

Caracterisation Geochimique des Deblais du Substratum de la Baie du Banco, Abidjan, Basse Cote d'Ivoire

Yao Diby Ferdinand
Assale Fori Jean Paul
Alla Amani Jonas
Digbehi Zeli Bruno

Université Félix Houphouët Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire de Géologie, Ressources Minérales et Energétiques (LGRME) Abidjan, Côte d'Ivoire

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n36p124](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n36p124)

Submitted: 19 October 2023
Accepted: 05 December 2023
Published: 31 December 2023

Copyright 2023 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Yao D.F., Assale F.J.P., Alla A.J. & Digbehi Z.B. (2023). *Caracterisation Geochimique des Deblais du Substratum de la Baie du Banco, Abidjan, Basse Cote d'Ivoire*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (36), 124. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n36p124>

Résumé

L'étude géochimique réalisée s'est effectuée sur les déblais du substratum de la baie du Banco situé au Sud-est du bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire. Cette étude vise à caractériser le substratum de la baie du Banco à partir des éléments chimiques ainsi que la détermination des paléoconditions des environnements de dépôt. La spectrométrie par fluorescence à rayon x (XRF) a permis de déterminer les éléments majeurs ainsi que des éléments traces présents dans les lutites noirâtres du substratum de la baie. Les éléments majeurs identifiés sont par ordre décroissant le Silicium (45,33 %), le Fer (35,56 %), l'Aluminium (9,24 %), le Potassium (2,31 %), le Calcium (2,22 %), le Titane (2,15 %), le Chlore (2,04 %) et le Phosphore (1,12 %). L'analyse géostatistique a permis de mettre en évidence de fortes corrélations entre la matière organique et le fer réduit (Fe²⁺), l'étain (Sn), l'arsenic (As) et le soufre (S). Le substratum de la baie du Banco est caractérisé par une forte concentration en soufre variant de 12475 à 75752 ppm et une bioproduktivité primaire plus importante en profondeur qu'en surface. Les éléments traces U, V et Mo ont permis d'identifier un milieu euxinique à interface eau-sédiment en subsurface du substratum (0- 32 m) tandis qu'en fin de forage (78-80 m), on distingue un milieu suboxique à anoxique. Ces

différents résultats ont permis de caractériser le substratum de la baie du Banco.

Mots-clés: Géochimie, Paléoconditions, Substratum, baie du Banco, Côte d'Ivoire

Geochemical Characterization of Substrate Spoils in Banco Bay, Abidjan, Ivory Coast

*Yao Diby Ferdinand
Assale Fori Jean Paul
Alla Amani Jonas
Digbehi Zeli Bruno*

Université Félix Houphouët Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire de Géologie, Ressources Minérales et Energétiques (LGRME) Abidjan, Côte d'Ivoire

Abstract

The geochemical study was carried out on cuttings from the Banco Bay bedrock in the southeastern part of the Côte d'Ivoire coastal sedimentary basin. The study aimed to characterize the Banco Bay bedrock based on chemical elements and to determine the paleo conditions of the depositional environments. X-ray fluorescence spectrometry (XRF) was used to determine the major and trace elements present in the blackish lutites of the bay bedrock. The major elements identified were, in descending order, Silicon (45.33%), Iron (35.56%), Aluminium (9.24%), Potassium (2.31%), Calcium (2.22%), Titanium (2.15%), Chlorine (2.04%) and Phosphorus (1.12%). Geostatistical analysis revealed strong correlations between organic matter and reduced iron (Fe 2+), tin (Sn), arsenic (As), and sulfur (S). The Banco Bay bedrock is characterized by high sulfur concentrations ranging from 12475 to 75752 ppm, and higher primary bioproductivity at depth than at the surface. Trace elements U, V, and Mo identified an euxinic environment at the water-sediment interface in the subsurface of the bedrock (0-32 m), while at the end of the borehole (78-80 m), a suboxic to anoxic environment was distinguished. These results have enabled us to characterize the bedrock of the Banco Bay.

Keywords: Geochemistry, Paleoconditions, Substratum, Banco Bay, Ivory Coast

Introduction

Les bassins sédimentaires se définissent comme une dépression de la croûte terrestre (continentale ou océanique) où s'accumulent des sédiments. Sous l'effet du poids, ces sédiments s'enfoncent et se transforment en roches sédimentaires par diagenèse. Ces bassins sédimentaires présentent en général, un intérêt socio-économique et scientifique important. En effet, ils renferment les ressources hydro-énergétiques, des substrats sédimentaires utiles à la fabrication des produits de première nécessité pour l'homme. Ils permettent également de reconstituer l'histoire de la vie au cours des temps géologiques ainsi que l'évolution des paléoenvironnements (Boga *et al.*, 2017).

En Côte d'Ivoire, la plupart des études effectuées sur le bassin ont porté sur les formations anciennes d'âges crétacé-tertiaires ayant des intérêts pétroliers et hydrogéologiques avérés. Dans le bassin sédimentaire immergé de Côte d'Ivoire, différents travaux ont été réalisés (Digbehi *et al.*, 2001 ; Bamba *et al.*, 2011 ; Bié *et al.*, 2012 ; Yao, 2014 ; Kouassi, 2014 ; Kessé, 2016) et qui ont conduit à une meilleure connaissance de cette partie du bassin. Plusieurs études ont été également réalisées dans le bassin sédimentaire côtier, (Yao (2012) ; Assalé (2013) ; Gbangbo *et al.* (2012)). En ce qui concerne les terrains beaucoup plus récents, du quaternaire à l'actuel, les travaux antérieurs ont montré qu'au cours du quaternaire, dans la partie émergée du bassin ivoirien se sont développées des lagunes durant la dernière régression (18000 BP). Ces lagunes ont occupé des dépressions côtières situées au-dessous du niveau moyen des océans ayant une communication permanente ou temporaire. Ce sont donc des zones de transition entre le milieu marin et le milieu continental. Dans la partie émergée du bassin ivoirien, précisément dans le domaine lagunaire, les recherches ont porté essentiellement sur les dépôts superficiels des vases lagunaires soit pour une étude de la pollution ou soit pour la compréhension de la dynamique sédimentaire actuelle au niveau du littoral Diangoné *et al.* (2020), Irié *et al.* (2015). Néanmoins, Des travaux sur la lithostratigraphie et la granulométrie ont été effectués sur le substratum de la baie du Banco (Yao, 2022). Cependant, une approche géochimique dans l'étude du substratum de la baie du Banco demeure primordiale dans la caractérisation de cette baie. L'objectif de cette étude est de caractériser le substratum de la baie du Banco à partir de la géochimie inorganique et déterminer les différents paléoenvironnements.

1. Présentation de la zone d'étude

La baie de Banco est située au Sud-est du bassin sédimentaire côtier ivoirien (Figure 1). Cette partie (onshore) du bassin est très étroite à l'Ouest mais atteint 35 km de large au niveau d'Abidjan. Ce bassin est traversé d'Ouest en Est par une faille majeure, appelée « faille des lagunes » qui le divise en deux entités :

- Au Nord de cette faille, les formations sont moins épaisses et formées des dépôts d'âge du «continental terminal» constitués d'argiles, de sables argileux et de grès plus ou moins ferrugineux (Digbéhi, 1987).
- Au Sud, les formations qui affleurent sont plus épaisses et sont recouvertes par des dépôts quaternaires (Affian, 1986) composés de sables blancs et sable argileux continentaux, cordons sableux, de sables, d'argilites fluvio-lagunaire et des sables marins.

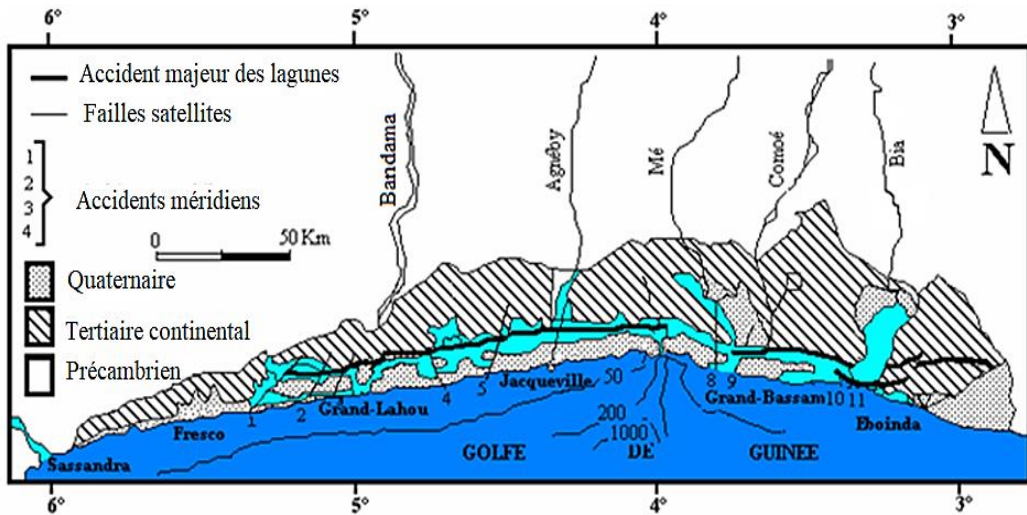


Figure 1. Bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire (Aka, 1991 ; in Koffi Bi, 2009)

2. Localisation des sondages

Les déblais proviennent de cinq (5) sondages exécutés dans la baie du Banco dans le cadre du projet de construction du 4ème pont d'Abidjan, Côte d'Ivoire (Figure 2). Trois (3) sondages ont été utilisés dans le cadre de cette étude. Il s'agit des forages DIBY-1, DIBY-2 et DIBY-3.

Tableau 1. Coordonnées géographiques des différents sondages en UTM

SONDAGES	LONGITUDE (m)	LATITUDE (m)
DIBY-1	384777,68	590044,895
DIBY-2	385015,274	590174,303
DIBY-3	385082,206	590236,894

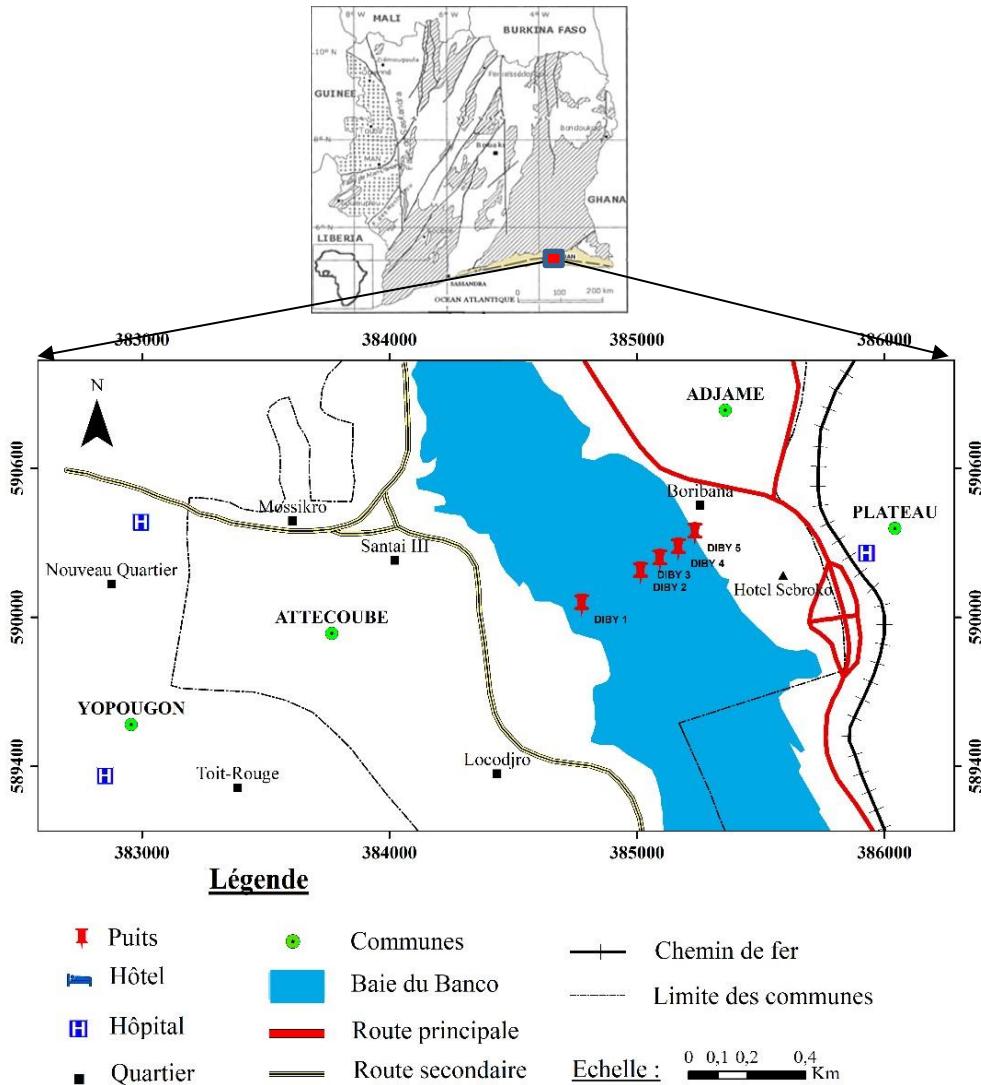


Figure 2. Localisation des différents forages

3. Matériel et méthode

Le matériel utilisé dans le cadre de ce travail est le spectromètre à fluorescence X (XRF) portable. Ce matériel permet une analyse chimique non destructive qualitative et semi-quantitative utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. En effet, chaque élément chimique est caractérisé par un spectre de fluorescence X spécifique. L'analyse du spectre de chaque élément chimique permet d'identifier cet élément ainsi que sa concentration dans l'échantillon. Deux analyses simultanées de durées

différentes sont effectuées sur l'échantillon et les résultats de ces analyses insérés dans un classeur Excel :

- une première analyse pour déterminer les éléments traces contenus dans les lutites sombres (Durée : 90s, Unité : en ppm).
- une deuxième analyse pour déterminer les éléments majeurs contenus dans les lutites sombres (Durée : 120s, Unité : en %).

Les analyses univariée et multivariée ont été réalisées avec le langage de programmation R. Ces analyses ont mis en évidence la dynamique des éléments chimiques dans le milieu en fonction de la concentration de la matière organique. L'identification des éléments chimiques caractéristiques a permis d'être renseigné sur les paléoconditions des milieux de dépôt.

4. Résultats et interprétations

4.1. Composition chimique des lutites

4.1.1. Analyse des éléments majeurs

Les différents éléments majeurs ainsi que leurs concentrations en pourcentage d'oxydes dans les lutites noirâtres du substratum de la baie du Banco sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Pourcentage d'oxyde des éléments majeurs dans les forages DIBY

Eléments	Fe	Ti	Ca	K	Al	P	Si	Cl
D1-01 m	43,114	3,882	8,528	3,133	5,296	0	33,27	2,777
D2-20 m	27,387	2,23	1,717	2,031	12,348	1,947	47,929	4,411
D2-26 m	27,66	1,671	0,68	1,575	8,625	1,228	54,6	3,961
D2-32 m	16,591	3,332	0,575	1,204	13,112	1,773	63,413	0
D2-80 m	84,84	0,548	0,449	1,639	2,895	0	9,366	0,263
D3-19 m	31,31	1,766	2,132	2,45	9,739	1,77	47,915	2,918
D3-79 m	18,07	1,668	1,454	4,137	12,711	1,124	60,836	0
MOYENNE	35,56	2,15	2,22	2,31	9,24	1,12	45,33	2,04

Les éléments majeurs identifiés dans les lutites noirâtres du substratum de la baie du Banco sont le fer (Fe), le titane (Ti), le calcium (Ca), le potassium (P), l'aluminium (Al), le phosphore (P), le silicium (Si) et le chlore (Cl). Les concentrations moyennes des éléments majeurs donnent les statistiques suivantes : le silicium (45,33 %), le fer (35,56 %) et Al (9,24 %) avec des concentrations qui varient respectivement de (9,36 à 63,41 %) ; (18,07 à 84,84 %) et de (2,89 à 13,11 %) dans les puits DIBY. Le phosphore est le moins abondant avec une moyenne de 1,12 %. Le chlore, le titane, le calcium, et le potassium sont très faibles dans les échantillons. Leurs concentrations moyennes évoluent de 2,04 à 2,31 %.

L'élément majeur le plus important dans ces lutites est le silicium (Figure 3) avec une proportion moyenne de 45,33 %. Cette forte concentration serait

liée à l'abondance du quartz d'où proviendrait le silicium fortement concentré dans les lutites. L'aluminium est un élément chimique qui caractérise les apports continentaux. Il a une proportion moyenne plus importante (9,24%) que celle du calcium qui caractérise les apports marins avec une moyenne de (2,22%). Les concentrations moyennes des éléments Al et Ca identifiés dans le milieu indiquent que les apports continentaux des sédiments dominent largement sur les apports marins dans la baie du Banco.

Les lutites grises à noires sont riches en matières organiques dont le taux dans le forage DIBY-2 atteint les 56,83%. La quantité de fer exprimée dans ces lutites grises à noires (35,56 %) provient donc du fer réduit (Fe^{2+}) et non du fer oxydé (Fe^{3+}) au regard du milieu qui est réducteur (conservation de la matière organique). Plus la quantité de matière organique est élevée et plus le (Fe^{2+}) est exprimé.

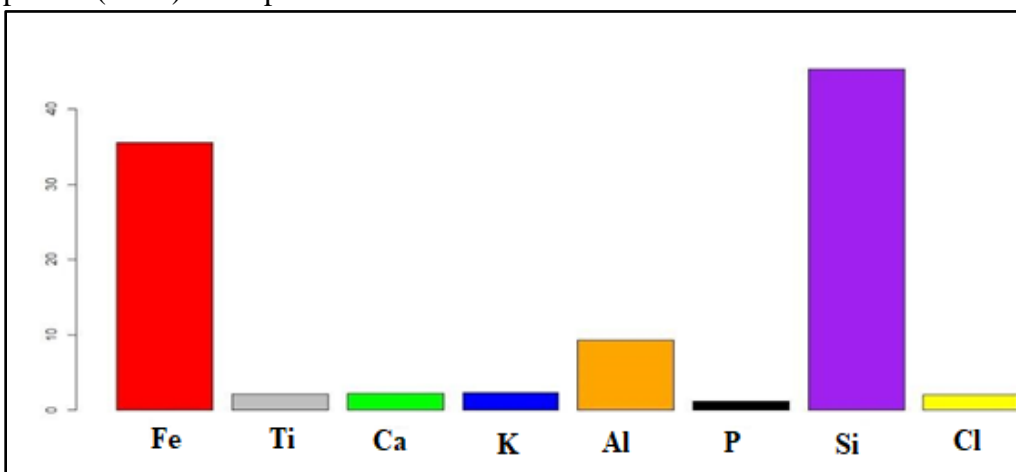


Figure 3. Éléments majeurs des puits DIBY

3.1.2. Analyse des éléments traces

Les éléments traces identifiés dans les lutites sombres de la baie du Banco sont présentés dans le tableau 3. Ces éléments sont le molybdène (15,94 ppm), le zircon (118,12ppm), l'uranium (10,25 ppm), le strontium (55,46 ppm), le rubidium (28,66 ppm), le thorium (11,73 ppm), le plomb (14,67 ppm), l'arsenic (24,34ppm), le zinc (38,82 ppm), le cuivre (24,39 ppm), le nickel (90,48 ppm), le chrome (93,07 ppm), le vanadium (141,33 ppm), le soufre (24376) et le baryum (154,6 ppm), l'étain (39,48 ppm). Les lutites étudiées dans les différents puits sont très riches en soufre (Figure 4) dont la concentration moyenne est de 24375,57 ppm avec des valeurs allant de 12475 à 75752 ppm.

Tableau 3. Proportion des éléments traces en ppm dans les puits DIBY

Eléments	Mo	Zr	Sr	U	Rb	Th	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Cr	V	S	Ba	Cs	Sn
D1-01 m	48,51	270,76	81,83	11,55	22,95	15,36	21,95	10,69	32,01	27,03	< LOD	110,7	140,2	17190	58,32	< LOD	< LOD
D2-20 m	4,83	215,89	64,27	< LOD	36,14	12,74	13,54	6,49	44,4	26,5	< LOD	96,95	157,4	14520	< LOD	< LOD	< LOD
D2-26 m	8,7	168,98	56,78	< LOD	27,1	9,82	15,09	< LOD	30,13	17,38	< LOD	83,38	117,2	19990	< LOD	< LOD	< LOD
D2-32 m	10,57	323,68	32,36	13,11	9,1	10,14	10,4	< LOD	< LOD	20,3	< LOD	63,36	121,7	12664	< LOD	< LOD	< LOD
D2-80 m	< LOD	67,26	22,1	8,11	14,94	< LOD	14,36	74,74	< LOD	< LOD	133,63	88,42	181,2	75752	196,7	70,21	39,43
D3-19 m	7,11	161,1	65,76	8,24	32,99	14,87	10,24	< LOD	44,48	25,06	< LOD	95,19	117,3	18038	< LOD	< LOD	< LOD
D3-79 m	< LOD	179,14	65,13	< LOD	57,41	7,45	17,1	5,47	43,08	30,12	47,37	113,5	154,3	12475	208,7	33,62	< LOD
Moyenne	15,94	118,12	55,46	10,25	28,66	11,73	14,67	24,34	38,82	24,39	90,48	93,07	141,3	24376	154,6	51,92	39,43

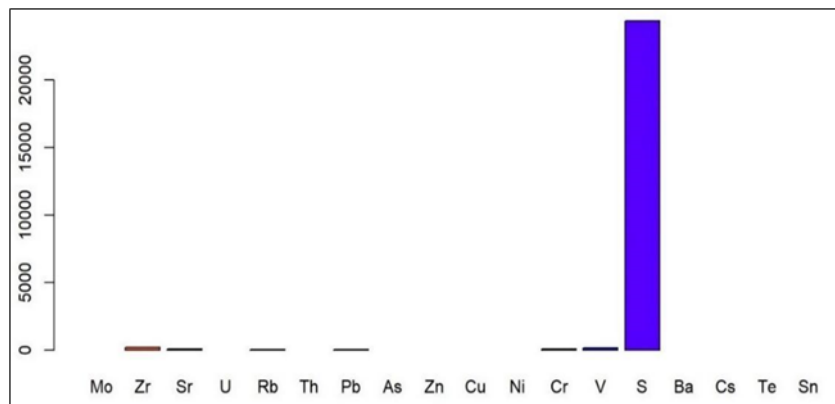


Figure 4. Élément soufre dans les lutites étudiées

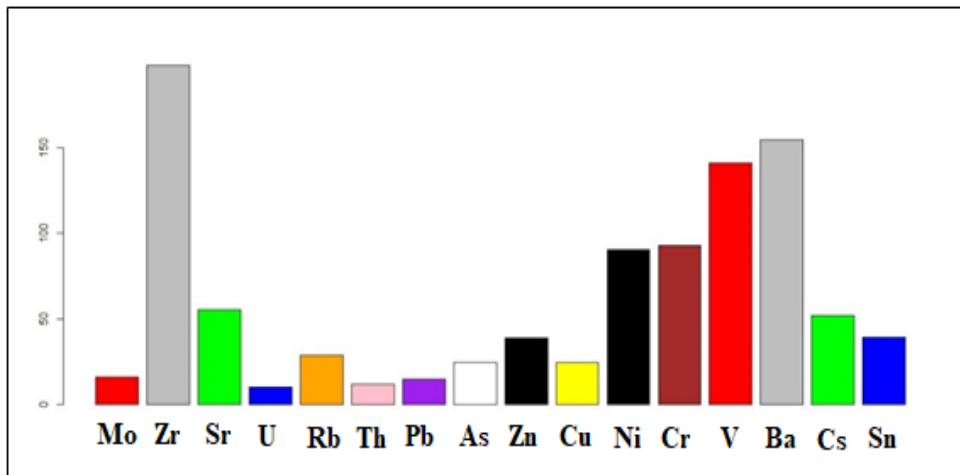


Figure 5. Éléments traces sans le soufre dans les lutites étudiées

3.2. Statistiques multivariées des éléments chimiques

3.2.1. Statistique multivariée des éléments majeurs

3.2.1.1. Corrélation entre les variables des éléments majeurs

On distingue deux types de corrélation entre les différentes variables des éléments majeurs: la corrélation positive et la corrélation négative (Figure 6). Les corrélations entre les différentes variables ont permis de les regrouper selon les affinités entre elles et la matière organique.

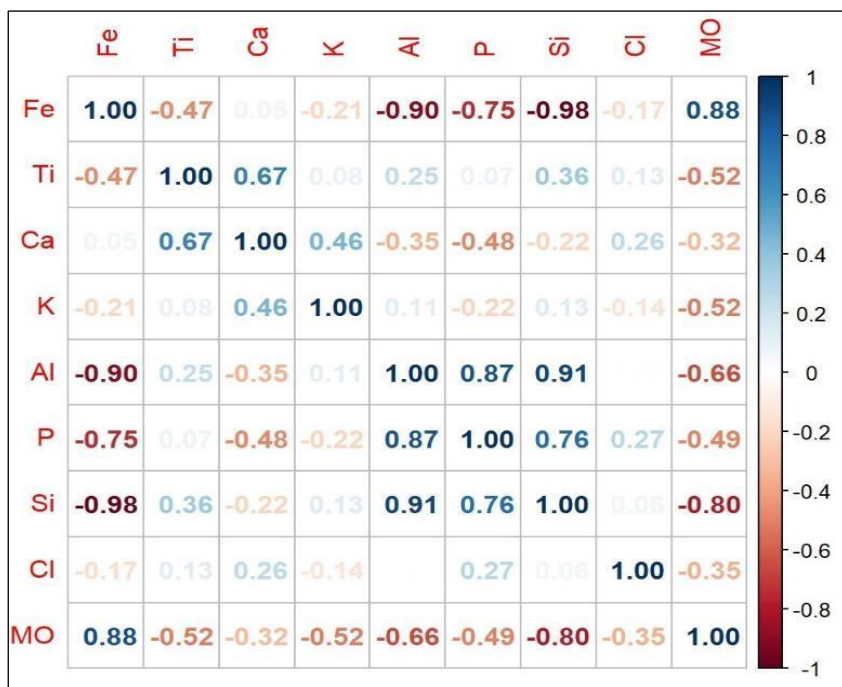


Figure 6. Corrélation des variables des éléments majeurs et la matière organique (Mo)

3.2.1.2. Analyse en Composante Principale (ACP) des éléments majeurs

L'analyse en composante principale utilisée dans cette étude a permis de mettre en évidence la répartition des éléments majeurs dans un milieu réducteur à différentes concentrations de matière organique. Les deux premiers axes nommés Dimension 1 et Dimension 2 (Dim 1 et Dim2) expliquent clairement les huit (09) individus étudiés à 77,9 % (Figure 7); ce qui est suffisant pour l'interprétation des données étudiées. Les résultats de l'ACP ont permis de mettre en évidence certaines relations entre ces variables en les regroupant en quatre groupes suivant : groupe 1, groupe 2, groupe 3 et groupe 4. Ces variables sont représentées par : le fer, le titane, le calcium, le potassium, l'aluminium, le phosphore, le silicium, le chlore et la matière organique.

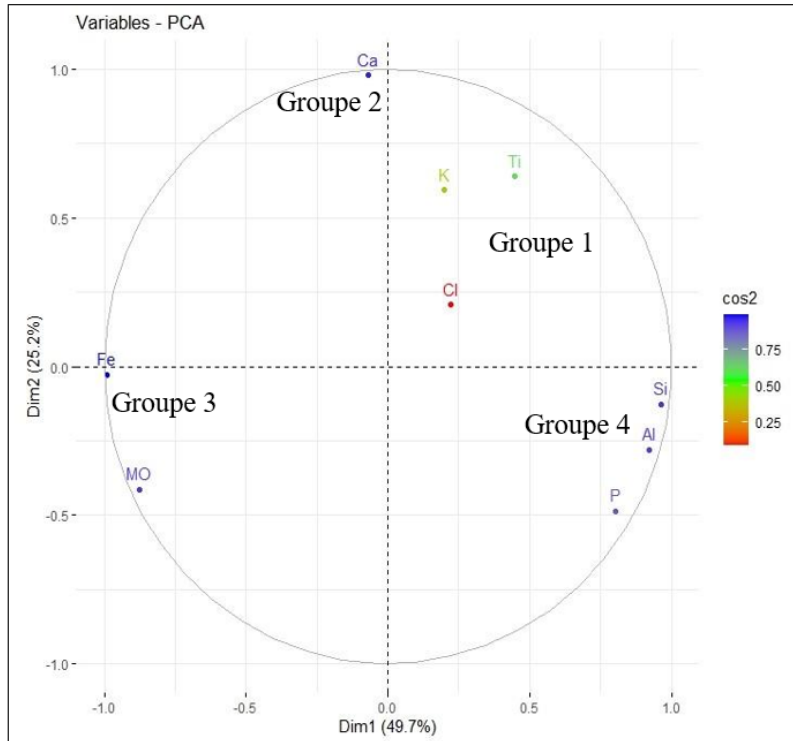


Figure 7. ACP des 09 variables des forages DIBY

➤ **Groupe 1**

Ce groupe est constitué de deux variables que sont : K, Ti avec une corrélation moyenne 0,50. Néanmoins ces deux variables sont regroupées selon leurs affinités. Ce groupe comprendra tous les individus ayant une affinité positive avec ces variables dans une corrélation moyenne. Ce groupe de variables chimiques ne favorise pas la concentration et la préservation de la matière organique. Leur présence dans un milieu indiquera une faible présence voire une absence de la matière organique dans le milieu. Ce milieu pourrait être suboxydé.

➤ **Groupe 2**

Ce groupe contient une seule variable qui est le Ca. Il n'y a pas d'affinité entre le calcium et les autres éléments chimiques présents dans le milieu. Cette variable se situe à proximité de l'axe 1 dans la partie positive. Ce groupe comprendra les variables qui ont une forte affinité avec le Ca et qui se concentreraient dans un milieu calme, peu profond favorisant le dépôt des minéraux carbonatés.

➤ **Groupe 3**

Ce groupe contient deux éléments à savoir le Fe et la Mo. Ces deux variables ont une forte corrélation positive (0,88). La liaison Fe-Mo met en

évidence une forte affinité entre ces deux variables. Cette affinité se caractérise par l'accumulation de la matière organique dans un environnement réducteur riche en minéraux de fer. Tous les individus qui vont se retrouver dans ce groupe auront une forte affinité et également une forte concentration en Fe^{2+} . Le Fer réduit Fe^{2+} permet la concentration et la préservation de la matière organique.

➤ **Groupe 4**

Dans ce groupe, on a trois variables : Si, Al, et P. Ces trois variables ont une forte corrélation allant de (0,76) à (0,91). Ce groupe va contenir les individus ayant une forte affinité aux trois variables précitées. Les individus dans ce groupe se concentreront dans un milieu à forte influence continentale.

▪ **Relation avec les différents groupes**

Deux relations significatives existent entre les différents groupes déterminés par l'ACP des éléments majeurs. Une relation entre le groupe 3 et le groupe 4 et une autre d'opposition entre les groupes 2 et 4. La relation entre les groupes 2 et 4 les oppose sur l'axe 2 (Dim 2) dans une corrélation négative. Au niveau de ces deux groupes, il existe une véritable corrélation négative entre les variables situées dans le groupe 4 et celles du groupe 3. On peut observer et noter que plus la concentration de Si, Al et P augmentent dans le milieu, la quantité de Fe et de Mo diminue et vice versa lorsque la concentration de Fe et Mo augmente, le taux de Si, Al et P diminuent également dans le milieu. Dans la deuxième relation entre les groupes 2 et 4, on note deux environnements de dépôt distincts. Le groupe 2 contenant les minéraux carbonatés indique un environnement calme, chaud, peu profond. Quant au groupe 4 contenant les variables Si, Al et P, il indiquerait un milieu turbulent à forte influence continentale.

3.2.1.3. Regroupement des classes (Clustering des individus)

Le regroupement des classes permet de ranger les individus en 3 classes ou clusters : cluster 1 ; cluster 2 et cluster 3 (Figure 8).

▪ **Cluster 1**

Cette classe est constituée d'un individu D2-80. C'est la seule classe qui contient le taux le plus élevé de matière organique (Mo). Elle contient également la concentration la plus importante de minéraux de fer réduit Fe^{2+} . Cette classe va correspondre au regroupement d'individus ayant une forte concentration en matière organique Mo et en (Fe^{2+}) milieu réducteur propice à la concentration de la matière organique.

▪ **Cluster 2**

Cette classe est également constituée d'un seul individu D1-1 qui est isolé des autres. Cette classe se distingue des autres par sa concentration la plus élevée en Ca (8,53%). Le taux en Fe est important (43,11%). On note également un faible taux de matière organique (8,78%). Cette classe va

regrouper les individus qui ont un fort taux de calcium et une faible concentration en matière organique. Cet échantillon pourrait contenir des carbonates de calcium sous forme de microfossiles.

▪ **Cluster 3**

Ce cluster comporte 5 individus qui sont : D2-20 ; D2-26 ; D2-32 ; D3-19 ; D3-79. Ces différents individus regroupés dans ce cluster ont une forte concentration en Silicium et en Aluminium. On note également une concentration de Phosphore déterminée dans ces individus tandis que les autres individus ont une très faible concentration en Phosphore. Le taux de matière organique de ces individus est relativement faible et on note une baisse importante de la concentration de fer. Ce dernier cluster va donc regrouper les individus qui ont une forte proportion en silicium, aluminium, phosphore et dont les pourcentages en fer et matière organique sont faibles. La particularité de ce cluster c'est que tous les individus contiennent du phosphore.

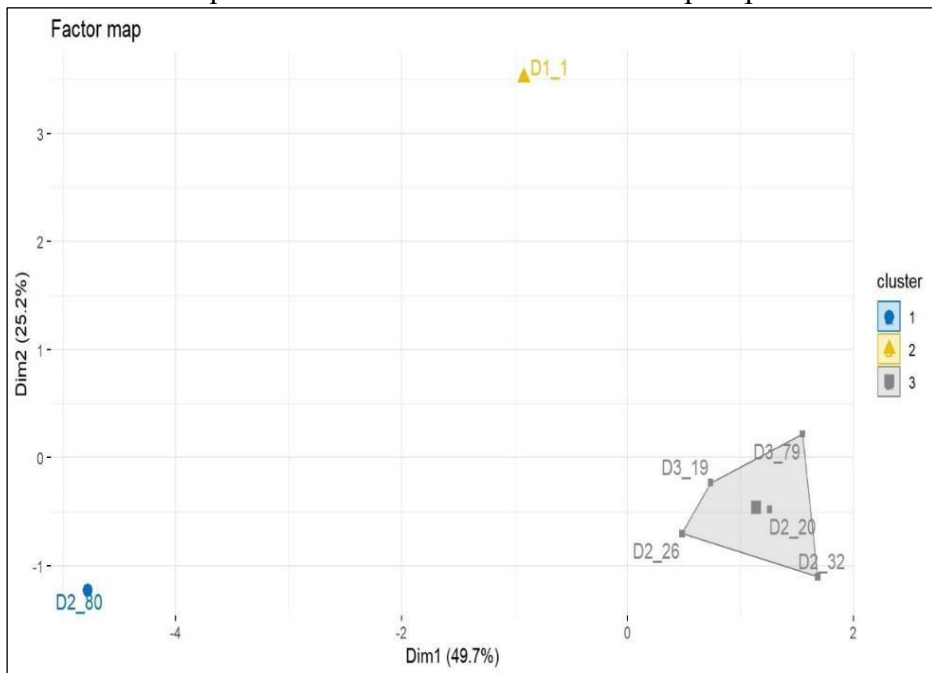


Figure 8 : Clustering des sédiments du substratum de la baie du Banco

3.2.1.4. Classification ascendante hiérarchique (CAH)

Cette classification permet de regrouper les puits DIBY selon leurs affinités aux différentes variables (Figure 9). Elle a permis de séparer les forages en 2 grandes classes. La première classe contient uniquement le puits D2-80 avec le taux le plus élevé de matière organique. Tous les individus qui vont appartenir à cette classe seront les individus riches en matière organique et en Fer 2+. La deuxième classe regroupe 2 groupes. Le premier groupe contient uniquement le forage D1-1 qui a la concentration la plus élevée en

calcium (Ca). Le groupe 1 rassemble les forages qui contiennent des carbonates de calcium en microfossiles. Le groupe 2 comprend 5 forages. Ces forages ont tous un taux élevé de silicium et d'aluminium et contiennent tous du phosphore.

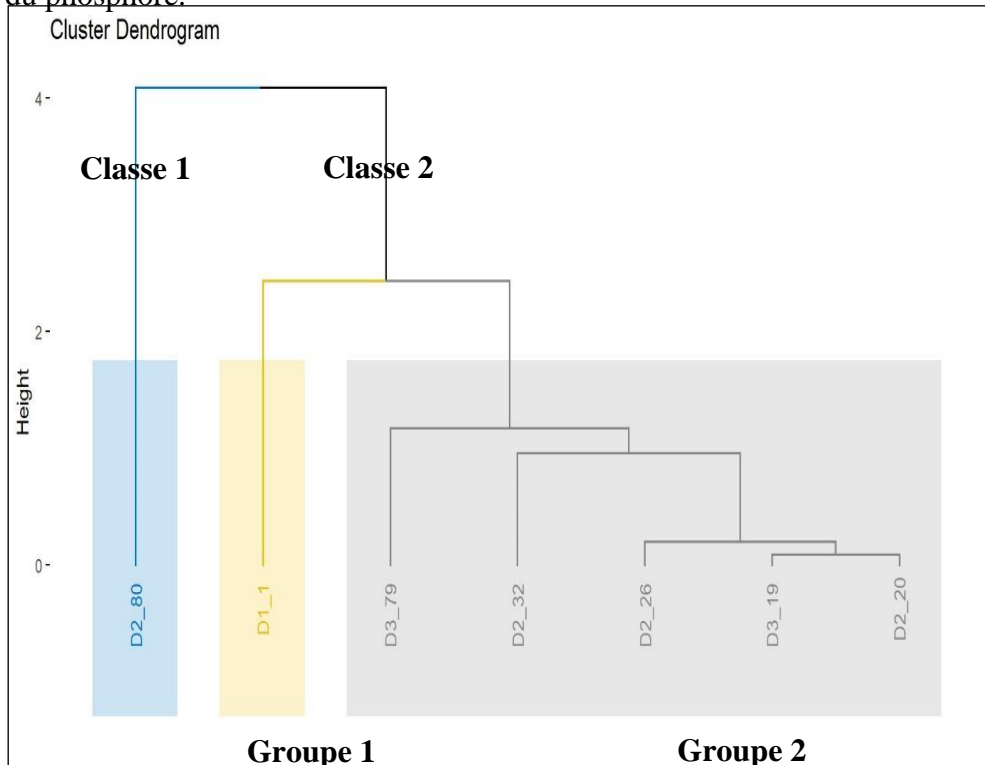


Figure 9. Classification Hiérarchique Ascendante des éléments majeurs du substratum de la baie du Banco

3.2.2. Statistique multivariée des éléments traces

3.2.2.1. Corrélation entre les variables des éléments traces

Deux types de corrélation existent également entre les différentes variables des éléments traces : la corrélation positive marquée par la couleur bleue foncée et la corrélation négative marquée par la couleur rouge foncée (Figure 10).

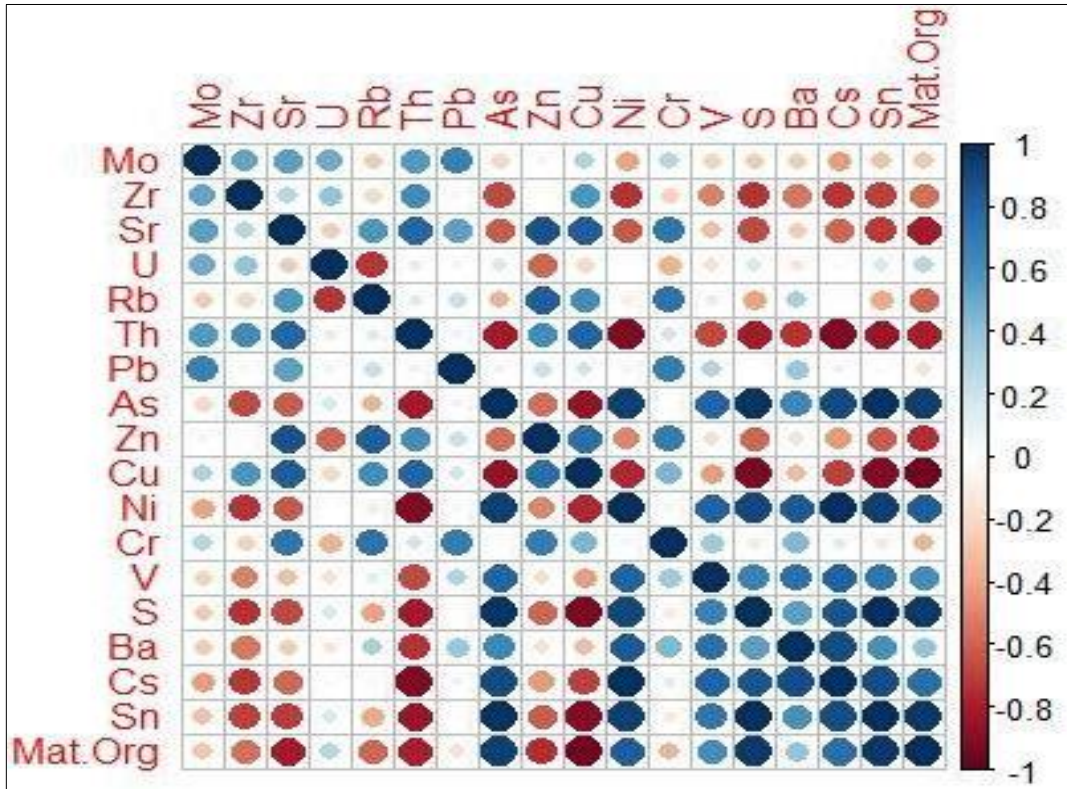


Figure 10. Corrélation des éléments traces du substratum de la baie du Banco

3.2.2.2. Analyse en Composante Principale (ACP) des éléments traces

Les deux premiers axes Dim 1 et Dim 2 définis par l'ACP des éléments traces permettent d'expliquer valablement les 18 variables étudiées à 78 %. Ce qui est largement suffisant pour l'interprétation de ces données (Figure 11). L'ACP permet de regrouper les 18 variables en 3 groupes qui sont : le groupe 1, le groupe 2 et le groupe 3.

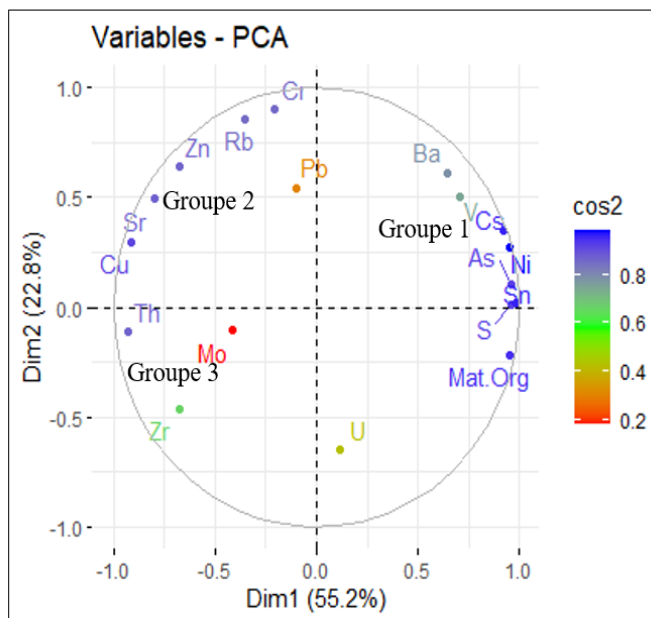


Figure 11. ACP des 17 variables traces des forages DIBY

➤ Groupe 1

Le groupe 1 est constitué de (08) variables qui sont : S, Sn, As, Ni, Cs, V, Ba et Mat Org. Les corrélations entre ces différentes variables sont moyennes à très fortes et se situent dans l'axe positif (Dim 2). Le regroupement de ces variables dans le groupe 1 suggère une très forte affinité entre ces éléments et la matière organique. Les échantillons de ce groupe auront une forte concentration en matière organique, en soufre et présenteront une bonne bioproduktivité primaire.

➤ Groupe 2

Ce groupe contient (06) variables qui sont : Cr, Rb, Zn, Sr, Cu et Th. Les corrélations entre ces variables sont fortes à très fortes. Les éléments de ce groupe vont contenir de faibles concentrations de matières organiques avec de fortes corrélations en ses différentes variables.

➤ Groupe 3

Le groupe 3 contient (2) variables qui sont Zr et U. La corrélation dans ce groupe est faible à moyenne. Les sédiments de ce groupe auront une forte concentration en zirconium avec une présence d'uranium.

➤ Relation avec les différents groupes

La relation importante et significative existante est la relation d'opposition entre les groupes 1 et 2. Dans cette relation, on note que plus la concentration de la matière organique augmente ainsi que les éléments traces Sn, As, Ni, Cs, V et Ba dans le milieu, on assiste à une baisse des éléments Th, Cu et Sr.

3.2.2.3. Regroupement des classes (Clustering des individus)

Le clustering permet de classer les individus représentés par les différents puits DIBY étudiés en quatre classes ou clusters. On a le cluster 1, le cluster 2, le cluster 3 et le cluster 4 (Figure 12).

- **Cluster 1**

Il est constitué d'un seul élément D1-1. Il se distingue des autres échantillons par son taux le plus élevé en Molybdène et en Strontium.

- **Cluster 2**

Ce cluster comprend quatre éléments qui sont D2-20 ; D2-26 ; D3-19 ; D3-79. Les éléments de ce cluster contiennent tous le plomb de concentration considérable.

- **Cluster 3**

Il contient un seul élément à savoir D2-32. Ce cluster va regrouper les échantillons fortement concentré en zirconium (Zr) et Uranium (U).

- **Cluster 4**

Le cluster 4 comprend un seul élément qu'est D2-80. Il va caractériser les échantillons qui ont une forte concentration en matière organique, soufre et présentant également une bonne bioproduktivité primaire.

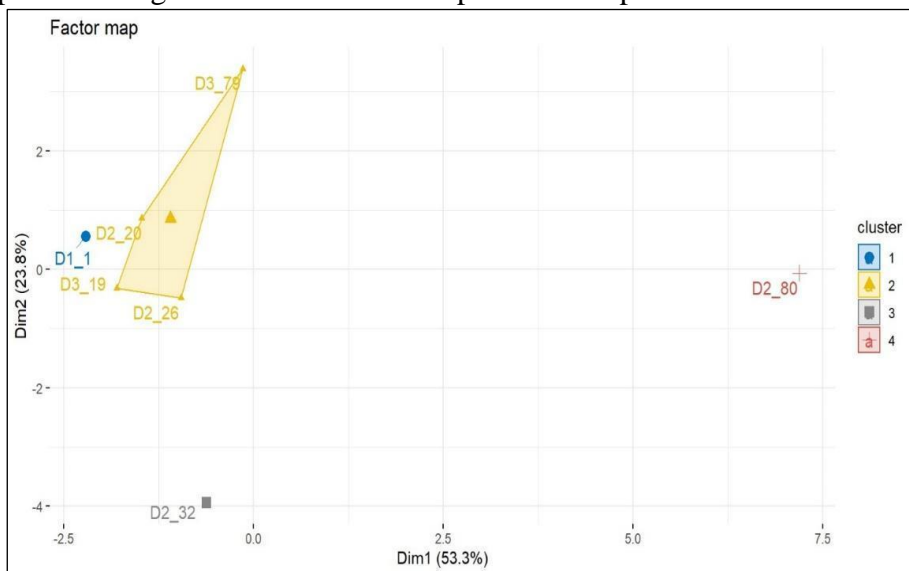


Figure 12. Clustering des sédiments du substratum de la baie du Banco

3.2.2.4. Classification ascendante hiérarchique (CAH)

La CAH permet de comprendre les affinités existantes entre les individus et les différents clusters qui ont été déterminés (Figure 13). Elle a permis de séparer les clusters en deux grandes classes. La classe 1 comprend un seul individu D2-80 qui a le taux de Mo le plus élevé des puits et qui a une forte affinité avec les variables S et Sn. La classe 2 comprend les autres

individus avec les taux de Mo inférieurs à ceux de la classe 1 et qui vont se regrouper dans les sous-classes en fonction de leurs concentrations dans les autres éléments chimiques. La classe 2 comprend 3 sous-classes. La sous-classe 1 comprend l'individu D2-32 qui est le deuxième puits ayant une forte concentration en Molybdène et zirconium. La sous-classe 2 comprend l'individu D1-1 qui a un faible taux de matière organique mais les proportions les plus élevées en ppm des éléments tels que le strontium, le thorium et le plomb. La sous-classe 3 comprend 4 individus qui ont des fortes concentrations en chrome et vanadium.

Au niveau des classes, la CAH permet de regrouper les familles sur la base de leur concentration en matière organique et aussi des différentes affinités entre les éléments chimiques des individus.

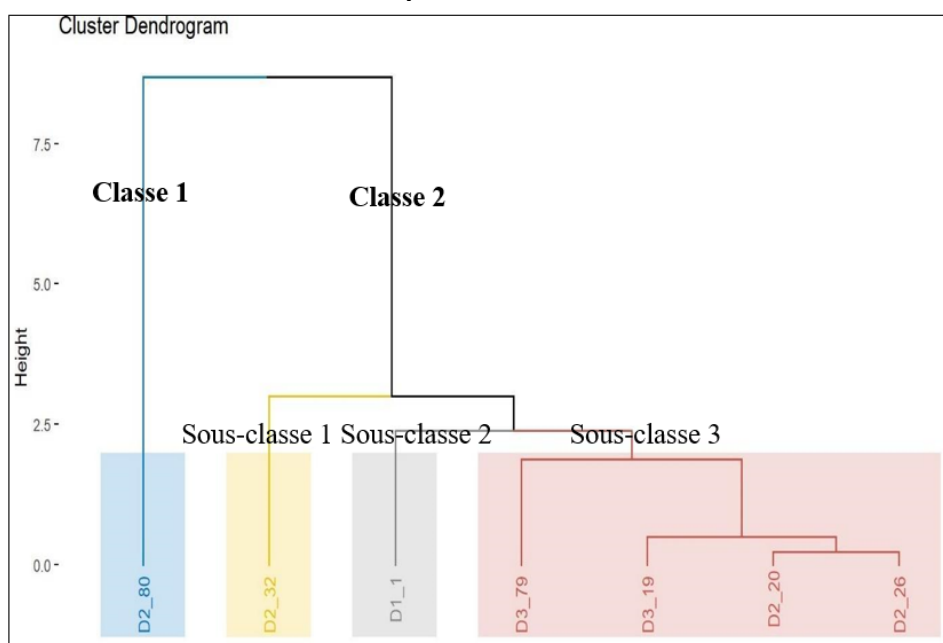


Figure 13. Classification Hiérarchique Ascendante des éléments traces la baie du Banco

3.3. Interprétation des paramètres géochimiques et contexte paléoenvironnementale

L'interprétation des données géochimiques s'est appuyée sur l'enrichissement ou l'appauvrissement en éléments majeurs ou éléments traces caractéristiques. L'association de différents éléments traces montre différentes sensibilités aux variations des conditions rédox d'un milieu (Tribovillard, 2006). La détermination du paléoenvironnement s'est faite à partir des marqueurs chimiques de paléoconditions du milieu.

➤ **Puits DIBY-1**

L'analyse géochimique du puits DIBY-1 s'est effectuée sur les sédiments de subsurface (3 m - 0 m). Ces sédiments contiennent le taux le plus élevé de Ca dans tous les puits étudiés (8, 52 %). Cet enrichissement en Ca traduit un dépôt de minéraux carbonatés dans la subsurface du puits. La présence des minéraux carbonatés dans ces sédiments indiquerait un milieu de dépôt calme, chaud et peu profond.

Le Ba identifié dans ce puits permet de caractériser la présence d'une bioproduktivité primaire en subsurface. Le taux de Ba (58,32 ppm) est le plus faible taux comparativement aux autres pourcentages de Ba dans les autres puits étudiés. Ce qui indiquerait que la bioproduktivité est moins dense dans ce puits (Tribovillard, 2006).

On observe également le taux le plus élevé en Mo (48,51 ppm). Les sédiments de subsurface présentent un enrichissement en U, V et Mo (Tableau 3), ce qui traduirait un milieu euxinique à interface eau-sédiment (Algéo et Maynard, 2004 ; Tribovillard, 2006).

➤ **Puits DIBY-2**

L'analyse géochimique du puits DIBY-2 s'est effectuée sur deux sections distinctes. La première section concerne les lutites noirâtres allant de 35 m à 20 m. La deuxième section concerne les lutites noirâtres situées en fin de forage (80-78 m).

Section 1

La somme des différents taux de Ca dans cette section est de 0,99 ppm (Tableau 2). On note un très faible taux de Ca dans cette section. Ce taux négligeable traduit une lithologie carbonatée (CaCo₃) négligeable voire nulle au niveau de cette section du puits. Ce faible taux de Ca pourrait indiquer un milieu agité ou turbulent et profond ne favorisant pas le dépôt de minéraux carbonatés.

Le Ba qui caractérise la bioproduktivité primaire n'a pas été identifié dans cette section ce qui suggère une absence de productivité primaire dans cette section.

Les sédiments présentent un enrichissement en U, V et Mo (Tableau 3). Ce qui traduirait un environnement euxinique à l'interface au-sédiment. Les éléments traces tels que U, Cu, Ni, As, Se, Zn, Pb et Mo ont été déterminés dans cette section du puits DIBY-2 mais l'élément Ba n'a pas été identifié. La présence de ces éléments dans cette section suggère un dépôt en milieu anoxique dépourvu d'une bioproduktivité primaire (Tribovillard, 2006).

Section 2

Cette section concerne les sédiments en fin de forage (80 à 78 m). On note un faible taux de Ca (0,449 ppm), Ce qui indiquerait un niveau de

lithologie carbonaté négligeable voire nul dans cette section. Cela serait dû à un milieu de dépôt peu profond.

Le taux de Ba très important (196, 7 ppm) traduit une meilleure productivité primaire dans le milieu.

Dans cette section on a une forte concentration en V et en U tandis que le taux en Mo est nul dans ce puits (Tableau 3) traduisant un milieu de dépôt suboxique à anoxique (Algéo et Maynard, 2004 ; Tribovillard, 2006).

➤ **Puits DIBY-3**

L'analyse géochimique de ce puits concerne deux principales sections. La section 1 qui part de 27 m à 0 m et la section 2, de 81 m à 79 m.

Section 1

Cette section constitue les sédiments de subsurface du puits DIBY-3. Elle présente un faible taux de carbonate inférieur à 3%. Ce faible taux indiquerait un milieu agité qui ne permet pas le dépôt de carbonate.

Ba n'a pas été identifié ce qui indiquerait que la bioproduktivité primaire n'est pas mise en évidence dans cette section.

L'enrichissement en U, V et en Mo traduirait un milieu euxinique à l'interface au-sédiment.

Section 2

Cette section représente les lutites de fin de forage situées entre 81 m et 79 m. Elle contient un taux de Ca inférieur à 2%. Ce taux très faible voire négligeable indiquerait une très faible présence de minéraux carbonatés. Cela serait dû à un milieu agité peu profond n'ayant pas favorisé le dépôt de minéraux carbonatés.

Le Ba a une forte concentration dans ce milieu (208, 7 ppm). Cette forte concentration, la plus importante de tous les puits étudiés suggère indique une bioproduktivité primaire plus importante dans cette section du puits. Les éléments chimiques U, V identifiés sans Mo indique un milieu suboxique à anoxique.

Synthèse paléoenvironnementale de la baie du Banco

Le taux de carbonate décroît de la surface vers la profondeur du substratum. Le taux de carbonate à la surface (0 -3 m) est la plus importante (8,52 %). Ce taux baisse significativement dans la subsurface (3 -35 m) de la baie avec une proportion comprise entre 0,575 % et 2,132 %. En fin de forage (78 - 81 m), ce taux très faible varie de 0,449 % à 1, 454 % dans les profondeurs du substratum. Ces différents taux indiquent que le milieu de dépôt des sédiments en surface est un milieu calme, chaud et peu profond. Cela a favorisé le dépôt de minéraux carbonatés sous forme de fossile. La

profondeur du substratum est pauvre en minéraux carbonatés probablement dans un milieu agité.

Le pourcentage de Ba croît de la surface à la profondeur du substratum. Cela suggère une meilleure productivité primaire pour les sédiments au fond de la baie contrairement aux sédiments de surface.

L'enrichissement en éléments U, V et Mo a été enregistré dans les sédiments de surface et de subsurface du substratum de la baie. Cela témoigne d'un milieu euxinique à interface eau-sédiment selon (Algéo et Maynard, 2004 ; Tribovillard, 2006). Dans le milieu profond du substratum précisément en fin de forage (80-78 m), on note un enrichissement en U, V sans MO. Ce qui suggère un environnement suboxique à anoxique. Cet environnement varie d'un puits à un autre. En fin de forage dans le puits DIBY-2, le milieu est anoxique tandis que dans le puits DIBY-3, le milieu est suboxique. Les conditions anoxiques identifiées dans le puits DIBY-2 à 80 m sont vérifiées par une forte concentration de matière organique dans le milieu. Ces conditions sont étayées par l'enrichissement en éléments chimiques liés aux environnements redox Zr, Sr, U, Rb, Pb, Cr, V, S (Tribovillard, 2006).

4- DISCUSSION

- **Concentration moyenne de l'aluminium et du calcium dans la baie du Banco: influence paléo-milieu**

Au sein des sédiments de la lagune, deux éléments sont désignés comme éléments clés. Il s'agit de l'aluminium et du calcium. L'aluminium est lié aux argiles et feldspaths issus de l'altération des massifs volcaniques (origine détritique) et le calcium est surtout d'origine marine (Bloundi, 2005). La concentration moyenne de l'aluminium (9,24%) est largement supérieure à celle du calcium (2,22%). Ces différentes concentrations en aluminium et en calcium indiquent une influence continentale dominant largement le substratum de la baie du Banco. L'influence marine est très faible.

- **Concentration du soufre**

Le soufre a une concentration qui domine largement tous les éléments traces identifiés dans le substratum. Il serait associé à la pyrite d'où sa forte teneur dans les lutites. Néanmoins la baie du Banco étant le réceptacle des eaux domestiques et industrielles, l'origine de la forte concentration en soufre devrait être approfondie.

- **Concentration du baryum**

Le baryum qui caractérise la bioprodutivité primaire (Tribovillard, 2006) est identifié dans les forages étudiés. Il est plus concentré dans les sédiments en fin de forage (80-78 m) avec une moyenne de 202,7 ppm et faible en surface 58,32 ppm. Cette concentration traduit une évolution de la bioprodutivité primaire de la surface vers les profondeurs du substratum de la baie du Banco. Cette bioprodutivité est également mise en évidence dans

la marge d'Abidjan précisément à l'ouest par les travaux de (Ouattara, 2017). Ces travaux indiquent que la bioproduktivité est plus importante à l'ouest de la marge d'Abidjan et faible à l'est.

Conclusion

Les éléments majeurs identifiés sont par ordre décroissant le Silicium (45,33 %), le Fer (35,56 %), l'Aluminium (9,24 %), le Potassium (2,31 %), le Calcium (2,22 %), le Titane (2,15 %), le Chlore (2,04 %) et le Phosphore (1,12 %). L'analyse géostatistique a permis de mettre en évidence de fortes corrélations entre la matière organique et le fer réduit (Fe 2+), l'étain (Sn), l'arsenic (As) et le soufre (S). Le substratum de la baie du Banco est caractérisé par une forte concentration en soufre variant de 12475 à 75752 ppm et une bioproduktivité primaire plus importante en profondeur qu'en surface. Les éléments traces U, V et Mo ont permis d'identifier un milieu euxinique à interface eau-sédiment en subsurface du substratum (0- 32 m) tandis qu'en fin de forage (78-80 m), on distingue un milieu suboxique à anoxique.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

Références :

1. AFFIAN K., 1986. Incidence réciproque des structures océaniques et continentales sur l'évolution des bassins ouest Africain (Golfe de Guinée et de la Côte d'Ivoire Méridionale), Thèse de 3ème cycle océanographique, Université, Bordeaux I, No 2167, 259 p.
2. AKA K., 1991. La sédimentation quaternaire sur la marge de Côte d'Ivoire : Essai de modélisation., Thèse Doctorat Etat ès Sciences Naturelles, Univ. Abidjan, n°146, 320 p.
3. ASSALE F. Y. P., 2013. Caractérisation Sédimentologique, Palynologique, Géochimique et Paléoenvironnementale des formations sédimentaires connexes à la faille des lagunes (est du bassin onshore de Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat. Univ F.H.B, 349 p.
4. ALGEO T. J. & MAYNARD J. B., 2004. Trace element behaviour and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical geology* 206, pp.289-318.
5. BAMBA M. K., DIGBEHI Z. B., SOMBO B. C., GOUA T. E. et N'DA L. V., 2011. Foraminifères planctoniques, biostratigraphie et

- paléoenvironnement des dépôts albo-turonien de la Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest. *Revue de Paléobiologie*, Genève, 30(1) : 1-11.
6. BIE G. R., DIGBEHI Z. B., YAO K. R., TEA Y. J., KANGAH K. D. et TAHI I., 2012. Stratigraphie Palynologique du Maastrichtien Supérieur-Éocène Supérieur du Bassin Sédimentaire Offshore de Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest. *International Journal of African Studies* Issue 6, pp.40-57.
 7. BLOUNDI M. K. (2005). Etude géochimique de la lagune de Nador (Maroc oriental): Impacts des facteurs anthropiques. Thèse de Doctorat Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Mohamed V-Agdal, 215 p.
 8. BOGA A. H, WANGO T. E., YAO K., AKOBE A. C, COULIBALY A. S., MONDE S., 2017. Mise en évidence des phases majeures de sédimentation dans le dépôt des formations sédimentaires de l'est du bassin sédimentaire tertiaire-quaternaire onshore de Côte d'Ivoire par l'étude de Stone-line, *International journal of development research*, Vol. 07, Issue 09, 14972 -14980.
 9. DIGBEHI Z. B., 1987. Etude comparée de la sédimentation des stades d'ouverture Atlantique Golfe de Guinée-Golfe de Gascogne : Sédimentologie, biostratigraphie, Thèse Doctorat Université de Pau, 366 p.
 10. DIGBEHI Z. B., AFFIAN K., MONDÉ S., POTHIN K. B. K. et AKA K., 2001. Analyse sédimentologique de quelques faciès du continental terminal. *BIOTERRE* vol. 2, n°1, pp.71-84.
 11. GBANGBOT J-M. K., DIGBEHI Z. B., N'GORAN J-P. Y., MONDE S., N'GUESSAN A. Y., 2012. Lithostratigraphie des dépôts de subsurface des régions de Bingerville et d'Assinie, Sud et Sud-est, Basse Côte d'Ivoire. Essai de comparaison des environnements de dépôts au cours du Tertiaire. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 86, n°1, pp 41-52.
 12. IRIE B. T. J. G, WOGNIN A. V, AKA A. M, KANDO A. M. L, COULIBALY A. S, MONDE S, AKA K., 2015. Caractérisation sédimentologique et minéralogique des dépôts superficiels du chenal est de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire), *BIOTERRE, Rev. Inter. Sciences de la Terre*, Vol. 15., pp. 69 – 81.
 13. KESSE T. M., 2016. Caractérisation lithologique, micropaléontologique et paléoenvironnementale des intervalles Cénomaniens et Turoniens des puits A1 à A9 du bassin sédimentaire immergé de Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat, Université d'Abidjan, 183 p.
 14. KOUASSI A. K, KOUASSI F. W, JULES O. M. MANGOUA J. O. M, et SAVANE I., 2014. Modèle conceptuel de l'aquifère du

- Continental Terminal d'Abidjan, Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions Proceedings of FRIEND-Water, Montpellier, France, October 2014 (IAHS Publ. 363, 2014).
15. OUATTARA. I. B., 2017. Impacts de la crise biologique intermédiaire du céno-manien-turonien dans le golfe de Guinée : cas du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire, à partir des études sédimentologique, géochimique, chiostratigraphique et palynostratigraphique, Thèse Doctorat, Univ. FHB. Cocody (Côte d'Ivoire) 219 p.
 16. TRIBOVILLARD. N, THOMAS J. ALGEO. B, TIMOTHY. L, ARMELLE. R., 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update.
 17. YAO D. F., ASSALE F. Y. P, YAO N. J. P., BROU U. M., DIGBEHI Z. B., 2022. Caractérisation lithostratigraphique, morphoscopique et granulométrique des sédiments du substratum de la baie du banco, Abidjan, basse Côte d'Ivoire., Afrique SCIENCE 21(2)., pp 28 – 43.
 18. YAO N. J. P., 2012. Caractérisation sédimentologique, minéralogique, géochimique et biostratigraphique des falaises vives de Fresco: région de Grand-Lahou (Cote d'Ivoire). Thèse Doctorat Université F.H.B (Cocody/Abidjan): 222 p.
 19. YAO N. J. P., GBANGBO J. M. K., BIE G. R, DIGBEHI Z. B., 2014. Essai de corrélation sédimentologique et paléoenvironnement des dépôts de subsurface d'Abidjan nord (sud de la Côte d'Ivoire) ", BIOTERRE, Revue Internationale Sciences de la terre, vol. 14.