

Feux naturels de tourbes à diatomites en Afrique de l'Ouest :

Épilogue de la controverse sur l'origine spontanée ou ignée de la combustion

J.-C. Leprun^(1,*) et M. Brossard⁽²⁾

- 1) Pédologue, Directeur de recherche ORSTOM-IRD retraité, 434 Rue du Pioch, 34570 Montarnaud, France
- 2) IRD, UMR Eco&Sols, Campus SupAgro, Bât. 12, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France

* Auteur correspondant : jean-claude.leprun@wanadoo.fr

RÉSUMÉ

De tout temps, des feux naturels dans les sols sont rapportés par les habitants d'Afrique de l'Ouest. Afin de conclure sur leur origine, cet article reprend les observations d'un site mauritanien et d'un site sénégalais, en les décrivant et en les analysant. Cette étude s'appuie sur des données géologiques et pédologiques résultant d'analyses pétrographiques, physico-chimiques, diffractométriques, géochronologiques et palynologiques auxquelles s'ajoutent des données de même nature sur le site malien du Lac Faguibine. Les mécanismes de cuisson des tourbes, de l'évolution des diatomites qui les recouvrent et des néogenèses minérales qui y sont observées sont passés en revue et interprétés. Le but de ce travail est d'alimenter le débat scientifique sur une controverse qui dure depuis plus d'un siècle, à savoir si les feux de tourbes ont comme origine un phénomène de type volcanique ou une auto-combustion, ce que les auteurs s'emploient à démontrer.

Mots-clés

Auto-combustion, diatomite cuite, tourbe, polygone de surface, sol tropical, Mauritanie, Mali, Sénégal

Comment citer cet article :

J.-C. Leprun et M. Brossard, 2024 - Feux naturels de tourbes à diatomites en Afrique de l'Ouest : épilogue de la controverse sur l'origine spontanée ou ignée de la combustion *Étude et Gestion des Sols*, 31, 05-29

SUMMARY**NATURAL DIATOMITE PEAT FIRES IN WEST AFRICA:*****Epilogue of the controversy of their spontaneous or igneous combustion origin***

From all times natural fires in soils are reported by the inhabitants of West Africa. To conclude on their origin, this paper presents the observations of a Mauritanian site and a site near Dakar, Senegal, describing and analysing them finely. New geological, petrographic, pedological data and physico-chemical analysis, diffractometric, geochronological and palynological data support these observations, as well as data from the Faguibine Lake site, in Mali. The combustion mechanisms of the peats, the evolution of the diatomites during combustion and the mineral neogenesis observed are reviewed and interpreted. The purpose of this work is to supply the scientific debate on a controversy that has lasted for more than a century and that is or will probably be closed today, namely whether the peat fires have as origin a volcanic phenomenon or an auto-combustion, which the authors endeavours to demonstrate.

Key-words

Auto-combustion, fired diatomite, peat, surface polygon, tropical soil, Mauritania, Mali, Senegal

RESUMEN**FUEGOS NATURALES DE TURBAS DE DIATOMITAS EN ÁFRICA DEL OESTE:*****Epílogo de la controversia sobre el origen espontáneo o ígneo de la combustión***

Desde hace mucho tiempo fuegos naturales en los suelos son informados por los habitantes del África del Oeste. Con el fin de concluir sobre sus orígenes, este artículo se apoya en las observaciones de un sitio mauritano y de un sitio en Dakar, describiéndolos y analizándolos. Los datos geológicos, petrográficos, edafológicos, y resultados de análisis físico-químicos, difractométricos, geocronológicos y palinológicos argumentan las observaciones, a los cuales se agregan datos del sitio del Lago Faguibine en Malí. El mecanismo de combustión de las turbas, de la evolución de las diatomitas que las envuelven y las neogénesis minerales que son observadas son descritas y interpretadas. El objetivo de este trabajo es de contribuir al debate científico sobre una controversia que dura desde más de un siglo y que es o será sin duda hoy encerrada, es decir, si los fuegos de turbas tienen como origen un fenómeno de tipo volcánico o una auto-combustión, cosa que los autores se emplean de demostrar.

Palabras clave

Auto-combustión, diatomita quemada, turba, polígono de superficie, suelo tropical, Mauritania, Malí, Senegal.

1. INTRODUCTION

Au cours de l'histoire géologique du Sahara, des lacs ont occupé des surfaces importantes à de multiples reprises (Faure, 1966). Depuis la fin du Pliocène, ces lacs ont révélé des niveaux de diatomites décrits par de nombreux géologues sur près de cinq millions de kilomètres de la Mauritanie (Faure *et al.*, 1963; Trompette *et al.*, 1967) jusqu'au Soudan en passant par le Mali, le Hoggar, le Niger et le Tchad (Servant, 1967). La persistance de ces lacs d'eau douce impliquait une pluviométrie plus élevée, une évaporation réduite et un niveau des nappes phréatiques élevée. La fréquence dans les dépôts de diatomites épaisses indique que les transports et les apports d'éléments détritiques étaient provisoirement réduits. La silice très abondante accompagnée de matières organiques nutritives permettait une prolifération exceptionnelle de diatomées. La sédimentation était donc presque exclusivement biochimique et siliceuse. L'environnement de sables éoliens épais favorisait cette silice d'origine probablement pédologique. La tectonique des zones d'études des sites est considérée peu ou pas active mais Sauvage et Sauvage (1992) et El Abass *et al.* (1993) notent l'existence suspectés de mouvements très récents dans la zone. Un séisme a été détecté à Tombouctou en 1905. A part la dernière venue volcanique des Mamelles à Dakar, il y a 700 000 et 800 000 ans, il n'y a pas eu d'autre activité volcanique en Afrique de l'Ouest (Crevola *et al.*, 1994).

Cela fait plusieurs centaines d'années que dans certaines régions sèches et arides de l'Afrique de l'Ouest les populations alertent les autorités locales sur la présence de fumées toxiques, de sources de chaleurs intenses et d'enfoncements de terrains étranges sur leurs territoires. Les « sols brûlent », comme le relatent les rapports de gouverneurs du début de la colonisation (Loppinot, 1920 et Mourgues, 1932 dans Monod et Palausi, 1961, p.266-267). Monod (1958) décrit des formations de diatomées cuites et durcies (dépôts GB1 et GB2 de la Majâbat-al Koubrâ) en Mauritanie. Il avance l'hypothèse de feux de « forêts ». En collaboration avec un géologue (Monod et Palausi, 1958; 1961) Monod attribue ces phénomènes observés sur le pourtour du Lac Faguibine (Mali) à des manifestations éruptives. Giorgio Marinelli, pétrographe volcanologue (Université de Pise en Italie) est sollicité, son observation de lames minces des dites « scories » (terme de Monod) lui permet de rejeter catégoriquement l'hypothèse d'activité volcanique (Marinelli, 1966a, b; 1979). Leprun et Trompette (1970), puis Hugot (1977) attribuent de leur côté la présence des diatomites cuites observées en Mauritanie à l'action de feux de tourbe, aujourd'hui éteints. Leprun (1986) décrit et analyse près de Dakar des feux de tourbes en cours de combustion et les sols qui en sont affectés. Mais il faut attendre Sauvage et Sauvage (1992) pour revenir à l'hypothèse des intrusions magmatiques au Lac Faguibine. Sur le même site, ces mêmes auteurs et leurs collègues (El Abbas *et al.*, 1993) affirment que les venues sont éruptives. Ce n'est qu'en 2003 que le débat rebondit avec une

équipe de chercheurs européens et maliens (Svensen *et al.*, 2003) qui réfute cette interprétation. Leurs observations autour du Lac Faguibine corroborent, en les citant, celles de Leprun (1986). L'objectif de cette contribution est de diffuser et valoriser des connaissances qui permettaient, dès les années 1970-1980, une réponse définitive à l'origine des diatomites brûlées d'Afrique de l'Ouest et des néogènes minérales associées, aidé en cela par l'article de Svensen *et al.* (2003). Les diatomites brûlées et cuites d'Afrique de l'Ouest et les néogènes minérales qui en découlent sont-elles issues d'une diagenèse ou d'un processus magmatique ? Le sujet est pertinent, car les feux de tourbes sont de nouveau d'une actualité mondiale, que l'on peut qualifier de « brûlante ».

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel

Les trois sites d'études sont (Figure 1) :

- 1) L'Aouker mauritanien autour de Tichitt (Leprun et Trompette, 1970) ;
- 2) La presqu'île du Cap-Vert, Dakar, Sénégal (Leprun, 1986) ;
- 3) Le lac Faguibine, Mali (Leprun, 1979, données personnelles).

2.1.1. Site I : l'Aouker mauritanien autour de Tichitt, Mauritanie

La coupe (Tableau 1) est située sur le versant occidental d'une butte témoin de sables dunaires éoliens holocènes de l'Aouker d'une hauteur de 7,60 m reposant sur des shales à intercalations gréseuses et des dolomies d'âge supposé Ordovicien (Leprun et Trompette, 1970). La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 50 et 100 mm. Les sols minéraux bruts sur sables ne portent pas de végétation hormis quelques rares touffes de graminées.

De nombreux affleurements de diatomites versicolores polygonales ont été examinés le long de la piste Tichitt-Arkane vers 18°20' 30" N, 9° 10' 00" W (Figure 2). Plusieurs de ces observations montrent des filons ou dykes de dolérite présentant sur leurs épontes des diatomites brûlées et cuites. Pour les géologues de l'équipe, il semblait évident que ce soient ces venues éruptives intrusives, injectées sous forme de dykes dans des fissures des roches encaissantes qui avaient cuit les diatomites. Les principes de la stratigraphie imposaient que ces filons soient plus récents que les roches traversées, ici les tourbes à diatomées. D'où l'hypothèse de venues éruptives récentes et la possibilité d'une utilisation géothermique retenue par plusieurs géologues travaillant dans ces régions. Une coupe a été décrite (Tableau 1).

Figure 1 : Emplacement des trois sites étudiés en Mauritanie, au Mali et au Sénégal.

Figure 1: Localisation of the studied sites in Mauritania, in Mali and in Senegal.



Tableau 1 : Description de la coupe du site 1, erg Aouker mauritanien autour de Tichitt.

Table 1: Site 1 section description, Mauritanian 'Aouker' erg near Tichitt.

Niveau	Épaisseur (cm)	Description
9	5 à 10	Argiles à diatomées durcies, comme cuites, à débit vertical hexagonal ou polygonal (10-15 cm), zonées de l'extérieur vers l'intérieur rouge brique (2,5YR4/8), blanc, noir, parfois bulleux
8	5 à 10	Cendres. Débris végétaux brûlés
7	10	Racines silicifiées et calcarifiées à structure ligneuse apparente, rayonnant autour d'un tronc
6	40	Argiles à diatomées feuilletées, friables, grises clair (7,5YR6/0), Traces de passage de racines
5	3 à 5	En discontinuité par rapport aux niveaux jacents, diatomites argilo-calcaireuses blanches à fentes de retrait
4	25	Diatomites sablo-calcaireuses blanches gris-blanc (10YR6/1,5) friables, farineuses, non feuilletées, à coquilles de Melania et Biomphalaria assez nombreuses
3	15	Sables fins (0,1-0,2 mm), vert olive (2,5YR6/4) à fins granules calcaires. Quelques grains de sables grossiers (0,2-0,5 mm) ronds mats. Quelques diatomées et débris végétaux verticaux très fins
2	20	Sables grossiers ronds mats et luisants mélangés, ocres (10YR6/7) hétérométriques. Agrégats de sables soudés par de l'argile et du fer. A la base manchons racinaires cylindriques ferrugineux et concrétions (poupées) ferrugineuses rouges (2,5YR5/8)
1	100 et plus	Sables blancs hétérométriques (fins anguleux luisants et ronds mats)

2.1.2.: Le site des Niayes, presqu'île du Cap-Vert, Dakar (Site 2)

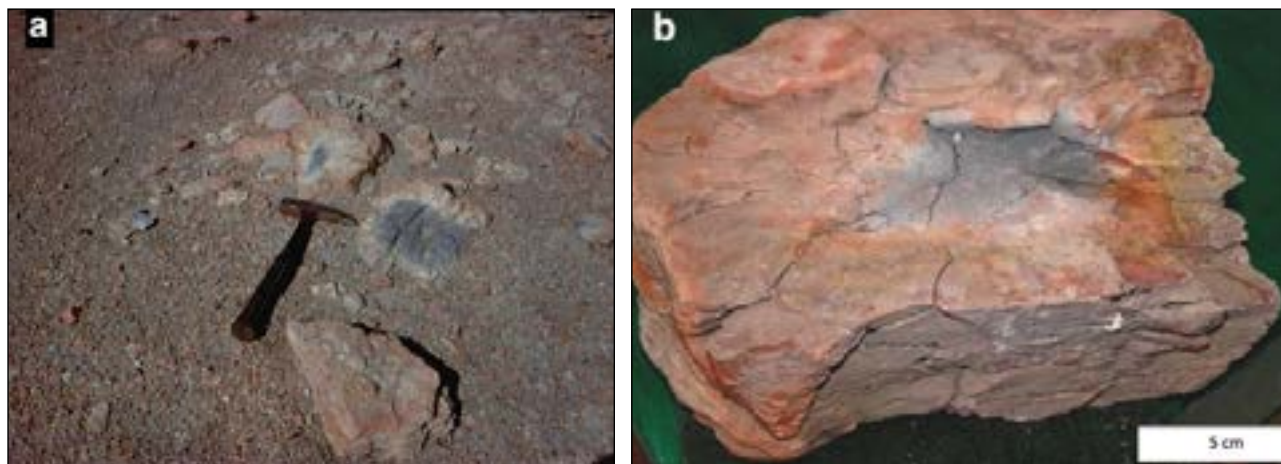
Cadre et situation

Un gisement de tourbes à diatomées qui se consumaient, produisant fumées toxiques et effondrements du sol, a été étudié à la demande des services des Eaux et Forêts sénégalais.

Le gisement se situe vers 14°45'33" N, 17°20'05" W dans le périmètre de reboisement de Mbao (Figure 1). Sur la carte géologique au 1:20 000^e (Elouard *et al.*, 1976), ce gisement se localise dans la formation N1b des sables interdunaires, sols noirs des Niayes, dépôts lacustres Unios. Il est considéré âgé de 12 000 B.P. (Lézine et Chateaufneuf, 1991), intercalé entre les sables dunaires de la régression Ogolienne datée de 20 000 ans B.P. et les dépôts littoraux de la transgression

Figure 2 : Polyèdres diatomitiques versicolores affleurant au sommet de la coupe du site 1 (2a) et dégagés par le vent (2b). (Clichés Leprun).

Figure 2: Diatomite versicolor polyhedrons up to the section in the site 1 (2a) and clean by wind (2b). (Slide Leprun).



Nouakchotienne datée 5 000 B.P. La mer était alors à -20 m par rapport à son niveau actuel. Le terme « niaye » désigne en wolof une dépression inondée très végétalisée, limitée par des cordons dunaires paralittoraux. Le niveau de la nappe d'eau y est fluctuant suivant la saison de l'année, mais aussi durant les périodes climatiques plus longues de sécheresse. Affleurante durant la saison des pluies, la nappe peut baisser et les Niayes peuvent alors s'assécher entièrement. Les Niayes sont occupées par une végétation naturelle luxuriante de type guinéen et sont mises de plus en plus en culture.

Une vingtaine de fosses a été creusée et étudiée sur le pourtour d'une cuvette d'une cinquantaine de mètres de diamètre. En surface, la topographie est constituée de creux et de bosses. Alors qu'elles étaient en train de brûler, les fosses ont été creusées de manière à présenter une face brûlée et une face intacte, ce qui a permis de juger des transformations dues à la combustion. Seules deux fosses, DAK 42 et DAK 56, seront ici commentées.

Étude de la fosse DAK 42

La face intacte 42a (Figure 3a) et la face brûlée 42b (Figure 3b) sont présentées dans le tableau 2 en page 10.

2.1.3. Le site du lac Faguibine, Mali (Site 3)

Cadre et situation

Le lac Faguibine est situé dans la zone semi-aride Zone sahélienne du nord du Mali (Figure 1). Le niveau d'eau du lac Faguibine change périodiquement, avec des cycles d'inondation et l'évaporation. Situés cinq mètres sous le niveau du fleuve Niger et alimentés en eau par un défluent de celui-ci, le Lac Faguibine (16°46' N - 03°55'W) et les deux dépressions des

Daounas occupent des superficies qui fluctuent au cours du temps, des saisons et des périodes de sécheresses. Lors de nos prospections, le dernier remplissage connu du lac datait de 1977 (Sauvage et Sauvage, 1992) et sa mise à sec de 1985. Durant la sécheresse sévère de la décade de 70, les mises en eau ont été quasi nulles. La pluviométrie moyenne annuelle varie autour de 200 mm. La topographie est celle de vastes plaines. Aucun affleurement des grès primaires sous-jacents formant le substratum de la région qui recouvrent les alluvions n'est visible. La végétation n'est constituée que d'étendues herbeuses éparées.

Une dizaine de fosses ont été creusées et observées en bordure du lac dans sa partie asséchée. Deux d'entre elles, FAG 1 et FAG 3, situées vers 16°30' 57" N, 4°00'52" W sont ici rapportées. En surface, le sol est poussiéreux, gris, sans aucune végétation, avec un micro-modèle ondulé alternant avec des faces planes et des fissures fines de grands polyèdres plats (Figure 4a). Localement, quelques boursoufflures gris rose affleurent.

La fosse FAG 1

Les faces de la fosse présentent des aspects différents (Figure 4b). La face la plus représentative montre, de 0 à 60 cm, des amas de diatomites cuites roses dont certains renversés, de forme polyédrique à centre gris noir, enfouis dans de la terre humifère limoneuse organique noire non tourbeuse, dans laquelle subsistent des racines plus ou moins décomposées. Une autre face est constituée de demi-cercles concentriques de limons fins argileux gris d'un mètre de diamètre comprenant, de l'intérieur vers l'extérieur, des arcs de diatomites lamellaires cuites de 15 à 20 cm d'épaisseur en masses prismatiques compactes et massives disloquées, successivement roses,

Tableau 2 : Description des deux faces du sol de la fosse DAK 42, site de Dakar.**Table 2:** Soil description DAK 42, (Dakar site) intact face 42a and burned face 42b.

Face intacte DAK 42a	Face brûlée DAK 42b
1/ 0-16 cm : limono-sableux, organique, feutré lamellaire, gris cendreux (10YR4,5/2) présentant un chevelu d'efflorescences locales de sels cristallisés verts et blancs. Cohésion faible, enracinement assez bien développé. Limite ondu-lée et transition sur 5 cm.	La surface du sol s'est enfoncée d'une trentaine de cm par rapport à la face in-tacte du profil située en face.
2/ 16-60 cm : presque uniquement orga-nique, très humifère, où on ne distingue plus que les pourtours des moules végé-taux. Même couleur avec efflorescences blanc-gris et revêtements des faces struc-turales olive-pistache (jarosite ?). Structure prismatique large à débit oblique avec fentes de 5 cm de large. Présence de quelques racines, mais pas de niveaux de diatomées visibles. Transition faible avec :	1/ 0-14 cm : polyèdres durcis mais légers et poreux, de 10 à 15 cm, polychromes (auréoles successivement noir, blanc, rose vers le centre). Dessous, sur quelques cen-timètres, dépôts lamellaires roses (5YR7/6), à empreintes de feuilles et tiges. Structure massive à polyédrique ; déga-gement de vapeurs toxiques qui cristalli-sent des efflorescences aciculaires blanches et des amas bruns ;
3/ 60-94 cm : plus sableux fin blanc, même structure mais sous-structure po-lyédrique fine. Cohésion faible. On note toujours la présence des revêtements de jarosite olive-pistache (5Y7/4) sur les faces structurales, mais beaucoup moins d'éléments végétaux reconnaissables. Ceux-ci sont noirs (10YR2/1,5) et humifiés. Limite tranchée brutale avec :	2/ 14-45 cm : tourbe brûlée rouge et vio-let rouge (2,5YR4/8) à empreintes de vé-gétaux, structure prismatique à faces re-couverts de revêtements irisés, cendreux à cohésion faible ;
4/ 94-120 cm : sableux fin à efflorescences salines (gypse ?), gris cendreux (10YR5/2), traces racinaires verticales entourées de manchons jaunes soufrés. Structure mas-sive, cohésion forte.	3/ 45-70 cm : tourbe sableuse brûlée po-lychrome grise, noire, rose (teinte moyenne 5YR7/4), sans cohésion, boulant ; discontinuité avec :
5/ 120-170 cm : sablo-argileux, très coloré brun verdâtre, bariolé de jaune à ocre vif (10YR5,5/ et 2,5Y4,5/4). Mêmes structure et cohésion, pas de racines. Limite pro-gressive avec :	70-100 cm : niveau sableux gris, dur
6/ > 170 cm : sableux fin, vert de gris, petites taches jaune vert (2,5Y5/3), glau-conie ?), humide, pas de racines. Même structure, mais nette tendance massive.	

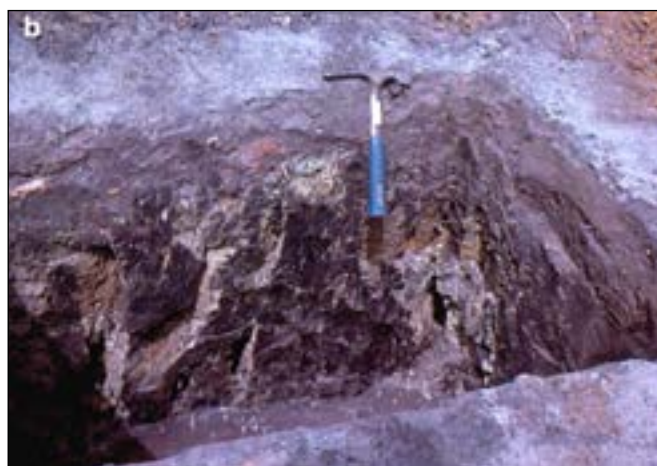
Figure 3 : Profils du sol de la fosse DAK 42 (site de Dakar). a) Face intacte, non brûlée, 42a. Les revêtements blancs proviennent des cendres emportées par le vent ; b) face brûlée 42b (cf. Tableau 2) (cliché Leprun).**Figure 3:** Soil Pit DAK 42 (Dakar site), a) intact, unburned face 42a; b) burned face 42b (cf. Table 2). (slide Leprun).

Figure 4 : a) Organisation polygonale de la surface des sols, fosses FAG 1 et 3 ; b) Fosse FAG 1, face brûlée. La tourbe a disparu, effondrement des polyèdres de diatomites cuites roses ; c) Fosse FAG 3, cercles de diatomites gris, noirs et roses. (Clichés Leprun).

Figure 4: a) Soil surface organised in a polygonal structure, FAG 1 and FAG 3 soil pits; b) FAG 1 pit, burned face, the peat disappeared, the burned, rose, diatomite polyhedral structure collapsed; c) FAG 3 pit, diatomite circles grey, black and rose. (Slides Leprun).



blanc cendreux et noires avec empreintes et restes de racines. Ces demi-cercles sont traversés par des passées scoriacées bulleuses vernissées marron, à aspect de lave cireuse, très dures, verticales ou obliques, souvent cassées et renversées. À la base apparaît un niveau de diatomites roses comme soufflées, non lapidifiées, grumeleux fin, fragile, avec plages de jarosite jaune safran et coquilles de gastéropodes. Le contact est brutal, sans transition avec un niveau parfaitement horizontal (60-80 cm), d'une plaque vitrifiée vernissée noire, cassée, très dure, servant de matériau de construction local ; passage sans transition avec des sables fins et diatomites mélangés, sans cohésion, plages de jarosite (80-140 cm).

La fosse FAG 3

Elle est située sur un petit monticule constitué entièrement de diatomites effondrées sans les emballages terreux (Figure 4c). L'une des faces présente des demi-cercles de diatomites concentriques gris, noirs et roses prélevés à 1 m et analysés (FAG 3 niveaux 1, 2, 3). La base, située sous le niveau de diatomites noir durci de 7 à 12 cm d'épaisseur se poursuit jusqu'à 120-140 cm, elle est prélevée à 120 cm. Elle est constituée de débris de diatomées roses en tous sens, avec remplissage de sables fins gris blanc ou verdâtres. De nombreux fourreaux racinaires durcis par du fer et du gypse sont observés.

La fosse FAG 56

On peut résumer le profil de la face intacte de la manière suivante : présence sur les 80 cm d'épaisseur superficiels d'une tourbe à constituants soufrés et salins pratiquement continue, qui devient de plus en plus organique et humifiée en profondeur et qui repose en discontinuité brutale sur un niveau sableux minéral de plus d'un mètre d'épaisseur.

La face brûlée accuse un abaissement des horizons de surface de 30 cm environ par rapport au niveau de la face intacte. On observe de haut en bas les horizons suivants :

0-15 cm : diatomite sableuse légère, poreuse, versicolore qui se débite en plaquettes horizontales empilées, à débit polyédrique régulier le plus souvent hexagonal de 10 cm, polychrome concentriquement, noir à la périphérie, puis blanc et enfin rose-rouge vif au centre (5YR7/6) à aspect de brique cuite, très fragile.

15-55 cm : tourbe brûlée à revêtements résineux irisés sur les faces, à matrice cendreuse emballant les polyèdres polychromes précédents. Limite plane tranchée avec le niveau suivant.

55-95 cm : niveau sableux gris, compact, à très rares tâches versicolores.

2.2. Méthodes

Sur chaque site ont été étudiées des coupes de sols de deux mètres de profondeur ainsi que les formations géologiques quaternaires de surface. Les coupes ont fait l'objet de descriptions morpho-pédologiques (Maignien, 1980), les couleurs ont été déterminées par le nuancier Munsell. Les prélèvements ont fait l'objet des analyses physico-chimiques suivantes (laboratoire du centre ORSTOM, Dakar; Paycheng, 1980) : granulométrie ; pH ; cations échangeables (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+) ; capacité d'échange cationique (T) ; extraits triacides ($\text{HCl-HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$) puis dosage du fer et de l'aluminium par colorimétrie ; formes du soufre (Paycheng *et al.*, 1976). La matière humique est extraite du sol par dissolution dans le pyrophosphate de sodium. On sépare les acides humiques des acides fulviques solubles en milieu acide. Le dosage du carbone organique se fait par la méthode à la diphenylamine (Méthode Anne) et celui de l'azote par la méthode Kjeldahl. Les extraits triacides et de fusion alcaline ont été réalisés après destruction de la matière organique, l'aluminium, le fer, les nitrates, les nitrites, le phosphore, la silice, le calcium, le magnésium. Fe et Al ont été mesurés par colorimétrie. Les éléments Si et Ti des extraits ont été déterminés par colorimétrie à l'Auto analyseur TECHNICON et Spectrophotométries par Absorption Atomique et par Émission de Flamme.

L'analyse triacide permet la dissolution complète des hydroxydes, oxydes, argile, olivine (qui est un minéral primaire), une forte dissolution des micas et des amphiboles (minéraux primaires également), une faible dissolution des pyroxènes et feldspaths (minéraux primaires), le quartz n'étant pratiquement pas dissous (Njopwouo et Orliac, 1979). Le rapport moléculaire $K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de la fraction argileuse permet d'évaluer le degré d'altération de l'argile (avec $K_i < 2$, la kaolinite est dégradée) (Pédro, 1986). L'attaque totale par fusion alcaline au tétraborate de Sr dissout et permet de doser l'ensemble des éléments, qu'ils soient issus de la néoformation ou de matériaux sains. La diffractométrie des RX est réalisée sur poudres (diffractomètre RIGAKU Geigerflex 2031, Laboratoire de Géologie, Centre ORSTOM, Dakar). Les éléments majeurs dans les solutions d'attaque ont été déterminés par spectrométrie d'émission à lecture directe (SOFICA ARL). Les observations aux microscopes à transmission et à balayage (MEB à balayage CAMECA MEB 07 couplé à un spectromètre à RX et à un analyseur multicanal TRACOR, Centre de Sédimentologie et Géochimie, CNRS, Strasbourg).

3. RÉSULTATS ANALYTIQUES

3.1. Le site des Niayes (Site 2), fosse DAK 42

Caractérisation physico-chimique

Cf. tableau 3, page 13

Analyses géochimiques

Cf. tableau 4 page 14 et tableau 5, page 14

Diffractométrie des RX

Les résultats de diffractométrie des RX ont mis en évidence sur les échantillons de la face intacte du profil DAK 42 la présence de quartz SiO_2 , d'hématite (Fe_2O_3), de jarosite ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 3\text{H}_2\text{O}$), de calcite (CaCO_3), de kaolinite, ainsi qu'un fond amorphe important (Figure 5). La face brûlée présente, outre les principaux pics des minéraux précédents, ceux très accentués à 4,04 et 2,84 nm de la cristobalite SiO_2 .

Inventaire des pollens

Les travaux de Medus (1979) sur les pollens de nos échantillons montrent que les spectres des niveaux 105-160 cm (non présentés) sont caractéristiques des Poacées (20 %) et des Cypéracées (10 %). Dans le niveau plus superficiel, le pourcentage des *Typha* diminue mais il se produit une forte augmentation (+ 20 %) des spores monolètes (fougères, *Lygodium*, *Syzygium guineense*) et l'apparition de grains d'*Alchornea*.

Inventaire des diatomées

Les déterminations des diatomées sur le profil DAK 56 par S. Servant (Leprun, 1986) ont donné les résultats suivants (Figure 6) :

- 0-10 cm : flore abondante, *phytolithaires* très abondantes, le genre *Nitzschia* est dominant ; quelques espèces halophiles (*Nitzschia palea*), et rares (*Cyclotella maneghinian* et *Pinnularia*).
- 40-50 cm : flore très abondante composée d'espèces épiphytes littorales et benthiques (*Gomphonema* et *Cymbella*), absence d'espèces planctoniques, *Phytolithaires* très abondantes. Les espèces suivantes sont les plus fréquentes : *Eunotia* et *Pinnularia*.
- 65-80 cm : diatomées et *phytolithaires* très rares. Les formes *Lithostilidium* (Graminées) sont les plus fréquentes.

Tableau 3 : Caractérisation physico-chimique des deux faces du profil DAK 42 (terre fine < 2 mm).**Table 3:** Soil profile DAK 42: physico-chemical characterization of the unburned and burned faces (on the fine earth, < 2 mm).

Face du Profil	Face intacte DAK 42 a						Face brûlée DAK 42 b		
	1	2	3	4	5	6	1	2	3
Niveau									
Épaisseur cm	0-16	16-60	60-94	94-120	120-170	>170	0-12	12-45	45-70
Granulométrie en %									
Teneur en eau % TS 105°C	6,1	6,9	3,1	0,7	1,6	0,6	3,2	3,4	1,8
0-2 µm	18,3	18,1	11,9	3,4	4,8	3,5	8,5	2,6	3,0
2-20 µm	16,0	24,3	4,6	3,5	4,3	1,3	38,0	27,9	5,3
20-50 µm	2,5	3,9	0,8	1,5	1,7	0,8	4,1	3,8	2,3
50-200 µm	33,1	29,3	43,2	46,5	50,0	64,4	26,0	25,1	54,4
200-2000 µm	27,7	21,1	37,8	44,0	37,6	30,2	21,7	39,0	32,1
Matière organique %									
MO totale	13,2	17,1	20,7	0,4	0,8	0,3	< 0,5		
Carbone	7,68	9,92	12,00	0,24	0,49	0,19	ND		
Azote	0,368	0,472	0,364	0,016	0,025	0,017			
C/N	20,9	21,0	34,0	15,0	19,6	11,2			
Soufre Total %	15,0	14,6	7,0	1,1	2,1	0,8	ND		12,6
Soufre jarosite %	12,52	9,03	4,96	0,30	2,02	0,93	ND 11,25		
pH eau	2,6	2,5	2,3	3,3	3,5	3,3	4,0	3,5	2,7
pH KCl	2,5	2,3	2,2	3,2	3,6	3,2	3,9	3,5	2,7
Cations échangeables cmol.kg⁻¹									
Ca ⁺⁺	13,50	0,50	ε	ε	0,12	ε	8,00	0,25	0,37
Mg ⁺⁺	0,75	1,00	0,25	0,12	0,12	0,12	5,75	6,50	1,00
K ⁺	ε	0,01	ε	ε	0,01	ε	0,38	0,03	0,01
Na ⁺	ε	0,06	0,05	0,06	0,06	ε	0,56	0,06	0,10
S	14,25	1,57	0,30	0,13	0,27	0,12	14,69	6,84	1,48
T	36,41	30,59	15,22	3,41	6,12	4,12	10,56	17,46	12,99
S/T %	39	5	2	5	4	3	ND-	39	11
Conductivité extrait 1/10 ^e µmhos.m ⁻¹	3.400	2.700	1.800	230	400	270	1.250	1.400	2.100
Éléments totaux en %									
Fer total	8,80	10,05	2,45	0,42	2,02	0,50	10,40	15,50	6,05
Fer DEB	7,85	9,15	2,45	0,31	1,62	0,40	7,95	12,00	5,12

ε = inférieur à la limite inférieure de détection

Tableau 5 : Extraction des matières humiques des échantillons du profil DAK 42 face intacte (C % < 2 mm).**Table 5:** Humic material extraction of the soil samples DAK 42 face unburned (C% < 2 mm).

Nos Echant.	Profondeur cm	C-MHT	C-Acides Humiques	C-Acides Fulviques	AF/AH	C Total échantillon	Taux humification %
DAK 42	0-16	22,22	8,65	13,57	1,57	76,8	29
	16-60	24,91	8,69	16,26	1,87	99,2	25
	60-94	34,49	8,74	25,75	2,95	120,0	29
	94-120	1,23	0,77	0,4	0,60	2,4	51
	120-170	2,44	1,24	1,2	0,97	4,9	50
	> 170	0,69	0,48	0,21	0,44	1,9	36

MHT : matières humiques totales

Tableau 4 : Analyses des extraits triacides, valeurs de Ki et résultats de fusion alcaline des deux faces du profil DAK 42 (% < 2 mm).**Table 4:** Analytical results of the tri-acid extracts, Ki values and the alkaline fusion, Soil profile DAK 42 unburned and burned faces (% < 2 mm).

Extrait triacide													
Face intacte													
Niveau	H ₂ O	SiO ₂	Res*	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Ki
1	21,2	11,8	48,7	8,5	5,1	0,24	0,01	0,43	0,18	0,07	0,12	96,4	3,9
2	23,1	12,8	43,0	11,8	5,4	0,29	0,01	0,04	0,20	0,11	0,14	96,9	4,0
3	18,6	4,9	72,6	2,5	1,3	0,14	ε	0,05	0,04	0,04	0,03	100,2	6,4
4	1,3	4,0	93,8	0,5	1,1	0,17	ε	ε	0,03	0,02	0,04	101,0	6,4
5	3,0	3,9	89,1	1,9	2,2	0,14	ε	ε	0,06	0,01	0,05	100,4	3,0
6	1,2	3,5	93,9	0,7	1,3	0,13	ε	0,02	0,04	0,01	0,05	100,9	4,8
Face brûlée													
1	5,6	18,3	53,2	10,3	8,9	0,36	0,01	0,22	0,28	0,14	0,19	97,5	3,5
2	7,3	19,2	46,8	15,0	6,8	0,36	0,01	0,02	0,25	0,15	0,19	96,1	4,8
3	6,1	5,4	81,1	5,5	1,6	0,18	ε	0,02	0,06	0,05	0,06	100,1	5,6
Analyses totales fusion alcaline													
Face intacte niveau 2,													
2	2,58	76,6	-	16,0	4,9	0,29	0,010	ε	0,21	0,26	0,32	101,1	
Face brûlée niveau 2													
2	1,26	77,9	-	11,5	7,60	0,50	0,017	0,017	0,33	0,24	0,54	100,2	

*Res : résidu de l'attaque triacide ; ε = inférieur à la limite inférieure de détection

3.2. Le site du Lac Faguibine (Site 3), les profils des fosses FAG 1 et 3

Analyses physico-chimiques

Cf. tableau 6, page 17

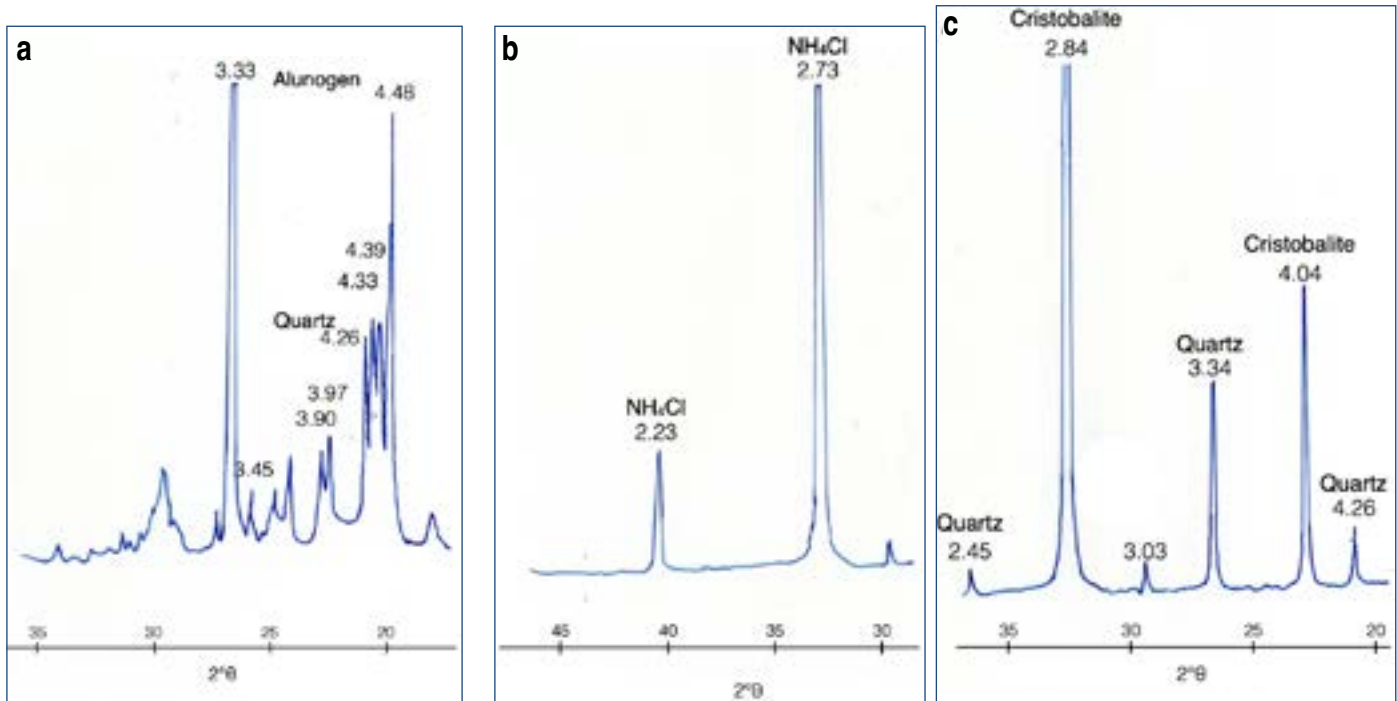
Analyses triacides et fusion alcaline

Sur l'ensemble des deux fosses, les pH sont basiques, les complexes absorbants dominés par l'ion Ca²⁺ sont bien pourvus en Mg²⁺, K⁺ et Na⁺ et saturés, les teneurs en soufre sont faibles, excepté au sommet de FAG 1 (Tableau 7).

La composition chimique des trois échantillons analysés prélevés dans les deux fosses différentes est très proche. Elle est constituée principalement de silice, d'alumine et de fer et d'un résidu non attaqué par les trois acides. L'ensemble des autres éléments, le manganèse, le titane et les alcalino-terreux ne dépasse pas 2 %. Connaissant l'attaque différentielle des différents minéraux par l'analyse triacide, on peut considérer que 30 % environ de la silice libérée est celle des tests de diatomées. La présence d'aluminium libéré par l'analyse triacide indique que cet aluminium et sans doute de la silice proviennent de certains minéraux, probablement des aluminosilicates. Le taux de silice

Figure 5 : Caractérisation des espèces minérales par diffraction de RX des échantillons du profil DAK 42, face brûlée. a) Efflorescences cristallines jaune orangé, pics de l'alunogène. b) Efflorescences cristallines blanches, pics du chlorure d'ammonium. c) Diatomites fondues, pics de la cristobalite.

Figure 5: Mineralogical characterisations by X-Ray Diffractometry on DAK 42 soil samples, burned face. a) Saline efflorescence, yellow orangy, alunogen peaks. b) White crystalline efflorescence, ammonium chloride peaks. c) Burned diatomite, cristobalite peaks.



est élevé par rapport à celui de l'aluminium si bien que le rapport moléculaire K_i (SiO_2/Al_2O_3) est élevé et varie entre 5 et 6. Rappelons que ce rapport est de 2 pour la kaolinite. Il faut noter que les taux de silice totaux de la fusion alcaline qui additionnent la silice des quartz et celle des diatomées sont pratiquement les mêmes que ceux du site de Dakar. En revanche le taux de silice attribué aux diatomées cuites est bien supérieur ici qu'à Dakar (30 contre 7 %). La tourbe du lac Faguibine est plus riche en diatomées.

Malgré des taux de silice et de résidu légèrement différents, les deux niveaux de la fosse FAG1 présentent des compositions semblables à l'attaque triacide.

La fusion alcaline (*Tableau 8*) dissout toute la silice : celle du quartz des grains de sable, celle des tests de diatomées et des phytolithes et celle des rares minéraux primaires présents. Elle représente 70 % et plus de la composition totale de l'échantillon. À part les valeurs un peu plus élevées de fer et d'alumine du niveau 3 FAG 3, les autres teneurs en éléments sont peu différentes. La couleur rose de ce niveau peut être liée à la teneur en fer. Le niveau 3 noir est un peu plus riche en titane, magnésium et calcium.

Les résultats des analyses totales de la fosse 3 sont également très proches. Le niveau gris est le plus siliceux, le

niveau rose le plus riche en fer et en aluminium, le niveau noir le mieux pourvu en cations Ca, K et Mg. Ici encore on peut noter qu'aux couleurs différentes correspondent des compositions chimiques différentes.

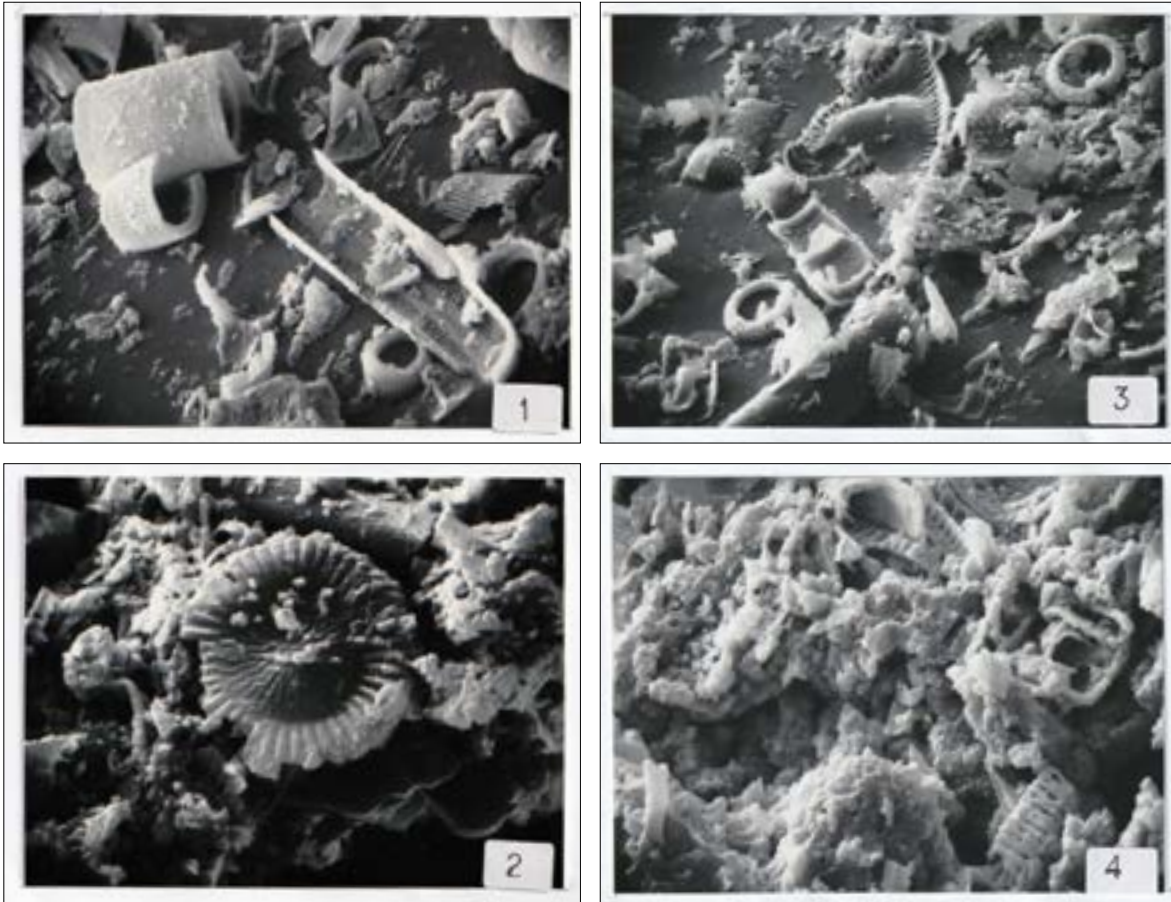
4. INTERPRÉTATIONS

4.1. La coupe de l'Aouker mauritanien autour de Tichât (Site 1)

Les niveaux de 7 à 9 du sommet de la coupe ont été érodés, comme soufflés par le vent. Les polyèdres diatomitiques ont été mis à l'affleurement, dégagés et en partie déplacés par le vent (*Tableau 1, Figure 2*). Le passage vertical des racines et leurs transformations que l'on peut suivre du haut en bas, niveaux 6 à 1 (ferrugineuse, calcaire et siliceuses et calcaire, puis ferrugineuse), prouvent que les niveaux sont en place et ont évolué *in situ*. Le mélange des sables hétérométriques à aspects différents des niveaux 1 et 2 suggère un mélange de sables éoliens ronds mat et de sables lacustres anguleux luisants dans le fond d'une dépression (« bâten ») en contrebas de la falaise de

Figure 6 : Observations au MEB de diatomées et de phytolites, profil DAK 42 : 1) face intacte, non brûlée, *Pinnularia* sp. (x1500) et 2) *Cyclotella meneghiniana* (x 3000) ; 3) & 4) face calcinée restes diatomées et de Phytolithes fondus du (X 1500).

Figure 6: SEM observations of diatoms and phytoliths, DAK 42 soil profile: 1) unburned face, *Pinnularia* sp. (x1500) and 2) *Cyclotella meneghiniana* (x 3000); 3) & 4) rest of diatoms and phytoliths from the burned face (X 1500).



grès. Les concrétions ferrugineuses et les manchons racinaires encroûtés militent en faveur de la présence d'une nappe d'eau fluctuant dans le temps et aujourd'hui disparue. L'apparition des diatomées feuilletées et les débris végétaux des niveaux 3, 4 et 5 indiquent un dépôt végétal du type tourbeux et probablement une action de cuisson de cette tourbe, attestée par les cendres et les débris végétaux brûlés. La présence des gastéropodes des genres *Melania* et *Biomphalaria* est indicatrice d'un niveau d'eau assez haut et permanent assez longtemps pour permettre leur survie. Les cendres des végétaux sans diatomites en partie calcinés du niveau 8 indiquent un assèchement du milieu et une combustion des végétaux responsables de la cuisson des diatomites du niveau 9.

Ce niveau 9 serait l'équivalent des formations GB2 et GB1 observées par Monod (1958) dans la Majâbat al-Koubrâ: le niveau GB2 est constitué d'argiles légères (sans cohésion de la description de Monod) à diatomées blanches, grises, noires, roses ou brique, le GB1 gris noir serait l'équivalent des niveaux

3 et 4 de la coupe. Les couleurs et l'aspect de ces « briques » polygonales sont la preuve d'une chaleur de combustion suffisamment élevée pour éliminer les végétaux, et transformer les diatomées.

Cette coupe confirme l'extension méridionale des dépôts et périodes lacustres de l'Holocène dans des régions ayant pu constituer récemment encore des zones inondées dont celle du Bâten de Tichît (p. 125 de la Majâbat Al-Koubrâ de Monod, 1958). À propos de ces dépôts, Monod (1958) écrit (pages 126-128) « J'ai dit plus haut que les argiles rouges à diatomées pouvaient être rouge brique. Sous cette forme elles évoquent immédiatement une argile ayant subi une cuisson ». Concernant les couches charbonneuses de l'Adrar, il avance comme explication possible l'hypothèse d'un « incendie de forêt ».

Pour Hugot (1977) « De la base au sommet les diatomées de Tichît sont essentiellement des diatomées planctoniques d'eaux lacustres et d'eaux saumâtres. » L'interprétation paléocécologique donnée est la suivante : « deux niveaux de diatomites compactes

Tableau 6 : Analyses physico-chimiques des échantillons des fosses FAG 1 et 3.**Table 6**: Physical-chemical characterisation of the pit samples FAG 1 and 3.

Niveau	Profil FAG 1			Profil FAG 3		
	60 cm	80 cm	base	1 m gris blanc	1 m cendreuse rose	0,70 à 1 m noir
0-0,2 μm %	27,8	20,6	2,5	11,3	24,9	43,0
2-20 μm %	42,0	43,2	1,3	33,6	38,0	28,1
20-50 μm %	0,2	0,6	1,2	1,9	2,3	1,8
50-200 μm %	8,3	10,3	83,0	12,0	11,6	14,5
200-2000 μm %	9,1	9,6	11,2	28,6	17,1	7,4
MO %	6,6	8,9	0,1	3,3	1,9	1,2
Carbone ‰	38,00	51,60	0,20	18,30	11,00	6,70
Azote ‰	4,55	4,83	0,05	2,78	3,13	0,88
C/N	8,4	10,7	4,0	6,9	3,5	7,6
pH eau	7,9	8,2	7,9	7,9	8,1	8,0
pH KCl	6,7	6,9	6,6	6,6	6,7	6,5
Ca ⁺⁺ cmol.kg ⁻¹	33,75	ép.	1,34	32,00	23,75	18,75
Mg ⁺⁺ cmol.kg ⁻¹	5,75	ép.	0,22	3,76	2,75	2,40
K ⁺ cmol.kg ⁻¹	5,63	ép.	0,18	9,25	4,00	1,90
Na ⁺ cmol.kg ⁻¹	4,53	ép.	0,14	4,25	1,63	1,25
S cmol.kg ⁻¹	49,66	ép.	1,88	49,26	32,13	24,30
T cmol.kg ⁻¹	39,35	ép.	2,30	38,85	26,15	22,25
S/T %	Saturé	ép.	81,7	saturé	saturé	Saturé
Soufre total ‰	4,5	3,0	0,3	< 1	0,01	0,95
Soufre gypse ‰	0,01	ε	0,01	< 1	0,01	0,67
Soufre jarosite ‰	0,84	0,80	0,12	< 1	0,01	0,83

ε = inférieur à la limite inférieure de détection ; ép. : échantillon épuisé ; Analyses des composés du soufre : dissolution dans une solution de carbonate basique puis de chlorure de sodium (Paycheng *et al.*, 1976).

Tableau 7 : Analyses triacides des échantillons de la fosse FAG 1 et FAG 3 (% terre fine < 2 mm).**Table 7**: Triacid analyses of the pit samples FAG 1 and FAG 3 (% fine earth < 2 mm).

Niveau cm	H ₂ O	SiO ₂	Res	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ki	Total
FAG 1													
40	14,69	35,84	29,48	7,69	7,80	0,04	0,40	0,48	0,94	0,20	0,42	7,81	97,98
60	17,49	27,22	35,61	7,31	7,45	0,08	0,40	0,57	0,96	0,19	0,90	6,2	98,18
FAG 3													
100	11,33	35,49	30,9	8,50	9,70	0,05	0,50	0,61	1,10	0,20	1,12	6,2	101,65

Tableau 8 : Teneurs en éléments majeurs (% terre fine < 2 mm) obtenus par fusion alcaline d'échantillons des fosses FAG 1 et FAG 3.**Table 8**: Contents of total major elements, alkaline fusion, samples from pits FAG 1 and Fag 3 (% fine earth < 2 mm).

Hor.	Perte à 110°	Perte à 1000°	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
FAG 1/ 1m	3,50	5,20	75,7	8,5	10,7	0,10	0,52	0,9	1,12	0,25	1,21	99,19
FAG 3/ 1 m gris	3,10	6,35	77,5	4,1	9,1	0,026	0,48	0,6	0,68	0,21	0,98	100,20
FAG 3/ 1m cendreuse rose	1,32	1,32	70,0	14,3	11,7	0,136	0,42	0,8	0,79	0,23	0,90	100,65
FAG 3 / 0,7 m noir	0,91	0,44	69,8	5,5	9,7	0,091	0,55	8,9	3,13	0,54	1,78	100,49

Tableau 9 : Teneurs en éléments en traces (ppm) obtenus par fusion alcaline des échantillons des fosses FAG 1 et FAG 3.**Table 9:** Trace elements contents (ppm) obtained by alkaline fusion, samples from FAG 1 and FAG 3 pits.

Niveau	V	Ni	Co	Cr	B	Zn	Ga	Cu	Pb	Sn
FAG 1 / 1m	132	55	49	35	43	75	15	27	32	ε
FAG 3 / 1m gris	77	36	4	119	42	9	25	29	4	ε
FAG 3 / 1 m cendreuse rose	127	53	24	153	67	53	27	30	29	ε
FAG.3 0,7 m noir	72	41	16	91	33	64	21	27	42	ε

ε = valeur inférieure à la limite de détection

Tableau 10 : Extraction des matières humiques des échantillons des profils FAG 1 et FAG 3 (C % < 2 mm).**Table 10:** Humic material extraction of the soil samples FAG 1 and FAG 3 (C% < 2 mm).

Nos échantillons	Profondeur cm	C-MHT	C-Acides Humiques	C-Acides Fulviques	AF/AH	C Total échantillon	Taux humification %
FAG 1	60	19,47	18,00	0,66	0,04	38,00	51
	80	16,67	10,87	5,80	0,53	51,60	32
	Base, 120	0,21	0,05	0,16	3,2	0,20	-
FAG 3	100, gris	1,07	0,52	0,55	1,06	19,30	5
	100, cendré	1,33	0,98	0,35	0,36	11,00	8
	70, noir	0,75	0,54	0,21	4,09	6,70	11

de lagune continentale peu profonde à eaux saumâtres reposant sur un substratum de sables ». Il reprend l'étude de Marinelli (1966a, b) pour adopter la thèse de la combustion spontanée sans l'expliquer.

4.2. Les fosses DAK 42 et DAK 56 (Site 2)

Description morphologique

L'examen des deux faces du profil DAK 42 (Tableau 2) met en évidence les transformations profondes subies par la face brûlée. La tourbe en se consumant a provoqué une forte perte de volume (plus d'un tiers) et fait apparaître une diatomite polyédrique durcie en surface et un mélange de tourbes brûlées et de diatomite polychrome sans consistance dans sa masse en profondeur. Le phénomène de cuisson sans flamme s'est poursuivi durant l'observation, avec de fortes émanations soufrées et le dépôt de diverses cristallisations. La température est très élevée dans certains volumes. Deux thermocouples de type nickel-chrome-nickel étalonnés de 40 à +1200 °C ont été utilisés pour relever les températures de la face brûlée. Ces températures varient beaucoup en fonction du niveau testé : de 400 à 500 °C dans la partie médiane de la fosse, mais peuvent atteindre 1120 °C dans certains volumes les plus chauds dégagant des fumeroles et enfoncés profondément dans la masse vers la base de la fosse. Les températures les plus élevées (> 1000 °C) ont été relevées le matin après avoir laissé les thermocouples toute la nuit dans ces niches en feu.

Les analogies entre les profils DAK 42 et DAK 56 sont évidentes, aussi bien sur les faces non brûlées que sur les faces brûlées. L'épaisseur des niveaux tourbeux et du plancher sableux est similaire. L'auto-combustion de la tourbe conduit à un effondrement de près de 30 cm des niveaux brûlés, à une élimination de la presque totalité de la matière organique de la tourbe et à la formation d'une diatomite versicolore durcie. Les analyses physico-chimiques sont tout à fait comparables.

Caractérisation physico-chimique

L'examen des textures des horizons données par les analyses granulométriques de la face intacte montre clairement la subdivision en deux blocs des deux faces, un bloc supérieur organique diatomitique de 0 à 94 cm et un bloc inférieur sableux de 94 cm à 170 cm et au-delà (Tableau 3).

Les pH des deux blocs sont très acides (<3). L'horizon organique supérieur présente une texture mixte sablo-argilo-limoneuse fine. La valeur élevée du rapport C/N indique que cette matière organique tourbeuse est incomplètement minéralisée. Cette valeur de 10-13 % en surface passe à plus de 26 % à 80 cm. Le niveau sableux situé sous 80 cm de profondeur est acide (pH 3-3,5), très peu organique (0,3 à 0,8 %, dépourvu de cations (S 1 à 2 cmol.kg⁻¹), peu conducteur (250 à 400 μmhos.cm⁻¹), à faible concentration de sulfates (1 à 3 %) et en fer dissous (0,5 à 1,0 mg/l). À la loupe, la fraction fine des sables non roulés et luisants domine alors nettement la fraction grossière à grains ronds et mats. Cela signifie que la proportion de sables d'origine

éolienne diminue vers la base. La teneur en matière organique élevée de 13 à 21 % de la tourbe de face intacte passe à des valeurs insignifiantes < 0,5 % après sa combustion. Les faibles teneurs en matière organique de la base du profil soulignent également la séparation en deux du profil, organique en haut, minéral et sableux en bas. Les taux de carbone et azote chutent.

Le complexe absorbant est bien pourvu uniquement en surface (somme des cations S de 25 à 30 cmol.kg⁻¹ mais taux de saturation faible), les pH de l'ordre de 2,5 sont acides sur l'ensemble du profil; les taux de soufre total (gypse + jarosite) passent de 12 % en surface à moins de 5 % à 80 cm. Les extraits eau (*Tableau 3*) révèlent des valeurs de conductivité électrique élevées (2000 à 3500 $\mu\text{mhos.cm}^{-1}$) et des teneurs en sulfates et en fer importantes (respectivement 12-63 cmol.L⁻¹ et 0,02-0,07 cmol.L⁻¹), mais qui diminuent vers la profondeur. Les taux de fer total de 8 à 15 % dans les niveaux supérieurs diminuent en profondeur.

L'examen des analyses de la face brûlée montre que sous l'effet de la combustion et par rapport à la face non brûlée, la texture du niveau supérieur passe à limono-argileuse, mais reste sableuse à la base. Les taux de 38 et 27,9 % de limons fins de la face brûlée peuvent signifier que ce sont les frustules fondues et abimées (*Figure 6*) qui alimentent ces niveaux en limons. La teneur en matière organique qui était de 13 à 20 % chute à moins de 0,5 % ce qui signifie que la tourbe s'est entièrement consommée. La teneur en eau ne dépasse pas 3 %. La combustion diminue la teneur en calcium mais augmente nettement celles des autres cations Mg, K et Na. À part les teneurs de Ca et Mg élevées dans le haut du profil, les teneurs des autres éléments échangeables sont très faibles et le complexe absorbant est fortement désaturé.

Analyses triacides et totales des faces intacte et brûlée de la fosse DAK 42

La comparaison des analyses triacides (*Tableau 4*) des niveaux hauts 1 et 2 de tourbes diatomitiques intactes et brûlées indique que la combustion fait augmenter le taux de silice d'environ 7 %, ce qui peut être attribué à la recristallisation en cristobalite de la silice des frustules de diatomées et des phytolithes. Les diffractogrammes de RX (*Figure 5*) indiquent que la face intacte contient du quartz, de l'hématite, de la jarosite, de la calcite, de la kaolinite et un fond amorphe important. Le résidu non attaqué de l'attaque triacide serait constitué sur la face brûlée du quartz des grains de sable, de la kaolinite, de l'hématite et de minéraux lourds. L'analyse totale par fusion alcaline du niveau 2 libère la totalité des constituants. Le taux de silice dissous, soit 77,9 %, correspond à celui des grains de quartz, de la totalité des diatomées et de la kaolinite. Les 11,5 % de fer dissous sont à attribuer à l'hématite et à la jarosite, et les 7,6 % d'aluminium à l'alunogène, mis en évidence aux RX.

On peut interpréter ces faits de la manière suivante: la combustion de la tourbe libère et concentre les frustules

siliceuses des diatomées. Une grande partie d'entre elles est déshydratée par la combustion. Les taux de silice croissent pour atteindre 50 et même 80 %. Les taux d'Al, de Ti et de Mn et ceux des cations augmentent légèrement. L'analyse totale va dissoudre la totalité des frustules et faire ainsi augmenter le taux de silice à près de 80 % et faire croître ceux du fer, de l'aluminium et du titane. On peut estimer que le pourcentage de silice libérée, qui était de 12 % dans la face supérieure intacte, et qui passe à 18-19 % dans la face brûlée, soit 6 à 7 % supplémentaires, représente pour partie la part de silice des tests des diatomées fondues et celle de la calcination de la kaolinite. Cette silice a été libérée par la combustion et recristallisée en cristobalite et peut être en tridymite. La comparaison entre les taux de silice libérée par l'analyse triacide dans le niveau 2 qui contient la tourbe et les diatomées (12 %) et ceux des niveaux sableux profonds qui n'en contiennent pas (3 %) permet également d'estimer grossièrement le pourcentage de diatomées de la tourbe.

Le reste de la silice du résidu de l'attaque triacide peut être attribué par l'analyse totale aux grains de sable quartzeux, à la kaolinite et aux quelques minéraux primaires (feldspaths) et lourds et serait alors d'environ 30 % pour le niveau 2. Le taux d'aluminium qui croît dans la face brûlée est attribué à sa libération des minéraux primaires et phylliteux.

Les taux de SO₄ et de Fe₂O₃ très élevés (*Tableau 3*) ne peuvent être dus qu'à l'accumulation de sulfures et de polysulfures de fer dans le sol (Vieillefont, 1977). Le Référentiel Pédologique Français (AFES, 2008) définit comme matériau ou horizon sulfidique un horizon organique ou minéral qui contient 0,75 % ou plus de soufre total (par rapport au poids sec de l'échantillon), principalement sous forme de sulfures. Le pH peut s'abaisser à des valeurs inférieures à 2 après séchage. L'oxydation des sulfures conduit à la formation des sulfates de fer et/ou d'aluminium. Le sulfate de fer formé, la jarosite, a une couleur jaune pâle qui sert à caractériser l'horizon sulfidique.

Minéralogie par diffractométrie des RX

L'apparition de la cristobalite (*Figure 5c*) à côté de la silice des grains de quartz (pics à 4,26, 3,34 et 2,45 nm) témoigne de la déshydratation des frustules et des phytolithes qui préexistaient dans la tourbe et de la reprécipitation de la silice en cristobalite. Les efflorescences cristallines jaune orangé déposées par les fumées qui tapissent les fissures présentent les pics caractéristiques de l'alunogène légèrement déshydraté [Al (SO₄)₃ 16 H₂O]. Les cristaux blancs déposés par les fumées sont constitués de chlorure d'ammonium NH₄Cl (*Figure 5b*); très rare en milieu naturel excepté près du cratère des volcans. Les raies caractéristiques de ces espèces minérales sont les suivantes: cristobalite: 4,04/2,84/2,24/1,92 nm; hématite: 2,70/2,51/1,69 nm; alunogène 4,48/4,33/4,39 nm; chlorure d'ammonium: 3,86/2,73/2,23/1,7 nm (*Figure 5c*). Un pic discret à 4,33 nm (*Figure 5a*) pourrait être celui de la tridymite. Laurent et Sheere (1971) ont montré la difficulté de distinguer aux RX la

crystalite de la tridymite dont les pics peuvent être légèrement déplacés en présence d'ions étrangers.

Extraction des matières humiques des échantillons du profil DAK 42 face intacte (C % < 2 mm)

Les teneurs en carbone et en acides humiques de la tourbe non brûlée sont élevées et expliquent le taux d'humification élevé atteignant 50 % en FAG (Tableau 5). En revanche, celles des acides fulviques sont remarquablement basses. Cette tourbe, comme l'indique la valeur du pH et le complexe absorbant saturé en Ca est une tourbe mésotrophe ou eutrophe.

Observations au microscope optique et au MEB

La tourbe non brûlée révèle des cristaux de gypse (SO_4Ca), de la pyrite, et de la jarosite mal cristallisés. Pour obtenir la cristobalite de la face brûlée qui n'était pas présente dans la face intacte, il a fallu atteindre des températures élevées de l'ordre de 1 000 °C. Un essai de cuisson au four a montré qu'à 1 120 °C l'échantillon de tourbe a perdu 35,6 % de sa masse et s'est transformé en une diatomite versicolore tendre et poreuse semblable à celle trouvée sur place. Au microscope les grains de sable fissurés indiquent qu'ils ont été partiellement attaqués lors de la combustion.

Les résultats des analyses physico-chimiques de la face intacte de la fosse DAK 56 (analyses non présentées), similaires au profil DAK42, montrent que l'horizon organique supérieur a une texture sablo-limoneuse fine, des taux de matière organique peu minéralisée (C/N élevés variant de 20 à 35 en profondeur) qui passent de 10-13 % en surface à plus de 26 % à 80 cm, un complexe absorbant bien pourvu uniquement en surface (Somme des cations de 25 à 30 cmol.kg^{-1}), des pH acides de l'ordre de 2,5, des taux de soufre total (gypse + jarosite) passant de 12 % en surface à moins de 5 % à 80 cm. Les extraits eau révèlent des valeurs de conductivité électrique élevées (2000 à 3500 $\mu\text{mhos.cm}^{-1}$) et des teneurs en sulfates et en Fe_2O_3 importantes (respectivement 12-63 cmol.L^{-1} et 32-119 mg.L^{-1}) mais qui diminuent vers la profondeur. Le niveau sableux situé sous 80 cm est acide (pH 3-3,5), très peu organique (0,3 à 0,8 %), dépourvu de bases (S 1 à 2 cmol.kg^{-1}), peu conducteur (250 à 400 $\mu\text{mhos.cm}^{-1}$), pauvre en sulfates (1 à 3 %) et en fer dissous (0,5 à 1,0 mg.L^{-1}).

Les analyses physico-chimiques de la face brûlée de la fosse DAK 56 montrent que par rapport à la face intacte un accroissement de la fraction silteuse, des valeurs du pH et des teneurs en cations échangeables, en fer et en soufre totaux. En revanche il y a une diminution importante de l'humidité, de la conductivité et de la teneur en sulfates par rapport au niveau tourbeux non brûlé.

Interprétation de l'inventaire des pollens des fosses DAK 42 et DAK 56

L'évolution des diatomées et des pollens dans les deux fosses DAK 42 et DAK 56 oriente l'interprétation bas vers le haut du profil comme celle d'un milieu d'eau relativement peu salé (< 15 g.l^{-1}), peu profond (1 à 5 m), à pH acide, de type marécage ou mangrove colonisé par une importante végétation aquatique à base de *Typha*, qui passe à un milieu d'eau douce moins acide (diminution de *Typha* accroissement des graminées et des fougères) mais plus salé, colonisé par des graminées tropicales, puis pour finir à un milieu un peu plus humide à légère réapparition du *Typha* et fort développement de *Phoenix*, *Elaeis guineensis* et *Nymphaea*. En surface, l'apparition d'espèces arborées de grande taille comme *Khaya senegalensis* et *Adansonia digitata* (le Baobab) et certains *Acacia* indique le passage à un milieu plus continental. La présence du filao (*Casuarina equisetifolia*), espèce introduite au début du siècle dernier dans le périmètre de reboisement de Mbaou marque le passage à l'ère actuelle.

Les très abondantes *phytolitaires* rencontrées de 0 à 50 cm ont été déterminées comme essentiellement des *Lithomesites* provenant des graminées et des *Lithodontium* provenant des *Typhaihomesites* a été fréquemment rencontrée liée aux diatomées au Tchad par S. Servant. Rappelons que pour les palynologues les *phytolitaires* sont des tests végétaux riches en silice souvent marqueurs de la végétation qui aurait subi des feux.

Interprétation des datations

Des résultats obtenus sur la face non brûlée DAK 42 entre la surface (activité % = 110,8 ± 8 (>1950)) et le niveau 65-80 cm (12900 ± 1200 B.P.) on peut déduire que le niveau à tourbe a commencé à se constituer au cours de la transgression de l'Holocène inférieur (Tchadien) au-dessus des sables probablement Ogoliens qui sont présents tout autour du site et a continué à se déposer durant l'Holocène supérieur (Nouakchotien) et ce, jusqu'à une période récente, puisque le prélèvement de 0-10 cm est daté postérieur à 1950, période du reboisement de Mbaou.

4.3. Le Lac Faguibine, Niger (site 3)

4.3.1. Morphologie de la fosse FAG 3

Le mélange des niveaux diatomitiques et de remplissage terreux partiellement tourbeux doit être interprété de la manière suivante : une tourbe initiale chargée de diatomées, déposée sur un plancher sableux, a entièrement brûlé, donnant place aux amas diatomitiques polyédriques polychromes, le rose dominant. Pour des raisons non explicitées, ces niveaux diatomitiques verticaux ont été bousculés et renversés (Figure 4). Un dépôt ultérieur de sédiments lacustres organiques non tourbeux

traversés par des racines non brûlées en voie de décomposition s'est alors déposé en remplissant les vides entre les polyèdres diatomitiques. Ces remplissages terreux ont été colonisés par une végétation qui n'est plus présente, mais dont les restes racinaires persistent. On n'a pas ici affaire à des horizons horizontaux superposés ordonnés, comme c'est le cas dans des profils de sols classiques, mais à un mélange désordonné diatomites/terre limoneuse tourbeuse.

D'autres fosses creusées à quelques centaines de mètres peuvent montrer des faciès différents de celles décrites. L'une d'entre elles, la fosse FAG 2 creusée à quelques centaines de mètres sur une légère élévation est, comme la fosse FAG 3, entièrement constituée d'amas diatomitiques rose rouille et noirs empilés et est exempte de remplissage terreux organique, ce qui renforce l'hypothèse du remplissage sédimentaire terreux déposé par un événement lacustre peu profond postérieur et aujourd'hui asséché. Les racines encore reconnaissables ont été identifiées par les locaux comme celles de joncs (*Phragmites*) vivant en bordure d'eau.

Notons que dans la *figure 1* de leur note, Svensen *et al.* (2003) délimitent une aire de « red and deformed diatomite » et précisent dans la légende que plusieurs surfaces de ces diatomites déformées ont été rencontrées au cours de leur mission sur le terrain.

4.3.2. Résultats analytiques des deux profils des fosses FAG 1 et 3

Analyses physico-chimiques

Les textures de FAG 1 soulignent l'opposition entre le haut du profil et sa base (*Tableau 6*). Elles passent d'argilo-limoneux sur les premiers 80 cm riches en diatomées à sableux fin sans diatomées à la base. Cette opposition est marquée par les teneurs en matière organique bien pourvue dans l'ensemble du profil et très faible à sa base. Le pH eau est voisin de 8. Les textures des trois niveaux de FAG 3 situés à 1 m varient de limono-sableux, limono-argileux et argilo-limoneux selon la couleur. Sur l'ensemble des deux fosses, les pH sont basiques, les complexes absorbants, saturés, sont dominés par l'ion calcium, sont assez bien pourvus en Mg, K et Na. Les teneurs en soufre sont faibles, excepté au sommet de FAG 1.

Analyses triacides

Les compositions chimiques des trois échantillons analysés prélevés dans les deux fosses différentes sont très proches (*Tableau 7*). Elles sont constituées principalement de silice, d'alumine et de fer et d'un résidu non attaqué par les trois acides. L'ensemble des autres éléments, le manganèse, le titane et les alcalino-terreux ne dépasse pas 2%. Sachant que l'attaque triacide permet la dissolution complète des hydroxydes, oxydes, argile, olivine (qui est un minéral primaire), une forte dissolution des micas et des amphiboles (minéraux primaires également),

une faible dissolution des pyroxènes et feldspaths (minéraux primaires), le quartz n'étant pratiquement pas dissous, on peut considérer que 30 % environ de la silice libérée est celle des tests de diatomées. La présence d'aluminium libéré par l'analyse triacide indique que cet aluminium et sans doute de la silice proviennent de certains minéraux, probablement des aluminosilicates. Le taux de silice est élevé par rapport à celui de l'aluminium si bien que le rapport moléculaire $Ki (SiO_2/Al_2O_3)$ est élevé et varie entre 5 et 6. Il faut noter que les taux de silice totaux de la fusion alcaline qui additionnent la silice des quartz et celle des diatomées sont pratiquement les mêmes de ceux du site de Dakar. En revanche le taux de silice attribué aux diatomées cuites est bien supérieur ici qu'à Dakar (30 contre 7 %). La tourbe du lac Faguibine est plus riche en diatomées. Malgré des taux de silice et de résidu légèrement différents, les deux niveaux de la fosse FAG1 présentent des compositions semblables à l'attaque triacide.

Analyses totales par fusion alcaline

La fusion alcaline dissout toute la silice : celle du quartz des grains de sable, celle des tests de diatomées et des phytolithes, et celle des rares minéraux primaires présents (*Tableau 8*). Elle représente 70 % et plus de la composition totale de l'échantillon. À part les valeurs un peu plus élevées de fer et d'alumine du niveau 3 FAG 3, les autres teneurs en éléments sont peu différentes. La couleur rose de ce niveau peut être liée à la teneur en fer. Le niveau 3 noir est un peu plus riche en titane, magnésium et calcium. Il est à remarquer que les trois niveaux diatomitiques de couleurs différentes de FAG 3 prélevés aux environs de 1 m, et qui ont des caractéristiques physico-chimiques différentes, ont des compositions très différentes.

Teneurs en éléments traces

Les résultats des analyses totales de la fosse 3 sont également très proches (*Tableau 9*). Le niveau gris est le plus siliceux, le niveau rose le plus riche en fer et en aluminium, le niveau noir le mieux pourvu en cations Ca, K et Mg. Ici encore on peut noter qu'aux couleurs différentes correspondent des compositions chimiques différentes. Le niveau 1 cendreuse rose plus riche en fer est aussi le plus riche en éléments traces V et Cr. Cette liaison fer-vanadium-Cr est fréquente en milieu ferrugineux tropical (Mosser, 1980).

Quelques éléments sur la matière organique

Les teneurs en carbone et en acides humiques de la tourbe non brûlée sont élevées et expliquent le taux d'humification élevé atteignant 50 % en FAG. En revanche, celles des acides fulviques sont remarquablement basses. Cette tourbe, comme l'indique la valeur du pH et le complexe absorbant saturé en calcium est une tourbe mésotrophe ou eutrophe. La matière organique des niveaux tourbeux de la face intacte du profil FAG 1 est très différente de celle des profils de Dakar. Alors

Figure 7 : Observations au MEB des diatomites du profil FAG 1 :
 1) face intacte : rouleaux de *Pinnularia* (X1500) ;
 2) face brûlée niveau de diatomées fondues (X 1500) ;
 3) face brûlée niveau de diatomées fondues la silice est sous forme de cristobalite (X 1500)

Figure 7: SEM observations of diatoms, FAG 1 soil profile:

1) unburned face, roll structure of *Pinnularia* sp. (x1500);
 2) burned face in the diatom burned layer (X 1500);
 3) burned face, burned diatoms, silica in cristobalite form (X 1500).



qu'à Dakar il s'agit d'une tourbe acide (oligotrophe), celle-ci est calcique (mésotrophe et eutrophe). Les pH et la teneur en Ca du complexe absorbant ($> 30 \text{ cmol.kg}^{-1}$) l'attestent. Elle est moins riche en matière organique, plus humifiée et est surtout beaucoup plus pauvre en acides fulviques (0,66 contre 13,6). Le rapport AF/AH qui est de 0,04 et 0,53 à 60 et 80 cm est de 1,57 et 1,87 à Dakar. Cela signifie que la tourbe du Lac Faguibine évolue ou a évolué dans un milieu biologiquement plus actif. Le rapport C/N beaucoup plus bas (Tableau 6), de l'ordre de 10, prouve les bien meilleures conditions de minéralisation et de polymérisation de la matière organique.

Observation au MEB des diatomites cuites du profil FAG 1

Les clichés de diatomites prélevées à 40 cm dans la fosse FAG 1 (Figure 7) montrent des objets très semblables à ceux des diatomées et Phytolithes fondues, obtenus à Dakar (Figure 5).

5. DISCUSSION

5.1. Les différents matériaux en présence et leur évolution

5.1.1. La tourbe

La tourbe est une matière organique formée par accumulation de végétaux dans un milieu aquatique anaérobie qui contient également des substances humiques, des cires et résines, incluant des alcools, des phénols, des éthers, des aldéhydes, des cétones, des acides carboxyliques, produits hautement inflammables, et des éléments traces. Selon la nature des végétaux accumulés, elle est classée, en tourbe blonde fibreuse, tourbe brune et tourbe noire. Cette dernière est celle des Niayes de Dakar. Elle provient en grande partie de la transformation des *Cypéracées*, des graminées et des fougères. Son existence a nécessité un apport important de débris végétaux dans un milieu réducteur. Après leur assèchement, les tourbières sont vulnérables à l'oxydation, voire à la combustion. Sous l'effet des tassements successifs la tourbe s'affaisse.

Les tourbes constituent un habitat commun pour les Diatomées. Selon une étude du Cirad (GERDAT-COG, 1983), la composition élémentaire des tourbes des Niayes de Dakar serait la suivante : 37,7 % de carbone, 3,6 % d'oxygène, 1,0 % d'hydrogène, 28,5 % d'azote, 8,5 % d'oxygène organique. Cette tourbe contient 29,2 % de cendres après combustion. Ces cendres présentent un taux de silice considérable ($\text{SiO}_2 = 16,4 \%$ MS). Dans le contexte environnemental sahélien du site, elles sont donc principalement constituées de sables quartzueux éoliens.

Dans les sols à tourbe, les sulfates présents dans l'eau sont réduits par voie biologique en sulfures. L'oxydation de la pyrite est à l'origine de l'acidification, le principal produit de l'oxydation étant la jarosite, sulfate basique de fer et de potassium, de formule $KFe_3(SO_4 12OH)_6$. Cette jarosite se présente dans les sols sous forme de taches de couleur jaune pâle à vert, généralement associées au fer dans les gaines racinaires.

Les tourbières sont présentes dans le monde entier, et en particulier dans les zones tropicales selon les estimations actuelles, soit 4,7 Mkm² (Gumbrecht *et al.*, 2017).

5.1.2. L'origine et le mécanisme de combustion spontanée des tourbes

Cette combustion est un phénomène fréquent, constaté depuis longtemps sur les charbons riches en matières volatiles. C'est l'échauffement dû à l'oxydation naturelle de la pyrite qui provoquerait le départ de feu. Cette oxydation est également observée dans les composts. Ces phénomènes ont davantage préoccupé les mineurs que les géologues et ont rarement été abordés. Hors les mines, il s'agit le plus souvent de feux de végétaux en décomposition qui se déclarent spontanément sur un site de compostage ou dans un silo à grains. La littérature n'est pas prolixe sur le mécanisme de déclenchement de ce phénomène d'auto-combustion spontanée sans flammes. Il a rarement été décrit et élucidé scientifiquement. Dans une lettre personnelle de Giorgio Marinelli (Université de Pise, Italie, pétrographe et spécialiste des volcans, lettre du 24/09/1979, inédite) décrit ainsi ce mécanisme : « *Les lacs africains dont les eaux douces sont riches en silice en raison des conditions de latéritisation sont très riches en diatomées. Cette activité biologique forte provoque des conditions asphyxiques. La fermentation anaérobie conduit à la formation d'hydrocarbures dont le méthane (CH₄) est l'un de principaux constituants. Avec ces hydrocarbures est associée une petite quantité de phosphore gazeux (PH₃) qui n'est pas spontanément combustible, et de phosphore liquide (P₂H₄). Ces gaz arrivent à la surface par les fissures du sol et le mélange gazeux riche en hydrocarbures prend alors feu. La quantité de chaleur émise peut atteindre la température de fusion des matériaux sédimentaires présents dans la tourbe et sur les parois de fissures. Ce phénomène se produit seulement la nuit car la lumière transforme le P₂H₄ gazeux inflammable en phosphore liquide non inflammable.* » Cette explication scientifique détaillée est la seule qui nous semble faire autorité de nos jours. Si la formation et l'accumulation de la tourbe nécessitent des conditions hydromorphes asphyxiques, ce mécanisme de combustion ne peut se faire qu'en milieu sec durant des périodes de sécheresse intenses et soutenues. Si la formation de la tourbe et des diatomées et phytolithes qui la peuplent se produit dans l'eau en milieu anaérobie, sous l'effet de périodes de sécheresses climatiques, la tourbe s'exonde, s'assèche et prend feu. Ce phénomène,

rapporté par les autorités coloniales il y a un siècle, est encore visible aujourd'hui autour du lac Faguibine¹.

5.1.3. Les diatomées

Les Diatomées ou Bacillariophycées sont des algues unicellulaires microscopiques lacustres, enfermées dans une coque siliceuse transparente et rigide formée de deux valves emboîtées (le test ou frustule), de forme et d'ornementation différentes suivant les espèces. On les trouve dans tous les milieux aquatiques, des eaux douces aux eaux salées. La diatomite est un sédiment siliceux résultant de l'accumulation des frustules de diatomées mortes. La diatomite est une roche claire, légère et poreuse, meuble ou consolidée, formée entièrement ou presque par des diatomées. Elle est connue sous d'autres noms comme la célite, le kieselguhr, la terre de diatomées, la farine fossile, le tripoli ou randannite (Foucault et Raoult, 1980). Ce qui rend les diatomées si intéressantes aux yeux des chercheurs, c'est qu'elles sont représentatives des milieux où elles vivent et prospèrent et constituent des marqueurs et témoins intéressants de l'évolution de ces milieux sous l'effet des variations climatiques (Servant-Vildary, 1978).

5.1.4. La silice des diatomées

Les diatomées ont besoin de silice pour édifier leurs frustules et ne peuvent donc proliférer que si le milieu en pourvoit. Le plus souvent, cette silice proviendrait de l'altération chimique des sables des sols des bordures émergées du site. En milieu tropical c'est l'altération latéritique des sols (les sols ferrugineux le plus souvent en milieu semi-aride) qui est le plus souvent évoquée.

L'acide monosilicique (H₄SiO₄) issu de l'altération des roches est l'unique forme de Si totalement soluble dans l'eau et assimilable par la plante (Jones et Handreck, 1967). La silice biogénique est le troisième stock de silicium terrestre. Elle a été dosée dans l'analyse de l'eau du lac Faguibine. Ce stock peut être subdivisé en silicium phytogène, microbien et protozoïque. Le silicium phytogène est défini comme le silicium qui précipite dans les racines, tiges, branches, feuilles ou aiguilles des *Phytolithes* (Brochier, 1999). Lorsque ces précipités dépassent 5 µm de diamètre, ils sont appelés *phytolithes*. Les plantes possèdent des teneurs en silicium allant de 0,1 à 16 % de leur poids en matière sèche (Sommer et Sommer, 2006). L'acide monosilicique stocké dans un premier temps sous forme de gel de silice va ensuite, par dessiccation due à la transpiration du végétal, précipiter dans les cellules des tissus aériens sous forme de particules d'opale biogène (silice hydratée amorphe, SiO₂·nH₂O, Frayse, 2007). Après la mort du végétal, les phytolithes retournent au sol ou à l'eau et entrent dans le stock

¹ <https://www.icrcnewsroom.org/story/fr/1968/mali-climate-change-transforms-lake-faguibine-into-desert-exiling-population>

biogénique hautement soluble qui contribue au silicium de la solution du sol (Van Cappellen, 2003). La libération de Si à partir de la dissolution des phytolithes équivaudrait à deux fois celle de l'altération des silicates (Alexandre *et al.*, 1997). Les phytolithes sont considérés comme la composante majeure du stock de silice biogénique dans les sols (Meunier et Colin, 2001). La tourbe peut, en se décomposant, libérer la silice des phytolithes contenue dans les organes des végétaux qui la composent. Certaines plantes, dites *Phytolithaires* comme les graminées et les fougères ont des taux de phytolithes élevés. Les relevés palynologiques effectués dans l'étude des diatomées des Niayes de Dakar ont mis en évidence une flore où les *Phytolithaires* sont très abondantes. La source principale de silice dosée après la combustion de la tourbe proviendrait non seulement des frustules des diatomées mais également des phytolithes des végétaux constituant la tourbe. Consumée, cette tourbe libérerait en partie la silice de la cristobalite, de la tridymite et du ciment siliceux des « microdykes ».

5.2. Les diatomites cuites

Pour les géologues, la diatomite est une roche sédimentaire siliceuse biogénique, de couleur claire, légère et poreuse, meuble ou consolidée, constituée entièrement ou essentiellement de squelettes de diatomées fossilisés. Elle est essentiellement considérée comme un matériau. Pour Rocher (1994) la plupart des principaux gisements continentaux dans le monde, dont l'ensemble des gisements français, sont associés au volcanisme.

5.2.1. Les diatomites cuites en Afrique de l'Ouest

Des tourbes à diatomées ont été principalement observées et décrites en Afrique de l'Ouest et du Nord par de nombreux géologues. Les surfaces couvertes par les diatomites en Afrique de l'Ouest peuvent être appréhendées par les études régionales énumérées par Faure (1969). Elles ont été reconnues en Mauritanie, en Algérie, au Niger, dans le nord oriental du Nigeria, dans le Tibesti en Algérie, au Tchad où dans la région de Koro-Tor elles s'étendent sur près de 150 000 km² (Wolf, 1964) au Kenya, au Soudan.

5.2.2. Les diatomites cuites des Niayes

On peut se demander pourquoi les tourbes brûlent brusquement et sans doute pour la première fois en décembre 1976 dans les Niayes de Dakar. Brusquement, car les forestiers ont découvert ce phénomène nouveau suite aux appels apeurés de la population alentour. Des chevaux se sont enfoncés dans les cavités fumantes et ont eu les pattes brûlées. Il faut rappeler que, depuis 1969, la plus terrible des sécheresses du siècle par son intensité et sa durée sévit au Sénégal et dans tout le Sahel (Anhuf et Frankenberg, 1993). Durant huit années la pluviométrie a été déficitaire. À Dakar en 1972, il est tombé

seulement 117 mm de pluies au lieu des 600 mm habituels. Les isohyètes sont descendus de 200 km vers le sud. Le niveau de la nappe phréatique a baissé de 10 m depuis 1969. Ce sont peut-être les premières années que ces tourbes brûlent, car aucun témoignage antérieur n'en relate l'existence.

5.2.3. Les diatomites cuites du lac Faguibine et la déformation des couches

Dans une lettre personnelle à J.-C. Leprun datée du 24/09/1979, Giorgio Marinelli (1966b) relate les faits suivants. Suite à une demande des autorités maliennes qui supputent une utilisation possible d'énergie géothermique, les Nations Unies envoient sur place en 1965 une mission d'experts. Les conclusions des experts sont approximatives. Leurs rapports n'apportent aucun élément constructif. Des échantillons de « scories » sont alors envoyés à sept laboratoires dont celui de l'U.S. Geological Survey, celui du Canada et le sien, à Pise. Tous répondent qu'il ne s'agit aucunement d'une lave. Il écrit donc la note du 7/2/66, puis le 29/7/66 une nouvelle note après avoir pris connaissance de la note de Monod et Palausi de 1961. En 1967, il rencontre Th. Monod et ils décident de travailler ensemble sur le problème. Monod se rend sur le terrain, prélève une quantité d'échantillons et les lui envoie. Après étude approfondie, le Pr. Marinelli confirme son diagnostic initial. Ils décident alors d'écrire une note mais cela ne se fera pas, la mort de Marinelli précède celle de Monod en 2000.

Toutes les observations de différents intervenants relèvent les déformations parfois importantes des niveaux de diatomites (Monod et Palausi, 1958), la *figure 1* et les « *red and deformed diatomite* » de l'article de Svensen *et al.* (2003), et la présente étude. Plusieurs hypothèses ont été avancées : 1) l'épaisseur de la tourbe : les couches s'accroissent donc, interrompues par les épisodes secs qui peuvent se prolonger ; 2) la néotectonique et les tremblements de terre : selon Sauvage et Sauvage (1992), les traces de mouvements tectoniques très récents peuvent être observées dans les sédiments holocènes. Monod et Palausi (1961) citent une secousse en 1905 puis en 1918. On peut également noter les observations de Klein (1979) et de Karpoff (1989) qui vont dans ce sens ; 3) l'impact possible d'une météorite évoquée et rapidement abandonnée. La première hypothèse nous semble la plus probable.

5.2.4. La formation des polyèdres des diatomites cuites

Il est admis que les sols polygonaux sont des figures d'origine périglaciaire. La question de la présence de polygones dans les environnements sahélo-sahariens situés à l'opposé des milieux périglaciaires se pose donc (*Figures 2 et 4*). La formation précoce de ces polygones a été observée dans les feux de tourbes de la presqu'île de Dakar. Des fissures en cours de formation délimitant les polygones s'échappaient des fumées

et des gaz à l'origine de cristallisations blanches et brunes d'alunogène et de sulfate d'ammonium. Il n'y a donc aucun doute, les polygones proviennent de la cuisson des diatomées présentes dans la tourbe et des conséquences de cette cuisson à haute température : modification des masses et du volume, rétraction et compaction. Les travaux pédologiques de Vieillefon (1977) décrivent en surface des sols de tannes proches des sols des Niayes, la formation de structures de surface polygonales. Des fentes et fissures séparent les polyèdres de 10 à 15 cm qui se forment par la remontée et le soulèvement de petits dômes d'échappées gazeuses d'hydrogène sulfuré et de méthane au-dessus d'un horizon argilo-limoneux à jarosite. La formation de sols polyédriques serait bien le résultat de phénomènes physico-chimiques de contraction et rétraction de natures différentes, sous l'effet de pressions différentes (submersion et émergence par l'eau, gaz et chaleur).

On peut interpréter les phénomènes de la manière suivante, grâce aux déterminations exhaustives au microscope de Marinelli (1966a), à celles de Monod et Palausi (1961) et à

Figure 8 : Cliché d'un échantillon de « microdyke » scoriacé. Structure bulleuse noire de la silice et aspect jaune-vert de la jarosite. (Cliché Leprun).

Figure 8: Scoria "Microdyke" sample. The silica is a black bulbous structure, jarosite is yellow green. (Slide Leprun).



nos propres observations. Sous l'effet de l'intense chaleur développée par l'auto-combustion de la tourbe, facilitée par la fusion des produits hautement inflammables qu'elle contient, qui proviennent de la décomposition d'une partie de la masse végétale (Mazière, 1969), les grains de quartz et les phytolithes sont attaqués et libèrent de la silice et des microéléments. Une partie de cette silice sous forme de solutions tapisserait les fissures des polyèdres de surface, une autre partie, sous forme de fumées toxiques déposerait les cristallisations aciculaires d'alunogène et de sulfates d'ammonium observés dans sur les parois des fosses observées les profils de Dakar. Une autre partie élaborée plus en profondeur formerait la plaque horizontale brune et dure, utilisée comme matériau trouvée dans les fosses du lac Faguibine (Figure 8). Cette pâte vitreuse brune cristalliserait en englobant les microcristaux cubiques observés par Marinelli et cités ici : pérovskite ? ilménite, pseudo brookite ? cristobalite et cordiérite (déterminée aux RX). Ces croûtes brunes vitrifiées à allure de scories tapissant les fissures des polyèdres sont constituées (Marinelli, 1966a) d'une pâte vitreuse bulleuse de silice englobant de nombreux grains de quartz arrondis probablement d'origine éolienne désertique. Certains sont plus clairs en surface et donc partiellement fondus. Sont également observées de nombreuses baguettes minces d'un pyroxène monoclinique sans couleur, de type diopside, et de petits cristaux quadratiques pseudo-cubiques de cristobalite et, moins fréquents, ceux de pseudo-cristaux de tridymite. Une fois refroidies, ces remontées fissurales vitreuses prennent l'aspect de laves bulleuses interprétées par Monod et Palausi (1961) comme des « microdykes » volcaniques. Monod attribue le nom de Daounites à cette formation. Dans la masse des enclaves rougeâtres de diatomées, on note la présence d'algues, de spicules de *Spongiaires* d'eau douce. Les enclaves noires sont constituées de sédiments siliceux, très riches en cristobalite, tridymite et de résidus de grains de quartz noyés dans un verre jaunâtre. La néphéline du lac Faguibine de Monod et Palausi n'en serait pas pour Marinelli.

L'aspect de scories et de pierre ponce des « microdykes » venant de l'intérieur, leur composition et la néoformation de minéraux tels que les pyroxènes, la cristobalite et la tridymite, la chaleur émise, les « fumerolles » ont fortement poussé les observateurs vers l'hypothèse de l'artéfact magmatique.

5.3. Eléments versés à la controverse sur la formation des diatomites cuites

5.3.1. Arguments avancés sur la formation ignée des diatomites cuites

Les arguments avancés sur la formation ignée des diatomites ont été émis essentiellement à partir des observations et des examens minéralogiques effectués autour du Lac Faguibine au Mali. Tout d'abord à partir d'arguments fondés par les évocations

de laves fissurales de Monod et Palausi (1961) puis par des raisonnements érigés sur des manifestations tectoniques par Sauvage et Sauvage (1992) et enfin par des arguments géophysiques et géologiques conçus par El Abass *et al.*, (1993).

L'aspect de la roche va surtout influencer le diagnostic : « La roche légère, scoriacée, vacuolaire, jaune soufre le plus souvent et parfois noire, que son aspect comme ses conditions de gisement (apparence de micro-dykes recoupant la diatomite quaternaire) devaient inciter à tenir pour une lave de type pierre ponce » (Monod et Palausi, 1961). Le cliché de la *figure 8* témoigne de cette apparence trompeuse.

La présence et les formes des « microdykes », la structure microlithique des scories, les émanations de « fumerolles » toxiques, la fusion du quartz, les néoformations de minéraux observées en lames minces ou aux RX (pyroxènes, chlorites ferrières, néphéline), constituaient autant de preuves de hautes températures habituellement uniquement compatibles avec des phénomènes volcaniques. Pour les géologues, les vieilles diatomites sont des roches dont le contexte habituel est le volcanisme (Rocher, 1994).

5.3.2. Arguments en faveur de la formation par auto-combustion des tourbes à diatomées

Sur le terrain, dans les fosses creusées où sont décrites les diatomites cuites, on n'observe nulle part de sills ou de dykes profonds de roches éruptives dénommées Daounites par Monod et qui se prolongeraient en profondeur. Aucune éponte de métamorphisme de contact n'est visible. Il est d'autre part difficile de mettre en doute les examens au microscope et aux RX du Pr. Marinelli, spécialiste des roches volcaniques et ses conclusions réfutant totalement l'origine ignée. Les preuves supplémentaires apportées par Swensen *et al.* (2003) sont autant d'arguments géologiques en faveur de l'auto-combustion. Dans leur travail, ils signalent qu'ils ont mesuré une température de 830 °C dans les volumes en cours de combustion.

On peut logiquement se demander comment de tels phénomènes éruptifs intrusifs récents pourraient se produire sur les vastes surfaces où ces polygones de diatomites ont été observés et décrits dans plusieurs régions de l'Afrique de l'Ouest (Faure, 1969) sans que les nombreux géologues qui parcouraient ces régions aient pu les mettre en évidence. En effet, les surfaces couvertes par les diatomites en Afrique de l'Ouest peuvent être appréhendées par les études régionales énumérées par Faure (1969).

Plusieurs preuves irréfutables de l'auto combustion superficielle peuvent être avancées :

- 1) l'examen d'échantillons de ces « scories » des Daounas envoyés par l'ONU ;
- 2) l'observation *in situ* du phénomène dans la presqu'île de Cap-Vert à Dakar en 1976 puis sur les bords du Lac Faguibine en mars 1979 ;

3) l'étude pétrographique de Marinelli (1966) sur les échantillons de « scories » qui se termine ainsi : « En conclusion il est à exclure que la scorie soit un produit volcanique. L'absence d'aluminosilicates (à l'exception de la cordiérite) démontre que la scorie a été formée par réchauffement à haute température d'un matériel sédimentaire avec fusion partielle de minéraux secs, stables à température élevée ».

- 4) les résultats des analyses de Svensen *et al.* (2003) qui correspondent en tous points aux nôtres ;
- 5) les analyses aux RX qui ont permis la reconnaissance de cristobalite et d'alunogène et qui ont révélé une partie des espèces minérales de Marinelli (1966b) et de Palausi et Monod (1961) ;
- 6) les clichés prises au MEB qui figurent ici et qui sont la preuve de la « fonte » des frustules de diatomées et de phytolithes sous l'effet du feu.

Des arguments climatiques peuvent être avancés, en particulier le fait connu qu'autour du lac Faguibine depuis une centaine d'années les habitants et les autorités aient constaté ces phénomènes et que ces feux ne se produisaient que pendant les périodes sèches et disparaissaient lorsque le niveau de l'eau remontait. Ce fait contrarie pourtant l'hypothèse du phénomène magmatique.

Enfin, l'observation sur place des sols tourbeux en cours de combustion et les transformations des profils dans les fosses pédologiques dans la presqu'île du Cap-Vert à Dakar est une preuve irréfutable de l'origine des feux de tourbe et de la formation superficielle des diatomites.

5.3.3. Les feux de tourbes de diatomites dans le monde

Au Chili, Ropercha *et al.* (2017) découvrent dans le désert de l'Atacama des verres inhabituels de silicates dont ils incombent tout d'abord l'origine à l'action d'une météorite. Puis des données de datation ¹⁴C et paléomagnétiques excluent cette hypothèse. Il s'agirait, en fait, de la combustion de sols riches en matières organiques dans les zones humides herbeuses, asséchées pendant les oscillations climatiques entre les périodes humides et sèches qui pourrait expliquer la formation de ces verres. L'option de diatomites quaternaires cuites est privilégiée.

Dans l'Île de la Réunion, en novembre 2020, un incendie se déclare dans la forêt classée du Maïdo constituée de tamariniers, de fougères et de bambous. Il va se prolonger plusieurs jours et nécessiter l'intervention de nombreux pompiers. Plusieurs faits curieux sont à signaler concernant ces feux :

- 1) Le nom Maïdo, donné par les esclaves, signifie « terre brûlée ». La forêt couverte de bambous à l'origine a donc dû brûler à plusieurs reprises par le passé. Cela a été le cas récemment, en 2010, 2011 et 2020.
- 2) Jean Riquier, pédologue qui a cartographié les sols de l'île en 1960 (1960a et b), fait mention de la présence de sols

originaux dénommés sols à « voune » dans cette forêt. Il décrit des dépôts d'éléments siliceux opalifères d'origine végétale dénommés « mascarégnite » par Lacroix (1936) au-dessus d'un sol ferrallitique, qui font penser à l'horizon A2 sableux blanc d'un podzol. Mais ce n'est pas un podzol, car dans un podzol, la silice est due à un lessivage et est d'origine résiduelle et n'est pas un dépôt. Sous 30 cm d'une tourbe noire spongieuse qui brûle « comme l'amadou », il décrit un niveau de particules d'opale de 20 à 100 μ , sorte de tripoli.

- 3) Raunet (1991) reprend une étude de ces sols. Il suggère une double pédogenèse andosols-podzols. La voune serait due à accumulation des débris végétaux d'une *Ericacée*, *Philippa montana*, auxquels se mêlent des *Bryophytes* (mousses, hépatiques, sphaignes) et de nombreux épiphytes. Il estime qu'il faudrait de 5000 à 15000 ans pour que s'accumule sous cette végétation 1 mètre de cette « voune ». La « mascarégnite » serait pour sa part composée pour plus de 80 % de silice sous forme de phytolithes d'opale et de quelques frustules de diatomées d'eau douce. Il conclut que seul un incendie à grande échelle, couvant et progressant lentement jusqu'à la combustion totale les années sèches peut expliquer la formation de « mascarégnite ». Sans autre preuve, l'origine du feu est attribuée à la foudre.
- 4) L'un des sapeurs-pompiers expérimentés du feu de 2020 reconnaît la difficulté de circonscrire ce genre de feu qu'il attribue à un « feu souterrain » qui dévaste épisodiquement cette forêt. On recherche alors un coupable. On dénonce un écologiste qui précautionneusement a brûlé le papier hygiénique dont il venait de se servir.
- 5) L'article de Meunier *et al.* (2001) décrit, dans cette même forêt de Maïdo, un profil partiellement différent de celui de Riquier, avec son épais horizon humifère noir Ao, son horizon A2 de phytolithes gris-blanc de 10 à 27 cm de profondeur, ses horizons Bh et Bfe-rouge et nodulaire indurés typiques d'un podzol. Les niveaux supérieurs organiques et des fragments de charbons de bois militent en faveur d'une combustion spontanée interne de végétaux.

5.3.4. Les incendies de forêts mettant en cause la tourbe

De très nombreux articles de presse nationaux et internationaux récents et actuels font état de la multiplication, de l'intensité et de la dangerosité des feux de tourbes de par le monde : Indonésie, Canada, Russie, Brésil. Ces feux sont unanimement considérés comme des incendies naturels particulièrement difficiles à vaincre, car le feu de tourbe couve et se propage parfois sur plusieurs mètres sous le sol, ce qui rend son accès difficile à l'eau des pompiers et à la pluie. En

Russie² les feux de tourbière qui ravagent chaque année la Sibérie ne seraient en fait qu'un seul et même incendie qui dure depuis plusieurs années. Ces feux se terrent dans le sol chaque hiver et ressurgissent chaque été à la faveur des températures anormalement élevées. En 2010, les Russes ont détourné une rivière près de Moscou sur 20 km pour noyer un feu de tourbe. La présence de diatomites cuites dans ces feux de tourbes n'a pas jusqu'à présent été évoquée probablement faute d'études spécifiques. Ces feux sont dénommés « feux couvants »³ car ce ne sont pas des feux ouverts de surface, a assuré le service russe pour les situations d'urgence.

En France, un article du journal Ouest France⁴ relate un feu de tourbe qui résiste depuis onze jours aux pompiers. L'incendie sera combattu par la réalimentation exceptionnelle du marais par les eaux de la Loire. Dans le Sud Médoc en 2011⁵ les pompiers déclarent « *Le feu de tourbe est un bourbier. Et nous ne sommes pas près de partir. Sans pluie et avec une telle chaleur, on n'éteint pas le feu de tourbe* ».

En Indonésie⁶, des fumées très denses, causées par des méga-feux, obscurcissent l'atmosphère, causant émissions de dioxyde de carbone et de particules et menaçant la santé des populations, précise Philippe Guizol, spécialiste des forêts au CIRAD. Ce sont les feux sur tourbières desséchées et dégradées qui sont à l'origine des fumées. En 1997, un incendie de forêt a enflammé une zone de tourbières qui a brûlé lentement pendant des mois. Ce feu a produit des gaz à effet de serre qui ont représenté de 20 à 40 % du total mondial des émissions provenant des combustibles fossiles pour l'année.

Au Canada⁷, chaque année 9000 incendies en moyenne brûlent plus de 2 millions d'hectares de forêts et ces feux de tourbière sont difficiles à éteindre et peuvent durer des mois sous la couche de neige. Il s'agit souvent de feux couvants qui produisent beaucoup de fumée en raison de la combustion incomplète et donnent lieu à des émissions plus importantes de monoxyde de carbone. Les énormes feux du

2 Novelthic Publié le 17 octobre 2020, <https://www.novelthic.fr/actualite/environnement/climat/isr-rse/en-siberie-l-attaque-des-feux-zombies-menace-la-planete-149104.html>

https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2023-07-05

3 L'Express avec l'AFP. 2020. Quatre questions sur le feu de forêt qui ravage la zone de Tchernobyl. Publié le 14/04/2020 à 16:44. https://www.lexpress.fr/monde/europe/quatre-questions-sur-le-feu-de-foret-qui-ravage-la-zone-de-tchernobyl_2123688.html

4 T. Hameau. Feu de tourbes non-stop depuis onze jours à Montoir. Ouest France, 20/07/2019. <https://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/saint-nazaire-44600/feu-de-tourbe-non-stop-depuis-dix-jours-montoir-6452915>

5 <https://www.sudouest.fr/gironde/lacanau/le-feu-de-tourbe-est-un-bourbier-9719185.php>

6 CIRAD. 2019. Communiqué de presse du CIRAD, 03/10/2019 : Incendies récurrents en Indonésie : briser le cercle vicieux. <https://www.cirad.fr/espace-presse/communiqués-de-presse/2019/incendies-indonesie>

7 <https://www.mcan.gc.ca/changements-climatiques/impacts-adaptation/changements-climatiques/carbone-f>

printemps 2023 pourraient mettre en cause les tourbières desséchées.

Au Brésil⁸, la plus vaste région humide du Monde, le Pantanal, qui abrite une faune et une flore exceptionnelles, n'est plus que l'ombre d'elle-même. Plus de 16 000 départs de feu ont été comptabilisés dans la région en 2020. Le chef des Pompiers, le colonel Barroso, les appelle des feux souterrains « *Le feu peut prendre, se propager sous la surface du sol et surgir n'importe où, n'importe quand* ».

En France, tout récemment⁹ « *Les feux progressent en souterrain, donc on éteint un bout, et ça peut ressortir et remettre le feu 200 mètres plus loin* », racontait à l'AFP jeudi 11 août un pompier volontaire des Deux-Sèvres face aux flammes qui ravagent la Gironde. La faute à la tourbe. Car depuis le milieu du XIX^e siècle, les tourbières des Landes ont été asséchées, volontairement. La zone où se déploie aujourd'hui la forêt était autrefois marécageuse. Pour assainir cette zone marécageuse, des arbres avaient été plantés, « *n'avoir planté que des pins résineux, c'est comme avoir planté des allumettes sur des braises* », compare Didier Galop (CNRS-GEODE, Toulouse). « *D'autant qu'à certains endroits des Landes, sous la tourbe, on trouve également du lignite, une roche de charbon* », rappelle Guillaume Bertrand, hydrogéologue et spécialiste des tourbières au laboratoire « chrono-environnement » de Franche-Comté. Les Anglo-Saxons parlent de « feux zombies ». La tourbe hautement inflammable a-t-elle bénéficié de la sécheresse de l'été ?

5.3.5. Impact des changements climatiques dus aux feux de tourbes

Les importants changements climatiques et l'assèchement des milieux humides par le réchauffement climatique actuel, et les actions humaines, accroissent la vulnérabilité générale des tourbières au feu. Les changements climatiques risquent aussi de faire fondre le permafrost des tourbières des régions septentrionales, ce qui pourrait exposer une plus grande quantité de tourbes à la destruction par le feu. Le plus grand danger provient de la fonte du permafrost qui a gelé les sols et la tourbe depuis le Quaternaire et en fondant peut libérer du méthane et prendre feu. Le danger est réel, car si les tourbières du Nord se mettent à brûler à un rythme plus élevé et à une plus grande profondeur, comme cela est observé, on assisterait à la poursuite du réchauffement climatique et à une amplification aux effets catastrophiques des émissions de gaz carbonique et de méthane.

8 Meyerfeld, B. 2020. *Le Pantanal, au Brésil, paradis de biodiversité ravagé par les flammes. Le Monde du 29/09/2020.*

9 Audrey Dufour, *En Gironde les incendies couvent dans la tourbe. La Croix du 12/08/2022.*

6. CONCLUSIONS

Après l'étude détaillée de trois exemples de feux de tourbe à diatomites en Afrique de l'Ouest et de nombreux autres cas de feux de tourbe de par le monde, nous estimons avoir apporté suffisamment de preuves géologiques, pétrographiques, minéralogiques, pédologiques, palynologiques et climatiques pour s'autoriser à affirmer que les feux de tourbe peuvent prendre naissance par auto-combustion.

Si les tourbes constituent une importante source de matière organique et de stockage du carbone, constituée depuis des milliers d'années, ces puits de carbone sont aussi très fragiles, puisque soumis à de nombreux agents perturbateurs naturels et anthropiques dont le feu par auto-combustion, lui-même susceptible de donner naissance à de vastes incendies de forêts.

Les feux naturels de tourbes qui se multiplient et qui sont attribués au réchauffement climatique accroissent bien évidemment les taux d'émission de gaz à effet de serre (en particulier carbone et méthane), d'où leur dangerosité dans le cadre du réchauffement climatique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les relecteurs pour leur suggestions judicieuses et Hélène Paquet pour son appui.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES (2008). Référentiel pédologique. Association française pour l'étude du sol (AFES). Éditions Quæ, Versailles, 405 p.
- Alexandre A., Meunier J.-D., Colin F., Koud J.-M. (1997). Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61 (3), 677-682.
- Anhuf D., Frankenberg P. (1993). Étude du changement végétal saisonnier au Sénégal oriental. *Cahiers d'Outre-Mer*, 183, 297-324.
- Brochier J.-E. (1999). Les phytolithaires. *In*: La Botanique, coll. « Archéologiques », Ed. Errance, 157-170.
- Crevola G., Cantagrel J.-M., Moreau C. (1994). Le volcanisme cénozoïque de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal) : cadre chronologique et géodynamique. *Bull. soc. géol. France*, 165, 5, 437-446.
- El Abass T., Person A., Gérard M., Albouy Y., Sauvage M., Sauvage J.-F., Bertil D. (1993). Arguments géophysiques et géologiques en faveur de manifestations volcaniques récentes dans la région du Lac Faguibine (Mali). *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris, Série II*, 316, 1303-1310.
- Elouard P., Brancart R., Hébrard L. (1976). Notice explicative de la carte géologique de la presqu'île du Cap-Vert au 1:20.000. Feuille de Rufisque. Direction des Mines et de la Géologie. Dakar, Sénégal. 35 p.
- Faure H. (1966). Évolution des grands lacs sahariens à l'Holocène. *Quaternaria*, 8, 165-175.
- Faure H., Mangin E., Nydal R. (1963). Formations lacustres du Quaternaire supérieur du Niger oriental. Diatomées et âges absolus. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 3, 41-63.
- Faure H. (1969). Lacs quaternaires du Sahara. *International Vereinigung für*

- Theoretische und Angewandte Limnologie: Mitteilungen, 17, 131-146.
- Foucault A., Raoult J.-F. (1980). Dictionnaire de Géologie. Masson, Paris. 331 p.
- Frayse F. (2007). Cycle biogéochimique du silicium dans les environnements superficiels continentaux: Impact des plantes terrestres. Thèse Univ. Paul Sabatier, Spécialité: Biogéochimie expérimentale. 205 p.
- GERDAT-COG (1983). Étude de la tourbe du Sénégal. GERDAT-CTFT, Nogent-sur-Marne, 8 p.
- Gumbricht T, Roman-Cuesta R.M., Verchot L., Herold M., Wittmann F., Householder E., Herold N., Muriyasar D. (2017). An expert system model for mapping tropical wetlands and peatlands reveals South America as the largest contributor. *Global Change Biology*. <https://doi.org/10.1111/gcb.13689>
- Hugot G. (1977). Un secteur du quaternaire lacustre mauritanien: Tichitt (Aoucker). Éléments pour servir à une étude géomorphologique. Mémoire Institut Mauritanien Recherche Scientifique, 1, 190 p.
- Jones L.H.P., Handreck K.A. (1967). Silica in Soils, Plants, and Animals. *Advances in Agronomy*, 19, 107-149.
- Karpoff R. (1989). Déformations récentes dans la vallée du Niger. *Géochronique*, 29, 7-8.
- Klein J.-C. (1979). Détermination des causes des anomalies de la crue du Niger. Rapport intermédiaire de la seconde phase d'étude (1977-1979). Rapport interne ORSTOM, Paris, 77 p.
- Lacroix A. (1936). Le Volcan Actif de l'Île de la Réunion et ses produits. Gauthiers-Villard éd., Paris. 297 p.
- Laurent E., Sheere J. (1971). Les silicites. Évolution de la silice. *Bull. Soc. Belge Géol., Paléont., Hydrol.* 80, 80, 3-4, 145-158.
- Leprun J.-C., Trompette R. (1970). Note préliminaire sur les formations quaternaires observées dans l'Aouker (Mauritanie). Rapport ORSTOM, Dakar, 16p. fdi:14358
- Leprun J.-C. (1986). Particularités et évolution des tourbes à diatomées quaternaires de la Presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Symposium INQUA « Changements globaux en Afrique », Dakar, 1986, 251-254.
- Lézine A.-M., Chateaufort J.-J. (1991). Peat in the « Niayes » of Senegal: depositional environment and Holocene evolution. *Journal of African Earth Science*, 12, 171-179.
- Maignien R. (1980). Manuel de prospection pédologique. Initiations et documentations. ORSTOM, Paris, 112 p. et ann. fdi:13826.
- Marinelli G. (1966a). Étude pétrographique d'une scorie du Mali. Doc. Interne non publiée du 7 février 1966. 3 p.
- Marinelli G. (1966b). Observation génétique sur une scorie du Mali. Doc. Interne non publiée du 28 juillet 1966. 2 p.
- Marinelli G. (1979). Lettre personnelle du 24/09, du professeur Giorgio Marinelli, Univ. De Pise (Italie) à J.-C. Leprun à propos des « roches fondues » des Daouanas et du mécanisme d'autocombustion. 1 p.
- Mazière J.-P. (1969). Contribution à l'étude des propriétés physiques et mécaniques de la tourbe. Thèse Doc. Spécialité, Grenoble. 201 p.
- Medus J. (1979). Analyse d'un sol tourbeux de Niayes près de Dakar. *Bulletin Institut Français d'Afrique Noire*, 41, série A, (3), 475-482.
- Meunier J.-D., Alexandre A., Colin F., Braun J.-J. (2001). Intérêt de l'étude du cycle biogéochimique du silicium pour interpréter la dynamique des sols tropicaux. *Bulletin Société Géologique de France*, 172 (5), 533-538.
- Meunier J.-D., Colin F. (2001). Phytoliths: applications in earth sciences and human history. A.A. Balkema Publishers, Lisse, Netherlands, ISBN 90 5809 345X (HB).
- Monod Th. (1958). Majâbat al-Koubrâ Contribution à l'étude de l'« Empty Quarter ouest-saharien ». *Mém. I.F.A.N.*, 52, Dakar, 407 p.
- Monod Th., Palausi G. (1958). Sur la présence dans la région du lac Faguibine (Soudan français) de venues volcaniques d'âge sub-actuel. *Comptes Rendus Académie Sciences*, Paris, 246 (5), 666-668.
- Monod Th., Palausi G. (1961). Sur les manifestations fissurales de laves à néphéline au sud du Lac Faguibine (Mali). *Bulletin Institut Français d'Afrique Noire*, 5, (23), 251-273.
- Mosser Ch. (1980). Étude géochimique de quelques éléments traces dans les argiles des altérations et des sédiments. *Sciences Géologiques*, 63, 229 p.
- Njopwou D., Orliac M. (1979). Note sur le comportement de certains minéraux à l'attaque triacide. *Cahiers ORSTOM Série Pédologie*, 17 (4), 329-337.
- Paycheng C. (1980). Méthodes d'analyses utilisées au Laboratoire commun de Dakar (Sénégal). Rapport multig. ORSTOM Dakar, 98 p.
- Paycheng C., Marius C., Lopez J. (1976). La détermination du soufre et de ses composés au Laboratoire ORSTOM de Dakar. Rapport multig. ORSTOM, Dakar, 15 p.
- Raunet M. (1991). Le milieu physique et les sols de l'Île de La Réunion. Conséquences sur la mise en valeur agricole. Cirad, Montpellier, 515 p.
- Pédro G. (1986). Intérêt géochimique et signification minéralogique du paramètre moléculaire $K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dans l'étude des latérites et bauxites. *Bulletin du Groupe Français des Argiles*, 18, (13), 19-31.
- Riquier J. (1960a). Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance: Île de la Réunion. Tananarive-Tsimbazaza (MDG): IRSM, Institut de recherche scientifique de Madagascar, 72 p.
- Riquier J. (1960b). Les Phytolithes de certains sols tropicaux et des podzols. 7th International Congress of Soil Science, Madison, Wisconsin, International Society of Soil Science, 60, 425-431.
- Rocher Ph. (1994). Mémento des roches et matériaux industriels. Diatomites. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, Département Procédés et Analyses. 60 p.
- Ropercha P., Gattacceca J., Millarca M.C., Devouar B., Lorand J.-P., Arriagad C., Rochet P. (2017). Surface vitrification caused by natural fires in Late Pleistocene wetlands of the Atacama Desert. *Earth Planetary Science Letters*, 469, 15-26.
- Sauvage F., Sauvage M. (1992). Tectonique, néotectonique et phénomènes ignées à l'extrémité est du fossé de Nara (Mali). *Journal African Earth Science*, 15, (1), 11-33.
- Servant M. (1967). Nouvelles données stratigraphiques sur le Quaternaire supérieur au Nord-Est du Lac Tchad (Kanem). Actes du Congrès Panafricain de Préhistoire et de l'Étude du Quaternaire, 6, Dakar, Sénégal. fdi:13533
- Servant-Vildary S. (1978). Étude des diatomées et paléolimnologie du Bassin tchadien au Cénozoïque supérieur. Travaux et Documents ORSTOM, Paris, 84, 2 vol., 346 p.
- Sommer U., Sommer F. (2006). Cladocerans versus copepods: the cause of contrasting top-down controls on freshwater and marine phytoplankton. *Oecologia*, 147, 183-94.
- Svensen H., Dysthe D.C., Bandlien E.H., Sacko S., Coulibaly H., Planke S. (2003). Subsurface combustion in Mali: Refutation of the active volcanism hypothesis in West Africa. *Geology*, 31, (7), 581-584.
- Trompette R., Manguin A., Anguin E. (1967). Nouvelles observations sur le Quaternaire lacustre de l'extrémité sud-est de l'Adrar de Mauritanie (Sahara occidentale). Actes du VI^e Congrès Panafricain Préhistoire et Quaternaire, Dakar.
- Van Cappellen Ph. (2003). Biomineralization and Global Biogeochemical Cycles. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54, (1), 357-381.
- Vieillefont J. (1977). Les sols de mangroves et des tannes de basse Casamance (Sénégal): importance du comportement géochimique du soufre dans leur pédogenèse. *Mém. ORSTOM n°83*, Paris, 298 p.
- Wolf J.-P. (1964). Carte géologique du Tchad. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Orléans.

