

Le rôle de l'évolution des paysages holocènes dans le comblement des bas-fonds du Parc national de la Lopé, moyenne vallée de l'Ogooué au Gabon

Victory Nfoumou Obame, Makaya M'Voubou, David Sebag, Richard Oslisly, Laurent Bremond, Michel Mbina Mounguengui, Pierre Giresse

► **To cite this version:**

Victory Nfoumou Obame, Makaya M'Voubou, David Sebag, Richard Oslisly, Laurent Bremond, et al.. Le rôle de l'évolution des paysages holocènes dans le comblement des bas-fonds du Parc national de la Lopé, moyenne vallée de l'Ogooué au Gabon. Bois et Forêts des Tropiques, Montpellier : CIRAD, 2017, 333 (3), pp.67-77. <http://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/ID-BFT-170105> . hal-01741839

HAL Id: hal-01741839

<https://hal-univ-perp.archives-ouvertes.fr/hal-01741839>

Submitted on 23 Mar 2018

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.

Le rôle de l'évolution des paysages holocènes dans le comblement des bas-fonds du Parc national de la Lopé, moyenne vallée de l'Ogooué au Gabon

Victory NFOUMOU OBAME¹
MAKAYA M'VOUBOU¹
David SEBAG^{2,3}
Richard OSLISLY⁴
Laurent BREMOND⁵
Michel MBINA MOUNGUENGUI¹
Pierre GIRESE⁶

¹ Université des sciences et techniques de Masuku
Département de géologie
BP 901, Franceville
Gabon

² Université de Rouen, CNRS
UMR 6143 M2C
76821 Mont-Saint-Aignan
France

³ IRD
UR 050 HSM
LMI Picass'eau
Université de Ngaoundéré
Cameroun

⁴ IRD
UMR 208 PALOC
Agence nationale des parcs nationaux
BP 20379, Libreville
Gabon

⁵ Université de Montpellier 2,
CNRS, IRD, EPHE
Institut des sciences de l'évolution
UMR 5554
Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier Cedex 05
France

⁶ UMR CNRS 5110,
Université de Perpignan-Via Domitia
Centre de formation et de recherche
sur les environnements méditerranéens
52, avenue Paul Alduy
66860 Perpignan
France

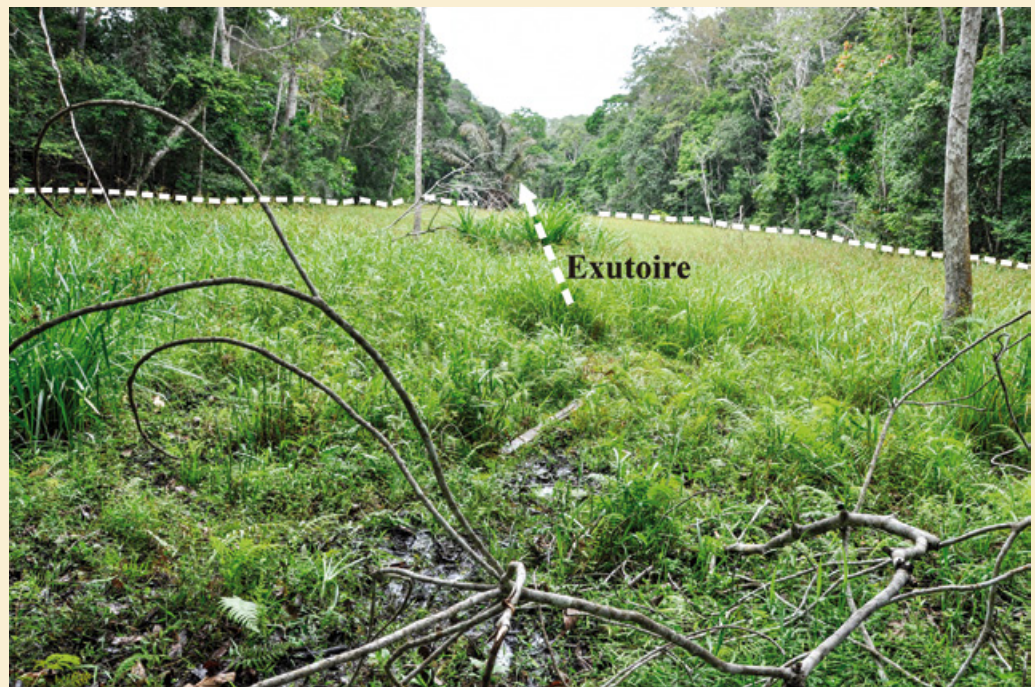


Photo 1.
Le marais Lopé 2.
Photo équipe Ecotrop, 2011.

Auteur correspondant / Corresponding author:
Victory Nfoumou Obame - victory.nfoumou@gmail.com

RÉSUMÉ

LE RÔLE DE L'ÉVOLUTION DES PAYSAGES HOLOCÈNES DANS LE COMBLEMENT DES BAS-FONDS DU PARC NATIONAL DE LA LOPÉ, MOYENNE VALLÉE DE L'OGOOUÉ AU GABON

Des analyses sédimentologique et géochimique associées à des datations ^{14}C ont été réalisées sur une carotte sédimentaire prélevée dans le marais Lopé 2 situé dans la zone nord du Parc national de la Lopé au Gabon. L'ensemble des résultats obtenus nous amène à subdiviser cette carotte en trois principales unités. La première unité part de la base de la carotte à 2 320 ans cal BP. Durant cette période, le marais Lopé 2 est une dépression topographique inondée occasionnellement en saison des pluies. Cette unité correspond à une formation pédologique constituée d'argile, de quartz et de matière organique très dégradée. La fin de cette unité correspond à la fin de la péjoration climatique qu'a connue l'Afrique centrale autour de 2 500 ans BP. La deuxième unité va de 2 320 à 585 ans cal BP. Elle montre une diminution progressive du flux de quartz témoignant de la densification relative de la végétation du marais en conséquence d'une humidification du climat. La matière organique de cette unité relativement abondante et riche en constituants réfractaires est d'origine mixte. La troisième unité qui va de 585 ans cal BP à l'actuel connaît un couvert végétal associé au développement du marais (amorcé à l'unité 2), entretenu par l'humidité du climat. Ici, la matière organique est riche en constituants biologiques.

Mots-clés : sédimentologie, matière organique, géochimie, marais, Holocène récent, paysage, Gabon.

ABSTRACT

HOW EVOLVING HOLOCENE LANDSCAPES ARE FILLING IN THE VALLEY BOTTOMS OF GABON'S LOPÉ NATIONAL PARK IN THE MID OGOOUÉ VALLEY

Sedimentological and geochemical analyses and ^{14}C dating were performed for a sedimentary core sample from the Lopé 2 marsh in the northern zone of Gabon's Lopé National Park. The results produced a division of the core sample into three main units. The basal part of the core sample was dated to 2,320 years cal BP. At this time, the Lopé 2 marsh was a topographic hollow that flooded sporadically during the rainy season. This unit corresponds to a soil formation of clay, quartz and highly decomposed organic matter. The upper boundary of this unit corresponds to the end of the climatic deterioration that affected central Africa around 2,500 years BP. The second unit represents the period from 2,320 to 585 years cal BP. This shows a gradual decrease in the flow of quartz that reflects the increasing relative density of the marsh vegetation as the climate became more humid. The organic matter in this unit is of mixed origin, relatively abundant and with a high content of refractory material. The third unit, representing the period from 585 years cal BP to the present, shows plant cover associated with developing marshland (which began in unit 2) that was sustained by the humid climate. The organic matter here is rich in biological material.

Keywords: sedimentology, organic matter, geochemistry, marsh, recent Holocene, landscape, Gabon.

RESUMEN

PAPEL DE LA EVOLUCIÓN DE LOS PAISAJES HOLOCENOS EN EL RELLENO DE LOS ESTEROS DEL PARQUE NACIONAL DE LOPÉ EN EL VALLE MEDIO DEL OGOOUÉ EN GABÓN.

Se realizaron análisis sedimentológicos y geoquímicos, asociándolos a dataciones de ^{14}C , en un testigo sedimentario extraído en el pantano Lopé 2 ubicado en la zona norte del Parque Nacional de Lopé en Gabón. Los resultados obtenidos nos llevaron a subdividir dicho testigo en tres unidades principales. La primera unidad va de la base del testigo hasta 2 320 años cal AP. Durante este período el pantano Lopé 2 es una depresión topográfica que se anega ocasionalmente durante la temporada de lluvias. Esta unidad se corresponde con una formación pedológica compuesta por arcilla, cuarzo y materia orgánica muy degradada. El final de esta unidad corresponde al fin del empeoramiento climático experimentado en África Central en torno a 2 500 años AP. La segunda unidad va de 2 320 a 585 años cal AP y muestra una disminución gradual en el flujo de cuarzo que refleja la densificación relativa de la vegetación del pantano debido a un clima más húmedo. La materia orgánica de esta unidad, relativamente abundante y rica en componentes refractarios, es de origen mixto. La tercera unidad, que va de 585 años cal AP hasta la actualidad, tiene una cubierta vegetal asociada al desarrollo del pantano (iniciado en la unidad 2) y mantenida por la humedad del clima. En este tramo, la materia orgánica es rica en componentes biológicos.

Palabras clave: sedimentología, materia orgánica, geoquímica, pantano, Holoceno reciente, paisaje, Gabón.

Introduction

Les paysages d'Afrique centrale ont connu de profonds bouleversements depuis le dernier maximum glaciaire qui a débuté il y a environ 20 000 ans BP (Maley, 2001). Cette évolution est documentée par des archives sédimentaires lacustres, dont la séquence BM6 du lac Barombi Mbo est la référence (Maley et Brenac, 1998 ; Lebamba *et al.*, 2012). Les tendances régionales et les principales étapes sont connues. En effet, de 10 000 à 2 800 ans BP, au lac Barombi Mbo, on note une phase humide qui se caractérise par une extension forestière. De 2 800 à 2 000 ans BP, le lac Barombi Mbo enregistre un climat fortement contrasté caractérisé par des longues saisons sèches. Centré à l'échelle régionale (Afrique centrale Ouest) entre 2 500 et 2 000 ans BP (Maley, 1992 ; Ngomanda *et al.*, 2008 ; Lebamba *et al.*, 2016), ce climat a permis le développement de savanes incluses autour du lac. Cette phase climatique a été suivie d'une phase humide qui va de 2 000 ans BP à l'actuel. Elle a occasionné un regain forestier dont l'extension n'a pas encore atteint celle de la première phase humide holocène. Ce regain forestier n'a pas été synchrone dans tous les sites de l'Afrique centrale (Maley, 2001). Au lac Nguène, la phase humide débute à 1 950 ans BP et engendre une augmentation du niveau lacustre. Ce n'est qu'à partir de 990 ans BP que le regain forestier a débuté (Makaya M'Voubou, 2005 ; Ngomanda *et al.*, 2007 ; Giresse *et al.*, 2009). Au lac Kamalété, l'élévation du niveau lacustre et la mise en place d'une mosaïque forêt/savane plus arborée ne sont effectives qu'à partir de 520 ans BP (Makaya M'Voubou, 2005 ; Ngomanda *et al.*, 2005 ; Giresse *et al.*, 2009). Au lac Ossa, la phase humide est caractérisée par une élévation du niveau lacustre et un regain forestier datés de 1 000 ans BP (Kossoni, 2003) alors qu'au lac Sinnda elle commence à 1 200 ans BP et entraîne une recrudescence des pluies interrompue par un bref épisode sec vers 650 ans BP (Vincens *et al.*, 2000). Autour du lac Sinnda, les savanes persistent encore aujourd'hui.

Les causes de certains de ces événements sont encore débattues et difficiles à trancher (Weldeab *et al.*, 2007 ; Bayon *et al.*, 2012) en raison de la faible densité géographique des séquences sédimentaires, du faible nombre d'archives à long terme et du rôle souvent prépondérant du contexte local (Ossa, Kamalété). Ce manque de données est particulièrement sensible dans le centre du Gabon, et notamment dans le Parc national de la Lopé où très peu de séquences sédimentaires ont été étudiées (Ngomanda *et al.*, 2005 ; Giresse *et al.*, 2009 ; Sebag *et al.*, 2013), alors que le contexte archéologique est très largement documenté (Oslisly et Peyrot, 1992a et b ; Oslisly, 2001 ; Oslisly et White, 2007). En effet, les vestiges de tous les stades de la préhistoire ont été retrouvés dans le Parc national de la Lopé, depuis les traditions céramiques associées aux premières installations néolithiques vers 4 000 ans BP jusqu'au développement de la métallurgie du fer qui va s'épanouir de 2 500 à 1 700 ans BP, dans le Parc national de la Lopé (Oslisly, 2001 et 2012). L'augmentation du nombre de sites entre 2 800 et 1 400 BP est suivie de leur diminution brutale entre 1 300 et 900 ans cal BP, qui peut être interprétée comme l'expression d'une crise démographique.

Ce phénomène (hiatus), particulièrement marqué dans la moyenne vallée de l'Ogooué, affecte également l'ensemble de l'arrière-pays du bloc forestier d'Afrique centrale atlantique (Oslisly *et al.*, 2013).

En dehors de rares séquences sédimentaires étudiées, il existe dans ce parc des enregistrements sédimentaires accumulés dans des bas-fonds marécageux. À travers la nature et la qualité des sédiments qui s'y accumulent, ces séquences enregistrent des changements climatiques et environnementaux au cours du temps. À cet effet, l'enregistrement sédimentaire du marais Lopé 2 est étudié dans le but de déterminer d'une part les phases de comblements sédimentaires du marais durant la fin de l'Holocène, d'autre part la succession des paléoenvironnements tout en soulignant leurs rôles dans ce comblement. Pour atteindre ces objectifs, les analyses des fractions organique et minérale de cette accumulation sédimentaire ont été réalisées.

Présentation du site et de la séquence sédimentaire

Le Parc national de la Lopé : climat, végétation, géologie, sols

Le climat régional est de type équatorial chaud et humide, marqué par deux saisons sèches et deux saisons des pluies. La pluviométrie annuelle, autour de 1 500 mm, est parmi les plus faibles du pays. Cette particularité est la conséquence d'un effet de « foehn » sur le revers du massif du Chaillu et des monts de Cristal qui bloque une partie de la mousson atlantique (Saint-Vil, 1977). La température moyenne mensuelle varie entre 20,6 et 30,8 °C. La végétation de la Lopé est une mosaïque de forêt et de savane (Descoings, 1974). Le substrat géologique est essentiellement formé de granitoïdes archéens (Chevallier *et al.*, 2002). Les sols sont de type ferrallitique à texture argilo-sableuse. Leurs fractions fines sont composées de kaolinite, de gibbsite, d'illite et de chlorite (Collinet et Forget, 1976). Les gravillons de quartz présents à la surface des sols et les sols tronqués, parfois recouverts par des nappes de graviers, signifient que ces sols sont depuis longtemps l'objet d'une forte érosion par ruissellement (Peyrot *et al.*, 2003).

Le marais Lopé 2

Le marais Lopé 2 (0°13'4,2" S-11°35'1,2" E) (photo 1) est situé au nord du parc (figure 1) au pied du mont Yindo (678 m d'altitude). Il occupe une dépression de 200 m de long sur 50 m de large. Les flancs de la dépression ont des pentes très fortes, notamment sur le flanc oriental. Des blocs de granitoïdes sont visibles sur les flancs et autour du marais. Le marais constitue une zone d'écoulement préférentiel durant les saisons pluvieuses vers la rivière Kombian. Le marais est occupé par les herbacées, essentiellement des cypéracées (*Rhynchospora corymbosa*) et quelques fougères. Les abords immédiats du marais sont recouverts

d'une végétation forestière dominée par les okoumés (*Aukoumea klaineana*). En arrière de cette végétation forestière, le flanc oriental de la dépression est occupé par une savane arbustive à *Crossopteryx febrifuga* où apparaissent des espèces pionnières, *Uapaca guineensis*, *Xylopicia aethiopica* et *Lophira alata* (azobés) (Ngomanda *et al.*, 2007).

La séquence sédimentaire

La succession sédimentaire étudiée correspond à une carotte de 355 cm de long prélevée dans le marais Lopé 2 à 10 m environ de la berge orientale, au cours de l'édition 2011 de l'École de terrain en écologie tropicale Ecotrop¹. La partie inférieure (355 à 250 cm) est composée d'un dépôt quartzueux gris clair à beige qui montre dans sa partie basale des taches d'oxydation du fer. Cette première partie de la carotte est riche en grains de quartz et très pauvre en débris végétaux. La partie supérieure de la carotte (250 cm jusqu'au sommet) est constituée d'une vase de couleur très variable allant du gris foncé au gris clair en passant parfois par le marron clair ou foncé. Elle est pauvre en quartz mais caractérisée par l'abondance de débris végétaux. Les analyses sédimentologiques ont porté sur 36 échantillons prélevés selon un pas constant de 10 cm, et celles de la géochimie organique (pyrolyse Rock-Eval) sur 29 échantillons selon un pas de 10 cm variable en fonction de la lithologie.

1 www.ecotrop.com

Quatre échantillons de cette carotte ont été datés au ¹⁴C par AMS (*Accelerator mass spectrometry*) au Laboratoire de mesure du ¹⁴C de Saclay. Le premier, prélevé à 228 cm, a été daté à 2 073 ans cal BP (A37032, âge ¹⁴C), le deuxième pris à 155 cm est daté à 1 021,9 ans cal BP (A37030, âge ¹⁴C). Le troisième échantillon a été prélevé à 106 cm et daté à 669,8 ans cal BP (A37031, âge ¹⁴C) tandis que le quatrième, à 13 cm, a été daté à - 35,2 ans cal BP (A37029, âge ¹⁴C). Les dates ont été calibrées à l'aide de la courbe de calibration de Stuiver, et le modèle d'âge a été établi à l'aide du logiciel Bacon (figure 2).

Méthodologie

Géochimie organique (pyrolyse Rock-Eval)

La pyrolyse Rock-Eval est une méthode classiquement utilisée pour déterminer la quantité, la qualité et la source de la matière organique des roches et sédiments anciens (Espitalié *et al.*, 1985 ; Lafargue *et al.*, 1998). De nos jours, son utilisation est étendue à l'étude des sols et des marais (Disnar *et al.*, 2003 ; Zaccone *et al.*, 2011 ; Carrie *et al.*, 2012). Elle consiste à chauffer un échantillon (100 mg) préalablement séché et broyé à l'aide d'un pyrolyseur RE6 (turbo model, Vinci Technologies®, France) : d'abord entre 200 et 650 °C dans du diazote (pyrolyse), puis entre 400 et 850 °C en présence d'oxygène (oxydation) selon un même gradient

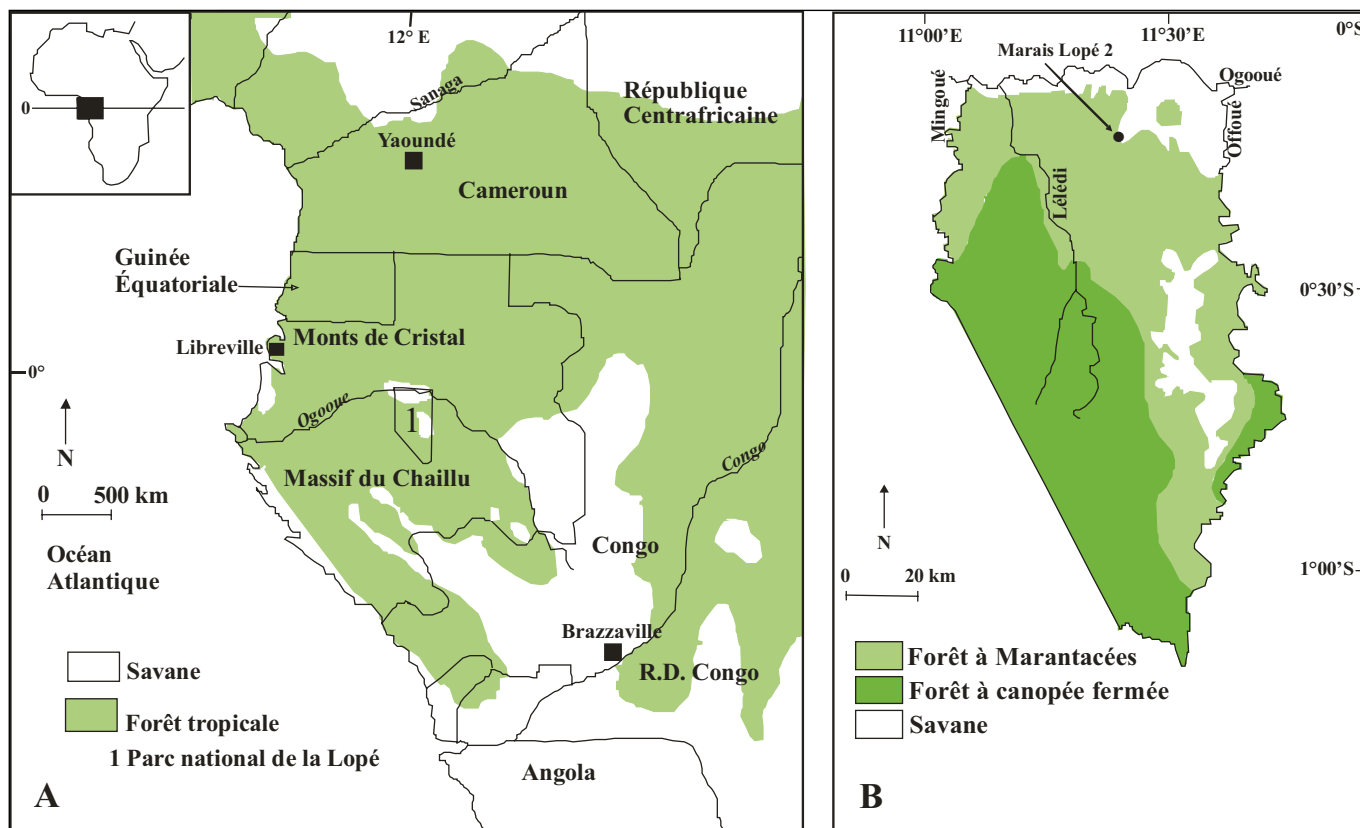


Figure 1. Localisation du Parc national de la Lopé au Gabon (A), et localisation du marais Lopé 2 dans le parc (B).

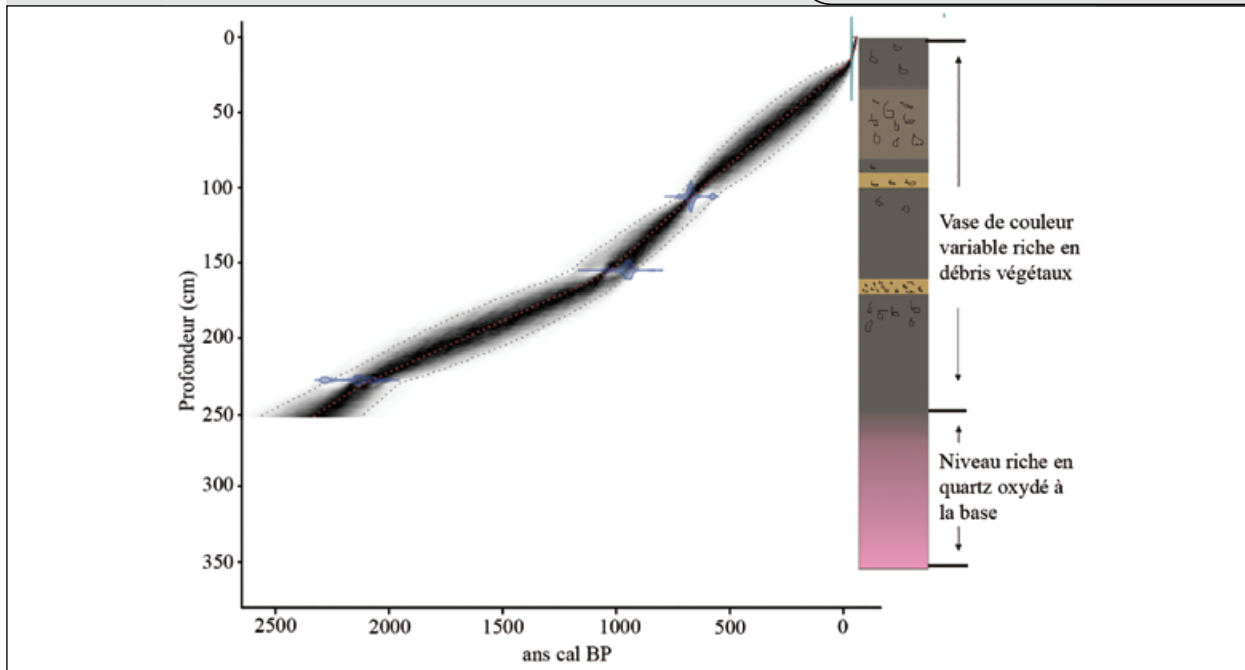


Figure 2.
Modèle d'âge de la carotte du marais Lopé 2.

de température (25 °C/min). Cette analyse a été effectuée au Laboratoire de géochimie organique de l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (France).

Au cours du cycle d'analyse, plusieurs signaux sont mesurés en continu : le signal S1 (hydrocarbures libérés au début de l'analyse), le signal S2 (hydrocarbures issus du craquage de la matière organique au cours de la phase de pyrolyse), les signaux S3 et S'3 (CO₂ et CO libérés au cours de la phase de pyrolyse), les signaux S4 et S'4 (CO₂ et CO libérés au cours de l'oxydation). Les paramètres standards de la pyrolyse sont calculés par intégration de ces courbes (Lafargue *et al.*, 1998 ; Behar *et al.*, 2001) : le carbone organique total (COT, en % de poids sec) mesure la teneur en carbone organique, la TpS2 (TpS2 = Tmax + 40, en °C) correspond à la température réelle du four lorsque le maximum d'hydrocarbure est libéré (pic S2). L'indice d'hydrogène (IH, en mg HC/g Corg) correspond à la quantité d'hydrocarbures libérée durant la pyrolyse, normalisée par le COT. L'indice d'oxygène (IO, en mg O₂/g Corg) quant à lui mesure la quantité d'oxygène libérée par gramme de carbone organique. Les échantillons présentant trop peu de carbone organique (COT < 0,04 %) n'ont pas été pris en compte dans cette étude (entre 346,5 et 310 cm).

En outre, une étude plus approfondie des courbes S2 peut permettre d'estimer la contribution des différents constituants organiques. Ce sont des courbes représentant la quantité d'hydrocarbures dégagée en fonction de la température. Notre étude se réfère à la méthode développée par Disnar *et al.* (2003) pour estimer la contribution des pools de constituants organiques définis par leur température de craquage spécifique. Ainsi, selon les travaux d'Albrecht *et al.* (2015), les courbes S2 ont été décomposées en intervalles de températures : 205-340 °C (A1, biopolymères labiles), 340-400 °C (A2, biopolymères résistants), 400-460 °C (A3, géopolymères immatures), 460-550 °C (A4, géopolymères

résistants), 550-650 °C (A5, géopolymères matures ou réfractaires). Ces cinq contributions relatives sont ensuite utilisées pour calculer deux indices, l-I-index (Log [(A1 + A2)/A3]) et R-index [(A3 + A4 + A5)/100], qui seront utilisés dans le diagramme I-R (Sebag *et al.*, 2007 ; Albrecht *et al.*, 2015 ; Sebag *et al.*, 2016). l-I-index représente la contribution de la matière organique immature, tandis que R-index représente celle de la matière organique mature.

Sédimentologie

Les analyses sédimentologiques effectuées selon les protocoles proposés par Makaya M'Voubou (2005), Giresse *et al.* (2009), Kossoni et Giresse (2010) ont été effectuées au laboratoire de l'Unité de recherche des Sciences de la Terre et de l'Environnement (URESTE) de l'Université des sciences et techniques de Masuku (USTM, Gabon). Le lavage des échantillons bruts sous filet d'eau à travers un tamis de 50 µm a permis de calculer la teneur de la fraction supérieure à 50 µm. L'observation à la loupe binoculaire de cette fraction grossière a permis de mesurer l'indice de clasticité de chaque échantillon (taille moyenne des quatre plus gros grains de quartz) et de faire une estimation semi-quantitative des constituants minéraux (micas) et organiques (débris végétaux et charbons de bois) de ce dernier. L'indice de clasticité et la teneur en fraction supérieure à 50 µm sont des paramètres témoignant de l'intensité de l'érosion et de l'énergie de dépôt. Les micas sont des minéraux constitutifs de la roche mère, leur libération peut témoigner de l'altération de cette roche. Les débris végétaux sont issus principalement de la végétation qui se développe dans le marais. Les charbons sont issus des feux des savanes environnantes, qui pourraient être liés à des mises à feu anthropiques ou, plus rarement, à des incendies naturels (Oslisly et Dechamps, 1994 ; Oslisly, 2001).

Résultats

Qualité de la matière organique sédimentaire

Les principaux résultats obtenus de l'analyse des échantillons de la carotte du marais Lopé 2 sont indiqués sur la figure 3.

Le diagramme IH en fonction de TpS2 nous permet de distinguer (1) des échantillons présentant les IH les plus faibles (entre 16 et 94 mg HC/g COT) et les TpS2 les plus élevés (entre 419 et 480 °C), (2) des échantillons avec des IH variables (entre 163 et 329 mg HC/g COT) accompagnés de TpS2 élevés (entre 408 et 469 °C), (3) des échantillons caractérisés par les IH les plus importants (entre 282 et 363 mg HC/g COT) et les TpS2 les plus faibles (entre 361 et 373 °C). Le premier groupe d'échantillons localisés entre 290 et 252,5 cm correspond lithologiquement au niveau riche en quartz et pauvre en débris végétaux (unité 1). Le deuxième groupe correspond aux échantillons de la vase riche en débris végétaux prélevés entre 252,5 et 95 cm (unité 2). Le troisième groupe correspond aux échantillons de la vase riche en débris végétaux pris entre 95 cm et le sommet de la carotte (unité 3).

Le diagramme COT en fonction de TpS2 permet également de distinguer les trois unités décrites dans le diagramme IH en fonction de TpS2. En effet, les échantillons de l'unité 1 présentent des COT très faibles (entre 0,06 et 0,34 %) pour des TpS2 élevés. Les échantillons de l'unité 2 ont des COT variables (entre 1,4 et 21,34 %) et des TpS2 élevés, tandis que ceux de l'unité 3 se caractérisent par des COT élevés (entre 18,78 et 33,41 %) et des TpS2 faibles.

Le diagramme IH en fonction d'IO permet de distinguer des échantillons de l'unité 1 caractérisés par les IO les plus importants (entre 148 et 298 mg O/g COT) et les IH les plus faibles. Il permet également d'identifier un ensemble constitué d'échantillons des unités 2 et 3 qui se caractérise par des IO faibles (137 et 210 mg O/g COT) et des IH élevés (163 et 363 mg HC/g COT).

Stabilité thermique des constituants organiques

Les mesures de la décomposition du signal S2 nous permettent d'obtenir la contribution de différentes classes de constituants organiques définis par leur stabilité thermique (figure 4).

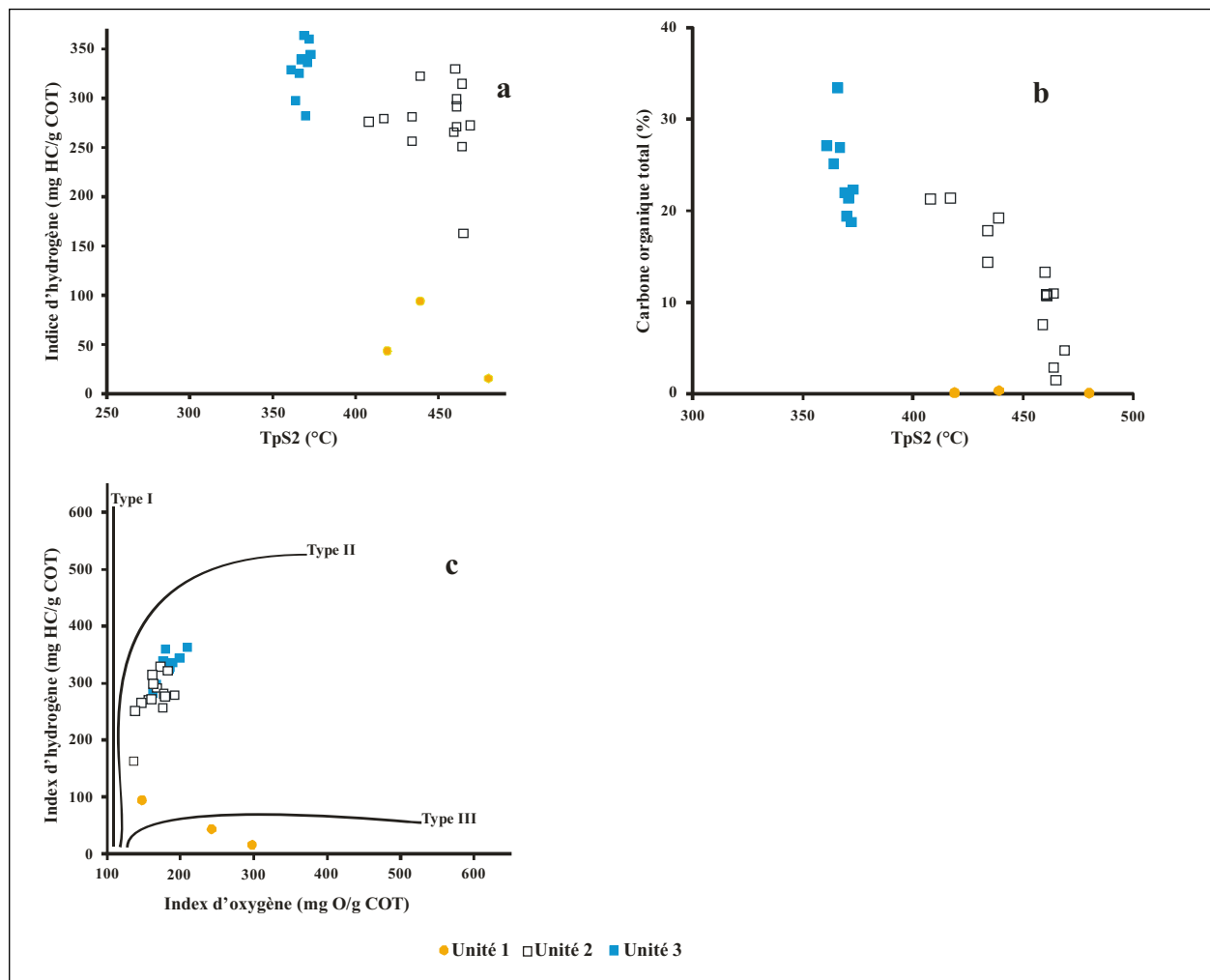


Figure 3.

Caractérisation de la matière organique sédimentaire du marais Lopé 2 à partir des paramètres standards de la pyrolyse Rock-Eval en utilisant les diagrammes : a, IH vs TpS2 ; b, COT vs TpS2 ; c, IH vs IO.

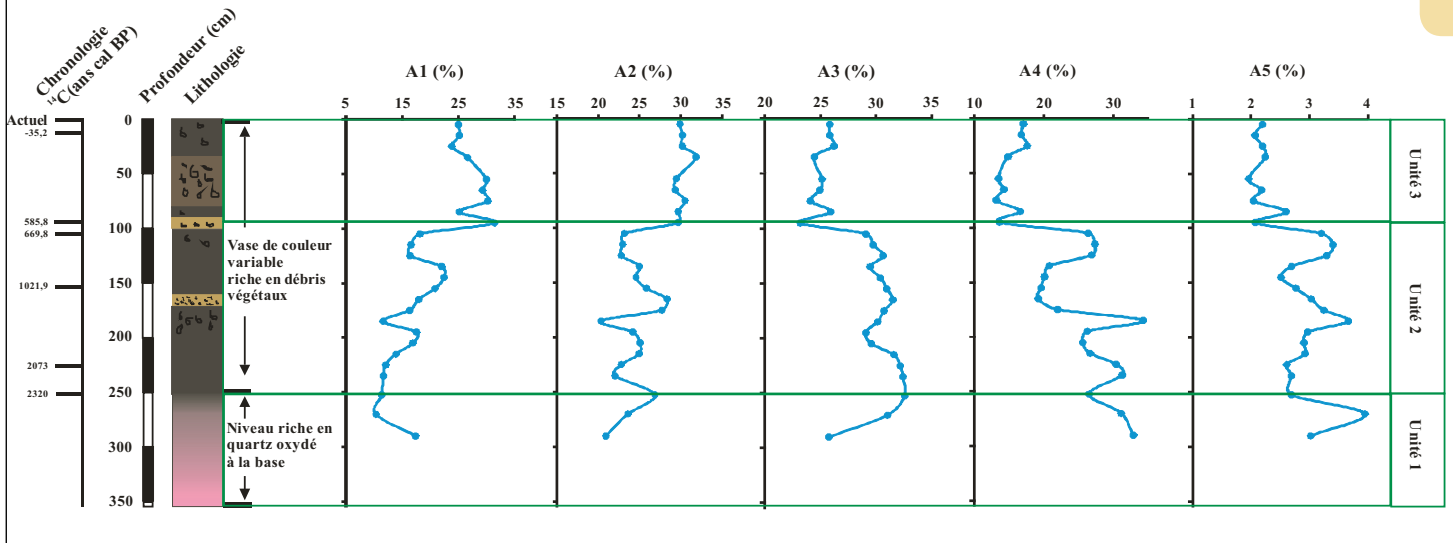


Figure 4.

(A1) biopolymères labiles ; (A2) biopolymères résistants ; (A3) géopolymères immatures ; (A4 et A5) géopolymères matures.

Les contributions en biopolymères labiles (A1) augmentent de la base vers le sommet de la carotte, et sont les plus faibles (entre 10,33 et 22,44 %) dans l'ensemble formé par les unités 1 et 2 (entre 290 et 95 cm). Dans l'unité 3 (de 95 cm au sommet), les biopolymères labiles sont plus abondants (de 23,8 à 31,4 %).

Les contributions en biopolymères résistants (A2) augmentent de la base vers le sommet de la carotte et évoluent globalement de la même manière que celles des biopolymères labiles. Ainsi, dans l'ensemble formé par les unités 1 et 2, les contributions en biopolymères résistants sont plus faibles (entre 20,3 et 28,3 %) que dans l'unité 3 où elles sont comprises entre 29,3 et 31,8 %.

Les contributions des géopolymères immatures (A3) diminuent de la base vers le sommet de la carotte. Dans l'ensemble formé par les unités 1 et 2, les teneurs sont nettement plus élevées (entre 25,8 et 32,5 %) que dans l'unité 3 (entre 23,2 et 26,2 %).

Les contributions en géopolymères matures (A4 et A5) diminuent globalement de la base vers le sommet de la carotte. On note des contributions plus élevées dans l'ensemble formé par les unités 1 et 2 avec des maxima de 34,23 % pour A4 et 3,94 % pour A5. Cependant dans l'unité 3, on enregistre les contributions les plus faibles, comprises entre 13,1 et 17,5 % pour A4 et entre 1,9 et 2,6 % pour A5.

Le diagramme I index en fonction de R-index (figure 5) permet de distinguer un ensemble formé d'échantillons des unités 1 et 2 (entre 290 et 95 cm). Cet ensemble est caractérisé par les valeurs les plus faibles en I-index (entre 0,016 et 0,202) et les valeurs les plus élevées en R-index (comprises entre 0,52 et 0,68). Ce diagramme permet également de distinguer des échantillons de l'unité 3 (entre 95 cm de profondeur et le sommet de la carotte) qui se caractérisent par les valeurs les plus élevées en I-index (entre 0,31 et 0,42) et les valeurs les plus faibles en R-index (entre 0,38 et 0,45).

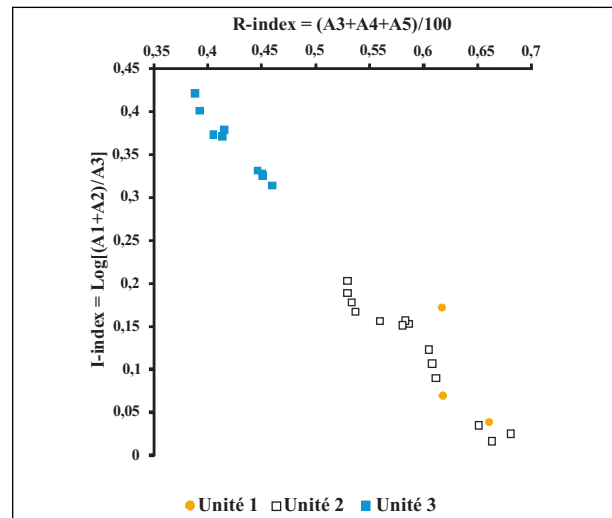


Figure 5.

Caractérisation de la matière organique sédimentaire du marais Lopé 2 en utilisant le diagramme I-index vs R-index.

Composition texturale des dépôts et marqueurs sédimentaires

La figure 6 illustre la distribution verticale des principaux composants et marqueurs de la sédimentation dans le site du marais Lopé 2.

Les valeurs de la fraction supérieure à 50 μm sont comprises entre 2,8 et 75,9 %. L'unité 1 (de 350 à 252,5 cm) présente des valeurs plutôt basses de 350 à 280 cm (entre 2,8 et 15,5 %) qui augmentent brutalement de 270 à 252,5 cm (entre 51,2 et 75,9 %). L'unité 2 (entre 252,5 et 95 cm) montre de fortes variations des valeurs de la fraction > 50 μm avec un maximum de 72,5 % et un minimum de 4,13 % (entre 95 cm et le sommet de la carotte) présente des valeurs élevées entre 95 et 55 cm (entre 42,3 et 70,9 %) qui diminuent entre 45 cm et le sommet de la carotte (entre 5,6 et 38,02 %).

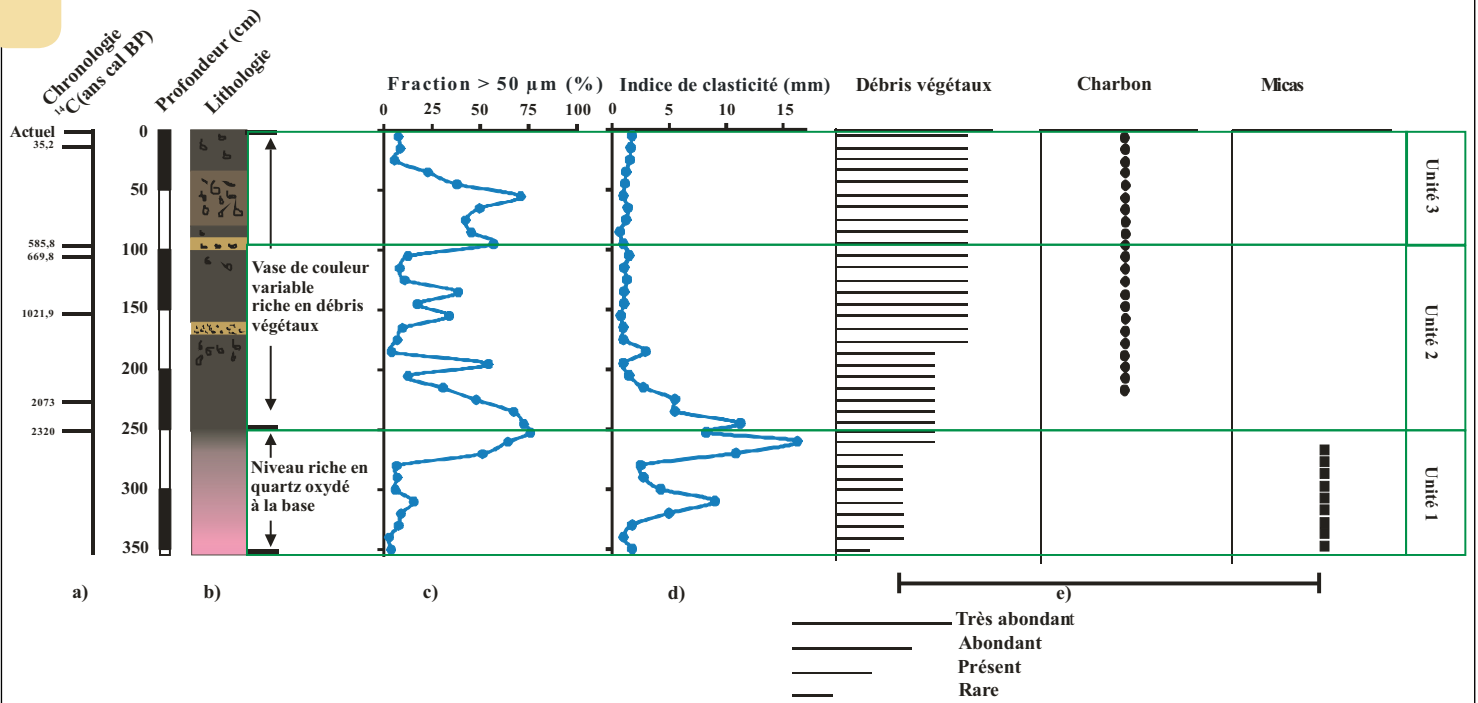


Figure 6. Résultats de l'analyse sédimentologique. a) datation ^{14}C ; b) lithologie; c) fraction $> 50 \mu\text{m}$; d) indice de clasticité; e) analyse semi-quantitative.

Les valeurs de l'indice de clasticité sont comprises entre 0,68 et 16,2 mm. Dans l'unité 1 elles sont faibles de 350 à 280 cm (maximum de 9 mm) et augmentent brutalement entre 270 et 252,5 cm (maximum à 16 mm). Dans l'unité 2, les valeurs diminuent progressivement jusqu'à se stabiliser dans les faibles intensités (entre 0,75 mm et 2,75 mm). L'unité 3 montre des valeurs de l'indice de clasticité faibles qui varient peu (0,68 et 1,75 mm).

Cette fraction supérieure à $50 \mu\text{m}$ renferme des constituants organiques (débris végétaux et charbons de bois) et des composants minéraux (quartz et micas). Les débris végétaux constitués essentiellement de restes de racines, de tiges, de feuilles sont plus abondants dans les unités 2 et 3 que dans l'unité 1. Les charbons de bois ont été observés uniquement dans les unités 2 et 3. Les micas blancs sont présents dans l'unité 1 alors qu'ils restent rares dans les unités 2 et 3.

Discussion

Évolution holocène du marais Lopé 2

L'analyse couplée des résultats sédimentologiques et géochimiques nous amène à subdiviser la carotte en trois unités. Ces unités sont caractéristiques de l'évolution du marais Lopé 2 en fonction des conditions environnementales qui ont prévalu au cours du temps.

L'unité 1 basale (de la base de la carotte à 2 320 ans cal BP) est riche en quartz, pauvre en débris végétaux, et très quartzreuse en son sommet (de 270 à 252,5 cm). La fraction organique peu abondante est riche en constituants réfractaires ($R > 0,6$) et sa signature Rock-Eval comparable à celle des horizons organo-minéraux des sols. La présence de

micas indique une contribution de la roche-mère. Ces résultats suggèrent que cette unité correspond à une formation de type pédologique, qui n'implique pas de sédimentation active dans la dépression avant 2 320 ans cal BP. La passée sableuse au sommet de l'unité 1 pourrait ainsi être rapprochée d'une phase climatique relativement sèche caractérisée par une forte saisonnalité (pluies rares et intenses), aussi observée dans le lac Nguène entre 2 800 et 1 800 ans cal BP (Makaya M'Voubou, 2005 ; Giresse *et al.*, 2009 ; Sebag *et al.*, 2013). Cette phase pourrait correspondre à la fin de la péjoration climatique documentée dans la région d'Afrique centrale Ouest entre 2 500 et 2 000 ans BP (Maley, 1992 ; Vincens *et al.*, 2010 ; Neumann *et al.*, 2012).

L'unité 2 médiane (entre 2 320 et 585 ans cal BP) est une vase riche en débris végétaux et quartzreuse à la base. La fraction organique, plus abondante vers le sommet, est riche en constituants réfractaires ($R > 0,5$), mais sa signature Rock-Eval indique une contribution autochtone palustre (matière organique aquatique et/ou débris végétaux faiblement dégradés). Cette évolution par rapport à l'unité 1 peut s'expliquer par une densification progressive de la végétation du marais. La colonisation des berges provoque d'abord le piégeage d'une partie de la fraction grossière (passage des sables aux vases), puis la diminution des apports détritiques terrigènes attestée par la disparition des quartz et l'augmentation relative de la fraction organique. Là encore, une situation comparable est enregistrée dans le lac Nguène à partir de 1 800 ans cal BP (Makaya M'Voubou, 2005 ; Giresse *et al.*, 2009 ; Sebag *et al.*, 2013). Le climat humide se manifeste par des précipitations relativement abondantes et régulières. Cela correspondrait au début de la phase humide enregistrée dans plusieurs sites de l'Afrique centrale Ouest (Bertaux *et al.*, 2000 ; Giresse *et al.*, 2009 ; Nguetsop *et al.*, 2011).

Conclusion

L'unité 3 sommitale (à partir de 585 ans cal BP) est riche en débris végétaux et très pauvre en grains de quartz. La fraction organique est très abondante, riche en constituants labiles ($R < 0,5$) et sa signature Rock-Eval est très proche de celle des apports biologiques non dégradés (algues, plantes et litière). Ces résultats reflètent l'augmentation de la contribution autochtone et la quasi-disparition des sédiments grossiers provenant de l'érosion des versants. Ils suggèrent une colonisation de la dépression par une végétation dense assez semblable à ce que l'on observe aujourd'hui et consécutive au maintien de conditions humides. La phase humide enregistrée dans l'unité 3 entre 585 ans cal BP et l'actuel serait la même que celle observée au lac Kamalété (distant de seulement quelques dizaines de kilomètres) entre 500 ans cal BP et l'actuel (Ngomanda *et al.*, 2005 ; Giresse *et al.*, 2009).

Proposition de fonctionnement du marais Lopé 2 au cours du temps

La première unité caractérise une formation de type pédologique, plutôt qu'un dépôt sédimentaire *stricto sensu*. La dépression topographique pourrait être inondée occasionnellement en saison des pluies, mais elle demeure essentiellement exondée le reste de l'année. Cela se traduit par un complexe pédologique renfermant de l'argile, du sable et très peu de matière organique. Cela explique également le caractère très dégradé de la matière organique (IO élevés) et les traces d'oxydation du fer responsables de la couleur orangée observée à la base de la carotte. La nature pédologique de cette unité implique qu'elle correspond à une période de temps relativement longue au cours de laquelle la sédimentation était moins active.

La deuxième unité correspond à des dépôts sédimentaires associés à une mise en place pérenne des eaux dans la dépression topographique. Sa base est caractérisée par une passée quartzuse qui marque une période érosive intense sur les versants et témoigne d'un milieu relativement ouvert sur les versants et sur les berges du marais. Au-dessus, les dépôts plus organiques attestent une humidité du milieu favorisant le développement d'espèces hygrophiles à l'intérieur et sur les berges du marais. Cette végétation aquatique constitue une barrière physique qui empêche les sédiments grossiers de se déposer dans le marais. Par conséquent, les sédiments fins provenant des versants et les résidus de plantes hygrophiles du marais vont constituer l'essentiel du dépôt.

Dans l'unité 3, la persistance des conditions humides est à l'origine de la densification de la végétation à l'intérieur du marais. L'unité 3 correspond à la situation actuelle du marais associée à un colmatage du marais plus accentué que dans l'unité 2.

La présente étude visant à déterminer, à partir d'un enregistrement sédimentaire du marais Lopé 2, la succession des paysages holocènes et leurs rôles dans le comblement des bas-fonds, est l'une des rares existantes dans le Parc national de la Lopé. En effet, les paléoenvironnements de ce parc sont très peu étudiés alors que l'archéologie est très largement documentée. Les variations paléoenvironnementales obtenues au cours de cette étude sont déduites essentiellement de la variation des constituants organiques et minéraux de l'enregistrement sédimentaire. La phase climatique sèche, qui correspondrait à un paysage ouvert, se caractérise par une sédimentation peu marquée et des sédiments pauvres en matière organique, tandis que la phase humide, correspondrait à un paysage fermé, se distingue par un remplissage progressif du marais par des sédiments de plus en plus organiques.

Les conclusions de ce travail sont plus ou moins ponctuelles et ne peuvent pas être automatiquement généralisées à la dimension du parc. Des études polliniques peuvent permettre d'obtenir des résultats plus précis que l'on pourrait étendre à une plus grande échelle. De plus, des études similaires en cours, étendues à plusieurs autres marais du parc, devraient nous permettre d'obtenir les successions paléoenvironnementales à l'échelle régionale. Cependant, la fin de la péjoration climatique et le début des conditions humides enregistrés au marais Lopé 2 à 2 320 ans cal BP pourraient s'inscrire dans une tendance commune aux autres marais du parc, mais aussi à toute l'Afrique centrale atlantique (changements hydro-sédimentaires vers 2 500-2 000 ans BP).

Remerciements

Nos remerciements s'adressent particulièrement aux chercheurs et étudiants de l'atelier Paléoenvironnement-Paléoécologie de l'édition 2011 de l'École de terrain en écologie tropicale Ecotrop (www.ecotrop.com) qui ont participé au prélèvement de la séquence sédimentaire étudiée. Ils s'adressent également à M. Mabicka Obame Rolf qui a rendu possibles les analyses de pyrolyse Rock-Eval réalisées au Laboratoire de géochimie organique de l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (France). Nos remerciements vont de même à l'Unité de recherche des Sciences de la Terre et de l'Environnement (URESTE) de l'Université des sciences et techniques de Masuku (USTM, Gabon), qui nous a permis de réaliser les études sédimentologiques.

Références bibliographiques

- Albrecht R., Sebag D., Verrecchia E. P., 2015. Organic matter decomposition: bridging the gap between Rock Eval pyrolysis and chemical characterization (CPMAS ¹³C NMR). *Biogeochemistry*, 112: 101-111. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-0033-8>
- Bayon G., Dennielou B., Etoubleau J., Ponzevera E., Toucanne S., Bermell S., 2012. Intensifying weathering and land use in iron Age Central Africa. *Science*, 335: 1219-1222. <https://doi.org/10.1126/science.1215400>
- Behar F., Beaumont V., De B. Penteado H. L., 2001. Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil and Gas Science and Technology*, 56 (2): 111-134. <https://doi.org/10.2516/ogst:2001013>
- Bertaux J., Schwartz D., Vincens A., Sifeddine A., Elenga H., Mansour M., *et al.*, 2000. Enregistrement de la phase sèche d'Afrique Centrale vers 3 000 ans BP par spectrométrie IR dans les lacs Sinnda et Kitina (Sud-Congo). *In*: Servant M., Servant Vildary S. (éds). *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*. Paris, France, IRD, Unesco, 43-49. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010023908>
- Carrie J., Sanei H., Stern G., 2012. Standardisation of Rock-Eval pyrolysis for the analysis of recent sediments and soils. *Organic Geochemistry*, 46: 38-53. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.01.011>
- Chevallier L., Makanga J. F., Thomas R. J., 2002. Carte géologique de la République gabonaise, 1/1 000 000. Notice explicative. Pretoria, Afrique du Sud, Council for Geoscience, 195 p.
- Collinet J., Forget A., 1976. Carte pédologique de reconnaissance. Feuille Booué Nord-Mitzi Sud à 1/200 000. Orstom, Notice explicative n° 63, 160 p.
- Descoings B., 1974. Les savanes du Moyen-Ogooué, région de Booué (Gabon) : conditions générales, analyse floristique, analyse structurale, valeur pastorale. Montpellier, France, CNRS, 141 p. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:07389>
- Disnar J. R., Guillet B., Keravis D., Di-Giovanna C., Sebag D., 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Organic Geochemistry*, 34 (3): 327-343. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00239-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00239-5)
- Espitalié J., Deroo G., Marquis F., 1985. Rock-Eval pyrolysis and its applications. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 40 (5): 563-579.
- Giresse P., Makaya M'Voubou, Maley J., Ngomanda A., 2009. Late-Holocene equatorial environments inferred from deposition process, carbon isotopes of organic matter, and pollen in tree shallow lakes of Gabon, west-central Africa. *Journal of Paleolimnology*, 41: 369-392. <https://doi.org/10.1007/s10933-008-9231-5>
- Kossoni A., 2003. Processus sédimentaires du lac Ossa (Dizangué, sud-ouest Cameroun) et évolution paléoclimatique holocène depuis 9 000 ans BP. Thèse de doctorat, Université de Perpignan, France, 221 p. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-11/010031520.pdf
- Kossoni A., Giresse P., 2010. Interaction of Holocene infilling processes between a tropical shallow lake system (Lake Ossa) and a nearby river system (Sanaga River) (South Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 56: 1-14.
- Lafargue E., Marquis F., Pillot D., 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 53 (4): 421-437. <https://doi.org/10.2516/ogst:1998036>
- Lebamba J., Vincens A., Lézine A. M., Marchant R., Buchet G., 2016. Forest-savannah dynamics on the Adamawa plateau (Central Cameroon) during the African humid period termination: A new high-resolution pollen record from Lake Tizong. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 235: 129-139. [https://pure.york.ac.uk/portal/en/publications/forest-savannah-dynamics-on-the-adamawa-plateau-central-cameroon-during-the-african-humid-period-termination\(a0b7bee8-164e-4680-a906-75e6d283b901\).html](https://pure.york.ac.uk/portal/en/publications/forest-savannah-dynamics-on-the-adamawa-plateau-central-cameroon-during-the-african-humid-period-termination(a0b7bee8-164e-4680-a906-75e6d283b901).html)
- Lebamba J., Vincens A., Maley J., 2012. Pollen, vegetation change and climate at Lake Barombi-Mbo (Cameroon) during the last ca. 33,000 cal yr BP: a numerical approach. *Climate of the Past*, 8: 59-78. <https://doi.org/10.5194/cp-8-59-2012>
- Makaya M'Voubou, 2005. Les paléoenvironnements sédimentaires fini-holocènes de trois lacs du Gabon (Kamalété, Nguène et Maridor). Études sédimentologiques et biochimiques. Thèse de doctorat, Université de Perpignan, France, 261 p. <http://www.theses.fr/2003PERP0578>
- Maley J., 1987. Fragmentation de la forêt dense humide africaine et extension des biotopes montagnards au Quaternaire récent : nouvelles données polliniques et chronologiques, implications paléoclimatiques et biogéographiques. *In* : Coetzee J. A., Van Zinderen Bakker E. M. (éds). *Palaeoecology of Africa and the surrounding islands*. Rotterdam, Pays-Bas, A.A. Balkema, 307-334. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_30-30/32049.pdf
- Maley J., 1992. Mise en évidence d'une péjoration climatique entre ca. 2 500 et 2 000 ans BP en Afrique tropicale humide. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 163 : 363-365. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_49-50/010013457.pdf
- Maley J., 2001. La destruction catastrophique des forêts d'Afrique centrale survenue il y a environ 2 500 ans exerce encore une influence majeure sur la répartition actuelle des formations végétales. *In*: Robbrecht E., Degreef J., Friis I. (éds). *Plant systematics and phytogeography for the understanding of African biodiversity*. Proceedings of the XVth AET-FAT Congress: Introduction. *Systematics and Geography of Plants*, 71: 777-796. <https://doi.org/10.2307/3668717>
- Maley J., Brenac P., 1998. Vegetation dynamics, Palaeoenvironments and Climatic changes in the forests of West Cameroon during the last 28,000 years BP. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 99: 157-187. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(97\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(97)00047-X)
- Neumann K., Bostoen K., Höhn A., Kahlheber S., Ngomanda A., 2012. First farmers in the central African rainforest: A view from southern Cameroon. *Quaternary International*, 249: 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.03.024>

- Nguetsop V. F., Bentaleb I., Favier C., Martin C., Bietrix S., Giresse P., *et al.*, 2011. Past environmental and climatic changes during the last 7200 cal yr BP in Adamawa plateau (Northern-Cameroun) based on fossil diatoms and sedimentary carbon isotopic records from Lake Mbalang. *Climate of the Past*, 7: 1371-1393. <https://doi.org/10.5194/cp-7-1371-2011>
- Ngomanda A., Chepstow-Lusty A., Makaya M'Voubou, Schevin P., Maley J., Fontugne M., *et al.*, 2005. Vegetation changes during the past 1,300 years in western equatorial Africa: A high resolution pollen record from Lake Kamalete, Lope Reserve, Central Gabon. *The Holocene*, 15 (7): 1021-1031. <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1191/0959683605hl875ra>
- Ngomanda A., Jolly D., Bentaleb I., Chepstow-Lusty A., Makaya M'Voubou, Maley J., *et al.*, 2007. Lowland rainforest response to hydrological changes during the last 1,500 years in Gabon, Western Equatorial Africa. *Quaternary Research*, 67: 411-425. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.01.006>
- Ngomanda A., Neumann K., Scheizer A., Maley J., 2008. Seasonality change and the third millennium BP rainforest crisis in southern Cameroon (Central Africa). *Quaternary Research*, 71: 307-318. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.12.002>
- Oslisly R., 2001. The history of human settlement in the middle Ogooué valley (Gabon): implications for the Environment. *In*: Weber W., White L. J. T., Vedder A., Naughton-Treves L. (eds). *African Rain Forest Ecology and Conservation*. New Haven and London, Yale University Press, 101-118.
- Oslisly R., 2012. Archéologie dans le Parc National de la Lopé, site mixte nature culture du patrimoine mondial. ANPN/IRD, 45 p. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010052640>
- Oslisly R., Dechamps R., 1994. Découverte d'une zone d'incendie dans la forêt ombrophile du Gabon ca 1 500 BP : essai d'explication anthropique et implications paléoclimatiques. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, 318 (2) : 555-560. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=4032511>
- Oslisly R., Peyrot B., 1992a. Un gisement du paléolithique inférieur : la haute terrasse d'Elarmékora (Moyenne vallée de l'Ogooué), Gabon : problèmes chronologiques et paléogéographiques. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, 314 (2) : 309-312.
- Oslisly R., Peyrot B., 1992b. L'arrivée des premiers métallurgistes sur l'Ogooué (Gabon). *The African Archaeological Review*, 10 : 129-138. <https://doi.org/10.1007/BF01117698>
- Oslisly R., White L., 2000. La relation Homme/milieu dans la réserve de la Lopé (Gabon) au cours de l'Holocène. Les implications sur l'environnement. *In* : Servant M., Servant-Vildary S. (éds). *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*. Paris, France, Unesco, 241-250. http://publishing.unesco.org/details.aspx?Code_Livre=3277
- Oslisly R., White L., 2007. Human impact and environmental exploitation in Gabon and Cameroon during the Holocene. *In*: Denham T. P., Iriarte J., Vrydaghs L. (eds). *Rethinking Agriculture, Archaeological and Ethnoarchaeological Perspectives*. Walnut Creek, CA, USA, Left Coast Press, 345-358.
- Oslisly R., White L., Bentaleb I., Favier C., Fontugne M., Gillet J. F., Sebag D., 2013. Climatic and cultural changes in the west Congo Basin forests over the past 5000 years. *Philosophical Transactions of The Royal Society B* 368: 20120304. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2012.0304>
- Peyrot B., Oslisly R., Abdessadok S., Fontugne M., Hatté C., White L., 2003. Les paléoenvironnements de la fin du Pléistocène et de l'Holocène dans la réserve de la Lopé (Gabon) : approche par les indicateurs géomorphologiques, sédimentologiques, phytologiques, géochimiques et anthropogènes des milieux enregistreurs de la dépression de la Lopé. *L'Anthropologie*, 107: 291-307.
- Saint-Vil J., 1977. Les climats du Gabon. *Annales de l'Université Nationale du Gabon* 1, 101-125.
- Sebag D., Debret M., Makaya M'Voubou, Mabicka Obame R., Ngomanda A., Oslisly R., *et al.*, 2013. Coupled Rock-Eval pyrolysis and Spectrophotometry for lacustrine sedimentary dynamics: Application for West Central Africa rainforests (Kamalété and Nguène lakes, Gabon). *The Holocene*, 23 (8): 1173-1183. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00861195/>
- Sebag D., Disnar J. R., Guillet B., Di Giovanni C., Verrecchia E. P., Durand A., 2007. Monitoring organic matter dynamics in soil profiles by Rock-Eval pyrolysis: bulk characterization and quantification of degradation. *European Journal of Soil Science*, 57 (3): 344-355. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00745.x>
- Sebag D., Verrecchia E. P., Cécillon L., Adatte T., Albrecht R., Aubert M., *et al.*, 2016. Dynamics of soil organic matter based on new Rock-Eval indices. *Geoderma*, 284: 185-203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.025>
- Vincens A., Buchet G., Servant M., 2010. Vegetation response to the African Humid Period termination in central Cameroon (7 degrees N) - new pollen insight from Lake Mbalang. *Climate of the Past*, 6: 281-294. <https://doi.org/10.5194/cp-6-281-2010>
- Vincens A., Elenga H., Reynaud-Farrera I., Schwartz D., Alexandre A., Bertaux J., *et al.*, 2000. Réponse des forêts aux changements du climat en Afrique Atlantique Équatoriale durant les derniers 4 000 ans et héritage sur les paysages végétaux actuels. *In* : Servant M., Servant-Vildary S. (éds). *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*. Paris, France, Unesco, 381-387. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers12-10/010023933.pdf
- Weldeab S., Ralph R., Schneider, Müller P., 2007. Comparison of Mg/Ca- and alkenone-based sea surface temperature estimates in the fresh water-influenced Gulf of Guinea, eastern equatorial Atlantic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8 (5): 1-10. <https://doi.org/10.1029/2006GC001360>
- Zaccone C., Sanei H., Outridge P. M., Miano T. M., 2011. Studying the humification degree and evolution of peat down a Holocene bog profile (Inuvik, NW Canada): a petrological and chemical perspective. *Organic Geochemistry*, 42: 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.02.004>