

Histoire de la végétation et du climat de l'Afrique nord-tropicale au Quaternaire récent*

J. MALEY**

RÉSUMÉ

L'examen critique des données polliniques disponibles concernant la végétation saharienne permet de conclure qu'elle n'a subi que peu de changements qualitatifs au cours des vingt derniers millénaires. Il faut essentiellement noter une certaine transgression sur le Sahara des taxons tropicaux de type sahélien vers le milieu de l'Holocène. Quantitativement, quelques données polliniques et géologiques convergent pour indiquer que les plaines sahariennes ont été extrêmement arides entre 20 000 et 15 000 ans BP environ et que sur les montagnes la végétation s'est beaucoup raréfiée. Une certaine recolonisation s'est effectuée à partir de 15 000 ans BP sur les montagnes.

L'étude pollinique de l'Holocène du Bassin du Tchad à Tjéri, vers le centre du bassin, met en évidence un changement majeur vers 7 000 ans BP, caractérisé en zone sahélienne par une brutale extension des taxons arborés jusques vers 5 000 ans BP, correspondant probablement à une extension de la savane sahélienne. Un changement important est intervenu aussi à la même époque sur les zones soudanienne et soudano-quinéenne où s'est produite en particulier entre 7 000 et 4 000 ans BP une extension de certains taxons qui se développent actuellement sur les sols bien drainés des interfluves.

Un tel changement vers 7 000 ans BP se retrouve aussi lorsqu'on examine les diverses données stratigraphiques, sédimentologiques et pédologiques disponibles pour l'Afrique nord-tropicale. En particulier, on observe qu'entre 15 000 et 7 000 ans BP la sédimentation était essentiellement de type argileux avec sur les interfluves le développement d'une pédogenèse de type vertisolique (montmorillonite dominante), tandis qu'après 7 000 ans BP la sédimentation est devenue plus grossière, de type sableux, avec sur les interfluves le développement d'une pédogenèse de type ferrugineux tropical (kaolinite dominante). Il apparaît que le changement marqué de type de sédimentation a correspondu à un changement hydrologique majeur et qu'en particulier le dépôt des sédiments sableux plus grossiers doit être associé à des crues brutales comparables aux crues actuelles.

L'interprétation paléoclimatique de ces données nécessite tout d'abord une connaissance précise de la climatologie dynamique actuelle de ces régions. Il faut ainsi distinguer les pluies qui se forment au sein de la mousson de celles qui se forment plus au nord sur la zone tropicale et particulièrement, au Sahara central. Ces dernières dépendent de dépressions qui sont engendrées par le 'Jet Stream Subtropical' et dans lesquelles la vapeur d'eau précipitée est d'origine équatoriale. Du fait du rôle dynamique de ce Jet dans leur formation, ces dépressions sont appelées dépressions subtropicales. Différentes données montrent que ces dépressions ont joué un grand rôle dans la paléoclimatologie saharienne. En accord avec les botanistes, on définit ainsi une zone climatique particulière du Sahara central.

Diverses études hydrologiques ayant montré qu'en Afrique tropicale un lien direct existe entre le régime des pluies et les caractéristiques de l'écoulement dans les cours d'eau, on peut conclure que le changement hydrologique majeur survenu vers 7 000 ans BP a correspondu à un changement dans le caractère des pluies. On montre que ce changement a résulté d'une modification de la taille des gouttes de pluie. Il apparaît en effet que suivant la taille des gouttes de pluie, l'évolution morphologique du paysage, les caractéristiques hydrologiques des cours d'eau et la granulométrie des sédiments déposés sont différentes. Ainsi on peut conclure qu'entre 15 000 et 7 000 ans BP les pluies fines à gouttes inférieures à 2 mm ont dominé, tandis qu'après 7 000 ans BP environ et jusque vers 4 000 ans BP, ont dominé les pluies à grosses gouttes supérieures à 2 mm, engendrées comme actuellement dans les cumulonimbus des dépressions mobiles.

ABSTRACT

LATE QUATERNARY HISTORY OF VEGETATION AND CLIMATE OF TROPICAL NORTH AFRICA

The critical examination of available pollen data from the vegetation of the Sahara allows one to conclude that this vegetation has gone through but few qualitative changes during the last twenty thousand years. In particular, one notices an extension in the Sahara of tropical Sahel taxa about the middle of Holocene. Quantitatively, some pollen and geological data converge to show that the Saharian plains were extremely arid between about 20 000 and 15 000 years BP and that on the mountains the vegetation became very sparse. A new colonization began on the mountains about 15 000 years ago.

The pollen study of Holocene sediments from the central part of the Chad basin was done in the Tjéri station. The results of this study exhibit a major change near 7 000 years BP, characterized in the Sahel zone by a dramatic extension of arboreal taxa until about 5 000 years BP, probably corresponding to northward extension of the sahel savanna. One important change took place also at the same time in the wet north tropical zone where, between about 7 000 and 4 000 years BP, there occurred an extension of taxa growing presently on the well-leached soils of interfluves.

Such a change near 7 000 years BP also appears in the available stratigraphical, sedimentological and pedological data from tropical north Africa. One observes particularly that, between 15 000 and 7 000 years BP, the

* La présente étude couvre une région qui s'étend essentiellement du Sahara central à la zone soudano-guinéenne (Fig. 1) en excluant la zone de la forêt dense humide. La période étudiée concerne approximativement les 20 derniers millénaires.

** ORSTOM, Laboratoire de Palynologie du CNRS (LA 327), Université des Sciences et Techniques O.P.S.T.O.M. Fonds Documentaire Languedoc, Montpellier 34060 Cedex, France.

17 JANV 1985

N° : 16.503

Cote : B

140

sedimentation was essentially of clay type with a vertisolic pedogenesis (montmorillonite dominant) while, after 7 000 years BP, the sedimentation became coarser, of sandy type, and on the interfluves a pedogenesis of tropical ferruginous type (kaolinite dominant) occurred. It appears that the dramatic change of sedimentation corresponded to a major hydrological change and in particular the deposition of coarser sandy sediments must be associated with flash floods similar to the present-day floods.

The palaeoclimatological interpretation of these data require first a precise knowledge of the present-day dynamic climatology of these regions. So, one must distinguish the rains forming in the monsoon from those which form in the tropical zone farther to the north, particularly in the central Sahara. The latter result from depressions generated by the Subtropical Jet Stream. In these tropical depressions the water vapor precipitated is of equatorial origin. Several data show that these depressions played an important role in the Saharian palaeoclimatology. So, in agreement with the conclusions of botanists, one defines a particular climatic zone across the central part of Sahara.

Several hydrological studies have shown that in tropical Africa there is a direct connection between the rains régime and the characteristics of the river flow. From this fact one can conclude that the major hydrological change of about 7 000 years BP was the result of a change in the character of the rains. One can show that this change resulted from modification in the raindrops size. Indeed, changes in the size of raindrops lead to modifications in the morphological evolution of landscape, in the hydrological characteristics of rivers and in the granulometry of the deposited sediments. So one can conclude that between 15 000 and 7 000 years BP, fine rains with drops smaller than 2 mm dominated whereas, from 7 000 to about 4 000 years BP rains with drops larger than 2 mm, originating, like today, from the cumulonimbus of mobile depressions, were dominant.

1 LE SAHARA CENTRAL

1.1 Introduction

Nos connaissances sur la végétation de l'Afrique nord-tropicale au Quaternaire récent sont dues dans leur quasi totalité à la palynologie. Les premières recherches palynologiques au Sahara central (Fig. 1) furent effectuées essentiellement dans la région du Hoggar par Pons & Quézel (1956, 1958) Quézel & Martinez (1958-59, 1962), puis par Van Campo *et al.* (1964, 1967). Une des principales données qui ressortait des analyses polliniques était la présence, parfois en grande quantité, de pollens provenant de taxons dont l'aire de répartition actuelle ne s'étend pas au Sahara, mais se situe en région tempérée ou (et) en région méditerranéenne.

La possibilité d'un transport par le vent de ces pollens depuis les régions tempérée ou méditerranéenne avait été envisagée dès ces premières études, mais Quézel & Martinez (1959-59) avaient conclu que cela était très improbable, en particulier du fait

que dans les sédiments étudiés se trouvaient fréquemment des fragments de bois de quelques millimètres qui ressemblaient beaucoup à des bois de Conifères. Or comme les spectres polliniques comportaient souvent de nombreux pollens de Conifères, cette donnée semblait être effectivement un argument irréfutable. Toutefois, la détermination de ces fragments de bois n'ayant pas été confirmée dans une publication ultérieure (Quézel, *commun.pers.* 1981), on ne doit donc pas exclure la possibilité d'un transport par le vent de ces pollens.

1.2 La pluie pollinique au Sahara

Cette question a été étudiée en détails dans le Laboratoire de Palynologie de Montpellier et en 1973, Van Campo publiait les premiers résultats d'une étude sur la pluie pollinique actuelle au Sahara occidental, dans laquelle il ressortait en particulier que les pollens de taxons vivant en région méditerranéenne ou tempérée représentaient environ 20% du spectre au Sahara septentrional à

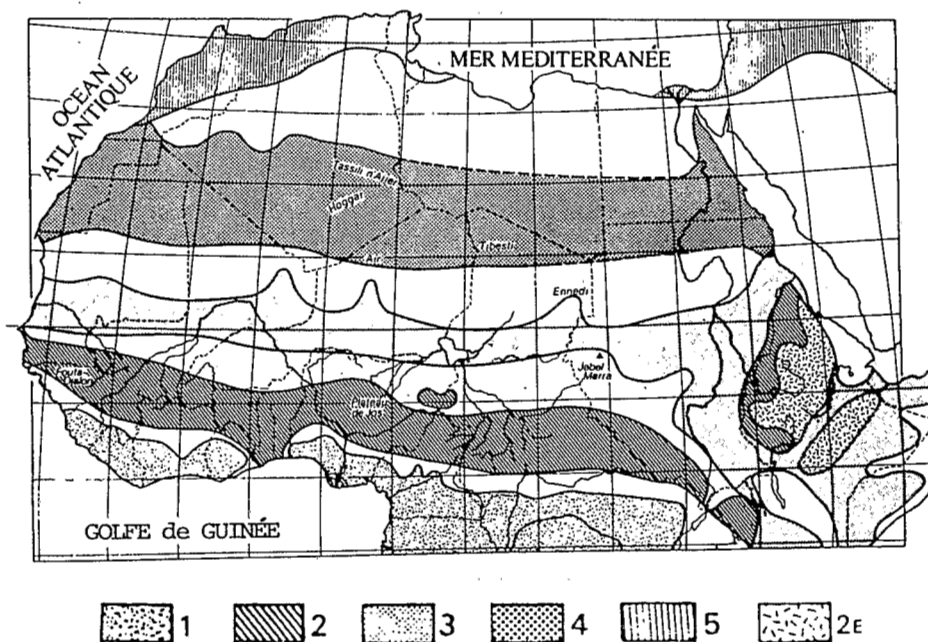


FIG. 1. — Carte schématique des principales zones climatiques et de végétation de l'Afrique au nord de l'équateur. (Sources: entre l'équateur et la zone sahélienne, d'après la carte de végétation de l'AET-FAT, 1958; pour le Sahara, les traits pleins sont d'après Quézel, 1965 et les pointillés sont une estimation, Maley, 1981). Pour les figurés, une zone sur deux est représentée en blanc, avec la légende en 'b'. 1, Zone Guinéenne (Forêt Dense Humide); 1b, Zone de transition (Mosaïque Forêt-Savane); 2, Zone Soudano-Guinéenne (2E, Hauts Plateaux Ethiopiens); 2b, Zone Soudanienne; 3, Zone Sahélienne; 3b, Zone du Sahara méridional ou tropical; 4, Zone du Sahara Central; 4b, Zone Saharo-Sindienne; 5, Zone Méditerranéenne.

TABLEAU 1. — Analyses polliniques de sédiments du Tibesti (Actuel et Pléistocène Supérieur)

Taxons	Petit Trou au Natron		Diatomites du Trou au Natron (Pléistocène terminal)							
	Actuel		n° 688 (ca. 17000 BP)		n° 687		n° 689 (14970±400 BP)		n° 690	
	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%
Gramineae	7	1,5	12	4,4	7	3,9	30	13,9	49	20,0
Cyperaceae	9	1,9	1	0,4	1	0,5	5	2,3	55	22,5
<i>Typha</i>							1	0,4	3	1,2
SM <i>Artemisia</i>	57	12,1			8	4,4	3	1,4	16	6,5
SM cf. <i>Pentzia monodiana</i>	27	5,7								
SM <i>Erica arborea</i>					1	0,5	2	0,9	16	6,5
SS <i>Ephedra</i>	105	22,3								
SS Compositae, tubuliflores	92	19,5			1	0,5			5	2,0
SS <i>Launaea</i>	10	2,1							1	0,4
SS Cruciferae	28	5,9							1	0,4
SS Chenopod.-Amaranthaceae	103	21,9							55	22,5
SS <i>Euphorbia</i>	13	2,7							1	0,4
SS <i>Rhus</i>									3	1,2
SS <i>Moltkia ciliata</i>	1	0,2								
SS <i>Rumex</i>	2	0,4								
SS <i>Silene</i>	1	0,2								
T <i>Tribulus</i>	4	0,8								
T <i>Maerua crassifolia</i>	1	0,2							2	0,8
T <i>Peristrophe bicalyculata</i>									1	0,4
T <i>Acacia</i>									1 (hors compte)	
M <i>Pinus</i>	2	0,4								
<i>Ricinus</i>	4	0,8								
Spores										
<i>Pteris dentata</i>			182	67,4	39	21,8	75	34,9	3	1,2
<i>Pteris vittata</i>			1	0,4	3	1,6	1	0,4	1	0,4
cf. <i>Cheilanthes</i>			10	3,7	18	10,0	21	9,7	1	0,4
<i>Actiniopteris radiata</i>			2	0,7	4	2,2	4	1,8	1	0,4
<i>Anogramma leptophylla</i>			1	0,4	7	3,9	6	2,8	1	0,4
<i>Asplenium cf. aethiopicum</i>							1	0,4		
<i>Ophioglossum</i>			2	0,7	21	11,7	6	2,8	2	0,8
<i>Riccia</i>			1	0,4	5	2,8	1	0,4	2	0,8
Anthocerotales			3	1,1	13	7,2	14	6,5	5	2,0
<i>Reboulia</i>			2	0,7						
Hépatiques					1	0,5			15	6,1
Spores, type monolète lisse	2	0,4	50	18,5	50	27,9	45	20,9	5	2,0
Total des spores	2	0,4	254	94,0	161	89,9	174	80,9	36	14,7
Total autres taxons	466	99,1	13	4,8	18	10,0	41	19,0	208	85,2
Indéterminés	2	0,4	3	1,1	—	—	—	—	—	—
Somme de base	470		270		179		215		244	
Abîmés	42	8,2	1	0,3	8	4,2	13	5,7	35	12,5
Total des pollens comptés	512		271		187		228		279	
SM	17,8		—		4,9		2,3		13,0	
SS	65,2		—		0,5		—		26,9	
T	1,0		—		—		—		1,2	
M	0,4		—		—		—		—	

SM, Saharo-Montagnard; SS, Saharo-Sindien; T, Tropical; M, Méditerranéen.

Béni-Abbès (30°N), 9,25% dans la partie la plus aride du Sahara au centre du Tanezrouft (26°N) et environ 1% à la limite sud du Sahara (21°30'N). Ces données ont été complétées ultérieurement (Cour, 1974; Cour *et al.*, 1973, 1980) et des résultats comparables ont été aussi obtenus en Libye (Schulz, 1979, 1980). Concernant particulièrement les pollens des taxons arborés, les pourcentages au Sahara occidental sont de 5% vers 27°N et de 1% vers 24°N (Cour *et al.*, 1980 et *commun. pers.*). D'après les auteurs ci-dessus, la liste suivante peut-être donnée des taxons arborés dont les pollens sont transportés actuellement au Sahara: *Abies*, *Acer*, *Alnus*, *Betulaceae*, *Buxus*, *Carpinus*, *Castanea*, *Cedrus*, *Corylus*, *Fraxinus*, *Juglandaceae*, *Phillyrea*, *Platanus*, *Quercus*, *Tilia*, *Ulmus*, *Vitis* et *Pinus*.

Etant donné que les pollens d'origine holarctique observés dans les divers sédiments étudiés se retrouvent dans cette liste, il est donc très possible qu'ils aient été aussi apportés par le vent, d'autant plus que les valeurs des pourcentages des pollens transportés actuellement au Sahara sont certainement très inférieures à ce qu'elles seraient, si les végétations dont ils proviennent étaient peu ou pas altérées par l'homme, particulièrement en ce qui concerne la végétation arborée.

Dans les nombreuses analyses polliniques effectuées au cours de la dernière décennie sur des sédiments du Quaternaire récent du Tibesti et du Djado à l'ouest de ce massif (Schulz, 1974, 1979; Maley, 1981), il est apparu que les pollens de taxons holarctiques étaient dans la plupart des analyses totalement ou quasi totalement absents. De ce fait, les forts pourcentages de ces pollens observés par Schulz (1974) dans quelques échantillons du Tibesti apparaissent aberrants et dus certainement à des apports par le vent (Schulz, 1979, 1980).

1.3 Quelques données palynologiques sur la végétation du Tibesti entre environ 17 000 et 6 600 ans BP

Grâce à de nombreuses données stratigraphiques et radiochronologiques, le Tibesti est actuellement le massif saharien dont l'évolution géologique au Quaternaire récent est la mieux connue (Fig. 2). On présente ici des analyses polliniques effectuées sur des dépôts lacustres prélevés sur les hauts plateaux du Tibesti entre 1 800 et 2 700 m et s'échelonnant entre environ 17 000 ans BP et l'Holocène inférieur (Tableaux 1 et 2), période pour laquelle on possède des échantillons pollénifères (Maley, 1981). Pour comparaison, on présente aussi l'analyse pollinique d'une colluvion actuelle venant de cette région (Tableau 1, colonne 1).

L'étude détaillée de ces spectres ayant déjà été publiée ailleurs (Maley, 1981), on ne présente ici que les conclusions principales:

— Malgré la présence d'étendues lacustres importantes au Tibesti entre environ 17 000 ans BP et l'Holocène inférieur — ce qui témoigne de conditions climatiques différentes de l'actuel — la flore pollinique était alors *qualitativement* comparable à celle qui vit actuellement sur les hauts plateaux du Tibesti (Quézel, 1958, 1965). Cette flore pollinique est composée essentiellement de taxons

saharo-montagnards et saharo-sindiens avec aussi un petit nombre de taxons tropicaux, ces derniers étant surtout fréquents sur les flancs de ce massif. Il semble donc qu'au Quaternaire récent la végétation devait être aussi composée essentiellement des éléments saharo-montagnard, saharo-sindien et, dans une moindre mesure, tropical;

— L'importance et la grande variété des spores de Fougères et d'Hépatiques est aussi à noter, alors qu'actuellement leur extension et leur variété sont réduites. Ces plantes devaient probablement vivre surtout à la périphérie des étendues lacustres. Le caractère xérophile de ces Fougères et de ces Hépatiques est à noter. Ce fait est à rapprocher de celui très marqué des taxons saharo-montagnards, saharo-sindiens et tropicaux qui composaient alors l'essentiel de la végétation.

Ces données indiquent clairement qu'une saison sèche annuelle existait à cette époque. On doit donc penser que les extensions lacustres, certaines très importantes (par exemple le lac du Trou au Natron avait une profondeur d'eau de plus de 330 m), peuvent s'expliquer d'abord par une certaine pluviosité annuelle, mais aussi par une réduction de l'évaporation liée à une baisse de la température et probablement à une couverture nuageuse et à des brouillards fréquents (cf. infra et Maley, 1981).

La grande rareté des pollens de Phanérogames dans les deux échantillons du Trou au Natron situés entre environ 17 000 et 15 000 ans BP (n°688 et 687) n'est pas due à l'altération des sédiments, car la matière organique est parfaitement conservée. Il est probable que la raréfaction des taxons saharo-montagnards et saharo-sindiens soit due à la baisse de la température qui, suivant les auteurs, aurait été de 6° à 10°C (Maley, 1981), et à l'extension de la neige et de certains phénomènes périglaciaires sur les hauts plateaux du Tibesti (Messerli, 1972). D'autre part, comme les données géologiques le montrent, le climat désertique intense qui régnait à ce moment dans les plaines du Sahara méridional (Fig. 2) et du Sahara septentrional (Conrad, 1969; Wendorf *et al.*, 1976) avait dû aussi raréfier considérablement la végétation de ces régions.

1.4 Interprétation paléoclimatique: le rôle du 'Jet Stream Subtropical' dans l'évolution climatique du Sahara central

Afin d'essayer de comprendre comment des précipitations pouvaient affecter alors le Sahara central et surtout les zones montagneuses, tandis que les plaines du nord et du sud du Sahara demeuraient très arides, il est nécessaire de faire appel à un système de pluies particulier qui est lié à l'activité de 'Jet Stream Subtropical'. En effet, l'étude détaillée de la climatologie dynamique de la zone nord-tropicale africaine montre qu'actuellement deux systèmes de pluie d'origine différente peuvent exister au Sahara. Sans entrer dans les détails qu'on trouvera ailleurs (Jalu, 1965; Dhonneur, 1974; Flohn, 1971; Maley, 1977, 1981) on observe que, d'une part au cœur de l'été, des pluies se forment dans la mousson lorsque celle-ci s'étend sur le Sahara central après avoir envahi toute la zone nord tropicale africaine. D'autre part, on observe

TABLEAU 2. — Analyses polliniques de sédiments du Tibesti (Holocène inférieur)

Taxons	Emi Koussi n° 1 (Holo.inf.?)		Mouskorbé n° 10 (8530 ± 100)		Mouskorbé n° 9 (6700 ± 140)		Mouskorbé n° 3 (6600 ± 140)		Tarso Yéga n° 5 (7100-6600?)	
	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%
Gramineae	233	24,7	69	12,6	12	4,2	90	25,5	10	3,2
Cyperaceae	47	5,0	16	2,9	4	1,4	35	9,9		
<i>Typha</i>	1	0,1			1	0,3	6	1,7		
SM <i>Artemisia</i>	462	49,0	76	13,9	90	31,8	75	21,2	198	63,0
SM cf. <i>Pentzia monodiana</i>	14	1,5	32	5,8	27	9,5	11	3,1	13	4,1
SM <i>Erica arborea</i>	1	0,1								
SM <i>Galium</i>	4	0,4								
SS <i>Ephedra</i>			3	0,5	27	9,5	3	0,8	8	2,5
SS Compositae, tubuliflores	5	0,5	94	17,2	11	3,9	4	1,1	9	2,8
SS Chenopod.-Amaranth.	4	0,4	143	26,2	48	17,0	2	0,5		
SS Cruciferae	28	2,9	8	1,4	7	2,4	6	1,7		
SS <i>Launaea</i>	1	0,1	6	1,1	6	2,1				
SS <i>Plantago</i>			8	1,4	4	1,4				
SS <i>Zygophyllum</i>			4	0,7	17	6,0			59	18,8
SS <i>Fagonia</i>			1	0,2	3	1,0				
SS <i>Euphorbia</i>	4	0,4	17	3,1	7	2,4	2	0,5	6	1,9
SS <i>Erodium</i>	12	1,2	3	0,5			7	2,0		
SS <i>Aizoon canariense</i>	24	2,5								
SS <i>Phoenix</i>							3	0,8		
SS <i>Silene</i>	8	0,8					1	0,3		
SS <i>Heliotropium</i>	1	0,1	1	0,2						
SS Urticaceae	1	0,1	3	0,5						
SS <i>Moltkia ciliata</i>					1	0,3				
SS Asclepiadaceae					1	0,3				
SS Papilionaceae	1	0,1							2	0,6
SS <i>Rhus</i>	3	0,3			1	0,3				
SS <i>Androcymbium</i>	1	0,1								
T <i>Tribulus</i>	1	0,1	9	1,6	3	1,0				
T <i>Indigofera</i>	1	0,1								
T <i>Aerva persica</i>			2	0,3	1	0,3				
T <i>Chrozophora</i>			1	0,2						
T <i>Acacia</i> (Gummiferae)					1	0,3				
T Combretaceae	1	0,1								
Haloragaceae	49	5,2								
M <i>Pinus</i>					1	0,3				
Spores										
<i>Pteris dentata</i>							10	2,8		
<i>Pteris vittata</i>							4	1,1		
cf. <i>Cheilanthes</i>			1	0,2			10	2,8		
<i>Actiniopteris radiata</i>	1	0,1	1	0,2			4	1,1		
<i>Anogramma leptophylla</i>	4	0,4					1	0,3		
<i>Ophioglossum</i>	2	0,2	12	2,2			12	3,4	5	1,6
<i>Riccia</i>	1	0,1	4	0,7			14	3,9	1	0,3
Anthocerotales	9	0,9	24	4,4	4	1,4	13	3,7	1	0,3
Hépatiques			5	0,9						
Spores, type monolète lisse	17	1,8					38	10,7	2	0,6
Total des spores	34	3,6	47	8,6	4	1,4	106	30,0	9	2,8
Total autres taxons	907	96,3	496	91,0	273	96,4	245	69,4	305	97,1
Indéterminés	1	0,1	2	0,3	6	2,1	2	0,5		
Somme de base	942		545		283		353		314	
Abîmés	50	5,0	76	12,2	55	16,2	56	13,7	45	12,5
Total pollens comptés	992		621		338		409		359	
SM	52,2		19,8		41,3		24,3		67,1	
SS	8,3		53,3		46,7		7,9		26,6	
T	0,3		2,2		1,7		—		—	
M	—		—		0,3		—		—	

Tableau synthétique de la succession des dépôts du Nord-CAMEROUN au TIBESTI.

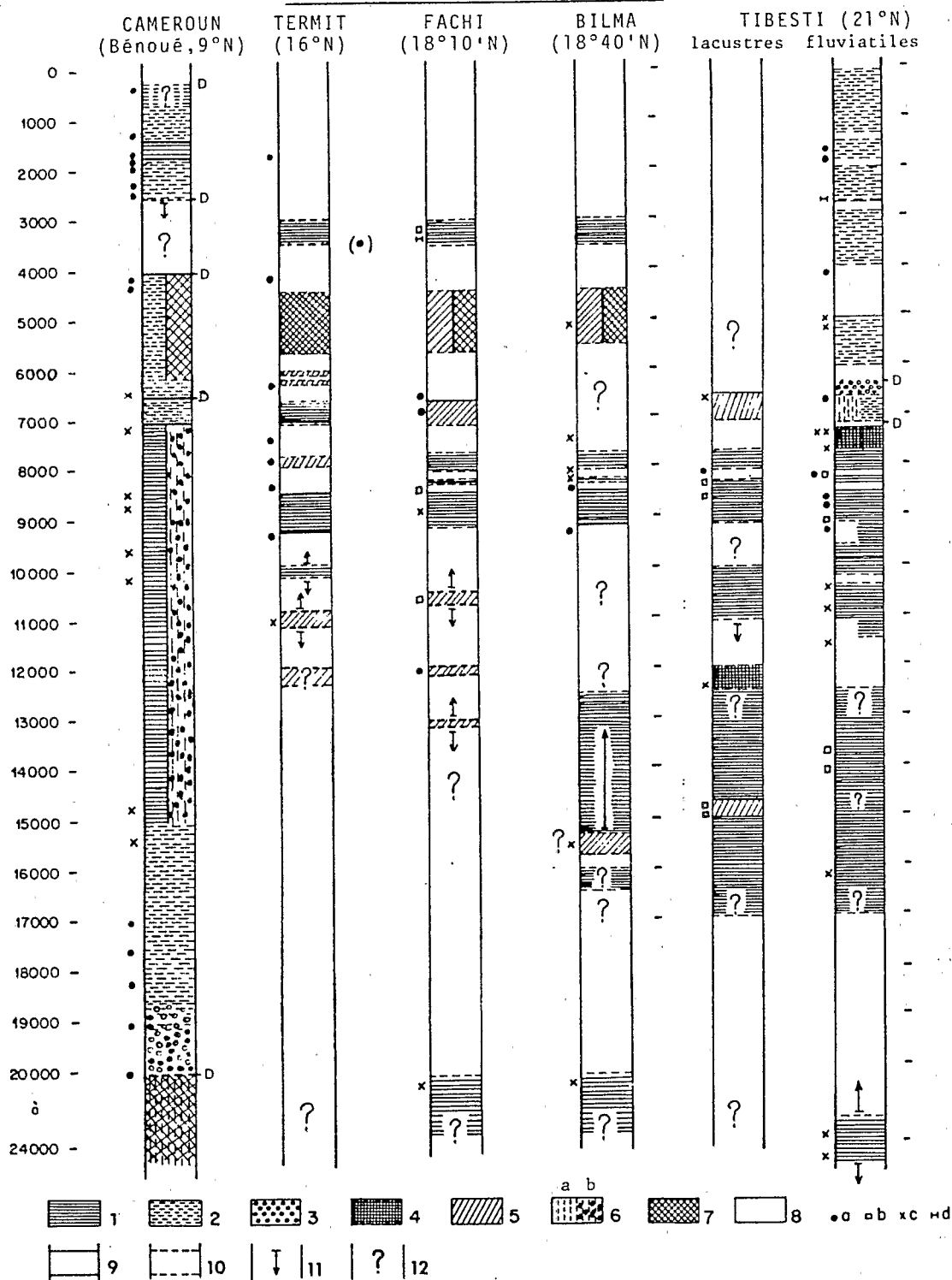


FIG. 2.—Tableau synthétique de la succession des dépôts sédimentaires à la longitude du Bassin du Tchad entre la zone tropicale humide et le Sahara Central pour des lacs ou rivières ayant de relativement petits bassins versant couvrant seulement une zone climatique. 1, Extension lacustre ou dépôts fluviales relativement fins et lités. 2, Sables et cailloutis; 3, Galets; 4, Croûte calcaire; 5, Lac réduit ou marécage; 6a, Paléosols divers; 6b, Vertisols; 7, Cuirasse ferrugineuse ou paléosol de type ferrugineux tropical; 8, Période aride (sables éoliens, etc); 9, Limites relativement bien datées; 10, Limites estimées; 11, Déplacement possible d'une limite chronologique; 12, Données ou périodes à préciser. D, Discontinuité. Position des datations C-14 et nature des échantillons datés: a, sur charbon ou débris végétaux; b, sur coquilles; c, sur calcaire; d, sur os. (•), datation importante dans un site voisin. Maley (1981) pour les références aux données stratigraphiques de base. Note: Les dépôts lacustres de Bilma de la fin du Pléistocène, si leur position chronologique est confirmée, résulteraient probablement d'apports artésiens en provenance du Sahara central (extrait de Maley, 1981).

qu'il y a aussi parfois formation de pluies durant les autres saisons de l'année, alors que le front de la mousson se situe très loin au sud du Sahara. D'un point de vue synoptique, ce second type de pluie se produit, en bref, lorsqu'une coulée d'air polaire s'avance en altitude vers le sud dans une ondulation du 'Jet Subtropical' qui, de l'automne au printemps, circule régulièrement d'ouest en est au-dessus du Sahara. Le système dépressionnaire qui se forme dans la moyenne troposphère à l'avant de l'ondulation du 'Jet', détruit localement et provisoirement l'anticyclone saharien et, en même temps, provoque ou favorise quelquefois de brèves expulsions vers le nord d'air équatorial humide (il ne s'agit pas alors de mousson). L'examen de photos de satellite montre que ces masses d'air humide viennent fréquemment de différents secteurs du Golfe de Guinée et parfois de plus à l'est (Morel *et al.* 1978). Le mélange de l'air polaire d'altitude, toujours très sec, avec l'air humide équatorial, entraîne très rapidement la formation de nuages qui, emportés par le courant directeur du 'Jet' (Fig.3), suivent une trajectoire d'allure parabolique et sont entraînés finalement vers l'est en déversant leurs pluies à travers le Sahara. Actuellement le parcours du Jet coupe parfois transversalement le Sahara et dans ce cas la dépression pluvieuse (ou sèche si elle n'a pas été alimentée en air humide) s'éloigne en direction de la Méditerranée ou du Moyen-Orient.

L'importance pour la paléoclimatologie saharienne des pluies liées à ces dépressions a été déjà postulée par Dubief (1963) puis par Maley (1977, 1981) et Nicholson & Flohn (1980). Une donnée intéressante en ce sens ressort d'une étude isotopique des eaux fossiles du Quaternaire récent d'une partie du Sahara libyen (Edmunds *et al.*, 1979). Ces auteurs (*ibid.*) ont montré que bien que les pluies étaient alors froides, la vapeur d'eau précipitée était d'origine équatoriale. Cette constatation s'explique très bien par ces dépressions pluvieuses qui résultent d'un mélange d'air polaire et d'air humide équatorial. On doit remarquer que seules apparemment les zones montagneuses ont bénéficié de ces pluies entre environ 17 000 ans et le début de l'Holocène. A part les parties basses à la

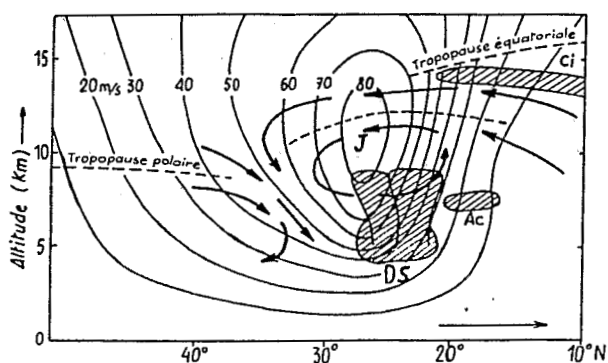


FIG. 3.—Coupe transversale du Jet Subtropical durant la saison fraîche; position d'une dépression subtropicale (DS); Ac, Alto-cumulus; Ci, Cirrus. Les flèches indiquent la circulation transversale au Jet avec développement de subsidence ou de convergence dynamique de part et d'autre de l'axe du Jet (adapté d'après Queney, 1974 et autres sources; Maley, 1981).

périphérie des montagnes qui pouvaient recevoir des écoulements fluviaux ou phréatiques ou éventuellement artésiens, l'absence de traces d'humidité dans les plaines du Sahara central pourrait s'expliquer par la violence des vents de sable à cette époque.

Actuellement, bien que les pluies liées aux dépressions tropicales soient généralement faibles; elles constituent cependant souvent un pourcentage important du total des pluies (Dubief, 1963; Maley, 1981). Ainsi il apparaît que, tout au long de la saison fraîche, d'Octobre à Mai, le 'Jet Stream Subtropical' alors dans sa position latitudinale la plus basse, exerce à long terme un rôle climatique indéniable. Au Quaternaire récent ce rôle s'est manifesté par la formation de la 'Moyenne Terrasse', dépôt fluvial typique du Sahara central, ainsi que par les formations lacustres contemporaines, qui ont été datées entre environ 17 000 et 6 500 ans BP (Fig.2) (Maley, 1977, 1981). Par contre, à l'Holocène moyen, l'érosion de cette terrasse et les sédiments grossiers qui se sont alors déposés dans les vallées (Fig.2), témoignent d'un climat différent (Maley, 1977, 1981). D'après ces données et d'autres exposées brièvement plus bas, il apparaît que les pluies de mousson ont dû alors s'étendre en été au Sahara central en prenant le pas sur les pluies des dépressions tropicales.

Il est donc ainsi possible de définir une zone climatique particulière du Sahara central où alternent et s'interpénètrent au cours du temps, et durant certaines périodes annuellement, des pluies estivales de mousson et des pluies de saison fraîche liées à l'activité du 'Jet Stream Subtropical'. Cette conclusion rejoint les conceptions botaniques de Monod (1944) et en particulier de Quézel (1965) qui a défini une zone de végétation du Sahara central dans laquelle s'interpénètrent des espèces de souche africaine et d'autres de souche mésogéenne ou méditerranéenne. La persistance de plantes reliques sur les montagnes du Sahara (Quézel, 1978; Maley 1980) s'expliquerait par la possibilité particulière de ces montagnes de recevoir des pluies aussi bien durant une phase glaciaire que durant un optimum thermique postglaciaire.

Les données polliniques exposées ci-dessus ainsi que d'autres données présentées plus bas à la fin du paragraphe 2.2, concernant l'extension sur le Sahara à l'Holocène moyen d'un élément tropical de type sahélien, ainsi que des sols ferrugineux tropicaux, ne permettent pas de retenir l'hypothèse avancée précédemment (Quézel & Martinez, 1958-59, carte 2) d'une migration à l'Holocène de taxons méditerranéens sur les montagnes du Sahara central. Hypothétiquement, une telle migration aurait pu se produire entre 30 000 et 40 000 ans ou à d'autres périodes plus anciennes. L'étude palynologique de sédiments lacustres du Sahara septentrional et central situés entre 20 000 et 40 000 ans et plus anciens, serait nécessaire pour pouvoir conclure précisément à ce propos.

TABLEAU 3. — Taxons caractéristiques des pollens déterminés sur la coupe de Tjéri.
Classement par Eléments et groupes écologiques

Elements et groupes ecologiques	
Taxons	
Elément SAHELIEN	
Amaranthaceae (type)	<i>Commiphora africana</i> (Burseraceae)
<i>Acacia</i> , Gummiiferae (Mimosaceae)	Compositae, Tubuliflores
<i>Acacia raddiana</i> (Mimosaceae)	<i>Hyphaene thebaica</i> (Palmae)
<i>Acacia</i> cf. <i>A. senegal</i> (Mimosaceae)	<i>Indigofera</i> sp. (Papilionaceae)
<i>Acacia seyal</i> (Mimosaceae)	<i>Maerua crassifolia</i> (Capparaceae)
<i>Balanites aegyptiaca</i> (Balanitaceae)	<i>Mitracarpus scaber</i> (Rubiaceae)
<i>Borreria</i> sp. (Rubiaceae)	<i>Monechma ciliata</i> (Acanthaceae)
<i>Capparis decidua</i> (Capparaceae)	<i>Oldenlandia</i> sp. (Rubiaceae)
<i>Capparis</i> sp. (Capparaceae)	<i>Salvadora persica</i> (Salvadoraceae)
<i>Celosia trigyna</i> (Amaranthaceae)	<i>Trianthema pentandra</i> (Aizoaceae)
<i>Cocculus pendulus</i> (Menispermaceae)	<i>Tribulus</i> sp. (Zygophyllaceae)
Elément SOUDANIEN	
<i>Allophyllus africanus</i> (Sapindaceae)	<i>Lannea</i> sp. (Anacardiaceae)
<i>Celtis integrifolia</i> (Ulmaceae)	<i>Mitragyna inermis</i> (Rubiaceae)
<i>Clematis hirsuta</i> (Ranunculaceae)	<i>Morelia senegalensis</i> (Rubiaceae)
Combretaceae	<i>Prosopis africana</i> (Mimosaceae)
<i>Dombeya quinqueseta</i> (Sterculiaceae)	
Elément SOUDANO-GUINEEN	
<i>Adina</i> sp. (Rubiaceae)	<i>Hymenocardia acida</i> (Euphorbiaceae)
<i>Alchornea cordifolia</i> (Euphorbiaceae)	<i>Nauclea</i> sp. (Rubiaceae)
<i>Bridelia ferrugina</i> (Euphorbiaceae)	<i>Olea hochstetteri</i> (Oleaceae)
<i>Bridelia</i> cf. <i>B. scleroneura</i> (Euphorbiac.)	<i>Uapaca</i> sp. (Euphorbiaceae)
<i>Elaeis guineensis</i> (Palmae)	
Elément MONTAGNARD (Tibesti)	
<i>Artemisia</i> sp. (Compositae)	<i>Pentzia monodiana</i> (Compositae)
<i>Ephedra</i> sp. (Ephedraceae)	<i>Plantago</i> (Plantaginaceae)
<i>Erica arborea</i> (Ericaceae)	<i>Silene</i> sp. (Caryophyllaceae)
Groupe des Plantes HYGROPHILES	
<i>Cissus ibuensis</i> (Vitaceae)	<u>Spores</u>
<i>Hygrophila</i> sp. (Acanthaceae)	<i>Azolla africana</i> (Azollaceae)
<i>Ipomoea</i> sp. (Convolvulaceae)	<i>Ceratopteris cornuta</i> (Adiantaceae)
<i>Laurembergia tetrandra</i> (Haloragaceae)	<i>Ophioglossum</i> sp. (Ophioglossaceae)
<i>Ludwigia</i> sp. (Onagraceae)	Spore monolète
<i>Nymphaea</i> sp. (Nymphaeaceae)	
<i>Polygonum</i> sp. (Polygonaceae)	
<i>Sesbania pachycarpa</i> (Papilionaceae)	

2 LA ZONE SAHELIENNE

2.1 *Le Pléistocène terminal*

La grande phase aride de la fin du Pléistocène supérieur a affecté aussi la zone sahélienne (Fig.2) et ce n'est que vers 13 000 ans BP que quelques dépôts lacustres très limités réapparaissent au Tchad. Au Kanem, au NE du lac actuel, l'étude des diatomées (Servant-Vildary, 1978) a montré le caractère saumâtre de ces étendues lacustres qui étaient alimentées en grande partie par la nappe phréatique et par des apports fluviaux allochtones venant de la zone tropicale humide (Fig.2 et Maley, 1981). L'étude des pollens montre une apparition timide de la végétation sahélienne entre environ 13 000 et 12 500 ans BP. L'amélioration climatique s'est poursuivie ensuite entrecoupée de phases arides (Fig.2). C'est apparemment seulement vers 10 100 ans BP qu'ont pu exister brièvement dans des petits bassins isolés de la zone sahélienne des lacs alimentés essentiellement par les pluies régionales (Fig.2 et Maley, 1981). La végétation sahélienne a pris durant cette courte période une première extension comparable à ce qu'elle sera ensuite à l'Holocène inférieur. Une phase aride relativement importante centrée vers 9 700 - 9 500 ans BP se situe au tout début de l'Holocène avant la transgression lacustre de l'Holocène inférieur datée approximativement de 9 200 à 8 500 ans BP.

2.2 *L'Holocène*

L'évolution de la végétation au cours de l'Holocène a été étudiée sur la coupe de Tjéri située au Kanem vers le centre du Paléotchad (Servant, 1973; Maley, 1981). Seuls les principaux résultats sont présentés ici, l'étude palynologique détaillée de cette coupe ayant été publiée récemment par ailleurs (Maley, 1981). Les pollens observés dans les 46 échantillons étudiés ont été classés suivant l'appartenance écologique des taxons dont il sont issus et aussi d'après la dominance actuelle plus ou moins marquée de ces taxons dans les différentes zones climatiques du bassin du Tchad (Tableau 3). Les principaux résultats sont synthétisés sur les Figs 4 & 5.

L'étude des diatomées, effectuée sur les mêmes échantillons que ceux utilisés par la palynologie, a permis à Servant-Vildary (1978) de tracer une courbe de la variation de la profondeur de l'eau à la station de Tjéri (Fig.5, courbe a). Vu la position de cette station, cette courbe retrace l'évolution des niveaux du Paléotchad durant l'Holocène. Il apparaît aussi que les principales phases d'extension lacustre mises en évidence grâce à la géologie en divers points de la zone du Paléotchad (Servant, 1973; Maley, 1981), se retrouvent sur cette courbe. Cette concordance est importante car elle permet en particulier de préciser la chronologie de la coupe de Tjéri (Fig.5d). De cette manière on voit que la phase du Paléotchad maximum ou Mégatchad (cordons lacustres vers 320 m), que diverses données situent à l'Holocène moyen (Servant 1973; Maley, 1981), correspond à l'extension maximum de cette courbe (Fig.5a). Il est ainsi possible de corréliser la

diminution majeure des pourcentages des pollens de l'élément sahélien (Fig.5, courbe c, phase III) à la grande phase aride située vers 7 500 ans BP. Cette phase aride, bien mise en évidence par des données géologiques (Servant, 1973), a affecté surtout la zone sahélienne ainsi que le Sahara méridional et central (Fig.2). On doit donc conclure que la transgression mise en évidence par les diatomées durant la phase III, n'a pu être causée que par des apports fluviaux allochtones à la zone tropicale sèche. L'examen des données palynologiques et le fait bien établi que les fleuves du bassin du Tchad transportent des pollens depuis leurs zones d'alimentation (Maley, 1972, 1981), montrent que ces apports fluviaux venaient de la zone tropicale humide. En effet, dans le contexte climatique de cette époque, le maximum atteint durant la phase III par les pollens de l'élément soudano-guinéen (Fig.5, courbe b), signifie que les apports fluviaux allochtones alimentant le Paléotchad venaient de la zone tropicale humide qui s'étend sur le sud du bassin du Tchad, où les fleuves Chari et Logone prennent leur source. Des données purement physiques concernant le bassin adjacent du Niger dont les sources (Bénoué et haut Niger) se trouvent essentiellement en zone tropicale humide, indiquent que les apports fluviaux dans le Golfe de Guinée ont été aussi maximum entre 8 500 et 7 000 ans BP (Pastouret *et al.*, 1978). Un tel déphasage climatique n'est pas un phénomène isolé car d'autres déphasages comparables ont pu être mis en évidence à d'autres époques comme vers le milieu du 1er millénaire AD et au 17^e s.AD (Maley, 1981).

Concernant l'évolution de la végétation en zone sahélienne, les données polliniques de Tjéri montrent en particulier que les taxons arborés ont dominé à l'Holocène moyen. Cette extension de la végétation ~~de la végétation~~ arborée peut-être associée, d'une part au maximum survenu à cette époque des pollens de l'élément soudanien (Fig.4) qui est composé surtout de taxons arborés (Tableau 3), et d'autre part à l'extension sur le Sahara méridional des sols de type ferrugineux tropical, avec parfois formation de cuirasses ferrugineuses (Fig.2). Ces diverses données semblent indiquer qu'il y a eu à l'Holocène moyen un certain glissement vers le nord des zones climatiques, accompagné probablement d'une certaine extension de l'élément tropical sahélien sur le Sahara méridional et central (cf. supra, fin I,4) Maley, 1977, 1981)

3 LA ZONE TROPICALE HUMIDE

3.1 *Quelques données polliniques d'âge holocène*

On ne possède pas actuellement pour cette zone de données polliniques obtenues in situ. Toutefois, quelques données indirectes sont obtenues par les pollens apportés par les fleuves qui se jetaient dans le Paléotchad. A ce propos, il est intéressant de remarquer que les pollens qui sont transportés actuellement dans le lac Tchad depuis la zone soudano-guinéenne (Maley, 1972, 1981), sont les mêmes que ceux qui se sont déposés dans les sédiments de Tjéri au cours de l'Holocène (Tableau 3). Cela tendrait à prouver que durant cette période

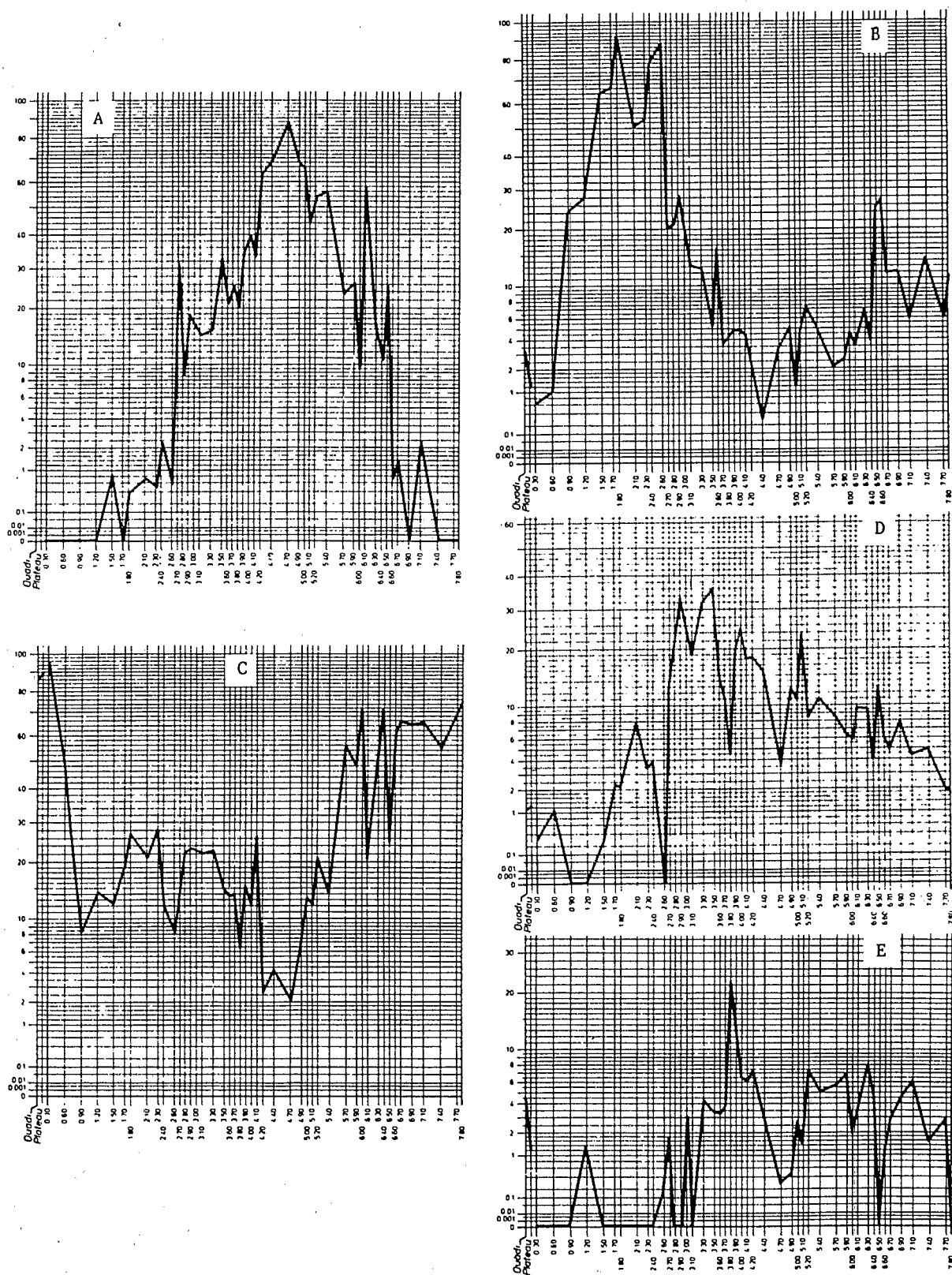
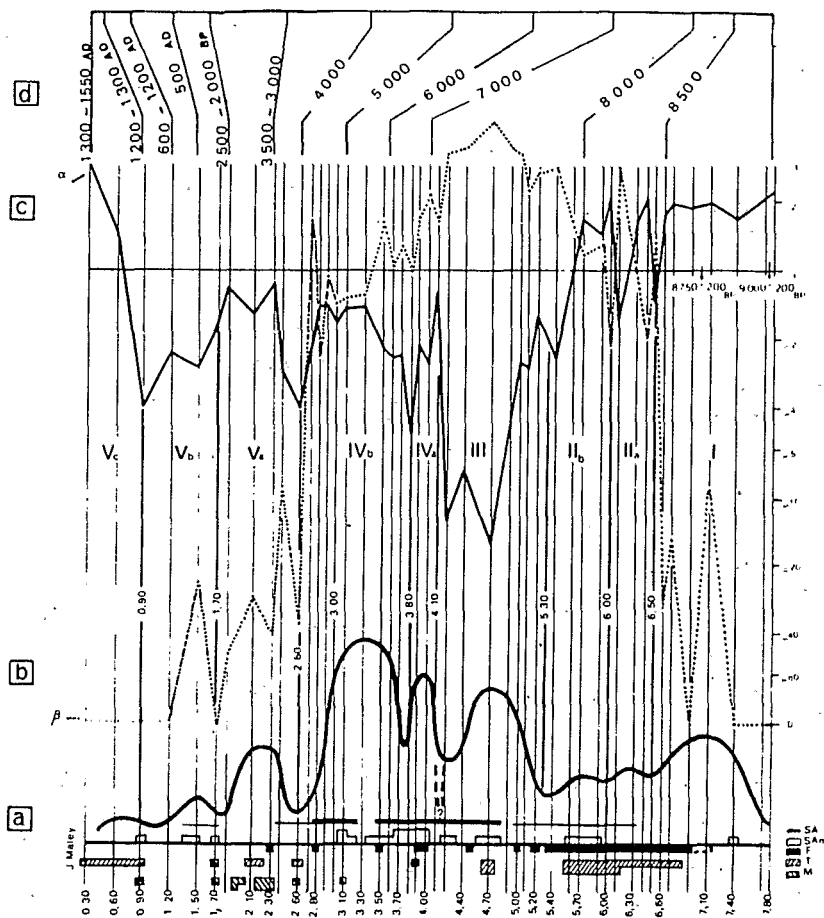


FIG. 4.—Coupe de Tjéri. Evolution des pourcentages relatifs des pollens des différents éléments et groupes écologiques présentée sur une échelle à progression variable, intermédiaire entre la progression arithmétique et la progression logarithmique (fonction puissance 0,33) (Terouanne *et al.*). A, Elément Soudano-Guinéen; B, Plantes Hygrophiles; C, Elément Sahélien, D, Elément Soudanien; E, Elément Montagnard (Tibesti). (Extrait de Maley, 1981).

FIG. 5.—Evolution comparée pour la coupe de Tjéri, de bas en haut (extrait de Maley, 1981): a, Niveaux lacustres relatifs d'après les diatomées (Servant-Vildary, 1978); quelques diatomées écologiquement importantes: SA, *Stephanodiscus astrea*; SAm, *Stephanodiscus astrea* var. *minutula*; F, diverses diatomées psychrophiles, surtout *Cymatopleura elliptica* et *Melosira italica* var. *valida*; T, *Cyclotella ocellata*; M, *Melosira italica*. b, Courbe pollinique de l'élément soudano-guinéen (en pointillés), B pourcentages actuels. c, Courbe pollinique de l'élément sahélien (trait plein), α pourcentages actuels. Les deux courbes b et c ont été construites en utilisant le rapport à la moyenne (valeur 1) sur une échelle logarithmique. d, Chronologie partiellement reconstituée d'après diverses corrélations régionales. Vers la base deux datations au radiocarbone.



et par rapport à l'actuel, il n'y a pas eu de changements qualitatifs marqués de la végétation dans la partie méridionale du bassin. Concernant les pollens déterminés jusqu'à l'espèce, on peut cependant noter que ceux d'*Alchornea cordifolia*, qui se développe surtout sur les sols hydromorphes du fond des vallées, ont dominé durant l'Holocène inférieur, tandis que le pollens d'*Hymenocardia acida* qui se développe surtout sur les sols bien drainés des interfluves, ont nettement dominé à l'Holocène moyen jusque vers 4 000 ans BP.

3.2 Données pédologiques et géologiques

Il est certain que ces données polliniques préliminaires devront être précisées et confirmées par des recherches palynologiques effectuées dans le sud du bassin du Tchad ou à son voisinage. Il faut toutefois remarquer que des données venant d'autres disciplines convergent tout à fait avec ces données polliniques. En effet, il apparaît que sur la zone tropicale humide, non seulement vers le sud du bassin du Tchad (Fig. 2), mais aussi plus à l'ouest sur l'Afrique occidentale, le Pléistocène terminal à partir d'environ 15 000 ans BP et l'Holocène inférieur jusque vers 7 000 ans BP, ont été caractérisés par l'extension de sols hydromorphes de type vertisolique avec développement de montmorillonite et formation de nodules calcaires. Il faut noter que ces sols nécessitent une certaine saison sèche annuelle. Ensuite, à l'Holocène moyen, entre environ 7 000 et 4 000 ans BP, ces régions ont vu l'extension de sols de types ferrugineux tropicaux qui se développent sur les substrats sableux et bien

drainés des interfluves avec formation de kaolinite. Ces types de sol nécessitent aussi une saison sèche annuelle (pour ces divers sols et les néoformations argileuses associées, (cf. Bocquier *et al.*, 1970; Bocquier, 1973; Millot, 1978).

Par ailleurs des données géologiques et sédimentologiques obtenues pour les grands bassins de la zone nord-tropicale africaine (Nil Bleu, Tchad, Bénoué-Niger, Sénégal), montrent que, corrélativement à la formation des sols de type vertisolique entre 15 000 et 7 000 ans BP environ, les fleuves transportaient et déposaient essentiellement des matériaux très fins de type argileux, dont une grande partie était d'origine éolienne (Maley, 1981), tandis qu'entre 7 000 et 4 000 ans BP environ, associée à une nette reprise de l'érosion, la charge alluviale devint plus grossière avec des dépôts de type sableux (Maley, 1981). Ainsi on peut conclure qu'entre 15 000 et 7 000 ans BP environ les cours d'eau étaient lents, à débit régulier et avec de nombreux méandres, tandis qu'entre 7 000 et 4 000 ans BP environ, les crues devinrent très brutales, comme on l'observe actuellement. Durant cette seconde phase, le tracé des fleuves se modifia pour devenir plus rectiligne, comme le sont par exemple les chenaux sableux remontant à cette époque qui ont été observés dans la plaine d'inondation du Tchad.

3.3 Interprétation paléoclimatique

La conclusion principale qui ressort de ces données est qu'un changement hydrologique majeur est survenu vers 7 000 ans BP. Ce changement est à lier directement à un changement dans le régime des

pluies car diverses études hydrologiques conduites sur la zone nord tropicale africaine (Rodier, 1964) ont bien montré le lien direct qui existe entre le régime des pluies et les caractéristiques de l'écoulement dans les cours d'eau.

Lorsqu'on étudie le régime actuel des pluies sur ces régions, on doit noter en particulier qu'il y a deux types principaux de pluie suivant leur position dans la mousson (Dhonneur, 1974).

— A l'avant du front de la mousson se trouve ce que les météorologistes appellent la zone C1 et qui est caractérisée par le passage de *dépressions mobiles* ou lignes de grains formés par d'épais *cumulonimbus*. L'ensoleillement et l'évaporation sont importants entre le passage des dépressions mobiles.

— A l'arrière de cette zone se trouve la zone C2 qui est caractérisée par des *dépressions quasi-stationnaires* constituées de *nuages de type stratiforme*. L'évaporation est réduite du fait de l'importance de la nébulosité.

Par ailleurs, étant donné que la taille des gouttes de pluie dépend surtout de la profondeur des nuages (Mason, 1971), les gouttes qui viennent des cumulonimbus ont en grande majorité des diamètres supérieurs à 2 mm, tandis que celles qui viennent des nuages stratiformes ont des diamètres essentiellement inférieurs à 2 mm (Wexler, 1954; Barat, 1957).

Ces distinctions sont très importantes car Barat (1957) a montré dans ses recherches sur la pluie en

Afrique tropicale et à Madagascar, que l'érosion des sols est très différente suivant la taille des gouttes de pluie (Fig.6). Les pluies des dépressions quasi-stationnaires (pluies homogènes de Barat), dont les gouttes sont en majorité inférieures à 2 mm, s'infiltrent instantanément ou avec seulement un faible ruissellement pelliculaire sans érosion notable. Les études de Hurault (1975) conduites dans l'Adamaoua, montrent que ce ruissellement pelliculaire conduit à la formation de sédiments fins dans les cours d'eau. Par ailleurs, du fait du volume et du poids relativement importants de la majorité des gouttes de pluie des dépressions mobiles (pluies hétérogènes de Barat), le ruissellement violent qui en résulte conduit à une forte érosion des sols. Dans les cours d'eau il en résulte des dépôts de sédiments grossiers de type sableux (Hurault, 1975). Ainsi on peut conclure, en bref,

— que le dépôt des alluvions argileuses et le développement des sols de type vertisolique entre 15 000 et 7 000 ans BP environ, ont été dûs à une grande extension des pluies fines et des nuages stratiformes, au détriment des pluies à grosses gouttes et des cumulonimbus. L'importance de la poussière saharienne poussée par le vent sur la zone nord-tropicale a dû jouer un grand rôle à cette époque dans l'extension des pluies fines et des sédiments fins (Maley, 1981, 1982)

— que, par contre, après 7 000 et jusque vers 4 000 ans BP, le dépôt de sédiments plus grossiers et la formation des sols ferrugineux tropicaux ont été dûs

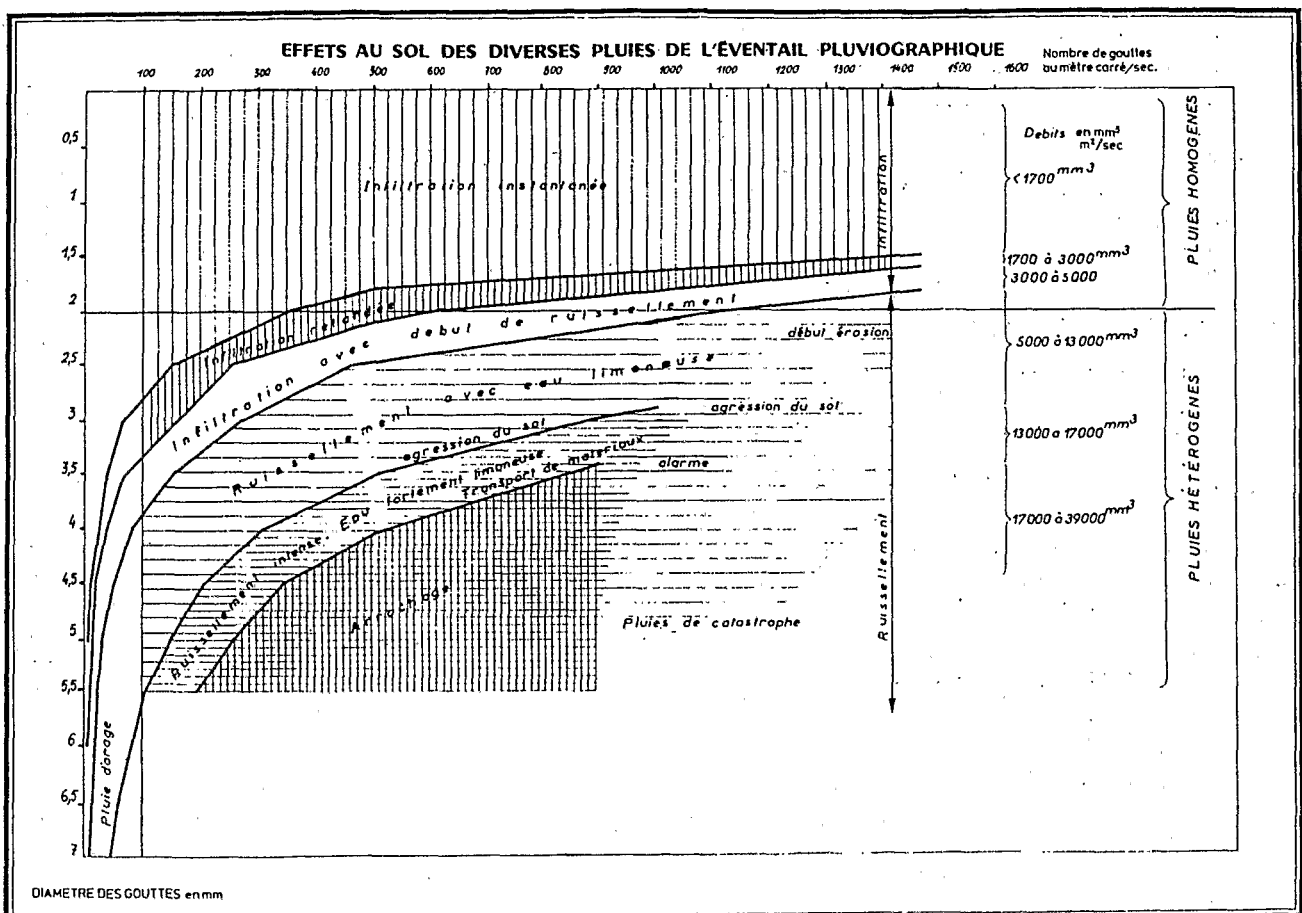


FIG. 6. — Effets au sol des diverses pluies de l'éventail pluviographique (Extrait de Barat, 1957).

à la brutale réapparition et domination des pluies à grosses gouttes des cumulonimbus.

Ainsi, sans changement notable de la longueur de la saison des pluies, il apparaît que des modifications des caractéristiques de la pluviosité et particulièrement des types de nuages, résultant de l'extension de la zone C2 au détriment de la zone C1 ou vice versa, sont capables de provoquer des changements majeurs en hydrologie, sédimentologie, pédologie, géomorphologie et finalement dans la végétation (cette hypothèse est exposée plus en détails dans Maley, 1981, 1982).

4 REMERCIEMENTS

Cet article a été écrit durant un séjour de l'auteur comme Research Associate avec le Professeur D.A. Livingstone au Zoology Department, Duke University, Durham, USA. Ce séjour a été possible grâce, d'une part, à la National Science Foundation par le Grant ATM 80-03516 à D. A. Livingstone et d'autre part, grâce à l'appui financier de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), Paris.

BIBLIOGRAPHIE

- BARAT, C., 1957. Pluviologie et aquidimétrie dans la zone intertropicale. *Mém. Inst. fr. Afr. noire* 49 pp 80.
- BOCQUIER, G., 1973. Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. *Mém. ORSTOM, Paris* 62:350.
- BOCQUIER, G., PAQUET, H., & MILLOT, G., 1970. Un nouveau type d'accumulation oblique dans les paysages géochimiques : l'invasion remontante de la montmorillonite. *C.r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris Sér. D.* 270:460-463.
- CONRAD, G., 1969. *L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien*. Publ. C N R S, Paris, Sér. Géol. 10:527.
- COUR, P., 1974. Nouvelles techniques de détection des flux et des retombées polliniques : étude de la sédimentation des pollens et des spores à la surface du sol. *Pollen Spores* 16:103-141.
- COUR, P., GUINET, P., COHEN, J. & DUZER, D., 1973. Reconnaissance des flux et des retombées polliniques et de la sédimentation actuelle au Sahara nord-occidental. *Proc. 3rd Int. Palyn. Conf., Moscow* 41-58.
- COUR, P. & DUZER, D., 1980. Action actuelle des courants atmosphériques sur la dissémination des pollens au Sahara et dans les régions climatiques avoisinantes le long d'un transect Oran-Abidjan. *Mém. Mus. natn. Hist. nat., Paris Sér. B.* 27:66-79.
- DHONNEUR, G., 1974. *Nouvelle approche des réalités météorologiques de l'Afrique Occidentale et Centrale*. Thèse Doct. Ing. 2 t. Dakar: ASECNA.
- DUBIEF, J., 1963. Le climat du Sahara. L'eau atmosphérique au Sahara. *Mém. hors série, Inst. Rech. sahar.* 2, 1:275.
- EDMONDS, W.M. & WRIGHT, E.P., 1979. Groundwater recharge and palaeoclimate in the Sirte and Kufra basins, Libya. *J. Hydrol.* 40:215-241.
- FLOHN, H., 1971. Tropical circulation pattern. *Bonn. met. Abh.* 15:55.
- HURAU, J., 1975. Surpâturage et transformation du milieu physique. Formations végétales, hydrologie de surface, géomorphologie. L'exemple des hauts plateaux de l'Adamaoua (Cameroun). *Étud. Photo-Interpret.* 7:218.
- JALU, R., 1965. Note sur le déclenchement des dépressions tropicales sahariennes. *La Météo., Paris* 78:113-127.
- MALEY, J., 1972. La sédimentation pollinique actuelle dans la zone du lac Tchad (Afrique centrale). *Pollen Spores* 14:263-307.
- MALEY, J., 1977. Palaeoclimates of central Sahara during the early Holocene. *Nature* 269:573-577.
- MALEY, J., 1980. Les changements climatiques de la fin du Tertiaire en Afrique : leur conséquence sur l'apparition du Sahara et de sa végétation. In M.A.J. Williams & H. Faure, *The Sahara and the Nile* 63-86. Rotterdam : Balkema.
- MALEY, J., 1981. *Études palynologiques dans le bassin du Tchad et Paléoclimatologie de l'Afrique nord tropicale de 30 000 ans à l'époque actuelle*. Thèse Sc., Université Montpellier. Travaux et Documents de l'ORSTOM, Paris 129:586.
- MALEY, J., 1982. Dust, clouds, rain types and climatic variations in tropical north Africa. *Quaternary Res.* 18: 1-16.
- MASON, B.J., 1971. *The physics of clouds* pp. 671. Oxford: University Press.
- MESSERLI, B., 1972. Formen und Formungsprozesse in der Hochgebirgsregion des Tibesti. *Hochgebirgsforschung, Innsbruck* 2:23-86.
- MILLOT, G., 1978. Clay genesis. In R.W. Fairbridge & J. Bourgeois, *The encyclopedia of sedimentology, Encyclopedia of earth sciences* 6:152-155.
- MOREL, P., DESBOIS, M. & SZEJWACH, G., 1978. A new insight into the troposphere with the water vapor channel of Meteosat. *Bull. Am. met. Soc.*, 59:711-714.
- NICHOLSON, S.E. & FLOHN, H., 1980. African environmental and climatic changes and the general atmospheric circulation in late Pleistocene and Holocene. *Climatic Change* 2:313-348.
- PASTOURET, L., CHAMLEY, H., DELIBRIAS, G., DUPLESSY, J.C. & THIEDE, J., 1978. Late Quaternary climatic changes in western tropical Africa deduced from deep-sea sedimentation off the Niger delta. *Oceanol. Acta* 1:217-232.
- PONS, A. & QUÉZEL, P., 1956. Premiers résultats de l'analyse palynologique de quelques paléosols sahariens. *C.r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris* 243:1656-1658.
- PONS, A. & QUÉZEL, P., 1958. Premières remarques sur l'étude palynologique d'un guano fossile du Hoggar. *C.r. hebd. Séanc. Sci., Paris* 246:2290-2292.
- QUENEY, P., 1974. *Éléments de météorologie* pp 300. Paris: Masson.
- QUÉZEL, P., 1958. Mission botanique au Tibesti. *Mém. Inst. Rech. sahar.* 4:357.
- QUÉZEL, P., 1965. *La végétation du Sahara, du Tchad à la Mauritanie* pp. 333. Stuttgart: Fischer.
- QUÉZEL, P., 1978. Analysis of the flora of Mediterranean and Saharan Africa. *Ann. Mo. bot. Gdn* 65:479-534.
- QUÉZEL, P. & MARTINEZ, C., 1958-59. Le dernier interpluvial au Sahara central. Essai de chronologie palynologique et paléo-climatique. *Libyca, série Anth. Préh. Ethn.* 6-7: 211-227.
- QUÉZEL, P. & MARTINEZ, C., 1962. Premiers résultats de l'analyse palynologique de sédiments recueillis au Sahara méridional à l'occasion de la mission Berliet-Tchad. In H.J. Hugot, *Missions Berliet, Ténéré-Tchad* 313-327.
- RODIER, J.A., 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. *Mém. ORSTOM, Paris* 6:137.
- SCHULZ, E., 1974. Pollenanalytische Untersuchungen quartärer Sedimente des Nordwest Tibesti. *Pressedienst Wiss. Fr. Univ. Berlin* 5:59-69.
- SCHULZ, E., 1979. *Die vegetation der östlichen zentralen Sahara und ihre Entwicklung im Holozän*. Thèse Sciences, Würzburg.
- SCHULZ, E., 1980. Present pollen rain in the central Sahara. *5th Palyno. Conf., Cambridge, Abst.*
- SERVANT, M., 1973. *Séquences continentales et variations climatiques : Evolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur*. Thèse Sciences, Paris.
- SERVANT-VILDARY, S., 1978. Etude des diatomées et paléoclimatologie du bassin tchadien au Cénozoïque supérieur. *Travaux et Documents de l'ORSTOM* 84,2.
- TEROUANNE, E., GROS, R. & COUR, P., à paraître. *Nouveau mode de représentation graphique: échelles en fonction puissance. Applications en palynologie et météorologie*. Université Montpellier.
- VAN CAMPO, M., 1973. Pollen analyses in the Sahara. In F. Wendorf & A. E. Marks, *Problem in prehistory : North Africa and the Levant* 45-64. Dallas : Southern Methodist University Press.
- VAN CAMPO, M., AYMOUNIN, G., COHEN, J., DUTIL, P. & ROGNON, P., 1964. Contribution à l'étude du peuplement végétal quaternaire des montagnes sahariennes: I. L'Atakor. *Pollen Spores* 6:169-194.
- VAN CAMPO, M., GUINET, Ph., COHEN, J. & DUTIL, P. 1967. Contribution à l'étude du peuplement végétal quaternaire des montagnes sahariennes. III. Flore de l'oued Outoul (Hoggar). *Pollen Spores* 9:107-120.
- WENDORF, F., SCHILD, R., SAID, R., HAYNES, C.V., GAUTIER, A. & KOBUSIEWICZ, M., 1976. The prehistory of the Egyptian Sahara. *Science* 193:103-114.
- WEXLER, R., 1954. The physics of tropical rain. In H. Riehl, *Tropical meteorology* 155-176. New York : McGraw Hill.