. Il est tentant de faire des prévisions statistiques en observant certaines anomalies dans les paramètres liés à la pluviométrie puisque la régularité de la circulation d'ensemble laisse espérer, dans ces régions, une prévision à long terme au point de vue global. Ainsi on rapproche souvent le phénomène de sécheresse au Sahel avec les anomalies thermiques positives de l'Atlantique Sud. Les prévisions qui en résultent peuvent être fausses car d'autres facteurs évoluent indépendamment, comme les pressions. Ainsi 1988, année annoncée sèche a été arrosée correctement au centre et à l'est, mais catastrophique au Sénégal avec seulement deux mois de pluies, la prévision s'est vérifiée localement. Le même scénario d'écart entre prévisions et observations s'est déroulé en 1991. De même l'étude précoce du déplacement de la ZITC pouvait laisser espérer l'estimation de la saison au Sahel mais, par exemple en 1984 les faits ont démenti les prévisions.

c. Les mécanismes de la sécheresse

Les causes en sont nombreuses et chaque année, avec sa typologie propre, apporte son ou ses paramètres explicatifs. Les mécanismes sont appréhendés au niveau régional ouest africain alors qu'il faudrait peut-être passer à une échelle plus globale. Mais déjà nous avons employé les données des pays hors CILSS car se cantonner au domaine sahélien nous condamnait à ne pas saisir les disfonctionnements climatiques éventuels. Rappelons la mise en évidence d'un zonage nord sud autour du 10ème parallèle nord et une différenciation éventuelle est ouest autour du 5ème méridien ouest. La baisse de pluviométrie depuis 1968 est particulièrement sensible au Nord. Les anomalies pluviométriques doivent bien être localisées dans l'espace pour y associer les autres facteurs physiques mesurables.

La circulation atmosphérique peut jouer un rôle puisque les pluies proviennent de nuages qui naissent dans la structure FIT oblique avec des mécanismes généralement convectifs. Si le flux de mousson s'affaiblit et que le jet africain d'est subit un renforcement thermique il y a dispersion de la chaleur latente et diminution des pluies car les mouvements convectifs sont faibles et souvent

cisaillés en hauteur.

D'une façon générale on peut penser classiquement que les mouvements des masses d'air traduisent l'équilibre entre l'anticyclone de Sainte Hélène au Sud et les anticyclones des Açores et de Lybie au Nord, associés à un thalweg thermique saharien qui peut se combler. Le jeu des forces en présence laisse comprendre l'amplitude plus ou moins forte des déplacements des masses d'air humides sur le continent. Un affaiblissement au Sud et un renforcement au Nord apportent de faibles précipitations sur le Sahel à cause du gonflement de la marge sud-est de l'anticyclone des Açores et par la force des alizés du nord-est. Mais un fort potentiel précipitable pénétrant sur le continent n'apporte pas nécessairement de la pluie si les conditions de développement des mouvements ascendants de convection ne sont pas remplies.

2.4.2.3. CONCLUSION

Les mesures au sol des paramètres autres que la pluie doivent être bien collectées pour appréhender correctement les causes des variations climatiques. L'emploi des données satellitaires avec la vision globale qui en résulte doit permettre de connaître les mouvements de l'équateur météorologique et l'intensité des mouvements convectifs. Les satellites apportent également des renseignements sur les champs de températures radiatives et sur l'albédo de surface.

Rien n'indique que les anomalies sèches actuelles vont cesser. Les années favorables ne doivent pas faire relâcher la vigilance d'autant plus qu'elles ne sont souvent pas bonnes globalement sur le domaine sahélien. Quelques saisons voisines des normales pluviométriques ne doivent pas faire oublier les très fréquents épisodes secs. La nouvelle normale de référence qui va être 1961-1990 va diminuer puisqu'elle inclut un plus grand nombre d'années sèches. Pour savoir s'il y a amélioration du régime des pluies il faut donc garder à l'esprit les valeurs médianes de la précédente période "humide" 1950-1967.

Chapitre 3

LES PARAMETRES CLIMATIQUES DE L'EVAPOTRANSPIRATION.

Les facteurs régionaux laissent apparaître deux sortes d'éléments qui contribuent à la stratification des paramètres climatiques et qui permettent de comprendre leur évolution au cours de l'année: ce sont l'élément océanique et l'élément continental. L'opposition entre ces influences se fait sentir non seulement sur les températures mais aussi sur l'humidité de l'air et l'insolation, le rôle des températures n'étant pas négligeable sur ces derniers paramètres. Sur le continent, c'est le relief qui est l'élément modificateur du climat. Son influence se manifeste de trois manières différentes. Par le modèle topographique qui peut créer des particularités locales difficiles à prendre en compte en cartographie régionale. Par la rugosité caractérisée par des différences de surface entre les lieux. Par l'altitude qui transforme profondément les caractéristiques climatiques. L'aspect zonal de la distribution de certains paramètres montre souvent une rupture vers le méridien 25° Est. Ceci est dû en partie au relief du Soudan mais aussi à la convergence des influences atlantiques et de celles de l'Océan indien. Pour les paramètres retenus des cartes schématiques résument les situations moyennes. Elles sont regroupées par trimestre et indiquées alphabétiquement de a à d.

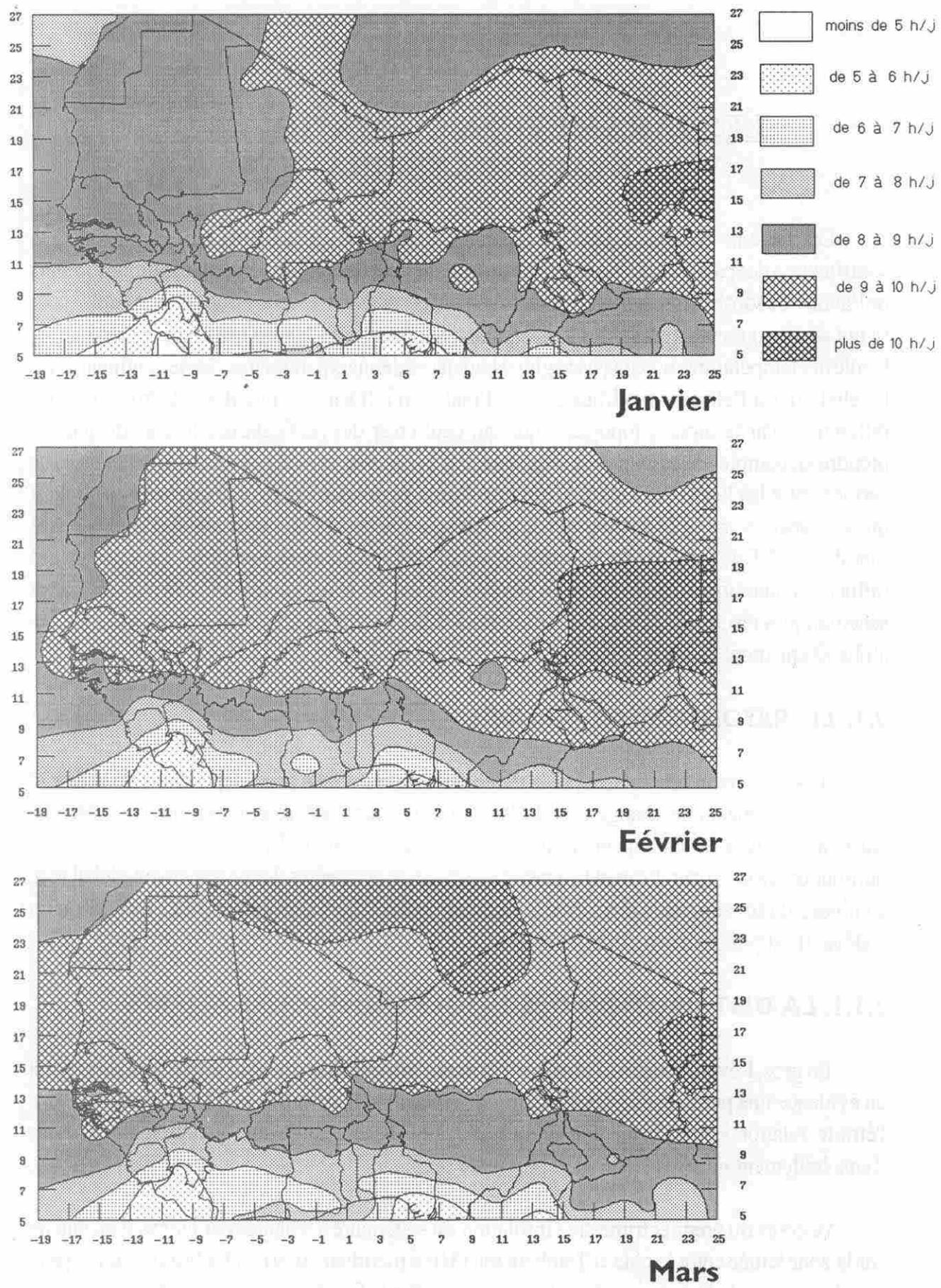
3.1. LE RAYONNEMENT SOLAIRE.

Il est mesuré indirectement par la durée d'insolation. Celle-ci est dépendante de la date et de la latitude mais elle change avec la limpideur de l'atmosphère plus ou moins chargée en particules solides ou en vapeur d'eau. Avec l'altitude la faible densité de l'air entraîne une diminution de la vapeur d'eau et la quasi inexistence de poussières. Le rayonnement global reçu au niveau du sol augmente alors avec la diminution des filtres atmosphériques à mesure qu'on s'élève. Il est plus riche en ultra-violets.

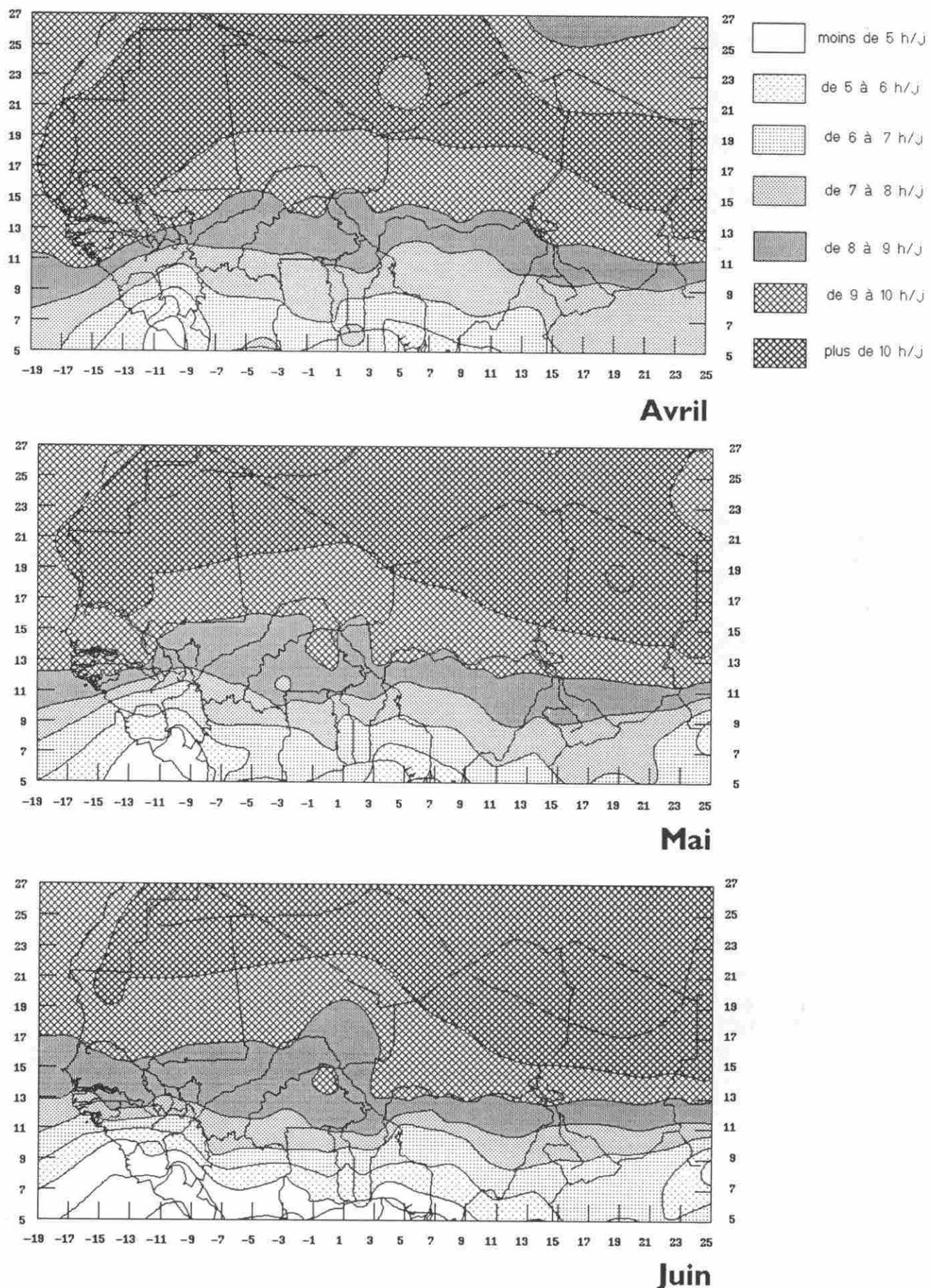
3.1.1. LA DISTRIBUTION DES INSOLATIONS JOURNALIERES.

En gros, l'évolution dans l'année suit la variation de la durée du jour astronomique mettant en évidence une permanence des structures de répartition (cartes N° 14a à 14d). Nous avons vu l'étroite relation entre l'insolation et la nébulosité. Il en résulte une variation de la durée d'ensoleillement inverse à celle de la pluviométrie.

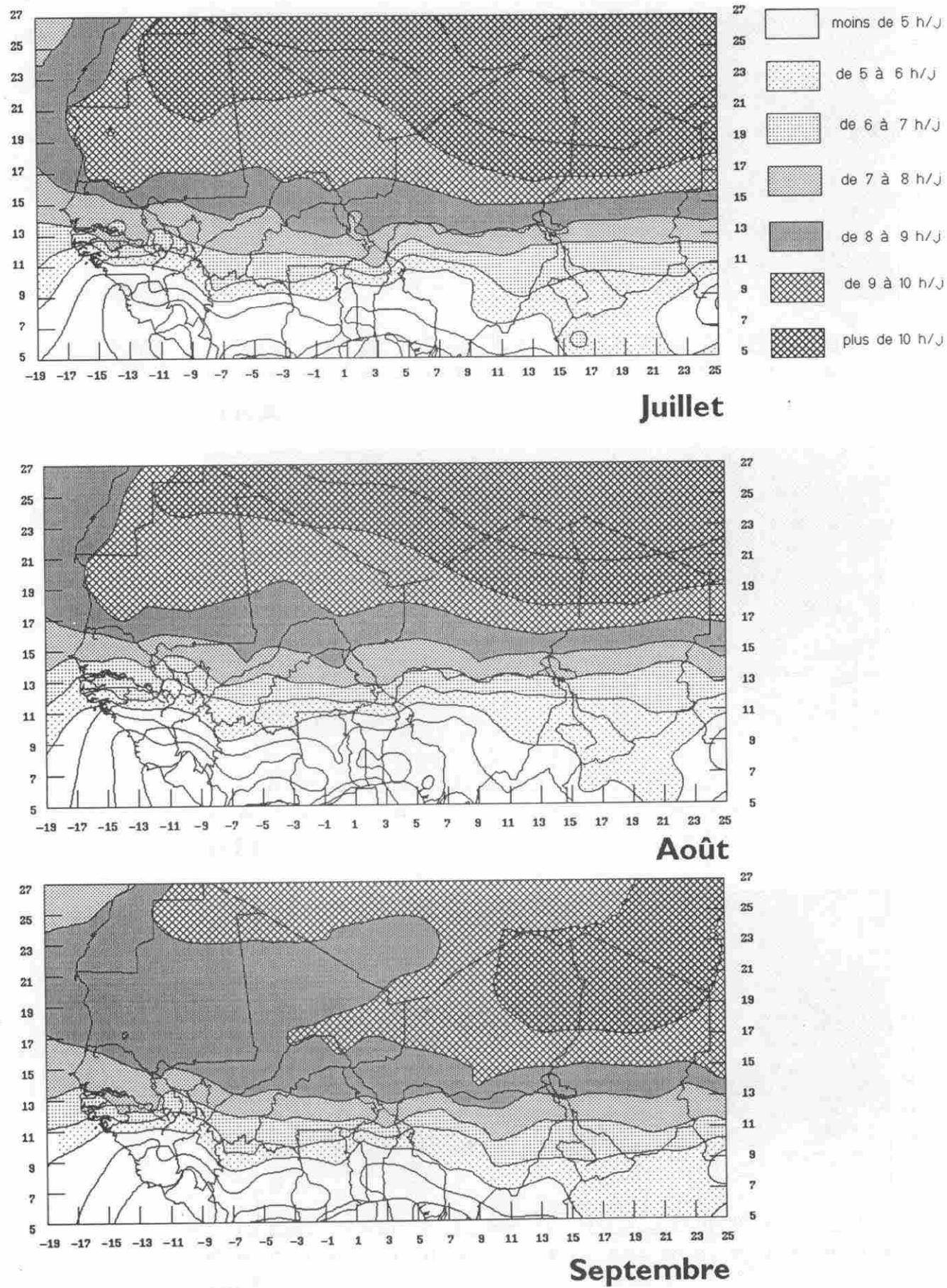
Au cours du premier trimestre l'insolation est supérieure à 9 heures par jour sauf en janvier sur la zone située entre la côte et Tombouctou (3ème méridien ouest) où les brumes provoquent une diminution de l'insolation d'une heure par jour. Sur le Soudan on dépasse 10h/jour de soleil.



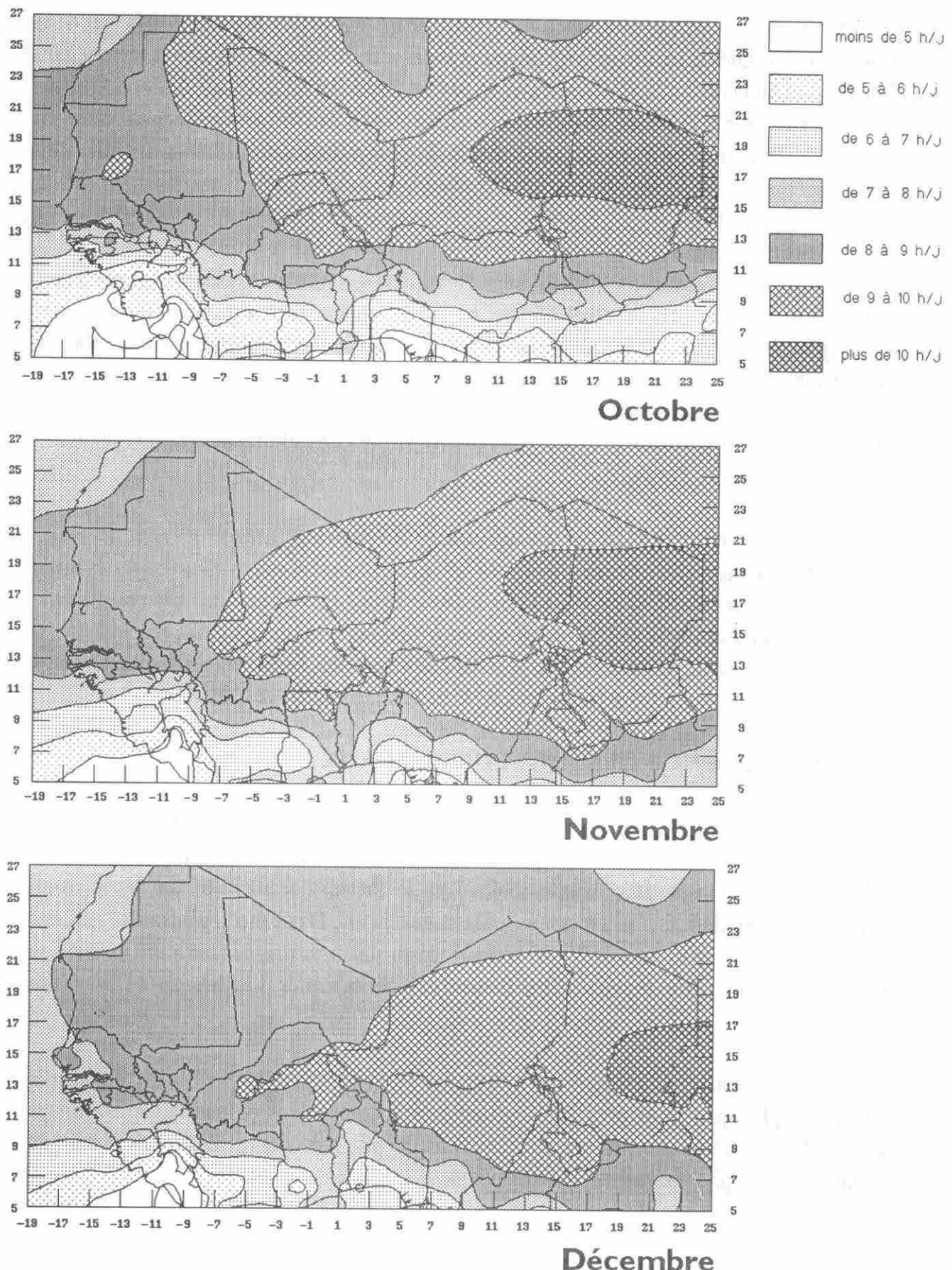
Carte N° 14a : Insolations du premier trimestre



Carte N° 14b : Insolations du deuxième trimestre



Carte N° 14c : Insolations du troisième trimestre



Carte N° 14d : Insolations du quatrième trimestre

Au second trimestre la côte atlantique ouest reste très ensoleillée dépassant 10 heures de la Gambie à Nouadhibou au mois d'avril. Saint Louis passe de 10 heures en mai à 9 heures en juin. Entre mai et juin l'isochrone de 8 heures passe de Conakry à Banjul. La plage de 8-9 heures par jour reste basée sur le 11ème parallèle nord et son évolution se fait surtout vers le delta central du Niger. Ainsi la diminution progressive de l'insolation se fait principalement le long des vallées du Niger supérieur et du Niger inférieur laissant une plage de fort ensoleillement sur le nord du Burkina autour de Dori.

Pendant le troisième trimestre les durées d'insolation se stratifient zonalement passant de 3 h/jour sur la côte sud à 11 heures sur l'Algérie. Le sud du Tchad reste plus ensoleillé que les zones situées plus à l'ouest. La côte atlantique ouest reste dans la plage de 8 à 9 heures par jour, laquelle en septembre, recouvre la Mauritanie et la majeure partie du Mali ainsi que le Hoggar. Au sud cette plage oscille autour du 15ème degré de latitude nord. Les latitudes plus basses ne reçoivent que 50 à 60% de l'insolation théorique: bassin du Tchad, région de Gaya, Burkina et Mali méridionaux, Casamance et Guinée Bissau.

Le dernier trimestre malgré le raccourcissement des jours mais à cause de l'arrêt des pluies voit augmenter l'insolation sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest. Cette progression reste zonale en octobre avec une accélération entre le Ghana et le Bénin. Puis à partir de novembre seule la région du Libéria conserve suffisamment de nébulosités pour accuser un faible ensoleillement. Plus au nord, de Bilma jusqu'au Soudan le soleil est présent plus de 10 heures par jour. La plage de 8 à 9 heures est toujours sur la Mauritanie, le Sénégal et le sud-ouest du Mali.

3.1.2. L'INFLUENCE DES FACTEURS LOCAUX

Les zones de fortes nébulosités entraînent une diminution de l'insolation. Les régions pauvres en humidité sont généralement bien ensoleillées avec une diminution possible par les lithométéores: brumes sèches, vents de sables. Tous les facteurs locaux favorisant la nébulosité et les brumes ont donc une répercussion sur l'ensoleillement. D'une façon générale le gradient d'insolation est zonal et croît de 5 à 10 heures/jour du sud au nord. Mais un autre gradient se manifeste d'ouest en est. Il augmente la durée d'ensoleillement de 3 heures entre Dakar et le Soudan.

En conclusion les différences intermensuelles de durées d'insolation viennent renforcer la stimulation photopériodique pour les plantes qui y sont sensibles. Ainsi des ensoleillement limités à la fin du mois d'août et en septembre peuvent rendre plus précoces les inductions florales de certains mils, sorghos ou niébés photopériodiques.

3.2. LES TEMPERATURES.

Les températures sont des paramètres intégrateurs qui traduisent bien les échanges d'énergie. Leur importance est primordiale pour l'estimation de l'évapotranspiration.

3.2.1. L'INFLUENCE DE L'ALTITUDE SUR LES TEMPERATURES.

On sait que la température diminue avec l'altitude et que ses variations sont décalquées sur le relief. Mais les particularités locales d'exposition et de modèle topographique nuancent les variations de température par leur action sur l'écoulement des flux. Dans la zone de l'étude les stations de mesure sont à des altitudes différentes variant de 2 à 860 mètres au dessus du niveau de la mer. Pour comprendre la répartition des températures il peut être envisagé de gommer le relief en ramenant les observations à un niveau unique, souvent celui de la mer. On peut ainsi apprécier l'influence de la continentalité et du zonage suivant la latitude. Le problème qui se pose alors et celui du gradient de température en fonction de l'altitude. La correction standard est de 0,65 par 100 mètres. Mais en toute rigueur la proximité de l'océan ou le caractère continental du site apportent des gradients différents. Le gradient peut augmenter avec les zones ventilées car l'accroissement de la vitesse du vent accélère l'évaporation ce qui facilite le refroidissement. Si la notion de gradient moyen est peu significative elle permet de rendre les températures homogènes et comparables et surtout de pallier les déficiences des points de mesure surtout dans les régions accidentées.

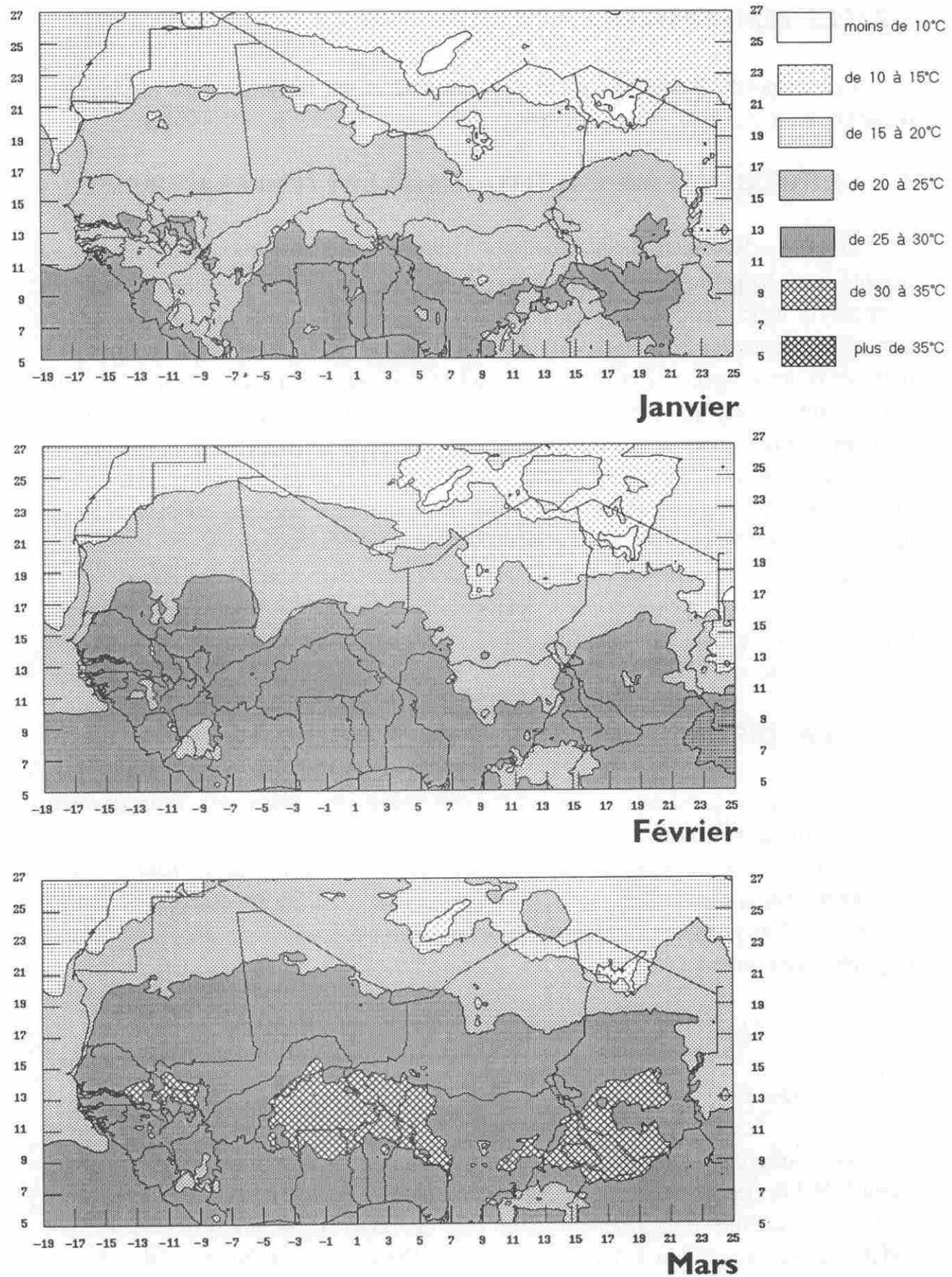
3.2.2. LA DISTRIBUTION DES TEMPERATURES.

Les variations décennales ou mensuelles présentent une permanence de la structure zonale de leur répartition. Mais on note des modifications très sensibles liées à l'orographie et à l'influence de la bordure atlantique notamment sur la façade ouest. La frontière du Soudan marque souvent une rupture dans la stratification zonale. Les cartes 15, 16 et 17 schématisent respectivement les distributions des températures moyennes, des maxima moyens et des minima moyens. Elles sont présentées par trimestre.

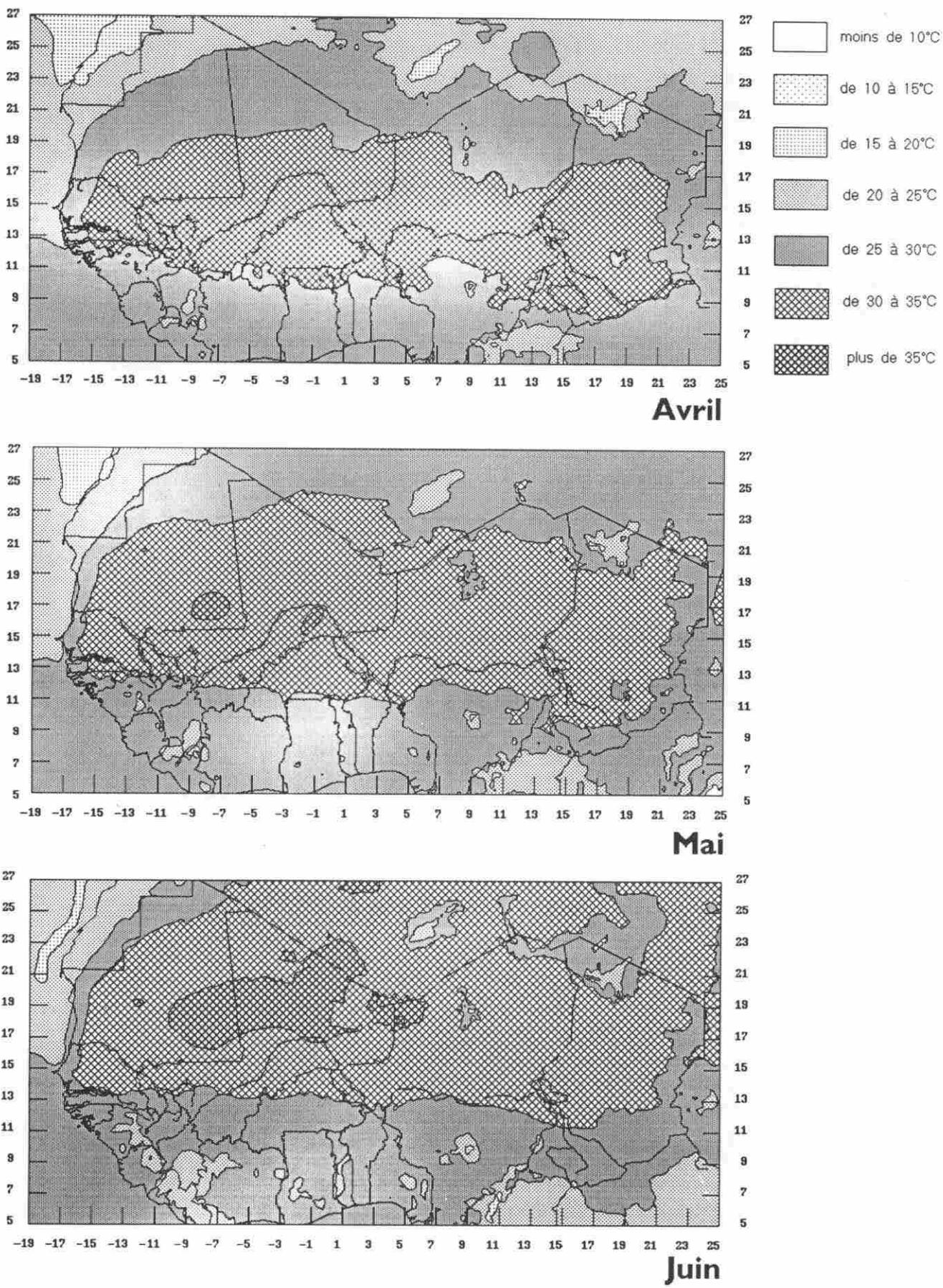
3.2.2.1. EVOLUTION PENDANT LE PREMIER TRIMESTRE

Mois de janvier

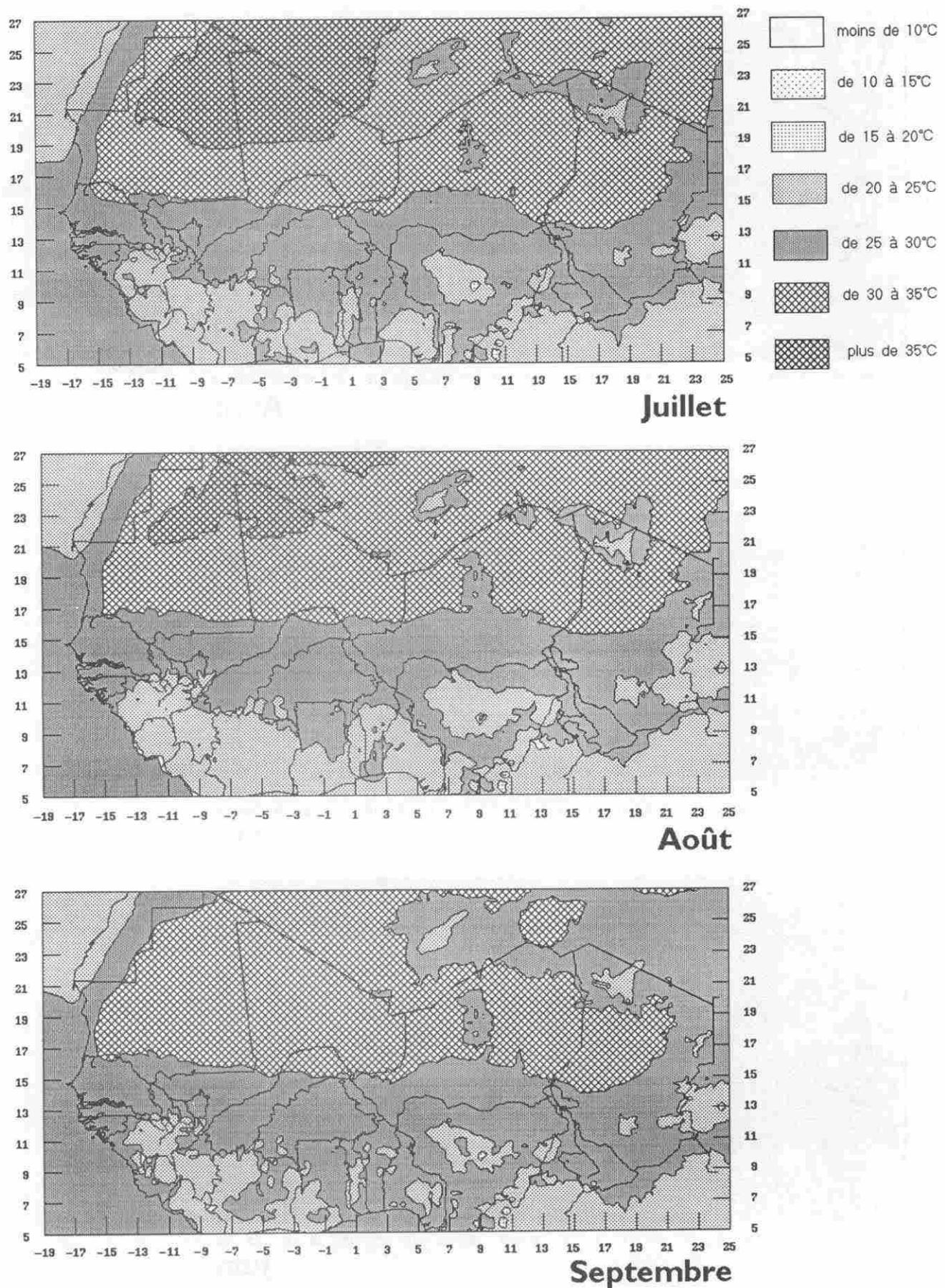
Les températures moyennes n'excéant jamais 30°C et sont plus basses au nord du 13ème parallèle N. Elles restent toujours plus fraîches sur la bordure ouest atlantique à cause du courant des Canaries et des upwellings fréquents. Les plus fortes températures se rencontrent sur la moitié sud du Burkina Faso, le Sud du Tchad, la région entre Dosso et Gaya au Niger, la vallée du haut Sénégal et de ses affluents au Mali.



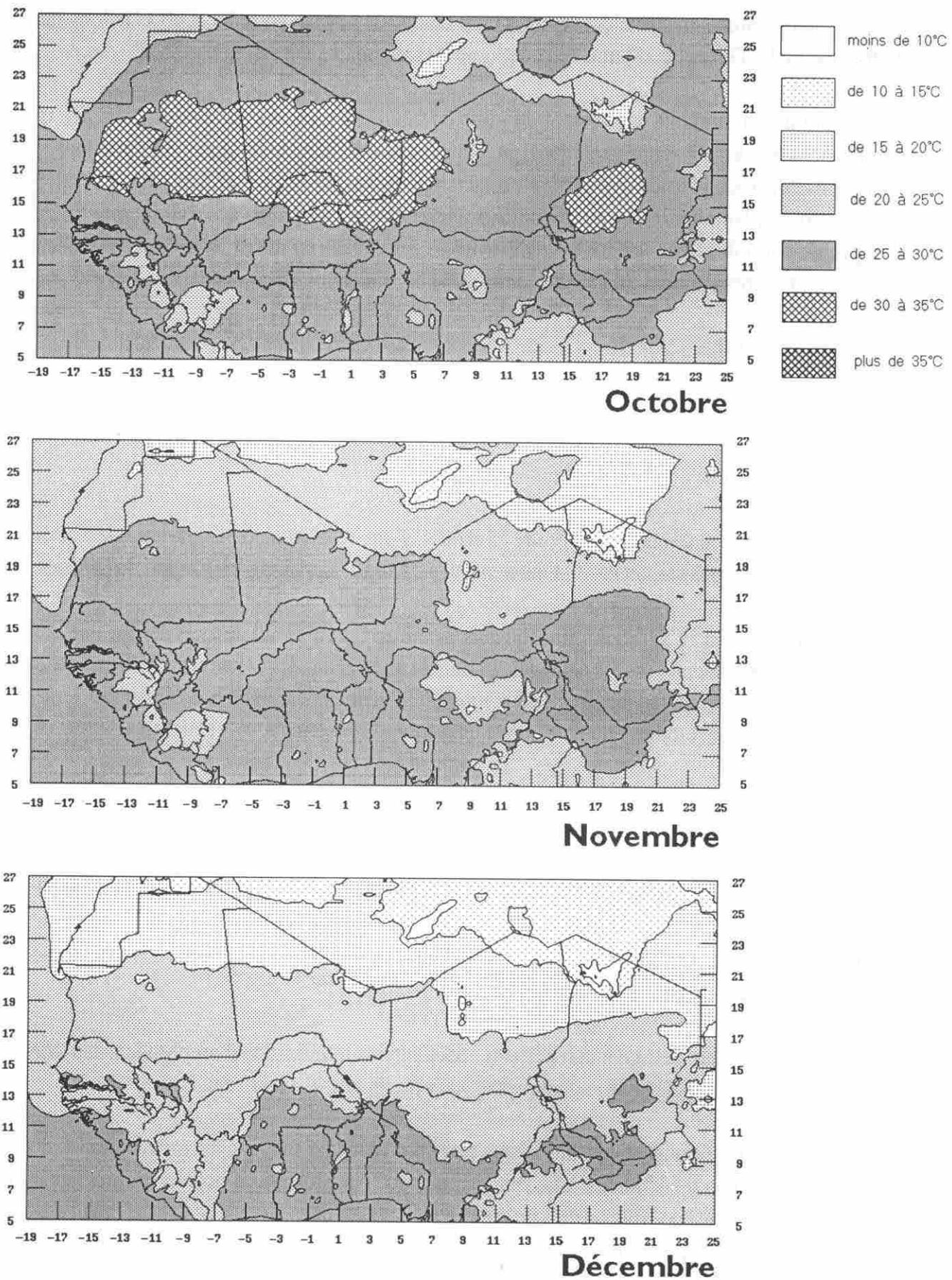
Cartes N° 15a : Températures moyennes du premier trimestre



Cartes N° 15b : Températures moyennes du second trimestre



Cartes N° 15c : Températures moyennes du troisième trimestre



Cartes N° 15d : Températures moyennes du quatrième trimestre

Les températures maximales présentent une chaîne de noyaux entre 35 et 40°C le long du 11ème parallèle. De part et d'autre de cette ligne les maxima ne dépassent pas 35°C.

Quant aux minima ils décroissent du golfe de Guinée à l'Algérie passant de 25°C à 5°C compte non tenu des effets orographiques qui font passer localement les températures minimales en dessous de zéro. La façade maritime ouest est tempérée par l'océan et l'influence de ce dernier se fait sentir dans l'intérieur jusqu'au 19ème degré N où on trouve des plages avec l'isotherme 20°C. Les plages délimitées par l'isotherme 20°C se retrouvent en allant vers l'est mais elles descendent progressivement à 11 degrés de latitude N.

Mois de février

Le réchauffement se manifeste avec la progression de l'isotherme 30°C au 17ème degré N, notamment dans la boucle du Niger. Mais les hauteurs du Nigéria et du Cameroun font obstacle à cette remontée sur le centre et l'est du Niger.

Une dorsale de maxima compris entre 35 et 40°C s'organise autour de 13° de latitude N. Les amplitudes thermiques varient de 10°C au Sénégal à 27°C au Soudan dans les monts du Darfour.

La plage de 15 à 20°C des minima moyens monte au 20ème parallèle mais descend vers le sud au Niger et s'infléchit vers Jos et le plateau Bauchi au Nigéria. Après une remontée au Tchad à 17° N elle prend une direction nord-sud le long du Soudan et descend très bas jusqu'au 7ème parallèle en RCA. La remontée des minima se fait sentir à Gaya et sur tout le sud du Burkina avec plus de 20°C.

Mois de mars

L'isotherme 30°C atteint 19°N laissant au sud une plage allant jusqu'au golfe de Guinée. Dans cette vaste plage zonale on trouve des noyaux de température supérieures à 30°C sur le Burkina Faso et l'ouest du Niger descendant au sud sur la vallée du fleuve. Un autre noyau remonte la vallée de la Bénoué pour aller dans la cuvette du Tchad.

Une bande zonale des maxima supérieurs à 35°C atteint 300 à 350 km d'amplitude en latitude au nord du 8ème parallèle N avec quelques noyaux dépassant 40°C au Tchad.

Les minima continuent leur translation vers le nord, la plage 20-25°C recouvre la vallée du haut Sénégal et tous ses affluents. Elle suit la vallée du Niger jusqu'à sa boucle et intéresse le Burkina Faso et l'ouest du Niger. Après un creux au Nigéria elle recouvre la bassin du Tchad sauf la région de Mongo et prend une direction nord-sud le long du 21ème méridien est. La frontière du Soudan marque l'isotherme 20°C.

3.2.2.2. EVOLUTION PENDANT LE SECOND TRIMESTRE

Mois d'avril

La progression des températures moyennes est rapide avec une zone dépassant les 30°C sur tout le Sahel. Elle est limitée à l'ouest par une bande d'une centaine de kilomètres de large située du nord au sud parallèlement à la côte, et à l'est par une autre le long de la frontière du Soudan.

L'isotherme 40°C des maxima moyens délimite trois plages axées sur les trois fleuves: le Sénégal, le Niger et le Tchad et situées au nord du 13ème parallèle N.

Des plages de minima dépassent 25°C en moyenne autour de Néma, dans le centre Burkina et l'ouest du Niger, dans le bassin du Tchad au sud de Bongor. Le reste du Sahel subit des minima compris entre 20 et 25°C sauf la bordure atlantique ouest et la zone frontalière du Soudan.

Mois de mai

Les températures moyennes élevées continuent à pénétrer sur le Sahara comme le mois précédent. L'isotherme 30°C progresse de 400 km vers le nord.

Les maxima voient les plages les plus chaudes, supérieures à 40°C, se réunir en une large bande zonale, aux influences orographiques près, sur l'ensemble du Sahel. Alors qu'au sud les pluies rafraîchissent l'atmosphère jusqu'à 12° de latitude N.

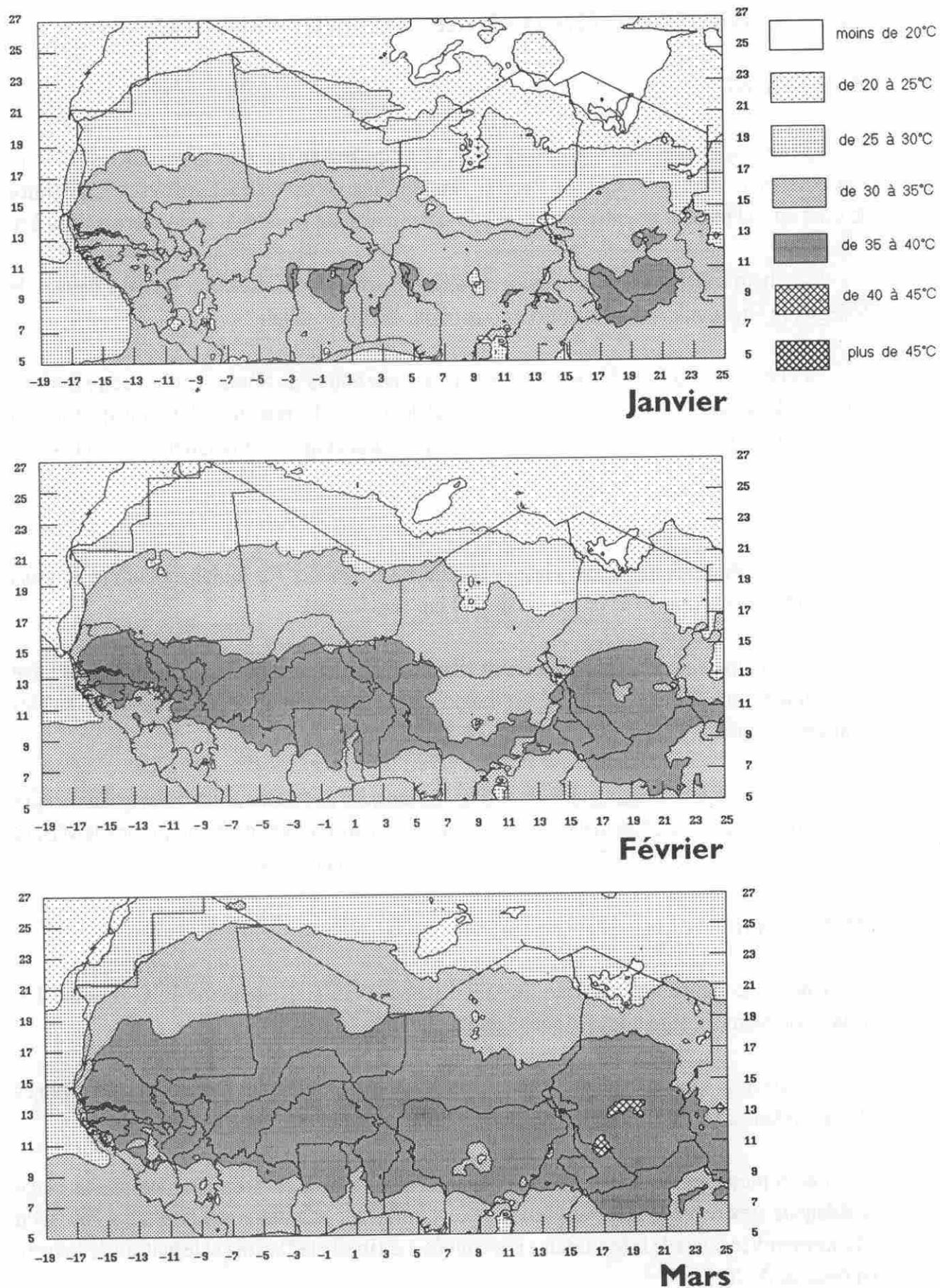
Deux plages de minima supérieurs à 25°C apparaissent de l'est mauritano-sénégalais jusqu'à l'ouest du Niger et dans le bassin du Tchad au Nord de Bousso. La côte atlantique au nord de M'Bour reste en dessous de 20°C. Le long du Soudan des plages inférieures à 20°C se retrouvent.

Mois de juin

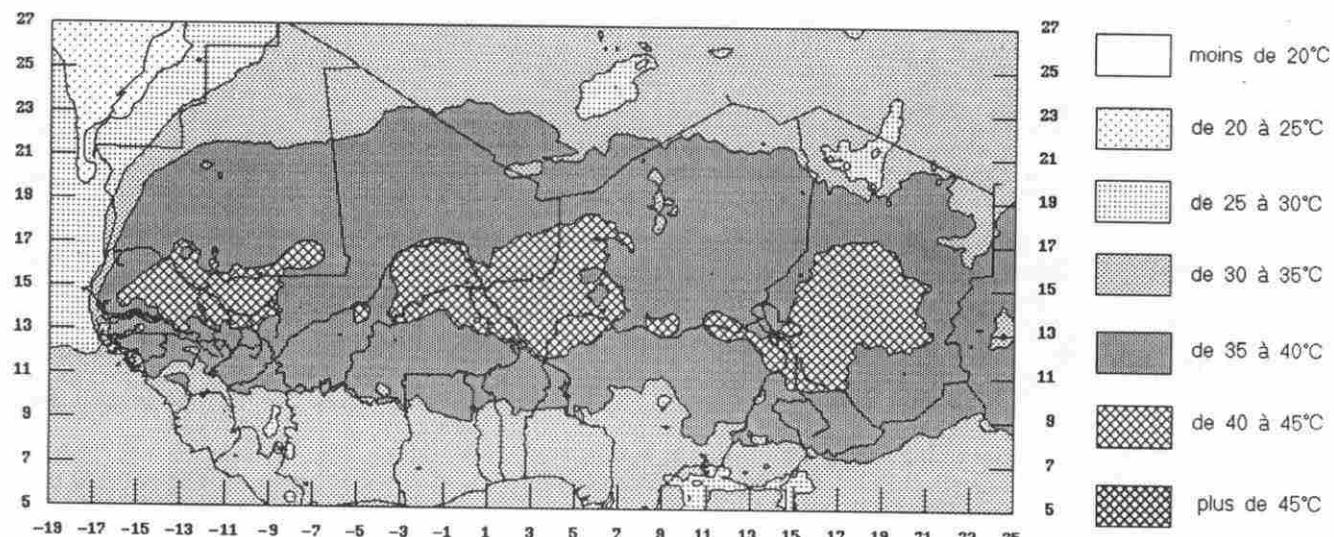
Une plage incluant Néma, Gao, Tessalit dépasse les 35°C. L'isotherme 30°C basé sur 13° de latitude Nord va gagner tout le sud algérien.

Les maxima suivent le même schéma pour les isothermes les plus élevés. Au sud les pluies plus abondantes les font chuter au dessous de 30°C de la côte au 8ème parallèle Nord.

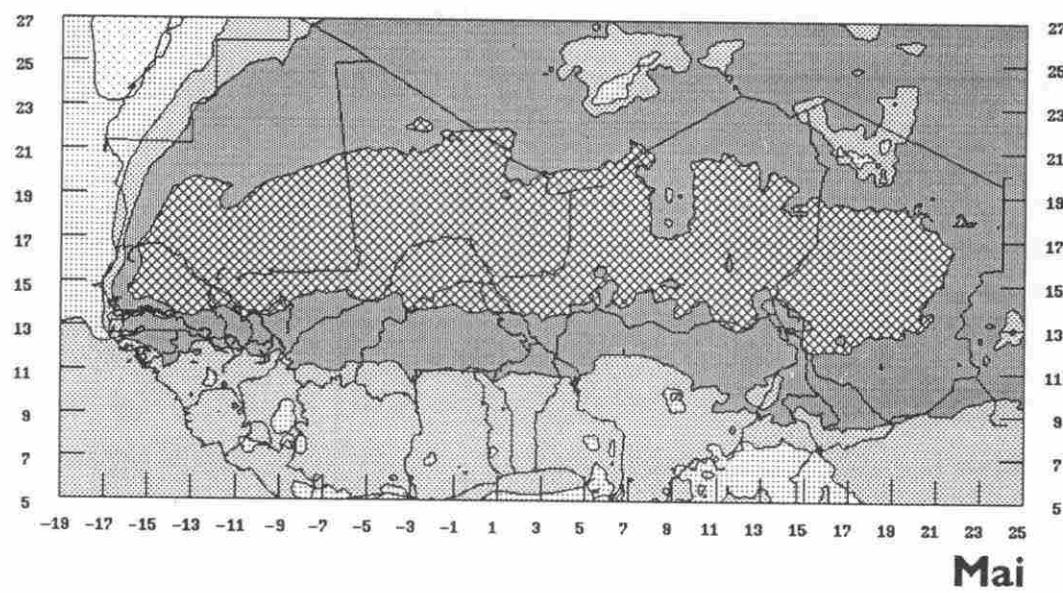
Les minima présentent la même structure qu'en mai avec accroissement de la plage occidentale supérieure à 25°C jusqu'en Algérie. L'influence atlantique se fait sentir à l'ouest du 14ème méridien ouest de la Mauritanie à la Guinée. Le Tibesti, le Darfour et le plateau de Jos sont en dessous de 20°C.



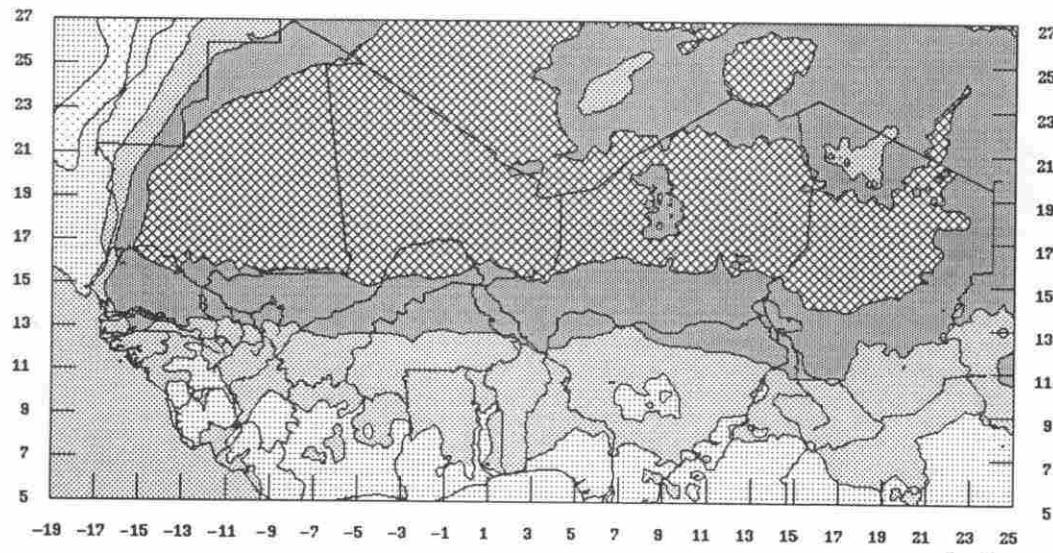
Cartes N° 16a : Températures maximales du premier trimestre



Avril

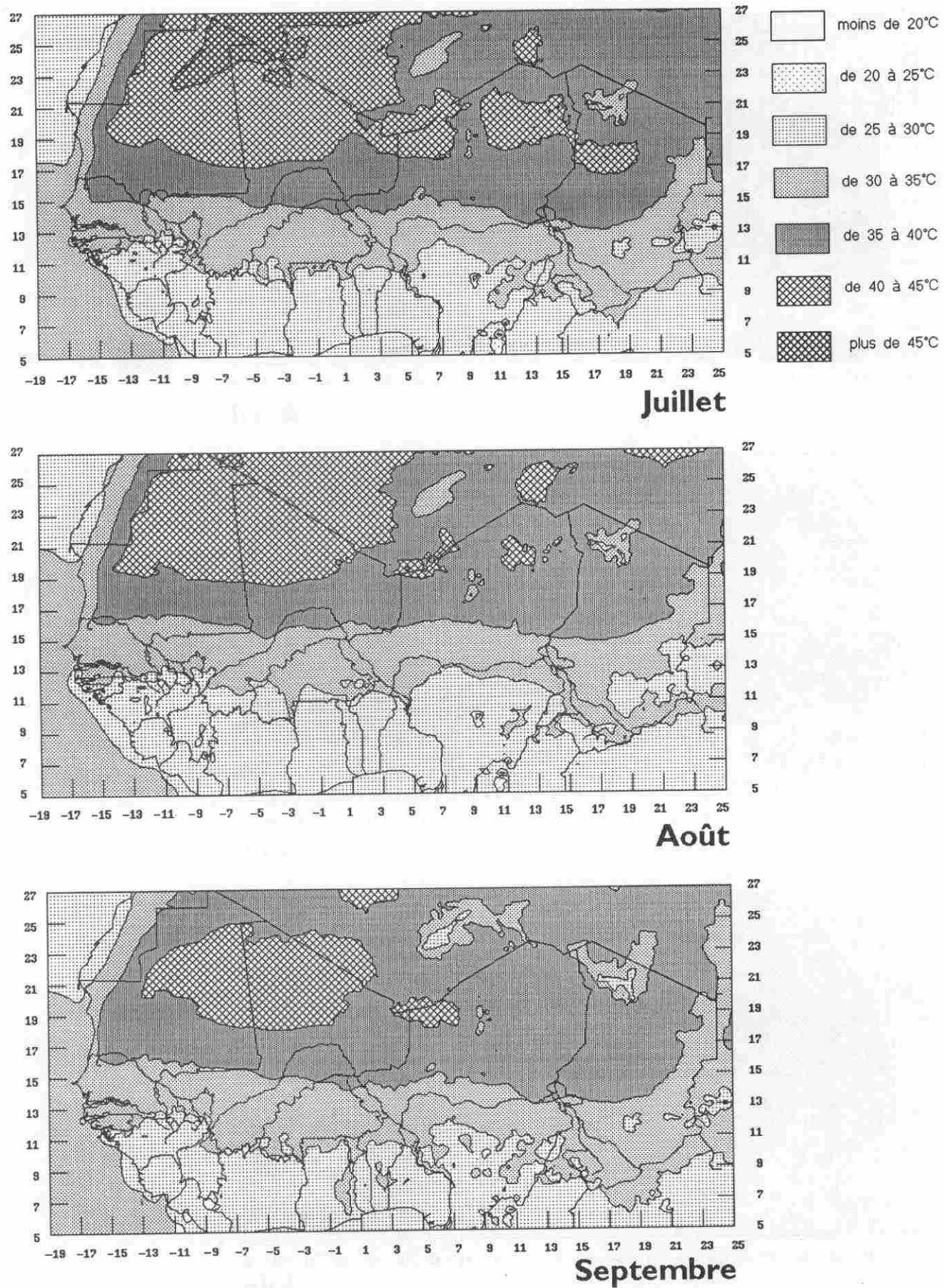


Mai

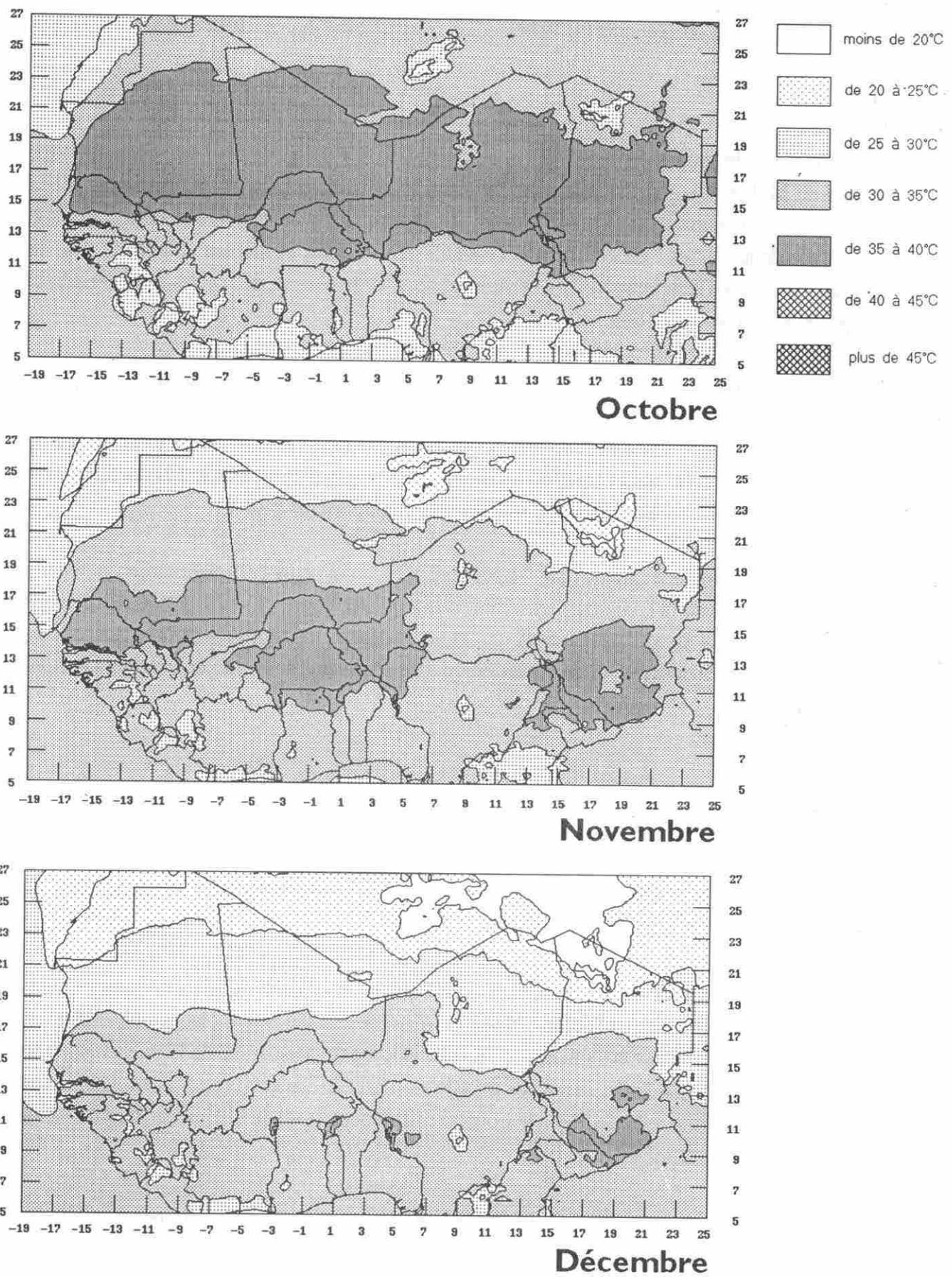


Juin

Cartes N° 16b : Températures maximales du second trimestre



Cartes N° 16c : Températures maximales du troisième trimestre



Cartes N° 16d : Températures maximales du quatrième trimestre

3.2.2.3. EVOLUTION PENDANT LE TROISIEME TRIMESTRE

Mois de juillet

Une plage de températures moyennes supérieures à 35°C intéresse le nord-est mauritanien, le nord du Mali et l'Algérie. L'isotherme 30°C, au tracé ouest-est assez rectiligne, poursuit sa translation vers le nord. Il correspond à l'isohyète 100 mm. Sur sa marge ouest il remonte vers le Sahara occidental à cause de l'influence océanique. Il s'infléchit également au nord le long du Soudan. Des plages inférieures à 25°C sont localisées sur le plateau de Jos, les monts Kirdi, la région de Mongo et le Darfour.

La même disposition se retrouve pour les maxima moyens avec une dorsale de températures comprises entre 40 et 45°C sur le 18ème parallèle Nord. L'isotherme maximal moyen 35°C correspond à l'isohyète 150 mm. L'influence atlantique fait remonter brutalement cet isotherme qui prend également une direction nord-est dans le couloir entre l'Ennedi et le Tibesti. La région de Nouadhibou et le Sahara occidental ont des maxima inférieurs à 30°C.

Pour les minima une grande plage supérieure à 25°C concerne l'est mauritanien et le delta intérieur du Niger jusqu'à l'Algérie. L'ensemble du Sahel est compris entre 20 et 25°C. En dessous de 20°C on trouve la frontière du Soudan, la région de Mongo, les monts Kirdi, le plateau de Jos, le Fouta Djalon et la côte autour de Nouadhibou. Les écarts diurnes sont généralement partout inférieurs à 10°C.

Mois d'août

Il y a encore progression vers le nord du rafraîchissement: la plage supérieure à 35°C monte de 200 km mais l'isotherme moyen de 30°C progresse seulement de 100 km toujours en accord avec les pluies de 100 mm. Les mêmes caractéristiques locales atlantique et soudannaise se retrouvent comme en juillet.

Les maxima conservent également la distribution du mois de juillet sans changements notables à part le morcellement de l'axe maximum de 40 à 45°C en petites plages situées dans les zones basses entre les massifs montagneux. La plage de maxima supérieurs à 45°C est réduite en Algérie à la région de Tindouf. Les noyaux frais de Mongo et du Darfour se réunissent en une seule unité. L'isotherme maximal de 30°C se trouve à la frontière nord de la Guinée Bissau et dans l'extrême sud du Mali.

Les minima moyens ne changent pratiquement pas. Les amplitudes thermiques journalières restent partout voisines de 10°C et leur aire s'est considérablement élargie. La valeur de ces écarts thermiques reste encore trop faible pour l'induction florale de certaines espèces maraîchères comme la tomate.

Mois de septembre

L'isotherme moyen de 30°C progresse vers le sud allant de Rosso à Mao. A l'ouest il est parallèle à la côte dont il se rapproche de 50 km à Nouakchott. Au Tchad il se redresse vers Faya et s'incurve pour passer au sud du Tibesti et du Hoggar. Sur sa limite méridionale il correspond à une pluviométrie de 50 mm.

Le même tracé se remarque pour l'isotherme maximal de 35°C avec la même correspondance pluviométrique. Les maxima sont en dessous de 45°C et cet isotherme se scinde en deux plages dans le nord Mauritanie et Mali et dans le nord-est nigérien.

Les minima conservent la même distribution mais la plage de 20 à 25°C se contracte dans le centre mauritanien. Les écarts diurnes ont tendance à augmenter dans la région saharienne et dépassent les 10°C.

3.2.2.4. EVOLUTION PENDANT LE QUATRIEME TRIMESTRE

Mois d'octobre

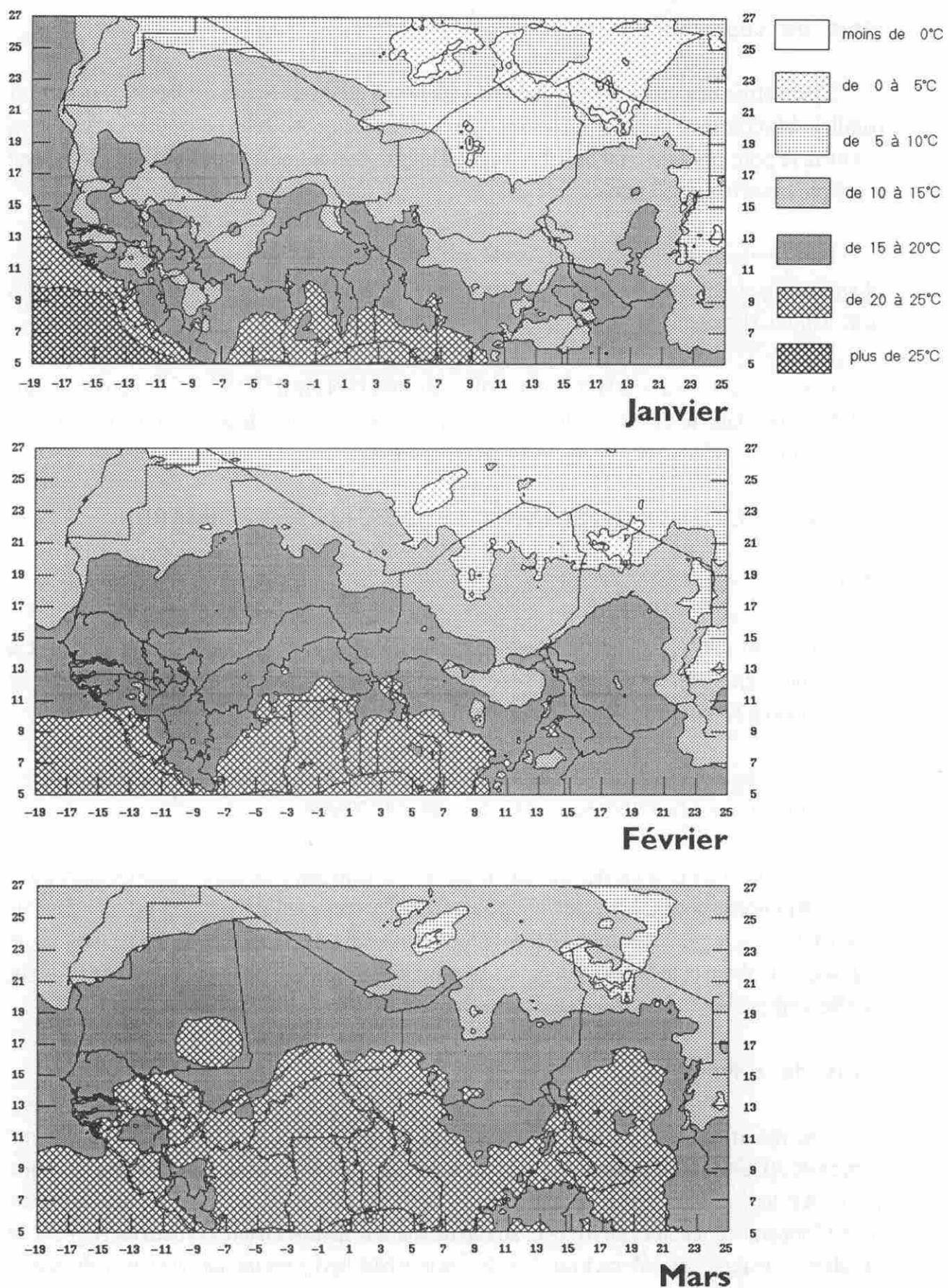
L'isotherme 30°C délimite une zone au nord du Sénégal et de la frontière entre le Mali et la Mauritanie. Une autre aire réduite subsiste au nord-est du lac Tchad. L'isotherme 25°C passe de Nouadhibou à Tindouf englobant l'ensemble du Sahara occidental.

Les maxima ne dépassent plus 40°C et l'isotherme 35°C s'aligne entre le 13ème parallèle à l'ouest et le 11ème à l'est. Il correspond à des pluies de 50 mm.

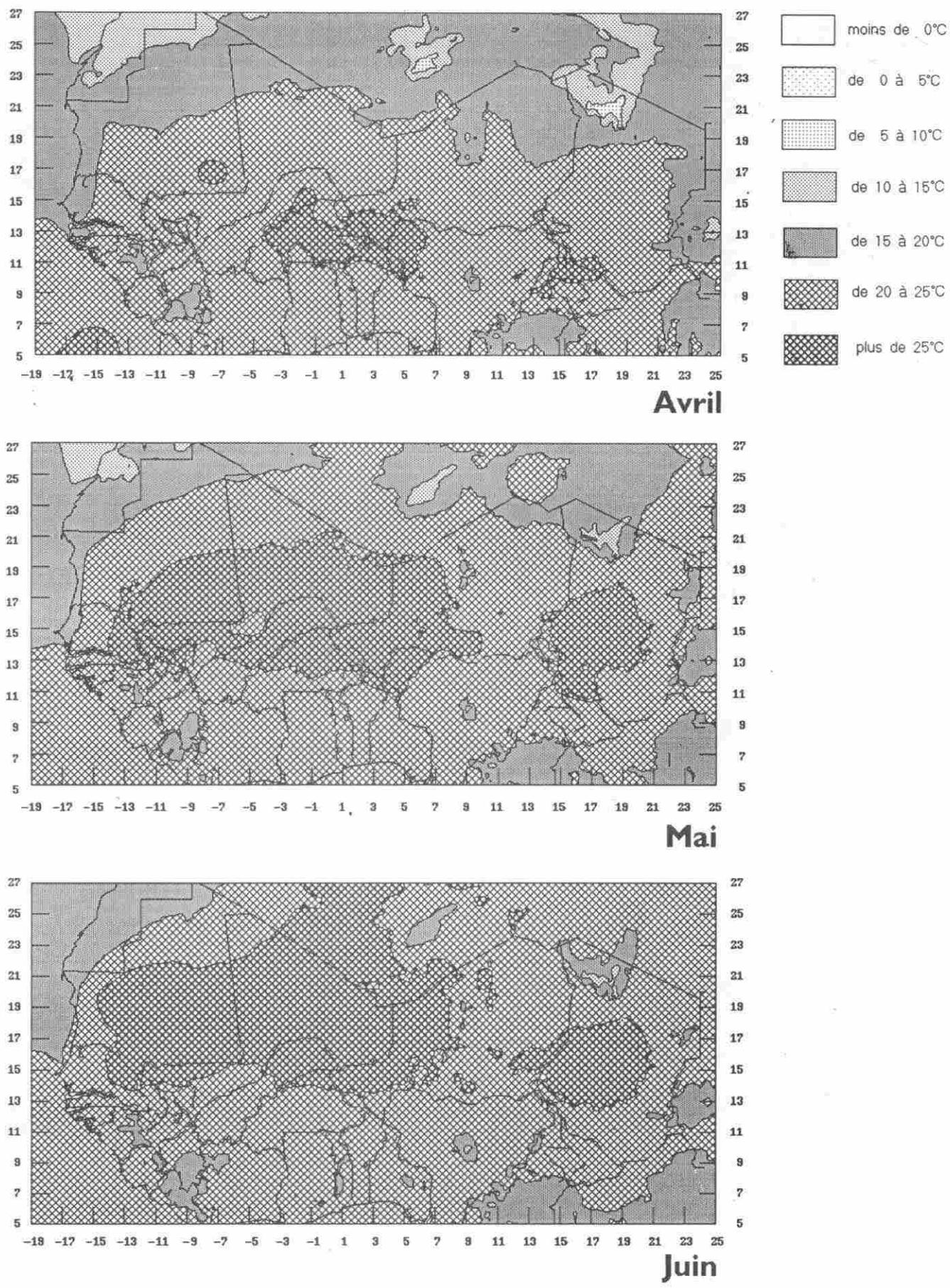
Les minima les plus élevés sont autour de Néma. Une plage centrale comprise entre 20 et 25°C est limitée au nord de la Mauritanie, pénètre dans l'extrême sud algérien puis passe au dessous de l'Aïr. Elle est fragmentée au sud par des noyaux plus frais sur Mongo, le Nigéria, l'Atakora, le nord-ouest ivoirien et le Fouta Djalon. Les amplitudes journalières croissent et vont de 10°C sur la côte sénégalaise à 20°C sur le Darfour, la moyenne du Sahel oscillant entre 15 et 18°C.

Mois de novembre

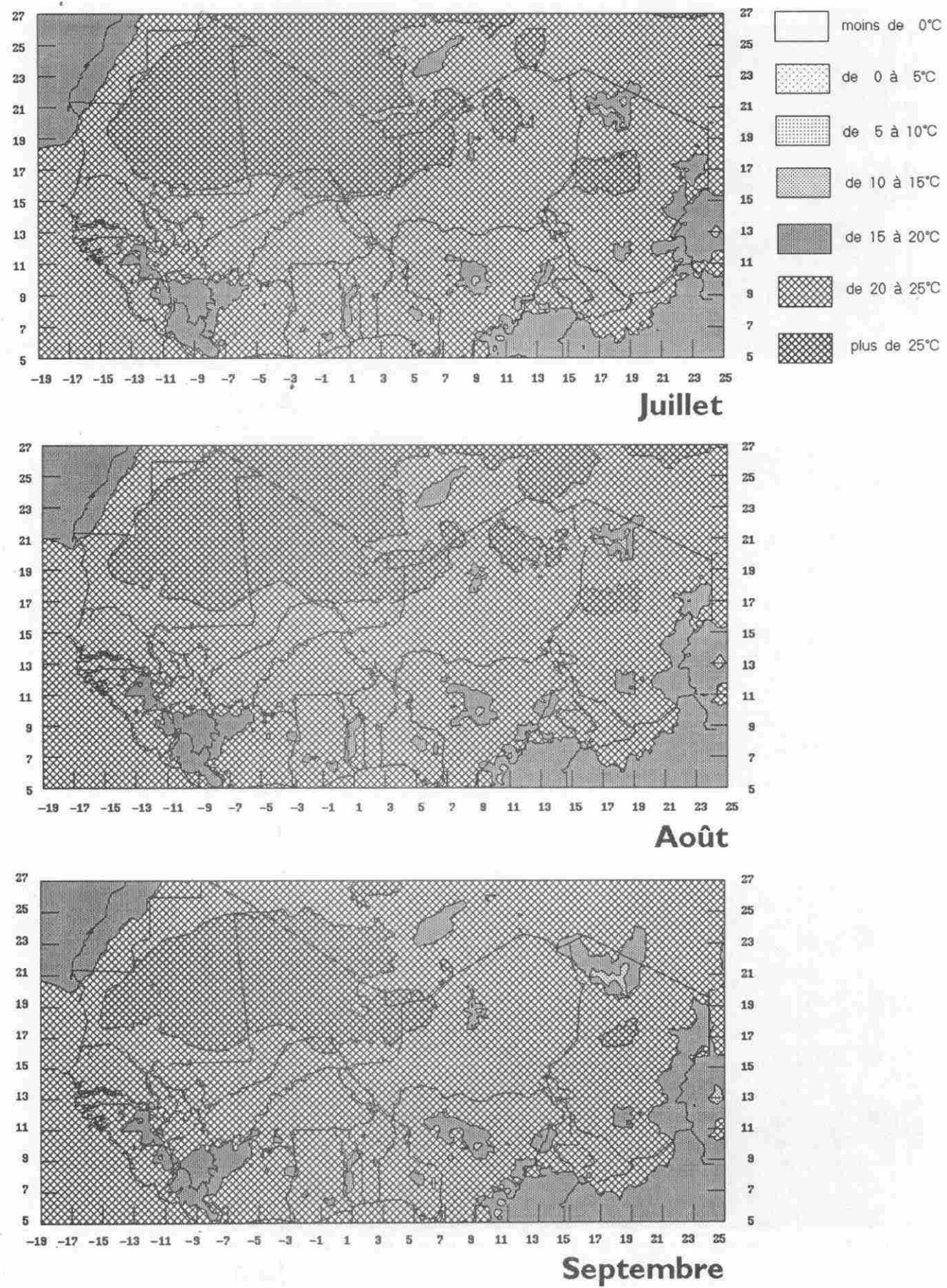
Une modification brutale se manifeste avec une baisse des températures. Si l'isotherme moyen de 30°C ne change pas au sud, il marque une limite nette au nord. Il s'aligne sur le 21ème parallèle puis s'infléchit vers l'Aïr entre 15 et 17° de latitude N. Quelques rares noyaux inférieurs à 25°C apparaissent autour de Mongo, au sud de Maradi, dans les hautes vallées du Niger et de la Falémé. Les repiquages de riz irrigués, s'ils sont trop tardifs, riquent un état végétatif stationnaire qui en allongeant le cycle va accroître les besoins en eau d'irrigation à la remontée des températures.



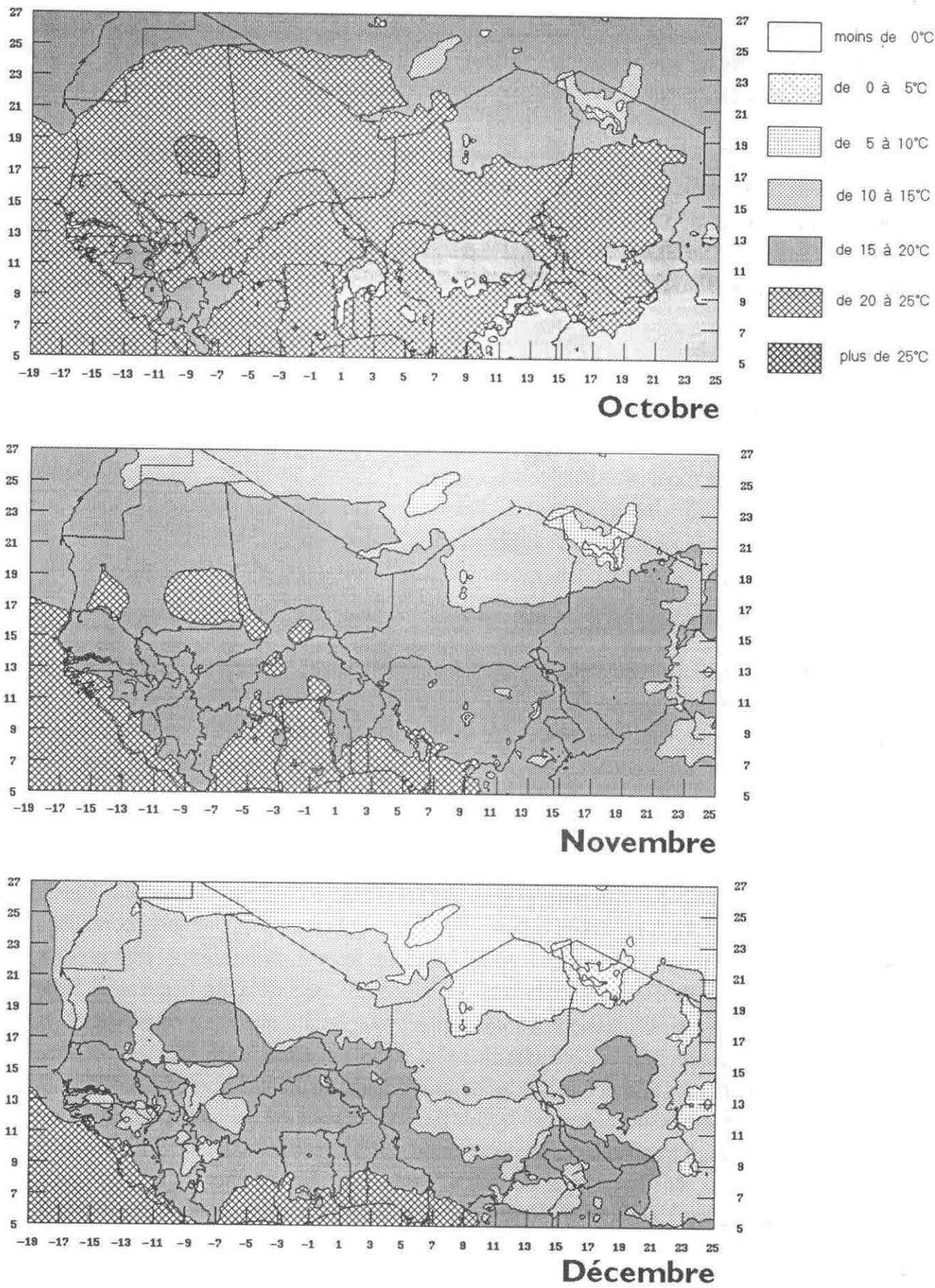
Cartes N° 17a : Températures minimales du premier trimestre



Cartes N° 17b : Températures minimales du second trimestre



Cartes N° 17c : Températures minimales du troisième trimestre



Cartes N° 17d : Températures minimales du quatrième trimestre

Une plage de températures maximales subsiste vers 15° nord englobant le sud de la Mauritanie, le Sénégal jusqu'à la Gambie, le delta central du Niger, le Burkina et l'ouest du Niger. Un autre noyau subsiste dans les vallées des affluents du lac Tchad.

L'isotherme 15°C des températures minimales apparaît à 25° Nord, contourne le Tassili des Hadjer, l'Aïr, et remonte à l'entrée du couloir entre le Tibesti et l'Ennedi. Quelques noyaux supérieurs à 20°C subsistent en Mauritanie, à Tombouctou et Hombori et sur le pourtour du Burkina. Cette chute de température permet le démarrage du blé dans les régions propices. Les amplitudes atteignent 20°C.

Mois de décembre

La distribution des isothermes s'apparente à celle de janvier. Au Niger, décembre est le mois le plus frais. L'isotherme 20°C suit le tracé de celui de 30°C en novembre. Un noyau supérieur à 25°C subsiste dans le sud du Tchad et vers la Gambie.

Les maxima laissent quatre noyaux supérieurs à 35°C alignés par 11° Nord: deux au Burkina, un au Nigéria et le plus important dans le centre-sud du Tchad. Au nord vers le 21ème parallèle les maxima tombent en dessous de 25°C.

L'isotherme 10°C des températures minimales apparaît par 25° Nord puis s'infléchit autour des massifs montagneux et passe au voisinage de Bilma. L'isotherme 15°C pénètre loin vers le sud par de grandes invaginations au travers du sud-ouest malien, dans le centre et l'est du Niger d'où il descend jusqu'au Cameroun. Les vallées des grands fleuves restent entre 15 et 20°C.

3.2.3. ROLE DES FACTEURS LOCAUX

L'orographie joue beaucoup dans le tracé des isothermes surtout quand l'altitude devient importante. Il est remarquable de voir la permanence de l'influence océanique sur la bordure du Sénégal et de la Mauritanie. La convergence inter-océanique associée au relief interrompt, presque tous les mois, le tracé des isothermes à la frontière du Soudan. Une autre action fréquente est celle des grandes vallées et des dépressions humides qui relèvent les minima et par conséquence les moyennes de températures. Inversement les aires plus sèches favorisent le rayonnement nocturne et la baisse des minima. On peut dire que les minima ont une distribution moins zonale que les autres températures car ils sont plus sensibles aux facteurs locaux. Une station de mesure en fond de vallée aux versants élevés peut recevoir une chute d'air froid provenant des plateaux et dans ce cas les minima sont plus bas que la normale. Ce phénomène est fréquent dans les postes climatiques du Soudan. Dans les régions sud, une végétation abondante joue également un rôle non négligeable sur les équilibres thermiques.

3.3. L'HUMIDITE DE L'AIR.

L'humidité atmosphérique décroît progressivement quand on s'éloigne de la côte en liaison avec la pénétration ou le recul des flux océaniques. Nous avons retenu la tension de vapeur comme paramètre de mesure de l'humidité donc du potentiel précipitable. Sa variation dans l'année se fait suivant un régime boréal avec maximum dans les mois d'août et septembre.

3.3.1. L'ALTITUDE ET LA TENSION DE VAPEUR.

La pression atmosphérique se raréfie régulièrement avec l'altitude, or la tension de vapeur est une pression partielle de l'atmosphère et subit le même phénomène, il y a donc un gradient et son problème se pose comme pour les températures. Si l'atmosphère est moins épaisse à mesure de l'élévation, sa densité diminue rapidement, de ce fait la variation au cours de l'année est moins grande en altitude qu'à des niveaux plus bas.

3.3.1. LA DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DE L'HUMIDITE.

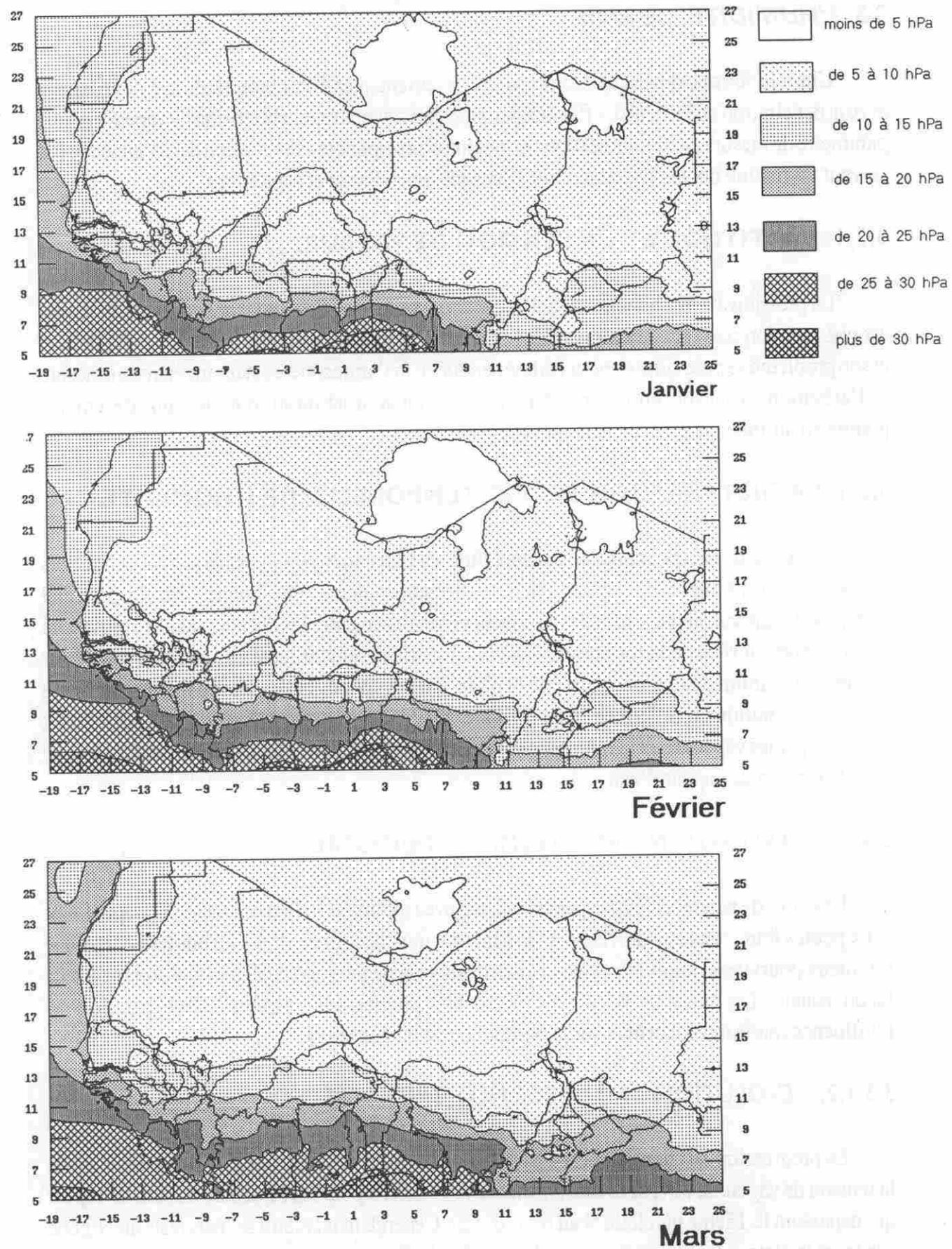
La vapeur d'eau a pour origine l'évaporation sur l'Océan Atlantique puis son advection vers le continent. La tension de vapeur, par sa distribution, donne une bonne idée du potentiel précipitable. En saison pluvieuse il y a souvent coïncidence entre les décades de forte pluviosité et les valeurs élevées de la tension de vapeur. Un enrichissement local en humidité se fait par l'évaporation immédiate d'une partie de la pluie, par l'évaporation en continu des nappes libres et par l'évaporation en différé de l'eau infiltrée. L'évapotranspiration de cette eau infiltrée est favorisée par les végétaux, et la forêt sempervirente donne le même effet que la surface océanique pour la tension de vapeur d'eau.

3.3.1.1. EVOLUTION AU PREMIER TRIMESTRE

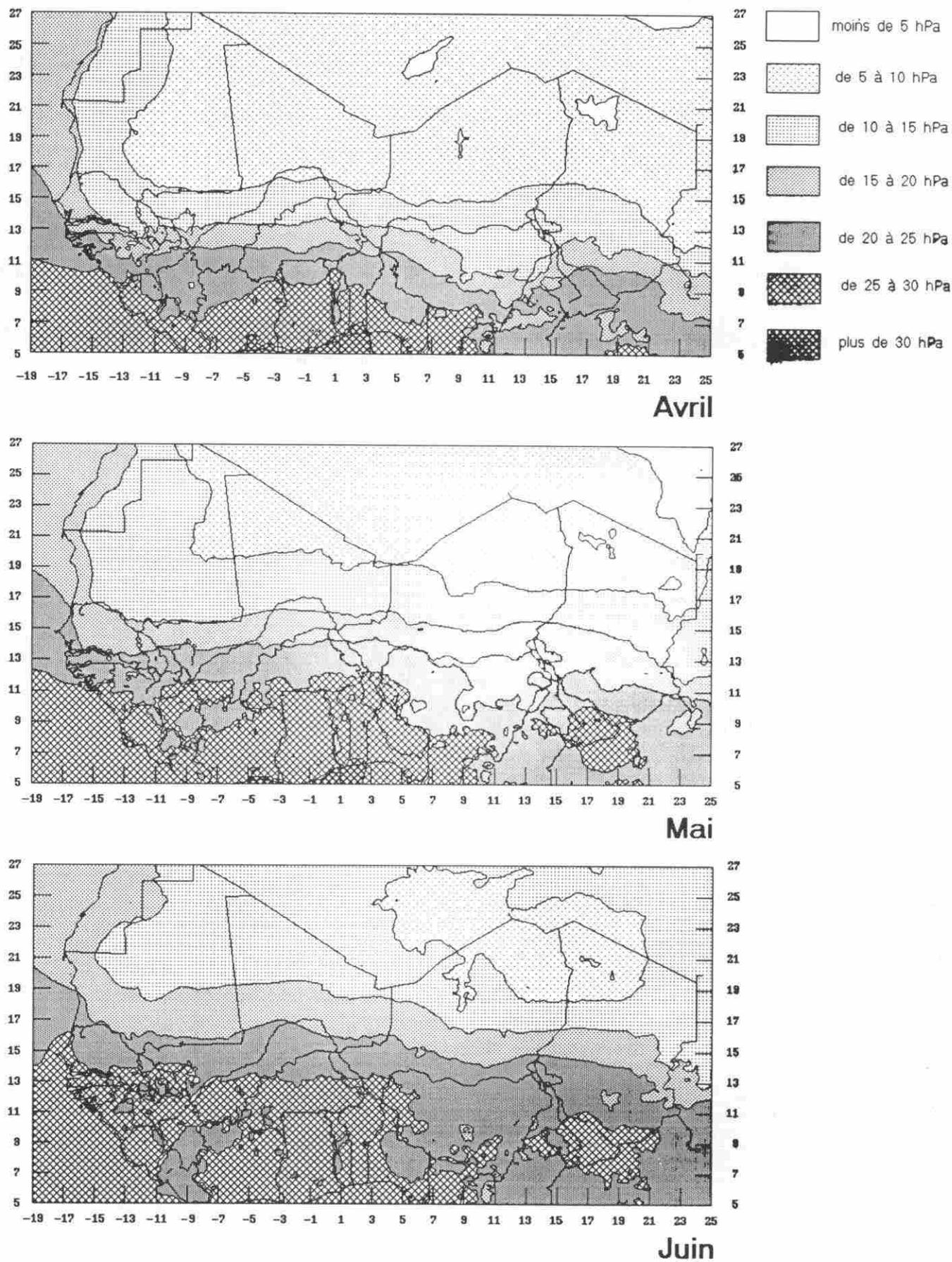
Les mois de janvier et février voient le Sahel avec moins de 10 hPa de tension de vapeur sauf deux petites franges au sud du Tchad et du Mali qui franchissent ce stade. La bordure océanique est mieux pourvue en humidité. Avec le mois de mars la pénétration de l'humidité commence de façon zonale. Les tensions de vapeur de 10 hPa progressent jusqu'au 13ème parallèle N. L'influence maritime s'accentue sur la bordure ouest du continent.

3.3.1.2. EVOLUTION AU SECOND TRIMESTRE

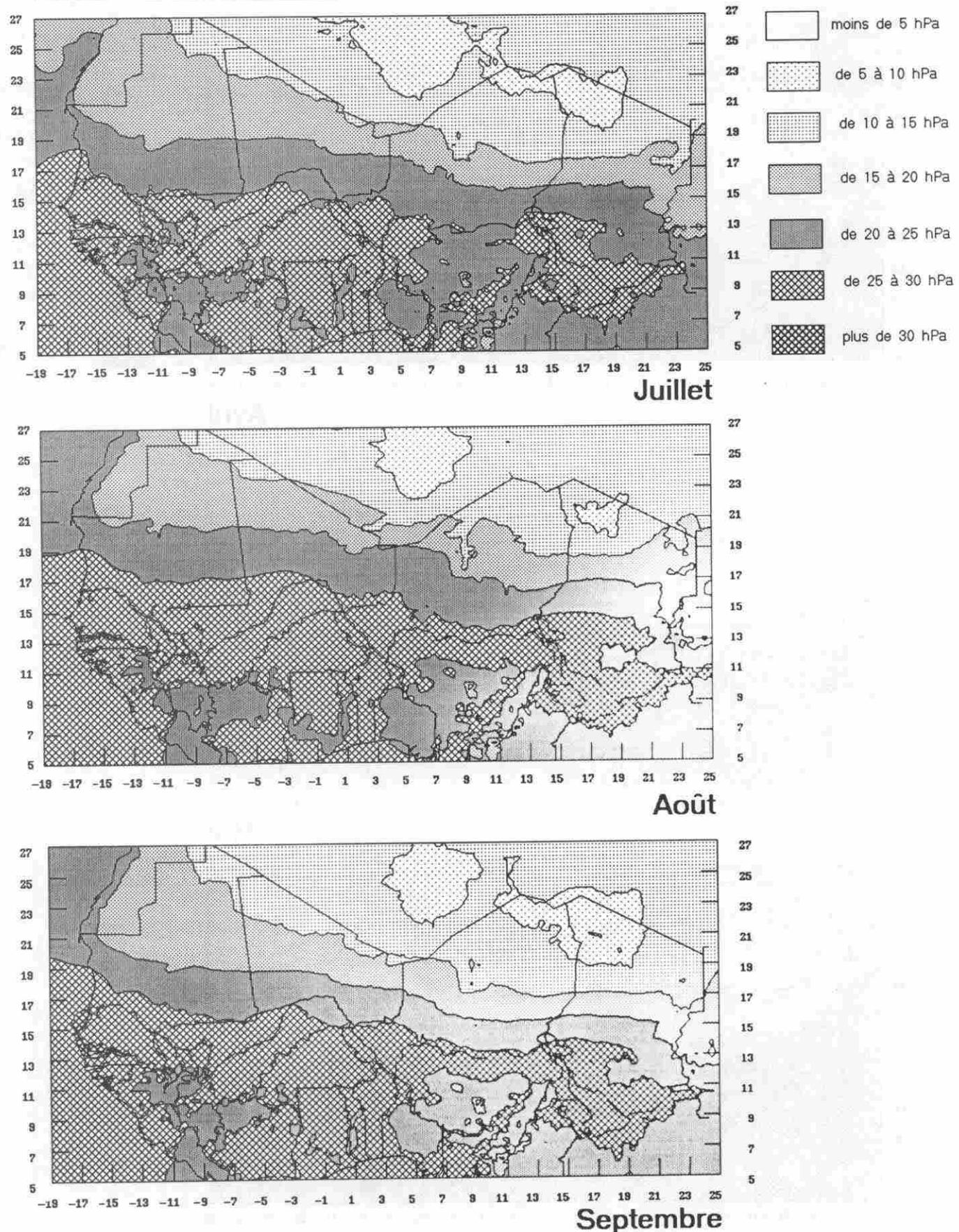
La progression de l'humidité est à peu près conforme à celle des pluies: l'accroissement de la tension de vapeur se fait par le sud. L'avancée reste zonale pour les 10 hPa de tension de vapeur qui dépassent le 15ème parallèle N au mois d'avril. Cependant un retard se manifeste au Nigéria sur Jos et le plateau Bauchi ainsi que sur la majorité du Cameroun. La même situation se présente en mai avec alignement des 10 hPa au dessus du 17ème parallèle et l'isobare de 20 hPa correspond



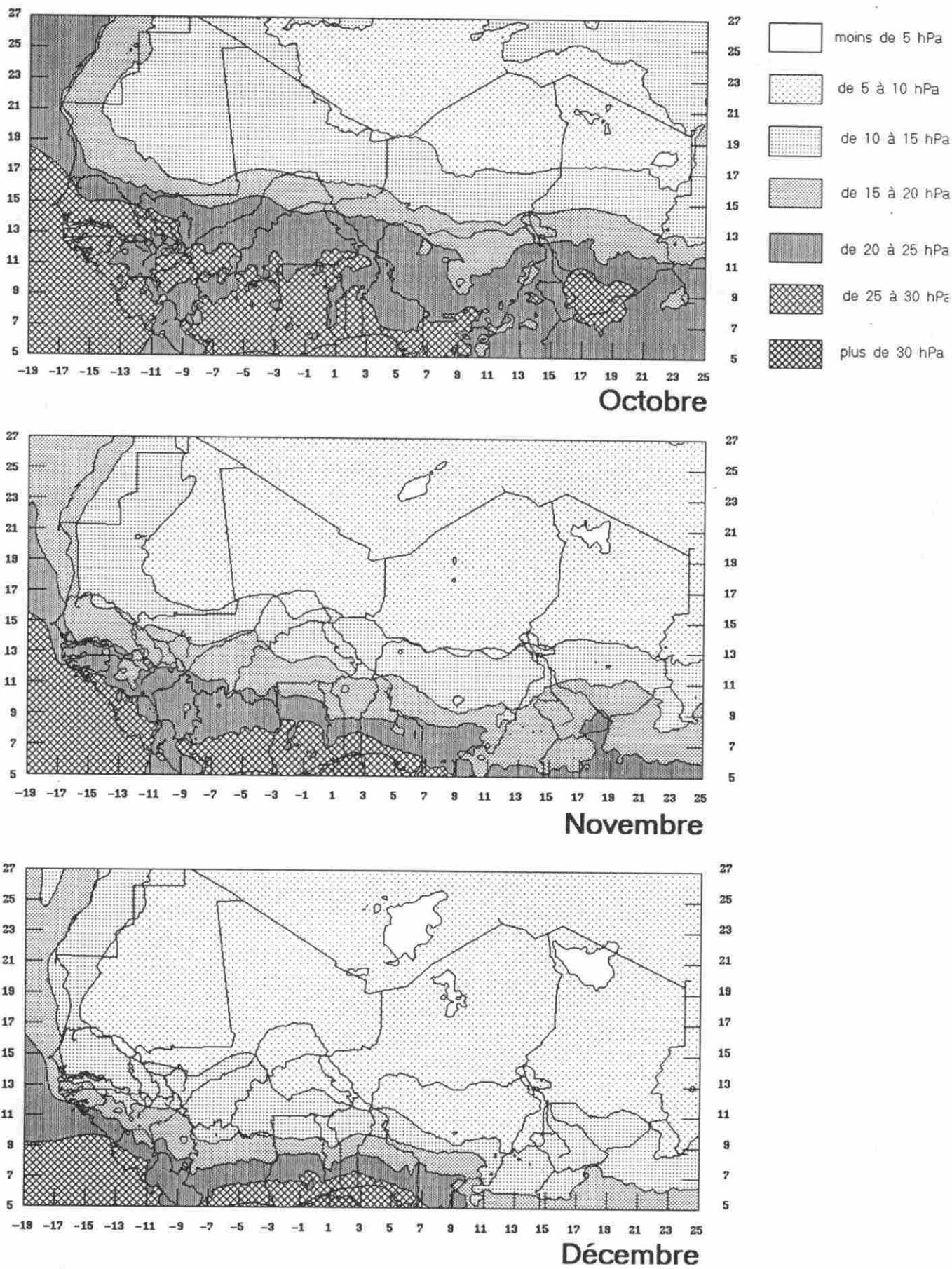
Cartes N° 18a : Tensions de vapeur du premier trimestre



Cartes N° 18b : Tensions de vapeur du second trimestre



Cartes N° 18c : Tensions de vapeur du troisième trimestre



Cartes N° 18d : Tensions de vapeur du quatrième trimestre

à l'isohyète médiane de 50 mm. Au sud la tension de vapeur ne dépasse pas les 25 hPa sur le nord-ouest ivoirien et les monts de Guinée (Fouta Djalon, monts Nimba). L'influence océanique se fait sentir jusqu'au méridien 9°O. En juin seules les hauteurs algériennes, l'Aïr et le Tibesti sont en dessous de 10 hPa de tension de vapeur d'eau. Comme en mai l'isobare de 25 hPa concorde avec l'isohyète de 100 mm. L'influence atlantique se fait moins sentir sur la côte ouest. Mais des irrégularités apparaissent également dans la distribution zonale avec un retard sur le Cameroun, le plateau Bauchi, la Guinée et le nord-ouest ivoirien.

3.3.1.3. EVOLUTION AU TROISIEME TRIMESTRE

Durant les mois de juillet et août l'isobare de 25 hPa concorde toujours avec l'isohyète de 100 mm. Pendant tout le trimestre, l'humidité de l'air élevée sur la côte, entre la Mauritanie et la Gambie, ne correspond pas à la pluviométrie ce qui indiquerait les mauvaises conditions de développement des ascendances dans cette région. En août et septembre une dorsale d'humidité maximale s'installe en permanence entre 13 et 18° de latitude nord sur la côte atlantique et entre 11 et 13° de latitude nord au Tchad. Le Nigéria, le Cameroun et la RCA restent en général au dessous de 25 hPa. Au Nigéria les vallées du Niger et de la Bénoué sont plus humides montrant le rôle positif de l'hydrologie.

3.3.1.4. EVOLUTION AU QUATRIEME TRIMESTRE

En octobre et novembre il y a toujours discordance entre l'humidité de la façade atlantique ouest et la pluviométrie. La décroissance se fait vers le sud en laissant des plages d'humidité plus élevée en accord avec l'hydrographie.

3.3.2. L'INFLUENCE DES FACTEURS LOCAUX

La façade ouest avec upwelling fréquent possède des températures modérées qui limitent le transport de la vapeur d'eau vers le continent. Les lacs et d'une façon générale, la présence de larges surfaces d'eau libre, permanentes ou temporaires, explique les humidités relativement fortes vers le lac Tchad et au-dessus du delta central du Niger.

3.4. LE VENT.

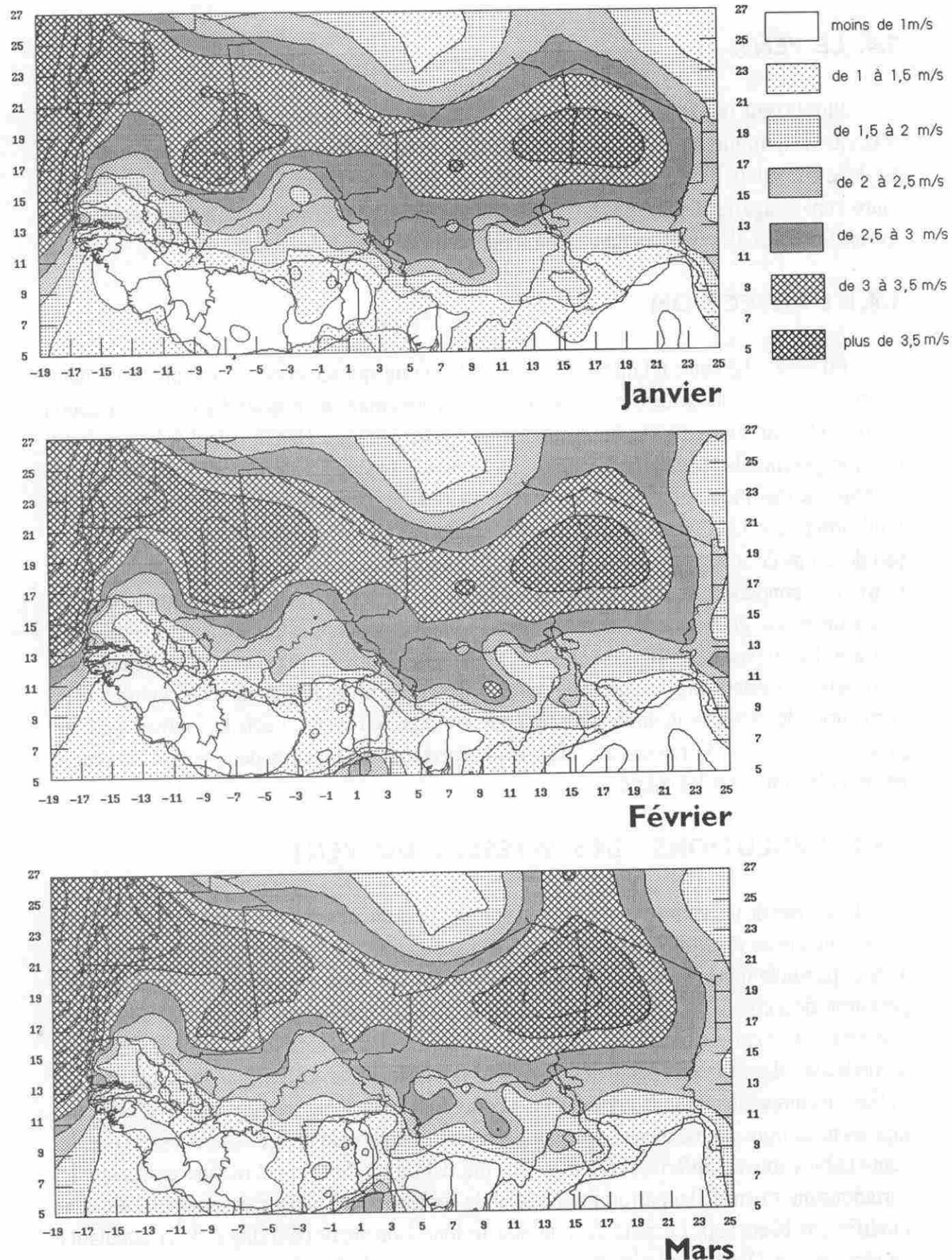
Plus le vent, ou air en mouvement, est proche du sol, plus la force de frottement se fait sentir et la vitesse diminue. Or en agroclimatologie c'est le vent à deux mètres qui est retenu. Ce vent est donc une valeur locale sensible aux conditions du milieu et qui ne saurait en aucune manière fournir une image des déplacements d'air en altitude. Nous avons d'ailleurs vu les problèmes posés par les formules d'évaluation du vent en fonction de la hauteur de mesure.

3.4.1. L'ADVECTION

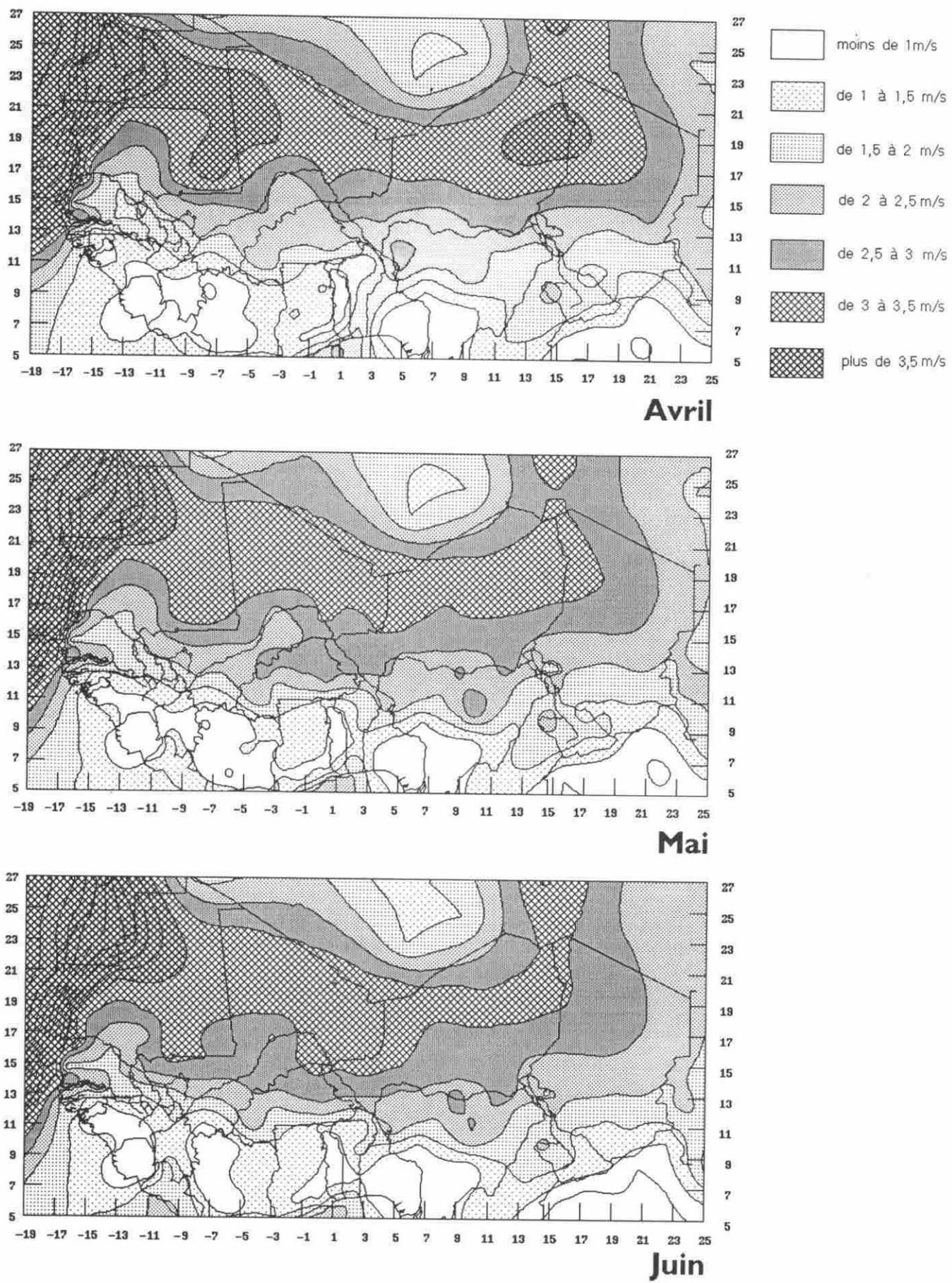
En zone sahélienne il faut tenir compte de l'énergie qui accompagne, comme dans toutes régions arides ou semi-arides, les phénomènes de déplacement des masses d'air. Cette advection influe sur les variations d'humidité en relation avec la température. Dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle le coefficient appliqué à la vitesse du vent est alors modifié en fonction de l'amplitude thermique entre les températures maximales et minimale. La formule retient comme seuils inférieurs 12°C pour l'amplitude et 15°C pour la température minimale. En passant à un pas de temps décadaire ou mensuel les calculs effectués avec les amplitudes obtenues par les moyennes conduisent à des résultats sensiblement différents puisque les variations inter-journalières sont gommées. Nous recommandons alors, pour une estimation correcte de l'ETP, de travailler au pas de temps journalier. On effectuera ensuite les regroupements décadaires et mensuels, généralement sous forme de cumuls. Il est donc nécessaire de faire les contrôles et les corrections de toutes les données utilisées pour le calcul de l'ETP à l'échelle journalière. Cette procédure évite d'avoir recours aux abaques de correction en fonction de la vitesse du vent et permet d'automatiser les calculs.

3.4.2. EVOLUTIONS DES VITESSES DU VENT

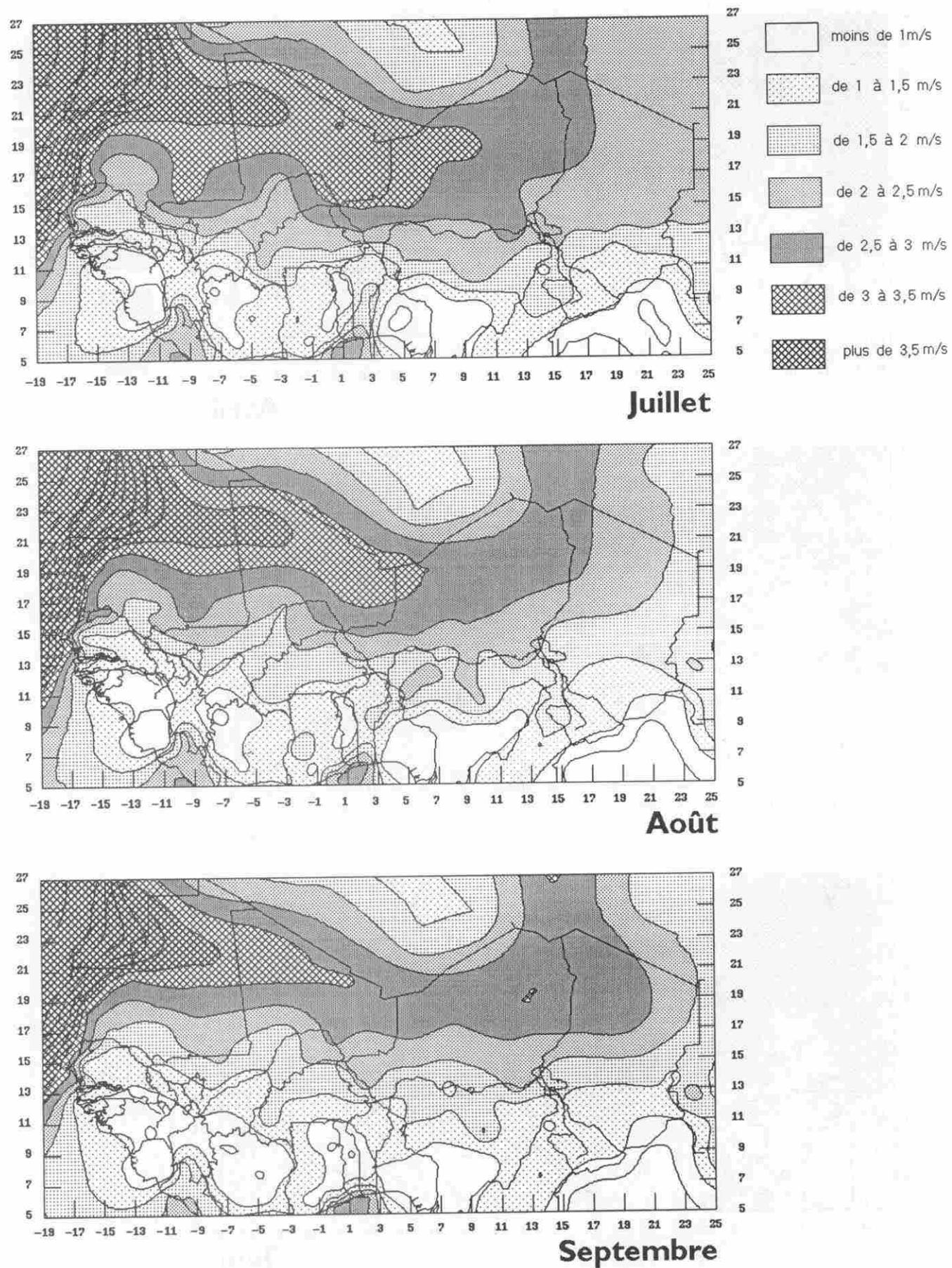
Les cartes de vitesses du vent montrent une grande homogénéité d'ensemble sur le continent où la structure de répartition reste constante. Un axe de forte vitesse est toujours présent sur le 18ème parallèle nord. Au sud de la latitude de 15°N il y a décroissance des vitesses jusqu'à proximité de la côte à l'exception du golfe du Bénin qui est fortement ventilé. La bordure atlantique ouest subit des vents extrêmement rapides ayant des vitesses moyennes qui varient de 4 à 7 m par seconde avec des isotaques parallèles à la côte. Mais à l'intérieur, au Sénégal, les vents sont très faibles en comparaison car ils prennent les valeurs zonales de l'intérieur du continent. Les vents rapides ne se trouvent pas au sud de la Guinée Bissau et la côte atlantique sud-ouest n'a que des vents faibles souvent inférieurs à 1 m/s. Chaque station où le vent est mesuré enregistre des variations intermensuelles parfois importantes de l'ordre de 1 à 3 mais la structure globale ne se modifie pas beaucoup. Le sens du vent suit le fonctionnement périodique de la circulation atmosphérique. D'une façon générale les zones bénéficiant du flux de mousson voient les vents venir du sud-ouest pendant la pénétration de l'air humide. Toutes les régions au nord du FIT



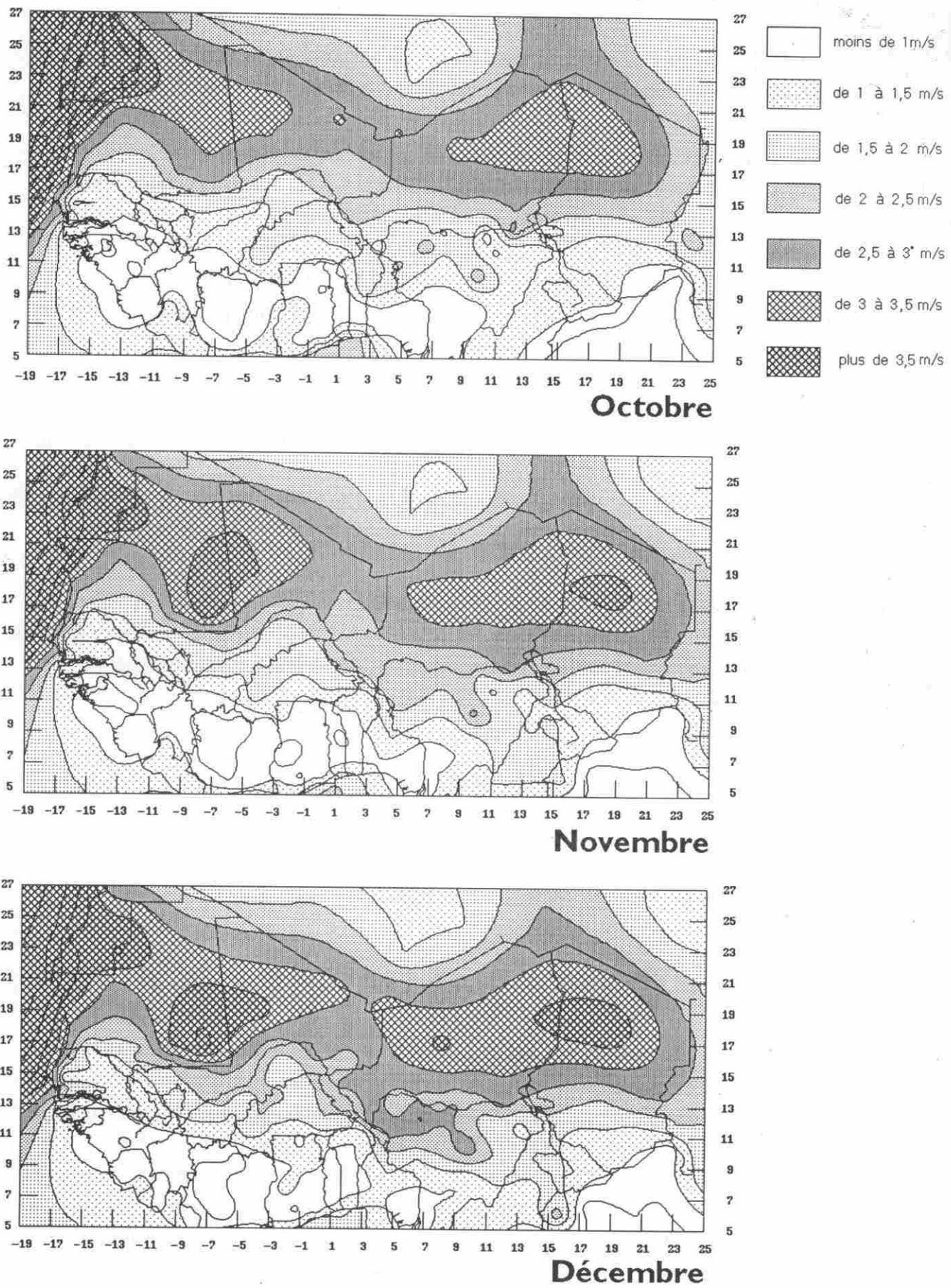
Cartes N° 19a : Vents moyens à 2 mètres du premier trimestre



Cartes N° 19b : Vents moyens à 2 mètres du second trimestre



Cartes N° 19c : Vents moyens à 2 mètres du troisième trimestre



Cartes N° 19d : Vents moyens à 2 mètres du quatrième trimestre

subissent des alizés du nord-est. Localement des couloirs liés à la topographie peuvent modifier légèrement les directions. Les vitesses instantanées varient énormément ainsi que les directions lors des passages des systèmes pluvieux et il peut y avoir une grande variabilité, d'un jour à l'autre, dans les vents moyens.

En janvier et février l'isotaque de 2,5m/s s'aligne par 14°N du Tchad au centre Niger, puis il pénètre dans le Nigéria nord-ouest et va contourner le plateau de Jos. Il suit la vallée du Niger, épouse sa boucle jusqu'à Bamako pour remonter vers Kiffa et Boutilimit en Mauritanie. Les vallées du Logone et du Chari reçoivent des vents de 2m/s. La même physionomie prévaut en mars mais les vents faiblissent un peu au sud du 14ème parallèle. Ces trois mois présentent des noyaux de vents supérieurs à 3,5m/s à la latitude de 18° Nord.

En avril les noyaux de vents forts du NE subsistent dans le Sahara. L'isotaque de 2,5m/s reste en place de la Mauritanie à la vallée du Niger puis à partir de Niamey il s'aligne sur le 15ème parallèle. En mai la pénétration du flux de mousson dans la vallée du Niger supérieur crée un retour d'est dans le nord du Burkina où se rencontrent des vents de 2,5m/s. En mai et juin les vents supérieurs à 3,5m/s se contractent dans le nord-ouest mauritanien.

Le troisième trimestre apporte une situation de vents faibles dans le bassin du Tchad. Au Niger l'isotaque de 2m/s progresse vers le nord et s'aligne par 15°N en septembre. Du sud Burkina à la Guinée Bissau en passant par les zones méridionales du Mali et du Sénégal on observe un affaiblissement des vents qui tombent en dessous de 1m/s en septembre. La zone de vents forts sahariens rétrécit et sa limite sud se place en septembre au 17° Nord.

Le quatrième trimestre se caractérise par le plus grand nombre de vents calmes. Les vents sahariens se renforcent dès le mois d'octobre indiquant le retrait rapide du FIT vers le sud. En novembre apparaissent dans cette zone des vents supérieurs à 3,5 m/s. L'accroissement des vents vers le sud se fait par les vallées et dans le couloir formé par la chaîne du Cameroun. L'extrême sud du Tchad et la RCA restent en régime de vents calmes.

3.4.3. INFLUENCE DES FACTEURS LOCAUX SUR LA VELOCITE.

Les variations saisonnières ont diverses causes. En saison sèche la rugosité due aux plantes disparaît ce qui entraîne un accroissement de la vitesse du vent au dessus du sol, donc une demande évaporative relativement plus forte. Il semble bien que la circulation des alizés soit plus forte que celle du flux de mousson comme le montrent les cartes de vitesses du vent. Les premiers circulent d'ailleurs dans des zones dépourvues de végétation alors que la mousson commence sa pénétration sur le continent par les régions à la végétation la plus dense. Le modèle topographique joue un rôle important pour les vents au sol. Les obstacles orographiques ralentissent ou dévient sa progression, les couloirs et les vallées la favorisent. Ceci explique les invaginations et les coins dessinés par les isotaques.

3.5. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

C'est la demande évaporative du climat. Le paramètre évaporation est difficile à appréhender et à cartographier car il est généralement mesuré par différents types d'appareils et il est impossible de disposer de données homogènes. L'évaporomètre Piche, les différents types de bac donnent des résultats discordants. Il faut donc bien définir ce qui est entendu par le terme évaporation, comment sa valeur a été obtenue et à quelles surfaces naturelles il s'applique.

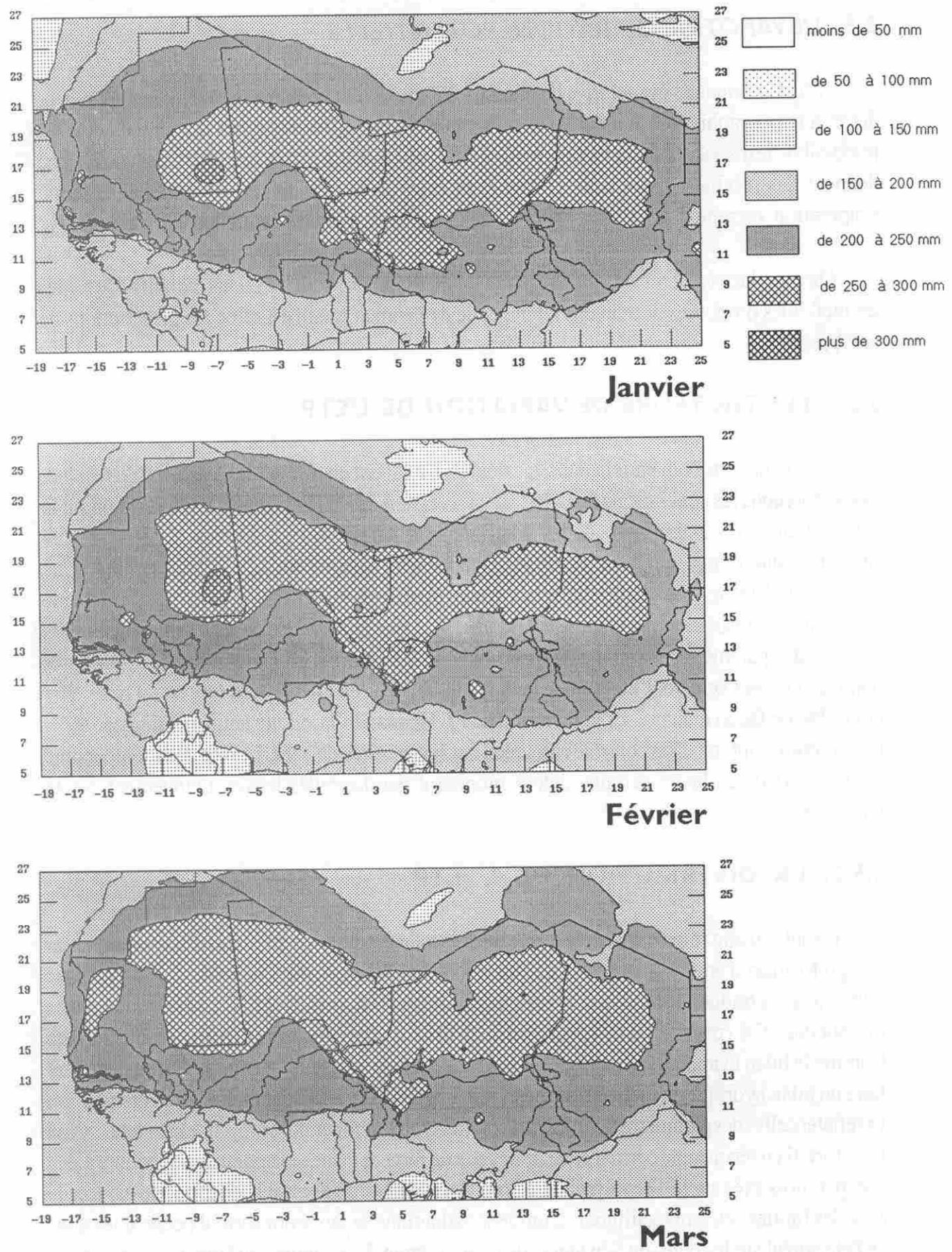
On remplace ici la mesure directe par des calculs qui utilisent les bilans radiatifs. De toutes les méthodes proposées nous avons retenu celle de Penman modifiée selon les prescriptions de la FAO.

3.5.1. LES FACTEURS DE VARIATION DE L'ETP.

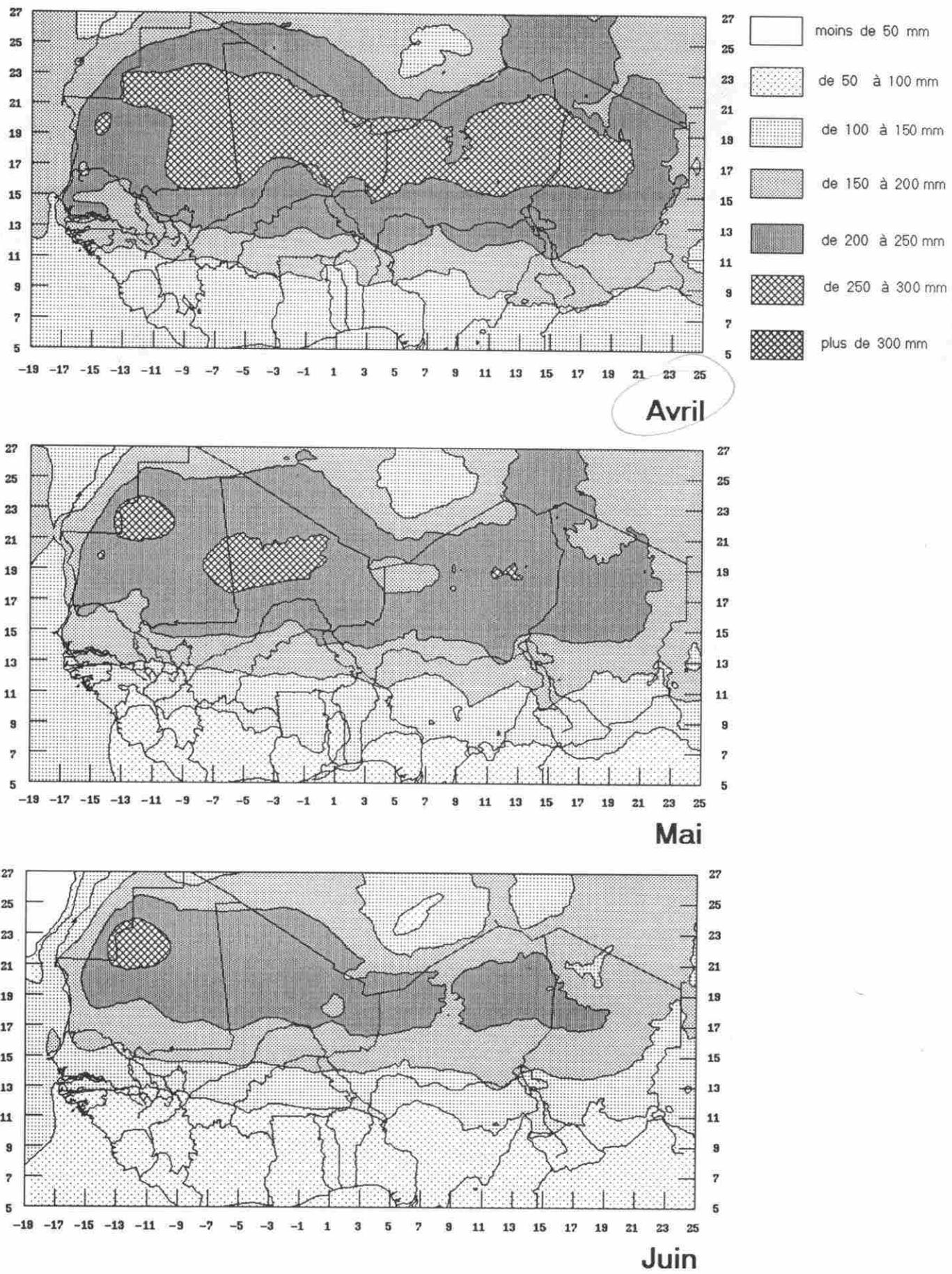
Les paramètres qui entrent dans le calcul de l'ETP ont un rôle sur la variabilité du résultat. Nous reprenons les conclusions du CIEH sur la précision de l'ETP calculée. L'imprécision sur la valeur d'albédo, l'incertitude sur les coefficients d'Angstroëm en absence de leur mesure entraînent une erreur sur l'évaluation du rayonnement solaire qui peut atteindre 30%. Une variation de 10 points sur l'humidité apporte une modification de l'ETP d'environ 2%, la même variation sur l'insolation fait changer l'ETP de 1%. Dans la moyenne des cas l'imprécision des mesures des paramètres entraîne une incertitude de 10% sur l'ETP. Dans le cas de climats très humides et assez venteux l'incertitude peut atteindre 30%, en effet le vent fort est un paramètre qui influe de façon majeure sur la précision de l'ETP quand l'humidité ambiante dépasse 60%. Ceci montre l'intérêt d'un contrôle rigoureux sur les mesures de vent. Le rôle de la température est primordial, d'ailleurs certains auteurs proposent des formules basées uniquement sur ce paramètre.

3.5.2. LA DISTRIBUTION DE L'ETP

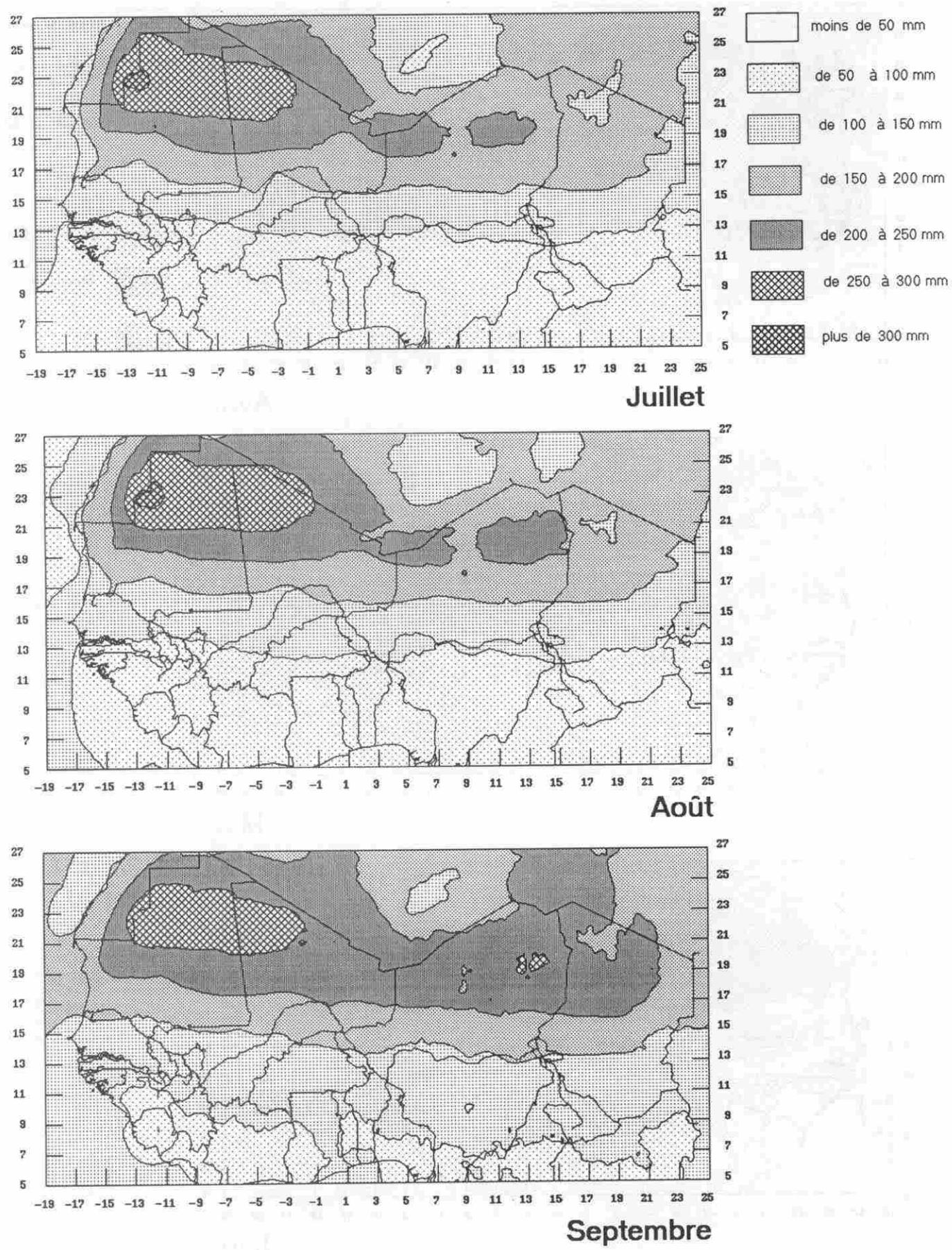
Il vaut souvent mieux utiliser le terme de demande évaporative que celui d'évaporation. Car la signification d'une "évaporation" très élevée quand l'alimentation pluviale devient presque nulle n'a pas de traduction physique. Il est bon de comparer les cartes d'ETPN° 20 à celles des pluies mensuelles N° 4 (pages 61 à 63) pour avoir une idée des déficits ou des recharges éventuelles. Comme le bilan évaporatif climatique n'a pas beaucoup de sens nous verrons plus loin comment faire un bilan hydrique en incluant la végétation. L'ETP intègre sept paramètres et sa distribution va refléter celles des paramètres les plus influents à savoir la température moyenne et le vent, quand il est fort. Il en résulte une permanence de noyaux de forte demande évaporative supérieure à 200 mm par mois axés sur le 18ème parallèle nord. Au sud de cette dorsale la distribution est zonale avec des limites souvent rectilignes. L'influence atlantique se fait sentir surtout pendant les mois de l'été boréal sur les côtes du Sénégal et de la Mauritanie. La coupure soudannaise se manifeste très fréquemment.



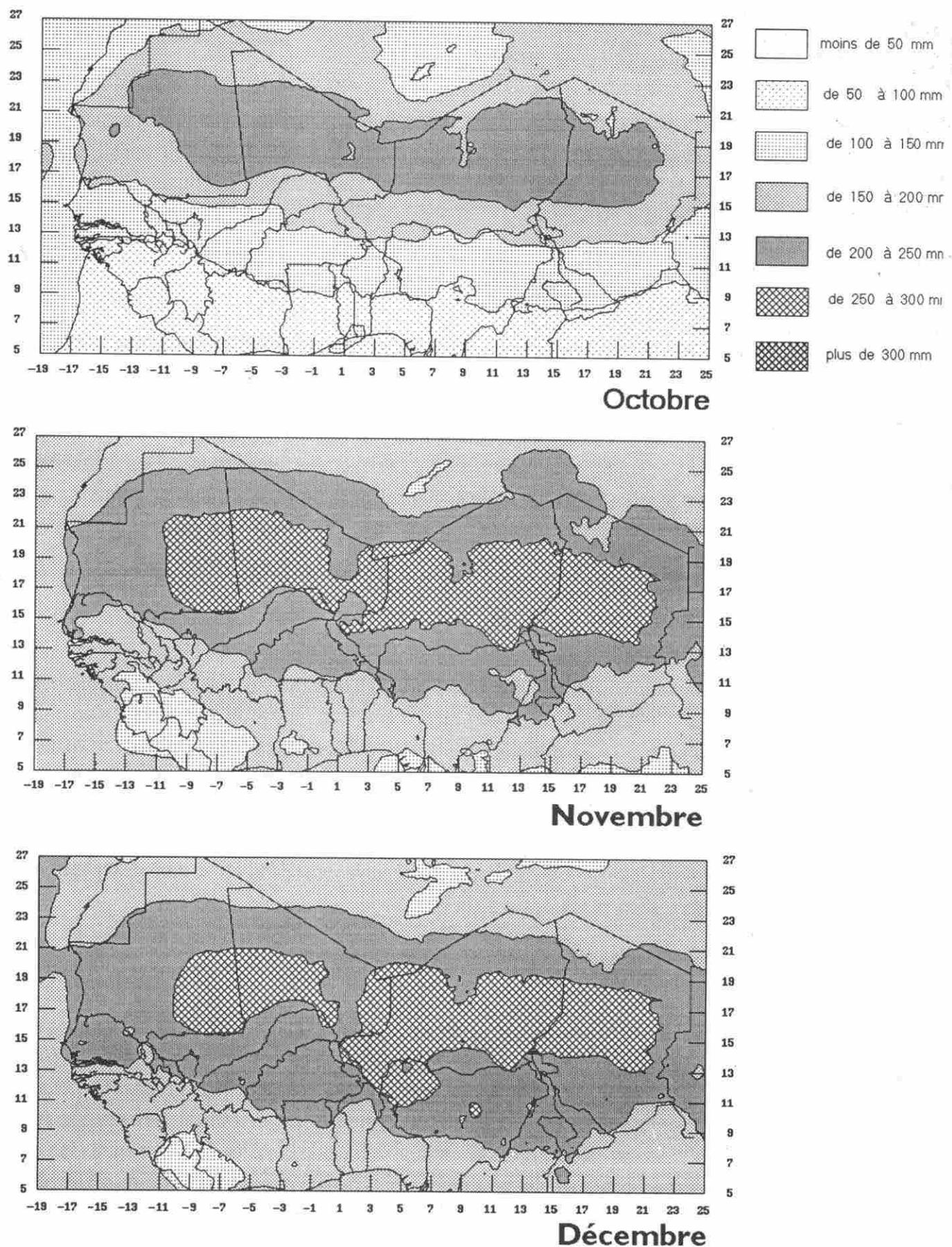
Cartes N° 20a : ETP mensuelles du premier trimestre



Cartes N° 20b : ETP mensuelles du deuxième trimestre



Cartes N° 20c : ETP mensuelles du troisième trimestre



Cartes N° 20d : ETP mensuelles du quatrième trimestre

3.5.2.1. AU PREMIER TRIMESTRE

L'ETP atteint des valeurs très élevées entre 250 et 300 mm par mois notamment au nord-est de la vallée du Niger entre Gao et Yelwa. La région de Néma demande plus de 300 mm en janvier et février. La limite de 200 mm n'intéresse que l'extrême sud du Mali, la Guinée Bissau et la frontière entre le Tchad et la RCA.

3.5.2.2. AU SECOND TRIMESTRE

Avril reste très demandeur en évaporation avec plus de 250 mm au nord du 15ème parallèle. Moins de 200 mm sont nécessaires au Tchad au sud d'une ligne Bongor-Abéché. La même limite se retrouve au sud d'une ligne Fada N'gourma- Kayes-Kaédi, intéressante le Ferlo et la région au sud de la Gambie. En mai les fortes demandes sahariennes se limitent à la Mauritanie et en juin elles subsistent autour de Zouerate par la conjonction du vent et des températures. Des demandes inférieures à 100 mm apparaissent en juin de la Guinée Bissau à Fada N'Gourma, tandis que la limite de 150 mm passe de 13 à 15°N entre mai et juin. L'ETP de 200 mm remonte de 450 km vers le nord pendant ce trimestre.

3.5.2.3. AU TROISIEME TRIMESTRE

La demande évaporative y est la moins forte. Les noyaux sahariens de forte ETP se morcellent et se réduisent. Le maximum est observé en juillet et août dans la région de Zouerate avec plus de 300 mm. L'influence de la température apparaît très forte puisqu'il y a des ETP plus faibles d'une part en bordure de l'océan au Sénégal et en Mauritanie et d'autre part le long du Soudan. La demande de 150 mm se déplace suivant les mois entre 14 et 16° de latitude nord. Les demandes inférieures à 100 mm se rencontrent en juillet et août au sud d'une ligne joignant le Burkina méridional à la Gambie. Cette ligne recule brutalement sur le 9ème parallèle au mois de septembre et disparaît même au Ghana sur la vallée de la Volta.

3.5.2.4. AU QUATRIEME TRIMESTRE

La physionomie d'octobre ressemble à celle de septembre. La demande saharienne est à son niveau le plus bas. La limite de 150 mm ne change pas mais il y a une remontée de celle de 100 mm qui se retrouve de l'extrême sud du Mali à la Guinée Bissau. L'extrême sud du Tchad bénéficie de cette plus faible évapotranspiration. Les deux derniers mois voient le retour des fortes demandes évaporatives sahariennes qui en décembre s'installent le long de la vallée du Niger entre Gao et Yelwa comme au premier trimestre. En novembre moins de 200 mm sont nécessaires au sud de la ligne Kaédi-Kayes-Bobo Dioulasso et au Tchad sous la ligne Pala-Am Timan. Cette même limite persiste en décembre avec un léger recul vers le sud.

Chapitre 4

AGROCLIMATOLOGIE.

C'est l'étude des interactions sol-plante-climat. Différents modèles mathématiques ont été proposés à cet effet et l'OMM a publié en 1983 plusieurs recueils de documents récapitulant les méthodes et la description des modèles opérationnels. Nous laissons aux chercheurs le soin de les utiliser et de les étalonner. Le présent travail permet de leur proposer des séries climatiques homogènes qui ont été contrôlées et complétées pour les pays du CILSS au moins pour la période 1950-1980, souvent les fichiers vont à 1983, et pour les pluies jusqu'à 1990. Nous présentons ici un zonage réalisé par l'étude des bilans hydriques, pour les principales cultures du Sahel. Ce travail n'est pas exhaustif pour l'ensemble des cultivars mais il donnera de précieuses indications aux agronomes, aux chercheurs et aux planificateurs. Un affinement pourra toujours être réalisé par les utilisateurs s'ils souhaitent employer des modèles plus sophistiqués comme les modèles de bilan hydrique multicouches, les modèles énergétiques ou les modèles simulant l'évolution des facteurs de croissance. L'appellation de «sécheresse au sahel» est la limitation géographique d'un phénomène qui affecte une grande partie de l'Afrique de l'ouest. Après le rappel rapide des données utilisées et l'analyse succincte des manifestations tant annuelles que mensuelles de la sécheresse, on développera l'aspect agroclimatologique du phénomène en gardant en mémoire que la diminution des pluies annuelles n'est pas homogène dans l'espace ce qui peut apporter des comportements différents des cultures. Nous verrons que la plus mauvaise répartition intermensuelle des apports d'eau pluviale est un facteur aggravant.

Depuis 1968 on observe des pluviométries souvent déficitaires avec une mauvaise répartition mensuelle pendant la saison humide. En faisant abstraction des autres facteurs limitatifs tels que la fertilité des sols ou la diminution des jachères on peut vérifier que les variations climatiques ont un impact sur les cultures. L'eau est le facteur limitatif et le plus fluctuant, les températures sont plus stables. Les conséquences des variations d'alimentation en eau sur la productivité des cultures sont seules étudiées ici et mises en évidence par les bilans hydriques. Ces derniers ont été effectués pour toutes les années et par dates de semis systématiques. Les calculs permettent d'obtenir une image complète de la variabilité des résultats pour chaque culture. Comme on explore, année par année, toutes les décades de mise en place des semences on peut obtenir les indices de rendements espérés les meilleurs auxquels correspondent les dates de semis optimales. Ces résultats fournissent des séries pour lesquelles il est intéressant d'examiner les différents quantiles, surtout ceux qui donnent des fréquences de retour acceptables pour les paysans, comme par exemple 4 ans sur 5. La comparaison des calculs entre période humide et période de sécheresse permet d'appréhender simplement les effets de la sécheresse sur les productions agricoles.

4.1. DOMAINE de l'ETUDE AGROCLIMATOLOGIQUE.

Il faut rappeler la variabilité géographique du Sahel qui entraîne sa stratification climatique. Ensuite il est important d'évoquer la nature des données utilisées et leur répartition spatiale.

4.1.1. AU POINT DE VUE GEOGRAPHIQUE

La zone sahélienne a été analysée plus haut à propos des pluies. Dans l'ensemble la zone des cultures se trouve dans les plaines et sur les plateaux qui recouvrent une pénéplaine de 200 à 350 mètres d'altitude. Cette zone reçoit des pluies variant du nord au sud entre 250 et plus de 1000 millimètres par an. Plus au nord pour des précipitations plus faibles on est dans la région pastorale.

4.1.2. LES DONNEES EMPLOYES

Elles sont limitées aux stations effectuant non seulement les relevés pluviométriques mais également les mesures des paramètres climatiques indispensables à l'évaluation correcte de l'évapotranspiration potentielle, c'est à dire les températures, l'humidité de l'air, l'insolation, et la vitesse moyenne du vent à deux mètres. On obtient ainsi environ 150 points qui représentent le dixième des postes pluviométriques actuellement en service. Les postes périphériques sont souvent sur des reliefs suffisamment importants pour nécessiter l'emploi d'un modèle numérique de terrain afin de réaliser une cartographie correcte dans les zones à forts gradients liés à l'altitude. La densité des points n'est pas homogène mais suffisante pour interpoler les résultats dans le sahel utile et tracer des cartes. Si les zones subsahariennes ont un réseau lâche cela importe peu les rendements y étant très faibles.

4.1.3. RAPPEL DE L'ANALYSE DE LA SECHERESSE.

Le déplacement vers le sud des isohyètes induit une transformation du zonage écologique qui se traduit par une contraction du domaine agricole. La carte d'évolution des isohyètes médians (carte N° 7, page 69), montre que la limite nord des cultures avec 250 mm a subi une translation vers le sud. Ce recul atteint jusqu'à 300 kilomètres au Niger. Les 500 mm nécessaires à une bonne réussite des cultures laissent peu de superficie en Mauritanie et au Niger. Le changement de position de cet isohyète affecte gravement le Sénégal, notamment sur sa façade maritime, le Mali et le Burkina Faso sont touchés, le Tchad moins atteint voit la dégradation de sa frange sahélienne. Le Cap Vert a perdu un tiers de ses pluies. La Guinée Bissau conserve des précipitations abondantes mais leur diminution supérieure à 500 mm entraîne une modification radicale des systèmes de production.

Pour se garantir contre les mauvais rendements fréquents, le paysan tend à augmenter ses surfaces cultivées, quand il le peut. La conséquence est une diminution des jachères et un abaissement rapide de la fertilité qui vient se conjuguer aux aléas de la pluviosité. L'abaissement

de pluviométrie n'est pas homogène sur l'Afrique de l'ouest, (carte N°8, page 70). Cette baisse s'articule autour d'une dorsale très nette comprise entre les parallèles Nord 12 et 14 et l'amplitude du phénomène s'accroît de façon exponentielle en allant vers l'ouest. Le mécanisme de la sécheresse montre que les fortes pluies journalières sont généralement réduites en nombre et en quantité à cause vraisemblablement d'un potentiel plus faible en eau précipitable. On observe que la durée de la saison pluvieuse n'a pas été affectée sauf sur la frange ouest, on peut y constater parfois un retard au démarrage et souvent une fin brutale et précoce. Ailleurs sur le Sahel le nombre d'événements pluvieux a peu varié, seule une bande comprise entre les 13ème et 15ème degrés de latitude Nord a perdu selon un tracé irrégulier entre 5 et 10 jours de pluies dans l'année. Les mois de juillet et septembre sont peu altérés et de façon statistiquement non significative sauf dans les régions ouest. Le fait le plus marquant est la baisse plus importante de la pluviométrie au mois d'août. Or c'est à ce moment que les plantes ont leurs plus forts besoins en eau car elles sont aux stades de la montaison ou de la floraison. Cette diminution de pluviosité au mois d'août représente une fraction très importante de la baisse annuelle totale et peut atteindre 80%. Les cultivars photopériodiques, surtout ceux de mil et de niébé, fleurissent courant septembre et leur production devient très souvent compromise par des réserves d'eau obérées par les épisodes secs du mois précédent. Aussi de vastes régions du Sahel ont abandonné ces variétés au profit de sélections au cycle végétatif de durée constante car pratiquement insensibles à la variation des rapports de durée entre le jour et la nuit.

4.2. LES COMPOSANTES DE L'AGROCLIMATOLOGIE.

Ce sont les facteurs sol et climat qui interfèrent avec la plante pour lui assurer un développement plus ou moins réussi..

4.2.1. AGRICULTURE ET CLIMAT.

L'agroclimatologie peut être considérée comme l'analyse des conditions climatiques du milieu agricole et de leurs conséquences sur la productivité des plantes. En zone sahélienne il est certain que le facteur primordial du climat agricole est l'eau disponible pour les plantes cultivées ou pour les pâturages. Les cultures vont réagir plus ou moins bien, à chacun de leur stade de développement, selon les disponibilités en eau. C'est ce qui explique la variation des productions agricoles, à technologies équivalentes, suivant les régions et les années. Le second facteur limitant peut être la température qui par ses excès dans l'un ou l'autre sens peut jouer un rôle non négligeable dans le développement des plantes et de leur productivité. Mais cela impliquerait l'emploi de modèles énergétiques, et nous supposerons en première approximation que le rôle de la température dans le niveau de l'évaporation recouvre déjà une partie importante de l'influence de ce facteur climatique. En effet la consommation en eau est fonction de la demande évaporative du climat. Il est donc important de cartographier les principales caractéristiques climatiques du milieu ou plutôt leurs conséquences sur les cultures pour délimiter les aires d'adaptation des plantes cultivées et de leurs cultivars repérés ici par leur durée de cycle végétatif qui apporte un élément important d'adaptation.

Le climat agricole est bien différent du seul climat météorologique et il peut se décomposer en trois éléments : le climat atmosphérique, le climat du sol et la notion de climax ou équilibre entre le milieu végétal et les deux précédents éléments climatiques.

- Le climat atmosphérique a pour composantes principales la température et surtout la pluviométrie. En effet le régime des pluies est la source majeure de la fourniture d'eau aux plantes, soit directement, soit par les régimes hydrologiques conditionnant une possible utilisation de l'irrigation: fleuves, rivières, mares. Mais la température, le vent, le rayonnement net reçu par le milieu vont conditionner le pouvoir évaporant de l'air et par là même la consommation en eau des cultures.

- Le climat édaphique. C'est celui du sol qui dépend en partie du précédent pour sa température et son évaporation. Mais ses propres caractéristiques hydrodynamiques résultent de sa porosité, de sa perméabilité, de sa composition granulométrique, de la présence de matière organique, de sa profondeur. Le rôle des conditions physiques du sol, texture et structure, est primordial pour fixer le niveau de la capacité de rétention de l'eau dans le sol.

- Le climax correspond à la plus forte biomasse végétale que peut apporter l'équilibre atmosphère-sol-plante. Les cultures vont se substituer à cet équilibre sans toujours l'atteindre, mais s'il est artificiellement maintenu par de bonnes techniques, le niveau possible de biomasse traduit la capacité de production des plantes cultivées. En effet elles vont utiliser les résultantes des deux premières composantes du climat agricole en modulant leur évaporation suivant le stade de leur développement végétatif. La vitesse et la profondeur d'enracinement sont des facteurs importants ainsi que la vitesse d'absorption de l'eau par la plante comparée à la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol.

4.2.2. LE SOL ET L'EAU

4.2.2.1. RAPPELS DE PHYSIQUE DU SOL.

Le sol est un milieu poreux permettant aux fluides (air et eau) de le traverser plus ou moins facilement. Il est constitué par des assemblages de grains ou particules solides laissant des espaces vides ou pores dans lesquels pourront passer les fluides.

La texture ou composition granulométrique est la répartition des grains élémentaires classés en fonction de leur taille. Les classes de tailles vont en décroissant depuis les graviers jusqu'aux argiles. Ces dernières, associées aux sables et limons, constituent la terre fine. Les combinaisons entre les trois fractions de la terre fine donnent les différentes textures de sol qui sont souvent représentées dans un triangle de texture.

La structure du sol représente les agrégats qui sont les assemblages des particules élémentaires de la texture. La structure peut être particulière comme dans les sols sableux où les grains sont isolés sans aucune cohésion entre eux. A l'opposé les sols argileux ont une structure pâteuse dense dite structure massive. Entre ces deux extrêmes les sols peuvent présenter une structure pouvant se décomposer en agrégats de tailles et de formes variées on dit alors que la structure est fragmentaire. Elles est due au mode de formation du sol, à son activité biologique et à sa couverture végétale (naturelle ou cultivée).

4.2.2.2. LE NIVEAU DE DISPONIBILITE DE L'EAU DANS LE SOL.

La porosité totale du sol est le rapport volumétrique entre les espaces vacants et le volume total en place. La teneur en eau du sol est également un rapport volumétrique puisque le taux d'humidité est le volume d'eau stockée comparé au volume total. Il y a saturation en eau quand tous les pores sont pleins d'eau, à l'exception de traces d'air résiduel restant piégé dans le sol. Il y a alors de l'eau libre qui peut s'écouler gravitairement dans les macroporosités du sol. Une fois cette eau libre disparue par ressuyage gravitaire et un peu par évaporation il reste de l'eau liée

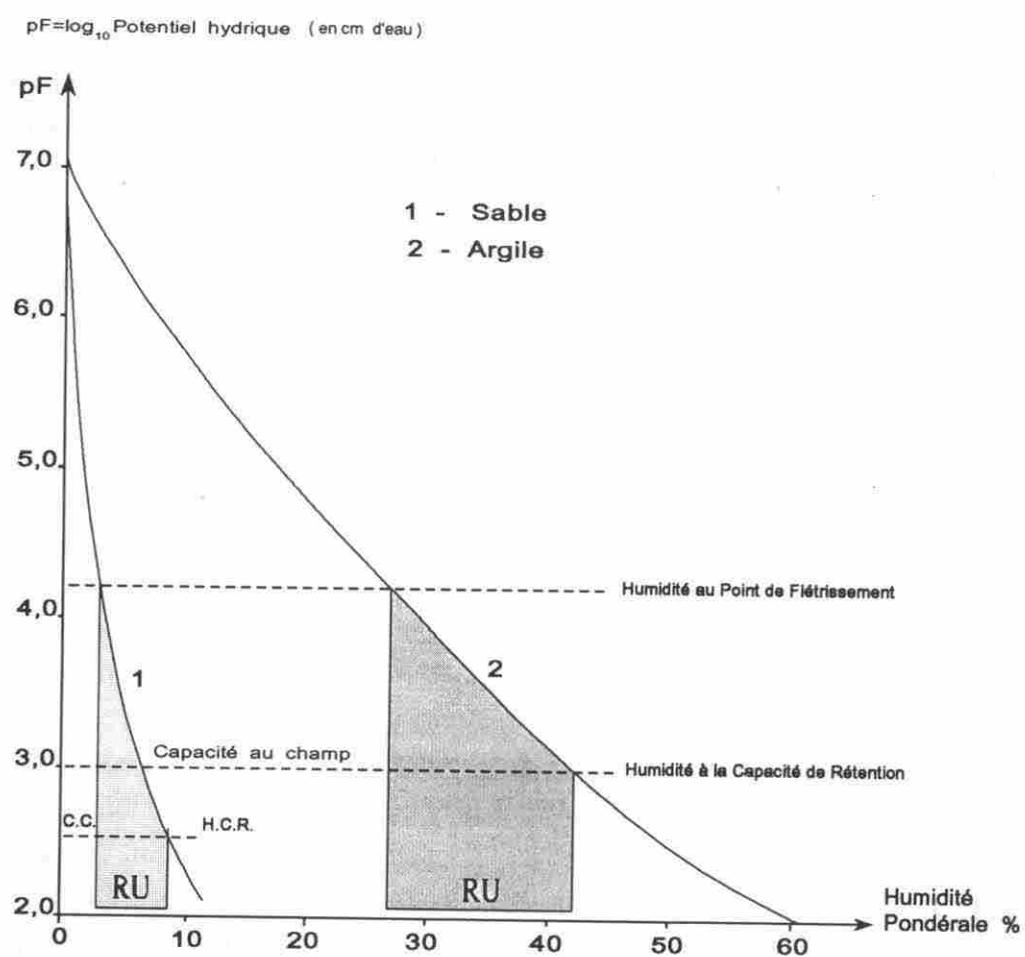


Figure N° 12 : Relations Potentiel - Humidité pour le sable et l'argile

stockée dans les microporosités du sol. Dans ces conditions le taux d'humidité atteint la capacité de rétention on est au stade dit de la capacité au champ. Si cette eau s'évapore on atteindra progressivement le taux d'humidité pour lequel les plantes ne pourront plus extraire l'eau qui leur est nécessaire. On arrive alors au point de flétrissement. La différence des taux entre la capacité de rétention et le point de flétrissement caractérise la réserve utile en eau du sol.

Dans un sol non saturé la pression de l'eau contenue dans le sol est inférieure à celle de l'air. La différence entre les deux est la pression capillaire cause de l'ascension de l'eau dans les micropores. Elle traduit les phénomènes de liaison à la surface des particules et est mesurable par une force de succion ou potentiel capillaire. Ce potentiel est l'effort que doit exercer la plante pour extraire l'eau du sol. L'énergie à déployer sera d'autant plus grande qu'il y aura moins d'eau dans le sol. La texture joue également un rôle, les sables retenant moins l'eau que les sols à particules fines qui ont des contacts importants avec l'eau et présentent une forte succion. Cette notion d'énergie d'extraction montre que le passage entre eau libre et eau liée est progressif puisque chaque goutte d'eau dans le sol est à la fois soumise aux forces de la pesanteur et aux forces de liaison avec le sol.

La conductivité hydraulique est une notion dynamique de la perméabilité exprimant la plus ou moins grande facilité du mouvement de l'eau dans le sol. Un sol bien structuré est meilleur conducteur qu'un sol mal structuré. Bien que peu stable au point de vue structural, un sable est également bon conducteur s'il est constitué d'éléments assez grossiers. D'une façon générale le sable est plus perméable qu'une argile. La teneur en matière organique favorise la stabilité structurale du sol et sa structuration grumeleuse ce qui augmente sa perméabilité.

4.2.3. LE BILAN HYDRIQUE.

C'est une des façons d'exprimer les relations sol-plante-climat.

En culture pluviale, l'eau disponible pour les plantes résulte des seuls apports des précipitations. L'eau qui touche le sol s'infiltre plus ou moins rapidement dans celui-ci. Si l'intensité de la pluie est forte une partie de l'eau ruisselle et, perdue pour la végétation, elle provoque des dégâts par érosion ce qui affecte le potentiel productif du terrain. L'eau infiltrée reconstitue les réserves hydriques du sol, jusqu'à saturation de la micro-porosité, alors l'eau libre qui reste percolé dans les couches plus profondes et à la limite peut atteindre la nappe perchée ou la nappe phréatique, c'est la perte par drainage. La plante dispose plus ou moins facilement de l'eau stockée dans le sol. Si le sol est sableux, il a une faible capacité de réserve, de l'ordre de 30 mm par mètre, qu'il restitue aisément. Ici la vitesse de pénétration de l'eau dans le sol est plus rapide que dans la plante. A l'opposé, un sol argileux peut atteindre une réserve de 150 à 200 mm qui est libérée de plus en plus difficilement au fur et à mesure qu'elle diminue. La vitesse d'infiltration descend souvent en dessous de 30 cm/jour et quand il pleut la plante absorbe l'eau libre plus facilement que le sol.

Indépendamment de ces différences, dues à la granulométrie du sol, la consommation de l'eau par les cultures est conditionnée par la demande évaporative du climat et le niveau d'humectation du sol. Elle varie pendant le cycle végétatif en fonction des stades de développement de la plante. Chaque stade est caractérisé par son coefficient cultural qui est le pourcentage maximum d'EvapoTranspiration Potentielle (ETP) qui représente la quantité d'eau maximale consommée par la plante (ETM) tel que: $ETM = Kc \times ETP$.

L'évapotranspiration réelle (ETR) est égale aux besoins maximaux du végétal (ETM) qu'il pourra effectivement utiliser s'il y a suffisamment d'eau dans son environnement. Dans le cas contraire l'ETR suivant le niveau de la demande évaporative et celui de la réserve du sol, va diminuer. On l'estime par une relation statistique proposée par Eagleman. Le rapport entre l'ETR et l'ETM est l'évapotranspiration relative comprise entre 0 et 1. Son complément à 1 est le stress hydrique qui est l'expression relative du déficit d'évaporation. Suivant le stade végétatif de la plante ce déficit va entraîner une diminution de rendement plus ou moins forte et à effet cumulatif. Il faut toutefois remarquer que les plantes à cycle long peuvent avoir une capacité de récupération. D'ailleurs les cultivars hâtifs voient leur durée de cycle s'allonger un peu quand des épisodes secs se manifestent.

Pour une culture donnée, le calcul pas à pas du bilan hydrique sert à estimer un indice de rendement espéré qui varie suivant les dates de semis et le déroulement de la saison pluvieuse. On obtient alors des statistiques pluriannuelles permettant d'évaluer l'impact du climat sur les rendements.

4.3. L'ETUDE AGROCLIMATOLOGIQUE.

La production végétale est l'expression plus ou moins réussie des potentialités du milieu de culture. Ces potentialités résultent de l'ensemble des facteurs naturels et socio-économiques. Ces derniers traduisent essentiellement la technicité des agriculteurs et le poids économique qui favorise certains producteurs. Les paysans agissent sur le milieu naturel en l'améliorant, en le conservant ou en le dégradant. La dégradation résulte de causes multiples dont le raccourcissement, voire la suppression des jachères. Et elle est amplifiée si on ne prend pas garde à toutes les formes d'érosion qui se manifestent. Les producteurs agissent aussi directement sur la culture en la plaçant dans des conditions de végétation déterminées par les façons culturales. Les facteurs naturels sont essentiellement le climat et le sol avec leur interaction sur la disponibilité en eau du sol, facteur qui conditionne le plus, en zone soudano-sahélienne, la croissance des végétaux. Le calcul des bilans hydriques intègre la fourniture d'eau (pluie, parfois irrigation) avec sa consommation (évapotranspiration du milieu cultivé) en tenant compte du pouvoir tampon du sol (capacité hydrodynamique de réserve d'eau).

La période culturale naturelle, hors irrigation, ne peut être comprise que pendant la période de végétation possible, résultant de l'équilibre naturel climat-sol, donc durant la saison pluvieuse.

Si on irrigue, cette période de végétation peut artificiellement être décalée et désaisonnée sur le calendrier. Mais nous ne testerons que les périodes naturelles intéressant l'agriculture pluviale la plus fréquemment pratiquée. Le pouvoir de récupération des plantes leur permet, dans une certaine mesure, de supporter des pluies intermittentes, aidées en cela par la réserve en eau du sol et leur régulation stomatique. L'idéal serait d'utiliser un modèle à pas de temps journalier pour bien saisir les variations quotidiennes du bilan hydrique. Mais pour accélérer les calculs et compte tenu du pouvoir tampon évoqué ci-dessus, on s'est contenté de simuler les bilans hydriques au pas de temps décadaire, bien que la végétation soit continue et que nos données permettent le calcul journalier.

Le modèle de bilan hydrique est applicable à l'ensemble de la zone, permettant d'obtenir une vision globale des situations suivant les périodes étudiées. Il est également adapté à chaque plante cultivée, permettant d'approcher son niveau de réussite. Il pourrait aussi avoir des prolongations avec des irrigations de complément, des travaux culturaux pour modifier le comportement hydrodynamique du sol. Sachant que les cultivars tardifs sont généralement plus productifs le bilan hydrique permet le zonage de l'utilisation optimale de ces cultivars. Toujours dans un souci de simplification, le modèle retenu est monocouche et calcule le bilan en eau d'une tranche de sol estimée homogène sous une culture bien déterminée. Un modèle multicouches existe mais il exige des mesures pédologiques pour le calibrer d'une façon correcte.

La méthode consiste à calculer décadairement le modèle de bilan hydrique du début de la saison des pluies jusqu'à la fin du cycle cultural et ceci chaque année pour 9 décades de semis possibles.

4.3.1. LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE

La plante utilise principalement l'eau du sol, l'absorption directe est généralement négligeable. L'eau sert à assurer la turgescence du végétal, l'absorption racinaire des nutriments et la circulation de la sève vers les zones d'activité: méristèmes, fleurs et fruits, etc... La période de végétation suppose donc la présence dans le sol d'eau pouvant être absorbée par la plante: succion, capillarité.

4.3.1.1. LES APPORTS D'EAU

Il peut s'agir de l'eau de pluie ou de l'eau d'irrigation, mais les apports par le sol n'ont pas été envisagés (cas rares de nappes perchées) car ils compliqueraient des conditions de drainage et des modélisations de remontées capillaires. Si les apports sont essentiellement les précipitations atmosphériques, comme c'est le cas pour les cultures pluviales, on utilise la pluie mesurée dans les postes pluviométriques; mais pour un travail régional, on pourrait envisager, en fonction de la distribution spatiale, de remplacer ces valeurs ponctuelles par des valeurs cumulées de la lame d'eau tombée sur la région considérée. Ceci est possible, mais l'habitude étant prise de caractériser chaque zone par son poste pluviométrique, nous nous sommes bornés aux valeurs ponctuelles.

Les pluies pénètrent dans le sol en fonction de ses caractéristiques d'infiltration, représentation de sa structure granulométrique. En sol sableux, la vitesse de pénétration de l'eau dans le sol est beaucoup plus grande que celle du passage dans la plante. Inversement en sol sablo-argileux, la plante s'alimente avant ou en même temps que le sol. Ce modèle simule les deux possibilités, mais c'est la première qui a été retenue à cause de la fréquence des cultures dunaires. Donc la pluie va d'abord alimenter la porosité du sol et servir à reconstituer son stock d'eau. L'eau libre ne pouvant pénétrer rapidement dans le sol sera perdue par ruissellement de surface mais celle qui a pénétré et qui ne sera pas retenue par les forces de succion du sol représente une autre perte par drainage en profondeur. L'ensemble des pertes est exprimé en millimètres et représente les eaux excédentaires par décade. Ce calcul est valable pour un champs plat et relativement peu pentu. A l'échelon d'une région agricole le ruissellement est certainement plus fort avec l'hétérogénéité des pentes et des natures de sol. En toute rigueur, sachant que le coefficient de ruissellement dépend du sol (texture, pente, structure, humidité), du couvert végétal et de l'intensité des pluies, on pourrait le calculer pour une situation donnée mais il faudrait tenir compte de l'intensité de chaque pluie, et travailler au pas de temps journalier.

La pluie de semis est la hauteur de pluie minimale exigée sur une période donnée pour pouvoir effectuer un semis avec une bonne chance de succès. Mais dans certaines régions on sème en sec et notre modèle simule cette possibilité. D'ailleurs à mesure que l'on avance dans la saison on est moins exigeant sur la quantité de pluie de semis puisque les pluies doivent devenir plus fréquentes. Généralement, on considère que 20 millimètres sont nécessaires au semis en début de saison.

4.3.1.2. LA CONSOMMATION D'EAU.

C'est l'ensemble des débits sortants, hors pertes, surtout dus à l'évaporation et à l'absorption de l'eau par les plantes

a. Les besoins en eau des plantes

Le coefficient cultural K_c d'une plante est le rapport, à une phase donnée de son développement, entre ses besoins en eau et l'ETP. Les mesures de ces différents coefficients ont été faites à Bambey en cases lysimétriques et ont été publiées par C. DANCETTE. Ces résultats expérimentaux devraient être confirmés en d'autres lieux et surtout à des latitudes diverses car la mesure traduit la consommation totale d'eau par la plante qui inclut, bien sur, ses besoins propres en eau, mais également une surconsommation (consommation de luxe) quand l'eau se trouve en excès dans le sol. Cette surconsommation doit diminuer vers des latitudes plus élevées et s'accroître vers le sud. Des formules ont été proposées en 1984 par l'IRAT pour ajuster ces coefficients K_c en fonction de la latitude.

b. La consommation des plantes et le sol

Il y a compétition entre les forces de liaison de l'eau aux particules et composants du sol et les forces de succion de la plante. On comprend alors que le végétal dispose plus ou moins facilement de l'eau présente dans le sol. Si le sol est sableux il a une faible capacité de réserve de l'ordre de 30 mm par mètre qu'il restitue aisément. A l'opposé un sol argileux peut atteindre un niveau de réserve très élevé, de 120 à 200 mm qui sera libérée de plus en plus difficilement au fur et à mesure qu'elle diminue. La plante consomme mieux une faible quantité d'eau disponible dans un sol sableux.

4.3.2. LES SORTIES DU BILAN HYDRIQUE.

4.3.2.1. CLIMAT ET PRODUCTION

Le comportement général des plantes vis à vis du climat est assez bien connu. En première approximation on vérifie que la consommation en eau des plantes cultivées, (arachides, mils, niébés,...) est proportionnelle à la longueur du cycle. Mais les principales différences entre les cultivars sont leur capacité plus ou moins grande à résister aux déficits hydriques. Les plantes réagissent souvent aux stress hydriques pour tenter d'assurer leur survie accompagnée d'une production minimale. Par exemple le mil laisse mourir ses tiges extérieures et assure une petite production sur la tige centrale. Les arachides ferment leurs stomates et replient les folioles de leurs feuilles. Les calculs de bilans hydriques utilisent alors des coefficients propres à chaque cultivar.

4.3.2.2. LES INFORMATIONS DU BILAN HYDRIQUE

Les calculs du bilan hydrique donnent en sortie une quantité d'informations: l'ETR, les pertes par ruissellement-drainage, l'évolution de la RU, les renseignements sur l'équilibre hydrique et l'indice de rendement espéré. Au point de vue hydrique l'indice de satisfaction en eau n'est autre que l'évapotranspiration relative. Le déficit hydrique relatif ou stress hydrique est le complément à 1 de l'évapotranspiration relative. Le déficit absolu est donné en millimètres et permet d'évaluer les quantités d'eau d'une éventuelle irrigation de complément. Les pertes par excès d'eau sont calculées par décade et cumulées pour la saison. Mais l'information la plus importante est l'indice de rendement espéré ou IRESP qui permet le contrôle des dates de semis. En effet la réussite des cultures dépend essentiellement de la satisfaction de leurs besoins en eau qui permet l'absorption des nutriments et le fonctionnement correct de leur métabolisme.

4.3.2.3. LE STRESS HYDRIQUE ET LE RENDEMENT

Les baisses de rendement qui résultent d'un stress hydrique ont pu être mesurées en culture irriguée ou en cases lysimétriques en faisant varier les apports d'eau. Il apparaît généralement que la diminution de production, en pourcentage, est une fonction linéaire du stress. La pente des droites

est différente suivant qu'on affecte le stress à l'ensemble du cycle végétatif ou à chacune des phases de ce cycle pendant laquelle il s'est manifesté. La sensibilité est la plus forte pour les phases de floraison et d'initiation de la fructification. Chaque type de plante réagit au déficit hydrique d'un sol suivant des règles qui lui sont propres. Il faut ajouter que la texture du sol influe sur la capacité de la plante à extraire l'eau du sol qui est moins liée dans les sables alors qu'elle nécessite dans le végétal, une forte pression osmotique, pour une extraction dans les argiles. Le déficit hydrique provoque un stress chez la plante en ralentissant son métabolisme ce qui affecte le développement de sa biomasse. La sévérité du stress n'implique pas toujours les mêmes conséquences suivant les plantes et la phase végétative concernée. Ainsi, à la levée il peut y avoir destruction presque totale de la culture avec obligation d'un resemis, alors qu'à la maturation il peut y avoir concentration des sucres ou des hydrates de carbone avec un léger stress.

Le stress, qu'il soit visible ou non, intervient avant le flétrissement de la plante. Le point de flétrissement correspond à une teneur en eau du sol au dessous de laquelle la plante ne peut plus assurer sa turgescence. Certaines plantes luttent en diminuant leur surface évaporante suivant des méthodes variées: fermeture des stomates, replis des folioles, chute de feuilles, perte des tiges extérieures chez les céréales.

4.3.3. ETUDE FREQUENTIELLE DES BILANS HYDRIQUES.

Chaque année 9 décades de semis sont testées et les valeurs de réussite des cultures sont stockées en mémoire pour ne retenir que la meilleure valeur annuelle avec sa décennie correspondante. Sur une série d'années on classe ces meilleurs résultats annuels par ordre décroissant pour en rechercher les quantiles qui nous intéressent: médiane, tiercile inférieur, quartile inférieur et quintile inférieur. La moyenne des décades de semis optimales est calculée pour chaque période de calcul. On peut donc tracer les courbes de réussite des cultures pour un site donné en fonction de la RU et de la période étudiée. La cartographie permettra d'obtenir une représentation spatiale des résultats.

4.3.3.1. LA PRODUCTION ET LES PERIODES DE SEMIS

a. L'IRESP

Les sorties du bilan hydrique traduisent d'abord les niveaux de productivité à l'hectare du point de vue de l'alimentation en eau grâce à l'IRESP. Cet indice peut servir à estimer le rendement si des mesures de terrain donnent suffisamment d'informations pour calculer la relation entre l'IRESP et les rendements observés. Entre la période sèche actuelle et la période humide qui l'a précédée il y a une différence entre les IRESP qui sont toujours en régression. Le pourcentage de cette diminution donne une idée de l'évolution des rendements sous l'impact des fluctuations climatiques. Ce sont les cultures les plus septentrionales qui présentent la plus forte variation. Le déficit des pluies n'y est pas forcément le plus marqué mais il apparaît dans des zones où le total

des précipitations, avec ses fortes variations interannuelles, était déjà en deçà des limites d'une productivité correcte. Le recul de l'IRESP affecte le plus les zones de faibles rendements, par exemple un indice de rendement initial de 10% va disparaître et la diminution est de 100%.

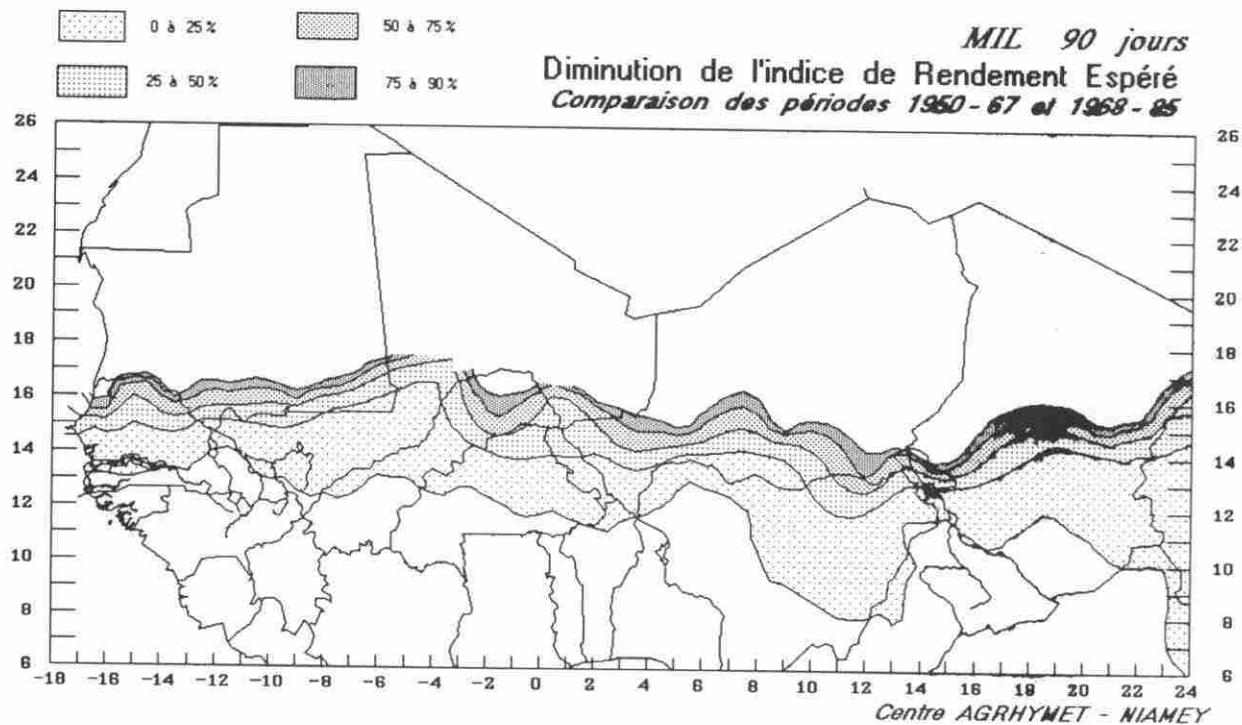
b. Les dates de semis

Un autre résultat des bilans hydrique est la statistique des dates de semis optimales. Il n'y a souvent pas de changement entre les deux périodes montrant, d'une part, la stabilité dans les démarrages des précipitations et d'autre part l'avantage d'une mise en place précoce des cultures. Dans certains pays du Sahel cette précocité est obtenue par des semis en sec. Le paramètre dates de semis n'est qu'indicatif car en pratique les paysans répartissent les semis entre toutes les pluies mouillant bien le sol et pour eux il n'y a pas une date unique de plantation. C'est une pratique qui accroît les chances de réussite à cause des fluctuations dans l'installation de la saison des pluies. Dans les zones les plus septentrionales les cultivars précoce permettent une plus grande marge de manœuvre pour le moment de leur mise en place.

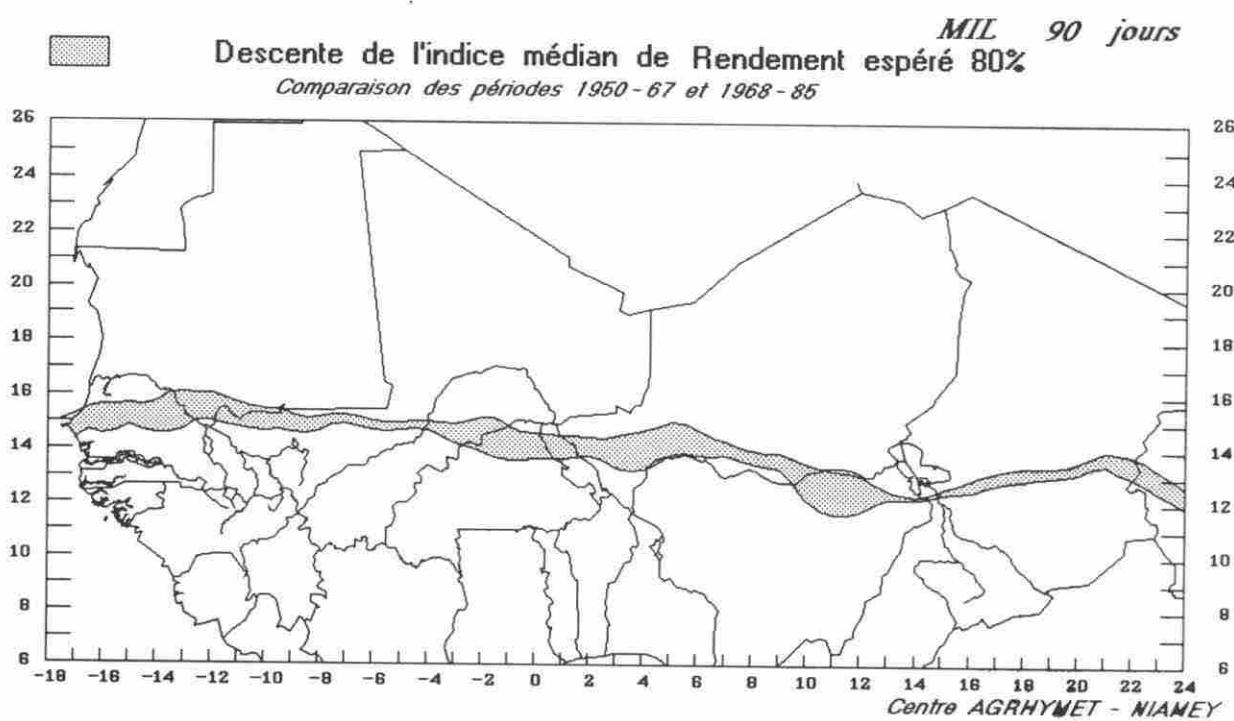
4.3.3.2. LES CULTURES ET LES VARIATIONS CLIMATIQUES

En général au niveau pluriannuel on compare les résultats pour un IRESP de 80% ce qui correspond à un bon niveau de réussite, par exemple pour le mil à un rendement d'une tonne de grains à l'hectare. Les cultures sont plus ou moins sensibles mais les résultats traduisent aussi la distribution spatiales de la baisse de pluviométrie. Par exemple le niébé de 75 jours accuse plus la sécheresse que le Sorgho de 120 jours qui a pourtant des exigences supérieures. La première culture est dans une zone plus sensible à la sécheresse, la seconde plus méridionale a bénéficié d'une pluviométrie correcte.

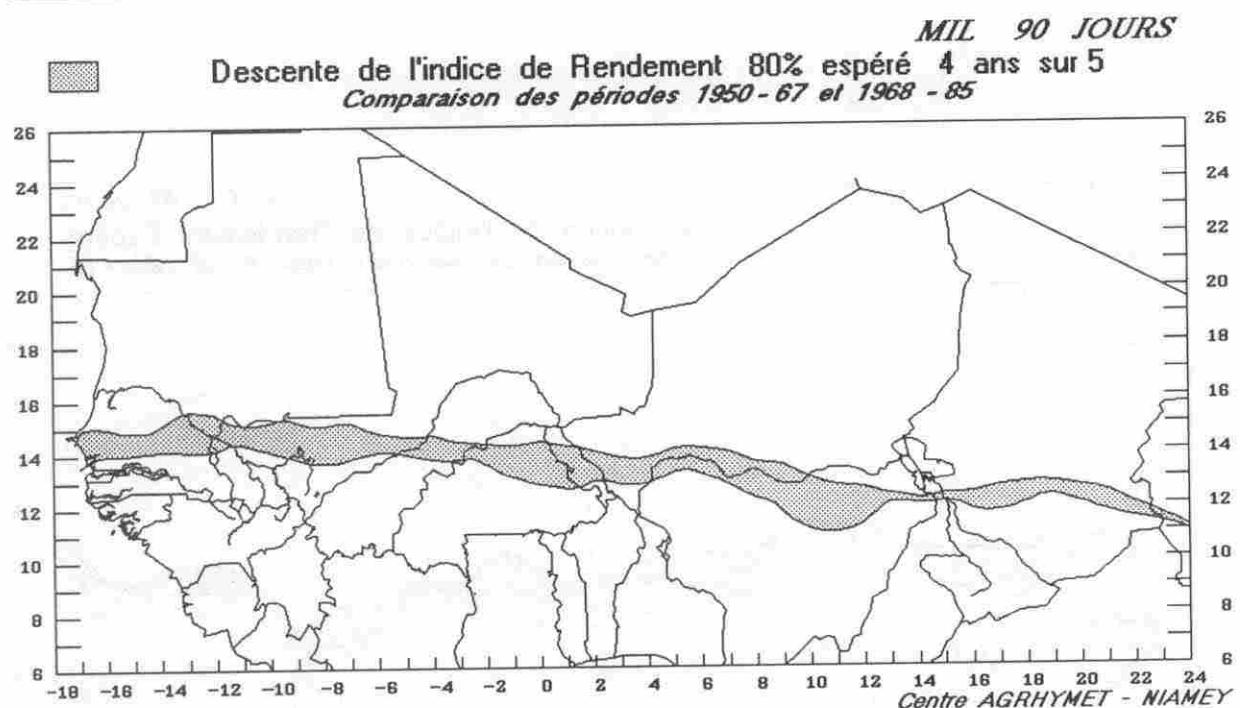
- Pour le mil de 90 jours et 4 ans sur 5 la limite des IRESP de 50% correspond maintenant à un indice de 25% soit une diminution de moitié. Ceci explique le doublement des surfaces cultivées dans les régions où les paysans ont suffisamment de terres. Mais beaucoup plus grave, il apparaît suivant les variations géographiques que c'est la limite de 75% qui a pu descendre à cette valeur. L'IRESP de 80% qui correspond à une bonne réussite à subit une translation vers le sud. Il est pratiquement absent de la Mauritanie, au Sénégal il s'aligne entre M'Bour et Bakel, au Mali il va de Nioro du Sahel à Mopti, au Niger le sud de Niamey et de Maradi sont concernés. Ce recul méridional montre la dégradation de la sécurité alimentaire car les chances de réussite de cette céréale de base sont plus faibles.



Carte N° 21a

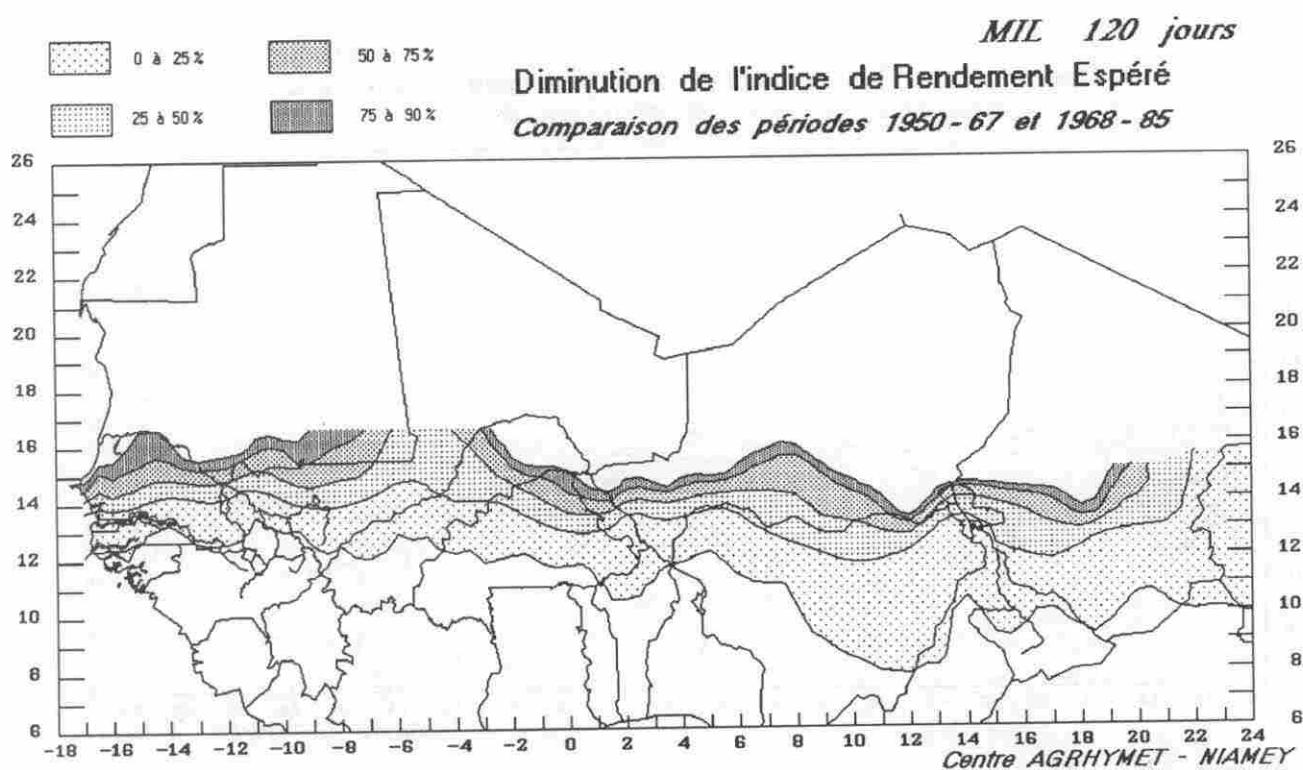


Carte N° 21b

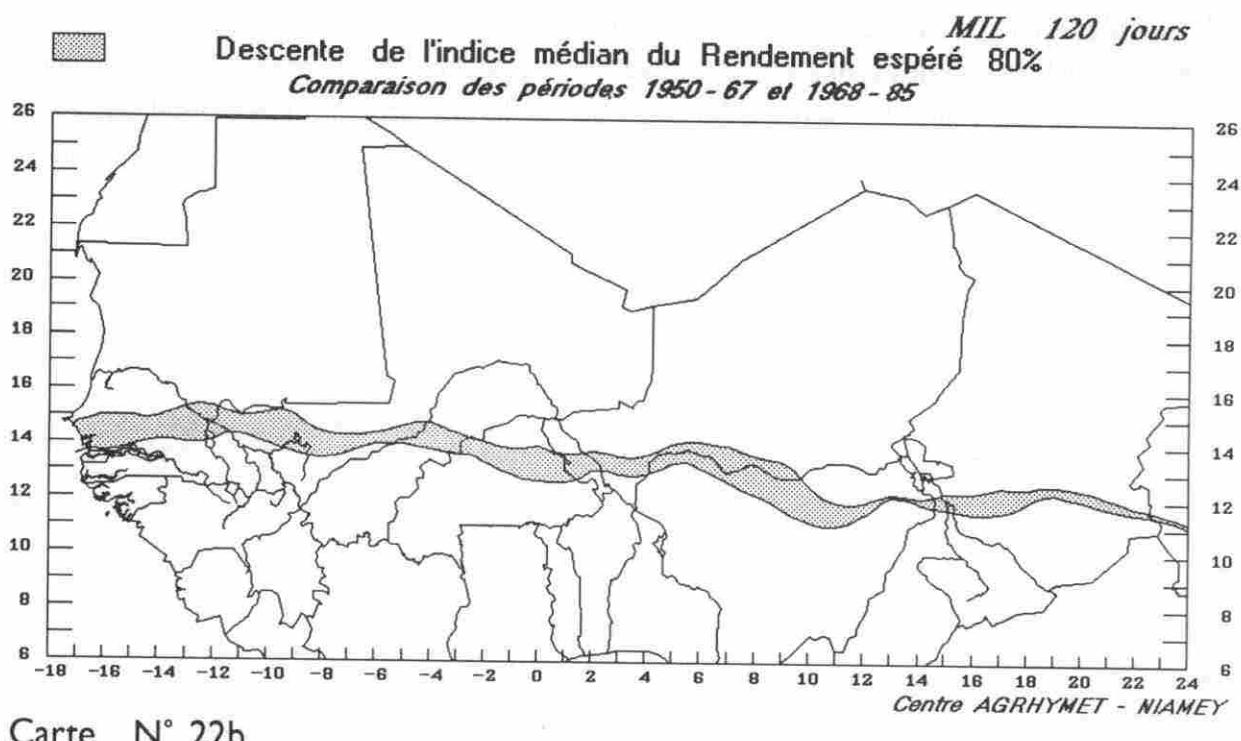


Carte N° 21c

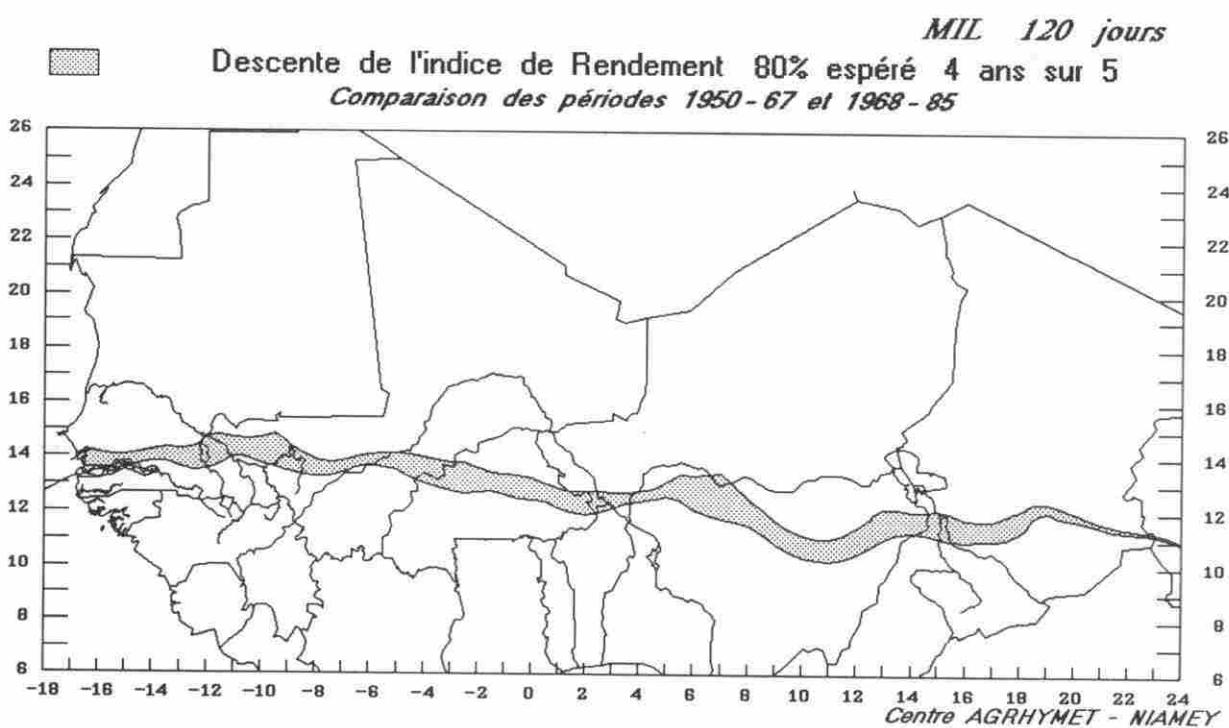
La productivité du **mil de 120 jours** a été encore plus atteinte dans les zones à faible rendement potentiel mais elle a tendance à se maintenir dans les régions plus méridionales au potentiel plus élevé. Ceci montre que la sécheresse est moins marquée au sud du 12ème parallèle et que de faibles stress hydriques affectent moins un cultivar à long cycle.



Carte N° 22a

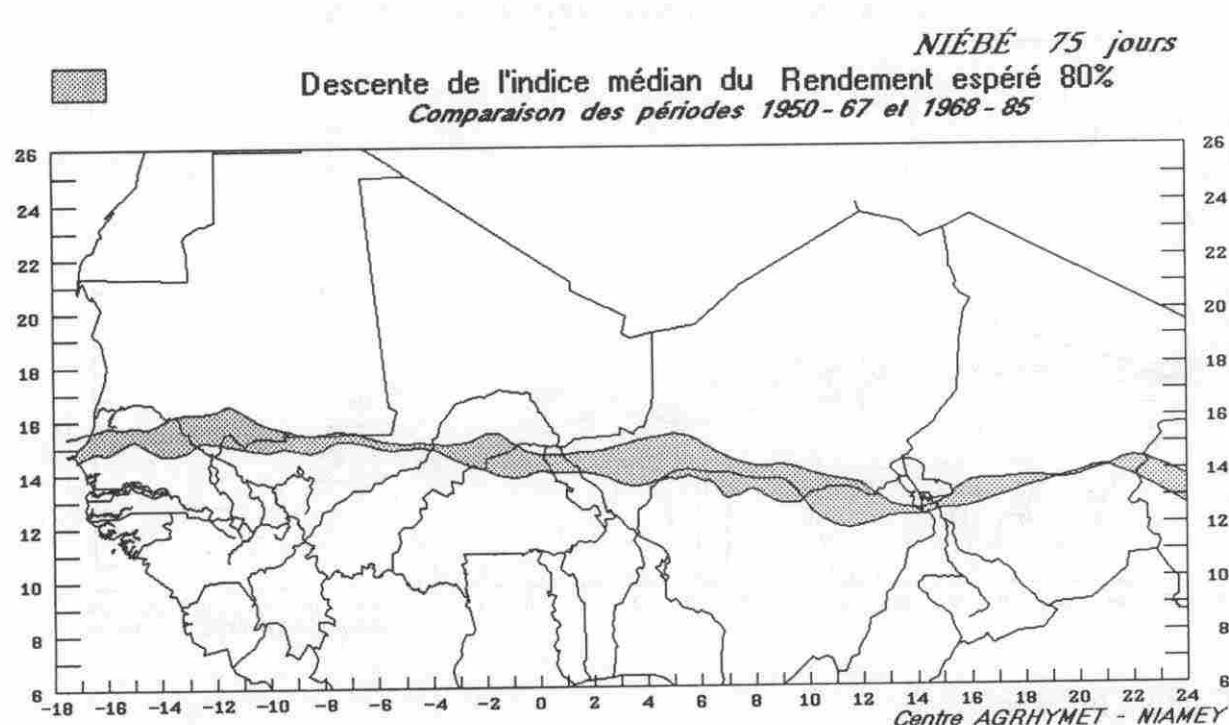
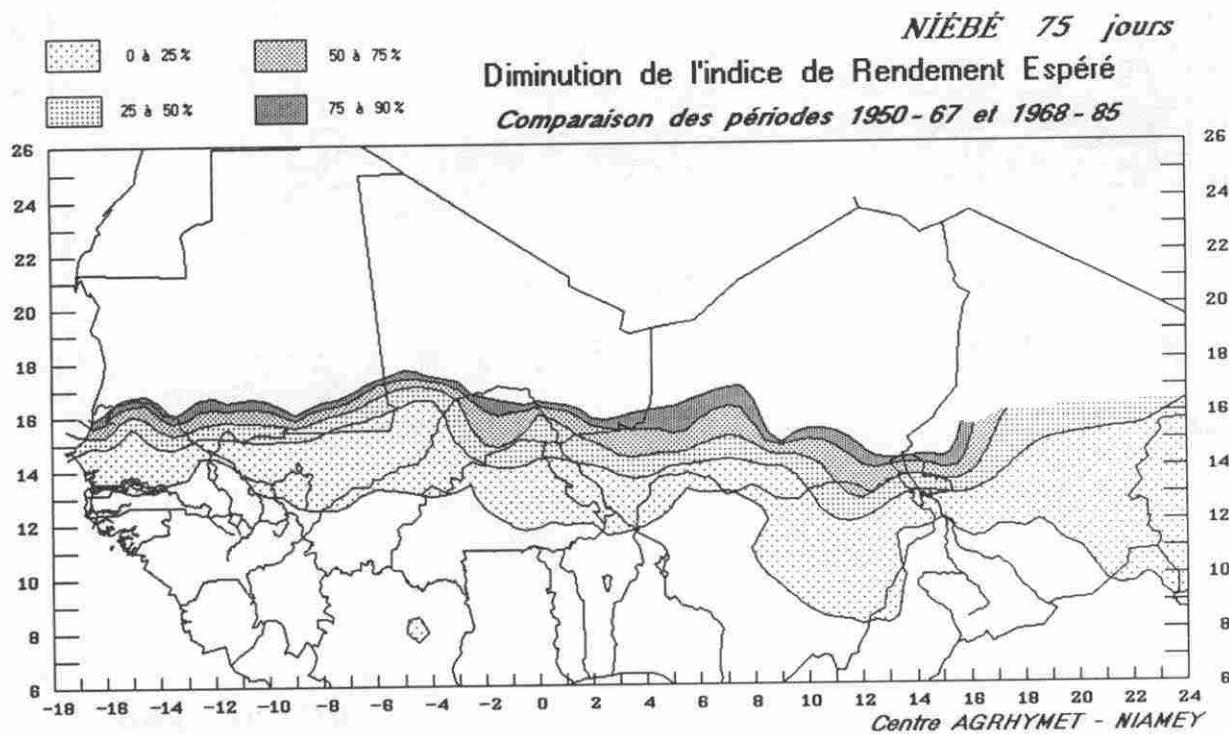


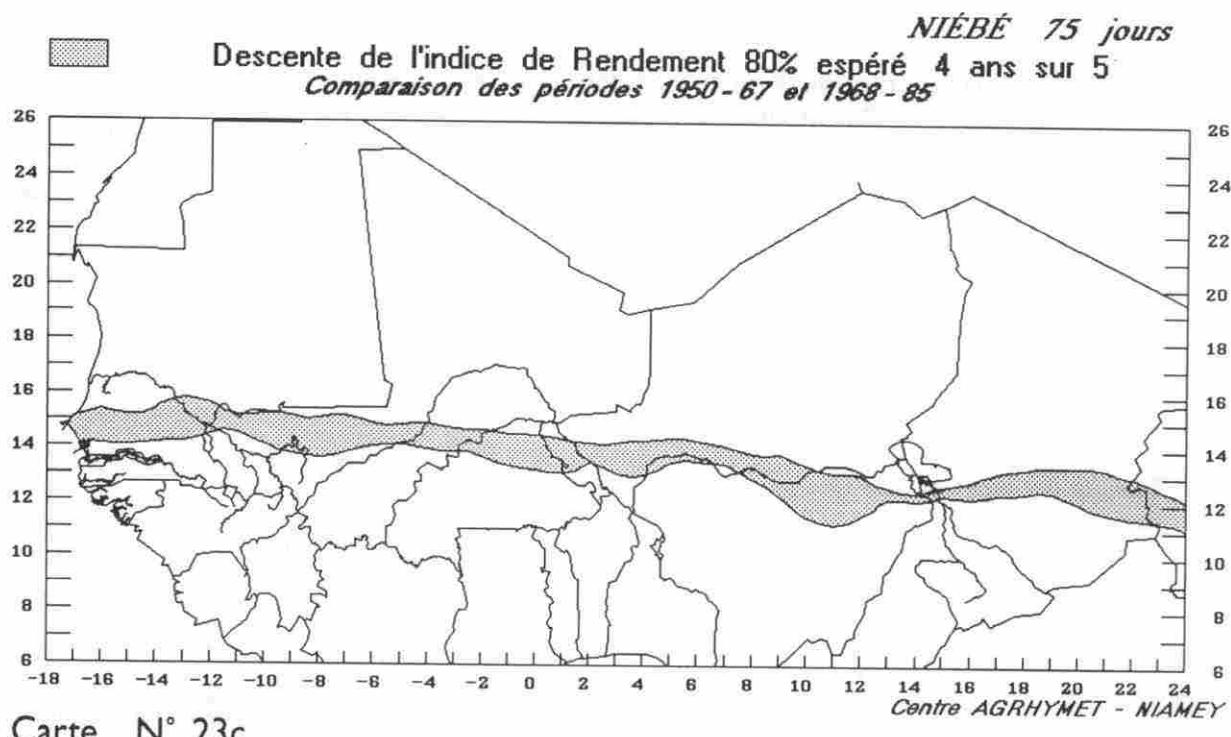
Carte N° 22b



Carte N° 22c

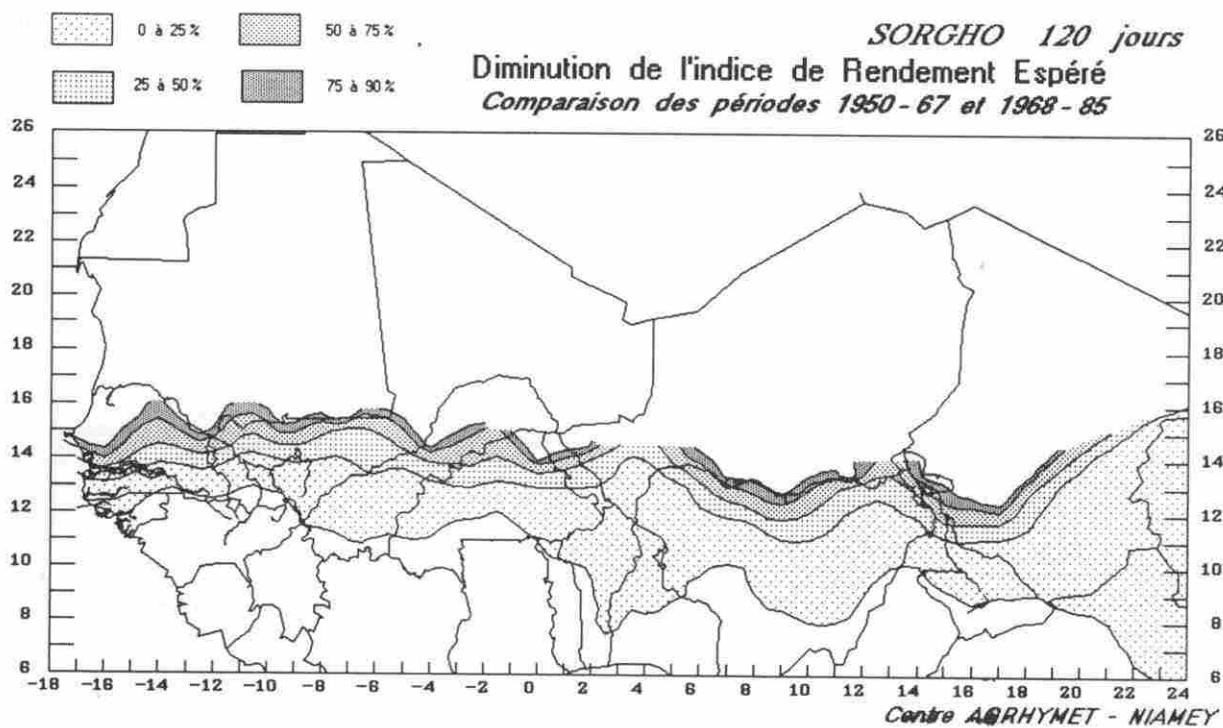
Le niébé donne pratiquement les mêmes résultats que les mils. Ces cultures ont leurs besoins en eau équivalents et elles sont souvent cultivées en association ce qui apporte une efficience accrue de l'eau de pluie. Le niébé de 75 jours qui est le plus septentrional à subit une forte diminution de son IRESP ce qui montre que la précocité n'est pas la panacée pour lutter contre la sécheresse.



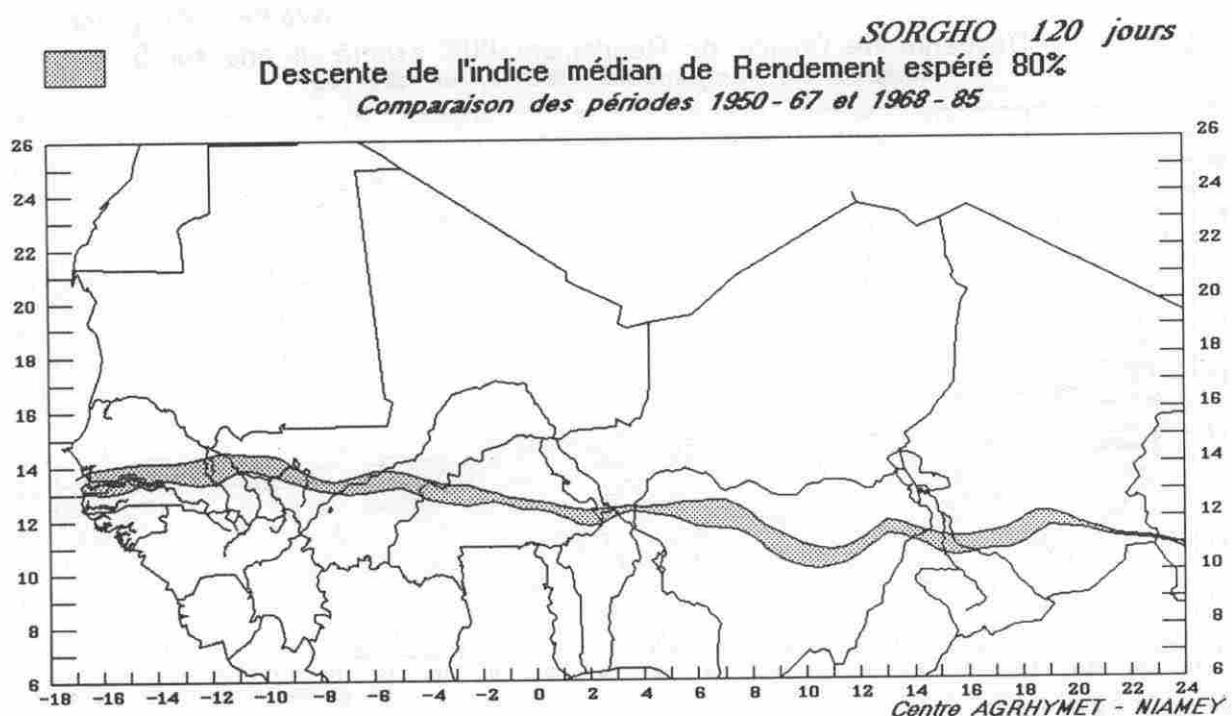


Carte N° 23c

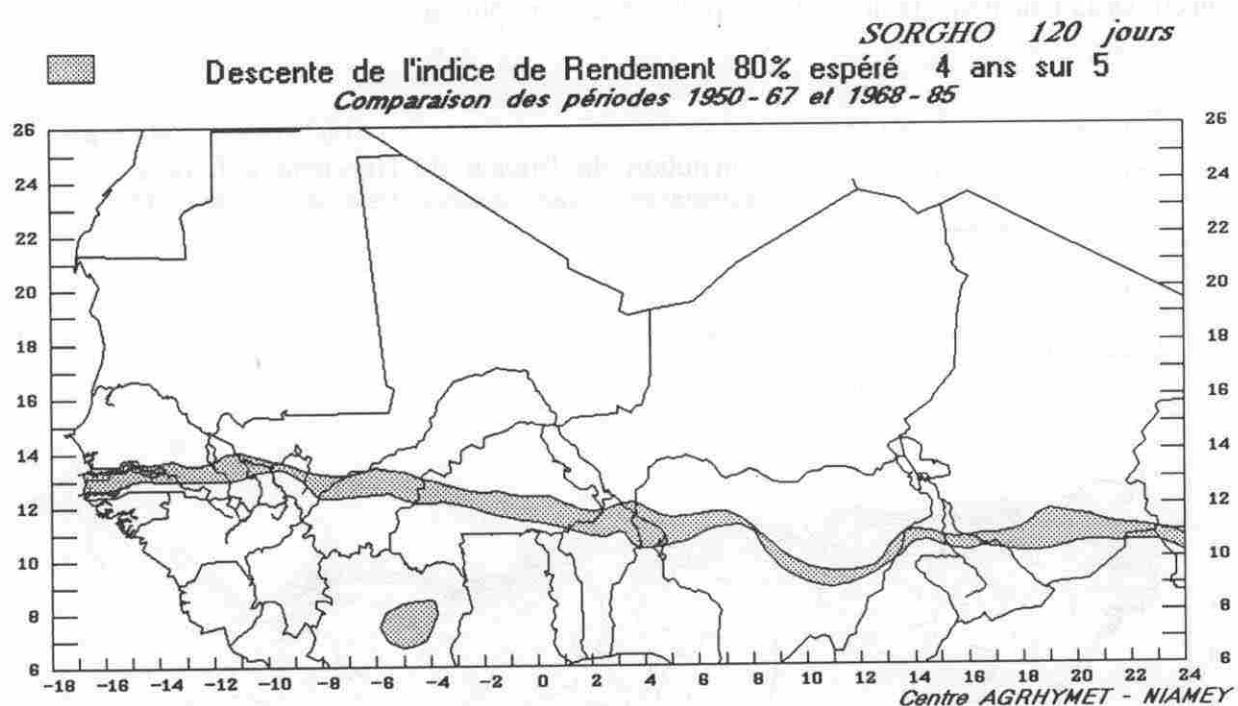
Le sorgho de 120 jours subit un recul 1 an sur 2 d'environ cinquante km si on souhaite obtenir un IRESP correct. Ceci est encore plus grave pour le sorgho photosensible. Mais le phénomène est masqué par les conditions particulières de culture de cette plante soit en décrue, soit en bas fonds ou en bordure de mare, peut-on encore parler de culture pluviale?



Carte N° 24a

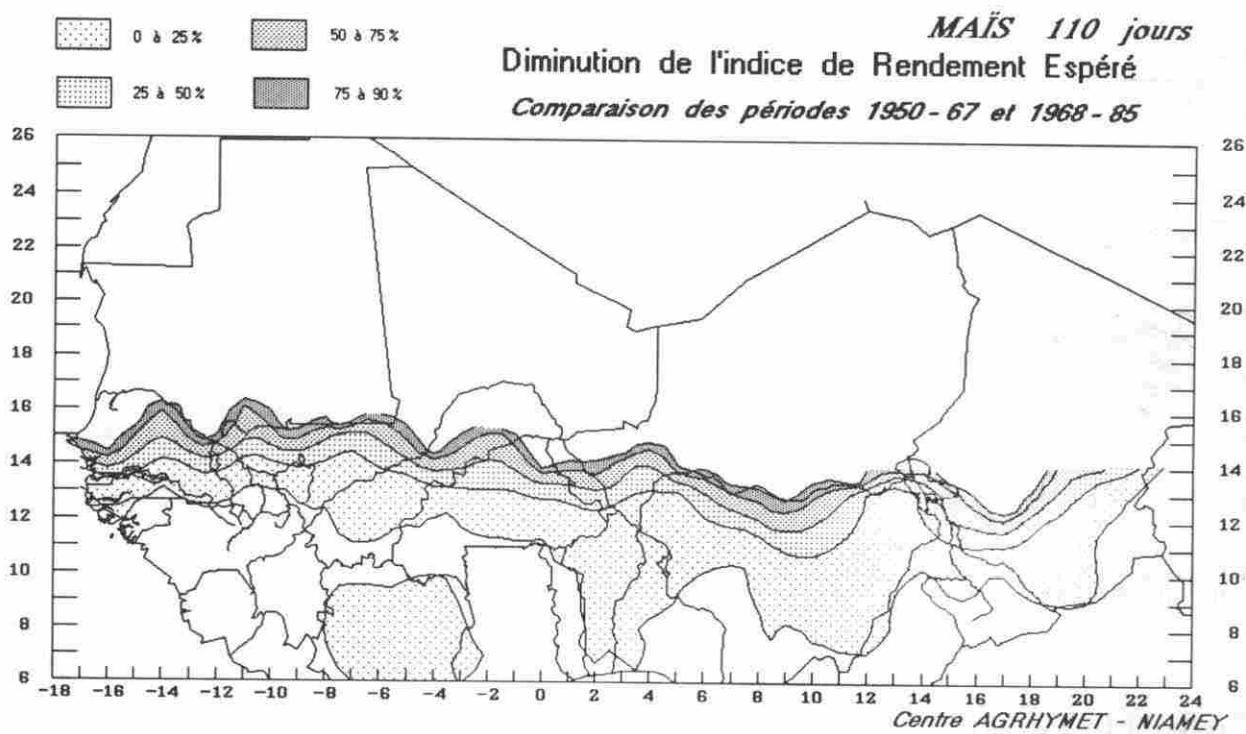


Carte N° 24b

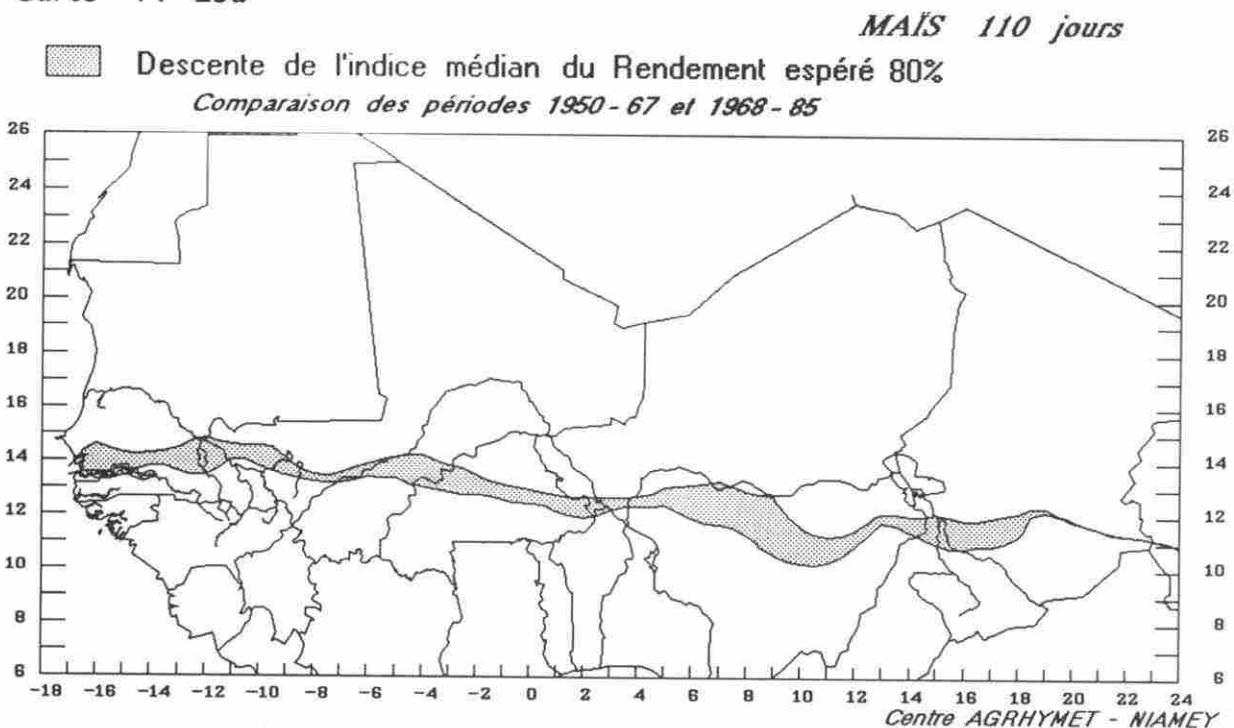


Carte N° 24c

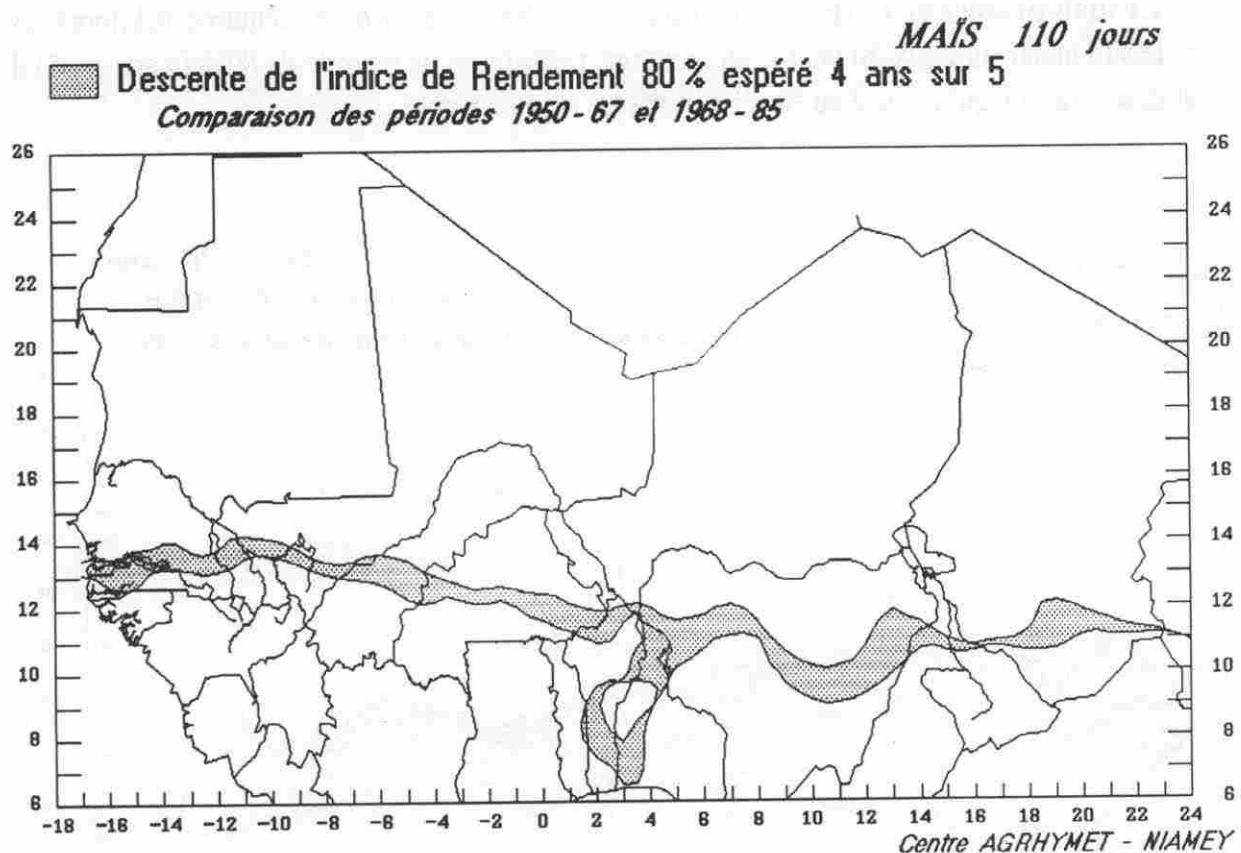
Le maïs précoce de 110 jours voit reculer son IRESP de 80% d'une centaine de kilomètres vers le sud un an sur deux. Si veut également une probabilité de réussite de 80% (4 ans sur 5) il faut descendre jusqu'à Yelwa au Nigéria et même jusqu'à Lagos.



Carte N° 25a



Carte N° 25b



Carte N° 25c

BIBLIOGRAPHIE

I. DONNEES DE BASE

ANNUAIRES CLIMATOLOGIQUES DU MALI Division climatologique de la
1987 à 1990 Direction nationale de la Météorologie Bamako

ANNUAIRES METEOROLOGIQUES DU NIGER
1981 à 1990 Direction de la Météorologie Nationale Niamey

BULLETINS PLUVIOMETRIQUES OU CLIMATOLOGIQUES ANNUELS DU TCHAD
1983 à 1988

FAO Données agroclimatologiques pour l'Afrique Volume 1.Pays au nord de
1984 l'équateur Coll. producton végétale et protection des plantes Rome

PRECIPITATONS JOURNALIERES DE L'ORIGINE A 1965 ORSTOM-CIEH
Ministère de la Coopération Paris pour tous les pays francophones

2. OUVRAGES ET ARTICLES

ANDRE N., CLAUSS F., MINOT D., PIATON H., CAGNEAUX E. Etude régionale de
1989 l'évapotranspiration potentielle Vol 1 aspects méthodologiques et outils
développés CIEH - Centre AGRHYMET 83 p Ouagadougou

BELLOCQ A. Climatologie des précipitations dans les régions sahéliennes. Modèle de bilan
1984 hydrique - Applications au Sénégal Vol 1, 131 p., Vol annexes 200 p.
DMN Dakar

BENOIT P. The start of the growing season in northern Nigeria Agric. Meteorology
1977 Vol 18, PP. 91-99

BERTRAND E. Mémoire de stage de fin d'études d'I.T.M.: Etude climatologique de la saison
1991 des pluies au Sahel sur les deux périodes 1950-1967 et 1968-1985. Etude d'un
modèle de bilan hydrique adapté au Sahel 70 p. 54 cartes
Centre AGRHYMET Niamey

CARBONNEL J.P. et HUBERT P. Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une
1985 rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso
C.R. Acad; Sc. Paris, t. 301, Série II, n° 13,

COCHEME J. et FRANQUIN P. Etude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche au sud du
1967 Sahara en Afrique occidentale. Projet conjoint FAO/UNESCO/OMM
325 p FAO Rome

C.T.G.R.E.F. Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations 204 p., 73 fig.,
1979 Ministère de la Coopération Paris

DHONNEUR G. Traité de météorologie tropicale - Application au cas de l'Afrique
1985 occidentale et centrale MNn Paris

DOORENBOS J., KASSAMA H. Yield response to water Rome FAO Bull irrigation et drainage
1979 N° 33 196 p

DOORENBOS J., PRUITT W.O. Les besoins en eau des cultures FAO Bull irrigation et drainage
1986 n°24 198 p Rome

EAGLEMAN J.B., An experimentally derived model for actual evapotranspiration.
1971 Agricultural Meteorology 8 (4-6), pp 385-394

ESCOUROU G. Climat et environnement: les facteurs locaux du climat Coll. géographie
1980 182 p. 20 fig. Masson Paris

ESTIENNES P. et GODARD A. Climatologie Collection U 368 p 120 fig.
1970 Armand Colin Paris

FARMER G. et WIGLEY T.M.L. Review of climatic trends for tropical Africa (Draft) research
1985 report for the ODA 112 p. Univers. of East Anglia Norwich

FARMER G., in Etudes de l'UICN sur le Sahel. chapitre 1 La pluviométrie UICN-NORAD
1989 Nairobi, Kenya pp 1-25 17 fig.

FRANQUIN P. La climatologie fréquentielle en agriculture tropicale.
1973 Techniques et Développement n°5, Janvier 73, pp. 6-15

FRANQUIN P. et FOREST F. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle
1977 des termes du bilan hydrique. Agronomie tropicale, Vol. XXXII-1,
Janvier-mars, pp. 7-11

FRERE M. et POPOV G.F. Surveillance agrométéorologique pour la prévision des récoltes
1979 FAO Etude production végétale et protection des plantes n°17 64 p. Rome

- GOMMES R.A. Pocket computers in agrometeorology FAO Plant production and protection paper n°45 140p Rome 1983
- GUILLOT B. CARN M. DAGORNE D., Remarques à propos des facteurs locaux sur l'activité convective en Afrique de l'Ouest et dans l'Atlantique intertropical. Veille climatique satellitaire N° 21 février 1988
- JANICOT S. Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulation quasi stationnaire durant une phase de transition climatique. Thèse de Doctorat Paris 6 Synthèse 180 p + annexes 1990
- KAWALEC A. Climatologie de la Guinée. Senasol Conakry 96p, 7 tab, 11 cartes, 8 fig 1977
- LEROUX M., Le climat de l'Afrique tropicale. Ed. H. Champion/M. Slatkine, Paris/Genève tome 1: 636p, 349 fig tome 2 :notice et atlas 250 cartes 1983
- LEROUX M., La variabilité des précipitations en Afrique occidentale: les composantes aérologiques du problème. Veille climatique satellitaire N°22 mai, 7 fig., pp 26-45 1988
- MARTIN C., PIATON H., VARDON P. Evaluation du potentiel éolien pour l'exhaure de l'eau Vol 1 Aspects méthodologiques et outils développés 200 p C.I.E.H. - C.E.R.E.R. Ouagadougou 1989
- MOREL R. et RAOULT B. Agroclimatologie de la Côte d'Ivoire 5 volumes et 1 atlas Ministère de l'Economie, des Finances et du plan de Côte d'Ivoire BDPA Paris 1980
- MOREL R., Problèmes posés par les normes pluviométriques dans la région sahélienne. Colloq. Int. Révi. Normes Hydro. suite aux incidences de la sécheresse. Com. Interafr. Etudes Hydro. Ouagadougou 1986
- MOREL R. Remarques à propos de l'effet des facteurs locaux sur la baisse de pluviométrie observée en Afrique de l'ouest sur le Sahel; Veille climatique satellitaire N° 23 août, pp 23-27, 3 fig. 1988
- MOREL R. Evolution de la pluviométrie en Afrique de l'ouest depuis 1950. Fribourg in vol 4 des actes de l'Association Internationale de Climatologie 1992
- NICHOLSON S.E. Rainfall and atmospheric circulation during drought period and wetter years in west africa M W R, 109, pp2191-2208 1981

- NICHOLSON S.E. The spatial coherence of african rainfall anomalies: Interhemispheric
1986 teleconnections j. Appl. Meteor. Vol 25, pp. 1365-1381 october
- OLIVRY J.C. Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux
1983 îles du Cap Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et
précipitations) Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol XX, n° 1, pp. 47-69
- ROBERTSON G.W. Weather-based mathematical models for estimating development and
1982 ripening of crops WMO CAgA Report n°15 158 p. Geneva
- ROBERTSON G.W. Guidelines on crop-wheather models (Draft) by Task Force On crop-
1983 wheather models WMO 202 p.
- SIVAKUMAR M.V.K., KONATE M., VIRMANI S.M. Agroclimatologie de l'Afrique de
1984 l'Ouest: le Mali ICRISAT Bulletin d'information n° 19 294 p Patancheru
- SIVAKUMAR M.V.K. et GNOUMOU F. Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : le
1987 Burkina Faso ICRISAT Bulletin d'information n° 23 191 p Patancheru
- STERN R.D., DENNETT M.D., DALE I.C. Analysing daily rainfall measurements to give
1982 agronomically useful results. I. Directs methods Expl. Agric. Volume 18,
pp. 223-236
- TRIPLET J.P. et ROCHE G. Météorologie générale Seconde édition 317 p.
1977 Ecole Nationale de la Météorologie Paris

TABLES

Table des cartes

carte 1a températures maximales 13ème décade : cartographie directe	p 31
carte 1b températures maximales 13ème décade : au niveau de la mer	p 31
carte 1c hypsométrie de l'Afrique de l'Ouest	p 32
carte 1d températures maximales 13ème décade : avec modèle numérique de terrain	p 32
carte 1e températures maximales 13ème décade : avec lissage exponentiel	p 33
carte 2 Tableau d'assemblage des cartes de pluies	p 53
carte 3a pluies médianes annuelles normales 1951-1980	p 59
carte 3b pluies annuelles quadriennales	p 60
carte 3c pluies annuelles décennales	p 60
carte 4a pluies médianes de mai	p 61
carte 4b pluies médianes de juin	p 61
carte 4c pluies médianes de juillet	p 62
carte 4d pluies médianes d'août	p 62
carte 4e pluies médianes de Septembre	p 63
carte 4f pluies médianes d'octobre	p 63
carte 5 Nombre de jours de pluies	p 65
carte 6 Rapport des pluies d'août à la médiane annuelle	p 66
carte 7 Déplacement des isohyètes entre 1950-67 et 1968-85	p 69
carte 8 Baisse de pluviométrie entre 1950-67 et 1968-1985	p 70
carte 9 Diminution du nombre annuel de jours de pluie	p 72
carte 10 Diminution du nombre de jours de pluie au mois d'août	p 73
carte 11a Apports d'eau moyens par jour de pluie (1950-1967)	p 74
carte 11b Apports d'eau moyens par jour de pluie (1968-1985)	p 74
carte 12a Diminution des pluviométries médianes du mois de juillet	p 76
carte 12a Diminution des pluviométries médianes du mois d'août	p 77
carte 12a Diminution des pluviométries médianes du mois de septembre	p 80
carte 12a Diminution des pluviométries médianes du mois d'octobre	p 80
carte 13 Schéma des zones d'anomalies pluviométriques	p 82
carte 14a Insolations du premier trimestre	p 88
carte 14b Insolations du second trimestre	p 89
carte 14c Insolations du troisième trimestre	p 90
carte 14d Insolations du quatrième trimestre	p 91
carte 15a Températures moyennes du premier trimestre	p 94
carte 15b Températures moyennes du second trimestre	p 95
carte 15c Températures moyennes du troisième trimestre	p 96
carte 15d Températures moyennes du quatrième trimestre	p 97

carte 16a Températures maximales du premier trimestre	p 100
carte 16b Températures maximales du second trimestre	p 101
carte 16c Températures maximales du troisième trimestre	p 102
carte 16d Températures maximales du quatrième trimestre	p 103
carte 17a Températures minimales du premier trimestre	p 106
carte 17b Températures minimales du second trimestre	p 107
carte 17c Températures minimales du troisième trimestre	p 108
carte 17d Températures minimales du quatrième trimestre	p 109
carte 18a Tensions de vapeur du premier trimestre	p 112
carte 18b Tensions de vapeur du second trimestre	p 113
carte 18c Tensions de vapeur du troisième trimestre	p 114
carte 18d Tensions de vapeur du quatrième trimestre	p 115
carte 19a Vents moyens à 2 mètres du premier trimestre	p 118
carte 19b Vents moyens à 2 mètres du second trimestre	p 119
carte 19c Vents moyens à 2 mètres du troisième trimestre	p 120
carte 19d Vents moyens à 2 mètres du quatrième trimestre	p 121
carte 20a Evapotranspirations potentielles du premier trimestre	p 124
carte 20b Evapotranspirations potentielles du second trimestre	p 125
carte 20c Evapotranspirations potentielles du troisième trimestre	p 126
carte 20d Evapotranspirations potentielles du quatrième trimestre	p 127
carte 21a Mil 90 jours : Diminution des IRESP entre 1950-67 et 1968-85.....	p 141
carte 21b Mil 90 jours : Diminution des IRESP de 80% un an sur deux.....	p 141
carte 21c Mil 90 jours : Diminution des IRESP de 80% quatre ans sur cinq	p 142
carte 22a Mil 120 jours : Diminution des IRESP entre 1950-67 et 1968-85.....	p 142
carte 22b Mil 120 jours : Diminution des IRESP de 80% un an sur deux.....	p 143
carte 22c Mil 120 jours : Diminution des IRESP de 80% quatre ans sur cinq	p 143
carte 23a Niébé 75 jours : Diminution des IRESP entre 1950-67 et 1968-85.....	p 144
carte 23b Niébé 75 jours : Diminution des IRESP de 80% un an sur deux.....	p 144
carte 23c Niébé 75 jours : Diminution des IRESP de 80% quatre ans sur cinq	p 145
carte 24a Sorgho 120 jours : Diminution des IRESP entre 1950-67 et 1968-85.....	p 145
carte 24b Sorgho 120 jours : Diminution des IRESP de 80% un an sur deux.....	p 146
carte 24c Sorgho 120 jours : Diminution des IRESP de 80% quatre ans sur cinq	p 146
carte 25a Maïs 110 jours : Diminution des IRESP entre 1950-67 et 1968-85.....	p 147
carte 25b Maïs 110 jours : Diminution des IRESP de 80% un an sur deux.....	p 147
carte 25c Maïs 110 jours : Diminution des IRESP de 80% quatre ans sur cinq	p 148

TABLE DES FIGURES

figure 1	Vitesses moyennes du vent à Sikasso	p 20
figure 2	Principe des Polygones itératifs	p 22
figure 3	Interpolation avec correction d'altitude	p 29
figure 4	Bloc diagramme de l'Afrique de l'Ouest	p 54
figure 5	Schéma de la circulation atmosphérique	p 56
figure 6	Doubles cumuls de pluviométrie	p 58
figure 7	Distribution des pluies annuelles 1950-67 et 1968-85	p 68
figure 8	Bloc diagramme de baisse de pluviométrie	p 71
figure 9	Distribution des pluies des mois de mai et juin 1950-67 et 1968-85	p 75
figure 10a	Distribution des pluies du mois de juillet 1950-67 et 1968-85	p 76
figure 10b	Distribution des pluies du mois d'août 1950-67 et 1968-85	p 78
figure 10c	Distribution des pluies du mois de septembre 1950-67 et 1968-85	p 79
figure 10d	Distribution des pluies du mois d'octobre 1950-67 et 1968-85	p 81
figure 11a	Classement des anomalies en 2 types	p 83
figure 11b	Classement des anomalies en 4 types	p 83
figure 12	Relations potentiels et humidité pour le sable et l'argile	p 133

Table des matières

AVERTISSEMENT	I
Chapitre I METHODOLOGIE.....	5
I.I. SOURCES.....	5
I.I.I. DOCUMENTS	5
I.I.I.I. LES DOCUMENTS DE SYNTHESE	5
I.I.I.II. DESCRIPTION DES SOURCES DE DONNEES	6
a - Les documents informatiques	6
b - Les documents écrits	6
I.I.I.III. DISCUSSION A PROPOS DES DOCUMENTS "ORIGINAUX"	7
a - Fiabilité	7
b - Années couvertes par les documents informatiques	7
c - Données sur les pays limitrophes du CILSS	8
I.I.2. QUALITE DES DONNEES	8
I.I.2.I. QUALITE DES DONNEES MESUREES.....	8
a - Les températures sous abri	8
b - L'humidité de l'air	9
c - La radiation solaire incidente	9
d - Le vent	10
I.I.2.II. LES PARAMETRES ESTIMES.....	10
a - L'albédo	11
b - Les coefficients d'Angstroem	11
I.2. CONTROLE ET HOMOGENEISATION DES DONNEES	12
I.2.I. NECESSITE D'UNE BASE OPERATIONNELLE DE DONNEES	12
I.2.II. ORIGINE DES DONNEES MANQUANTES	13
I.2.II.I. STRUCTURE DES RESEAUX D'OBSERVATION	13
a - Densité des stations d'observations	13
b - Fréquences des observations	14
I.2.II.II. TROUS D'ENREGISTREMENT	14
a -Absence d'observation	14
b - Non transmission de données	15
I.2.III. CAS DES DONNEES ABERRANTES	15
I.2.III.I. LES TACHES DE VERIFICATION	15
a - Pour les températures :	15
b - Pour l'humidité relative et la tension de vapeur :	16
c - Pour l'insolation :	16
d - Pour la vitesse du vent :	16
e - Pour la pluie :	16
I.2.III.II. LES ERREURS DE TRANSMISSION	17
I.2.III.III. LES ERREURS DE REPORT	17
a - Pour la Pluie	17
b - Pour les autres paramètres climatiques	18

1.2.4. ESTIMATION DES DONNEES MANQUANTES	18
1.2.4.1. CALCULS A PARTIR DES MESURES EXISTANTES	18
a - Température moyenne	18
b - Insolation à partir de la nébulosité en octas	19
c - L'humidité de l'air	19
d - La correction des mesures à 3 observations par jour	21
e - L'emploi des régressions	21
1.2.4.2. ESTIMATIONS PAR INTERPOLATIONS	21
a - L'interpolation temporelle	23
b - L'interpolation spatiale	23
c - La comparaison des deux méthodes d'interpolation	24
1.3. UTILISATION DES DONNEES	26
1.3.1. TABLEAUX DE DONNEES	26
1.3.2. PROBLEMES POSES PAR LA CARTOGRAPHIE	27
1.3.2.1. LA METHODE DE CARTOGRAPHIE	27
1.3.2.2. LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE	28
1.3.2.3. TOPOGRAPHIE ET REPRESENTATION DES PARAMETRES	29
1.4. LES OUTILS INFORMATIQUES	34
1.4.1. STOCKAGE ET MANIPULATION DES DONNEES DE BASE	34
1.4.2. MENU ET APPEL DES PROGRAMMES	34
1.4.3.1. SAISIE, EDITION ET MISE A JOUR	35
Saisie à partir de 3 observations par jour	37
Mise à jour et édition	37
1.4.3.2. CALCULS DE PARAMETRES CLIMATIQUES	37
Insolation à partir de la nébulosité	38
Tension de vapeur et humidité relative	38
Calcul de l'évapotranspiration potentielle Penman	38
1.4.3.3. LES VERIFICATIONS ET CORRECTIONS	39
Recherche des données manquantes	39
Vérification des durées d'insolation	39
Vérification de l'humidité de l'air	40
Contrôle des températures	40
1.4.3.4. INTERPOLATIONS	40
Interpolation de périodes plus courtes	40
Interpolation spatiale journalière	41
Interpolation spatiale décadaire	41
Interpolation spatiale mensuelle	41
1.4.3.5. ECHANGES ET COPIES DE FICHIERS	42
Conversion et reformatage de fichiers	42
Conversion de fichiers CLICOM ASCII délimité	43
Manipulations de fichiers pluviométriques en ASCII	43
Copie, extraction ou impression de fichiers de base ETP en ASCII	43

Table des matières

1.4.3.6. LES TABLEAUX STATISTIQUES	43
Probabilités suivant une loi gamma tronquée	44
Probabilités suivant une loi normale	44
Répartition fréquentielle en classes	44
Statistiques des valeurs extrêmes annuelles	45
Statistiques sur les saisons des pluies	46
1.4.3.7. LES BILANS HYDRIQUES	47
Edition des paramètres cultureaux	48
Calcul des bilans hydriques décennaux	48
Calculs prévisionnels de bilans hydriques	50
1.4.4. LIMITES DES PROGRAMMES	52
 Chapitre 2 La PLUIE.....	53
 2.1. L'ENVIRONNEMENT GEOGRAPHIQUE	54
2.1.1. L'AFRIQUE DE L'OUEST.....	54
2.1.2. PLUIES ET RELIEF.....	55
 2.2. LES CARACTERISTIQUES DE LA PLUVIOMETRIE	55
2.2.1. LES FACTEURS EXPLICATIFS DE LA PLUVIOMETRIE	55
2.2.1.1. LA CONVERGENCE INTERTROPICALE	55
2.2.1.2. LA CIRCULATION ZONALE	57
2.2.1.3. LES MOUVEMENTS LOCAUX	57
2.2.1.4. CONCLUSION	57
2.2.2. LA VALEUR DES DONNEES DE PRECIPITATION	58
2.2.3. LES PRECIPITATIONS ANNUELLES.....	59
2.2.4. LA VARIABILITE SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS	61
2.2.4.1. LA SAISON DES PLUIES.....	64
2.2.4.2. LE NOMBRE DE JOURS DE PLUIE.....	64
2.2.4.3. LES CARACTERISTIQUES MENSUELLES.....	65
 2.3. LA VARIATION DES PLUIES ANNUELLES DEPUIS 1950.	67
2.3.1. L'EVOLUTION DES ISOHYETES	69
2.3.2. SPATIALISATION DE LA BAISSE DE PLUVIOMETRIE	70
2.3.3. LE NOMBRE DE JOURS DE PLUIE	72
 2.4. VARIATIONS DES PLUIES MENSUELLES	75
2.4.1. DESCRIPTION DES MODIFICATIONS.....	75
2.4.2. REFLEXIONS SUR LES CAUSES DE LA SECHERESSE	82
2.4.2.1. CLASSIFICATION DES ANOMALIES PLUVIOMETRIQUES	82
2.4.2.2. FACTEURS EXPLICATIFS.....	84
a. Le déplacement de la ZITC et la classification des anomalies.....	84
b. Les paramètres influant la pluviométrie.....	85
c. Les mécanismes de la sécheresse	85
2.4.2.3. CONCLUSION.....	86

Chapitre 3 LES PARAMETRES CLIMATIQUES	
DE L ' EVAPOTRANSPIRATION.	87
3.1. LE RAYONNEMENT SOLAIRE.	87
3.1.1. LA DISTRIBUTION DES INSOLATIONS JOURNALIERES.	87
3.1.2. L'INFLUENCE DES FACTEURS LOCAUX	92
3.2. LES TEMPERATURES.	93
3.2.1. L'INFLUENCE DE L'ALTITUDE SUR LES TEMPERATURES.	93
3.2.2. LA DISTRIBUTION DES TEMPERATURES.	93
3.2.2.1. EVOLUTION PENDANT LE PREMIER TRIMESTRE	93
Mois de janvier	93
Mois de février	98
Mois de mars	98
3.2.2.2. EVOLUTION PENDANT LE SECOND TRIMESTRE	99
Mois d'avril	99
Mois de mai	99
Mois de juin	99
3.2.2.3. EVOLUTION PENDANT LE TROISIEME TRIMESTRE	104
Mois de juillet	104
Mois d'août	104
Mois de septembre	105
3.2.2.4. EVOLUTION PENDANT LE QUATRIEME TRIMESTRE	105
Mois d'octobre	105
Mois de novembre	105
Mois de décembre	110
3.2.3. ROLE DES FACTEURS LOCAUX	110
3.3. L'HUMIDITE DE L'AIR.	111
3.3.1. L'ALTITUDE ET LA TENSION DE VAPEUR.	111
3.3.1.1. LA DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DE L'HUMIDITE.	111
3.3.1.1.1. EVOLUTION AU PREMIER TRIMESTRE	111
3.3.1.1.2. EVOLUTION AU SECOND TRIMESTRE	111
3.3.1.1.3. EVOLUTION AU TROISIEME TRIMESTRE	116
3.3.1.1.4. EVOLUTION AU QUATRIEME TRIMESTRE	116
3.3.1.2. L'INFLUENCE DES FACTEURS LOCAUX	116
3.4. LE VENT.	117
3.4.1. L'ADVECTION	117
3.4.2. EVOLUTIONS DES VITESSES DU VENT.....	117
3.4.3. INFLUENCE DES FACTEURS LOCAUX SUR LA VELOCITE.....	122

3.5. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE.....	123
3.5.1. LES FACTEURS DE VARIATION DE L'ETP.	123
3.5.2. LA DISTRIBUTION DE L ' ETP	123
3.5.2.1. AU PREMIER TRIMESTRE	123
3.5.2.2. AU SECOND TRIMESTRE	128
3.5.2.3. AU TROISIEME TRIMESTRE	128
3.5.2.4. AU QUATRIEME TRIMESTRE.....	128
Chapitre 4 AGROCLIMATOLOGIE.....	129
4.1. DOMAINE DE L'ETUDE AGROCLIMATOLOGIQUE.	130
4.1.1. AU POINT DE VUE GEOGRAPHIQUE	130
4.1.2. LES DONNEES EMPLOYES	130
4.1.3. RAPPEL DE L'ANALYSE DE LA SECHERESSE.....	130
4.2. LES COMPOSANTES DE L'AGROCLIMATOLOGIE.	131
4.2.1. AGRICULTURE ET CLIMAT.	131
4.2.2. LE SOL ET L'EAU	132
4.2.2.1. RAPPELS DE PHYSIQUE DU SOL.....	132
4.2.2.2. LE NIVEAU DE DISPONIBILITE DE L'EAU DANS LE SOL.....	133
4.2.2.3. LE BILAN HYDRIQUE.....	134
4.3. L'ETUDE AGROCLIMATOLOGIQUE.....	135
4.3.1. LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE	136
4.3.1.1. LES APPORTS D'EAU.....	136
4.3.1.2. LA CONSOMMATION D'EAU.....	137
a. Les besoins en eau des plantes.....	137
b. La consommation des plantes et le sol.....	138
4.3.2. LES SORTIES DU BILAN HYDRIQUE.	138
4.3.2.1. CLIMAT ET PRODUCTION	138
4.3.2.2. LES INFORMATIONS DU BILAN HYDRIQUE	138
4.3.2.3. LE STRESS HYDRIQUE ET LE RENDEMENT	138
4.3.3. ETUDE FREQUENTIELLE DES BILANS HYDRIQUES.....	139
4.3.3.1. LA PRODUCTION ET LES PERIODES DE SEMIS	139
a. L'IRESP	139
b. Les dates de semis	140
4.3.3.2. LES CULTURES ET LES VARIATIONS CLIMATIQUES	140
BIBLIOGRAPHIE.....	149
TABLES.....	153
TABLE DES CARTES.....	153
TABLE DES FIGURES.....	155

Cet Atlas a été imprimé
à l'école **Issa Béri** - Niamey - Niger
- Mars 1992 -