

Ministère des Relations Extérieures — Coopération et Développement

VEILLE CLIMATIQUE SATELLITAIRE

METEOROLOGIE NATIONALE CMS LANNION - GOES W - VISIBLE 05/04/1986 17H00 TU



BIBLIOTHEQUE
S. 2/2
O. R. S. T. O. M.
R 4592(d)
4 JUL. 1986

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: B*16984

Ex: *unep*

à B*16991



FORET EQUATORIALE, RELAIS DE L'OCEAN COMME SOURCE DE VAPEUR D'EAU POUR L'ATMOSPHERE

MONTENY, B.A., Bioclimatologie, O.R.S.T.O.M.

Adresse actuelle : Ecologie Végétale, Faculté des Sciences,
Université Paris XI, ORSAY.

RESUME

Les études concernant les transferts énergétiques se produisant à l'interface forêt-atmosphère, tout comme celles concernant le bilan hydrique, ont montré que l'écosystème forestier bordant le Golfe de Guinée en Afrique du l'Ouest recyclait 60 à 75 % de la quantité des eaux de pluie annuelle. Ce transfert de vapeur d'eau est fonction, d'une part, des caractéristiques climatiques, comme l'énergie solaire disponible et la fraction d'eau provenant des précipitations stockées dans le sol, et d'autre part, des propriétés biologiques du système forestier lui-même. Il correspond à l'évapotranspiration et contribue au maintien des conditions physiques initiales des masses d'air en provenance de l'océan (forte humidité et faible amplitude thermique). Ces conditions favorables permettent le recyclage de l'eau (condensation-précipitation) et son transport vers les régions situées plus au nord en relation directe avec le mouvement de la Zone Intertropicale de Convergence (ZITC). L'importance de la participation de cette évapotranspiration des surfaces végétales à l'équilibre du climat terrestre a été soulignée par des modèles de circulation atmosphérique générale comme le « FLAS » utilisé par Shukla et Mintz (1982).

Le travail présent, basé sur les études des bilans énergétique et hydrique, réalisé sur divers couverts végétaux, analyse les effets probables de diverses perturbations soit à caractère biologique (déforestation à grande échelle...) soit à caractère physique (baisse de température de l'air...) qui affecteraient le transfert de vapeur d'eau. Les conséquences de ces perturbations à grande échelle pourraient se répercuter sur la distribution saisonnière et les quantités de pluies réparties sur les régions situées sur le pourtour du Golfe de Guinée.

INTRODUCTION

En Afrique de l'Ouest, la forêt tropicale humide est localisée, en raison de son équilibre avec les effets océaniques et orographiques, en bordure du Golfe de Guinée : pluies importantes, fortes humidités et température moyenne de l'ordre de 26°C. Toutefois, en raison de l'accroissement démographique, ces zones forestières sont de plus en plus mises en culture. En Côte d'Ivoire seulement, la défriche forestière, liée à l'activité humaine, représente une moyenne de 323.000 ha/an depuis 1973 (Bertrand, 1983), correspondant à 35 % de la surface forestière initiale.

Ces changements physiologiques affectent les interactions sol-plante-atmosphère. En effet, la répartition énergétique à l'interface sol-végétation et l'atmosphère, se trouve modifiée et il s'établit un nouvel équilibre. Ce dernier, fonction des caractéristiques physiques de la nouvelle surface et de ses propriétés physiologiques, influencera certains paramètres physiques de l'atmosphère, essentiellement son humidité et sa température.

Il en est de même au niveau de l'océan où certaines modifications, liées à des mouvements (courants verticaux par exemple) à l'intérieur de la masse océanique, entraînent des changements des caractéristiques de sa surface. Les échanges énergétiques se produisant à l'interface océan-atmosphère s'en trouvent affectés et leurs effets se répercutent sur certains paramètres de la masse d'air.

La première partie de cet article présente une analyse de quelques résultats concernant l'importance des échanges radiatifs et énergétiques se produisant au niveau de la forêt et de cultures annuelles pratiquées en zone forestière.

A l'aide de ces données et connaissant l'importance des quantités d'énergie solaire reçues et le stock hydrique du sol disponible dans la zone racinaire, les calculs du bilan hydrique permettent de déterminer la fraction d'eau de pluie transférée par le système végétal à l'atmosphère. La discussion porte sur les valeurs des bilans hydriques obtenus pour les divers couverts végétaux et sur leurs conséquences sur le cycle hydrique.

La seconde partie porte sur l'effet de la modification d'une caractéristique physique de l'océan comme la température de sa surface et les perturbations observées au niveau de certains paramètres de la masse d'air à son arrivée sur le continent africain. La discussion qui suit analyse l'effet qu'entraîne cette modification sur les interactions végétation-atmosphère dont l'impact se répercute entre autres sur la seconde saison des pluies, lors du retour vers le sud de la ZITC.

Fonds Documentaire ORSTOM



010016989

CONSIDERATIONS GENERALES

Le rayonnement net d'un système est d'une grande importance dans l'évaluation des caractéristiques radiatives des surfaces terrestres. Il correspond au bilan entre les rayonnements incident, réfléchi et émis au niveau de la surface végétale selon l'équation :

$$R_n = R_g - R_r + R_a - R_t$$

avec R_g : rayonnement global de courtes longueurs d'onde ;

R_r : rayonnement réfléchi ;

R_r/R_g : albedo de la surface = a ;

R_a et R_t : rayonnements de grandes longueurs d'onde émis par l'atmosphère et la surface terrestre respectivement ;

R_n : rayonnement net.

Deux des rayonnements, R_r et R_t dépendent des propriétés radiatives et des caractéristiques architecturales du système biologique. Toutefois, compte tenu de l'importance de la concentration de vapeur d'eau atmosphérique, les variations du bilan des grandes longueurs d'onde R_a-R_t seront plus faibles comparativement à celles du bilan des courtes longueurs d'onde R_g-R_r .

L'énergie totale absorbée, R_n , est répartie à l'interface du système végétation-atmosphère selon différents processus de transfert. L'équation simplifiée exprimant le bilan de ces processus s'écrit :

$$R_n = L \cdot ETR + H + G$$

avec ETR : évapotranspiration du couvert végétal ;

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau ;

L.ETR : densité du flux de chaleur latente ;

H : densité du flux de chaleur sensible ;

G : densité de flux de chaleur sensible dans le sol.

La méthode du bilan d'énergie/rapport de Bowen a été utilisée dans le cas d'un couvert forestier d'Hévéa (Monteny et al. 1985) pour déterminer la répartition de l'énergie totale absorbée R_n entre L.ETR et H, R_n et G étant mesurés. Pour le couvert forestier équatorial, l'évapotranspiration a été déterminée par la méthode du bilan hydrique (Huttel, 1975) selon l'équation :

$$P - D - R + dS = ETR$$

avec P : pluie ;

D : drainage profond ;

R : ruissellement en surface ;

dS : variation du stock hydrique du sol exploré par le système racinaire. Les variations de ce stock hydrique étaient mesurées à l'aide de la sonde à neutron. Quant aux autres termes du bilan, ils ont été obtenus selon les méthodes classiques.

Par ailleurs, des mesures hydrologiques réalisées sur des bassins versants sous forêt naturelle, d'une superficie de 40 km², ont permis la détermination de leur aptitude à l'écoulement (D) et au ruissellement (R) en fonction de la pluviométrie (Casenave, 1984). Ces données permettent de confirmer la régionalisation du modèle d'estimation de l'évapotranspiration présenté pour l'écosystème forestier.

Des mesures du bilan d'énergie ont également été réalisées sur des couverts végétaux à caractères agricoles remplaçant les forêts originales. Les résultats, obtenus sur l'ensemble du cycle de végétation, permettent la comparaison de leurs bilans hydriques avec ceux des systèmes pérennes. L'impact des modifications physiologiques introduites dans la zone forestière peut ainsi être mis en évidence.

Les cartes de la distribution des températures de surface nous ont été aimablement communiquées par le Service Océanographique de Côte d'Ivoire et proviennent de la NOAA.

RESULTATS ET DISCUSSION

Peu de mesures du rayonnement net R_n sont réalisées en régions tropicales humides malgré l'utilité de la connaissance du bilan radiatif des couverts végétaux. C'est pourquoi, des mesures simultanées de certains termes du bilan radiatif ont été réalisées sur différents couverts végétaux. Les données obtenues ont permis de déterminer des équations statistiques reliant le rayonnement net R_n au rayonnement global R_g . Le tableau I résume quelques résultats obtenus sur divers couverts végétaux ainsi que certaines équations tirées de la littérature.

Tableau I

Relation entre les rayonnements net R_n et global R_g pour divers types de couverts végétaux
(r : coef. de corrélation)

Type de couvert végétal	albedo %	$R_n = aR_g$ a	+ b b	(W.m-2) r	Nombre de couples
Forêt					
amazonienne (SHUTTLEWORTH, 1984)	12	0,86	- 35	—	—
thailandaise (PINKER, 1980)	12	0,87	- 25	0,99	—
Puerto Rico (ODUM, 1970)	12	0,72	—	—	—
Hévéa (air humide) (MONTENY, 1985a)	14	0,73	- 0,4	0,98	282
Hévéa (air sec) (ibid)	14	0,78	- 50	0,98	113
palmier à huile (MONTENY, 1985b)	13	0,71	- 22	0,98	135
Culture					
riz (LHOMME, 1981)	18	0,71	- 5	0,99	165
manioc faible densité (MONTENY, 1985b)	18	0,66	- 18	0,99	99
forte densité	18	0,64	- 9	0,99	96
ananas (COMBRES, 1984)	19	0,62	4	0,97	
pueraria (MONTENY, 1985b)	22	0,66	3	0,99	141
Surface sol					
en jachère (MONTENY, 1985b)	21	0,58	- 36	0,96	42
après brulis (ibid)	9	0,54	- 42	0,97	26
nu : sec (ibid)	23	0,64	- 42	0,98	150
humide	12	0,73	- 5	0,97	27

Les forêts tropicales ou les forêts plantées comme l'*Hévéa* ou le palmier à huile ont un coefficient de régression a supérieur aux couverts végétaux de faible hauteur comme les diverses cultures, en raison principalement d'un piégeage plus important de l'énergie incidente, se traduisant par un albedo (R_r/R_g) plus faible pour les systèmes forestiers. C'est, dans nos conditions, principalement la fraction d'énergie réfléchie qui influencera le rayonnement net pour une même quantité de rayonnement solaire global reçue. Ainsi, un premier élément indicatif de l'impact de la modification physiologique des systèmes végétaux intervient : **la fraction d'énergie totale disponible pour les processus d'échange diminue.**

La quantité d'énergie totale absorbée R_n par le système forestier est répartie selon les deux principaux processus d'échange : L.ETR et H, G étant négligeable en raison de la faiblesse de la transmission de l'énergie solaire par le feuillage forestier.

La figure 1 présente les relations entre l'énergie totale absorbée R_n et la fraction d'eau évapotranspirée L.ETR et transférée à l'atmosphère. Les pentes de ces relations dépendent des diverses conditions hydriques du sol et du système forestier qui évoluent dans le temps en raison d'une part, du vieillissement du feuillage, et d'autre part, des réactions du système biologique aux facteurs pédo-climatiques.

L'analyse des données d'évapotranspiration L.ETR de deux types de couverts forestiers (Monteny, 1984, 1986) a montré :

1.) l'importance de la fraction d'eau de pluie interceptée par le système foliaire du couvert forestier qui, selon les caractéristiques des pluies, représente 11 à 40 % des quantités d'eaux reçues, et qui est immédiatement évaporée et restituée à l'atmosphère ;

2.) pour des conditions d'alimentation hydriques optimales, une relation étroite entre l'évapotranspiration et la quantité d'énergie disponible ;

3.) l'importance du développement du système racinaire dans l'exploration de la réserve hydrique du sol qui, au fur et à mesure de son épuisement, influence le comportement du système végétal : la réduction des échanges de vapeur d'eau est compensée par l'accroissement du transfert de chaleur sensible entre la surface et l'atmosphère en raison du rééquilibrage entre les deux processus ;

4.) dans le cas des arbres à feuille caduque comme l'*Hévéa*, le vieillissement du feuillage entraîne une réduction progressive de l'évapotranspiration, avec un rééquilibrage des transferts d'énergie à l'interface forêt-atmosphère (fig. 1).

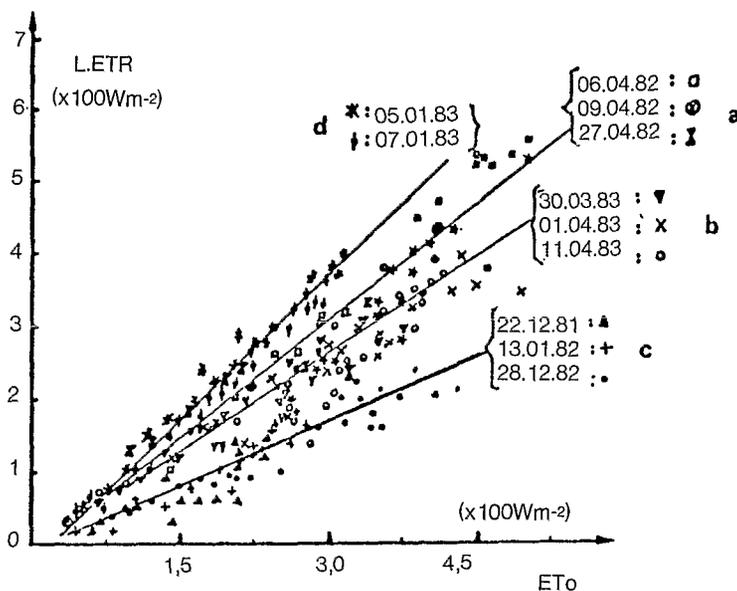


Figure 1. - RELATION ENTRE L'EVAPOTRANSPIRATION STANDARD $ET_o = (P' / (P' + \gamma)) \times (R_n - G)$ ET L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE D'UN COUVERT D'HEVEA LETR POUR DIVERSES CONDITIONS :

- a) feuillage jaune, alimentation hydrique favorable, vent humide du sud ;
- b) feuillage jaune, alimentation hydrique déficiente partiellement, idem ;
- c) feuillage âgé, alimentation hydrique favorable, vent humide du sud ;
- c) feuillage âgé, alimentation hydrique favorable, vent sec du nord.

Dans le cas des couverts végétaux de faible hauteur, la densité de flux de chaleur sensible dans le sol G intervient en début de végétation, au cours des périodes de sécheresse, entraînant une modification partielle des surfaces foliaires, et en fin de végétation : il représente 5 à 27 % du rayonnement net. D'autre part, une relation linéaire entre le rayonnement net et l'évapotranspiration réelle de ces couverts cultivés peut être obtenue tant que l'alimentation hydrique et le développement foliaire ne sont pas des facteurs limitants (Monteny et al., 1981). Or, ces couverts présentent généralement un système racinaire qui se développe dans le niveau supérieur du sol (40 à 80 cm), explorant un volume nettement inférieur à celui des systèmes forestiers. Ceci se traduit par **une réserve hydrique disponible faible, et par des pertes en profondeur (drainage) plus élevées**, second élément indicatif de l'impact de la modification physiologique des systèmes végétaux. Ces paramètres influenceront bien évidemment les processus d'évapotranspiration de ces couverts et donc la concentration en vapeur d'eau des masses d'air.

La connaissance de l'évolution des déperditions en eau en fonction de la **fraction d'énergie solaire totale absorbée** et de la **variation de la réserve du sol utilisable** par le système végétal permet de modéliser les échanges hydriques des couverts végétaux (Monteny, 1985, 1986). Cette réserve hydrique utilisable R.U. varie entre 40 et 220 mm selon les caractéristiques du sol et la profondeur explorée par le système racinaire du système végétal.

MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX

En considérant le premier terme de la formule de Penman, comme l'ont fait Priestley et Taylor (1972), encore appelé évapotranspiration standard ET_o , et les valeurs mesurées de l'évapotranspiration réelle ETR correspondante, le rapport ETR/ ET_o fournit un coefficient « C » qui caractérise l'importance de la régulation stomatique du système végétal en relation avec les conditions pédo-climatiques. L'analyse de la variation de ce coefficient en fonction de l'état hydrique du sol a permis de déterminer une équation générale pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle des couverts forestiers, en Afrique de l'Ouest, en fonction des réserves hydriques du sol disponible et de l'état phénologique du système végétal :

$$ETR = ET_0 \times (1,05 - e^{(-2,5 \times RHD/RU)}) \times IF/IF_0$$

avec $ET_0 = (P'/(P' + \gamma)) \times R_n = (P'/(P' + \gamma)) \times 0,75 R_g$

RG : rayonnement solaire global en mm ;

RDH : réserve hydrique du sol disponible dans la zone explorée par le système racinaire en mm ;

RU : réserve hydrique maximale utilisable dans la même zone de sol en mm ; IF₀ correspond à l'indice foliaire du couvert au moment du recouvrement total du sol par le feuillage et le rapport IF/IF₀ la variation du degré de recouvrement pour des valeurs IF ; P' : pente de la courbe de pression de vapeur d'eau saturante pour une température donnée ; γ : constante psychrométrique.

Deux autres équations permettent, d'une part, d'estimer la fraction d'eau des pluies interceptée par le feuillage qui s'évapore immédiatement et d'autre part, celle qui, après avoir traversé la canopée, ruisselle à la surface du sol (Casenave, 1984).

L'ensemble de ces équations permet de modéliser l'évolution du bilan hydrique du système végétal à partir de quelques données de base : la pluie, le rayonnement solaire global, les caractéristiques du sol, l'évolution phénologique du couvert dont l'indice foliaire IF et de la croissance du système racinaire.

Les calculs, réalisés sur 2 années (1980 et 1982) caractérisées par une distribution pluviométrique différente, sont résumés dans le tableau II. Il montre, en valeur annuelle, les termes du bilan hydrique pour diverses régions de la zone forestière : Tai, dans le sud-ouest ivoirien ; Dabou et Banco pour la région côtière, Yapo pour la région sud-est et Yamoussokro pour la région située au nord de la zone forestière.

Les deux années ont une distribution des pluies différentes : en 1980, la répartition des pluies présente un caractère bimodal normal entre mars et novembre, tandis qu'en 1982, 80 % de la totalité des pluies annuelles ont été enregistrée entre mi-avril et mi-juillet, principalement dans la région sud de la zone forestière. Cette distribution anormale est à mettre en relation avec les modifications de certaines caractéristiques de la surface de l'océan qui perturbent la circulation générale de la masse d'air comme nous l'analyserons ultérieurement. Il est évident que des apports de 500 à 1.200 mm d'eau par mois influent fortement sur les pourcentages calculés. D'autre part, le couvert forestier puisera dans les réserves hydriques disponibles du sol pour couvrir ses besoins sans qu'il n'y ait nécessairement de variations annuelles importantes de ce stock, en raison du phénomène de compensation lié à la distribution des pluies, ce qui n'a pas été le cas en 1982 où la deuxième saison des pluies a été déficiente à la suite des perturbations thermiques de la surface océanique. La réserve hydrique du sol en s'épuisant, réduit progressivement les échanges de vapeur d'eau du couvert forestier. Cette réduction sera beaucoup plus accentuée dans le cas de couverts végétaux dont le système racinaire ne se développe que faiblement en profondeur (figure 2) avec des conséquences perturbatrices sur les caractéristiques climatiques. Ainsi, le système pérenne participe davantage au maintien des conditions physiques initiales de l'atmosphère, notamment en vapeur d'eau et en chaleur, durant de plus longues périodes, que les systèmes cultivés annuellement, qui ne peuvent maintenir une forte activité sur d'aussi longues durées entre deux pluies.

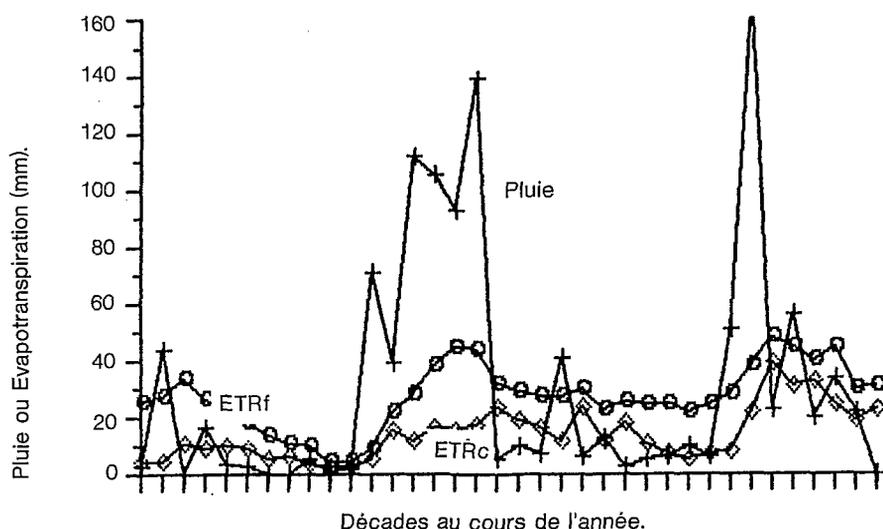


Figure 2. - EVOLUTION DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE DE LA FORET ETRf ET D'UNE CULTURE + JACHERE ETRc AU COURS DE L'ANNEE 1980 EN BASSE COTE D'IVOIRE.

Le couvert forestier transfère dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau, 60 à 75 % des précipitations annuelles (tableau II).

Tableau II

Valeurs annuelles de deux termes du bilan hydrique (exprimé en mm/an) calculées pour la forêt et des cultures basses dans certaines régions de la zone forestière de Côte d'Ivoire

LIEU	ANNEE	surface végétale	PLUIE	ETR. totale	P/ETR %
BANCO	1969-71	forêt équatoriale (Huttel, 1975)	1800	1170	65
YAPO	1972-73	forêt équatoriale (Huttel, 1975)	1950	1425	73
TAI	1980	forêt équatoriale (calcul)	2065	1422	69
		culture + jachère	2065	821	30
	1982	forêt équatoriale	1713	1257	73
		culture + jachère	1713	788	46
DABOU	1980	forêt équatoriale	1135	1126	99
		culture + jachère	1135	664	58
	1982	forêt équatoriale	2242	956	42
		culture + jachère	2242	525	23
YAMOUSOUKRO	1980	forêt équatoriale	1382	1025	74
		culture + jachère	1382	764	55
	1982	forêt équatoriale	990	1026	113 *
		culture + jachère	990	762	76

* La réserve hydrique du sol y participe pour 13 %.

Une grande partie de ce transfert contribue à son tour à l'alimentation des systèmes nuageux qui sont entraînés vers le nord par la circulation atmosphérique générale. Les travaux de Laglaire (Aubreville 1949) portant sur un bilan hydrique annuel entre la quantité d'eau apportée par la mousson et la quantité totale d'eau précipitée sur le territoire de la Côte d'Ivoire, confirment que les deux tiers des précipitations totales proviennent de l'évapotranspiration du système forestier et qu'un tiers seulement provient de la vapeur d'eau océanique. Baumgartner et Reichel (1975) citent des chiffres comparables pour des bilans hydriques annuels continentaux correspondant à la différence entre la pluviosité globale et l'écoulement total des rivières et fleuves.

SCHEMA DESCRIPTIF DES MOUVEMENTS D'EAU AU-DESSUS DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

Le déterminisme climatique dans le Golfe de Guinée et au-dessus de l'Afrique de l'Ouest est lié au déplacement saisonnier de la Zone Intertropicale de Convergence (ZITC), lieu de confluence des alizés boréal et austral. En effet, l'avancée de la ZITC, à partir du Golfe de Guinée vers le nord du continent africain et son retour, conditionnent la distribution des pluies entre février et novembre comme le montrent les figures 3 et 4 sur l'ensemble de la Côte d'Ivoire pour deux années. Une étude plus récente (Guillot et al., 1986) présente une synthèse des hypothèses actuelles des conditions susceptibles d'affecter la répartition des pluies en Afrique de l'Ouest.

Un des premiers facteurs perturbant le fonctionnement du système forestier est la disponibilité en eau dans le sol qui dépend de la distribution quantitative des pluies. En effet, les quantités d'eau précipitées proviennent de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans la masse d'air. Sa concentration E, à son arrivée sur le continent, dépend de l'importance du transfert d'énergie via le processus d'évaporation à l'interface océan-atmosphère. Toutefois, l'un des composants du bilan d'énergie, la **température de surface** (SST) des masses océaniques, jouerait un rôle déterminant dans le mouvement de la ZITC (Citeau, 1984 ; Merle, 1983, Servain, 1985 ; Guillot et al. 1986). Ces auteurs ont mis en évidence une relation entre la température moyenne de la surface de l'océan au sud de l'équateur et la pluviosité enregistrée dans la région située entre la côte et la partie sud du Sahel. Par ailleurs, une analyse de la répartition des pluies annuelles (1941-1973) sur l'Afrique de l'Ouest (Janicot, 1985) révèle l'existence, de part et d'autre du parallèle 10°N, de deux zones à forte homogénéité : celle au nord de 10°, correspondant au passage privilégié des lignes de grains, et l'autre au sud du 10°N jusqu'à la côte guinéenne, recevant les pluies de mousson entrecoupées d'une petite saison sèche.

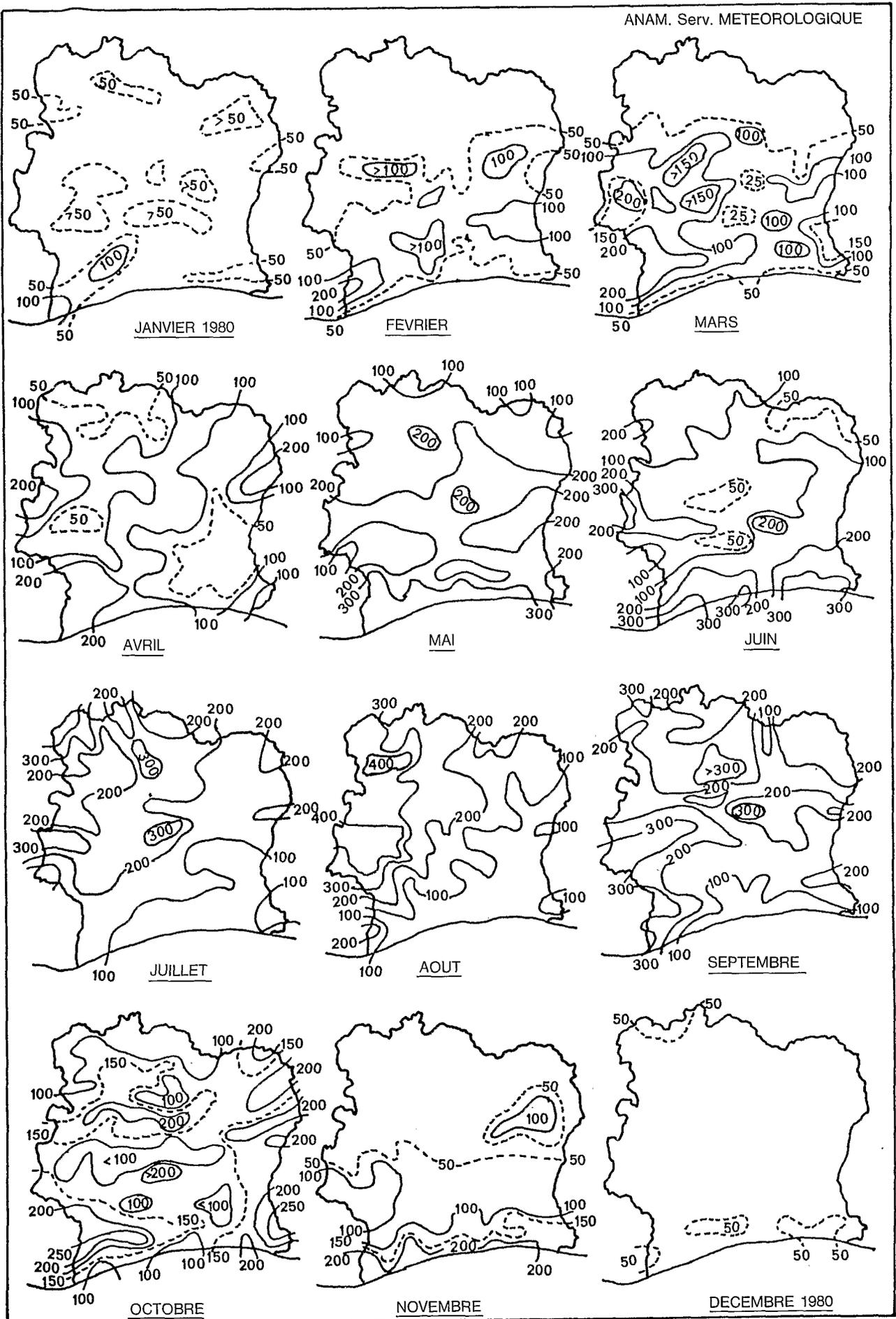


Figure 3. - DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE DES PRECIPITATIONS MENSUELLES SUR LE TERRITOIRE IVOIRIEN POUR 1980. (Anam, Serv. Météorologique).

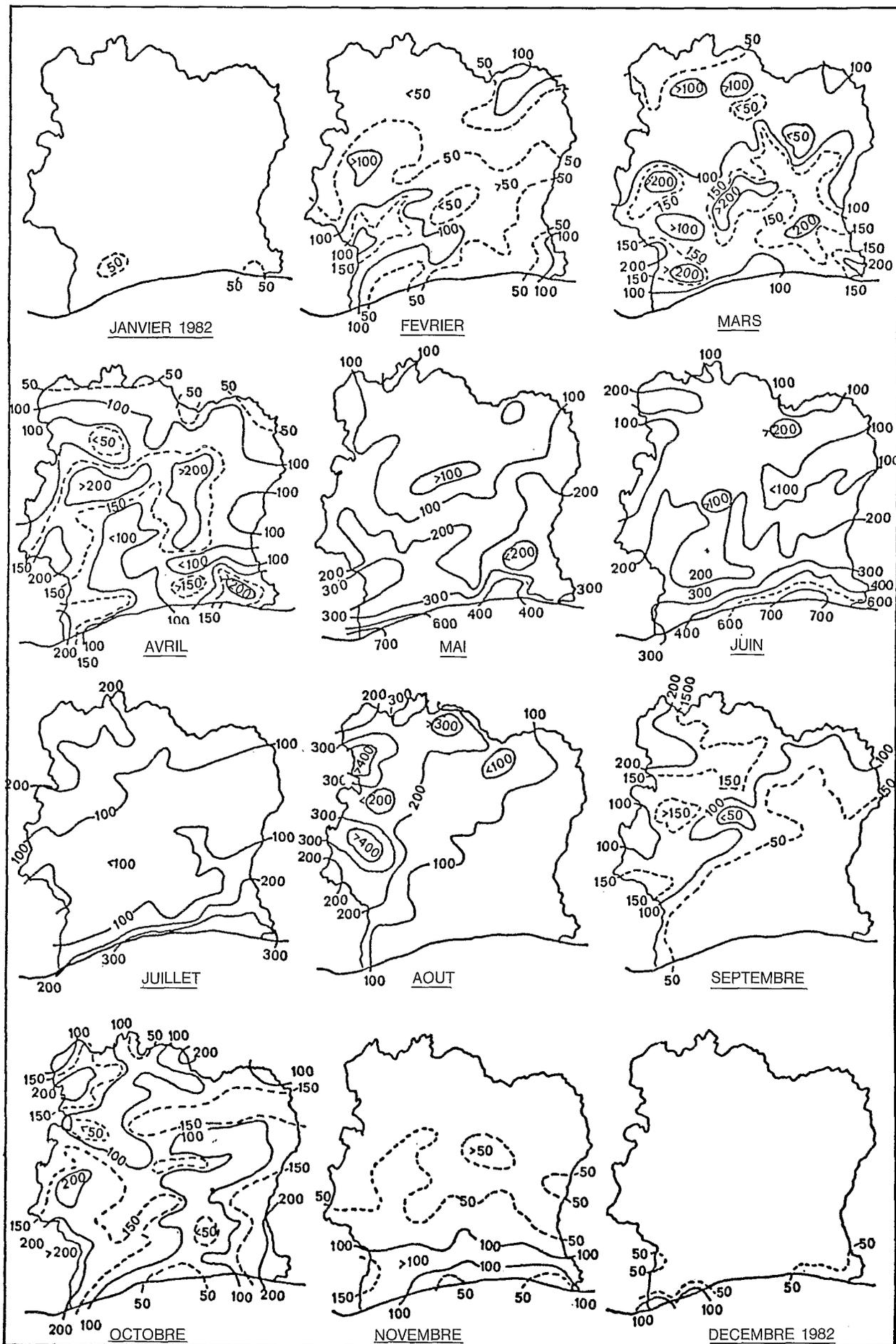


Figure 4. - DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE DES PRECIPITATIONS MENSUELLES SUR LE TERRITOIRE IVOIRIEN POUR 1982. (Anam, Serv. Météorologique).

Cependant, les remontées d'eau froide, au niveau de l'équateur dans la région de 1-4°S, 5-8°W et en bordure des côtes ivoiro-ghanéennes, affectent également les échanges de chaleur latente : de 4 à 5 mm/jour pour une température de surface de 28°C, ils passent de 1 à 2 mm/jour pour 22°C (Flohn, 1983). La figure 5 représente la relation obtenue entre la concentration d'eau atmosphérique, caractérisée par sa tension de vapeur d'eau E au sol, et mesurée à l'arrivée des masses d'air sur le continent et les températures de la surface de l'océan : cette concentration se réduit au contact de cette surface océanique, passant d'un maximum enregistré entre avril-mai à un minimum en août-septembre (E_1 , E'_1 , E''_1 sur le schéma 1).

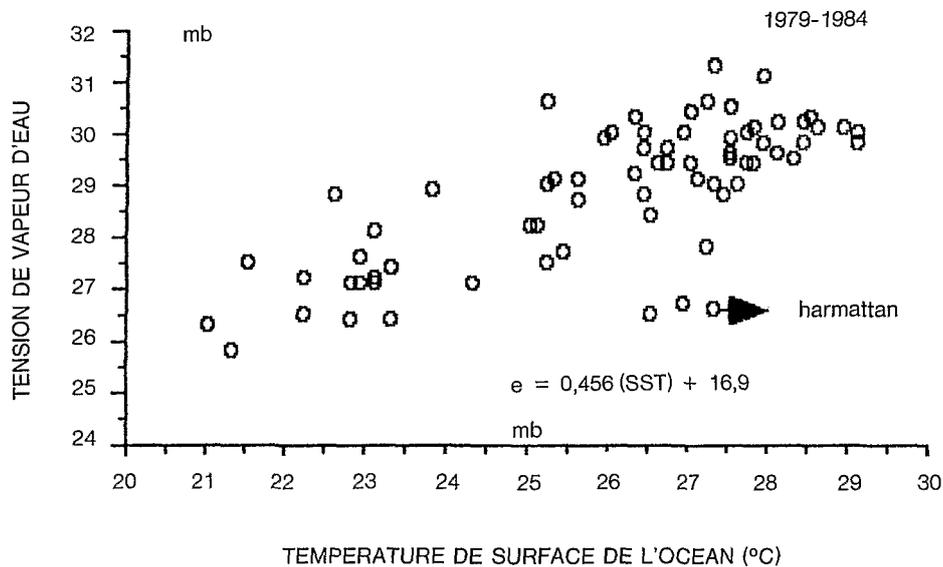


Figure 5. — RELATION ENTRE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE L'OCEAN ET LA TENSION DE VAPEUR D'EAU DE L'AIR A SON ARRIVEE SUR LE CONTINENT.

Si ces remontées d'eau froide se produisent de façon prématurée et avec puissance comme en 1982 et 1983, leur effet se manifeste dès le mois de juin en liaison avec l'importance de l'aire de refroidissement de la surface océanique et de sa durée, deux facteurs qui influencent la concentration de vapeur d'eau de la masse atmosphérique. L'abaissement de la température de la surface océanique influe sur le bilan radiatif qui devient plus faible que précédemment. L'inversion du gradient thermique océan-air provoque un ralentissement de la convection profonde (développement vertical des cumulonimbus) de la ZITC. L'augmentation de la stabilité des masses d'air qui en résulte se répercute sur la répartition des quantités d'eau précipitée : les fortes pluies enregistrées en bordure du Golfe de Guinée en sont la manifestation. Ainsi, les masses d'air, déchargées prématurément d'une bonne partie de leur contenu en vapeur d'eau, ne répartissent plus que de faibles quantités de pluie à l'intérieur du continent. L'exemple de l'année 1982 (figure 4) considérée comme une « année froide » illustre bien le phénomène : en mai et juin, des quantités de pluies importantes sont mesurées en bordure du Golfe, et durant juillet à octobre, les isohyètes de répartition des pluies, abstraction faite des régions à relief de l'ouest ivoirien, sont parallèles à la direction de l'arrivée des masses d'air, c'est-à-dire du SW. En outre, les quantités enregistrées durant ces mois sont plus faibles que la normale. Ce phénomène a également été observé précédemment par Bakun (1978) pour les années 1964 et 1967.

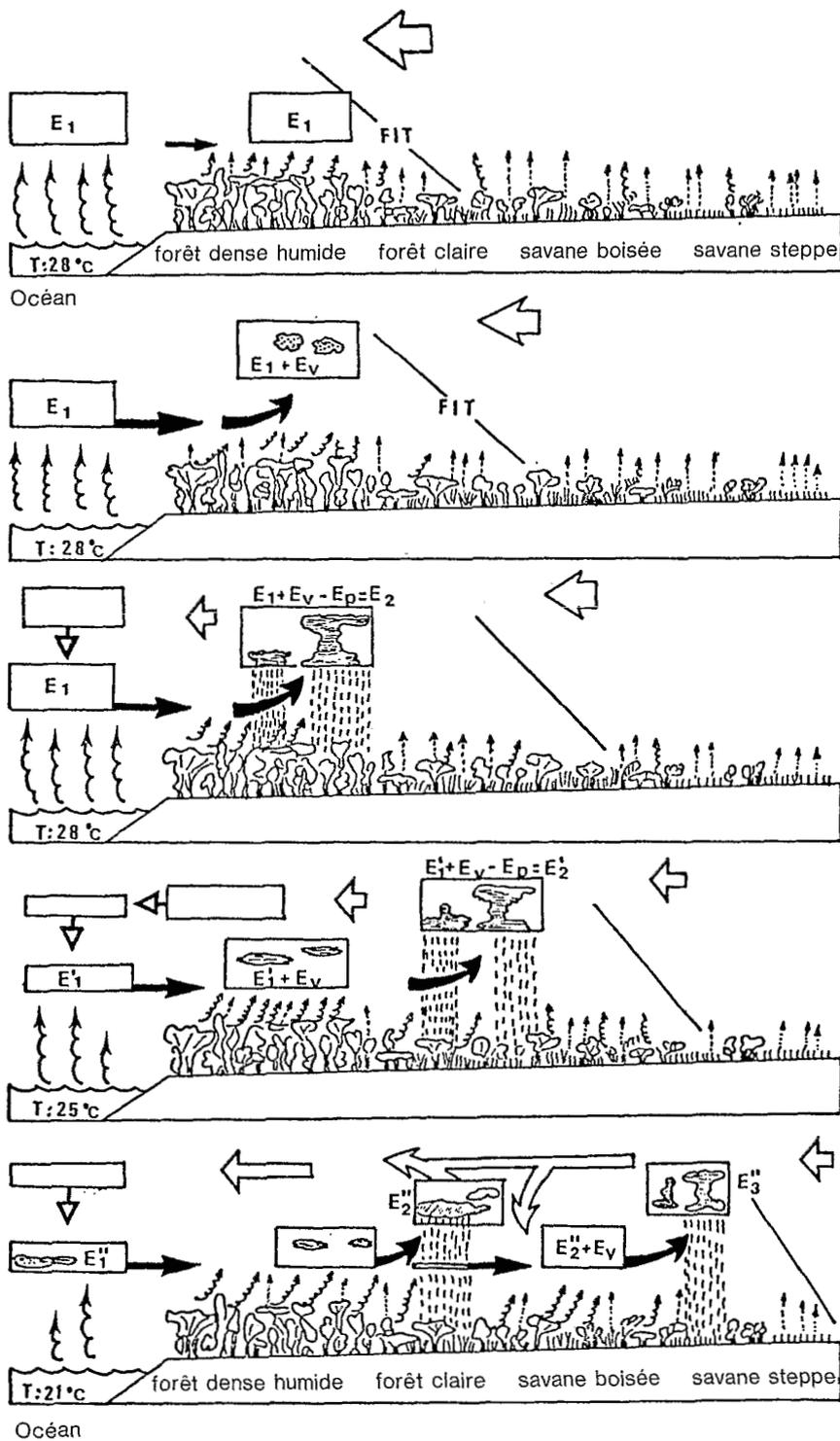


Schéma 1. – TURN-OVER DE LA VAPEUR D'EAU AU-DESSUS DE L'OCEAN ET SON RECYCLAGE AU-DESSUS DU CONTINENT AFRICAIN.

Le système forestier pallie en partie cette réduction de la concentration en vapeur d'eau de la masse atmosphérique par un apport provenant du processus d'évapotranspiration. Toutefois, la réduction **rapide** de la température de surface de l'océan provoque également la formation des nuages du type stratus relativement homogènes qui occultent la végétation. C'est ce qui caractérise la petite saison sèche avec un rayonnement solaire moyen de 1.100 J.cm-2.j. Or, les quantités d'énergie solaire moyenne reçues au sol durant cette période (juillet-septembre 1982) sont parmi les plus faibles qui ont été enregistrées (900 J.cm-2.j.). La figure 6 présente

l'affaiblissement de l'énergie solaire reçue au sol en relation avec l'abaissement de la température de surface de l'océan. Cette réduction des quantités d'énergie disponibles au niveau des couverts forestiers se répercute sur l'évapotranspiration : le transfert n'est plus que de 1 à 2 mm d'eau par jour en août et septembre au lieu des 3 à 5 mm des mois précédents. Cette réduction des échanges de vapeur d'eau sera accentuée par la mise en place, sur une grande échelle, de couverts végétaux dont les possibilités d'exploration du sol sont plus limitées compte tenu de la faible pluviométrie en cette période.

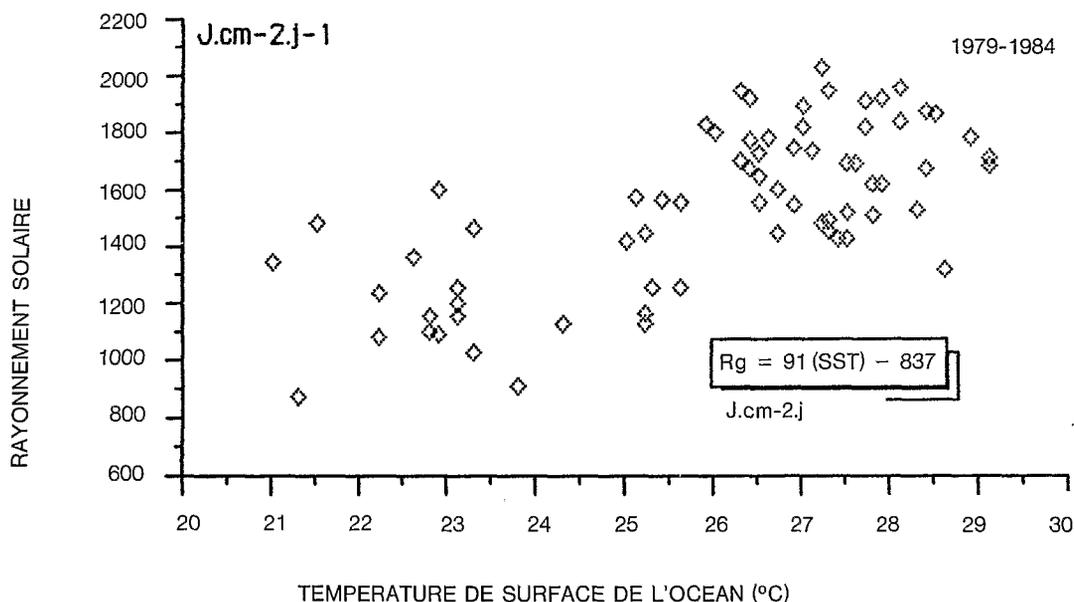


Figure 6. – **RELATION ENTRE LE RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL ET LA TEMPERATURE DE SURFACE DE L'OCEAN (1979-1984).**

Ainsi, à l'apport de vapeur d'eau océanique E_o , il faut ajouter la part jouée par l'évapotranspiration des systèmes forestiers $E_{TR} = E_v$ dans le cycle hydrique continental ; ils y participent activement en absence de facteurs limitants (schéma 1). La couche atmosphérique de l'alizé au-dessus du continent contient donc une quantité de vapeur égale à $E_1 + E_v$. Avec les pluies, une fraction de cette vapeur d'eau se condense et précipite E_p , réduisant sa concentration dans la masse atmosphérique à : $E_1 + E_v - E_p = E_2$ avec $E_1 > E_2$. Avec l'avancée de la ZITC vers l'intérieur du continent, la masse d'air porteuse s'appauvrit en vapeur d'eau : $E_1 > E_2 > E_3 > E_4 \dots$. Ce que confirme une analyse de la concentration de vapeur d'eau atmosphérique au-dessus du continent réalisée pour le mois de juillet 1979 entre le sol et le niveau 850 mb, montrant une réduction progressive du flux de vapeur d'eau, du sud vers le nord du continent (Cadet, 1984).

Par ailleurs, si les caractéristiques liées à l'écosystème forestier sont modifiées d'une part par des feux de brousse répétés et d'autre part par la mise en place de plantes annuelles sur de grandes superficies, les apports de vapeur d'eau à l'atmosphère vont être inférieurs à ceux existant précédemment durant la période cruciale de l'avancée de la ZITC et lors de son retour. Le tableau II compare les bilans hydriques à l'échelle annuelle des valeurs d'évapotranspiration réelle : les évapotranspirations des systèmes végétaux annuels ne représentent qu'une fraction des apports d'eau des pluies compte tenu de la quantité d'énergie solaire reçue, l'état et la durée de développement foliaire et les caractéristiques du sol intervenant sur le ruissellement, l'infiltration et le stockage de l'eau. Les modifications introduites avec les systèmes cultivés ne fonctionnant que durant quelques mois pourraient entraîner des changements physiques au niveau de la couche d'air de mousson en raison :

1) d'une réduction de la quantité d'énergie absorbée, le rapport R_n/R_g passe de 0,75 pour un couvert du type forestier à 0,67 pour une végétation ayant une densité foliaire couvrant le sol ;

2) de l'absence de végétation durant la phase où le sol est nu ou en jachère, phase où le système injecte principalement de l'énergie calorifique dans l'atmosphère ayant pour effet une augmentation de la température de l'air et du sol durant la période diurne. Il en résulte des valeurs thermiques diurnes plus élevées qui perturbent les formations nuageuses ;

3) d'une diminution de l'évapotranspiration des plantes annuelles, en fin du cycle végétatif, lors du retour de la ZITC en septembre-octobre.

Ces modifications de la couverture végétale initiale participeraient à la réduction de la pluviosité (en nombre et en quantité de pluies) dans les régions situées au nord de la zone forestière. Cette réduction est susceptible d'entraîner la modification de la composition floristique des forêts claires et des savanes boisées dont la physiologie serait mieux adaptée aux nouvelles conditions hydriques avec des effets de rétroactions sur l'alimentation en vapeur d'eau des masses d'air. Ainsi, il est à craindre que si la couverture végétale de la zone forestière continue à se

dégrader dans le sens d'une réduction de la période de l'activité biologique, passant de 11-12 mois/an pour tout système pérenne à 4-7 mois pour un système végétal annuel, les échanges énergétiques entre le sol, la végétation et l'atmosphère seront rééquilibrés en défaveur des échanges hydriques. La réduction du transfert de vapeur d'eau, accompagnée d'un accroissement du flux de chaleur sensible, affecte le mécanisme de formation des nuages. Il en découlerait une diminution de la pluviosité dans les régions situées d'abord le plus au nord (Sahel) et ensuite les régions soudanaises. Ce rééquilibrage affecterait la **répartition et la durée de la seconde saison des pluies**, favorisant une des phases de la désertification. Kandel et al. (1984) ont partiellement posé le problème de l'impact qu'aurait la dégradation physiologique de la végétation des régions forestières et soudanaises sur l'affaiblissement du flux de mousson.

CONCLUSION

Cette étude, conduite en zone forestière de l'Afrique de l'Ouest, est une contribution à l'analyse des divers processus d'échange qui se produisent à l'interface du système végétal et de l'atmosphère. Elle montre que ces processus dépendent du type de surface et de ses propriétés physiques et biologiques. Ainsi, il a été constaté que :

- la fraction d'énergie totale absorbée se réduit en passant de la forêt à un couvert de faible hauteur comme les cultures annuelles ;
- la quantité d'eau transférée à l'atmosphère dépend de l'évolution phénologique du système biologique au cours du temps en relation avec les conditions climatiques et l'importance des réserves hydriques du volume de sol exploré par le système racinaire.

A partir des équations obtenues et de l'évolution de certains paramètres pédo-climatiques, la simulation du bilan hydrique du système végétal du type pérenne comme la forêt ou du type annuel comme une culture et jachère, fournit un ordre de grandeur de la fraction d'eau des pluies qui est transférée à l'atmosphère, et qui représente respectivement 65-75 % et 45-55 %.

Or, la transformation du système végétal pérenne est actuellement en cours sur une grande échelle dans cette zone forestière. Cette modification de la couverture végétale entraînera inévitablement une réduction de l'évapotranspiration qui amoindrira la concentration de vapeur d'eau dans les masses d'air, en particulier, au début de l'avancée de la ZITC quand les sols sont dénudés, et lors de son retour, quand la végétation cultivée est en fin de cycle.

A ces modifications qui se produisent à l'interface végétation-atmosphère, s'ajoutent les perturbations du bilan énergétique à l'interface océan-atmosphère, liées aux remontées d'eaux froides équatoriales. En effet, celles-ci affectent les caractéristiques des masses d'air de l'alizé (humidité et température) qui arrivent au-dessus du continent dans la couche limite de la végétation présente. De plus, selon la puissance de l'inversion thermique océanique, le système nuageux formé atténuera plus ou moins fortement l'énergie solaire, réduisant d'autant l'évapotranspiration. La conséquence de l'ensemble de ces modifications se répercute sur la répartition quantitative déficiente des précipitations dans la zone soudanienne au cours de la deuxième saison des pluies.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUBREVILLE, A. 1949. Climats, forêts et désertifications de l'Afrique Tropicale. Soc. Ed. Geogr. Mar. et Colon., Paris, 351 pp.
- BAKUN, A. 1978. Guinea current upwelling. Nature 271 : 147-150.
- BAUMGARTNER, A. et REICHEL, E. 1975. World Water Balance. Mean, annual, global, Continental and Maritime Precipitation, Evaporation and Runoff. 179 pp. Amsterdam : Elsevier.
- BERTRAND, A. 1983. La déforestation en zone de forêt en Côte d'Ivoire. Rev. Bois et Forêts des Tropiques, 202 : 3-17.
- CADET, D.L. et HOUSTON, S.H. 1984. Precipitable water over Africa and the Eastern/Central Atlantic Ocean during the 1979 summer. J. Meteo. Soc. Japan 62 : 761-774.
- CASENAVE, A., FLORY, J., MAHIEUX, A. et SIMON, J.M. 1984. Etude hydrologique des bassins versants de TAI. 1981. Rapport ORSTOM, 88 pp.
- CITEAU, J., GUILLOT, B. et LAHUEC, J.P. 1984. Suivi des déplacements de la zone de convergence en Atlantique : Une des composantes des tendances climatiques dans le Golfe de Guinée. in « La sécheresse en zone intertropicale ». 21-26. Actes du Colloque « Résistance à la sécheresse en milieu intertropical ». DAKAR septembre 1984.

- COLLINET, J., MONTENY, B.A. et POUYAUD, B. 1984. Recherche et aménagement en milieu forestier tropical humide : Le milieu physique.
Projet TAI de Côte d'Ivoire.
Notes Techniques MAB 15, 35-58, UNESCO.
- COMBRES, J.C. 1984. Bilan énergétique et hydrique d'une culture d'ananas. Utilisation optimale des potentialités climatiques.
Compte rendu d'activité. IRFA, 108 p.
- FLOHN, H. 1983. A climate feedback mechanism involving oceanic upwelling, atmospheric CO₂ and water vapour.
in « Variations in the Global Water Budget ». 493-418.
eds. Street-Perrott et al.
- HUTTEL, Ch. 1975. Recherches sur les écosystèmes de la forêt subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire.
La Terre et la Vie 29 : 169-264.
- GUILLOT, B., LAHUEC, J.P., CITEAU, J., BELLEC, B. et NOYAET, A. 1986b. Analyse de l'évolution climatique en Afrique de l'Ouest en 1983-1985 à l'aide de l'imagerie satellitaire et des données conventionnelles. INQUA/1986, Dakar Symposium, INQUA-ASEQUA, ORSTOM-CNRS, p. 173-178.
- GUILLOT, B., LAHUEC, J.P., CITEAU, J., BELLEC, B. et NOYAET, A. 1986b. Analyse de l'évolution climatique en Afrique de l'Ouest en 1983-1985 à l'aide de l'imagerie satellitaire et des données conventionnelles. (sous presse).
- JANICOT, S. 1985. Analyse spatio-temporelle du champ de précipitations annuelles sur l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique Centrale.
Veille Climatologique Satellitaire 10 : 32-44.
- KANDER, R. et COUREL, M.F. 1984. Le Sahel est-il responsable de sa sécheresse ?
Le Recherche 15 : 1152-1154.
- LHOMME, J.P., MONTENY, B.A. et HUMBERT, J. 1981. Evapotranspiration et caractéristiques aérodynamiques d'un gazon et d'une culture de riz en zone intertropicale.
Agronomie 2 : 181-197.
- MERLE, J. 1983. Océan et Climat. Les fonctions thermiques de l'océan dans la dynamique du climat. Une revue des idées actuelles.
La Météorologie 6 : 85-95.
- MONTENY, B.A., HUMBERT, J., LHOMME, J.P. et KALMS, J.M. 1981. Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire.
Agric. Meteor., 23 : 45-59.
- MONTENY, B.A. 1985a. Apport de la bioclimatologie à l'interprétation des interactions végétation-atmosphère et leurs impacts sur les caractéristiques climatiques.
Rapport ORSTOM, 17 pp.
- MONTENY, B.A., BARBIER, J.M. et BERNOS, C.M. 1985 b. Determination of the energy exchanges of a forest type culture : *Hevea brasiliensis*. 211-233 p in « The forest-atmosphere Interaction » ed. B.A. Hutchison and B.B. Hicks.
- MONTENY, B.A. 1986. Importance of the tropical rain forest as an atmospheric moisture source. 6 pp.
Parameterization of the land-surface characteristics.
To be published by the European Space Agency.
ISLSCP Conference held at ROME, Italy, december 1985.
- ODUM, J. 1970. The tropical rain forest at El Verde (Porto Rico) : I 191-I 289.
- PINKER, R.T., THOMPSON, O.E. and ECK, T.F. 1980. The energy balance of a tropical evergreen forest.
J. Appl. Meteor. 19 : 1341-1350.
- PRIESTLEY, C.H. and TAYLOR, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters.
Month Weath. Rev. 100 : 81-92.
- SERVAIN, J. 1985. Influence de l'Atlantique tropical sur les hydroclimats de l'Afrique occidentale et du nordeste brésilien.
Veille Climatologique Satellitaire 10 : 45-53.
- SHUKLA, J. and MINTZ, Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate.
Science 215 : 1498-1501.
- SHUTTLEWORTH, W.J., CASH, J., LLYOD, C., MOORE, C. and ROBERTS, J. 1984. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest.
Quart. J.R. Meteor. Soc. 110 : 1163-1169.