



HAL
open science

Variabilité de l'environnement et du climat du Sahel à la fin de la Période Humide Holocène

Kévin Lemonnier

► **To cite this version:**

Kévin Lemonnier. Variabilité de l'environnement et du climat du Sahel à la fin de la Période Humide Holocène: analyse palynologique d'une carotte de sondage dans la région des Niayes du Sénégal. Sciences de l'environnement. 2020. hal-03086096

HAL Id: hal-03086096

<https://ephe.hal.science/hal-03086096>

Submitted on 22 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École Pratique
des Hautes Études



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES
Sciences de la Vie et de la Terre

MÉMOIRE

Présenté
par
LEMONNIER Kévin

pour l'obtention du Diplôme de l'École Pratique des Hautes Études

TITRE :

Variabilité de l'environnement et du climat du Sahel à la fin de la Période Humide Holocène : analyse palynologique d'une carotte de sondage dans la région des Niayes du Sénégal.

Soutenu le 11/12/2020 devant le jury suivant :

SANCHEZ GONI Maria – Président
LEZINE Anne Marie – Tuteur scientifique
HELY Christelle – Tuteur pédagogique
BOUIMETARHAN Ilham – Rapporteur
MONTADE Vincent – Examineur

Mémoire préparé sous la direction de :

LEZINE Anne-Marie

Intitulé de la structure d'accueil : Laboratoire d'Océanographie et du Climat : expérimentations et approches numériques (LOCEAN), Paris

Directeur : CHARRASSIN Jean-Benoît

et de :

HELY Christelle

Intitulé de la structure d'accueil EPHE : Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (ISEM)

EPHE (Sciences de la Vie et de la Terre)

Groupe de Recherche et d'Enseignement Thématiques de l'EPHE : Dynamique des environnements naturels et anthropisés (DENA).



École Pratique
des Hautes Études



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES
Sciences de la Vie et de la Terre

MÉMOIRE

Présenté
par
LEMONNIER Kévin

pour l'obtention du Diplôme de l'École Pratique des Hautes Études

TITRE :

Variabilité de l'environnement et du climat du Sahel à la fin de la Période Humide Holocène : analyse palynologique d'une carotte de sondage dans la région des Niayes du Sénégal

Soutenu le 11/12/2020 devant le jury suivant :

SANCHEZ GONI Maria – Président
LEZINE Anne Marie – Tuteur scientifique
HELY Christelle – Tuteur pédagogique
BOUIMETARHAN Ilham – Rapporteur
MONTADE Vincent – Examineur

Mémoire préparé sous la direction de :

LEZINE Anne-Marie

Intitulé de la structure d'accueil : Laboratoire d'Océanographie et du Climat : expérimentations et approches numériques (LOCEAN), Paris

Directeur : CHARRASSIN Jean-Benoît

et de :

HELY Christelle

Intitulé de la structure d'accueil EPHE : Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (ISEM)

EPHE (Sciences de la Vie et de la Terre)

Groupe de Recherche et d'Enseignement Thématiques de l'EPHE : Dynamique des environnements naturels et anthropisés (DENA).

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Anne Marie Lézine qui m'a poussé à m'inscrire à l'EPHE pour passer ce diplôme et qui, en tant que collègue et tutrice scientifique a été d'une aide inestimable. Merci à Christelle Hély de m'avoir accordé sa confiance et son soutien en tant que tutrice pédagogique.

Ce travail n'aurait pu se faire sans le support et l'accompagnement reçu au Sénégal. Mes remerciements s'adressent au professeur El Hadji Sow et Cheikh Abdoul Kader Fofana, respectivement directeur et enseignant chercheur du département de géologie de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD). Je souhaite également remercier Abdoul Aziz Camara, conservateur botanique à l'herbier de l'UCAD qui a été d'une grande aide sur le terrain et dont les connaissances en botanique ont été précieuses. Ce travail n'aurait pu se faire sans le soutien et les autorisations des autorités locales compétentes. Je tiens à remercier Juliette Mignot et Alban Lazar du LMI ECLAIRS ainsi qu'Amadou Thierno Guèye du LPAOSF pour leur accueil. La représentation de l'IRD au Sénégal a été d'une aide importante grâce à la logistique mise à notre disposition.

J'adresse toute ma gratitude à Bernard Bassen, notre chauffeur et guide local et sa famille qui nous ont offert une hospitalité sans équivalence.

Au LOCEAN, ma reconnaissance s'adresse aux équipes BTP et VALCO. Un grand merci aux personnes du site de Bondy et de ces équipes qui m'ont aidé à affiner ce travail.

Je tiens aussi à remercier Guillaume Buchet, qui au CEREGE m'a initié à la détermination des grains de pollen de la flore Africaine.

Cette étude a bénéficié du soutien financier du projet LEFE SALOUM porté par Matthieu Carré, du réseau scientifique IRD CLIMACTE coordonné par Abdel Siffedine ainsi que du LOCEAN et du LMI ECLAIRS. Elle a aussi reçu l'appui du projet ANR/Belmont forum ACCEDE porté par Nicholas McKay.

Merci aux membres du jury pour le temps qu'ils ont bien voulu m'accorder.

Enfin, un immense merci à ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu et continueront à le faire encore longtemps j'espère.

Table des matières

Remerciements	3
Liste des figures	6
Liste des tableaux	8
Liste des annexes	9
Liste des abréviations	10
Introduction	11
I. Contexte environnemental	13
A. La région des Niayes	13
1) La végétation	14
2) Le climat	16
II. Matériel et Méthode	18
A. La localisation du site	18
B. Le carottage	19
C. Les datations	20
D. L'analyse palynologique	21
1) L'échantillonnage et la préparation chimique	21
2) La détermination et le comptage	22
E. Le traitement des données	27
III. Les résultats	28
A. Le diagramme des pourcentages : grains de pollen et NPP	28
B. L'analyse statistique des données	32
1) Les grains de pollen	32
2) Les pourcentages et les influx des groupes issus de l'analyse statistique	34
C. Les algues	35
D. Les fragments de charbons	38

IV. Interprétation et discussion	38
A. La fin de la période humide au Sahel	38
B. La fin de la période humide Holocène dans les Niayes	42
C. La fin de l'HHP à Mboro-Baobab	45
1) Un paysage à physionomie constante	45
2) Une évolution progressive vers l'assèchement du milieu lacustre	45
3) Le retrait progressif des éléments tropicaux humides	45
D. La crise environnementale du dernier millénaire	47
1) La tendance à l'assèchement de 1340 CE à 1900 CE	47
2) L'effondrement de la galerie forestière à 1640 CE	48
3) L'impact anthropique	48
Conclusion	50
Bibliographie	53
Annexes	59

Liste des figures

Figure 1. Localisation de la région des Niayes sur la carte du Sénégal (Aguiar, 2009).	13
Figure 2. Distribution et type de végétation en Afrique de l'Ouest. A : Répartition des grands domaines de végétation de l'Afrique (White 1983) B : Répartition des grands types de végétation selon la pluviosité (annuelle, saisonnière) (Trochain et al., 1980).	15
Figure 3. Distribution schématique de la végétation en bordure d'une niaye (Raynal, 1961).	16
Figure 4. Déplacement saisonnier de la ZCIT au-dessus de l'Afrique (Figure de Doukpolo, 2007).	17
Figure 5. Localisation du site de prélèvement de la carotte Mboro-Baobab et du réseau hydrologique local.....	19
Figure 6. Section 200-250 cm de la carotte Mboro-Baobab.....	20
Figure 7. Âges en années calendaires BP en fonction de la profondeur en cm de la carotte Mboro-Baobab.....	21
Figure 8. Diagramme palynologique simplifié des principaux taxons de la carotte Mboro-Baobab (Sénégal).	31
Figure 9. Classification hiérarchique des taxons obtenue à partir de l'analyse factorielle des correspondances des données de la carotte Mboro-Baobab.....	32
Figure 10. Projection de l'AFC un axe d'aridité croissante.....	33
Figure 11. Évolution des pourcentages (A) et influx (B) de pollen regroupés par l'AFC en fonction du temps en âge cal BP.....	35
Figure 12. Évolution des influx des algues en fonction du temps en cal BP sur le site Mboro-Baobab.....	37
Figure 13. Évolution des influx de Tetraedron en fonction du temps en cal BP sur le site Mboro-Baobab.....	37
Figure 14. Évolution des influx des fragments de charbon en fonction du temps en cal BP sur le site Mboro-Baobab.....	38
Figure 15. Nombre d'enregistrements paléo-hydrologiques d'Afrique Nord tropicale en fonction du temps en années cal BP (Lézine et al., 2011).....	39

Figure 16. Changements de biodiversité au sein de groupes des végétation guinéo-congolais, soudanien et sahélien en fonction du temps en cal BP dans trois zones de latitude d’Afrique tropicale (Hély et al., 2014).....	40
Figure 17. Marqueurs de la variabilité de la mousson Ouest Africaine durant les derniers vingt mille ans (Shanahan et al., 2015).	41
Figure 18. Chronologie de la dégradation des environnements végétaux à la fin de la période humide Holocène (Vincens, 1999 ; repris par Lézine 2017).....	42
Figure 19. Carte piézométrique de la nappe phréatique de la région des Niayes (Putallaz, 1962).....	43
Figure 20. Diagrammes palynologiques simplifiés de deux sites de la région des Niayes : A : Diogo. B : Touba N’Diaye (Lézine, 1988).....	44
Figure 21. Diagramme palynologique simplifié du site de Jikariya au Nord Est du Nigeria (Waller et al., 2007).....	46
Figure 22. Évolution des principaux marqueurs environnementales sur le site Mboro-Baobab en fonction de la chronologie CE au dernier millénaire (Lézine et al., 2019)...	49

Liste des tableaux

Tableau 1. Précipitations en mm à Dakar, Mboro, Saint Louis.....	17
Tableau 2. Comparaison des températures moyennes entre deux stations : Mboro et Linguère.....	18
Tableau 3. Profondeur et âge des niveaux datés.....	20
Tableau 4. Les étapes de la préparation des échantillons palynologiques.....	22
Tableau 5. Liste des taxons de pollen identifiés dans la carotte Baobab.....	24

Liste des annexes

Annexe 1 : Photos de grains de Pollen et 'Non Pollen Palynomorphs' trouvés dans les sédiments de la carotte de Mboro-Baobab.....	59
Annexe 2 : Tableau des comptages.....	61
Annexe 3 : Sahel environmental variability during the last millennium: Insight from a pollen, charcoal and algae record from the Niayes area, Senegal.....	77

Liste des abréviations

AHP :	African Humid Period
APD :	African Pollen Database
HHP :	Holocene Humid Period
LIA :	Little Ice Age
LMC14 :	Laboratoire de Mesure du Carbone 14
LOCEAN :	Laboratoire d'Océanographie et du Climat, Expérimentations et Approches Numériques
NPP :	Non Pollen Palynomorph
ZCIT :	Zone de Convergence Inter-Tropicale

Introduction

Le Sahel a connu, tout au long des derniers millénaires, des changements environnementaux de grande amplitude alternant des phases de grande humidité et des phases de sécheresse intense. Au cours de l'Holocène, l'intensification de la mousson induite par le changement orbital provoque la formation de nombreux lacs au Sahara et au Sahel (Lézine et al., 2011). C'est la période humide Holocène ou HHP (Holocene Humid Period). Ces conditions humides favorisent la migration des plantes tropicales guinéo-congolaises et soudaniennes, aujourd'hui présentes au Sud du Sénégal ou en bordure du Golfe de Guinée, vers le Nord, jusqu'à proximité du Tropique (Watrin et al., 2009 ; Hély et al., 2014).

La fin de l'HHP a donné lieu à de nombreux débats. Il s'agit d'un événement important qui marque le passage de l'environnement humide décrit pendant l'holocène à celui que nous connaissons aujourd'hui. Depuis l'article de deMenocal et al. (2000), les débats portent sur la chronologie de cet événement et la vitesse de cette transition. Ce dernier suggère, à partir de l'étude des poussières transportées à l'océan, une transition brutale entre un état humide et un état aride à 5500 cal BP. Kröpelin et al. (2008) montrent au contraire une transition beaucoup plus progressive au Sahara central entre 4300 et 2700 cal BP.

Dans un article de synthèse reprenant les données de carottes marines prélevées au large de l'Afrique, Shanahan et al. (2015) montrent une situation plus complexe avec la fin de l'HHP variant en fonction du temps et de la latitude. Précoce et brutale aux latitudes Sahariennes (5500 cal BP ; de Menocal et al., 2000) celle-ci s'inscrit dans une évolution lente dans le bassin du Congo initiée dès 9000 cal BP, qui prend fin à 2500 cal BP (Schefuß et al., 2005).

A l'exception des sites de Yoa (Lézine et al., 2011) et de Jikariya (Waller et al., 2007), les données de végétation qui documentent la fin de l'HHP sont rares au Sahara et au Sahel et souvent à faible résolution. Ces deux études montrent le retrait progressif des plantes tropicales humides en parallèle de la mise en place d'une aridification croissante des conditions environnementales. Dans un environnement de forêt galerie très développée de la région des Niayes au Sénégal, Lézine (1989) montre au contraire que la destruction des forêts à la fin de l'HHP a été abrupte à un âge centrée autour de 2500 cal BP.

C'est dans ce contexte que la carotte sédimentaire du site Mboro-Baobab (15° 8'58.49" N, 16°54'34.37" W) dans la région des Niayes au Sénégal est analysée. L'étude à haute résolution des micro-organismes organiques (pollen, spores, algues) ainsi que des fragments de charbon sur une période couvrant la fin de la période humide Holocène de 4300 cal BP à l'actuel a pour but d'établir une chronologie précise de la réponse de l'environnement au changement climatique à la fin de l'HHP puis de son évolution jusqu'à l'actuel.

Les deux premiers chapitres de ce mémoire décrivent le contexte environnemental du site de Mboro-Baobab et la méthode utilisée. Le troisième chapitre décrit les résultats obtenus. Enfin, le quatrième chapitre les discute.

I. Contexte environnemental

A. La région des Niayes

La zone des Niayes s'étend sur une bande de 10 à 15 km de large le long de la côte atlantique du Sénégal, entre la ville de Dakar au Sud et le delta du fleuve Sénégal au Nord (soit entre 15 et 16°N) (Fig. 1). Elle est caractérisée par la présence de dépressions inter-dunaires remplies de matière organique. Ces dépressions sont associées à un ancien réseau hydrographique stoppé au cours de l'Holocène récent par l'édification du cordon dunaire littoral (Michel, 1973). La nappe phréatique sub-affleurante favorise le maintien de conditions d'humidité soutenant le développement d'une végétation hygrophile ainsi que le maintien de galeries forestières de type tropical humide. Cette végétation particulière a été qualifiée de sub-guinéenne par Trochain (1940) au vu des similitudes qu'elle présente avec la végétation de forêt mésophile guinéenne qui s'étend aujourd'hui en Casamance, 2.5° de latitude plus au Sud.



Fig.1. Localisation de la région des Niayes en rouge sur la carte du Sénégal (Aguiar, 2009).

1) La végétation

La répartition de la végétation en Afrique est en relation directe avec les principaux facteurs climatiques que sont la pluviosité et la longueur de la saison sèche (Trochain et al., 1980). De grands domaines phytogéographiques sont définis avec des limites qui suivent globalement les isohyètes en latitude (White, 1983) (Fig. 2A). La région des Niayes se trouve à la latitude de la zone sahélienne constituée de formations herbeuses boisées (pseudo-steppes, Trochain, 1940). Les espèces caractéristiques des pseudo-steppes sahéliennes sont : *Acacia senegal*, *A. seyal*, *Commiphora africana*, *Lannea humilis*, *Lophira lanceolata*. Dans les Niayes, cette végétation se développe sur les cordons dunaires entourant les dépressions. Dans le fond des dépressions où la nappe phréatique entretient des conditions d'humidité se développent des galeries forestières. Du haut de la dune au fond des dépressions, la végétation passe d'une affinité sahélienne à une forêt galerie d'affinité guinéenne et soudano-guinéenne (Fig. 3). Ces galeries sont caractérisées par la présence d'*Elaeis guineensis* associé en particulier à *Phoenix senegalensis*, *Syzygium guineense*, *Alchornea cordifolia*, *Anthostema senegalense*, *Macaranga heudelotii*, *Dialium guineense*, *Cassia podocarpa*, ainsi qu'à d'autres espèces de Combretaceae et de Moraceae (Trochain, 1940). La définition « sensu stricto » de la niaye a été donnée par Trochain : « C'est le nom ouolof des boqueteaux ou galeries de Palmiers à huile (*Elaeis guineensis*) qui entourent les étangs littoraux plus ou moins colmatés ». La présence d'eau libre au centre de la niaye permet la croissance de plantes hygrophiles ou aquatiques telles que *Typha sp.*, différentes espèces de Cyperaceae et *Nymphaea lotus*.

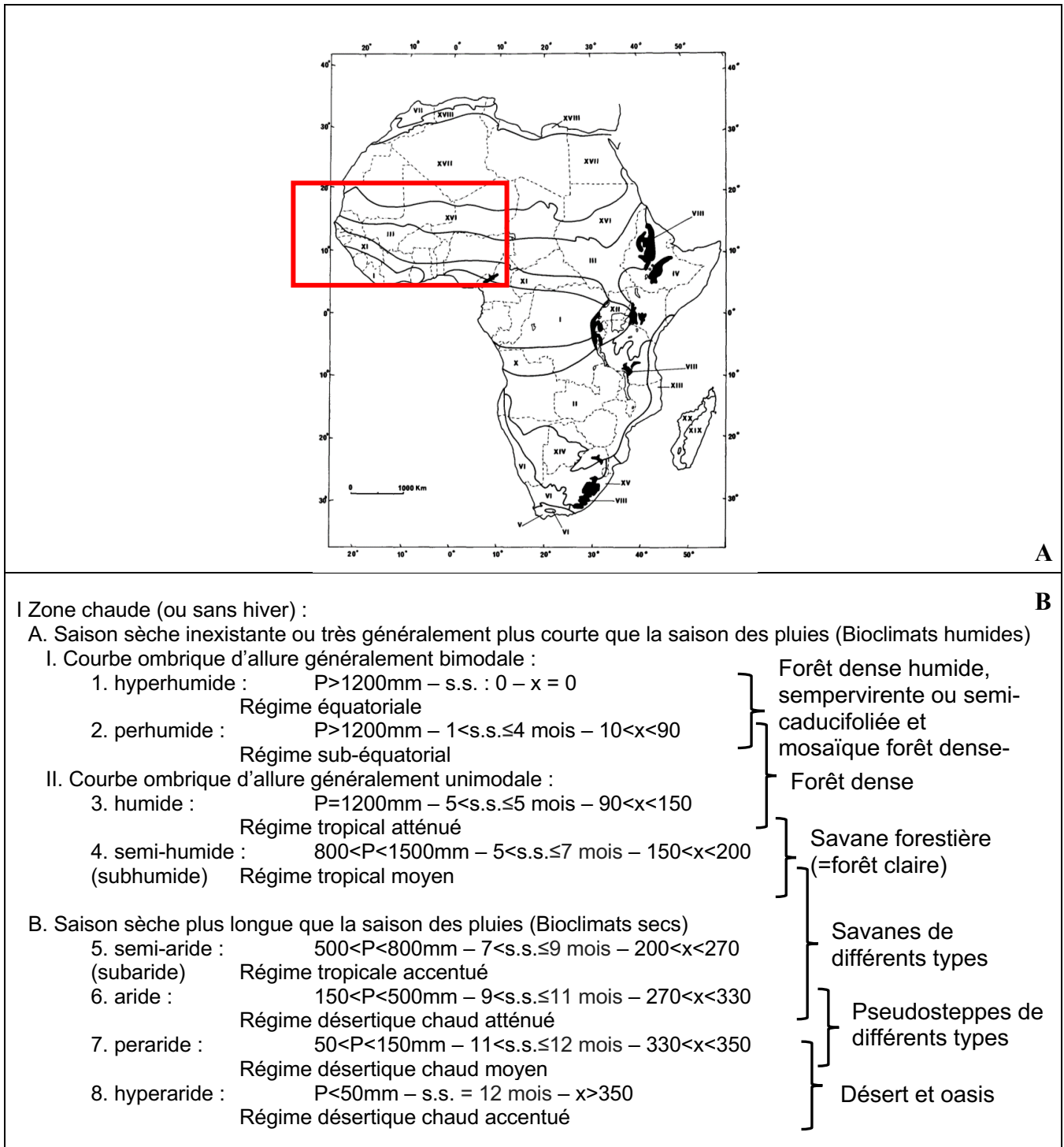


Fig.2. Distribution et type de végétation en Afrique de l'Ouest. **A** : Répartition des grands domaines de végétation de l'Afrique (White 1983). L'encadré englobe les grands domaines que l'on trouve au Sénégal. I : centre régional d'endémisme guinéo-congolais ; XI : zone de transition régionale guinéo-congolaise/soudanienne ; III : centre régional d'endémisme soudanien ; XVI : zone de transition régionale du Sahel ; XVII : zone de transition régionale du Sahara. **B** : le tableau montre la répartition des grands types de végétation selon la pluviosité (annuelle, saisonnière) (Trochain et al., 1980).

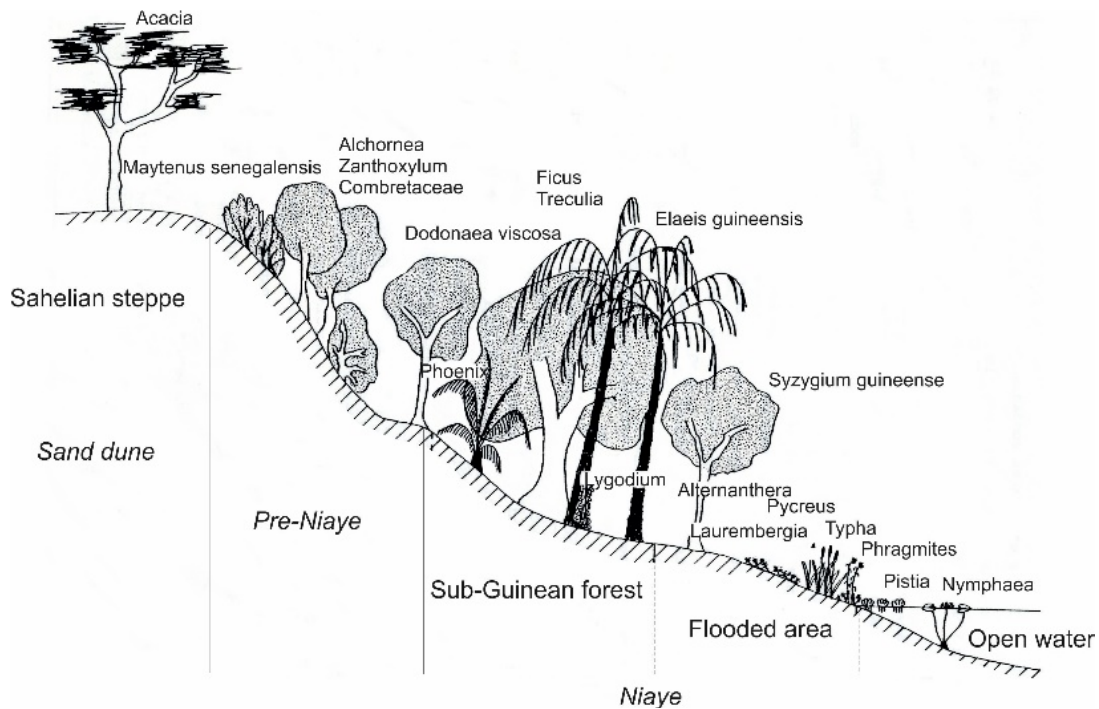


Fig.3. Distribution schématique de la végétation en bordure d'une niaye. Du sommet vers le centre de la dépression se succèdent la végétation steppique sahélienne, la forêt de galerie sub-guinéenne et la végétation hygrophile (Raynal, 1961).

Du fait de l'action anthropique croissante dans cette région à fort potentiel agricole située proche des grandes villes (Dakar, Thiès, St Louis) la végétation naturelle de la région des Niayes est aujourd'hui fortement dégradée. Les principales causes en sont, après la grande sécheresse du Sahel des années 1970 (Hulme, 1992), l'assèchement accru des dépressions du fait de l'augmentation du pompage agricole et industriel et la destruction des galeries forestières pour la récolte de bois et le développement des surfaces cultivées.

2) Le climat

La circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest est caractérisée par deux courants majeurs de direction opposée. La mousson atlantique, masse d'air humide qui prend son origine dans l'océan Atlantique, au Sud de l'Equateur, souffle en direction du Nord-Est. Présente toute l'année aux latitudes basses, proches de l'Equateur, elle va, au-delà, affronter l'alizé continental sec, « l'Harmattan », de direction inverse. La rencontre de ces flux crée une masse d'air ascendante humide de vapeur d'eau prélevée à l'océan, appelée « Zone de Convergence Inter-Tropicale »

ou ZCIT. La projection au sol de la ZCIT définit la zone d'influence du système de mousson qui se situe entre 4°N l'hiver et à 20-25°N l'été (Leroux, 1983) (Fig. 4).

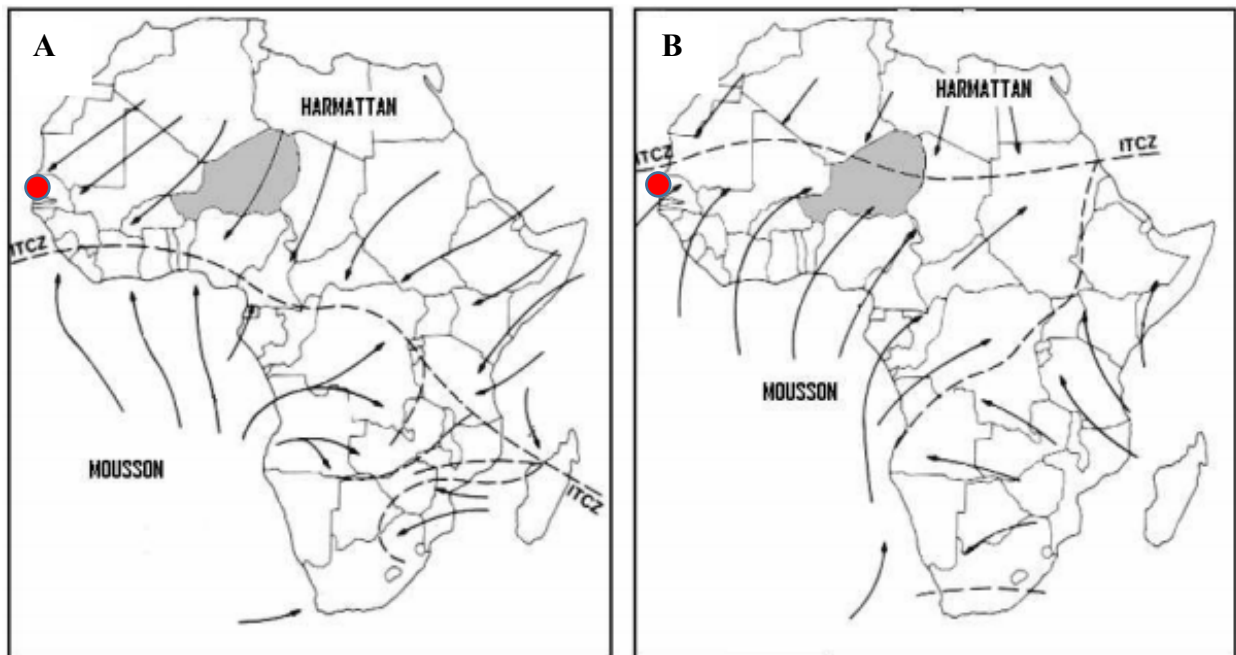


Fig.4. Déplacement saisonnier de la ZCIT au-dessus de l’Afrique **A** : position moyenne en Janvier-Février, **B** : position moyenne en Juillet-Août. La région des Niayes, symbolisée par le point rouge se trouve dans la zone de battement de l’ITCZ et son climat est donc marqué par l’alternance entre une saison sèche et une saison pluvieuse (Figure de Doukpolo, 2007).

Le déplacement saisonnier de la ZCIT est donc à l’origine d’un important gradient climatique au-dessus de l’Afrique de l’Ouest qui se traduit par une diminution régulière des précipitations du Sud vers le Nord.

Comme le montrent les valeurs relevées à Mboro, dans la région des Niayes, les précipitations sont de l’ordre de 383 mm par an. Les hauteurs de pluie enregistrées décroissent depuis 500 mm au Sud (Dakar) et 300 mm au Nord (Saint Louis). Elles sont concentrées sur les mois de Juin à Octobre (Tabl. 1). Le reste de l’année (de Novembre à Mai) est caractérisé par une quasi-absence de précipitations.

Tabl.1. Précipitations en mm à Dakar (14°42'41.77" N, 17°28'7.93" W), Mboro (15° 8'21.76" N, 16°52'57.87" W) et Saint Louis (16°1'50.41" N, 16°29'10.56"W) Ces données illustrent le gradient de diminution des précipitations du Sud-Nord. (Données issues de climate-data.org).

Précipitations (mm)	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total
Dakar	1	1	0	0	0	10	77	182	150	42	2	3	468
Mboro	1	1	0	0	1	10	66	144	129	30	2	0	384
St Louis	1	1	0	0	0	7	42	107	95	28	1	2	284

L'influence de l'upwelling côtier est importante. Cette remontée d'eau froide entraîne des températures plus basses le long de la côte comparées aux stations situées plus à l'intérieur des terres comme le montre la comparaison entre les stations de Mboro et Linguère (Tabl. 2). Cette station située 190 km à l'Est de Mboro et à la même latitude enregistre une moyenne de température de 28,5°C alors qu'elle ne s'élève qu'à 25,5°C à Mboro. La différence de température est la plus marquée pendant les mois les plus chauds, de Mars à Juillet.

Tabl.2. Comparaison des températures moyennes entre deux stations météorologiques du Sénégal : Mboro (15° 8'21.76" N, 16°52'57.87" W) et Linguère (15°23'45.51" N, 15° 6'49.06" W). L'influence de l'upwelling côtier se traduit par des températures plus fraîches tout au long de l'année à Mboro par rapport à Linguère (Données issues de climata-data.org).

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
T°C Linguère	24,3	26,1	28,2	29,9	31,2	31,3	29,8	29,0	29,0	30,0	27,8	25,0
T°C Mboro	22,7	23	24,4	24,3	25	27,1	27,4	27,1	27,3	27,4	26	23,5
Δ T°C	1,6	3,1	3,8	5,6	6,2	4,2	2,4	1,9	1,7	2,6	1,8	1,5

II. Matériel et Méthode

A. La localisation du site

La carotte Mboro-Baobab (15° 8'58.49" N, 16°54'34.37" W) a été prélevée dans un lac de très faible profondeur (inférieure à 50 cm) et soumis à des assèchements temporaires (Fig. 5A). Le site se trouve dans le secteur de Mboro à environ 80 km au Nord-Est de Dakar et 2,3 km de la côte atlantique et à 6 m au-dessus du niveau de la mer (Fig. 5 B, C).

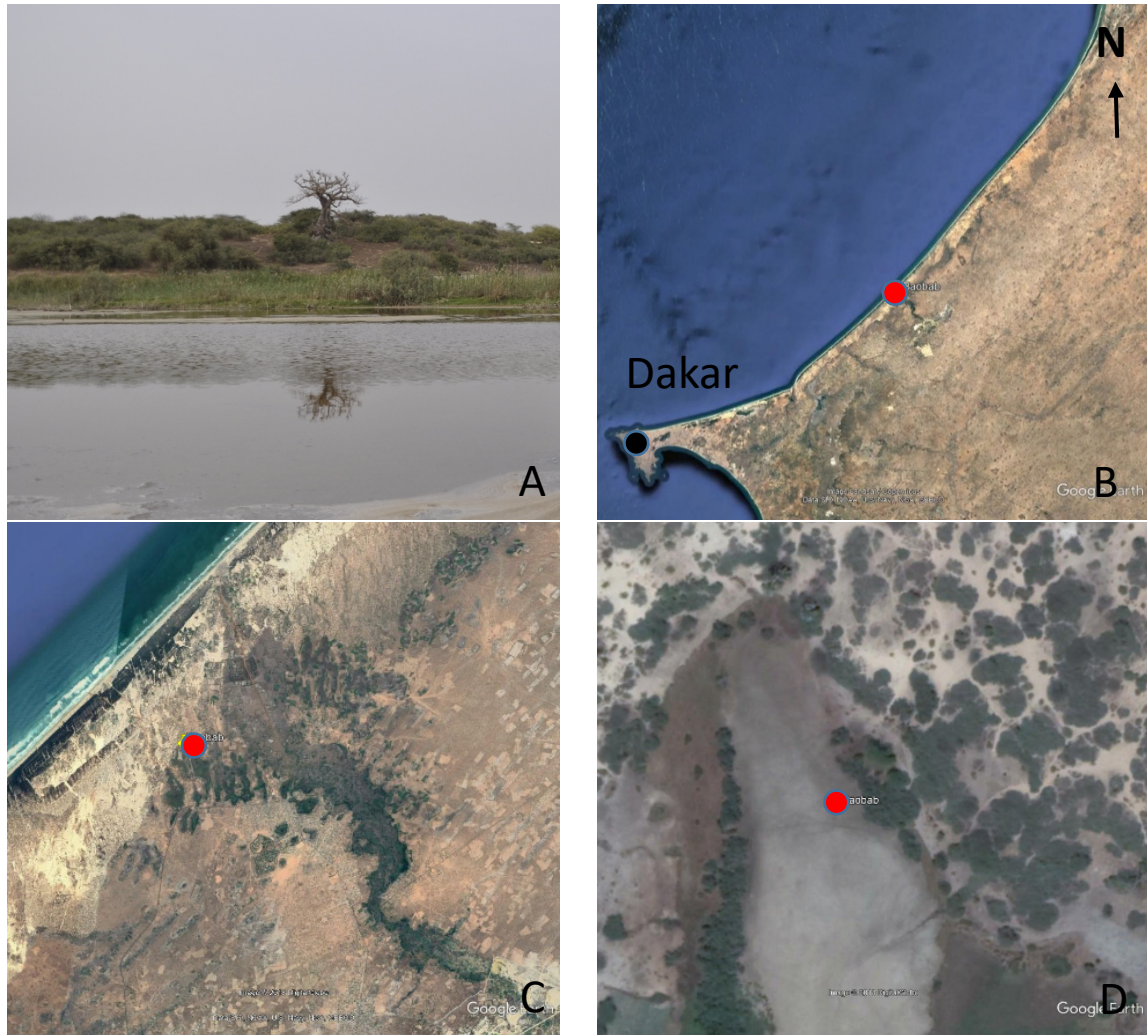


Fig.5. Le site de « Baobab » (A) est localisé à l’Ouest d’un des réseaux hydrographiques les plus importants de la zone des Niayes à Mboro (B-D). Ce réseau est composé d’un écoulement principal au centre (C) et d’une série de dépressions remplies de matière organique sur les bordures sud et nord. Le point rouge localise le site de prélèvement.

B. Le carottage

Un prélèvement a été effectué en 2016 à proximité de la berge à l’aide d’un carottier russe manuel (Jowsey, 1966) (Fig. 5D).

Une carotte de 4 m de longueur a été prélevée sous une dizaine de centimètres d’eau. Elle est divisée en 8 sections de 50 cm. La série sédimentaire est très homogène, caractérisée par une argile organique noire (Fig. 6).



Fig.6. Section 200-250 cm de la carotte Mboro-Baobab montrant une sédimentation organique homogène.

C. Les datations

Trois échantillons ont été datés au LMC14 par spectrométrie de masse à 399,5, 299,5 et 99,5cm de profondeur sur la matière organique totale. Le modèle d'âge est construit à l'aide de ces niveaux datés auxquels ont été ajoutés la date du sommet (2016=date du prélèvement) et la date du niveau situé à 30,5 cm qui marque l'apparition du pollen de *Casuarina equisetifolia* (Filao) dans les échantillons. Cet arbre a été planté à partir de 1948 dans le secteur pour fixer les dunes littorales (Mailly et al., 1994) (Tabl. 3 ; Fig. 7).

Tabl. 3. Profondeur et âge des niveaux datés. 3 échantillons aux profondeurs 99,5 cm, 299,5 cm et 399,5 cm sont datés au LMC14. Le niveau à 30,5 cm est marqué par l'apparition des grains de pollen de *Casuarina equisetifolia*, arbre planté à partir de 1948 dans la région pour fixer les dunes. Le niveau de surface (0 cm) correspond à l'année de prélèvement (2016).

Échantillon LMC14	Profondeur (cm)	Nature	Age BP	Erreur âge BP	cal BP
	0	Surface			-66
	30,5	Casuarina			-2
49827	99,5	Sédiment	580	30	604
49828	299,5	Sédiment	3265	30	3496
49829	399,5	Sédiment	3865	30	4298

Le logiciel statistique R (R Development Core Team, 2005) ainsi que le package Bacon (Blaauw & Christen, 2011) ont été utilisés pour construire le modèle d'âge. Les calibrations ont été réalisées grâce à la courbe de calibration IntCal13 (Reimer et al., 2013).

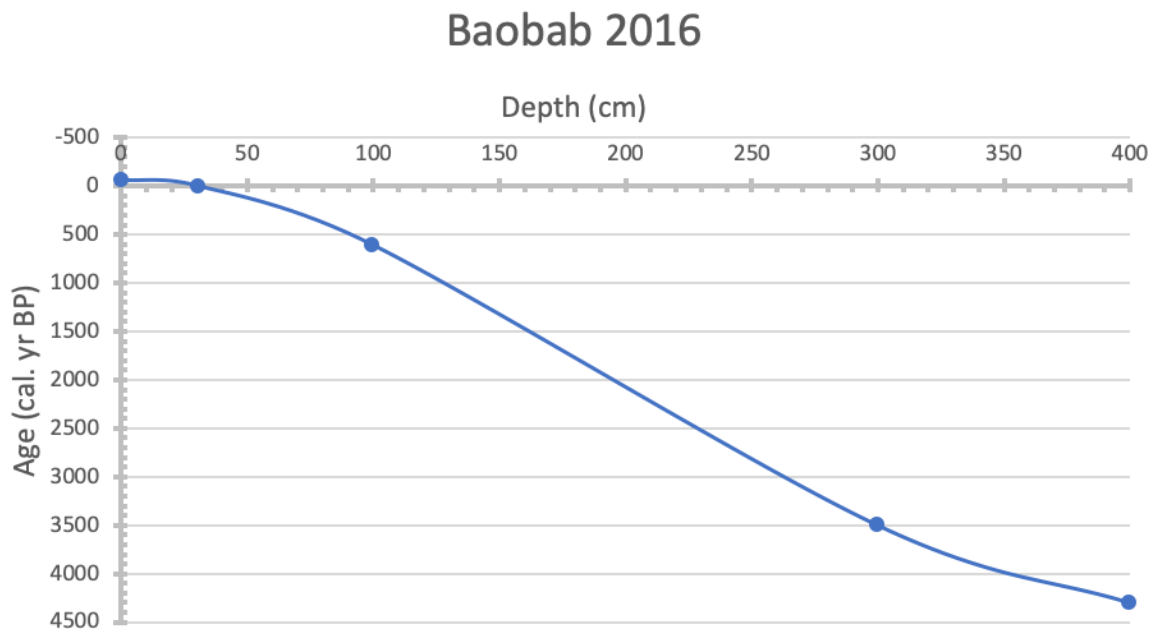


Fig.7. Ages en années calendaires BP en fonction de la profondeur en cm de la carotte Mboro-Baobab.

A partir de ces datations, le taux de sédimentation en cm/an a pu être calculé entre chaque échantillon : dans les 30 centimètres supérieurs de la carotte, le taux de sédimentation est le plus élevé. Il est compris entre 0,4 et 0,5 cm/an. Il se situe autour de 0,09 cm/an dans les niveaux inférieurs.

D. L'analyse palynologique

1) L'échantillonnage et la préparation chimique

Un échantillon d'environ 1cm³ (dont le volume exact a été mesuré à l'aide d'un pycnomètre) a été prélevé tous les 5 cm pour l'analyse palynologique. Au total, 78 échantillons ont été analysés. Les échantillons ont été préparés selon la méthode classique de Faegri et Iversen (1977). Un premier tamisage élimine la fraction grossière du sédiment, supérieure à 160 µm. On ajoute un contaminant en quantité connue, ici des spores de *Lycopodium*, dans le but d'évaluer les concentrations

(nombre de grains de pollen par cm^3) et l'influx (nombre de grains par cm^2 par an) une fois le modèle d'âge pris en compte. Ces spores se présentent sous forme de pastilles contenant chacune 18583 cellules. Deux pastilles sont ajoutées à chaque échantillon. Ensuite, différentes attaques par des acides (chlorhydrique, fluorhydrique) et base (hydroxyde de potassium) permettent d'éliminer certains constituants du sol : les carbonates, la silice, les argiles et une partie de la matière organique. Un dernier tamisage s'effectue sur une toile à maille de 5 μm . Le résidu, coloré à la safranine, est enfin dilué dans la glycérine phénolée puis monté entre lame et lamelle (Tabl. 4).

Tabl. 4. Etapes de la préparation des échantillons palynologiques en laboratoire. 1cm^3 de sédiment subit une succession de traitements chimiques et de tamisages avant d'être monté entre lame et lamelle pour l'observation au microscope.

Prélèvement d' 1 cm^3 de sédiment
Tamisage à 160 μm
Ajout de 2 tablettes de <i>Lycopodium</i>
Traitement à l'acide chlorhydrique 20% à froid – 10'
Traitement à l'acide fluorhydrique 70% à froid – 1 nuit
Traitement à l'acide chlorhydrique 20% à froid – 30'
Traitement à l'hydroxyde de potassium 10% à chaud – 10'
Tamisage à 5 μm
Ajout de glycérine phénolée
Coloration à la safranine
Montage du résidu entre lame et lamelle

2) La détermination et le comptage

La détermination des taxons polliniques se fait par observation au microscope optique au grossissement 100 et le comptage, au grossissement 50.

Les grains sont déterminés au niveau du genre, plus rarement de l'espèce. Dans certains cas cependant, la détermination ne peut se faire qu'au niveau de la famille. Ceci est dû à l'homogénéité des caractères morphologiques des grains de pollen au sein d'une même famille, par exemple chez les Poaceae ou les Cyperaceae, ou parfois au sein de deux familles comme chez les Combretaceae, très proches des Melastomataceae.

Un 'type' pollinique est accolé au nom du taxon lorsque plusieurs grains de pollen présentent la même morphologie, le nom du taxon choisi étant celui de la plante la plus commune dans l'environnement étudié. L'identification des taxons est effectuée

à l'aide des publications et atlas polliniques, par exemple : 'Atlas des pollens du Tchad' (Maley, 1970), 'Atlas de pollen de Côte d'Ivoire' (Ybert, 1979), 'Pollen des savanes d'Afrique Orientale' (Bonnefille et Riollot, 1980) et la collection de photographies numériques de la Banque Africaine de Données pollinique (APD - African Pollen Database) conservée au laboratoire LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat, Expérimentations et Approches Numériques). Pour chaque échantillon, au moins 20 taxons polliniques ont été identifiés et entre 250 et 1058 grains de pollen et spores ont été comptés. La nomenclature est conforme à celle de la Banque Africaine de Données Polliniques (Vincens et al, 2007). Les taxons sont répartis dans les groupes suivants : A = Arbre, AL = Arbre/liane, L = Liane, I = Indifférencié (ce sont des familles ou des genres qui peuvent revêtir des formes variées : arbres, arbustes, lianes ou herbes), N = Herbe, Nq = Plante aquatique et Sp = Fougères. Ils sont aussi regroupés selon leur affinité phytogéographique, dans quatre ensembles définis par White (1983). Il s'agit des régions saharienne, sahélienne, soudaniennne et guinéo-congolaise. Les plantes aquatiques sont également identifiées (Tabl. 5).

Les taxons déterminés sont au nombre de 105, répartis en 37 taxons d'arbres, 14 taxons d'arbustes, 4 taxons de plantes lianescentes, 2 palmiers, 21 taxons de plantes herbacées, 16 taxons indifférenciés, 7 taxons de plantes aquatiques (Nq) et 4 taxons de fougères (Sp). Le tableau des comptages est donné en annexe 2.

Tabl.5. Liste des taxons de pollen identifiés dans la carotte Mboro-Baobab. Les taxons sont répartis dans les groupes suivant : A = Arbre, AL = Arbre/liane, L = Liane, I = Indifférencié (arbres, arbustes, lianes ou herbes), N = Herbe, Nq = Plante aquatique, ainsi que dans les domaines auxquels ils appartiennent (Saharien, Sahélien, Soudanien, ou Guinéo-Congolais).

Famille	Taxon	Forme	Saharien	Sahélien	Soudanien	Guineo-Congolais	Plantes aquatiques
ACANTHACEAE	Hygrophila	N			x		
	Justicia-type	I		x	x		
	Justicia-type flava	N		x	x		
AMARANTHACEAE	Achyranthes-type aspera	N	x	x			
	Aerva-type lanata	N	x	x			
	Alternanthera	N	x	x			
	Amaranthaceae/Chenopodiaceae undiff.	I	x	x			
	Celosia-type trigyna	N	x	x			
	Chenopodium-type	N	x	x	x		
	Gomphrena	N	x	x			
	Suaeda	I	x	x			
ANACARDIACEAE	Anacardiaceae undiff.	A			x	x	
	Lannea-type	A		x	x	x	
APIACEAE	Apiaceae undiff.	I		x	x		
APOCYNACEAE	Apocynaceae undiff.	I	x	x	x		
	Tabernaemontana	AL			x	x	
ARECACEAE	Elaeis guineensis	PA				x	
	Phoenix reclinata-type	PA	x	x	x	x	
ASCLEPIADACEAE	Gymnema	AL	x				
ASTERACEAE	Asteraceae undiff.	I	x	x	x		
	Centaurea-type perrottetii	N	x	x			
	Cichorieae undiff.	I	x	x	x		
BOMBACACEAE	Adansonia digitata	A			x	x	
BURSERACEAE	Commiphora africana-type	A		x	x		
CAESALPINIACEAE	Detarium senegalense	A			x	x	
CAPPARACEAE	Capparis fascicularis-type	AL		x	x		
	Cleome-type gynandra	N	x	x			
CARYOPHYLLACEAE	Caryophyllaceae undiff.	I	x	x			
	Cerastium-type	N	x	x			
	Polycarphae-type	N	x	x	x		
	Polycarpon-type	N	x	x	x	x	
CASUARINACEAE	Casuarina equisetifolia-type	A					
CELASTRACEAE	Celastraceae undiff.	AL	x	x	x		
	Salacia	AL			x	x	
CHRYSOBALANACEAE	Chrysobalanus/Parinari	A			x	x	
COMBRETACEAE	Combretaceae undiff.	A		x	x	x	
COMMELINACEAE	Commelina-type benghalensis	N		x	x	x	
	Commelina-type forskalaei	N	x	x			

CONVOLVULACEAE	Convolvulus-type	N	x	x	x		
	Ipomoea-type	I	x	x	x		
CYPERACEAE	Cyperaceae undiff.	Nq					x
DILLENACEAE	Tetracera	AL			x	x	
EBENACEAE	Diospyros	A			x	x	
	Ebenaceae undiff.	A					
EPHEDRACEAE	Ephedra	AL	x				
EUPHORBIACEAE	Acalypha	I			x	x	
	Alchornea	A			x	x	
	Anthostema-type	A				x	
	Antidesma-type	A			x	x	
	Bridelia-type	A			x	x	
	Erythrococca-type	A			x	x	
	Hymenocardia	A		x	x	x	
	Macaranga-type	A			x	x	
	Mallotus-type	A			x	x	
	Uapaca	A			x	x	
FABACEAE	Aeschynomene	I			x	x	
HALORRHAGACEAE	Laurembergia tetrandra	Nq					x
LAMIACEAE	Basilicum-type polystachyon	N			x		
LORANTHACEAE	Tapinanthus-type	L		x	x	x	
MALVACEAE	Hibiscus	I	x	x	x		
MELIACEAE	Khaya-type senegalensis	A				x	
MENISPERMACEAE	Cissampelos-type	AL			x	x	
	Cocculus	L	x	x	x		
	Tinospora bakis	L	x	x	x		
MIMOSACEAE	Acacia	AL	x	x	x		
	Prosopis-type africana	A		x	x	x	
MORACEAE	Ficus	A		x	x		
	Musanga-type	A		x	x	x	
	Myrianthus-type	A				x	
MYRTACEAE	Syzygium-type guineense	A			x	x	
NYMPHAEACEAE	Nymphaea	Nq					x
OCHNACEAE	Lophira	A			x	x	
ONAGRACEAE	Ludwigia-type ascendens	Nq					x
POACEAE	Poaceae undiff.	N	x	x	x	x	
POLYGALACEAE	Polygala-type	I	x	x	x		
POLYGONACEAE	Polygonum senegalense	Nq					x
POTAMOGETONACEAE	Potamogeton	Nq					x
RANUNCULACEAE	Clematis-type	AL	x	x	x		
RUBIACEAE	Leptactina	A				x	
	Hymenodictyon-type	A			x	x	
	Ixora-type	A			x	x	
	Mitracarpus villosus	N		x	x		
	Mitragyna-type inermis	A		x	x	x	

	Morelia senegalensis	A		x	x	x	
	Pavetta	AL			x	x	
	Rubiaceae undiff.	I	x	x	x	x	
	Spermacoce-type radiata	N		x	x		
RUTACEAE	Zanthoxylum-type zanthoxyloides	A			x	x	
SALVADORACEAE	Salvadora persica-type	A	x	x			
SAPINDACEAE	Allophylus	AL		x	x	x	
	Paullinia pinnata	L			x	x	
	Sapindaceae undiff.	AL		x	x	x	
SAPOTACEAE	Sapotaceae undiff.	AL		x	x	x	
	Vitellaria-type paradoxa	A				x	
SOLANACEAE	Solanum-type	I	x	x	x		
STERCULIACEAE	Dombeya-type	A			x	x	
TAMARICACEAE	Tamarix	A	x	x			
TILIACEAE	Triumfetta-type	I		x	x		
TYPHACEAE	Typha	Nq					x
ULMACEAE	Celtis	A		x	x	x	
ZYGOPHYLLACEAE	Tribulus	N	x	x			

Les résidus non polliniques ou « Non Pollen Palynomorph » (NPP) sont identifiés et quantifiés. Ils sont représentés par 5 taxons d'algues vertes (division des Chlorophyta) : *Botryococcus*, *Pediastrum*, *Coelastrum*, *Tetraedron*, et *Scenedesmus*. Ce sont tous des genres planctoniques. *Botryococcus* présente une large adaptation écologique et se retrouve dans des milieux oligotrophes à eutrophes (Komárek & Marvan, 1992 ; Guy-Ohlson, 1992). *Coelastrum* et *Pediastrum* sont présents dans des milieux hypertrophes (Sandgren, 1988). Toutefois les espèces de ces genres se retrouvent aussi dans des milieux mésotrophes à eutrophes (Reynolds, 2006). *Pediastrum* peut être présent dans des points d'eau temporaires ou permanents. *Scenedesmus* est principalement présent dans les milieux eutrophes. *Tetraedron* est présent dans des environnements variés mais le plus commun dans les mares et petits lacs (Guiry & Guiry, 2008).

Ont également été rencontrées des spores de champignons qui n'ont pas été déterminées au niveau du genre ou de l'espèce. Enfin, les fragments de charbons, ont aussi été dénombrés sans distinction de taille.

E. Le traitement des données

Les comptages sont convertis en pourcentages. Le pourcentage des grains de pollen des plantes terrestres est calculé sur la somme des grains de pollen d'arbres, d'herbes et d'indifférenciés comptés par échantillon. Celui des grains des plantes aquatiques et des fougères est calculé séparément, sur le total de tous les grains de pollen et des spores de fougères. Ces pourcentages sont calculés séparément afin de faire la distinction entre le milieu régional et le milieu aquatique. Les pourcentages des NPP (Non Pollen Palynomorphs) sont calculés sur le total des NPP comptés.

Les pourcentages sont présentés sous forme d'un diagramme montrant l'évolution des principaux taxons en fonction de l'âge. Le diagramme est élaboré à l'aide du logiciel Tilia (Grimm, 1991).

La concentration (nombre de grains par cm³) et l'influx (nombre de grain par cm² par an) de l'ensemble des palynomorphes (grains de pollen, spores et NPP) et des fragments de charbon sont également calculés :

- Concentration = (nombre de grains comptés x nombre de contaminants introduits) / (volume traité x nombre de contaminants comptés)
- Influx = concentration x taux de sédimentation

Les variations de pourcentages étant ténues (Fig. 8), des analyses statistiques ont été effectuées afin de préciser la délimitation des zones du diagramme et l'interprétation des résultats. Le but de cette approche est de caractériser et dater les étapes du retrait des plantes tropicales qui s'étaient étendues dans la région des Niayes au cours de la période humide antérieure. Une classification hiérarchique a été effectuée à partir d'une analyse factorielle des correspondances afin de valider les regroupements de taxons établis par Lézine (1987) dans la région des Niayes sur la base des inventaires botaniques et les flores de l'Afrique de l'Ouest. Cette analyse a été pratiquée sur les données brutes moins les taxons qui n'apparaissent que sous la forme d'un grain unique dans un seul échantillon, ainsi que les Poaceae, les plantes cultivées et les plantes aquatiques. Ces derniers dominent largement (Poaceae), ou n'ont pas d'affinité phytogéographique définie (plantes cultivées ou aquatiques).

III. Les résultats

A. Le diagramme des pourcentages : grains de pollen et NPP

La figure 8 présente l'évolution des pourcentages des principaux taxons en fonction de l'âge. Si certains taxons comme les Poaceae présentent des variations de faible amplitude, d'autres comme *Typha* ou *Elaeis* connaissent une évolution significative. Sur la base de ces variations, quatre zones sont identifiées. De la base au sommet :

Zone 1A : 4300 - 3700 cal BP

Cette zone est caractérisée par la présence de taxons d'arbres guinéo-congolais tels que *Mallotus* (3%), *Zanthoxylum* (2,4%), *Uapaca* (2,5%), *Alchornea* (15%) et *Macaranga* (11%). Les pourcentages de *Typha* sont très faibles (inférieurs à 1%).

Parmi les NPP, *Pediastrum* et *Coelastrum* dominent largement avec des pourcentages qui peuvent atteindre des valeurs supérieures à 80% pour *Pediastrum* et 30% pour *Coelastrum*. Les autres taxons d'algues (*Botryococcus* et *Tetraedron*) sont faiblement représentés avec des pourcentages toujours inférieurs à 10%.

Zone 1B : 3700 - 3050 cal BP

Il y a peu de changement par rapport à la zone précédente. Toutefois, les taxons forestiers cités précédemment diminuent sensiblement. C'est particulièrement le cas de *Uapaca* (0,3%), *Celtis* (0,3%), *Lannea* (1,2%) et *Mitragyna* (1,2%) augmentent ainsi que les taxons de bordure humide (*Syzygium* 7,2%, *Elaeis* 1,2%). Les taxons de milieux secs, comme les Amaranthaceae et *Aerva* qui étaient ponctuellement présents en zone 1A augmentent également. Leur pourcentage reste cependant faible (inférieur à 1,5%).

Cette zone s'identifie par le changement majeur observé parmi les NPP. Ce changement est illustré par le développement massif de *Tetraedron* qui atteint jusqu'à 80% du total des NPP. Les pourcentages des algues sont tous soumis à des variations de forte amplitude.

Zone 2A : 3050 - 1600 cal BP

Cette zone s'identifie par les pourcentages de *Typha* qui augmentent de façon très significative jusqu'à représenter 15%. Cette augmentation s'accompagne de celle, plus progressive, des Cyperaceae (22,8%). Parmi les arbres, les pourcentages de *Mallotus* ou de *Uapaca* diminuent progressivement jusqu'à des valeurs inférieures à 0,5% alors que ceux d'*Alchornea* augmentent (16,5%). Les taxons des milieux secs, comme *Mitracarpus* et *Spermacoce*, déjà présents précédemment, augmentent avec des pourcentages qui atteignent jusqu'à 4%.

Les NPP sont caractérisés par l'augmentation progressive des pourcentages de *Botryococcus*, (maximum = 17%). Les pourcentages des autres algues présentent toujours, comme c'était le cas dans la zone précédente, de très fortes variations.

Zone 2B : 1600 - 700 cal BP

Par rapport à la zone précédente, on voit se développer les Cyperaceae (23%) puis *Elaeis* (2,6%). Certains taxons d'arbres guinéo-congolais (*Mallotus* 0%, *Anthostema* 0,2%, *Zanthoxylum* 0,2%, *Celtis* 0,9%) ou des zones humides (*Syzygium* 0,2%) diminuent, voire disparaissent presque complètement alors que d'autres se maintiennent (*Alchornea* 19%) ou même augmentent (*Detarium* 2,1%, *Mitragyna* 1,6%). Les pourcentages de *Typha* baissent sensiblement (5%) alors qu'apparaît une autre plante aquatique, *Potamogeton* (1,9%).

Parmi les NPP, les pourcentages de *Tetraedron* et *Botryococcus* continuent d'augmenter jusqu'à pour atteindre des maximums à 85% et 47% respectivement. Même si les variations sont toujours fortes, *Pediastrum* et *Coelastrum* diminuent de manière progressive jusqu'à des valeurs inférieures à 10%.

Les zones 3 et 4 ont fait l'objet d'une étude détaillée (Lézine et al., 2019) en annexe 3. Seules les grandes tendances sont indiquées ici.

Zone 3 : 700 - 129 cal BP

Dans cette zone, *Alchornea*, et *Elaeis* dominent tout en suivant une évolution opposée. *Elaeis* atteint sa valeur la plus élevée (12%) alors qu'*Alchornea* diminue régulièrement (minimum à 4,5%). *Syzygium* reste bien représenté (2%). Parmi les plantes de bords humides, *Typha* augmente de façon remarquable, jusqu'à 35% et les Cyperaceae diminuent (7%).

Les NPP sont dominés par *Tetraedron* (jusqu'à 90%) et *Botryococcus* (jusqu'à 60%). *Coelastrum* disparaît.

Zone 4A : 129 – -14cal BP

Cette zone est caractérisée par l'augmentation massive des Poaceae (90%) et la diminution corrélative des *Typha* (17%). Les pourcentages d'*Elaeis* restent au niveau atteint dans la zone précédente (7%). *Botryococcus* domine presque exclusivement l'assemblage des algues. Cette zone est par ailleurs caractérisée par l'apparition des spores de champignons.

Zone 4B : -14 cal BP - Actuel

Cette zone se différencie de la précédente par l'apparition de *Casuarina equisetifolia* qui atteint jusqu'à 16%. Les Poaceae diminuent jusqu'à 55% au contraire de *Typha* qui augmente jusqu'à des valeurs supérieures à 30%. *Botryococcus* domine totalement l'assemblage des algues.

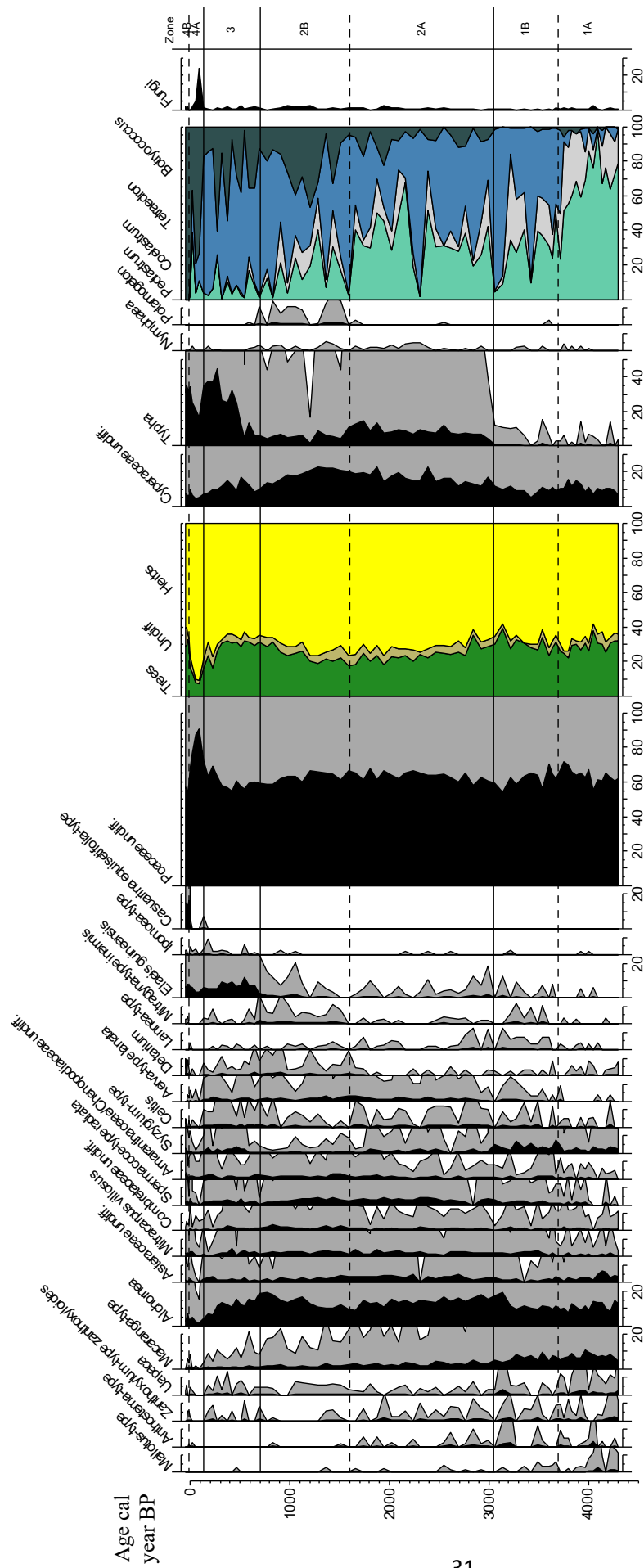


Fig.8. Diagramme palynologique simplifié des principaux taxons de la carotte Mboro-Baobab (Sénégal). Ce diagramme montre de gauche à droite suivant le temps (en âges calendaires BP) les pourcentages des taxons les plus significatifs. En couleur est présenté un diagramme synthétique montrant les pourcentages A (vert clair), Undiff (vert olive) et N (jaune). A la droite, un diagramme synthétique des algues d'eau douce : *Pediastrum* (vert), *Coelastrum* (gris), *Tetraedron* (bleu) et *Botryococcus* (bleu foncé) est présenté. Les pourcentages des grains de pollen sont calculés sur une somme excluant les plantes aquatiques et les fougères. Les pourcentages de ces derniers sont calculés sur le total général. Les Pourcentages des taxons NPP sont calculés sur le total des NPP.

B. L'analyse statistique des données

1) Les grains de pollen

La classification hiérarchique des taxons montre que trois groupes distincts se forment (Fig. 9) :

Un premier groupe est dominé par des taxons d'arbres, d'affinité guinéo-congolaise ou de milieux plutôt humides comme *Dictyandra*, *Macaranga*, *Mallotus*, *Syzygium*, *Uapaca*.

Un deuxième groupe intermédiaire est constitué d'un mélange de taxons d'arbres et de plantes herbacées, d'affinité soudanienne ou présentant une large distribution spatiale. *Alchornea*, Asteraceae, *Celtis* et *Mitracarpus villosus* sont les taxons les plus représentés.

Le troisième groupe contient très peu d'arbres à l'exception d'*Acacia* et *Adansonia digitata*. Il est dominé par des espèces herbacées rencontrées en milieu sahélien voire saharien. Les taxons les plus représentatifs sont *Aerva lanata*, les Amaranthaceae et *Tribulus*.

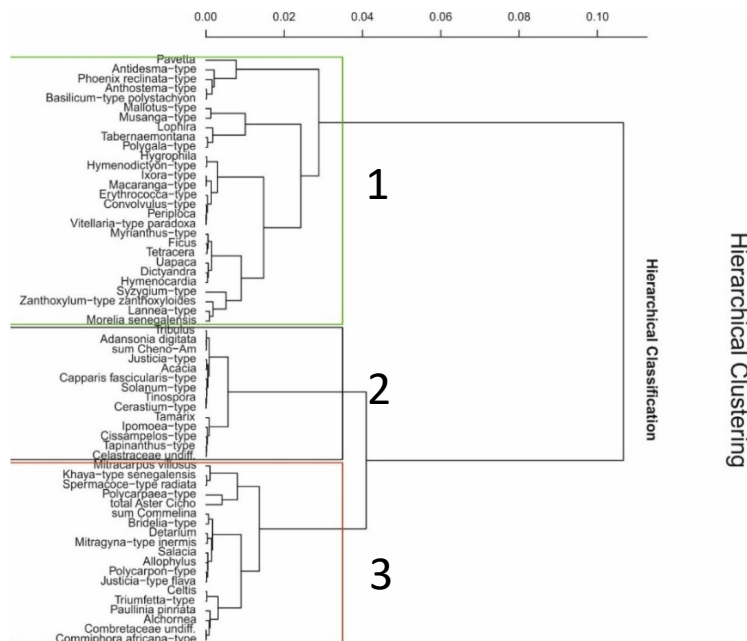


Fig.9. Classification hiérarchique des taxons obtenue à partir de l'analyse factorielle des correspondances des données de la carotte Mboro-Baobab. 3 groupes se distinguent : le groupe 1 est dominé par les taxons forestiers guinéo-congolais comme *Macaranga* ou *Mallotus*. Le groupe 3 est composé de taxons herbacés steppiques des milieux sahélien et saharien. Le groupe 2, intermédiaire, est constitué d'un mélange de taxons d'arbres et de plantes herbacées possédant souvent une large distribution spatiale.

L'analyse factorielle des correspondances permet de situer ces trois ensembles sur deux axes selon un gradient d'aridité croissant (axe 1) (Fig. 10). Le premier groupe s'identifie à l'extrémité droite de l'axe 1 formé principalement d'éléments forestiers Guineo-Congolais. Il caractérise la période 4300-3200 cal BP (phase 1 - Fig. 11A). A l'opposé se situe le groupe 3 en majorité formé des éléments herbacés steppiques qui augmentent régulièrement depuis le début de la phase 1 jusqu'à la limite entre les phases 2 et 3. Ce groupe caractérise la période post 1500 cal BP, en particulier la période post-500 cal BP (phase 3 - Fig. 11A). Entre ces deux extrêmes s'identifie le groupe 2 où les éléments forestiers cohabitent avec les éléments herbacés steppiques. Ce groupe s'insère dans la période qui voit la progressive diminution des éléments les plus humides et l'augmentation des éléments steppiques (phase 2 Fig. 11A).

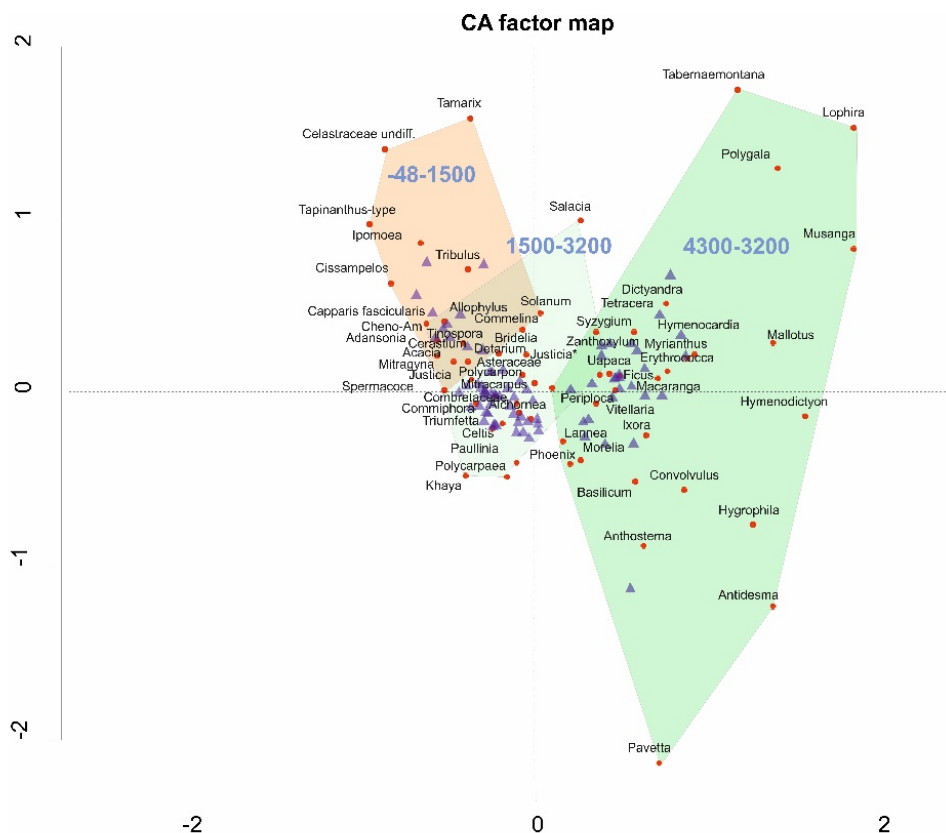


Fig.10. Les résultats de la projection de l'AFC situent les 3 groupes de végétation sur un axe d'aridité croissante de droite à gauche. Les éléments forestiers humides du groupe 3 caractérisent la période de 4300 à 3200 cal BP. A l'opposé, le groupe 1 constitué des éléments les plus sec caractérise la période post-1500 cal BP. Entre les deux se dessine une période intermédiaire allant de 3200 à 1500 cal BP intégrant une association de taxons herbacés et arbustifs.

2) Les pourcentages et les influx des groupes issus de l'analyse statistique

Le pourcentage de ces trois groupes a été calculé sur la somme des taxons utilisés dans l'analyse statistique. Deux observations se dégagent du diagramme synthétique des pourcentages de ces groupes (Fig. 11a) :

(1) une coupure majeure se dégage à 3200 cal BP avec l'augmentation des éléments du groupe 2 et la chute des éléments du groupe 1. Cette dernière est définitive à 2700 cal BP après une période de fluctuations d'environ 500 ans.

(2) une évolution lente des éléments de groupe 3 montre une aridification progressive depuis le début de la période couverte par la série pollinique. Les éléments arides augmentent régulièrement jusqu'à 1500 cal BP puis se stabilisent jusqu'aux derniers 300 ans.

L'analyse des influx confirme ces observations (Fig. 11b). Elle met en lumière un élément supplémentaire : une phase au cours de laquelle les éléments des groupes 1 et 2 augmentent fortement, entre 3900 et 3700 cal BP (avec un pic à 3800 cal BP).

Un changement majeur dans l'environnement du site intervient au cours du dernier millénaire marqué par la diminution des éléments du groupe 2 à partir de 700 cal BP suivi d'un effondrement général de l'environnement végétal. L'étude du dernier millénaire, sera discutée au chapitre IV. D.

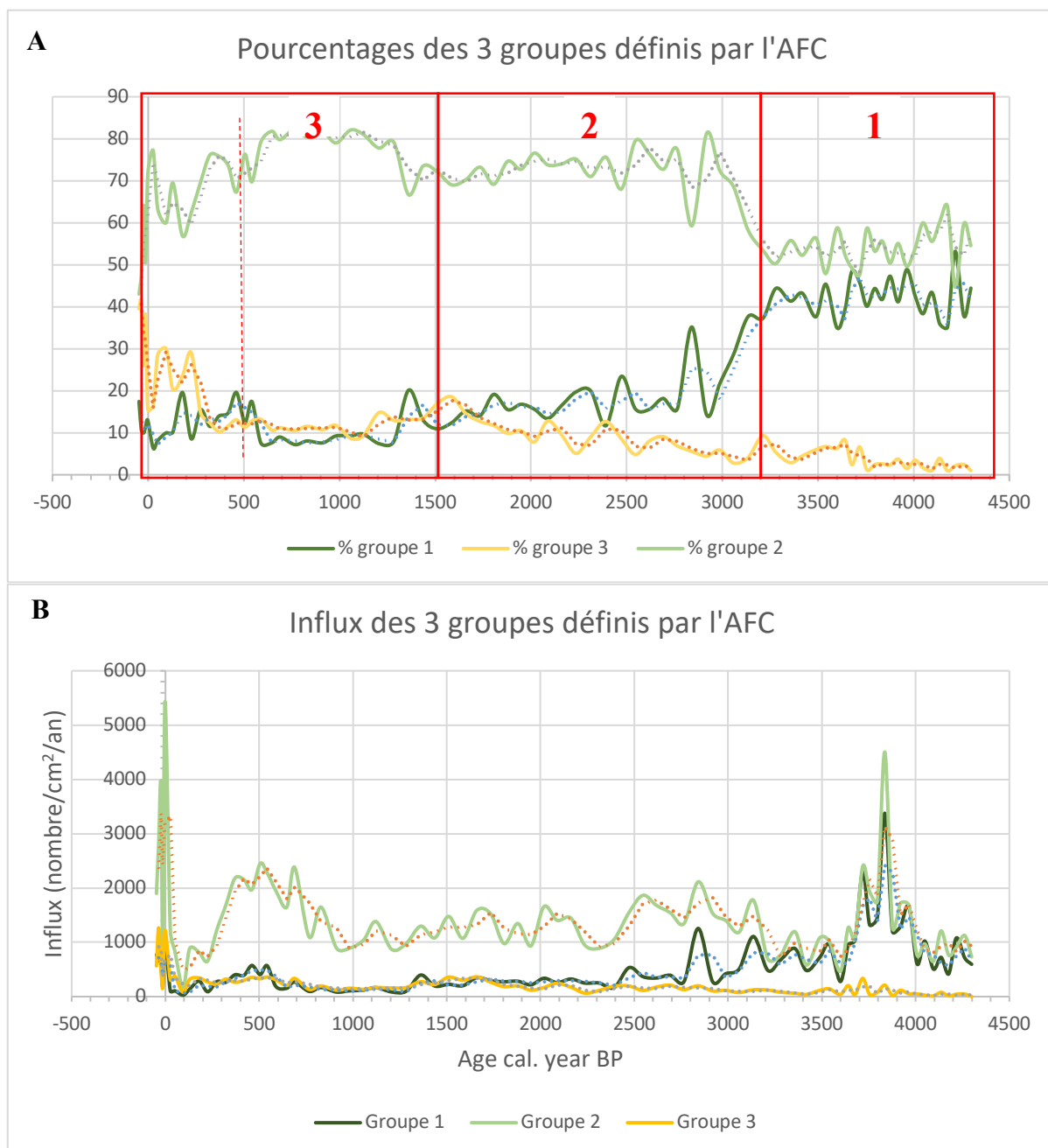


Fig.11. Évolution des pourcentages (A) et influx (B) de pollen regroupés par l'AFC en fonction du temps en âge cal BP. Les pourcentages sont calculés sur la somme des taxons utilisés pour l'analyse. Les numéros 1 à 3 se rapportent aux grandes coupures dégagées par l'analyse.

C. Les algues

Les mesures d'influx des algues (Fig. 12) confirment la chronologie des événements environnementaux décrits par la palynologie (Fig. 8) : la période allant de la base de la séquence jusqu'à 3050 cal BP (sommet de la zone palynologique 1b) est caractérisée par une forte productivité algale dominées par *Pediastrum* et *Coelastrum*

indiquant la présence d'eau douce dans la dépression. Deux pics successifs sont enregistrés : Le premier, à 3836 cal BP, est contemporain du pic des influx des éléments tropicaux du groupe 1 (Fig. 11B) ; le second, à 3280 cal BP se situe toujours dans la période caractérisée par les éléments du groupe 1 (Fig. 11A) dont les influx sont cependant nettement inférieurs (Fig. 11B).

Les valeurs d'influx de *Pediastrum* et *Coelastrum* enregistrent une décroissance brutale à 3050 cal BP puis disparaissent quasiment de l'assemblage des algues après 1200 cal BP ; la période intermédiaire, entre 3050 et 1200 cal BP, étant caractérisée par de fortes fluctuations affectant le taxon le mieux représenté, *Pediastrum*. *Botryococcus*, absent à la base du diagramme, augmente régulièrement jusqu'à 1500 cal BP sans atteindre des valeurs supérieures à 3600 cellules/cm²/an. Ce n'est que dans la partie supérieure de la série sédimentaire après 700 cal BP qu'il domine l'assemblage des algues (sommet de la zone palynologique 2B, Fig. 8). Il atteint un pic de 25800 cellules/cm²/an à l'actuel.

Tetraedron atteint des valeurs d'influx (Fig. 13) en moyenne 11 fois plus élevées que les trois taxons précédents ce qui est cohérent avec la faible épaisseur de la tranche d'eau de la dépression. Sa quasi absence à la base de la série jusqu'à 3750 cal BP renforce l'hypothèse d'une tranche d'eau supérieure lors d'une phase humide favorable à la présence des arbres tropicaux.

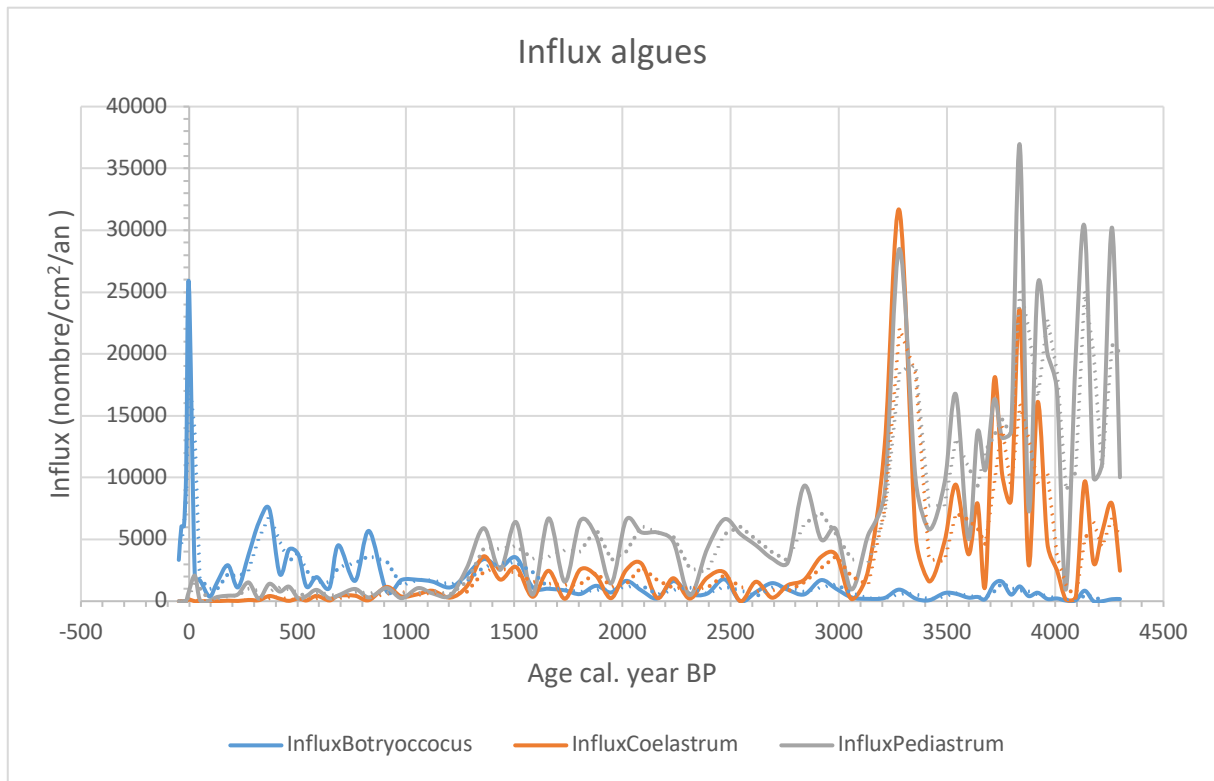


Fig.12. Évolution des influx des algues en fonction du temps en cal BP sur le site Mboro-Baobab montrant le changement majeur de l'environnement hydrologique à 3280 cal BP.

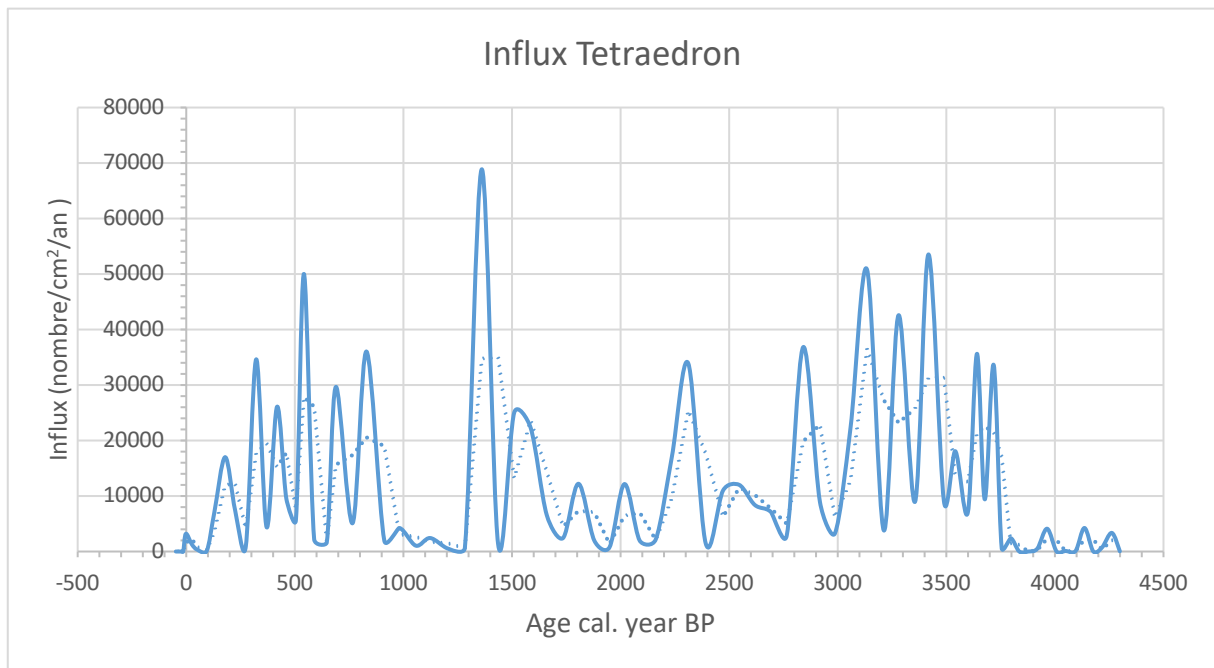


Fig.13. Évolution des influx de *Tetraedron* en fonction du temps en cal BP sur le site Mboro-Baobab montrant l'augmentation massive de ces algues à 3700 cal BP.

D. Les fragments de charbons

Depuis la base jusqu'à environ 600 cal BP, les influx de charbons restent très faibles (Inférieur à 60000 fragments/cm²/an) et leur présence épisodique. Ce n'est que dans les derniers siècles qu'une augmentation conséquente du nombre de charbons est remarquable (Fig. 14).

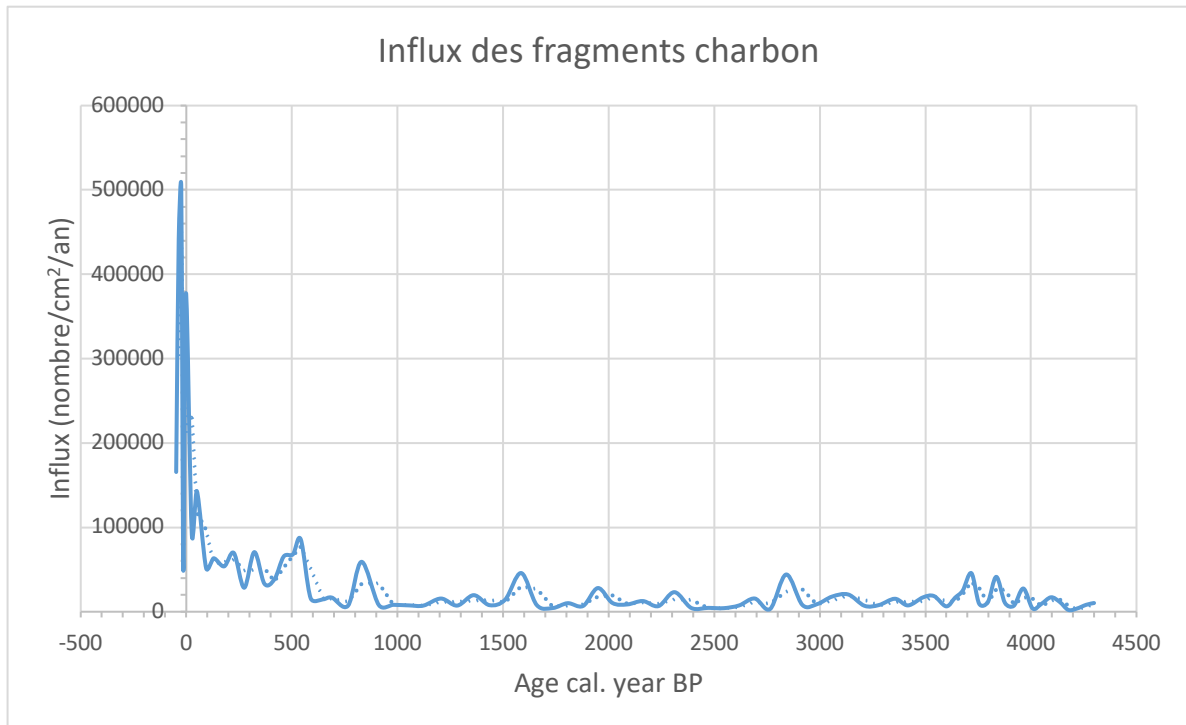


Fig.14. Évolution des influx des fragments de charbon en fonction du temps en cal BP sur le site Mboro-Baobab.

IV. Interprétation et discussion

A. La fin de la période humide au Sahel

L'augmentation de la radiation solaire d'été induite orbitalement entre -12000 et -6000 ans a eu pour conséquence le renforcement du contraste thermique entre les surfaces continentales et océaniques ce qui a été à l'origine de fortes moussons d'été (COHMAP, 1988). C'est la « Période Humide Africaine » (de Menocal et al., 2000). Au cours de cette période (aussi appelée Holocene Humid Period, HHP), le niveau des lacs du Sahara et du Sahel augmente de façon extrêmement importante (Lézine et al., 2011) (Fig. 15) jusqu'à plusieurs dizaines voire une centaine de mètres par rapport au

niveau actuel (Shanahan et al., 2009 ; Gasse, 2000). La Figure 16 montre l'évolution des 4 situations hydrologiques (lacs permanents, lacs temporaires (ou playas), rivières, marécages et paléosols) au cours de cette période. On observe une augmentation des environnements humides qui s'intensifie à partir de 10500 cal BP pour atteindre un maximum entre 9500 et 7500 cal BP. A partir de 7500 cal BP, les niveaux de lacs s'abaissent progressivement jusqu'à l'actuel pour laisser place à des marécages. Le maximum des surfaces humides se situe autour de 6000 cal BP (ligne bleu ciel sur la Figure 15).

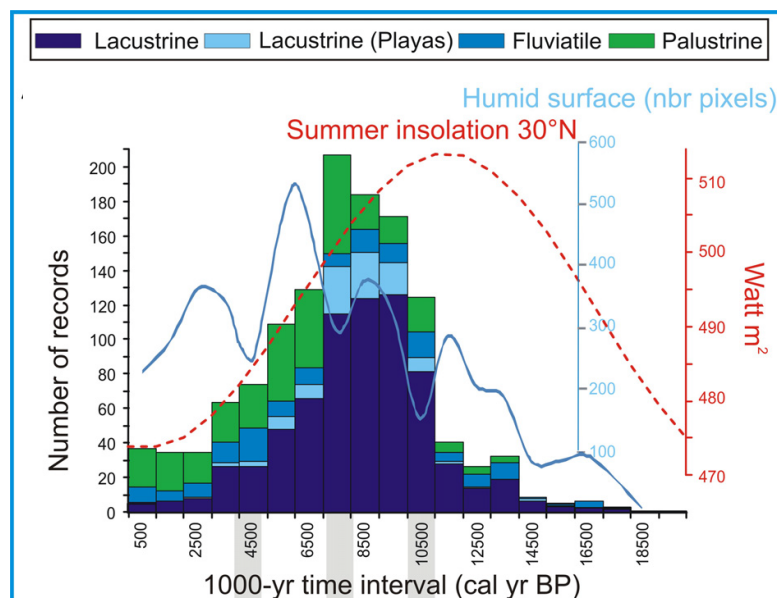


Fig.15. Nombre d'enregistrements paléo-hydrologiques d'Afrique Nord tropicale (détaillés en 4 types : lacs permanents, lacs temporaires ou playas, rivières et marécages) en fonction du temps en années cal BP. La courbe de l'insolation en juin est superposée en pointillés rouges (Berger et Loutre, 1991). La courbe bleu représente l'étendue des surfaces humides qui atteint son maximum à 5500 cal BP. (Lézine et al., 2011)

L'augmentation des conditions humides a entraîné la migration des plantes tropicales Guinéo-Congolaises et Soudaniennes, aujourd'hui présentes au Sud du Sénégal ou en bordure du Golfe de Guinée, vers le Nord (Watrin et al., 2009). Ces plantes se sont alors installées jusqu'à la latitude 25°N au Sud de la Lybie (Fig. 16). Elles ont utilisé les réseaux de rivières et de fleuves où les conditions d'humidité du sol étaient importantes comme voie de migration. Toutefois, la permanence d'éléments steppiques, même au cœur de la période humide montre que l'environnement végétal était contrasté avec coexistence de zones humides et zones sèches. Les données palynologiques ne montrent pas de remplacement d'une zone de végétation par une autre mais une interpénétration d'éléments aujourd'hui dans des zones distinctes.

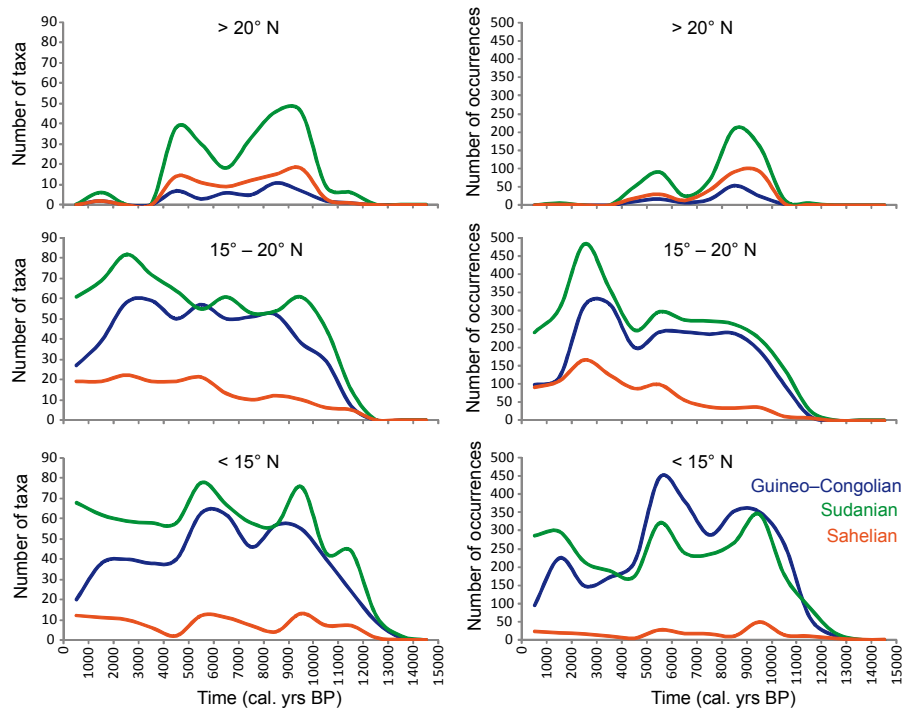


Fig.16. Changements de biodiversité au sein des trois groupes de végétation : guinéo-congolais (bleu), soudanien (vert) et sahélien (rouge) en fonction du temps en cal BP dans trois zones de latitude d’Afrique tropicale, au Nord de 20°N, entre 15 et 20 °N et au Sud de 15°N. A gauche, sont représentées les variations du nombre de taxons et à droite leur abondance. La figure montre une augmentation importante du nombre de taxons et de leur abondance au début de l’Holocène, en réponse à la mise en place et l’intensification de la mousson africaine. Au cœur de la période humide Holocène, le paysage est composé d’une mosaïque des trois groupes de végétation. (Hély et al., 2014).

En étudiant les dépôts d’éléments terrigènes dans une carotte marine prélevée au large des côtes de la Mauritanie, de Menocal et al. (2000) suggère que la transition entre un environnement humide et un environnement aride à la fin de la période humide Holocène aurait été abrupte et se serait produite vers 5500 cal BP. Depuis, d’autres publications comme celle de Shanahan et al. (2015) ont montré que cette transition aurait plutôt été progressive. Elle se serait, de plus, produite avec un décalage dans le temps de plus en plus long vers le Sud (Fig. 17). Ce décalage se chiffrerait à 2000 ans entre la Mauritanie à 20.8°N et l’embouchure du Congo à 5.5°S. L’étude de la variation de la composition isotopique de l’hydrogène des cires de feuilles d’une carotte marine localisée au large du Sénégal (15,5°N), à une latitude proche de celle du site Mboro-Baobab confirme la chronologie de de Menocal et al. (2000) concernant la fin de l’HHP. Elle montre cependant une diminution des précipitations progressive jusqu’à 1000 cal BP. Ces exemples discutés par Shanahan et al. (2015) montrent donc toute la complexité de cette période clé de l’histoire climatique de

l'Afrique tropicale. L'importance d'enregistrements précis permettant d'en fixer la chronologie en est d'autant plus grande.

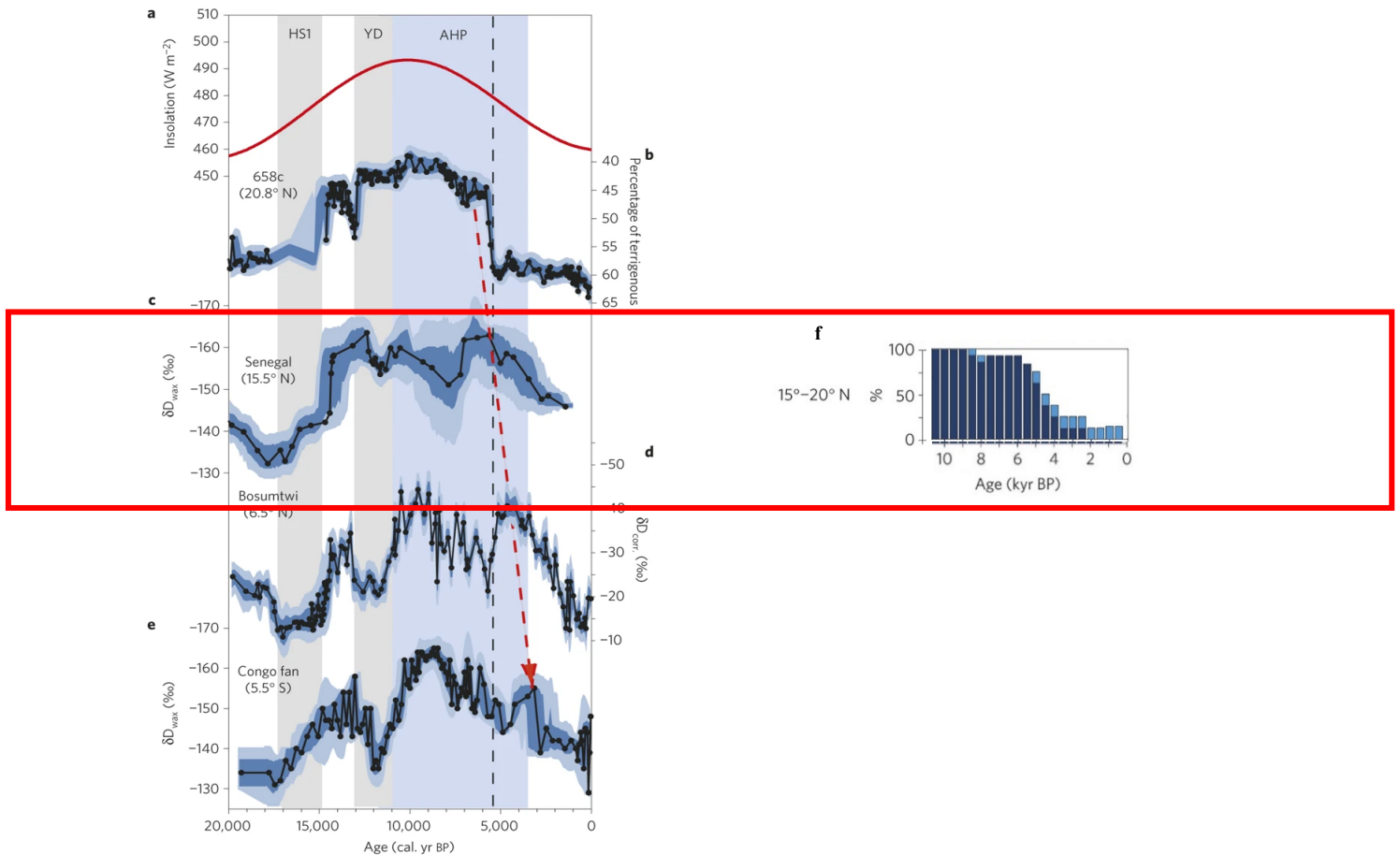


Fig.17. Marqueurs de la variabilité de la mousson Ouest Africaine durant les derniers vingt mille ans (Shanahan et al., 2015). Sur cette figure, l'échelle de temps est inversée et le zéro se situe sur la droite. **a** : Insolation estivale à 30°N , **b** : Variation d'influx d'éléments terrigènes dans une carotte marine au large de la Mauritanie (20°45'N 18°35'W), **c-e** : Variation de la composition isotopique de l'hydrogène des cires de feuilles δD_{wax} dans le fleuve Sénégal (**c**, 15°30'N 17°57'W), au lac Bosumtwi (**d**, 6°30'N 1°25'W) et dans le bassin du Congo (**e**, 5°35'S 11°13'E). La ligne en pointillé noir indique la fin de la période humide Holocène. La flèche en pointillé rouge souligne le décalage dans le temps de la migration de la ceinture de pluie vers le Sud. L'encadré rouge montre la situation décrite par Shanahan et al. (2015) au Sahel avec à gauche l'enregistrement marin (**c**) et à droite les données hydrologiques continentales (**f**). Ces deux types d'enregistrements soulignent le caractère progressif de l'aridification du Sahel.

B. La fin de la période humide Holocène dans les Niayes

Lézine (1989) a montré que l'expansion massive des galeries forestières guinéo-congolaises dans les Niayes avait pris fin de façon brutale, vers 2500 cal BP. Comme le montre la Figure 18 tirée de Lézine (2017) et Vincens et al. (1999), la chronologie de la dégradation des environnements végétaux à la fin de l'HHP varie principalement en fonction du contexte hydrogéologique local qui peut maintenir des conditions humides favorables au développement forestier longtemps après la fin de la période humide.

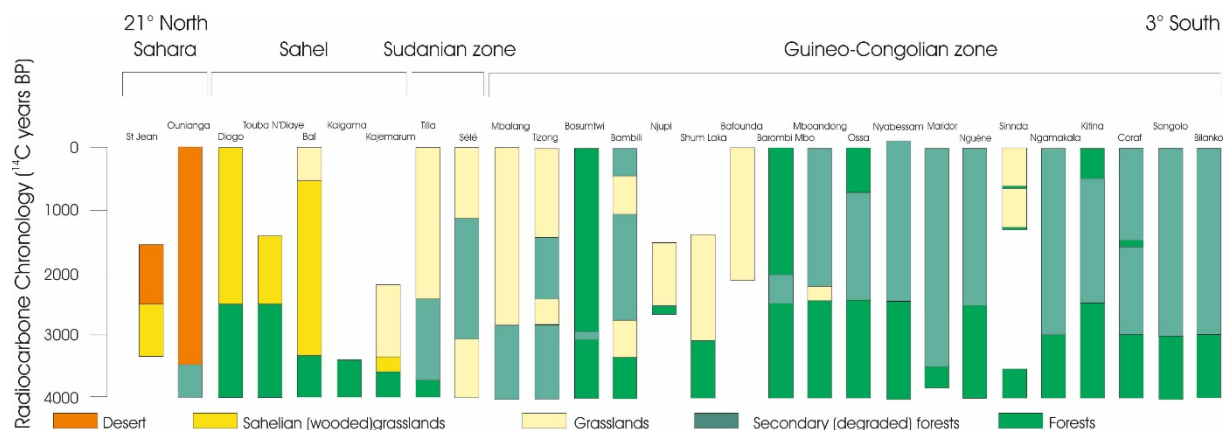


Fig.18. Chronologie de la dégradation des environnements végétaux à la fin de la période humide Holocène. Cette chronologie est différente d'un site à l'autre en fonction de la latitude et des conditions hydrologiques locales (Vincens, 1999 ; repris par Lézine 2017).

L'importance des conditions hydrologiques locales est particulièrement nette dans la zone des Niayes. Le site de Diogo (Lézine, 1989) est situé au centre du système hydrologique, où la nappe est la plus stable (Putallaz, 1962) (Fig. 19). Le site de Touba N'Diaye au contraire est situé sur ses bordures. Il est donc naturellement beaucoup plus sensible aux variations, même mineures, du niveau phréatique que le site de Diogo. A Diogo, l'Holocène est entièrement forestier et stable comme le montrent les valeurs des pourcentages des taxons arbustifs, toujours situées aux alentours de 40% de la somme totale des grains de pollen et des spores (entre 50 et 80% d'une somme excluant les plantes aquatiques et les fougères) (Lézine, 1989) (Figure 20A). A Touba N'Diaye au contraire s'observent des variations importantes de la somme des arbres, avec notamment une période d'effondrement forestier au milieu de l'Holocène entre 8000 et 6000 cal BP et des périodes de développement autour de 9000 et 3500 cal BP (Figure 20B). Le comportement des arbres à Touba N'Diaye reflète l'étroite relation

entre la disponibilité en eau et le développement forestier ainsi que l'extrême sensibilité des galeries forestières des Niayes aux variations de celle-ci.

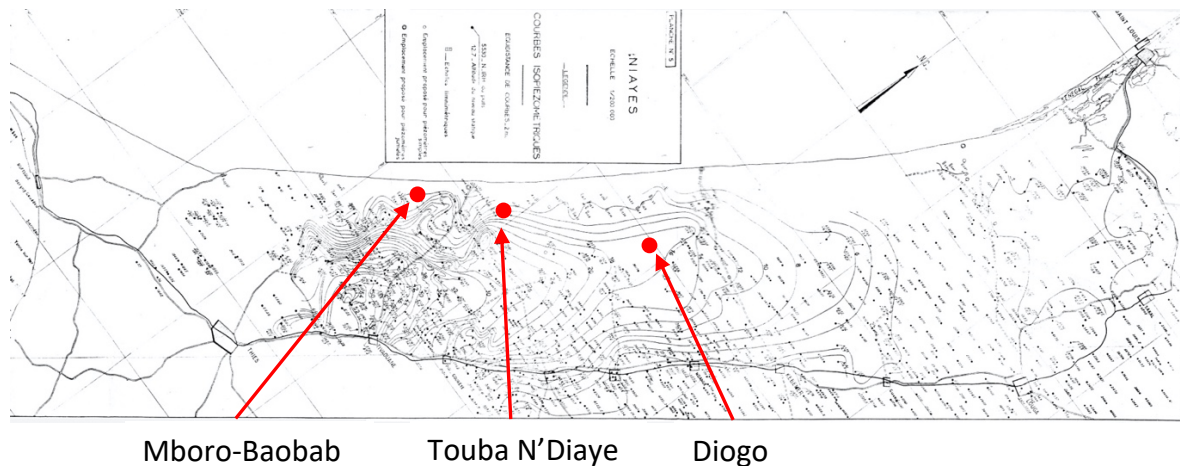


Fig.19. Carte piézométrique de la nappe phréatique de la région des Niayes. Sont indiqués en rouge le site de Mboro-Baobab ($15^{\circ} 8'58.49''$ N, $16^{\circ}54'34.37''$ W) ainsi que deux sites préalablement étudiés par Lézine (1989) : Touba N'Diaye ($15^{\circ}10' N$ $16^{\circ}52' W$) et Diogo ($15^{\circ}16'N$ $16^{\circ}48' W$). Le site de Touba N'Diaye, bien que proche du site Mboro-Baobab se situe de l'autre côté du paléodrainage. Le site de Diogo, plus au Nord, est au centre du système hydrologique et il est donc moins sensible aux changements de niveau de l'aquifère (Putallaz, 1962).

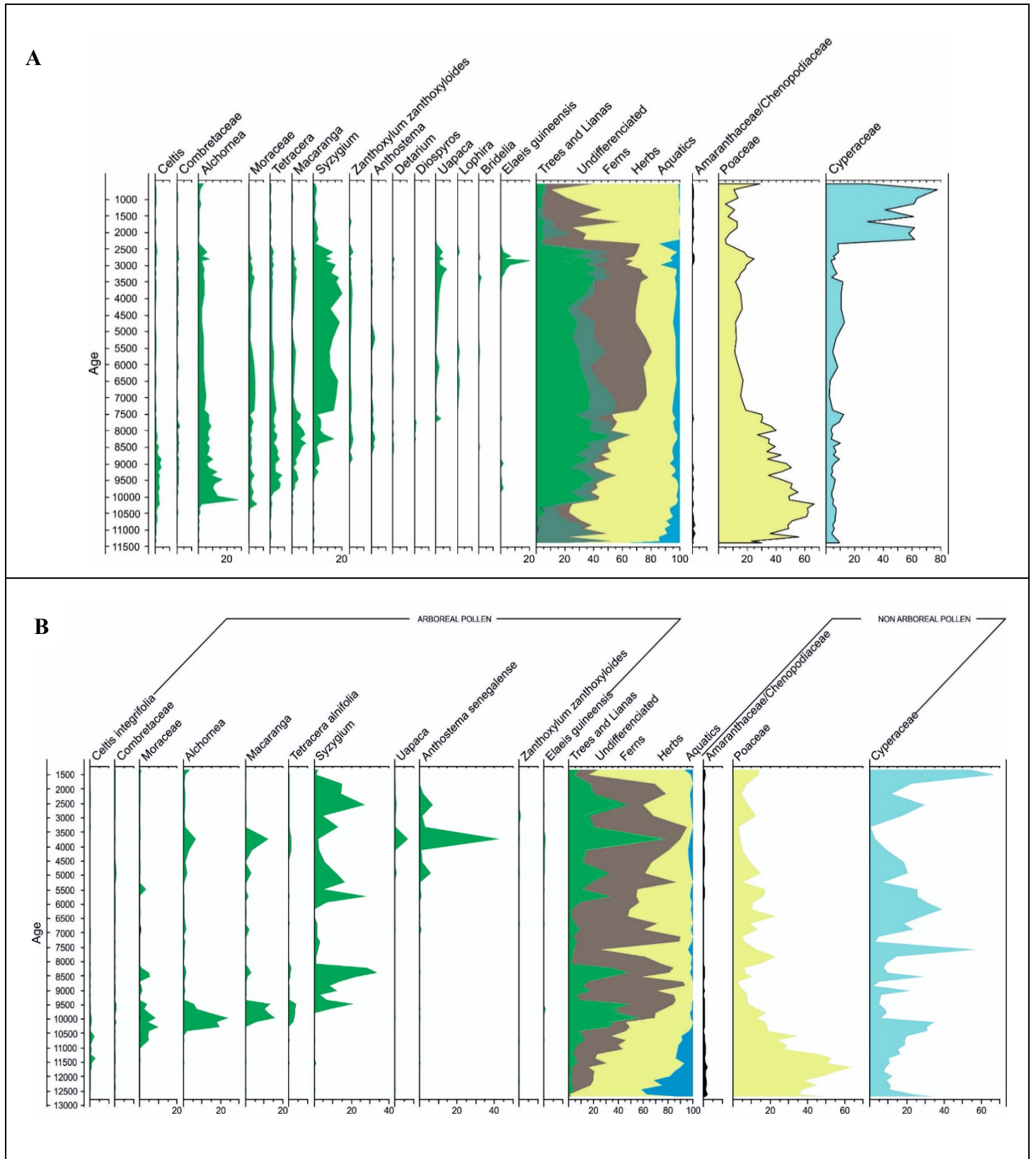


Fig.20. Diagrammes palynologiques simplifiés de deux sites de la région des Niaves : **A** : Diogo (15°16 N 16°48 W). **B** : Touba N'Diaye (15°10 N 16°52 W). Les pourcentages sont ici calculés sur une somme incluant la totalité des grains de pollen et spores comptés (Lézine, 1988).

C. La fin de l'HHP à Mboro-Baobab

La résolution élevée de l'étude de la carotte Mboro-Baobab (en moyenne un échantillon tous les 60 ans) permet de documenter avec précision la chronologie des événements à la transition entre l'HHP et la période actuelle.

1) Un paysage à physionomie constante

Par comparaison avec les sites de Diogo et Touba N'Diaye, Mboro-Baobab présente des variations du couvert arboré très faibles (inférieures à 10%). Il est probable que le site était déjà, à 4300 cal BP dans un contexte plus sec qu'à Touba N'Diaye et Diogo de par sa position en périphérie de la nappe phréatique. Ces conditions expliquent aussi le faible pourcentage d'arbres à Mboro-Baobab en comparaison aux autres sites. A Mboro-Baobab, le pourcentage des arbres est d'environ 30% alors qu'il peut monter jusqu'à 80% à Touba N'Diaye et Diogo.

2) Une évolution progressive vers l'assèchement du milieu lacustre

Le milieu aquatique montre cependant une tendance progressive à l'assèchement du plan d'eau. Deux étapes sont observées : la première à 3700 cal BP où le développement rapide de *Tetraedron* parmi les algues (Fig. 13) suggère que le niveau du lac s'abaisse ; la seconde à 3050 cal BP où *Pediastrum* chute drastiquement (Fig. 12) en même temps que *Typha* se développe en bordure de la dépression (Fig. 8). Cette dernière étape témoigne d'une accentuation de la baisse du niveau lacustre et du développement consécutif des zones péri-aquatiques qui ont permis le développement des populations de *Typha* en bordure du plan d'eau. Jusque vers 700 cal BP, des plantes aquatiques (*Nymphaea* et *Potamogeton*) sont toutefois présentes, ce qui suggère que de l'eau douce était toujours présente.

3) Le retrait progressif des éléments tropicaux humides

Entre 4300 et 3200 cal BP, la composition de la végétation révèle que des arbres de type Guinéo-Congolais étaient présents à Mboro-Baobab au cours de l'HHP (Fig. 8) comme c'était le cas dans les dépressions proches de Touba N'Diaye et Diogo. Le pic

d'influx pollinique du groupe 1 montre en outre que ces arbres se sont particulièrement développés au cours d'une période centrée autour de 3800 cal BP (Fig. 11B). Une phase forestière identique est enregistrée à Touba N'Diaye, notamment par les pics de *Macaranga*, *Uapaca* et *Anthostema* entre 4000 et 3500 cal BP (Fig. 20B). Au-delà de la région des Niayes, le site de Jikariya dans la région des Manga au nord du Nigeria (Waller et al., 2007) enregistre également une phase de développement forestier entre 3800 et 3500 cal BP (Fig. 21). La concordance de ces résultats confère à cette phase de développement forestier une valeur régionale, probablement liée à des conditions humides.

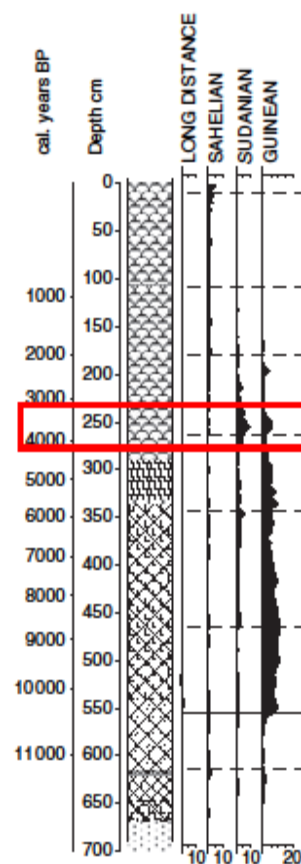


Fig.21. Diagramme palynologique simplifié du site de Jikariya au Nord Est du Nigeria (13°18.82'N 11°04.62'E). L'encadré rouge met en avant l'augmentation des éléments soudaniens et guinéens entre 3800 et 3500 cal BP. Cette augmentation marque un retour de conditions humides (Waller et al., 2007).

A 3200 cal BP, l'augmentation du groupe 2 coïncide avec le changement hydrologique majeur noté par l'augmentation des *Typha* et la chute des *Pediastrum*, indiquant la mise en place de conditions plus sèches dans le secteur de Mboro-Baobab. Cependant, le groupe 1 est toujours présent bien qu'il diminue progressivement pour atteindre son niveau le plus bas à 2700 cal BP. Cette diminution correspond au retrait

successif des taxons, tout d'abord *Mallotus*, *Uapaca*, *Macaranga*, suivi d'*Anthostema*. Si certains disparaissent ensuite presque complètement, (*Mallotus* et *Anthostema*) d'autres restent présents jusqu'au sub-actuel, bien que faiblement représentés. C'est le cas d'*Alchornea* et *Macaranga* dont les pourcentages indiquent qu'ils restent bien représentés particulièrement après 3200 BP, jusqu'au dernières centaines d'années. Ces résultats permettent de dater la fin de l'HHP dans la dépression de Mboro-Baobab entre 3200 et 2700 cal BP, légèrement antérieurement à la date initialement proposée par Lézine (1989) de 2500 cal BP.

D. La crise environnementale du dernier millénaire

Une seconde crise environnementale est enregistrée par la carotte Mboro-Baobab. Elle est contemporaine du LIA (petit âge glaciaire ou Little Ice Age) des moyennes latitudes (Mann, 2002). L'étude détaillée du dernier millénaire, publiée dans Lézine et al. (2019), intègre aussi l'analyse des diatomées de la carotte Mboro-Baobab. Ce travail a été réalisé en collaboration avec Cheikh Abdoul Kader Fofana (département de géologie, université Cheikh Anta Diop, Dakar). L'étude des diatomées couplée à l'analyse palynologique a permis de préciser la chronologie des événements du dernier millénaire. Elle apporte en particulier des éléments sur la salinité du milieu.

Trois éléments principaux caractérisent l'évolution de l'environnement du site de Mboro-Baobab au cours de cette période.

1) La tendance à l'assèchement de 1340 CE à 1900 CE

Plusieurs indicateurs montrent que l'assèchement progressif de la dépression Mboro-Baobab initié au cours de l'HHP s'intensifie au cours du dernier millénaire. L'analyse de la flore de diatomées confirme les observations tirées de l'étude des algues vertes (Fig. 12 et 13) et montre que l'eutrophisation progressive du plan d'eau s'accompagne d'une augmentation de la salinité. Les conditions salines augmentent à partir de 1340 CE et atteignent un maximum à 1906 CE (Fig. 22C). L'assèchement de la dépression de Mboro-Baobab est maximal au cours de cette période comme l'illustrent la disparition des algues vertes et le pic de champignons daté à 1845 CE.

Le rapport *Typha*/Plantes aquatiques, qui reflète l'évolution de la bordure lacustre, montre que les surfaces favorables au développement des plantes péri-aquatiques atteignent leur maximum aux environs de 1640 CE. Ce rapport ne fluctue que très faiblement après cette date.

On note que l'augmentation de ce rapport intervient après une phase de développement de *Syzygium*, un arbre de marécage. Ceci a été interprété comme l'illustration de deux phases successives d'abaissement du plan d'eau.

2) L'effondrement de la galerie forestière à 1640 CE

Les taxons de plantes tropicales humides sont stabilisés autour de 30% (Fig. 22A), montrant que la galerie forestière était très modérément développée à Mboro-Baobab jusqu'à 1640 CE. A cette date, leurs pourcentages chutent brutalement et atteignent un minimum à 1845 CE. Ce minimum est atteint en même temps que le niveau de l'eau dans la dépression est au plus bas. A cette même période, les pourcentages des éléments les plus secs du groupe 3 augmentent de façon significative (phase 3 Fig. 11).

3) L'impact anthropique

Avant 1600 CE, le nombre de fragment de micro-charbon est très faible. A partir de 1350 CE, les influx augmentent faiblement (Fig. 22A). Cette première phase d'augmentation correspond au LIA et met en avant la répétition des feux et le probable allongement de la saison sèche. En revanche, l'augmentation sans précédent qui a lieu dans les dernières décennies suggère un changement radical, sans doute lié aux activités économiques de la région, comme l'intensification de la production de charbon autour des villes de Thiès et Saint-Louis depuis 1950 (Gueye, 2000).

En conclusion de l'étude du dernier millénaire à Mboro-Baobab, l'événement humide décrit au Sahel par Maley (1976) autour de 1600 CE au lac Tchad et par Carré et al. (2019) dans le delta du Saloum entre 1500 et 1800 CE ne se retrouve pas dans la région des Niayes tout comme plus au nord aux environs de St Louis (Fofana et al., 2020). Les conditions environnementales du LIA apparaissent au contraire marquées par une forte dégradation liée à l'assèchement du climat. Ces résultats sont

concordants avec ceux de Shanahan et al. (2009) qui identifie une période sèche entre 1400 et 1750 CE dans l'enregistrement du lac Bosumtwi.

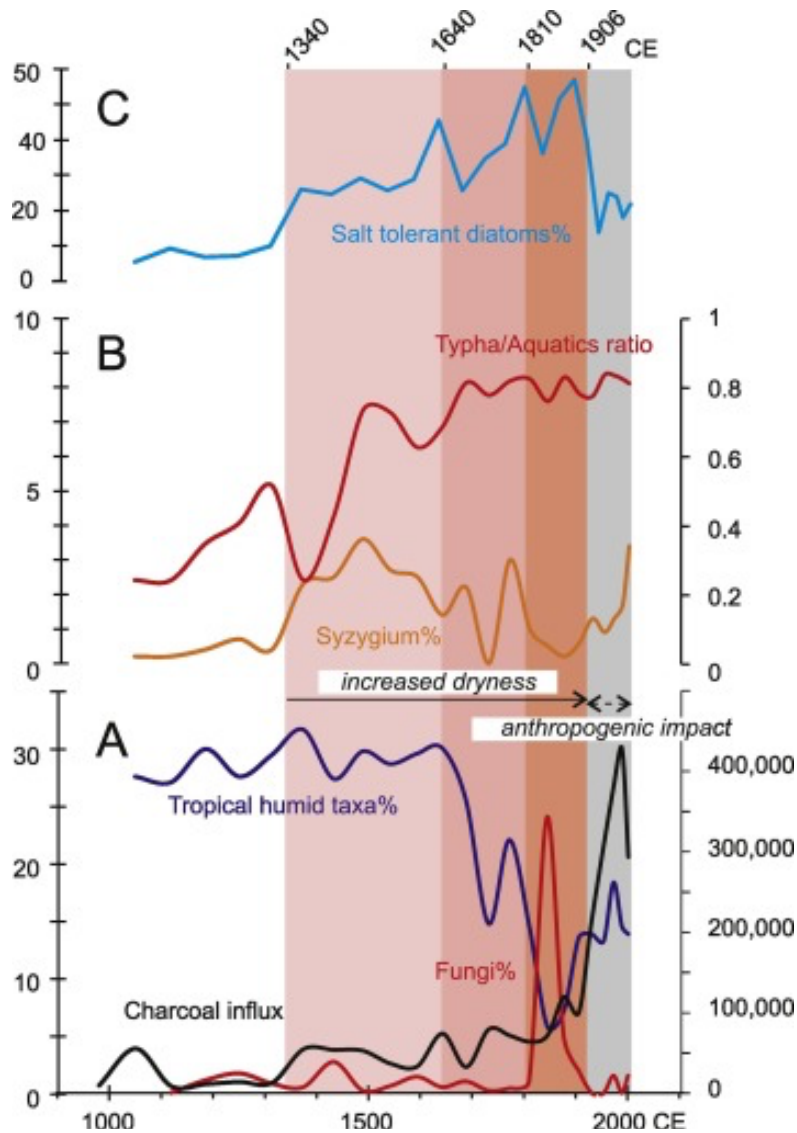


Fig.22. Évolution des principaux marqueurs environnementales sur le site Mboro-Baobab en fonction de la chronologie CE au dernier millénaire. **A** : Les pourcentages de pollen et de spores de champignons et les influx de charbon montrent la tendance à l'assèchement qui atteint son maximum à 1845 CE et l'augmentation des activités anthropiques pendant les derniers siècles. **B** : Les marqueurs polliniques de l'abaissement du niveau du lac. **C** : Les pourcentages de diatomées tolérantes de conditions salées. (Lézine et al., 2019)

Conclusion

L'analyse des micro-organismes organiques (pollen, spores, algues) d'une séquence sédimentaire de 4300 ans prélevée au site de Mboro-Baobab dans la zone des Niayes du Sénégal a permis de décrire l'évolution de l'environnement végétal et lacustre du site à la fin de la période humide Holocène. Le taux de sédimentation important (0.4-0.5cm/an) a donné l'opportunité, rare au Sahel, de préciser l'amplitude et la chronologie du changement environnemental aux échelles locale (évolution du milieu hydrologique) et régionale (végétation).

Quatre grandes périodes caractérisent le milieu hydrologique :

- Entre 4300 et 3700 cal BP, le lac de Mboro Baobab est un lac d'eau douce comme l'indique la dominance des taxons *Pediastrum* et *Coelastrum*.
- Entre 3700 et 3050 cal BP, l'apparition de *Tetraedron* dans le cortège algaire suggère l'abaissement du plan d'eau et donc une certaine détérioration des conditions hydrologiques.
- A 3050 cal BP l'abaissement du plan d'eau se poursuit. Un seuil se franchit dans l'assèchement du milieu permettant le développement d'une importante population de bordure lacustre (*Typha*). L'apparition de *Botryococcus* suggère un début d'eutrophisation qui s'accroît progressivement jusqu'à l'actuel. La présence de *Nymphaea* et *Potamogeton* indique que l'eau douce était toujours présente.
- Au cours du dernier millénaire, les conditions hydrologiques sont clairement dominées par la sécheresse ; les diatomées indiquant par ailleurs une salinisation progressive du plan d'eau. Un court épisode d'assèchement au moins partiel du plan d'eau est daté à 105 cal BP.

Par comparaison avec les autres sites des Niayes (Touba N'Diaye et Diogo), le site Mboro-Baobab est caractérisé par une végétation de galerie forestière très dégradée, y compris à la fin de la période humide entre 4300 et 3700 cal BP. Ceci est probablement dû à la situation du site en périphérie de la zone d'alimentation de la nappe phréatique, où les conditions environnementales sont peu favorables au développement forestier. Les données palynologiques montrent toutefois que la phase

de développement forestier déjà observée dans les Manga entre 3800 et 3500 cal BP (Waller et al., 2007) est également enregistrée à Mboro-Baobab autour de 3800 cal BP.

A 3700 cal BP, s'observent les premiers indices d'aridification du milieu comme par exemple, apparition du taxon herbacé steppique *Aerva*. L'importance des taxons steppiques s'intensifie progressivement pour atteindre son maximum en deux phases successives, à 1500 cal BP puis 300 cal BP. La réponse de la végétation forestière à cette aridification se fait sentir dès 3200 cal BP. Entre 3200 et 2700 cal BP, le groupe des taxons les plus humides décline progressivement. Il se maintient à un bas niveau jusqu'à 310 cal BP (1640 CE), puis s'effondre jusqu'à des valeurs inférieures à 5% à 105 cal BP (1845 CE).

Ces résultats montrent une grande cohérence entre le comportement du milieu hydrologique et celui de la végétation lors de la mise en place de conditions arides à 3700 cal BP. Par contre, à l'inverse du changement brutal du milieu lacustre daté de 3050 cal BP, la réponse de la végétation forestière est plus progressive, initiée antérieurement, dès 3700 cal BP. Les taxons de forêt sèche (*Lannea*) se développent en effet dès 3700 cal BP. A l'inverse, les taxons forestiers *Mallotus* et *Anthostema* disparaissent presque complètement à 3000 cal BP. *Zanthoxylum*, *Macaranga* et *Uapaca* restent, eux, présents très faiblement jusque dans les derniers siècles ainsi qu'*Alchornea*, jusqu'à l'actuel. La destruction quasi totale de la galerie forestière Holocène de Mboro-Baobab est enfin datée de 310 cal BP (1640 CE).

En l'absence de taxons polliniques marqueurs de l'agriculture, déceler l'impact anthropique dans la région des Niayes est difficile. Seuls les fragments de micro charbon sont susceptibles d'indiquer la présence de feux liée au développement économique de la région des Niayes. Ces derniers augmentent très légèrement dès 610 cal BP. C'est à 140 cal BP, que leur augmentation brutale, dans des proportions inégalées antérieurement, montre l'intensification de la pression anthropique dans la région des Niayes en lien avec la production de charbons de bois.

Ces résultats montrent donc que la réponse de la végétation dans la Niaye de Mboro-Baobab au changement climatique qui a eu lieu à la fin de la période humide Holocène

a été progressive. La dégradation de la galerie forestière se situe principalement au cours de la période comprise entre 3700 cal BP et 2700 cal BP. Ces résultats affinent les premières évaluations de Lézine (1989) qui avait daté la fin de l'extension forestière dans les Niayes aux environs de 2500 cal BP mais ne confirment pas le caractère abrupt du passage de la forêt galerie guinéo-congolaise au paysage actuel mis en évidence par exemple à Diogo. Avant 3700 cal BP, les conditions environnementales étaient suffisamment humides pour permettre la présence d'un lac d'eau douce et le développement d'une phase forestière. La concordance des observations à Mboro-Baobab et à Jikariya au Nord du Nigeria (Waller et al., 2007) suggère que cette phase humide était commune à l'ensemble du Sahel.

Ces résultats ont permis de préciser la chronologie des événements qui se sont succédés à la fin de l'HHP au Sahel. Ils montrent que, dans un contexte général de dégradation environnementale, les espèces ont eu un comportement individuel permettant à certaines d'entre elles de persister jusqu'aux derniers siècles en dépit des conditions d'aridité croissante. La dernière grande crise environnementale qui a eu lieu au Sahel a eu lieu au cours du dernier millénaire et a entraîné la destruction de la galerie forestière de Mboro-Baobab.

Bibliographie

Aguiar, L. A. A. (2009). Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des Niayes du Sénégal entre 1950 et 2004. Doctoral dissertation, Université du Québec à Montréal.

Blaauw, M., & Christen, J. A. (2011). Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian analysis*, 6(3), 457-474.

Bonnefille, R., & Riollet, G. (1980). Pollens des savanes d'Afrique orientale (140 pp.). CNRS, Paris.

Carré, M., Azzoug, M., Zaharias, P., Camara, A., Cheddadi, R., Chevalier, M., Lazar, A. (2019). Modern drought conditions in western Sahel unprecedented in the past 1600 years. *Climate Dynamics*, 52(3-4), 1949-1964.

Cohmap Members. (1988). Climatic changes of the last 18,000 years: observations and model simulations. *Science*, 1043-1052.

De Menocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L., & Yarusinsky, M. (2000). Abrupt onset and termination of the African Humid Period : rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary science reviews*, 19(1-5), 347-361.

Doukpolo, B. (2007). Variabilité et tendances pluviométriques dans le Nord-Ouest Centrafricain : Enjeux environnementaux. *Mémoire de DEA de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, Bénin*.

Faegri, K., Kaland, P. E., & Krzywinski, K. (1989). Textbook of pollen analysis (No. Ed. 4). John Wiley & Sons Ltd.

Fofana, C. A. K., Sow, E., & Lézine, A. M. (2020). The Senegal River during the last millennium. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 275, 104175.

Gasse, F. (2000). Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5), 189-211.

Grimm, E. C. (1991). *Tilia and tiliagraph*. Illinois State Museum, Springfield.

Guèye, S. (2000). Etude sur les ressources forestières et les plantations forestières du Sénégal: période: 1992-99. *Projet GCP/INT/679/EC. CE, FAO*.

Guiry, M. D., & Guiry, G. 2. (2008). *AlgaeBase. AlgaeBase*.

Guy-Ohlson, D. (1992). Botryococcus as an aid in the interpretation of palaeoenvironment and depositional processes. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 71(1-4), 1-15.

Hély, C., & Lézine, A. M., & APD contributors (2014). Holocene changes in African vegetation: tradeoff between climate and water availability. *Climate of the Past*, 10, 681-686.

Hulme, M. (1992). Rainfall changes in Africa: 1931–1960 to 1961–1990. *International Journal of Climatology*, 12(7), 685-699.

Jowsey, P. C. (1966). An improved peat sampler. *New phytologist*, 65(2), 245-248.

Komárek, J., & Marvan, P. (1992). Morphological differences in natural populations of the genus Botryococcus (Chlorophyceae). *Archiv für Protistenkunde*, 141(1-2), 65-100.

Kröpelin, S., Verschuren, D., Lézine, A. M., Eggermont, H., Cocquyt, C., Francus, P., Cazet, J. P., Fagot, M., Rumes, B., Russell, J. M., Darius, F., Conley, D. J., Schuster, M., von Suchodoletz, H. & Engstrom, D. R. (2008). Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: the past 6000 years. *science*, 320(5877), 765-768.

Leroux, M. (1983). *Le climat de l'Afrique tropicale*. Ed. Champion, 650.

Lézine, A. M. (1987). Paléoenvironnements végétaux d'Afrique occidentale nord-tropicale depuis 12000 BP : analyse pollinique de séries sédimentaires continentales (Sénégal-Mauritanie). *Géodynamique*, 2(2), 137-138.

Lézine, A. M. (1988). Les variations de la couverture forestière mésophile d'Afrique occidentale au cours de l'Holocène. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 307(4), 439-445.

Lézine, A. M. (1989). Late Quaternary vegetation and climate of the Sahel. *Quaternary Research*, 32(3), 317-334.

Lézine, A. M., Hély, C., Grenier, C., Braconnot, P., & Krinner, G. (2011). Sahara and Sahel vulnerability to climate changes, lessons from Holocene hydrological data. *Quaternary Science Reviews*, 30(21-22), 3001-3012.

Lézine, A. M. (2017). Vegetation at the time of the African Humid Period. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*.

Lézine, A. M., Lemonnier, K., & Fofana, C. A. K. (2019). Sahel environmental variability during the last millennium: Insight from a pollen, charcoal and algae record from the Niayes area, Senegal. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 271, 104103.

Maley, J. (1970). Contributions à l'étude du Bassin tchadien. Atlas de pollens du Tchad. *Bulletin du Jardin botanique National de Belgique*. Vol. 40, No. 1, 29-48.

Maley, J. (1976). Les variations du lac Tchad depuis un millenaire: conséquences paleoclimatiques. *Palaeoecol. Afr*, 9, 44-47.

Mailly, D., Ndiaye, P., Margolis, H. A., & Pineau, M. (1994). Fixation des dunes et reboisement avec le filao (*Casuarina equisetifolia*) dans la zone du littoral nord du Sénégal. *The Forestry Chronicle*, 70(3), 282-290.

Mann, M. E. (2002). Little ice age. *Encyclopedia of global environmental change*, 1, 504-509.

Michel, P. (1973). Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique. Mémoires Orstom, 63.

Putallaz, J. (1962). Hydrogéologie de la région des Niayes. Technical Report BRGM DAK 62 A 12, BRGM.

Raynal, A. (1961). Flore et végétation des environs de Kayar (Sénégal) : de la côte du lac Tanma. Université de Dakar - Faculté des sciences.

Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T.P., Hafliðason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffman, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M. & van der Plicht, J. (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869-1887.

Reynolds, C. S. (2006). The ecology of phytoplankton. Cambridge University Press.

R Development Core Team. (2005). R: A language and environment for statistical computing, reference index version 2.2. 1. R *Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria.

Sandgren, C. D. (Ed.). (1988). Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press.

Schefuß, E., Schouten, S., & Schneider, R. R. (2005). Climatic controls on central African hydrology during the past 20,000 years. *Nature*, 437(7061), 1003-1006.

Shanahan, T. M., Overpeck, J. T., Anchukaitis, K. J., Beck, J. W., Cole, J. E., Dettman, D. L., Peck, J. A., Scholz, C.A. & King, J. W. (2009). Atlantic forcing of persistent drought in West Africa. *Science*, 324(5925), 377-380.

Shanahan, T. M., McKay, N. P., Hughen, K. A., Overpeck, J. T., Otto-Bliesner, B., Heil, C. W., King, J., Scholz C. A. & Peck, J. (2015). The time-transgressive termination of the African Humid Period. *Nature Geoscience*, 8(2), 140-144.

Trochain, J. (1940). Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. *Commonw Rev*, 46, 310-316.

Trochain, J.L., Blasco, F., & Puig, H. (1980). Écologie végétale de la zone intertropicale non désertique. Univ. P. Sabatier, Toulouse, 468pp.

Vincens, A., Schwartz, D., Elenga, H., Reynaud-Farrera, I., Alexandre, A., Bertaux, J., Mariotti, A., Martin, L., Meunier, J. D., Nguetsop, F., Servant, M., Servant-Vildary, S. & Wirrmann, D. (1999). Forest response to climate changes in Atlantic Equatorial Africa during the last 4000 years BP and inheritance on the modern landscapes. *Journal of Biogeography*, 26(4), 879-885.

Vincens, A., Lézine, A. M., Buchet, G., Lewden, D., & Le Thomas, A. (2007). African pollen database inventory of tree and shrub pollen types. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 145(1-2), 135-141.

Waller, M. P., Street-Perrott, F. A., & Wang, H. (2007). Holocene vegetation history of the Sahel: pollen, sedimentological and geochemical data from Jikariya Lake, north-eastern Nigeria. *Journal of Biogeography*, 34(9), 1575-1590.

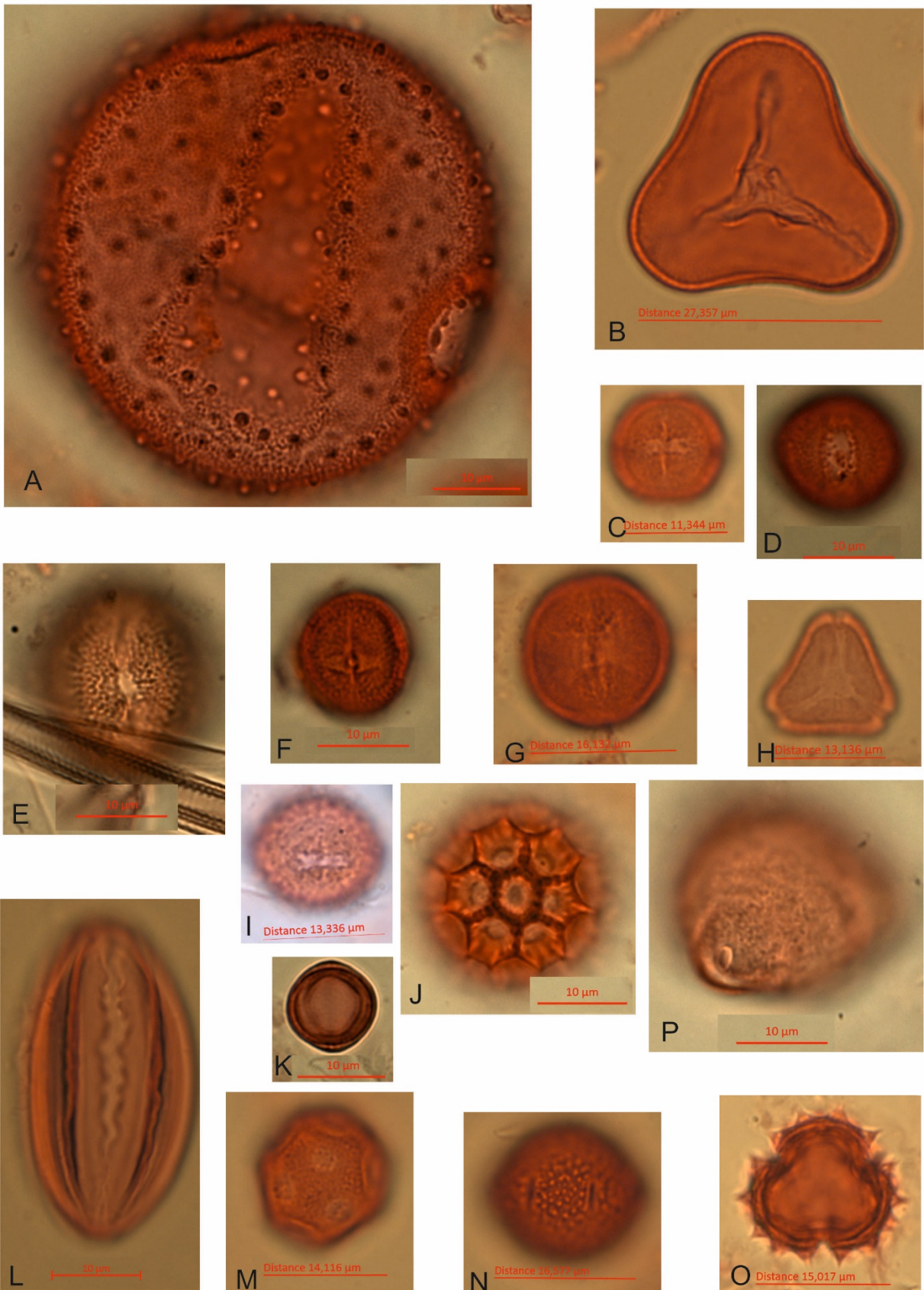
Watrín, J., Lézine, A. M., Gajewski, K., & Vincens, A. (2007). Pollen–plant–climate relationships in sub-Saharan Africa. *Journal of Biogeography*, 34(3), 489-499.

Watrín, J., Lézine, A. M., & Hély, C. (2009). Plant migration and plant communities at the time of the “green Sahara”. *Comptes Rendus Geoscience*, 341(8-9), 656-670.

White, F. (1983). The vegetation of Africa. Unesco, Paris, 356pp.

Ybert, J. P. (1979). Atlas de pollens de Côte d'Ivoire (No. 40). IRD Editions.

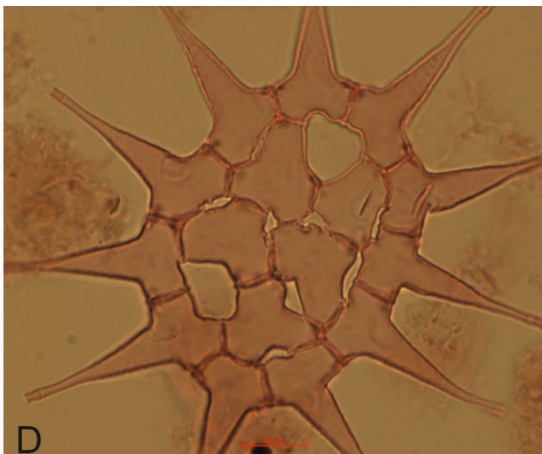
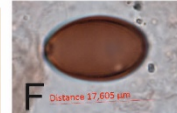
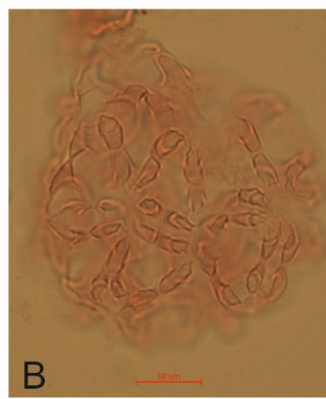
Annexe 1 : Photos de grains de Pollen et 'Non Pollen Palynomorphs' trouvés dans les sédiments de la carotte de Mboro-Baobab
Planche 1



Grains de pollen:

A: *Adansonia digitata*; B: *Elaeis guineensis*; C: *Macaranga*-type; D: *Tetracera*; E: *Detarium*; F: *Leptactina*; G: *Alchornea*; H: *Syzygium*; I: *Uapaca*; J: *Gomphrena*; K: *Polycarpon*; L: *Ephedra*. M: *Aerva*-type; N: *Spermacoe radiata*; O: *Asteraceae undiff.*; P: *Casuarina equisetifolia*

Planche 2



NPP:

A: *Scenedesmus*; B: *Coelastrum*; C: *Botryococcus*; D: *Pediastrum simplex*; E: *Tetraedron minimum*; F: Spore de champignon

Annexe 2 : Tableau des comptages

Profondeur Moyenne	10,5	15,5	20,5	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5	50,5	55,5	60,5	65,5	70,5	75,5	80,5	85,5	90,5	95,5	100,5	105,5	110,5	115,5
Age cal BP	-48	-36	-24	-14	-2	26	50	94	129	179	225	274	322	370	418	461	505	542	589	647	689	766
Adansonia digitata	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acacia	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acalypha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Achyranthes-type aspera	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	3	2	1	0	0	4	0	1	0
Aerva-type lanata	0	0	2	1	3	1	4	0	4	5	12	8	5	5	2	5	8	7	10	6	3	8
Aeschynomene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Alchornea	9	16	37	19	18	23	12	3	13	23	28	51	47	64	40	51	60	41	73	101	44	88
Allophylus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alternanthera	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	3	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1
Amaranthaceae/Chenopodiaceae undiff.	8	12	4	7	8	9	6	2	5	7	12	6	2	8	6	4	4	3	6	15	5	8
Anacardiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anthostema-type	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Antidesma-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apocynaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asteraceae undiff.	7	4	5	10	10	5	2	0	6	10	17	7	5	9	7	5	8	9	5	11	2	9
Basilicum-type polystachyon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bridelia-type	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	3	0	5	1	0	3	0	2	6	1	0
Capparis fascicularis-type	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caryophyllaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Casuarina equisetifolia-type	61	50	72	91	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celastraceae undiff.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celosia-type trigyna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celtis	2	0	0	2	0	2	1	0	3	3	4	9	6	11	5	2	8	2	8	7	4	3
Centaurea-type	0	2	0	0	3	2	0	0	2	1	0	1	3	0	1	0	2	0	0	0	0	0
Cerastium-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Chenopodium-type	1	0	23	28	0	0	0	0	0	0	4	4	1	2	0	1	4	2	1	1	0	1
Cichorieae undiff.	1	0	7	4	9	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	2	0	1	3
Cissampelos-type	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	2	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1
Clematis-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cleome-type gynandra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cocculus	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combretaceae undiff.	1	2	2	2	7	1	5	1	2	4	1	4	4	14	8	6	9	5	5	14	4	11

Profondeur Moyenne	10,5	15,5	20,5	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5	50,5	55,5	60,5	65,5	70,5	75,5	80,5	85,5	90,5	95,5	100,5	105,5	110,5	115,5
Age cal BP	-48	-36	-24	-14	-2	26	50	94	129	179	225	274	322	370	418	461	505	542	589	647	689	766
Commelina-type benghalensis	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	1	0	3	1	0	0	0	0	0	1	2
Commelina-type forskalaei	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Commiphora africana-type	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	1	0
Convolvulus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cyperaceae undiff.	48	46	55	59	83	48	33	12	36	51	86	101	67	135	81	47	120	66	80	71	28	78
Dictyandra	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Diospyros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Dombeya-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ebenaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elaeis guineensis	26	23	42	39	30	30	21	7	17	17	24	24	32	42	34	22	34	43	33	51	6	7
Ephedra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erythrococca-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ficus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	1	0	1	0	1
Gomphrena	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gymnema	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hibiscus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Hygrophila	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hymenocardia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Hymenodictyon-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ipomoae-type	1	1	0	0	2	1	2	0	1	3	1	1	1	1	0	0	0	2	0	1	0	0
Ixora-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Justicia-type	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Justicia-type flava	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Khaya-type senegalensis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Lannea-type	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	2	0	1
Laurembergia tetrandra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptactina	4	0	5	2	0	2	0	0	2	1	1	3	4	2	2	1	2	3	3	12	2	7
Lophira	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ludwigia-type adscendens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Macaranga-type	0	1	3	2	4	0	1	0	1	3	2	5	3	3	3	4	3	4	10	7	2	8
Mallotus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Mitracarpus villosus	9	6	11	7	14	13	5	1	5	1	4	7	8	11	18	2	14	12	9	19	4	11
Mitragyna-type inermis	1	1	2	0	0	0	0	0	1	1	4	1	0	1	1	0	0	1	4	2	4	3
Morelia senegalensis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Musanga-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Myrianthus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Profondeur Moyenne	10,5	15,5	20,5	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5	50,5	55,5	60,5	65,5	70,5	75,5	80,5	85,5	90,5	95,5	100,5	105,5	110,5	115,5
Age cal BP	-48	-36	-24	-14	-2	26	50	94	129	179	225	274	322	370	418	461	505	542	589	647	689	766
Nymphaea	0	0	0	0	1	2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0
Paullinia pinnata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	4	0	0	0
Pavetta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Phoenix reclinata-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Poaceae undiff.	239	196	297	332	323	367	504	173	210	213	317	288	205	299	201	201	279	199	281	436	139	272
Polycarpea-type	0	0	0	0	2	4	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0
Polycarpon-type	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2
Polygala-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polygonum	1	0	5	0	2	1	1	1	1	0	2	2	2	1	0	0	1	0	0	0	0	1
Potamogeton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0
Prosopis-type africana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Rubiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salacia	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salvadora persica-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapindaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapotaceae undiff.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solanum-type	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spermacoce-type radiata	3	8	12	3	18	4	4	0	4	5	10	10	9	16	8	3	17	3	8	17	1	9
Suaeda	22	20	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
Syzygium-type	14	6	7	5	6	3	1	1	3	10	2	10	5	13	10	12	12	8	2	5	1	1
Tabernaemontana	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Tamarix	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Tapinanthus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Tetracera	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0
Tinospora	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tribulus	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Triumfetta-type	0	0	1	0	0	0	1	0	2	2	1	1	0	1	1	0	2	0	0	3	0	1
Typha	210	214	301	300	294	181	165	41	173	238	319	457	150	227	215	129	90	21	87	50	17	25
Uapaca	1	2	0	0	2	1	0	0	0	2	1	5	1	7	0	2	4	2	0	3	1	2
Undetermined	1	0	1	1	1	2	0	1	1	3	0	2	1	0	1	0	3	2	1	0	0	0
Vitellaria-type paradoxa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zanthoxylum-type	0	0	3	3	1	0	0	0	0	2	4	0	1	0	2	0	0	4	0	0	2	0
Monoletes undiff.	46	30	54	10	38	15	15	5	9	20	34	38	37	68	40	33	55	25	23	32	10	15
Triletes undiff.	4	3	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
Lygodium	0	0	0	8	6	6	2	0	3	0	4	2	0	7	0	5	5	0	3	0	0	0
Monolètes à épines et non lisses autres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0

Profondeur Moyenne	10,5	15,5	20,5	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5	50,5	55,5	60,5	65,5	70,5	75,5	80,5	85,5	90,5	95,5	100,5	105,5	110,5	115,5
Age cal BP	-48	-36	-24	-14	-2	26	50	94	129	179	225	274	322	370	418	461	505	542	589	647	689	766
Fungi undiff.	1	0	2	0	0	5	4	6	4	6	1	5	10	13	8	1	14	8	3	6	12	0
Algae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Botryococcus	65	81	131	547	380	95	62	14	67	203	124	299	315	483	96	153	194	39	126	124	135	223
Coelastrum	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	2	8	4	27	9	1	12	2	28	7	13	60
Pediastrum	0	0	0	0	11	100	3	2	15	31	61	121	10	91	34	43	11	14	59	27	14	134
Scenedesmus cf naegeli	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tetraedron	0	0	0	0	47	62	13	3	308	1187	828	68	1710	284	1136	347	296	1665	142	190	885	693
Anthocerotaceae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Profondeur Moyenne	120,5	125,5	130,5	135,5	140,5	145,5	150,5	155,5	160,5	165,5	170,5	175,5	180,5	185,5	190,5	195,5	200,5	205,5	210,5
Age cal BP	830	912	981	1057	1123	1206	1283	1361	1436	1510	1586	1660	1735	1806	1879	1949	2018	2088	2162
Adansonia digitata	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1
Acacia	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0
Acalypha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achyranthes-type aspera	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Aerva-type lanata	7	7	4	3	6	7	9	11	8	13	11	14	15	6	8	5	5	11	10
Aeschynomene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alchornea	92	63	46	84	100	42	57	37	64	64	32	40	84	39	76	47	60	59	76
Allophylus	4	0	1	0	0	2	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Alternanthera	1	2	2	1	1	2	2	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0
Amaranthaceae/Chenopodiaceae undiff.	6	7	6	9	12	3	9	4	17	16	6	6	9	5	12	5	6	4	4
Anacardiaceae undiff.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anthostema-type	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	3	0	1	0	0
Antidesma-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apocynaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asteraceae undiff.	4	13	8	9	16	6	14	7	18	21	12	17	19	10	18	17	16	15	15
Basilicum-type polystachyon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bridelia-type	0	1	1	1	2	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Capparis fascicularis-type	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caryophyllaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Casuarina equisetifolia-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celastraceae undiff.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celosia-type trigyna	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celtis	9	0	2	5	4	1	4	1	0	2	0	7	7	0	6	2	2	5	5
Centaurea-type	1	0	2	3	1	2	1	1	3	1	3	2	0	1	2	1	0	1	0
Cerastium-type	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chenopodium-type	5	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	1	1
Cichorieae undiff.	1	0	2	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cissampelos-type	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Clematis-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cleome-type gynandra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cocculus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combretaceae undiff.	17	11	7	7	11	4	10	10	11	14	6	7	8	1	8	3	7	5	5
Commelina-type benghalensis	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	2	0	0	0	0
Commelina-type forskalaei	0	1	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Commiphora africana-type	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	3

Profondeur Moyenne	120,5	125,5	130,5	135,5	140,5	145,5	150,5	155,5	160,5	165,5	170,5	175,5	180,5	185,5	190,5	195,5	200,5	205,5	210,5
Age cal BP	830	912	981	1057	1123	1206	1283	1361	1436	1510	1586	1660	1735	1806	1879	1949	2018	2088	2162
Convolvulus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Cyperaceae undiff.	83	89	81	128	152	89	184	121	197	152	101	129	165	76	205	78	97	125	115
Dictyandra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diospyros	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
Dombeya-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ebenaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elaeis guineensis	6	3	4	11	5	0	5	2	2	0	0	1	3	3	3	0	1	3	1
Ephedra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erythrococca-type	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Ficus	1	0	2	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
Gomphrena	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gymnema	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hibiscus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hygrophila	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hymenocardia	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hymenodictyon-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ipomoae-type	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ixora-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Justicia-type	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Justicia-type flava	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Khaya-type senegalensis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lannea-type	0	0	1	1	2	0	1	1	3	1	0	1	4	0	1	1	2	2	0
Laurembergia tetrandra	0	1	0	2	2	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Leptactina	6	9	1	2	3	5	4	1	4	3	5	2	2	0	1	0	0	0	0
Lophira	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ludwigia-type adscendens	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Macaranga-type	9	10	4	5	11	4	6	11	10	8	8	15	10	7	18	8	10	7	18
Mallotus-type	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
Mitracarpus villosus	14	9	9	15	16	6	14	13	17	15	6	19	10	4	23	10	11	16	11
Mitragyna-type inermis	3	7	4	2	4	2	2	2	7	4	0	0	2	0	1	1	0	1	0
Morelia senegalensis	0	0	0	0	1	0	1	3	2	0	0	1	4	0	0	2	1	1	2
Musanga-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Myrianthus-type	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
Nymphaea	2	2	0	2	1	0	2	3	4	1	0	2	1	1	2	1	2	1	3
Paullinia pinnata	0	0	1	3	2	0	2	1	4	3	0	0	1	0	0	0	0	1	2
Pavetta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Profondeur Moyenne	120,5	125,5	130,5	135,5	140,5	145,5	150,5	155,5	160,5	165,5	170,5	175,5	180,5	185,5	190,5	195,5	200,5	205,5	210,5
Age cal BP	830	912	981	1057	1123	1206	1283	1361	1436	1510	1586	1660	1735	1806	1879	1949	2018	2088	2162
Phoenix reclinata-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poaceae undiff.	294	266	217	342	356	221	356	243	397	321	232	300	343	207	349	286	255	275	341
Polycarpea-type	0	2	1	3	3	0	4	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	2	0
Polycarpon-type	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	1
Polygala-type	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polygonum	1	1	1	3	1	0	1	1	1	3	0	2	4	2	0	2	2	1	0
Potamogeton	9	4	5	8	7	0	1	7	17	10	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Prosopis-type africana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rubiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salacia	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Salvadora persica-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapindaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapotaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solanum-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spermacoce-type radiata	7	9	8	15	20	13	23	10	25	14	7	13	22	9	17	19	11	15	15
Suaeda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Syzygium-type	1	1	1	5	3	1	2	3	3	6	3	1	2	7	9	4	5	8	3
Tabernaemontana	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tamarix	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tapinanthus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tetracera	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Tinospora	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
Tribulus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Triumfetta-type	1	0	1	1	0	0	1	1	2	0	0	2	1	0	2	0	1	0	1
Typha	36	38	22	40	48	7	70	32	52	32	54	86	125	38	123	42	45	58	60
Uapaca	2	0	0	4	4	2	3	2	4	3	1	1	1	2	1	0	1	2	3
Undetermined	1	3	1	1	2	2	0	0	1	4	2	2	1	0	2	1	1	0	0
Vitellaria-type paradoxa	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Zanthoxylum-type	1	0	0	0	0	0	0	2	4	1	0	0	4	0	1	7	1	1	3
Monoletes undiff.	21	28	20	28	50	14	66	32	52	64	54	31	64	22	60	37	32	41	37
Triletes undiff.	0	0	3	0	0	2	0	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
Lygodium	0	0	0	4	3	0	3	4	0	0	0	6	16	1	9	0	5	2	0
Monolètes à épines et non lisses autres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fungi undiff.	28	10	15	9	15	5	5	10	15	10	14	9	5	1	6	9	12	9	4
Algae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Botryococcus	548	116	178	245	210	105	309	223	391	344	79	69	90	38	145	78	107	75	21

Profondeur Moyenne	120,5	125,5	130,5	135,5	140,5	145,5	150,5	155,5	160,5	165,5	170,5	175,5	180,5	185,5	190,5	195,5	200,5	205,5	210,5
Age cal BP	830	912	981	1057	1123	1206	1283	1361	1436	1510	1586	1660	1735	1806	1879	1949	2018	2088	2162
Coelastrum	8	167	39	81	112	27	175	238	251	269	25	169	20	168	242	27	164	261	24
Pediastrum	29	154	25	150	84	43	390	387	363	623	37	460	160	427	615	159	428	476	515
Scenedesmus cf naegeli	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	0	1	0	1	1	0	1	1	0
Tetraedron	3475	283	439	150	322	49	94	4513	195	2437	1558	452	249	801	230	84	792	168	203
Anthocerotaceae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Profondeur Moyenne	215,5	220,5	225,5	230,5	235,5	240,5	245,5	250,5	255,5	260,5	265,5	270,5	275,5	280,5	285,5	290,5	295,5	300,5	306,5
Age cal BP	2236	2312	2392	2472	2546	2618	2692	2765	2841	2918	2987	3059	3135	3212	3280	3356	3418	3489	3541
Adansonia digitata	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Acacia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Acalypha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achyranthes-type aspera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aerva-type lanata	5	3	15	6	7	12	5	10	6	3	5	0	3	5	5	2	1	1	2
Aeschynomene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alchornea	60	43	79	66	79	87	62	87	63	100	91	63	62	40	40	33	33	32	33
Allophylus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alternanthera	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0
Amaranthaceae/Chenopodiaceae undiff.	2	3	7	9	1	4	6	3	3	6	5	3	2	6	1	1	2	5	5
Anacardiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anthostema-type	2	0	0	0	1	5	0	1	4	1	2	0	5	9	0	0	0	4	1
Antidesma-type	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Apiaceae undiff.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apocynaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Asteraceae undiff.	24	0	19	11	16	20	19	18	7	12	16	10	5	6	8	0	4	3	5
Basilicum-type polystachyon	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Bridelia-type	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	4	0	2	0	1
Capparis fascicularis-type	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Caryophyllaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Casuarina equisetifolia-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celastraceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celosia-type trigyna	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celtis	1	0	6	6	6	7	1	10	8	6	6	0	3	1	2	4	1	5	0
Centaurea-type	0	0	2	0	0	0	2	1	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Cerastium-type	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Chenopodium-type	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Cichorieae undiff.	0	0	0	0	1	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cissampelos-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Clematis-type	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cleome-type gynandra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cocculus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combretaceae undiff.	4	6	8	6	4	8	5	6	5	9	6	1	3	7	5	4	1	6	2
Commelina-type benghalensis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0	0
Commelina-type forskalaei	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Commiphora africana-type	0	0	0	0	0	2	0	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0

Profondeur Moyenne	215,5	220,5	225,5	230,5	235,5	240,5	245,5	250,5	255,5	260,5	265,5	270,5	275,5	280,5	285,5	290,5	295,5	300,5	306,5
Age cal BP	2236	2312	2392	2472	2546	2618	2692	2765	2841	2918	2987	3059	3135	3212	3280	3356	3418	3489	3541
Convolvulus-type	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cyperaceae undiff.	93	60	186	91	112	133	58	112	64	83	127	50	35	47	44	30	18	30	37
Dictyandra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Diospyros	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Dombeya-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ebenaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Elaeis guineensis	0	1	6	1	2	3	1	3	5	4	11	0	4	0	4	1	0	1	2
Ephedra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erythrococca-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Ficus	0	1	0	0	0	1	1	1	4	0	1	2	2	1	0	1	0	2	0
Gomphrena	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gymnema	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hibiscus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hygrophila	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hymenocardia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	1
Hymenodictyon-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0
Ipomoae-type	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Ixora-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Justicia-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Justicia-type flava	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Khaya-type senegalensis	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lannea-type	0	0	1	1	0	1	1	5	5	0	7	0	4	2	3	2	1	1	2
Laurembergia tetrandra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
Leptactina	2	0	2	0	0	3	0	2	0	0	2	1	0	1	0	1	1	0	1
Lophira	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Ludwigia-type adscendens	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Macaranga-type	15	5	11	21	18	16	13	13	21	16	19	19	13	19	34	18	25	17	28
Mallotus-type	0	0	0	0	2	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	2	1
Mitracarpus villosus	11	9	10	9	5	18	11	16	8	12	13	9	7	5	9	8	9	12	6
Mitragyna-type inermis	0	0	0	1	2	2	1	2	0	1	1	0	0	2	5	1	3	0	3
Morelia senegalensis	4	3	1	0	0	4	0	1	1	2	1	0	0	0	2	2	0	3	2
Musanga-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Myrianthus-type	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0
Nymphaea	3	2	2	0	1	1	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	1
Paullinia pinnata	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Pavetta	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Profondeur Moyenne	215,5	220,5	225,5	230,5	235,5	240,5	245,5	250,5	255,5	260,5	265,5	270,5	275,5	280,5	285,5	290,5	295,5	300,5	306,5
Age cal BP	2236	2312	2392	2472	2546	2618	2692	2765	2841	2918	2987	3059	3135	3212	3280	3356	3418	3489	3541
Phoenix reclinata-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
Poaceae undiff.	321	192	362	315	309	388	232	396	231	349	365	218	175	222	246	180	208	213	159
Polycarpea-type	0	0	0	0	3	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Polycarpon-type	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Polygala-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polygonum	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0
Potamogeton	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prosopis-type africana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rubiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Salacia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salvadora persica-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapindaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapotaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solanum-type	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spermacoce-type radiata	13	13	23	18	12	17	10	12	0	16	20	10	4	5	10	6	4	5	6
Suaeda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Syzygium-type	8	7	7	12	4	0	5	6	10	3	7	18	10	7	30	9	18	8	11
Tabernaemontana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Tamarix	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tapinanthus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tetracera	0	0	1	0	0	1	0	0	2	1	1	0	0	1	2	1	0	1	2
Tinospora	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Tribulus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Triumfetta-type	3	0	0	0	2	3	0	1	2	1	1	0	1	0	2	0	0	1	0
Typha	41	36	66	49	82	62	34	61	34	48	30	5	4	4	5	2	0	1	5
Uapaca	0	1	1	2	0	1	2	1	3	0	2	1	9	2	2	2	0	0	2
Undetermined	2	0	0	1	1	0	0	2	0	0	1	3	0	2	0	0	0	1	4
Vitellaria-type paradoxa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Zanthoxylum-type	0	3	1	3	1	5	3	0	5	4	3	0	3	6	0	2	2	5	1
Monoletes undiff.	34	33	46	29	32	41	24	41	27	22	39	35	15	22	15	17	16	16	6
Triletes undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	3	0	0	0	0	1	0	0
Lygodium	0	0	14	5	6	6	0	2	7	0	5	0	3	10	7	5	0	12	14
Monolètes à épines et non lisses autres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fungi undiff.	11	8	12	9	10	9	6	4	4	0	4	9	6	12	2	7	4	7	1
Algae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Botryococcus	202	48	85	136	0	75	104	108	25	181	116	25	9	26	104	10	8	40	34

Profondeur Moyenne	215,5	220,5	225,5	230,5	235,5	240,5	245,5	250,5	255,5	260,5	265,5	270,5	275,5	280,5	285,5	290,5	295,5	300,5	306,5
Age cal BP	2236	2312	2392	2472	2546	2618	2692	2765	2841	2918	2987	3059	3135	3212	3280	3356	3418	3489	3541
Coelastrum	231	17	265	179	0	161	20	151	79	380	430	14	117	1247	3513	250	159	296	531
Pediastrum	597	39	590	509	384	462	246	366	424	532	663	77	254	869	3165	470	578	586	942
Scenedesmus cf naegeli	2	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
Tetraedron	2119	2705	205	846	850	859	508	334	1672	950	372	1808	2430	379	4730	435	5344	552	1019
Anthocerotaceae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Profondeur Moyenne	310,5	315,5	320,5	325,5	330,5	335,5	340,5	345,5	350,5	355,5	360,5	365,5	370,5	375,5	380,5	385,5	390,5	395,5
Age cal BP	3599	3641	3677	3718	3755	3796	3836	3877	3919	3964	4008	4049	4095	4136	4177	4217	4262	4299
Adansonia digitata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acacia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Acalypha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Achyranthes-type aspera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aerva-type lanata	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Aeschynomene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alchornea	31	24	39	31	60	30	43	39	47	41	55	25	35	44	32	21	31	34
Allophylus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Alternanthera	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
Amaranthaceae/Chenopodiaceae undiff.	4	5	1	4	2	3	3	0	5	2	6	1	0	2	1	1	1	0
Anacardiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anthostema-type	0	0	0	3	3	2	0	0	1	1	3	5	0	1	0	0	1	0
Antidesma-type	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0
Apiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apocynaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asteraceae undiff.	6	3	11	7	7	12	7	6	17	10	19	3	13	21	19	7	8	10
Basilicum-type polystachyon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Bridelia-type	2	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0	0	0	1	0	2	1
Capparis fascicularis-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caryophyllaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Casuarina equisetifolia-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celastraceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celosia-type trigyna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celtis	0	3	0	1	3	2	0	0	3	0	3	1	0	0	0	4	0	0
Centaurea-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cerastium-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chenopodium-type	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Cichorieae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cissampelos-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Clematis-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cleome-type gynandra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cocculus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combretaceae undiff.	3	4	4	4	15	5	4	5	10	3	6	0	2	3	6	2	2	3
Commelina-type benghalensis	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1

Profondeur Moyenne	310,5	315,5	320,5	325,5	330,5	335,5	340,5	345,5	350,5	355,5	360,5	365,5	370,5	375,5	380,5	385,5	390,5	395,5
Age cal BP	3599	3641	3677	3718	3755	3796	3836	3877	3919	3964	4008	4049	4095	4136	4177	4217	4262	4299
Commelina-type forskalaei	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Commiphora africana-type	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Convolvulus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cyperaceae undiff.	29	30	35	37	68	76	46	66	85	33	77	14	30	32	36	30	21	19
Dictyandra	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Diospyros	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Dombeya-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ebenaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elaeis guineensis	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Ephedra	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erythrococca-type	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	0	1	2	0	0
Ficus	0	0	0	2	0	1	1	2	0	2	2	0	0	0	1	0	0	2
Gomphrena	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gymnema	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Hibiscus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hygrophila	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hymenocardia	1	2	1	2	1	1	0	0	0	0	2	1	0	0	2	0	0	2
Hymenodictyon-type	0	0	0	1	0	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0
Ipomoeae-type	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Ixora-type	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Justicia-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Justicia-type flava	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Khaya-type senegalensis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lannea-type	2	0	0	1	1	0	0	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0
Lauremburgia tetrandra	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Leptactina	0	2	0	0	0	1	2	1	3	0	5	1	0	0	1	1	1	2
Lophira	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1
Ludwigia-type adscendens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Macaranga-type	12	19	23	17	38	28	30	24	36	39	61	15	19	26	21	21	13	12
Mallotus-type	1	1	2	0	0	1	0	1	2	1	5	2	8	3	0	4	3	3
Mitracarpus villosus	3	6	3	2	6	8	2	4	9	3	9	1	3	6	2	5	2	1
Mitragyna-type inermis	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Morelia senegalensis	2	0	3	0	2	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
Musanga-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0
Myrianthus-type	0	0	2	0	1	3	2	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Nymphaea	0	0	0	0	3	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Profondeur Moyenne	310,5	315,5	320,5	325,5	330,5	335,5	340,5	345,5	350,5	355,5	360,5	365,5	370,5	375,5	380,5	385,5	390,5	395,5
Age cal BP	3599	3641	3677	3718	3755	3796	3836	3877	3919	3964	4008	4049	4095	4136	4177	4217	4262	4299
Paullinia pinnata	0	0	0	0	0	0	2	0	2	1	0	1	0	3	0	0	0	0
Pavetta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0
Phoenix reclinata-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poaceae undiff.	200	159	210	218	424	284	223	235	357	225	412	98	162	197	205	159	127	165
Polycarpaea-type	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	1	3	0	0	1	1	2	0
Polycarpon-type	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Polygala-type	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Polygonum	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0		1	1
Potamogeton	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prosopis-type africana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rubiaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salacia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Salvadora persica-type	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapindaceae undiff.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sapotaceae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solanum-type	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spermacoce-type radiata	2	2	4	4	3	7	1	6	5	6	2	0	0	0	5	0	1	0
Suaeda	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Syzygium-type	7	9	26	14	7	8	7	11	8	6	4	6	6	8	5	10	6	6
Tabernaemontana	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	1	0	0	5
Tamarix	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tapinanthus-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tetracera	2	1	0	1	2	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Tinospora	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tribulus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Triumfetta-type	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Typha	2	0	1	1	4		1	0	9	1	5	1	1	0	0	4	0	1
Uapaca	1	0	1	4	6	0	4	7	14	9	2	3	3	3	2	3	2	7
Undetermined	2	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0	0	1	1	1
Vitellaria-type paradoxa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Zanthoxylum-type	0	1	3	3	1	5	2	1	8	1	0	0	1	1	3	5	5	3
Monoletes undiff.	24	14	26	22	30	30	32	39	49	25	31	33	14	14	13	15	12	20
Triletes undiff.	7	0	6	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4
Lygodium	0	8	0	6	31	25	12	0	31	12	20	65	0	20	16	4	6	0
Monolètes à épines et non lisses autres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fungi undiff.	8	0	13	8	12	5	10	2	11	4	7	1	6	2	8	9	7	3

Profondeur Moyenne	310,5	315,5	320,5	325,5	330,5	335,5	340,5	345,5	350,5	355,5	360,5	365,5	370,5	375,5	380,5	385,5	390,5	395,5
Age cal BP	3599	3641	3677	3718	3755	3796	3836	3877	3919	3964	4008	4049	4095	4136	4177	4217	4262	4299
Algae undiff.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Botryococcus	29	12	10	29	80	20	17	21	41	7	32	2	6	54			7	13
Coelastrum	384	273	75	374	520	310	335	151	965	182	358	5	30	616	280	260	343	182
Pediastrum	509	473	622	340	670	517	525	377	1529	784	2424	35	1692	1922	908	519	1314	741
Scenedesmus cf naegeli	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Tetraedron	711	1231	551	701	30	91	0	0	31	161	0	4	8	270	1	34	146	3
Anthocerotaceae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Annexe 3 : Sahel environmental variability during the last millennium: Insight from a pollen, charcoal and algae record from the Niayes area, Senegal



Research papers

Sahel environmental variability during the last millennium: Insight from a pollen, charcoal and algae record from the Niayes area, Senegal

Anne-Marie Lézine^{a,*}, Kévin Lemonnier^a, Cheikh Abdoul Kader Fofana^b^a Laboratoire d'Océanographie et du Climat, Expérimentation et Approche numérique/IPSL, Sorbonne Université, CNRS-IRD-MNHN, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France^b Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 July 2019

Accepted 23 July 2019

Available online 26 July 2019

Keywords:

Pollen

Algae

Charcoal

Last millennium

Sahel

Senegal

ABSTRACT

The pollen, algae and charcoal record from the “Baobab” depression near Mboro in the Niayes area of Senegal shows that the last millennium was characterized by a gradual aridification which started 1340 CE and culminated 1845 CE. The sub-Guinean gallery forests, which survived the previous environmental crisis dated from the end of the Holocene Humid Period, suddenly collapsed and the Niayes region suffered a dramatic loss of biodiversity. We show that the tipping point between a forested and non-forested state occurred ca 400 centuries after the onset of aridity recorded by the lowering of the water level and the progressive salinization of the aquatic environment.

© 2019 Published by Elsevier B.V.

1. Introduction

Was the last major Sahelian drought in the 1970s unusual? By studying records of environmental changes and associated forcing mechanisms in the recent past, it is possible to situate this major climate crisis in the context of the natural variability of the west African monsoon climate system. Natural archives such as lake sediments can fill gaps in understanding climate variability by providing access to a long-term perspective encompassing periods out of any anthropogenic influence. In western Africa, such long-term records are rare (e.g., Nash et al., 2016 and references therein) and somewhat contradictory. In particular, the well-known interval of the Little Ice Age (LIA – 1400–1850 CE) when exceptionally cool temperatures were reached in the Northern hemisphere, was described as a dry period in the Lake Bosumtwi area (Ghana) (Shanahan et al., 2009) and a humid period in the Saloum delta (Senegal) (Carré et al., 2019).

The littoral depressions of the Niayes area, along the northern coast of Senegal have provided major information on the Holocene history of the West African environments (Lézine et al., 2011; Hély et al., 2014). Local environmental conditions linked to the proximity of the coast have favored accumulation of organic matter and expansion of gallery forests in the bottom of the depressions during the Holocene (Lézine, 1989) which have persisted up to recently thanks to the high level of the water table (Trochain, 1940; Pezeril et al., 1986). It has been shown that these gallery forests were highly sensitive to variations of

the level of the water table whatever the temporal resolution considered, from decades (Aguiar et al., 2010) to centuries (Lézine and Chateaufneuf, 1991). Here we present a study combining pollen and diatom analyses on a sedimentary series recovered NW of Mboro in the center of the Niaye area. The aim of our study is to examine the hydrological variations during the last millennium and to discuss their impact on the local vegetation. We also aim at characterizing the signature of human activities on the natural environment.

2. Regional setting

The Niaye area consists of depressions formed between linear fixed and partially fixed coastal dune ridges, located between 15° and 16° N, at roughly 17°W along the Atlantic coast of Senegal. These depressions belong to an extensive river system which took place during the Holocene Humid Period ca 12 ka yr BP. (Lézine, 1989). Edification of coastal dunes (Michel, 1973) gradually closed access to the sea of water courses and promoted the development of thick, continuous peat accumulations. The presence of fresh, shallow ground-water near the surface in the bottom of the interdune depressions (Lézine and Chateaufneuf, 1991) supports the preservation (though deeply degraded today by intensive agriculture activity) of gallery forests of Guinean phytogeographical affinity, which are the last traces of the northern extension of tropical humid forests during the Holocene (Watrín et al., 2009; Hély et al., 2014). This is the “sub-Guinean domain” of Trochain (1940) consisting of enclaves of aquatic vegetation in open water areas (*Nymphaea*, *Potamogeton*, *Pistia*) and reed-swamp populations (*Typha*, *Phragmites*) associated with *Syzygium guineense* in the flooded

* Corresponding author.

E-mail address: Anne-marie.lezine@locean-ipsl.upmc.fr (A.-M. Lézine).

zone, surrounded by Guinean forest relicts at the foot of the dunes (*Elaeis guineensis*, *Ficus*, *Treculia*, *Phoenix*) followed by *Dodonaea*, *Alchornea*, *Zanthoxylum*, *Combretum* towards the upper limit of the gallery forests, whereas typically Sahelian trees grow at the top of the dunes (*Acacia*, *Balanites*) (Adam, 1953, 1958; Jaeger, 1949; Villiers, 1957; Michel et al., 1969; Raynal, 1963) (Fig. 1A).

Hydrological studies in the Niayes area have shown that the water level varies greatly in phase with local rainfall. Accentuated dryness associated with intensive water pumping in recent decades has led to the lowering of the fresh water table and the penetration of salt waters from the adjacent sea into the depressions closest to the coast (e.g., Faye, 1995; Aguiar et al., 2010; Maugis et al., 2009).

3. Material and methods

A 4 m long sediment core was collected in the center of the so-called “Baobab” depression in 2016 (15.149132 N; 16.909275 W) under few tens cm of water using a “Russian” manual corer (Jowsey, 1966). Baobab lies SW of the main paleoriver channel of M'Boro at the NW extremity of a depression separated from the sea shore by a ridge of ca 2 km wide dunes of recent Holocene age (Michel, 1973) (Fig. 1B). The sediment consists of homogeneous organic clay. Samples were taken at 5 cm intervals for pollen and algae analyses.

For pollen and non-pollen palynomorph (NPP) analyses samples were processed using the standard HF method described by Faegri and Iversen (1977). After sieving in a 5 µm mesh, the residue was stained with safranin and mounted in glycerine. Pollen identification was based on the reference slide and photo collections of the LOCEAN laboratory and the Museum national d'Histoire naturelle in Paris as well as on pollen atlases of tropical African flora from e.g., Maley (1970), APLF (1974), Ybert (1979) and Bonnefille and Riollet (1980). Pollen nomenclature, which follows the standard defined by the African Pollen Database (Vincens et al., 2007), was based on Lebrun and Stork (1991–2015). The pollen microflora was composed of 86 taxa (Table 1): 44 trees, shrubs, palms and lianas, 17 herbs and 14 undifferentiated taxa mainly because of the low level of determination of the grains or when the family or genus level corresponded to several life-forms. In addition, four aquatic pollen taxa and four ferns were encountered. Pollen taxa were grouped according to the phytogeographical

affinity of the parent species following Lézine et al. (2009) in four entities according a decreasing rainfall gradient: Guineo-congolian, Sudanian, Sahelian and Saharan. In addition, some taxa have been selected as indicators of water-table fluctuations according to their distance from the open water area (Raynal, 1963; Michel et al., 1969; Lézine, 1987) (Fig. 2).

Pollen percentages were calculated against a sum excluding aquatics and ferns, the percentages of which were calculated separately against a sum including all the pollen grains and fern spores counted.

Undifferentiated fungi and four green algae (*Botryococcus*, *Coelastrum*, *Pediatrum*, *Tetraedron*) represent the NPP group. NPP are presented as percentages (Fig. 3B) and micro-charcoal as influxes (nbr of particles/cm²/year) (Fig. 4).

For diatom analyses samples were processed using a standard method (Battarbee, 1986). The residu was diluted in 20 ml of water and 2 ml was taken, then dried and fixed with Naphrax. Diatom identification was based on e.g., Guerneur (1954), Servant-Vildary (1978), Foged (1986), Gasse (1986), Compère (1991), Cocquyt et al. (1993), Bellinger and Sigeo (2015). In addition, Sow and Diene (2002), Sow (2001, 2004), Sow et al. (2005) were used to precise the ecological requirement of taxa, particularly in Senegal. Twenty-two diatoms were determined (Table 2). They correspond to three main hydrological conditions: freshwater, freshwater/salt tolerant, brackish/marine waters and undifferentiated. Diatoms are presented as percentages calculated against the sum of all the diatoms counted (Fig. 3A).

Both pollen and diatom data are presented under the form of diagrams using Tilia and CONISS (Grimm, 1991). Diversity indices were derived from PAST 3.23 software (Hammer et al., 2001).

4. Age control

Age control was established by three accelerator mass spectrometry (AMS) radiocarbon dating of total organic matter on the whole Baobab sequence, conducted at UMS-ARTEMIS AMS Facilities (France). An additional control point was given by the first occurrence of *Casuarina equisetifolia* pollen grains in our samples the parent trees of which were planted in 1948 in the Niaye area (Ndiaye et al., 1993) (Table 3). According to this, the last millennium is represented by the 121

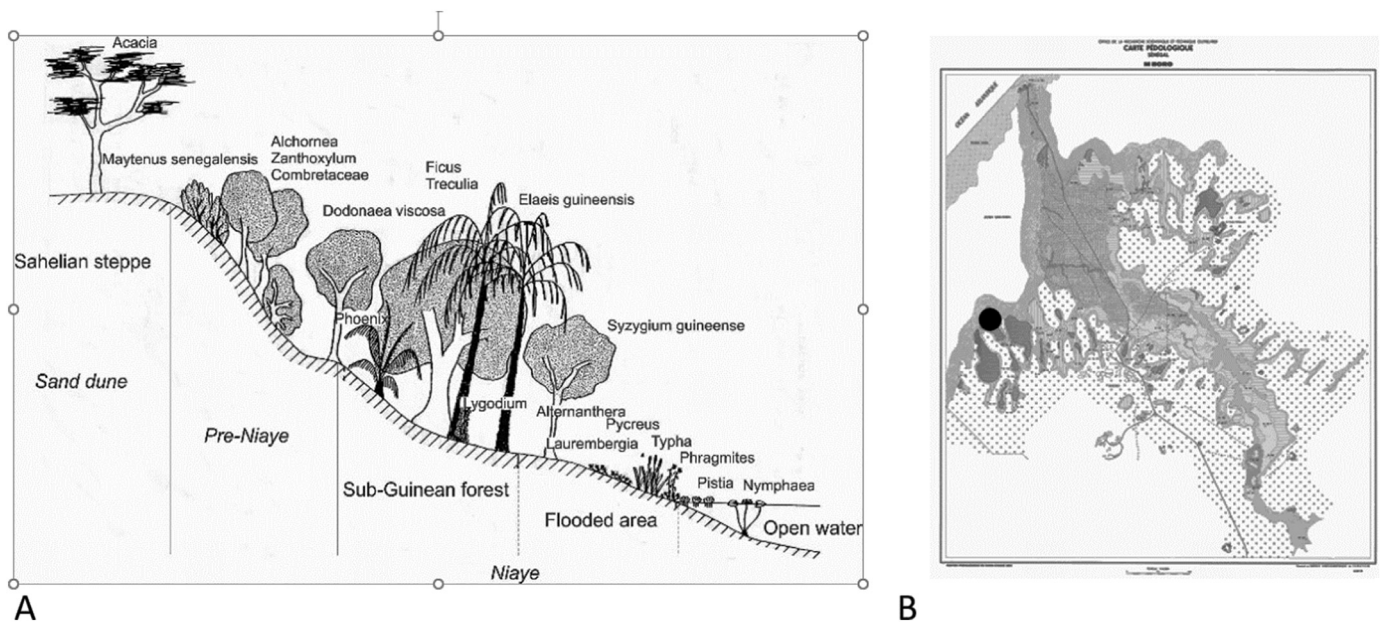


Fig. 1. The Niaye gallery forest. A: Schematic distribution of plants on dune slopes from the Sahelian steppes at the top of the dunes to the open-water surface at the bottom of the depressions (Raynal, 1963; Michel et al., 1969); B: The Mboro complex of paleodrainages and interdunal depressions filled by organic matter and the location of the study site (black dot) (ORSTOM, 1962).

Table 1

List of pollen taxa recovered in the Baobab last millennium sequence. Nomenclature follows Vincens et al., 2007.

Trees and shrubs	Undifferentiated
<i>Acacia</i>	<i>Acalypha</i>
<i>Adansonia digitata</i>	<i>Aeschynomene</i>
<i>Alchornea cordifolia</i>	<i>Amaranthaceae/Chenopodiaceae</i> undiff.
<i>Allophylus</i>	<i>Asteraceae</i> undiff.
<i>Anacardiaceae</i> undiff.	<i>Cichorieae</i> undiff.
<i>Anogeissus</i> -type <i>leiocarpus</i>	<i>Hibiscus</i>
<i>Anthostema</i> -type	<i>Ipomoea</i> -type
<i>Bridelia</i> -type	<i>Justicia</i> -type
<i>Capparis fascicularis</i> -type	<i>Polygala</i> -type
<i>Casuarina equisetifolia</i> -type	<i>Rubiaceae</i> undiff.
<i>Celastraceae</i> undiff.	<i>Solanum</i> -type
<i>Celtis</i>	<i>Suaeda</i>
<i>Chrysobalanus icaco</i> /Parinari	<i>Triumfetta</i> -type
<i>Cissampelos</i> -type	Undetermined
<i>Cocculus pendulus</i> -type	HERBS
<i>Combretaceae</i> undiff.	<i>Achyranthes</i> -type <i>aspera</i>
<i>Combretum</i> -type <i>aculeatum</i>	<i>Aerva</i> -type <i>lanata</i>
<i>Combretum</i> -type <i>molle</i>	<i>Alternanthera</i>
<i>Commiphora africana</i> -type	<i>Centaurea</i> -type <i>perrottetii</i>
<i>Detarium senegalense</i>	<i>Cerastium</i> -type
<i>Dictyandra</i>	<i>Chenopodium</i> -type
<i>Diospyros</i>	<i>Cleome</i> -type <i>gynandra</i>
<i>Elaeis guineensis</i>	<i>Commelina</i> -type <i>benghalensis</i>
<i>Ficus</i>	<i>Commelina</i> -type <i>forskalaie</i>
<i>Hymenocardia</i>	<i>Gomphrena</i>
<i>Khaya</i> -type <i>senegalensis</i>	<i>Justicia</i> -type <i>flava</i>
<i>Lannea</i> -type	<i>Mitracarpus villosus</i>
<i>Macaranga</i> -type	<i>Poaceae</i> undiff.
<i>Mallotus</i> -type	<i>Polycarpha</i> -type
<i>Mitragyna</i> -type <i>inermis</i>	<i>Polycarpon</i> -type
<i>Morelia senegalensis</i>	<i>Spermacoce</i> -type <i>radiata</i>
<i>Myrianthus</i> -type	<i>Tribulus</i>
<i>Paullinia pinnata</i>	AQUATICS
<i>Phoenix reclinata</i> -type	<i>Cyperaceae</i> undiff.
<i>Prosopis</i> -type <i>africana</i>	<i>Lauremburgia tetrandra</i>
<i>Salacia</i>	<i>Ludwigia</i> -type <i>stolonifera</i>
<i>Sapotaceae</i> undiff.	<i>Nymphaea lotus</i> -type
<i>Syzygium</i> -type	<i>Polygonum senegalense</i> -type
<i>Tabernaemontana</i>	<i>Potamogeton</i>
<i>Tamarix</i>	<i>Typha</i>
<i>Tapinanthus</i> -type	FERNS
<i>Tetracera</i>	<i>Lygodium microphyllum</i>
<i>Tinospora bakis</i>	Monolètes (spiny)
<i>Uapaca</i>	<i>Monolètes</i> undiff.
<i>Zanthoxylum</i> -type <i>zanthoxyloides</i>	<i>Triletes</i> undiff.

uppermost centimeters of the 4 m-long Baobab sedimentary section. Our analysis has a temporal resolution varying between 70 and 12 years.

5. Results

The pollen (Fig. 2), diatom (Fig. 3A) and NPP (Fig. 3B) records display several phases of environmental change over the last millennium with a remarkable coherency. They are described from the base to the top of the sequence.

5.1. Pollen

The pollen spectra are characterized by the dominance of Poaceae and the continuous occurrence of Chenopodiaceae/Amaranthaceae and Asteraceae. This, together with the high number of other taxa, mainly herbaceous, from steppes, grasslands and wooded grasslands point to an open and fairly dry regional landscape. Except Poaceae, all the other taxa are poorly represented. This is particularly true for tropical trees which are characterized by a low pollen productivity and an entomophilous way of pollen dispersal (e.g., Watrin et al., 2007). As a consequence, their percentages are rarely higher than 10% (e.g., *Alchornea*).

Zone 1, base-1340 CE: Zone 1 is typified by tropical tree taxa, e.g., *Alchornea*, *Macaranga*, *Allophylus*, *Detarium* and *Mitragyna inermis* which reach their highest values (%). Aquatics (*Potamogeton*, *Nymphaea*) are also present. All this depict an open water surface surrounded by a relatively developed gallery forest. By the end of this zone, in sub-zone 1b (1235–1340 CE) tropical trees start to decline whereas *Typha* starts to increase showing the onset of lake level lowering under drier conditions. Zone 1b marks the onset of *Elaeis guineensis* development.

Zone 2, 1340–1810 CE: Some tropical tree taxa disappear (*Allophylus*, *Mitragyna inermis*) or decline (*Alchornea*, *Macaranga*). In contrast, *Syzygium guineense* increases, as well as taxa from reed-swamp populations (*Typha*, ferns) both recording low water stands and marsh encroachment.

Zone 3, 1810–1945 CE: This zone shows a dramatic environmental change with the disappearance of most of the plant taxa replaced almost exclusively by Poaceae (91%). As a consequence, biodiversity falls sharply and Simpson diversity index values, which fluctuated only slightly around 0.6 in the lowermost zones, fall to 0.177 at level dated 1845 CE. The peak of Fungi at this level (Fig. 3B) testify for the at least partial or seasonal desiccation of the Baobab depression.

Zone 4, 1945–2016 CE: This zone is characterized by the increase in markers of anthropogenic activity with the appearance of pollen from the planted tree *Casuarina equisetifolia*. Charcoal remains, which steadily increased since 1370 CE, peaked at 1989 CE, suggesting the dramatic increase in fire occurrence. Increase in diversity compared to zone 3 as well as significant percentages of tropical tree taxa suggests a certain recovery of the gallery forest. However, these taxa never reach values as high as in zones 1 and 2. *Typha* and *Syzygium* show that the level of the water table remained low during this zone. The increase of *Suaeda* in the uppermost levels (post 1980 CE: zone 1b) points to the setting of saline conditions.

5.2. Algae

5.2.1. Diatoms

Aulacoseira granulata and *Nitzschia* (*N. acicularis* and *N. scalaris*) are the most dominant species and account for up to 95, 49 and 23% respectively (Fig. 3A).

Zone 1, base-1340 CE: the diatom assemblage is almost exclusively represented by *A. granulata*, a planktonic species characteristic of well mixed fresh waters. This taxon is associated with *N. acicularis*, which confirms the presence of enriched turbid waters (zone 1a). Towards the top of Zone 1 at levels dated 1235 CE and above, Zone 1b shows an increase in diversity with *N. scalaris*, *Eunotia pectinalis* and *Thalassiosira decipiens* showing the appearance of more brackish/saline conditions.

Zone 2, 1340–1925 CE: This zone is characterized by the gradual decline of *A. granulata*, which reached its lowest values in year 1906 EC. Three main taxa successively increase: *N. scalaris* (Zone 2a), *T. decipiens* (Zone 2b), then *N. acicularis* (Zone 2c) suggesting the gradual increase of dry conditions initiated in Zone 1b.

- **Zone 2a** (1340–1600 CE) is characterized by a noticeable increase in diversity and the appearance of periphytic (e.g., *Fragilaria construens*) or bentic (e.g., *F. pinnata*, *Pinnularia neomajor*) species. That together with the presence of species either cosmopolite or salt tolerant point to the lowering of the water level and the setting of dry conditions.
- **Zone 2b** (1600–1800 CE): *N. scalaris* decrease and is replaced by *T. decipiens* and *C. stelligera* showing that salt waters increased in the aquatic environment.
- **Zone 2c** (1800–1925 CE): *N. acicularis* dominate the diatom assemblage is association with *T. decipiens*. Meanwhile *A. granulata* reaches its lowest values. All this suggests that the water level reached its lowest position.

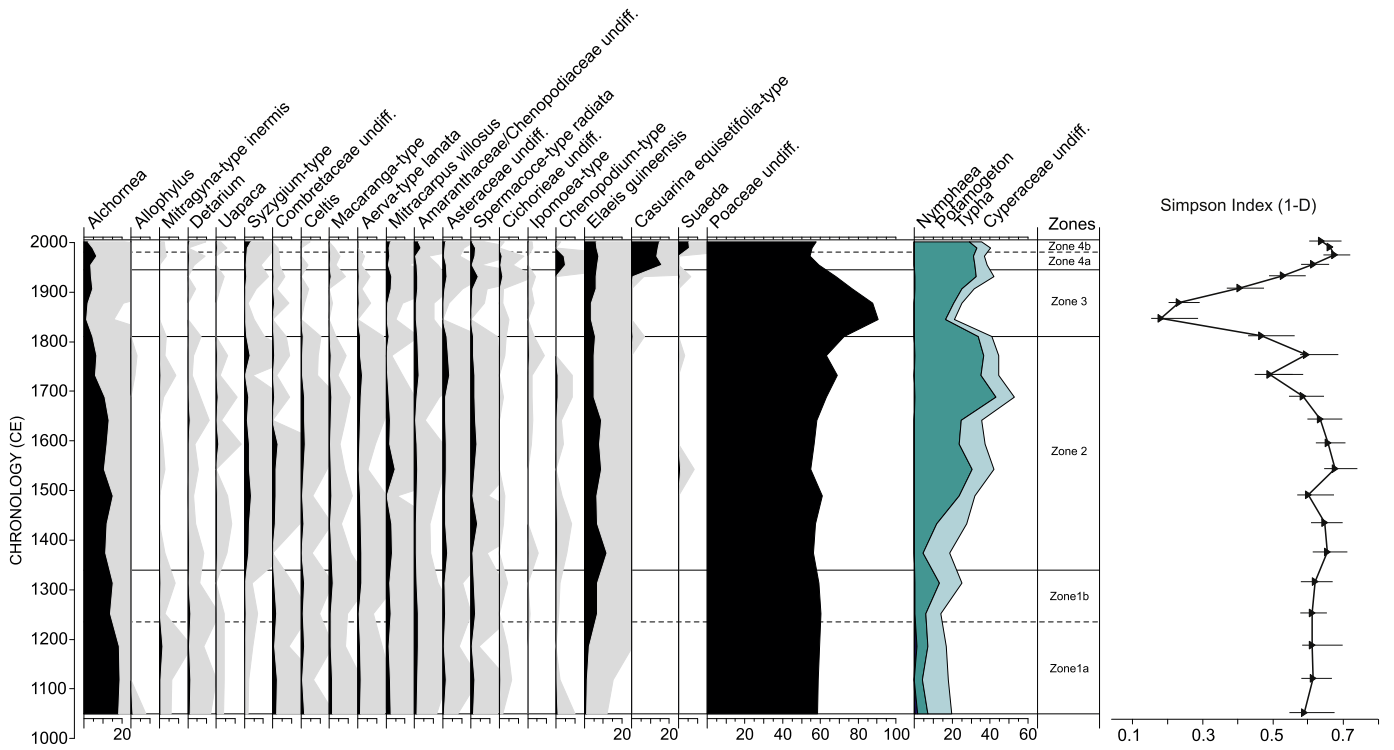


Fig. 2. Synthetic pollen diagram of the Baobab (last millennium) showing from left to right versus time (in chronology CE) selected plant taxa. On the right, the Simpson D-1 index of diversity.

Zone 3, 1925–2001 CE: The increase of *A. granulata* in the upper levels of the core suggests a certain recovery of the fresh water environment. This remained however highly variable and salty conditions are suggested in the upper level (Zone 3b) by the reappearance of *T. decipiens* and *S. tenera* which were absent from Zone 3a.

5.2.2. Green algae

The green algae record (Fig. 3B), shows the opposite trend between *Tetraedron*, *Pediastrum*, *Coelastrum* which gradually decrease from the base to the top of the sequence, though fluctuating, and *Botryococcus*.

This pattern illustrates the gradual depletion of nutrient and lowering of the water level. The absence of any other green algae except *Botryococcus* at levels post-1954 CE indicates the emergence of clearly oligotrophic conditions. This nutrient poor environment immediately followed the phase of lake level lowering indicated by the increase of fungi peaking at 1845 CE.

6. Discussion

Three main features emerge from our study:

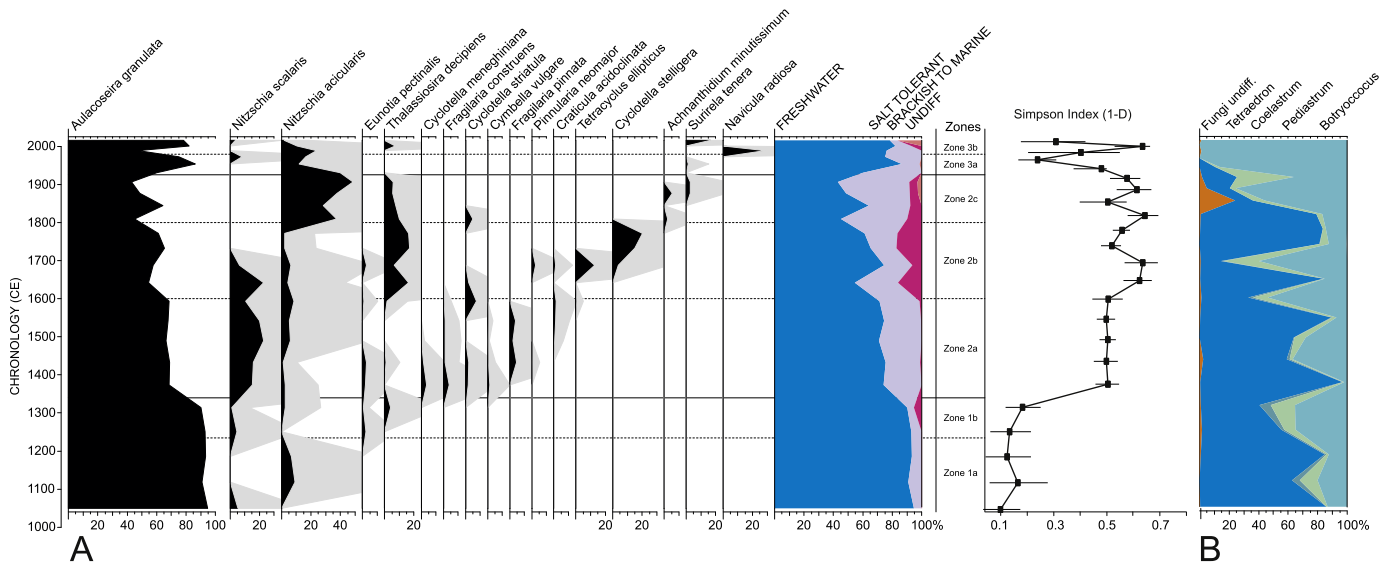


Fig. 3. Synthetic diagram of the Baobab (last millennium) diatom and NPP record showing from left to right versus time (in chronology CE) A: selected diatom taxa, main groups of diatoms according to their ecological significance, the Simpson D-1 index of diatom diversity and B: the NPP (Fungi and Green Algae) record.

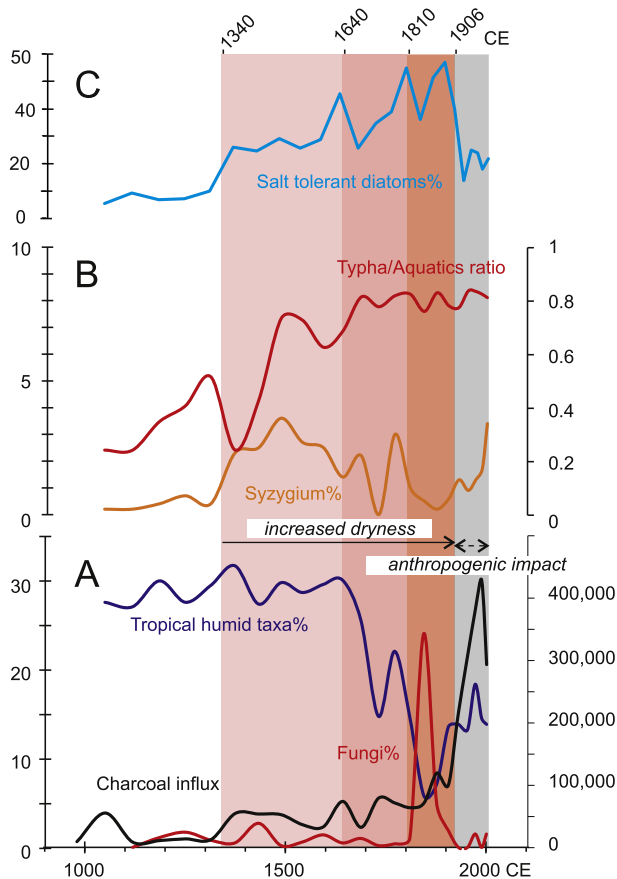


Fig. 4. Main paleoenvironmental features at Baobab, (Mbora sector of the Niaye area, Senegal) during the last millennium. A: Pollen and Fungi% and Charcoal influxes illustrating the drying trend which led to the main environmental crisis peaking at 1845 CE in the Niayes area of Senegal and the increase of the anthropogenic activity during the last centuries; B: pollen markers of lake level lowering; C: diatom markers of increased salinity.

6.1. The dramatic collapse of the Guineo-Congolian gallery forest at 1640 CE

The end of the HHP, from 4500 cal yrs BP onward (Lézine et al., 2011), was marked the decline of tropical plants that previously widely expanded throughout the Sahel and the Sahara (Watrín et al., 2009; Hély et al., 2014). The abruptness of the forest collapse in the Niayes area (Lézine, 1989) was interpreted as the result of crossing a hydrological threshold, after a long period of increased seasonality in rainfall since the mid-Holocene. The tipping point between a forest environment and an open and degraded environment occurred ca. 2500 cal yrs. BP (Lézine, 1989), i.e. approximately 2000 years after the end of the HHP in Western Africa. The specific hydrological conditions

due to the proximity of the ocean led to maintain a high level of the groundwater at the bottom of the depressions. They compensated for a possible precipitation deficit by maintaining moisture conditions allowing the forest to maintain at the foot of the dunes for an additional two millennia after the end of the HHP.

Over the past millennium, tropical plant types stabilized at 30%, reflecting that sub-Guinean gallery forests remained only moderately developed in the Niayes area as compared to the HHP during which these values were at least 80% (Lézine, 1989). These % dramatically fall at 1640 CE to a minimum at 1845 CE pointing to the setting of a severe environmental crisis: the biodiversity dramatically declined and the Baobab depression dried up, at least partially. The disappearance of green algae and their replacement by fungi in the lake sediments as well as the high values of salt-tolerant diatoms clearly show that hydrological conditions were more evaporated including pronounced seasonal drying of the depression (Fig. 4). This drought event in the Niayes area of Senegal is contemporaneous with the repeated dry years in the inner delta of the Niger River as recorded by documentary sources since 1639 (Coquery-Vidrovitch, 1997) and continuing into the 19th century, particularly between years 1800 and 1850 CE (Nicholson et al., 2012 in Nash et al., 2016). Similarly, the level of Lake Chad underwent multiple lowering phases (Maley, 1976) and drought conditions developed at Lake Bal, Nigeria (Holmes et al., 1999) during the 17th century.

6.2. The drying trend from 1375 CE to 1900 CE

The forest collapse 1640 CE occurred after several centuries of increasing drought starting from 1340 CE, as revealed by the development of marshy plant populations and of saline conditions in the Baobab depression.

The most prominent feature of the hydrological evolution of the Baobab depression during the last millennium is the development of *Syzygium* and *Typha* populations both resulting from the lowering of the water table responsible for a marsh development. As the water level dropped, *Syzygium* trees were able to expand towards the center of the depression. This situation also occurred in the Niayes area during the dry phases of the Holocene as shown by the well-preserved woods of *Syzygium* trees north of Baobab, around Diogo (Fig. 5).

The *Syzygium* development at Baobab occurred during the time interval 1340–1810 CE with a peak at 1490 CE. As the level dropped further, these trees progressively declined and were replaced by reed-swamp (*Typha*) populations that reached their maximum at 1688 CE. The *Typha*:Aquatic Pollen ratio used to illustrate the hydrological evolution of the Baobab depression (Fig. 4B) confirms the gradual lowering of the water level. This evolution is also confirmed by the emergence of benthic and periphytic diatom taxa reflecting the lowering of the water level during the time-interval 1600–1925 CE (Diatom Zone 2b and 2c), i.e., during the drought event revealed by the pollen and fungi record. In the meantime, diatom taxa of cosmopolite or saline ecological tolerance reached their maximum testifying for increased evaporation. The development of the freshwater taxon *Typha* at the lake margin during this period is not incompatible with the increase in water salinity revealed by the diatomaceous flora since *Typha* can tolerate brackish water for long periods of time and even develop on dry soils affected by seawater infiltration (Adam, 1964).

Our Baobab record does not show the humid event described in the Sahel by Maley (1976) at lake Chad around 1600 CE and Carré et al. (2019) in the Saloum area of Senegal, 1500–1800 CE as well as in Eastern Africa by e.g., Verschuren et al., 2000 and Stager et al., 2005. However, it closely matches the Lake Bosumtwi record (Shanahan et al., 2009) which identifies a drought event between 1400 and 1750 CE, “similar in timing to the Little Ice Age (LIA, ~1400 to 1850 CE)”. From our record, the LIA was a period of increased dryness in the Niaye area of Senegal with a particularly severe drought event peaking at 1845 CE.

Table 2

List of Diatom taxa recovered in the Baobab last millennium sequence.

Freshwater	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
<i>Aulacoseira granulata</i>	<i>Cyclotella stelligera</i>
<i>Craticula acidoclinata</i>	<i>Cyclotella striatula</i>
<i>Cymbella vulgare</i>	<i>Eumotia pectinalis</i>
<i>Fragilaria construens</i>	<i>Nitzschia acicularis</i>
<i>Fragilaria pinnata</i>	<i>Nitzschia scalaris</i>
<i>Navicula densa</i>	<i>Rhopalodia gibba</i>
<i>Navicula radiosa</i>	BRACKISH TO MARINE
<i>Pinnularia divergens</i>	<i>Navicula groveoides</i>
<i>Pinnularia neomajor</i>	<i>Surirela fastuosa</i>
<i>Tetracyclus ellipticus</i>	<i>Thalassiosira decipiens</i>
SALT TOLERANT	UNDIFF
<i>Achnanthis minutissimum</i>	<i>Surirela tenera</i>

Table 3
Radiocarbon measurements (UMS-ARTEMIS AMS Facilities, France) and additional control points: 1948 CE: first appearance of *Casuarina equisetifolia* pollen grains in the sediments; 2016 CE: date of the core recovery).

Lab number SacA	Sample (cm)	Nature	Median age CE	Range 1 σ
49827	BAOBAB 2016 (99–100)	MO	1346	1317–1407
49828	BAOBAB 2016 (299–300)	MO	– 1547	1607–1503
49829	BAOBAB 2016 (399–400)	MO	– 2349	2454–2289
Additional control points (Age CE)				
BAOBAB 2016 (0.5)		Surface		2016
BAOBAB 2016 (30.5)		First record of <i>Casuarina</i> pollen grains		1948



Fig. 5. Fossil woods of *Syzygium guineense* of late Holocene age preserved in the organic levels of the Niaye sediments (Mandeng-Yogo, work in progress). A: the trunks emerge thanks to the digging of a well; B: the red arrows show the traces of the base of the *Syzygium* trees that formed a dense forest at the bottom of the interdunal depressions.

6.3. The anthropogenic impact

Micro-charcoal fragments are insignificant in number at levels prior to 1600 CE. Then, during the LIA, they increase slightly, reflecting repeated fires during marked and probably longer dry seasons. In contrast, their unprecedented increase over the past two decades suggests a radical change in regional economic activities, probably in relation to the intensification of charcoal production around the cities of Thiès and St-Louis (Guèye, 2000).

7. Conclusion

Our pollen, charcoal and algae record of the Baobab sedimentary sequence near Mboro shows that, during the last millennium, the Niayes area of Senegal underwent a gradual aridification which culminated 1845 CE. This drying trend occurred during the Little Ice Age during which the Northern Hemisphere experienced cool climate conditions. In the Niayes area, the sub-Guinean gallery forests, which survived the previous environmental crisis dated from the end of the Holocene Humid Period 2500 years ago, suddenly collapsed and the region suffered a dramatic loss of biodiversity. We show that the tipping point between a forested and a non-forested state occurred ca 400 centuries after the onset of aridity recorded by the lowering of the water level and the progressive salinization of the aquatic environment. This response time of tropical ecosystems to climate change can have critical implications for biodiversity and forest management strategies.

Acknowledgements

This work was initiated in the frame of a CNRS INSU LEFE research project headed by M. Carré and an IRD scientific network coordinated by A. Sifeddine (CLIMACTE). It is an “ACCEDE” Belmont Forum contribution (18 BELM 0001 05). Thanks are due to the Institut de Recherche pour le Développement (IRD) in Senegal and the UCAD Geological

Department for logistic support in the field and authorizations and to the ECLAIRS International Laboratory, Dakar and the LOCEAN Laboratory for fundings. AML and KL are funded by CNRS, CAKF by UCAD. Raw data will be stored at NEOTOMA and are also available on request from the first author.

References

- Adam, J.G., 1953. Note sur la végétation des Niayes de la presqu'île du Cap Vert (Dakar, AOF). 100. Bull. Soc. Bot. Fr., pp. 153–158.
- Adam, J.G., 1958. Flore et végétation de la réserve botanique de Noflaye (environs de Dakar, Sénégal). Bull. Inst. Fond. Afr. Noire (A) 20/3, 809–868.
- Adam, J.G., 1964. Contribution à l'étude de la végétation du lac de Guiers (Sénégal). Bull. Inst. Fond. Afr. Noire (A) 26/1, 1–72.
- Aguiar, L.A., Garneau, M., Lézine, A.M., Maugis, P., 2010. Évolution de la nappe des sables quaternaires dans la région des Niayes du Sénégal (1958–1994): relation avec le climat et les impacts anthropiques. Sécheresse 21 (2), 97–104.
- Association des Palynologues de Langue Française (APLF), 1974. Pollen et spores d'Afrique tropicale. Talence, CEGET. Travaux et Documents de Géographie Tropicale 16.
- Battarbee, R.W., 1986. Diatom analysis. In: Berglund, B.E., Ralska-Jasiewiczowa, M. (Eds.), Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, pp. 527–570.
- Bellingier, E.G., Sigeo, D.C., 2015. Freshwater Algae, Identification, Enumeration and Use as Bioindicators. 2nd edition. Wiley Blackwell.
- Bonnefille, R., Rioulet, G., 1980. Pollens des savanes d'Afrique tropicale. CNRS, Paris.
- Carré, M., Azzoug, M., Zaharias, P., Camara, A., Cheddadi, R., Chevalier, M., Fiorillo, D., Gaye, A.T., Janicot, S., Khodri, M., Lazar, A., 2019. Modern drought conditions in western Sahel unprecedented in the past 1600 years. Clim. Dyn. 52 (3–4), 1949–1964.
- Cocquyt, C., Vyverman, W., Compère, P., 1993. A Check-List of the Algal Flora of the East African Great Lakes (Malawi, Tanganyika and Victoria). National Botanic Garden of Belgium.
- Compère, P., 1991. Contribution à l'étude des algues du Sénégal. Algues du lac de Guiers et du Bas Sénégal. Bull. Jard. Bot. Natl. Belgiq. 61, 171–267.
- Coquery-Vidrovitch, C., 1997. Écologie et histoire en Afrique noire. Histoire, économie et société, 16^e année, n°3. Environnement et développement économique, pp. 483–504.
- Fægri, K., Iversen, J., 1977. Textbook of Pollen Analysis. Blackwell, Oxford.
- Faye, S., 1995. Modélisation hydrodynamique des nappes du littoral Nord entre Cayar et St. Louis. Impact des futurs prélèvements envisagés dans le cadre de l'approvisionnement en eau de Dakar et de ses environs. PhD Thesis. Université Cheick Anta Diop, Dakar.
- Foged, N., 1986. Diatoms in Gambia. Bibliotheca diatomologica 12, 1–124.

- Gasse, F., 1986. East African diatoms. Taxonomy, ecological distribution. *Bibl. Diatomol.* 11, 1–202.
- Grimm, E., 1991. *Tilia and Tiliagrah*. Illinois State Museum, Springfield.
- Guermeur, P., 1954. Diatomées de l'AOF (première liste, Sénégal). Institut français d'Afrique noire.
- Guèye, S., 2000. Etude sur les ressources forestières et les plantations forestières du Sénégal: période 1992–99. Projet GCP/INT/679/EC. FAO, CE.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.* 4 (1).
- Hély, C., Lézine, A.-M., members, A.P.D., 2014. Holocene changes in African vegetation: tradeoff between climate and water availability. *Clim. Past* 10 (2), 681–686.
- Holmes, J.A., Allen, M.J., Street-Perrott, F.A., Ivanovich, M., Perrott, R.A., Waller, M.P., 1999. Late Holocene palaeolimnology of Bal Lake, Northern Nigeria, a multidisciplinary study. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Palaeoecol.* 148, 169–185.
- Jaeger, P., 1949. La végétation. Etudes sénégalaises 1 “la presqu'île du Cap Vert”. Institut Fondamental d'Afrique Noire, Dakar, pp. 93–157.
- Jowsey, P.C., 1966. An approved peat sampler. *New Phytol.* 65, 245–248.
- Lebrun, J.-P., Stork, A.L., 1991–2015. *Énumération Des Plantes à Fleurs d'Afrique Tropicale et Tropical African Flowering Plants: Ecology and Distribution*. 1–7. Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève.
- Lézine, A.-M., 1987. Paléoenvironnements végétaux d'Afrique nord-tropicale occidentale depuis 12 000 B.P. analyse pollinique de séries sédimentaires continentales (Sénégal-Mauritanie). PhD Thesis. Univ. Aix-Marseille.
- Lézine, A.-M., 1989. Late Quaternary vegetation and climate of the Sahel. *Quat. Res.* 32, 317–334.
- Lézine, A.-M., Chateaufeuf, J.-J., 1991. Peat in the “Niayes” of Senegal: depositional environment and Holocene evolution. *J. Afr. Earth Sci.* 12, 171–179.
- Lézine, A.-M., Watrin, J., Vincens, A., Hély, C., et al., 2009. Are modern pollen data representative of west African vegetation? *Rev. Palaeobot. Palynol.* 156 (3–4), 265–276.
- Lézine, A.-M., Hély, C., Grenier, C., Braconnot, P., Krinner, G., 2011. Sahara and Sahel vulnerability to climate changes, lessons from paleohydrological data. *Quat. Sci. Rev.* 30 (21–22), 3001–3012.
- Maley, J., 1970. Contribution à l'étude du bassin tchadien: atlas des pollens du Tchad. *Bull. Hardin Bot. natl Belgiq.* 40, 29–48.
- Maley, J., 1976. Mécanisme des changements climatiques aux basses latitudes. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Palaeoecol.* 14, 193–227.
- Maugis, P., Aguiar, L., Grenier, C., 2009. Hydrogeological modeling as a tool supporting the interpretation of pollen proxies for palaeoclimate reconstitution: the Senegalese “niayes” case-study. *Compt. Rendus Geosci.* 341 (8–9), 783–793.
- Michel, P., 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie: étude géomorphologique. ORSTOM, Paris.
- Michel, P., Naegelé, A., Toupet, C., 1969. Contribution à l'étude biologique du Sénégal septentrional. I: le milieu naturel. *Bull. Inst. Fond. Afr. Noire (A)* 31, 757–839.
- Nash, D.J., De Cort, G., Chase, B.M., Verschuren, D., Nicholson, S.E., Shanahan, T.M., Asrat, A., Lézine, A.-M., Grab, S.W., 2016. African hydroclimatic variability during the last 2000 years. *Quat. Sci. Rev.* 154, 1–22.
- Ndiaye, P., Maily, D., Pineau, M., Margolis, H.A., 1993. Growth and yield of *Casuarina equisetifolia* plantations on the coastal sand dunes of Senegal as a function of microtopography. *For. Ecol. Manag.* 56 (1–4), 13–28.
- Nicholson, S.E., Klotter, D., Dezfuli, A.K., 2012. Spatial reconstruction of semi-quantitative precipitation fields over Africa during the nineteenth century from documentary evidence and gauge data. *Quat. Res.* 78, 13–23.
- ORSTOM, 1962. Carte pédologique 1:10000, M'Boro. ORSTOM, Paris/Dakar.
- Pezeril, G., Chateaufeuf, J.J., Diop, C.E.W., 1986. La tourbe des Niayes au Sénégal: genèse et géologie. *Symp. intern. INQUA-ASEQUA “Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire. Passe, Present, Futur”*. Travaux et docs 197. ORSTOM, Paris, pp. 385–391.
- Raynal, A., 1963. Flore et végétation des environs de Kayar (Sénégal). (de la côte au lac Tanma). *Ann. Facult. Sci. Dakar* 9, 121–231.
- Servant-Vildary, S., 1978. Etude des diatomées et paléolimnologie du bassin Tchadien au Cénozoïque supérieur. *Travaux et Documents.* 84. ORSTOM, Paris, pp. 1–346.
- Shanahan, T.M., Overpeck, J.T., Anchukaitis, K.J., Beck, J.W., Cole, J.E., Dettman, D.L., Peck, J.A., Scholz, C.A., King, J.W., 2009. Atlantic forcing of persistent drought in West Africa. *Science* 324 (5925), 377–380.
- Sow, E., 2001. Le Quaternaire récent du Sénégal occidental (Lacs Retba et Tanma; Estuaire de la Casamance). PhD Thesis. Université de Dakar, Sénégal.
- Sow, E., 2004. Les diatomées subfossiles de la mare de Thiaroye (Dakar-Sénégal): inventaire floristique et paléoenvironnement. *Vie et Milieu* 54, 171–180.
- Sow, E., Diene, M., 2002. Résultats préliminaires sur les diatomées de la Casamance (Sénégal): mise en évidence de deux périodes pluviales le long du sondage de Sédhiou. *Diatom Res.* 17 (1), 219–234.
- Sow, E., Sarr, R., Diop-Ngom, F., 2005. Les diatomées du Quaternaire récent de Diana Malari (Casamance, Sénégal): implications paléoclimatiques. *Sécheresse* 16, 137–142.
- Stager, J.C., Ryves, D., Cumming, B.F., Meeker, L.D., Beer, J., 2005. Solar variability and the levels of Lake Victoria, East Africa, during the last millenium. *J. Paleolimnol.* 33 (2), 243–251.
- Trochain, J., 1940. Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. Larose, Paris.
- Verschuren, D., Laird, K.R., Cumming, B.F., 2000. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years. *Nature* 403, 410.
- Villiers, A., 1957. Aperçu sommaire sur le peuplement des Niayes de la presqu'île du Cap Vert (Sénégal). *Bull. Inst. Fond. Afr. Noire (A)* 19/1, 333–345.
- Vincens, A., Lézine, A.-M., Buchet, G., Lewden, D., Le Thomas, A., et al., 2007. African Pollen Database inventory of tree and shrub pollen types. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 145 (1–2), 135–141.
- Watrin, J., Lézine, A.-M., Gajewski, K., Vincens, A., 2007. Pollen–plant–climate relation in sub-Saharan Africa. *J. Biogeogr.* 34 (3), 489–499.
- Watrin, J., Lézine, A.-M., Hély, C., 2009. Plant migration and ecosystems at the time of the “green Sahara”. *Compt. Rendus Geosci.* 341, 656–670.
- Ybert, J.P., 1979. Atlas des pollens de Côte d'Ivoire. ORSTOM, Paris.

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES
SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Variabilité de l'environnement et du climat du Sahel à la fin de la Période Humide
Holocène : analyse palynologique d'une carotte de sondage dans la région des
Niayes du Sénégal

Lemonnier Kévin
Soutenu le 11/12/2020

RÉSUMÉ

A la fin de l'HHP au Sahel, des changements environnementaux de grande ampleur aboutissent à l'alternance entre une phase humide, où des végétaux de type tropical ont pu se développer, à la période sèche actuelle caractérisée par une végétation de pseudo-steppe. Cette période fait l'objet d'intenses recherches qui décrivent une transition soit abrupte soit plus progressive révélant à la fois la complexité du changement environnemental et la complexité des enregistrements issus des archives marines ou continentales utilisées. La chronologie de cette transition varie selon les sites et les archives entre 5.5 et 2.5 k cal BP. L'étude à haute résolution des micro-organismes organiques (pollen, spores, algues) et des fragments de charbon de la carotte sédimentaire du site de Mboro-Baobab (15° 8'58.49" N, 16°54'34.37" W), dans la région des Niayes au Sénégal, a permis d'étudier la réponse de l'environnement au changement climatique de la fin de l'HHP et son évolution vers l'actuel. L'analyse de 78 échantillons sur 4m de sédiment recoupant 4300 ans a permis de déterminer 105 taxons polliniques et 6 taxons d'algues et champignons microscopiques et de comptabiliser le nombre de micro-charbons de bois contenu dans les sédiments. Les résultats de l'étude indiquent qu'entre 4300 et 3700 cal BP, le site est formé d'un lac d'eau douce, entouré d'une galerie forestière modérément développée et composée de taxons tropicaux humides comme *Uapaca*, *Macaranga*, *Anthostema* et *Alchornea*. A partir de 3700 cal BP s'observent les premiers indices d'aridification du milieu avec un premier abaissement du niveau du lac et l'apparition de taxons herbacés steppiques tels qu'*Aerva*. La réponse de la végétation forestière à cette aridification se fait sentir entre 3200 et 2700 cal BP. Au cours de cette période, les taxons plus humides décroissent progressivement tandis que les taxons pionniers (*Alchornea*) et les taxons de forêt sèche (*Lannea*) se développent. Les pourcentages des arbres restent alors stables et la galerie forestière, même dégradée, se maintient jusqu'au dernier millénaire. Au cours du Petit Age Glaciaire (LIA), une crise majeure est enregistrée qui correspond à la destruction quasi totale de la galerie forestière à Mboro-Baobab. L'anthropisation du milieu attestée par l'accroissement des micro-charbons n'est attestée qu'à partir de 105 cal BP.

Mot clé : Sahel, Période Humide Holocène, Pollen, Niayes.