

Caractérisation des Indices de Pollution (Igeo, Pli, Tec et Pec) d'un Environnement Estuarien à Forte Pression Anthropique : la Baie de Biétry (Côte d'Ivoire, Golf de Guinée)

Coulibaly Aoua Sougo

PhD /Département Géosciences marines
Université Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Monde Sylvain

Professeur /Département Géosciences marines Université
Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Amani Etche Mireille

Dr /Département Géosciences marines
Université Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Aka Kouamé

Professeur /Département Géosciences marines Université
Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Akobé Apie Colette

Dr /Département Géosciences marines
Université Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Gérard Blanc

Professeur/Département Géosciences marines
Université Bordeaux, France

Abstract—Biétry's bay is the place of industrial discharges. Metal contamination in the water system resulting in accumulation of metals in sediments. Indices of pollution and contamination were calculated to estimate the degree of pollution (Igeo), the contamination factor (CF) and the pollutant load (PLI). The results are consistent and show a sediment contamination by metal pollutants. Indeed, the minimum PLI is greater than 1, indicating a polluted environment. The comparative analysis of metal contents with the TEC and PEC shows that Ni and Cd are non-toxic. Therefore; sediments Bay Biétry are toxic Cr, Cu, Zn, As, Pb and Zn.

Index terms : Igeo, CF ; PLI, TEC, PEC

Résumé: La baie de Biétry est le lieu des rejets industriels. La contamination métallique dans ce système aquatique se traduit par une accumulation des métaux dans les sédiments de surface. Des indices de pollution et de contamination ont été calculés afin d'estimer le degré de pollution (Igeo), le facteur de contamination (CF) et la charge polluante (PLI). Les résultats sont concordants et montrent une contamination des sédiments par les polluants métalliques. En effet, le PLI minimum est largement supérieur à 1, traduit un environnement pollué. L'analyse comparative des teneurs métalliques avec le TEC et PEC montre que le Ni et le Cd sont non toxiques. Par contre les sédiments de la baie de Biétry présentent une toxicité au Cr, Cu, Zn, As, Pb et Zn. **Mots clés**: Igeo, CF ; PLI, TEC, PEC

I. INTRODUCTION

La lagune Ebrié s'étend sur 125 Km de littoral ivoirien et occupe une surface d'environ 500 Km, avec 4 m de profondeur en moyenne. C'est la plus grande lagune d'Afrique occidentale [1, 2]. Elle possède de nombreuses baies qui représentent près du cinquième de la surface du plan d'eau soit environ 100 Km² [3]. La baie de Biétry, relativement isolée bien que proche du canal de Vridi, est soumise à une forte pression anthropique. C'est le point d'aboutissement principal du réseau d'égouts dans le secteur Sud d'Abidjan depuis 1984. Cet environnement confiné montre une d'eutrophisation et périodiquement, des morts massives de poissons ; etc. La contamination métallique dans les systèmes aquatiques se traduit généralement par l'accumulation progressive des métaux dans les sédiments de surface.

Le but de cette étude est de quantifier la pollution polymétallique dans la baie de Biétry, par l'utilisation d'indices de pollution et de contamination. Aussi les teneurs en éléments traces métalliques dans les sédiments permettront d'évaluer leur qualité environnementale.

II. MATERIEL ET METHODES

Echantillonnage du sédiment

Les échantillons de sédiment de surface ont été prélevés dans la baie de Biétry (Figure 1) à l'aide d'une benne à sédiment de type Van Veen. Les 12 points échantillonnés ont

été repérés par un GPS et couvrent l'ensemble de la baie de Biétry. Une partie du sédiment est prélevé au cœur de la benne, pour éviter toute contamination métallique. Les échantillons sont conservés dans des flacons de 50 ml, préalablement décontaminé à l'aide d'une solution de HNO₃ à 10% pendant une semaine puis rincé 5 fois à l'eau désionisée et à l'eau Milli-Q et séché sous une hotte à flux lumineux.

Protocole de mise en solution des métaux

Les métaux présents dans les échantillons sont généralement analysés au laboratoire par spectrométrie de masse (ICP-MS). Cependant les sédiments étant des solides, il est nécessaire de les minéraliser pour pouvoir ensuite déterminer les teneurs en métaux dans les solutions d'attaque. Les échantillons de sédiments sont séchés à l'étuve (50°C), puis broyés et homogénéiser dans un mortier en agate.

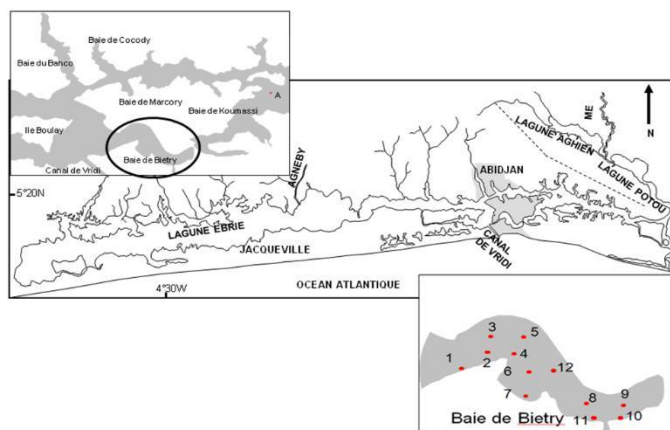


Figure 1 : La baie de Biétry dans l'estuaire de la lagune Ebrié (1-12 stations)

Une attaque totale sur le sédiment a été réalisée à l'aide de trois (3) différents acides afin d'obtenir les teneurs totales de chaque métal dosé. Ainsi, 30 mg de sédiment sont digérés à l'eau régale (1,5 ml HCl «suprapur» à 30,9% + 0,5 ml HNO₃ «suprapur» à 65,5%) et 2 mL d'HF «suprapur» (à 65 %) dans des flacons en téflon (Savilex®). Ces derniers sont fermés hermétiquement et maintenus pendant 2 h à 110°C sur une plaque chauffante. Après refroidissement, les gouttelettes condensées sur les bouchons des flacons sont récupérées à l'aide d'un rinçage d'eau Milli-Q® effectué à la pissette. L'évaporation du contenu des flacons est réalisée par chauffage à 100°C pendant 12 h. On laisse refroidir de nouveau pour effectuer la reprise du résidu de digestion avec 0,250 ml de HNO₃ à 65,5% et 5 mL d'eau Milli-Q® ; la nouvelle solution est chauffée une dernière fois à 80°C pendant 10 min. Après refroidissement et décantation, 3,5 mL du surnageant est prélevé et conservé dans un flacon auquel on ajoute 6,5 mL d'eau Milli-Q®. La dilution finale de l'échantillon est de 2/3.

Dosage des ETM par ICP-MS (inductively coupled plasma – mass spectroscopy)

L'analyse en mode quantitatif des ETM (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb) a été réalisée à l'aide d'un spectromètre de masse couplé à un plasma d'ionisation (Perkin-Elmer type Elan 5000) permettant de détecter des éléments en trace à des concentrations minimales de 10-3 µg.L-1.

Détermination du bruit de fond et du niveau de pollution

Compte tenu de l'absence voir de la rareté des données de concentrations métalliques dans la baie de Biétry, un échantillon A, a été prélevé dans la lagune Ebrié en marge de cette étude. Le choix de cet échantillon, qui sert de bruit de fond de la lagune, a été fait en fonction de sa localisation géographique (éloigné des influences anthropiques) et conforté aux résultats de la composition chimique [4, 5, 6a, 6b]

Détermination du degré de pollution

Pour la détermination quantitative de la pollution ou degré de pollution, l'indice de geoaccumulation Igeo [7] a été utilisé. Cet indice (tableau 1) se détermine à partir du niveau de base de la teneur en métaux dans le sédiment selon la formule suivante : $I_{geo} = \log_2 (C_n / 1,5 B_n)$ avec : C_n (Concentration dans le sédiment pour l'élément n), B_n (Bruit de fond géochimique pour l'élément n) et 1,5 (Constante prenant en compte les fluctuations naturelles de la teneur d'une substance donnée dans un environnement et les faibles influences anthropiques).

Tableau 1 : Classification de Müller [7]

Classe	Valeur	Intensité de pollution
0	$I_{geo} \leq 0$	Non pollué
1	$0 < I_{geo} < 1$	Non pollué à modérément pollué
2	$1 < I_{geo} < 2$	Modérément pollué
3	$2 < I_{geo} < 3$	Modérément pollué à sévèrement pollué
4	$3 < I_{geo} < 4$	Sévèrement pollué
5	$4 < I_{geo} < 5$	Sévèrement pollué à très sévèrement pollué
6	$5 < I_{geo}$	Très sévèrement pollué

Détermination du PLI (Pollution Load Index)

Pour évaluer (quantitatif) le niveau de contamination métal par métal dans un échantillon donné ; les teneurs des ETM ont été utilisées pour calculer le facteur de contamination (Contamination Factor - CF). Cet indice rend compte du rapport concentration d'un métal donné (C_{métal}) sur son équivalent dans une référence (C_{référence}). Nous avons utilisé les concentrations crustales de Wedephol [8] et Pekey [9] comme valeurs de références. Le CF se calcule selon la formule suivante : $CF = C_{m\acute{e}tal} / C_{r\acute{e}f\acute{e}r\acute{e}n\acute{c}e}$

En outre, en intégrant le CF, Tomlinson et al., [10] estime la charge polluante ou Pollution Load Index (PLI) d'un échantillon. Cet indice (PLI) donne une estimation quantitative du niveau de pollution des éléments chimique dans un échantillon donné. Il a pour expression :

$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n}$ avec CF : facteur de contamination ; n : nombre de métaux

Cette méthode dégage deux niveaux de pollution de l'échantillon. Ainsi, pour $PLI \approx 1$: pas de pollution et pour $PLI > 1$: présence de pollution [10].

Qualité environnementale du sédiment

Pour évaluer la qualité environnementale des sédiments, nous avons comparés les concentrations des ETM de la zone d'étude aux valeurs guides américaines SQGs (Sediment Quality Guidelines) récemment développées à partir d'une base de données d'effets biologiques et écologiques que pourraient occasionner certaines concentrations de polluants dans les sédiments. Le TEC (Threshold Effect Concentration) et le PEC (Probable Effect Concentration) établis par MacDonald et al., [11] permettent d'évaluer la qualité des sédiments marins et de l'eau douce. Le TEC identifie les concentrations des contaminants en dessous desquels les organismes vivants dans les sédiments ne sont pas affectés, contrairement au PEC, qui lui, identifie les concentrations des contaminants au-dessus desquels on observe des effets néfastes sur les organismes vivants dans les sédiments [12, 13, 14]. Ces travaux ont permis de déterminer les valeurs du TEC et du PEC de 8 métaux traces (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni et Zn).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

TENEURS TOTALES EN ETM DE LA BAIE DE BIÉTRY

Les teneurs en métaux des sédiments de la baie de Biétry et les concentrations métalliques crustales [8, 9] sont présentées dans les tableaux 2 et 3. D'une manière générale, les sédiments de cette baie présentent de fortes concentrations. Les teneurs moyennes sont supérieures aux valeurs d'UCC (Upper Continental Crust).

Comparativement aux résultats de l'échantillon A (Bruit de fond géochimique de la lagune Ebrié – [4, 5, 6a, 6b]), les concentrations minimales dans la baie de Biétry sont supérieures pour un même élément considéré. En outre, ce tableau 2 fait ressortir l'existence d'une pollution, tant d'un point de vue général (valeurs d'UCC), que d'un point de vue local (échantillon A).

Tableau 2 : Concentrations totales (mg/kg) des sédiments

Echts.	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
1	54,79	20,58	18,25	87,27	2,92	0,16	19,42
2	28,34	5,30	1,83	16,39	2,17	0,06	6,53
3	130,87	52,18	43,56	264,32	16,79	1,12	73,14
4	180,80	59,30	64,46	248,55	11,26	0,76	113,88
5	9,22	3,50	2,70	18,85	0,91	0,07	4,72
6	14,58	3,57	2,80	27,24	1,47	0,07	4,91
7	25,84	13,30	6,67	53,01	3,05	0,22	11,45
8	11,08	5,01	2,75	25,23	1,15	0,07	5,39
9	36,31	6,00	6,13	51,29	3,19	0,21	10,87
10	2058,6	31,04	79,09	498,51	5,92	1,39	209,04
11	24,95	4,89	9,96	48,94	2,41	0,24	12,14
12	101,21	35,77	70,40	308,32	17,18	1,69	114,79

Tableau 3 : ETM, UCC et A des sédiments de la baie

.	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
---	----	----	----	----	----	----	----

Min	9,22	3,50	1,83	16,39	0,91	0,06	4,72
Max	2058,6	59,30	79,09	498,51	17,18	1,69	209,04
Moy.	223,06	20,04	25,72	137,33	5,70	0,50	48,86
Ecartyp	580,60	20,01	29,95	155,61	5,97	0,58	65,67
UCC	35,00	19,00	14,00	52,00	2,00	0,10	17,00
A	7,31	3,47	1,51	11,18	0,75	0,05	2,40

UCC-Upper Continental Crust ou concentrations métalliques crustales, A-bruit de fond de la lagune

ÉVALUATION QUANTITATIVE DU NIVEAU DE POLLUTION DANS LA BAIE DE BIÉTRY Indice de géoaccumulation

L'évaluation du niveau de pollution de la baie de Biétry (figure 2) fait apparaître toutes les six (6) classes de l'Igeo de Müller [9]. Ces métaux peuvent être classés en :
 - métaux non polluants (classe 0 et 1) : Il s'agit du Ni dont la proportion est de 55%.
 - métaux polluants (classes 2, 3, 5, 6) : Ils sont dans une proportion variant de 70 à 100%. Il s'agit du Cr, As, Pb, Cd, Zn et Cu.

Cette classification empirique (en élément non polluant et polluant) permet à la fois une approche quantitative et qualitative du niveau de pollution dans la baie de Biétry.

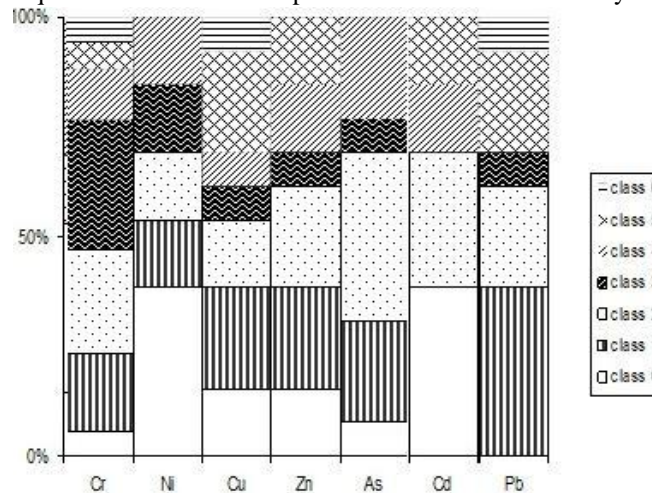


Figure 2 : Niveau de pollution (%) dans les sédiments de la baie de Biétry

Pollution Load Index

Le tableau 4 présente les rapports de contamination pour chaque ETM de la baie de Biétry. Ce rapport est supérieur à 1 pour l'essentiel des métaux avec un maximum de 29 pour le Cr. Toutefois le Ni a une concentration voisine (19,4 mg/kg) de celle de l'UCC (19 mg/kg) à la station 10. Le facteur de contamination est de 1,02.

Tableau 4 : Facteur de contamination des métaux

Stations	Cr	CFcr	Ni	CFni	Cu	CFcu	Zn	CFzn	As	CFas	Cd	CFcd	Pb	CFpb
1	194	5,55	112	5,91	60,8	4,35	430	8,27	15,1	7,57	0,63	6,29	83,9	4,93
2	379	10,84	142	7,46	86,6	6,18	274	5,27	25,1	12,53	0,47	4,69	148	8,73
3	148	4,24	78,2	4,12	65,9	4,71	320	6,15	22,3	11,16	0,84	8,44	71,6	4,21
4	200	5,71	83,7	4,40	69,6	4,97	292	5,62	13,6	6,80	0,76	7,59	93,9	5,52
5	196	5,61	73,7	3,88	87,5	6,25	177	3,40	18,0	8,99	0,30	3,05	90,6	5,33
6	191	5,45	75,9	3,99	92,5	6,61	332	6,38	9,92	4,96	0,53	5,25	77,9	4,58
7	148	4,23	80,0	4,21	64,6	4,62	184	3,55	22,1	11,06	0,33	3,35	59,9	3,53
8	367	10,48	101	5,30	113	8,09	346	6,65	11,7	5,84	0,92	9,17	61,8	3,64
9	192	5,49	55,3	2,91	73,6	5,26	200	3,84	19,4	9,69	0,46	4,56	78,5	4,62
10	1012	28,91	19,4	1,02	31,8	2,27	230	4,42	5,15	2,57	0,49	4,93	97,7	5,75
11	256	7,30	76,3	4,02	108	7,69	390	7,50	21,5	10,76	1,04	10,41	108	6,33
12	159	4,53	90,5	4,76	111	7,90	515	9,91	15,1	7,54	1,50	15,00	109	6,41
UCC	35		19		14,00		52,00		2,00		0,10		17,00	

L'analyse de la figure 3, traduisant la variation du PLI dans les 12 stations de la baie de Biétry, montre des valeurs de PLI toutes supérieures à 1 (PLI>1). Ainsi ; les sédiments de la baie de Biétry présentent une forte charge polluante.

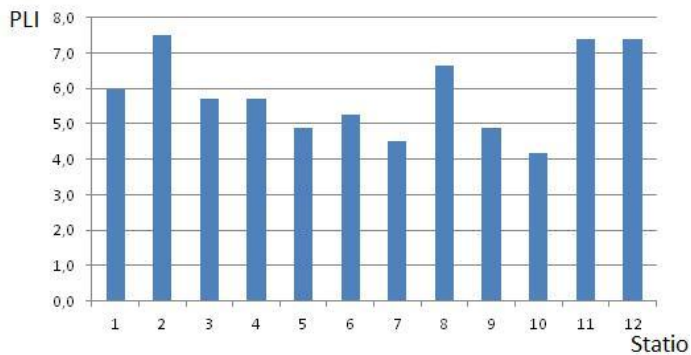


Figure 3 : Evolution du PLI dans les 12 stations de la baie de Biétry

L'évaluation quantitative du niveau de contamination soit métal par métal dans un échantillon donné (CF) soit l'ensemble des ETM dans un échantillon donné (PLI) montre que les sédiments de la baie de Biétry présente une pollution (PLI>1).

Qualité environnementale du sédiment

L'évaluation de la qualité des sédiments des différentes stations de la baie de Biétry permet d'en dégager trois (3) niveaux de toxicité (Tableau 5). Le Ni (station 10) et le Cd (stations 1 à 10) ne constituent pas de danger. Toutefois; les autres ETM sont néfastes pour l'environnement de la baie de Biétry.

Tableau 5 : Qualité des sédiments dans les stations

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
<TEC: non toxique	-	10	-	-	-	1-10	-	-
TEC-PEC: toxique	-	-	1-12	1-11	1-12	11,12	3-12	2-5 7
>PEC: très toxique	1-12	1-9 11-12		12	-	-	2	1 9-12

IV. CONCLUSION

La pollution métallique de la baie de Biétry, se traduit par une accumulation des métaux dans les sédiments de surface. C'est ce que révèle le dosage de sept (7) ETM (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb et Zn) par ICP-MS. Par ailleurs, des indices de pollution et de contamination ont été calculés à partir des teneurs métalliques obtenus. Ces indices permettent d'estimer le degré de pollution (Indice de géoaccumulation – Igeo), le niveau de contamination métallique (facteur de contamination - CF) et l'ampleur de la pollution métallique au niveau des sédiments (Indice de charge polluante - PLI). Les résultats obtenus sont tous concordants, et montrent une contamination des sédiments par les polluants métalliques. En effet, le PLI minimum est de 4,2 et le maximum de 7,5. Cet indice supérieur à 1, traduit un environnement pollué. Du point de vue qualitatif, l'analyse comparative des teneurs métalliques aux valeurs de références de qualité (TEC et PEC) montre que seuls les sédiments de 10 sites de la baie de Biétry sont non toxiques uniquement pour le Ni (station 10) et le Cd (stations 1 à 10). Pour les autres métaux (Cr, Cu, Zn, As, Pb et Zn), les sédiments sont toxiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]. Affian K. Approche environnementale d'un écosystème lagunaire microtidal (Lagune Ebrié en Côte d'Ivoire), par des études géochimiques et hydrologiques, bathymétriques et hydrologiques : Contribution du S.I.G. et de la télédétection, Thèse Doctorat, Université Cocody, 225p. 2003

[2]. Mondé S. Etude et modélisation hydrodynamique de la circulation des masses d'eau dans la lagune Ébrié (Côte d'Ivoire), Thèse Doctorat d'État, Université Cocody, 325p. 2004

[3]. Varlet F. Le régime de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Traits physiques essentiels, Trav. Doc. ORSTOM, 83, 164p. 1978

[4]. Coulibaly A.S., Monde S., Wognin V.A., Aka K. State of anthropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the Metal Elements Traces, European Journal of Scientific Research, Vol.19, N°2:pp. 372-390. 2008

[5]. Coulibaly A.S., Monde S., Wognin V.A., Aka K. Analyse des éléments traces métalliques (ETM) dans les baies estuariennes d'Abidjan (Côte d'Ivoire), Afrique SCIENCE, Vol.5(3), pp.77-96. 2009

[6a]. Coulibaly A.S., Monde S., Wognin V.A., Aka K. Teneurs des éléments traces métalliques des sédiments d'un environnement littoral mixte : la confluence fleuve Comoé – lagune Ebrié en Côte d'Ivoire, Revue CAMES – Série A (Sciences et Médecine), Vol.10, pp. 137-142. 2010a

[6b]. Coulibaly A.S., Monde S., Aka K. Biodisponibilité et spéciation chimique des éléments traces métalliques dans un environnement confiné : la baie de Biétry, International Journal of African Studies, Vol.3, pp.41-52. 2010b

[7]. Müller G. Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme", Chemical Zeitung 105: 157-164. 1981

[8]. Wedepohl K.H. The composition of continental crust", *Goechimica and Cosmochimica Acta*. Vol. 59, n°7 pp. 1217-1232. 1995

[9]. Pekey H. The distribution and sources of heavy metals in Izmit Bay surface sediments affected by polluted stream, *Marine pollution Bulletin*. 52;1197-208. 2006

[10]. Tomlinson L, Wilson G, Harris R, Jeffrey DW. Problems in the assessments of heavy-metal levels in estuaries and formation of a pollution index, *Helgol Meeresunters* ; 33:566-75. 1980

[11]. Macdonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems, *Arch. Environ. Con. Tox.* 39 : 20-31. 2000

[12]. Long E.R., Macdonald D.D., Smith S.L., Calder F.D. "Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments", *Environ. Management* 199 : 81-97. 1995

[13]. Ingersoll C.G., Haverland P.S., Brunson E.L., Canfield T.J., Dwyer F.J., Henke C.E., Kemble N.E., Mount D.R., Fox R.G. Calculation and evaluation of sediment effect concentrations for the amphipod *Hyacella azteca* and the midge *Chironomus riparius*, *J. Great lakes res.* 22 pp.2-623. 1996

[14]. Macdonald D.D. Sediment injury in the Southern California Bight: review of the toxic effects of DDTs and PCBs in sediments, Prepared for National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, Long Beach, CA. 1997

Authors Profile

Coulibaly



Aoua S. est titulaire d'un

doctorat en biogéochimie de l'environnement de l'Université Bordeaux I. Depuis 2003, elle exerce en tant que enseignant chercheur à l'Université Félix Houphouët Boigny (UFHB) d'Abidjan. En 2011, elle a été promu Maître de

Conférences du CAMES et occupe le poste de directrice du laboratoire de géochimie marine à l'UFHB d'Abidjan. Ces recherches portent entre autres sur la pollution métallique des environnements lagunaires. Elle est auteur d'une dizaine d'articles publiés dans des journaux internationaux de références, qui renferment les résultats de ses études.



Monde S. was born in Abidjan, Côte d'Ivoire. His received the M.Sc. E.S and Ph.D. degrees from the University of Cocody (Côte d'Ivoire , West-Africa) and University of La Rochelle (France) in 1995, 1997, 2004 and 2005 in Earth Sciences. From 1997 he was assistant

professor, from 2003 he was associate professor, and since 2008 he has been a Professor in Marine Geology and the head of marine geology department at University of Cocody. His research areas include Marine geology, Acoustic sedimentary (bathymetry, acoustic mapping), Hydrodynamic modeling of coastal environments, Coastal engineering