



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

MEMOIRE DE MASTER

Vignon Mechtilde VIAINON

OPTION : ECO-HYDROLOGIE

=====

**Contribution potentielle du stock sédimentaire en
éléments nutritifs (NT,PT) dans les sédiments
superficiels de la zone Sud-Est du lac Nokoué.**

Maitre de mémoire :

Dr. Metogbe Belfrid
DJIHOUESSI

Enseignant chercheur à l'INE

Superviseur :

Prof. Martin Pépin AINA

Professeur titulaire des
universités

PROMOTION : 2021-2022



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

MEMOIRE DE MASTER

Vignon Mechtilde VIAINON

OPTION : ECO-HYDROLOGIE

=====

**Contribution potentielle du stock sédimentaire en
éléments nutritifs (NT,PT) dans les sédiments
superficiels de la zone Sud-Est du lac Nokoué.**

Soutenu le 16 Février 2023 devant le jury composé de :

=====

Président	Prof. Daouda MAMA	Université d'Abomey-Calavi
Rapporteur	Dr. Metogbe Belfrid DJIHOUESSI	Université d'Abomey-Calavi
Examineur	Prof. Flavien DOVONOU	Université d'Abomey-Calavi

PROMOTION : 2021-2022

Dédicace

Je dédie ce travail à

Mes parents Romain VIAINON et Georgette AKAPKO

Remerciement

Ce travail a été réalisé au Laboratoire des Sciences et Technique de l'Eau et Environnement de l'Université d'Abomey-Calavi dans le cadre d'un programme doctoral financé par le projet OmiDelta qui nous ont accordé un appui technique et financier.

Au Professeur Titulaire Martin Pepin AINA, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE) de l'INE/UAC, Directeur Générale de l'Environnement et du Climat (DGEC) au Ministère du Cadre de Vie et du Développement Durable pour accepter superviser ce travail.

Au Professeur Christophe KAKI du Département des Sciences de la Terre, pour ces conseils, encouragement et son encadrement lors des travaux de laboratoire.

Au Docteur Belfrid DJIHOUESSI qui a dirigé la réalisation de ce travail, avec une bienveillante attention. Sa capacité de travail et ses qualités scientifiques et humaines resteront pour moi un exemple. Un très grand merci pour la confiance que vous m'avez accordée. Merci pour votre grande disponibilité, votre grand enthousiasme, votre grande patience, vos conseils et les encouragements permanents tout au long de cette période. J'ai appris énormément de choses à vos côtés.

Mes remerciements vont à l'endroit du Docteurs Rodrigue ADECHINA, du Département des Sciences de la Terre pour sa disponibilité et contributions lors des diverses rencontres au cours de la rédaction de ce document.

Tous les membres du Laboratoire des Sciences et Technique de l'Eau et Environnement et du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce document.

Un sincère merci à Akilou SOCOKOU, Arnaud ASSOGBA, Victor OPKEITCHA Amen TIGO, Raoul APKASSOU, Flaurine NOUASSE, avec qui les travaux de terrains ont été effectués dans le cadre de ce travail. Trouvez ici l'expression de ma profonde gratitude.

A Claude TCHABI, Romaric HEPKAZO et Lauriane IROTORI, je tiens à vous exprimer mes sincères remerciements pour votre accompagnement moral lors de mes travaux.

A Belcai KPLEDEHOU et Fiacre NONGNIDE pour leur assistance, aide et soutien indéfectibles. Puisse Dieu vous combles de ses bienfaits.

Je remercie tous les stagiaires du LSTEE pour leurs aides lors des analyses et contribution à la réalisation de ce document.

A tous le personnel du Laboratoire de Géologie Mines et Environnement qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce document.

A tous les collègues de promotion merci pour vos soutiens et pour la bonne ambiance qui a toujours caractérisé nos différentes rencontres.

A mes sœurs j'adresse mes sincères remerciements. Elles qui ont toujours cru en moi et m'ont toujours soutenu durant tout mon cursus universitaire.

A tous ceux qui, de près comme de loin, ont participé à la réussite de ce travail et dont les noms n'ont pas été mentionnés ici, je vous dis merci.

Table des matières

Dédicace	2
Remerciement.....	4
Liste des sigles et abréviation.....	8
Liste des tableaux	9
Liste des figures	11
Liste des photos	13
Résumé.....	14
Abstract	15
Introduction	16
1 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	19
1.1 Sédiment: origine des particules sédimentaires et mécanisme de diagenèse précoce.....	19
1.1.1 Origine des particules sédimentaires.....	19
1.1.2 Diagenèse précoce des sédiments	20
1.2 Composition des sédiments	21
1.2.1 Composition granulométrique des sédiments	21
1.2.2 L'eau dans le sédiment	22
1.2.3 Matière organique dans les sédiments.....	23
1.3 Cycle du phosphore et de l'azote dans les sédiments	23
1.3.1 Cycles du phosphore dans les sédiments.....	23
1.3.2 Cycle de l'azote dans le sédiment	26
1.4 Stocks des nutriments dans les sédiments des lacs côtiers	31
1.5 Etat de connaissance sur l'interaction à l'interface eau-sédiment du lac Nokoué.....	31
2 APPROCHE METHODOLOGIQUE	34
2.1 Présentation de la zone d'étude	34
2.1.1 Environnement physique	35
2.1.2 Milieu humain et activités socio-économiques	36
2.2 Collecte des données :	36
2.2.1 Choix des points de prélèvement et de la période d'échantillonnages.....	37
2.2.2 Technique d'échantillonnage de sédiment	37
2.2.3 Détermination des paramètres physiques des sédiments.....	38
2.2.4 Détermination des paramètres chimiques dans les sédiments.....	39
2.3 Traitement des données	41
2.3.1 Traitement des paramètres physico-chimiques	41

2.3.2	La distribution Traitements des données granulométriques.....	41
3	RESULTATS ET DISCUSSIONS	47
3.1	Caractéristiques morphologiques du lac Nokoué	47
3.1.1	Evolution spatiale des différents faciès en fonction de la superficie	47
3.1.2	Répartition spatiale des faciès de la zone sud est du lac Nokoué.....	48
3.1.3	Comparaison de la répartition des lithofaciès actuels du lac avec ceux des années .	50
3.1.4	Distribution granulométrique des sédiments superficiels de la zone sud-est du lac Nokoué	51
3.2	Caractéristique physico-chimique des sédiments	63
3.2.1	Caractéristique physique	63
3.2.2	Caractéristique chimique des sédiments.....	67
3.3	Estimation des stocks sédimentaires d’azote et de phosphore total dans les sédiments..	73
3.3.1	Stock sédimentaire d’azote total	73
3.3.2	Stock sédimentaire en phosphore total	74
	Conclusion et suggestion.....	76
	Références	77

Liste des sigles et abréviation

MO : matière organique

PID : phosphore inorganique dissous

EIS : eau interstitielle superficiel

NOP : azote organique particulaire

NOD : azote organique dissous

RDNA : réduction dissimilatrice du nitrate en ammonium

NT : azote total

PT : phosphore total

Liste des tableaux

Tableau 1 :Classification granulométrique des sols selon le guide GTR.....	21
Tableau 2: Méthodes de mesure d'azote et phosphore total (APHA 2005)	40
Tableau 3: Terminologie de caractérisation de la moyenne (Mz).....	43
Tableau 4: Terminologie caractéristique du sorting index	43
Tableau 5: Terminologie caractéristique de Krumbein ($Sk\sigma$).....	44
Tableau 6: Superficies des différents faciès en pourcentage.....	48
Tableau 7: paramètre granulométrique des échantillons de sable moyen.	52
Tableau 8: paramètre granulométrique des échantillons de sable fin à moyen.....	53
Tableau 9: Paramètres des échantillons constitués de sable fin	54
Tableau 10: Paramètre granulométrique des échantillons constitués de sable moyen argileux	56
Tableau 11: Paramètre granulométrique des échantillons constitués de sables fins à argileux	57
Tableau 12: Paramètre granulométrique des échantillons constitués de vase sableuse	58
Tableau 13: Paramètre des échantillons de sédiments constitués de vase	60
Tableau 14: Moyenne de la teneur en porosité en fonction de la nature du sédiment	64
Tableau 15: Moyenne de la teneur en eau en fonction de la nature du sédiment.....	66
Tableau 16: Moyenne en matière organique en fonction de la nature du sédiment.....	68
Tableau 17: Variation des paramètres physico-chimiques dans les sédiments	72
Tableau 18: Valeurs moyennes du stock d'azote total en fonction de la nature des sédiments de la zone d'étude.	73
Tableau 19: valeurs moyennes du stock en phosphore total en fonction de la nature des sédiments de la zone d'étude.	74

Liste des équations

Équation 1: réactions primaires d'oxydation de la matière organique établies selon (Froelich et al. 1979) dans les sédiments	21
Équation 2: réduction dissimilatoire du nitrate en ammonium (RDNA)	28
Équation 3: processus d'oxydation de l'ammonium en nitrite	29
Équation 4: processus d'oxydation du nitrite en nitrate.....	29
Équation 5: processus conduisant à la production d'azote	30

Liste des figures

Figure 1: Diagramme de Folk pour la classification des sols.	22
Figure 2: Cycle du phosphore dans les sédiments d'après Slomp et al. (1996).....	24
Figure 3: Cycle de l'azote d'après Trimmer et al (2003) avec les cinq processus principaux: ammonification (violet), nitrification (bleu), dénitrification (vert), réduction dissimilaire de nitrate en ammonium, RDNA (rouge) et anammox (jaune).....	27
Figure 4: Carte de localisation du lac Nokoué	35
Figure 5: Carte de répartition des lithofaciès des sédiments superficiels de la zone Sud-Est du lac Nokoué.....	49
Figure 6: Carte sédimentologies des années 1984(a), 2011(b) et 2022(c)	51
Figure 7: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable fin à moyen montrant une prédominance de sable fin (échantillon A48).....	52
Figure 8: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable fin à moyen montrant une prédominance de sable fin (échantillon A14).....	54
Figure 9: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable fin à moyen montrant une prédominance de sable moyen (échantillon A17)	55
Figure 10: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable moyen argileux montrant une prédominance de sable fin (échantillon A65).....	56
Figure 11: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable fin argileux montrant une prédominance de sable fin (échantillon A21).....	58
Figure 12: :Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable moyen argileux montrant une prédominance de sable fin (échantillon A37).....	59
Figure 13: Histogramme de fréquence d'un échantillon de vase (échantillon A38)	61
Figure 14: Courbe cumulatives des différents faciès de sédiments analysés	62
Figure 15: Variation de la teneur en porosité dans les sédiments superficiels.....	64

Figure 16: Carte des lithofaciès(a) et variation de la teneur en porosité des sédiments(d).....	65
Figure 17: Répartition spatiale de la teneur en eau	66
Figure 18: Carte de répartition des lithofaciès(c), de la porosité(d) et la teneur en eau(e) dans les sédiments	67
Figure 19: Variation de la matière organique.....	68
Figure 20: Carte de répartition des lithofaciès(c) et la variation de la matière organique(f) ...	69
Figure 21: Variation spatiale de la teneur en azote total	69
Figure 22: Variation de l'azote total dans les sédiments	70
Figure 23: Variation du phosphore total dans les sédiments.....	71
Figure 24: Carte de variation du phosphore total dans les sédiments	72

Liste des photos

Planche 1: Prélèvement des sédiments	38
Planche 2: Sédiment avant calcination (à droite) et après calcination (à gauche)	40

Résumé

Les sédiments des écosystèmes aquatiques jouent un rôle important dans les cycles biogéochimiques et constituent une source de réceptacle de la matière organique sédimentée. Pour une gestion durable de l'eutrophisation du lac, il est important d'avoir une estimation quantitative des éléments nutritifs au niveau du compartiment sédimentaire du lac Nokoué. Ainsi, la présente recherche vise à déterminer la contribution potentielle des nutriments dans les sédiments superficiels du lac Nokoué. Afin d'atteindre l'objectif fixé, une campagne d'échantillonnage a été effectuée pendant la saison sèche (mi-janvier à la fin du mois de février 2022). Au total, 103 échantillons ont été prélevés dans la zone Sud-Est du lac à l'aide d'une benne Eckman. Les proportions de la classe granulométrique ont été déterminées grâce à un massif vibrant composé d'une série de 7 mailles. L'azote et le phosphore total ont été déterminés par spectrophotométrie grâce à une minéralisation en milieu alcalin. Les résultats de l'analyse granulométrique ont montré que les sédiments sont constitués de 27,44% de sable. 31,67% de sable vaseux. 31,03% de vase sableuse et 9,84% de vase. L'analyse comparative des cartes sédimentologiques a montré que le lac se comble au fil des ans avec une extension de vase sableuse qui tend à tapisser le fond du lac. Les résultats issus de l'analyse des paramètres physiques (porosité, teneur en eau) indiquent que les sédiments sont très riches en eau avec une moyenne de 51.50 % et une porosité moyenne de 0.55. Aussi, les plus fortes teneurs sont observées dans les sédiments vaseux et vaso-sableux. La variation spatiale de ces paramètres indique que la variation en teneur en eau et porosité est fonction de la texture du sédiment. La teneur en matière organique oscille entre 0.4% à 50% avec une moyenne de 11.13 %. La concentration en azote totale oscille entre 281.5 à 9639 mg/kg avec une moyenne de 4334.6 mg/kg. Le phosphore total varie entre 25231 à 412889 µg/kg avec une moyenne de 124716 µg /kg. Ces valeurs élevées en matière organique, azote et phosphore total indiquent que les sédiments constituent une source interne en élément nutritif qui contribue à la dégradation de l'état écologique du lac Nokoué.

Mots clés : sédiment, matière organique, stocks sédimentaires, azote total, phosphore total.

Abstract

The sediments of aquatic ecosystems play an important role in biogeochemical cycles and constitute a receptacle source of sedimented organic matter. For a sustainable management of the eutrophication of the lake, it is important to have a quantitative estimation of the nutrients in the sedimentary compartment of Lake Nokoué. Thus, the present research aims at determining the potential contribution of nutrients in the surface sediments of Lake Nokoué. In order to achieve the objective, a series of sampling campaigns were carried out during the dry season (mid-January to end of February 2022). A total of 103 samples were collected in the south-eastern zone of the lake using an Eckman grab sampler. The proportions of the granulometric class were determined thanks to a vibrating mass composed of a series of 7 meshes. Nitrogen and total phosphorus were determined by spectrophotometer through mineralization in alkaline medium. The results of the particle size analysis showed that the sediments are composed of 27.44% sand. 31.67% of muddy sand. 31.03% of sandy mud and 9.84% of mud. The comparative analysis of the sedimentology maps showed that the lake is filling up over the years with an extension of sandy mud that tends to cover the bottom of the lake. The result of the analysis of the physical parameters (porosity. water content) indicates that the sediments are very rich in water with an average of 51.50 % and an average porosity of 0.55. Also the highest contents are observed in the muddy and muddy-sandy sediments. The spatial variation of these parameters indicates that the variation in water content and porosity is a function of sediment texture. The organic matter content varies between 0.4% and 50% with an average of 11.13%. The total nitrogen concentration varies between 281.5 to 9639. mg/kg with an average of 4334.6 mg/kg. The total phosphorus varies between 25231 to 412889 ug/kg with an average of 124716 ug/kg. These high values of organic matter, nitrogen and total phosphorus indicate that the sediments are an internal source of nutrients that contribute to the degradation of the ecological state of Lake Nokoué.

Key words : sediments, organic matter, stocks sedimentary, total nitrogen, total phosphore.

Introduction

Ces dernières années, une attention particulière de la communauté scientifique s'est portée sur la préservation et la gestion des écosystèmes aquatiques. La dégradation continue et accélérée de ceux-ci avec pour conséquence les phénomènes d'eutrophisation est une réalité à laquelle peu de milieux aquatiques au monde échappent. Les modifications majeures observées, dues tant aux activités anthropiques qu'aux facteurs naturels, ont des conséquences écologiques potentielles sur ces écosystèmes (Aw S., 2009). L'accroissement des apports d'azote et de phosphore provenant des bassins versants depuis les années 1960 et l'augmentation des activités anthropiques, est reconnu comme étant la cause majeure de la dégradation environnementale des écosystèmes côtiers (Cloern, 2001). En effet, de nos jours, les écosystèmes aquatiques sont sous l'influence de cette pollution en particulier en Afrique, où ces milieux sont généralement gouvernés par le phénomène d'eutrophisation qui aujourd'hui constitue un véritable problème environnemental.

Les apports en phosphore et en azote sont assurés, soit par des apports exogènes (rejets agricoles et urbains) provenant des bassins versants soit par le lac lui-même à partir des réserves en nutriments situées au niveau du sédiment (Schauser et al ; 2009). Cette charge interne constitue souvent une source importante en éléments nutritifs pour les eaux situées à l'interface eau-sédiment (Owens, 2002 ; Zhou,2005) et peut être considérée comme des sources diffuses dites secondaires, de contaminants pour l'environnement. Les interactions complexes entre les processus physiques, chimiques et biologiques peuvent remobiliser les polluants de la colonne sédimentaire vers la colonne d'eau et ainsi favoriser leur dispersion, mais également leur biodisponibilité (Zoumis et al., 2001). Très peu d'études concernant le rôle des sédiments des environnements aquatiques en Afrique ont été reportées dans la littérature. La plupart de celles qui ont été menées portent sur la colonne d'eau (Aw, 2013 ; Aw, 2011; Lhote, 2000). Dans ces environnements, la phase solide (les particules en suspension et les sédiments) joue un rôle déterminant dans l'équilibre des écosystèmes. Ainsi les sédiments influencent les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des eaux.

Plusieurs études ont été menées ces dernières années sur le lac Nokoué plus précisément au niveau du compartiment de la colonne d'eau pour comprendre le phénomène d'eutrophisation qui se traduit par le développement des macrophytes tels que la jacinthe d'eau. Mais force est de constater d'après les études antérieures que le lac est alimenté par une autre source d'apports d'éléments nutritifs. Pour une gestion efficace de l'eutrophisation dans le lac Nokoué, il a été récemment démontré lors d'une étude portant sur les bilans des nutriments

notamment l'azote et le phosphore au niveau du lac que près de 80% des apports fluviaux étaient immédiatement évacués du lac, et ne pouvait donc être responsable de l'eutrophisation (Djihouessi, 2018). Pour ce faire il est important de comprendre le fonctionnement des sédiments dans le processus d'eutrophisation.

Vu les conséquences écologiques potentielles observées au niveau du lac Nokoué dues tant aux activités anthropiques (industrialisation et urbanisation rapide) qu'aux facteurs naturels ces dernières années, une attention particulière de la communauté scientifique s'est portée sur la gestion de cet écosystème compte tenu de ces importants rôles dans l'économie du Bénin. Sur cette base, il est question de s'intéresser aux stocks sédimentaires en éléments nutritifs (azote et phosphore total) à l'interface eau-sédiment au niveau du lac Nokoué.

Le présent travail de recherche a pour objectif général de déterminer la contribution potentielle des stocks sédimentaires en éléments nutritifs dans les sédiments superficiels du lac Nokoué. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés sur la zone sud-est du lac Nokoué avec des objectifs spécifiques de :

- déterminer les caractéristiques granulométriques des différents faciès de sédiments superficiels de la zone sud-est du lac
- évaluer la variation spatiale de la teneur en azote et phosphore total,
- quantifier les stocks d'azote et phosphore dans les sédiments superficiels de la zone Sud-est du lac Nokoué.

Hypothèses :

- La répartition spatiale des différents faciès a connue une évolution dans le temps
- la concentration d'azote et de phosphore dans les sédiments varie dans l'espace
- Le stock d'azote et de phosphore varie en fonction de la nature du sédiment

Le présent document est organisé en trois chapitres :

- le premier chapitre s'intéresse à la revue bibliographique qui sous-tend l'étude sur l'estimation des stocks en azote et phosphore dans les sédiments ;
- le deuxième chapitre prend en compte la collecte des données et la méthodologie ;
- Le troisième chapitre présente les résultats et la discussion issue des travaux effectués.

Et enfin une conclusion et quelques perspectives.

Partie I : synthèse bibliographique

1 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Sédiment : origine des particules sédimentaires et mécanisme de diagenèse précoce

1.1.1 Origine des particules sédimentaires

Les sédiments sont définis comme un ensemble des dépôts continentaux ou marins constitués de particules qui proviennent de l'altération ou de la décomposition des roches préexistantes et de la précipitation de matières en suspension qui transitent dans la colonne d'eau (Lesven, 2008 ; Ramaroson, 2008 ; Scordia, 2008). Le sédiment est un milieu complexe et hétérogène constitué d'eau (jusqu'à 80%), de matériaux inorganiques et organiques et de composés d'origines anthropiques (Power et Chapman, 1992). Ainsi, on retrouve principalement dans les sédiments (Tessier, 2012) :

- des éléments chimiques qualifiés de majeurs (Si, Al, K, Ca, Fe, Mg, etc.) et dont les teneurs sont notamment liées à la nature géochimique du sédiment (détritique, roche mère, etc.)
- des éléments nutritifs (carbone organique, sulfate, azote, phosphore, etc.)
- des éléments métalliques présents, naturellement ou non, à l'état de traces (Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, etc.) ainsi que des contaminants organiques (HAP, PCB, composés phytosanitaires, etc.). L'ensemble de ces éléments chimiques contenu dans les sédiments proviennent principalement de quatre sources distinctes :
- **L'Origine terrigène** : les particules proviennent de l'altération superficielle des roches selon des mécanismes physiques ; chimique et biologique tels que l'érosion, les variations de température, l'hydrolyse, l'acidification, la salinité et l'activité des microorganismes (Gounou, C. 2008 ; Azzouz. S, 2014).
- **L'origine endogène** : les particules provenant de cette origine sont issue production autochtone du milieu. Cette production provient de la sédimentation des débris de macrophytes tels que les plantes aquatiques et les cadavres de microphytes et d'animaux (Azzouz. S, 2014).
- **L'origine liée à la néoformation** : qui correspond aux phénomènes d'altérations, de transferts et de précipitations qui peuvent se produire dans le bassin de sédimentation ou à l'intérieur du sédiment durant la diagenèse (Loustau cazalet, M. 2012).
- **L'Origine anthropique** : en relation avec les activités humaines comme les rejets agricoles, industriels et domestiques (Loustau cazalet, M. 2012 ; Azzouz S., 2014).

Les éléments chimiques présents au niveau des sédiments dans le système aquatique est soumis à un nombre important de réactions biogéochimiques qui vont conduire à des

modifications de composition physico-chimique du milieu grâce à un mécanisme complexe de transformation appelées diagenèse.

1.1.2 Diagenèse précoce des sédiments

Par définition, la diagenèse précoce désigne l'ensemble des transformations que subissent les sédiments après leur déposition. Elle est contrôlée par des réactions chimiques (adsorption, précipitation, dissolution), physiques (diffusion, advection, bioturbation) et biologiques (minéralisation de la matière organique par l'activité bactérienne), qui ont lieu simultanément dans les sédiments (Berner 1980). Ces processus sont gouvernés de manière prépondérante par la minéralisation de la matière organique (MO) dans la colonne sédimentaire. Au cours de la diagenèse précoce, de nombreuses transformations ont lieu dans les sédiments qui conduisent au relargage et/ou à l'enfouissement de la matière organique, mais également à la transformation de phases particulières.

La source principale du déclenchement de la diagenèse précoce est la dégradation de la matière organique associée aux particules qui sédimentent. Cette dégradation a lieu grâce à la présence des microorganismes benthiques hétérotrophes, qui vont utiliser la matière organique comme source de carbone et d'énergie suivant une série de réactions enzymatiques (Berner, 1980 ; Schultz, 2006 ; Tessier, 2012). En effet, après enfouissement de la MO dans les sédiments, celle-ci va subir une dégradation progressive à travers une série de réactions d'oxydoréduction qui conduisent à l'oxydation de la MO particulaire en dioxyde de carbone qui sera le donneur d'électron (le réducteur) et une suite de composés présents dans le milieu vont jouer le rôle d'accepteurs d'électrons (les oxydants) (Tessier, 2012). Ces réactions ont lieu en fonction de la disponibilité des oxydants et de la décroissance de leurs potentiels d'oxydoréduction. Les réactions métaboliques dans les sédiments contribuent de façon prépondérante à la production et à la minéralisation de la matière organique et déterminent les caractéristiques des conditions d'oxydoréduction des sédiments (Moreno, 2015). Dans le sédiment, l'oxygène dissous est considéré comme la première source d'oxydant disponible pour la minéralisation de la MO et utilisable par les microorganismes en raison de sa plus grande production d'énergie libre.

Les différentes espèces qui vont alors successivement se réduire suivant la décroissance du potentiel d'oxydoréduction sont le dioxygène dissous, les nitrates, les oxydes, l'hydroxyde de manganèse, de fer et les sulfates suivant les mécanismes d'oxydoréduction présentée sur la Figure ci-dessous.

Oxydation de la Matière Organique (M.O.) par l'oxygène (1)	ΔG° (KJ/mol)
$138\text{O}_2 + \text{M.O.} + 18\text{HCO}_3^- \rightarrow 124\text{CO}_2 + 16\text{NO}_3^- + 122\text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{PO}_4$	-479
Dénitrification (2)	
$94.4\text{NO}_3 + \text{M.O.} \rightarrow 52.2\text{N}_2 + 13.6\text{CO}_2 + 84.8\text{H}_2\text{O} + \text{HPO}_4^{2-} + 92.4\text{HCO}_3^-$	-453
Oxydation par les oxydes de manganèse (3)	
$236\text{MnO}_2 + \text{M.O.} + 104\text{H}_2\text{O} + 364\text{CO}_2 \rightarrow 236\text{Mn}^{2+} + 470\text{HCO}_3^- + \text{HPO}_4^{2-} + 8\text{N}_2$	-349
Oxydation par les oxydes de fer (4)	
$424\text{FeO}_3 + \text{M.O.} + 104\text{H}_2\text{O} + 740\text{CO}_2 \rightarrow 424\text{Fe}^{2+} + 846\text{HCO}_3^- + \text{HPO}_4^{2-} + 16\text{NH}_3$	-114
Oxydation par les sulfates (5)	
$53\text{SO}_4^{2-} + \text{M.O.} \rightarrow 53\text{HS}^{2-} + 39\text{CO}_2 + 39\text{H}_2\text{O} + \text{HPO}_4^{2-} + 67\text{HCO}_3^- + 16\text{NH}_4^+$	-77

Équation 1: Réactions primaires d'oxydation de la matière organique établies selon (Froelich et al. 1979) dans les sédiments

La minéralisation de la matière organique particulaire à l'interface eau-sédiment provoque, en raison des gradients d'oxydoréduction, des réactions de transformation (diagenèse précoce) qui modifient la distribution et la mobilité des éléments nutritifs (Moreno, 2015).

1.2 Composition des sédiments

1.2.1 Composition granulométrique des sédiments

La distribution granulométrique des grains solides d'un sédiment ou d'un matériau en général est une caractéristique physique qui permet de classer le matériau selon la taille de ses particules élémentaires. Elle définit la classe du matériau indépendamment de sa nature chimique. Chaque catégorie se distingue par des propriétés physiques et géotechniques qui lui sont propres.

Tableau 1 : Classification granulométrique des sols selon le guide GTR

Fraction granulométrique	Dénomination
> 200 mm	Enrochements
20 mm à 200 mm	Cailloux
2 mm à 20 mm	Graviers
63 μm à 2 mm	Sables
2 μm à 63 μm	Limons
0 à 2 μm	Argiles

D'autres classifications basées sur la granulométrie permettent d'attribuer des dénominations conventionnelles dans le but de regrouper les sols en familles présentant des caractéristiques géotechniques très voisines. Parmi les classifications couramment utilisées, il y a la classification triangulaire de Taylor qui prend la forme d'un triangle dont chaque côté représente les pourcentages d'argile, de limon et de sable contenus dans le sol étudié (Figure I.2).

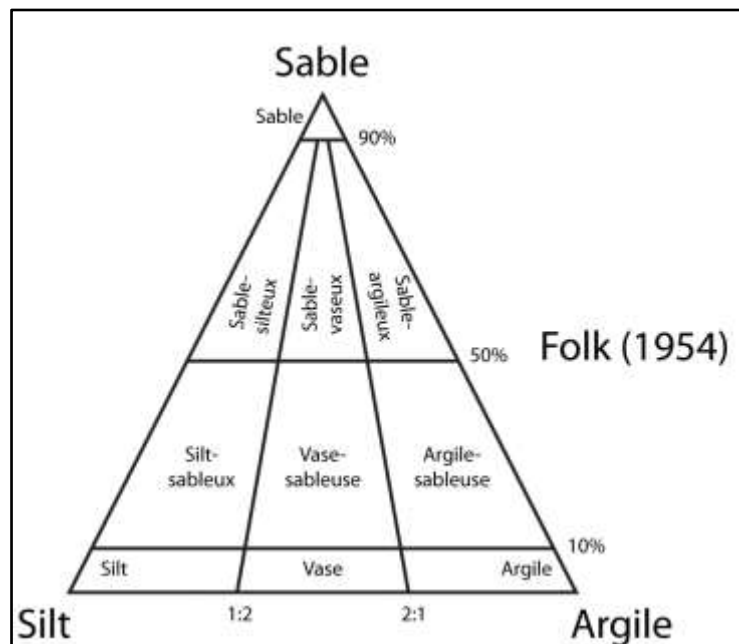


Figure 1: Diagramme de Folk pour la classification des sols.

La distribution granulométrique joue un rôle important dans le comportement mécanique et géotechnique des sédiments. En effet, plus la distribution granulométrique est étalée, plus la capacité portante du matériau formulé est élevée (Léreau J., 2006). Selon Dubois (2006), la fraction fine contenue dans le sédiment et correspondant aux particules dont le diamètre est inférieur à 80 μm , provoque des comportements complexes. En effet, les particules fines – et notamment les argiles – sont de nature cohésive et se caractérisent par une surface de contact importante et chargée positivement, ce qui leur donne un grand pouvoir d'adsorption des contaminants. Plusieurs études ont montré qu'environ 70 % des contaminants sont fixés sur la fraction fine ($< 45 \mu\text{m}$), tandis que la contamination est quasi nulle sur les autres fractions (Tran, N. T., 2009 : Zeraoui.A, 2020).

1.2.2 L'eau dans le sédiment

La teneur en eau exprimée en pourcentage (%) est définie comme étant le rapport entre la masse d'eau présente dans un matériau et la masse de sa fraction solide. Pour les sédiments, elle est très variable et dépend principalement de la nature du sédiment. (Zentar. R, et al,

2011). L'eau contenue dans le sédiment peut se présenter sous plusieurs formes selon son degré de liaison avec les particules (Zeraoui.A, 2020) :

- l'eau libre : elle n'est pas liée aux particules et circule librement à travers les grains. Elle peut être éliminée par une simple décantation ;
- l'eau capillaire : elle représente l'eau qui est liée aux particules fines par des forces capillaires ;
- l'eau colloïdale : c'est l'eau qui forme les hydrates de colloïdes, elle peut être éliminée par de simples procédés de séparation solide liquide ;
- l'eau intercellulaire : c'est l'eau qui est chimiquement liée aux particules et qui entre dans la composition chimique du matériau, elle ne peut être éliminée que par des procédés thermiques.

1.2.3 Matière organique dans les sédiments

L'origine de la matière organique dans les sédiments est très variée, elle provient souvent de débris végétaux et de la décomposition de différents micro-organismes (bactéries, champignons...). (Kasmi. A, 2014 : Song. Y, 2017,) (Zeraoui.A, 2020):

D'après (Colin, 2003), la fraction organique d'un sol peut être classée en deux catégories :

- les substances non humiques : cela regroupe les éléments dont la structure simple est connue dans la chimie classique (acides organiques, acides aminés, protéines, lipides, etc.) ;
- les substances humiques : elles représentent entre 85 et 90 % de la matière organique totale d'un sol et n'appartiennent à aucun groupe de la chimie ou la biochimie, ce qui rend leur définition difficile. Les acides humiques ont une structure très variée, hétérogène et complexe. Cependant, ils ont un élément en commun : une molécule hydrophile. En effet, la capacité de rétention de ces molécules peut atteindre 20 fois leur poids, et elles sont également ioniques.

1.3 Cycle du phosphore et de l'azote dans les sédiments

1.3.1 Cycles du phosphore dans les sédiments

Dans les écosystèmes aquatiques enrichis en nutriments de façon naturelle ou anthropique, le stockage interne des nutriments dans les sédiments, en particulier celui du phosphore, peut donc être une source secondaire à l'origine du phénomène d'eutrophisation des écosystèmes aquatiques. De façon naturelle, le phosphore provenant de l'altération des roches est

lentement lessivé par les eaux de ruissellement pour rejoindre le réseau hydrique ou il sédimente. Dans le milieu aquatique, le phosphore sédimentaire est donc majoritairement sous forme particulaire, associé à la fois à la matière organique et/ou aux particules minérales (Slomp 2011, Ruttenberg 2014). De nombreux auteurs s'accordent à dire que le cycle du phosphore est généralement régi par un ensemble d'équilibre au sein de la colonne d'eau et à l'interface eau-sédiment. Les échanges de phosphores à l'interface eau-sédiment relèvent des phénomènes très complexes, qui regroupent des processus chimiques, biologiques et physiques. La compréhension et la quantification de ces échanges dans le cycle du phosphore sont des sujets de préoccupation très actuels et très délicats. En effet, il est actuellement admis que la couche superficielle des sédiments peut considérablement influencer la production primaire (Golterman 1984) en particulier par le processus de relargage ou de stockage du phosphore (Abdallaoui 1998). Le devenir du phosphore est régi par plusieurs mécanismes. La figure 2 présente le cycle du phosphore dans les sédiments les processus marquants du cycle sont : l'assimilation, la minéralisation, l'adsorption, la désorption et enfin la précipitation et la dissolution.

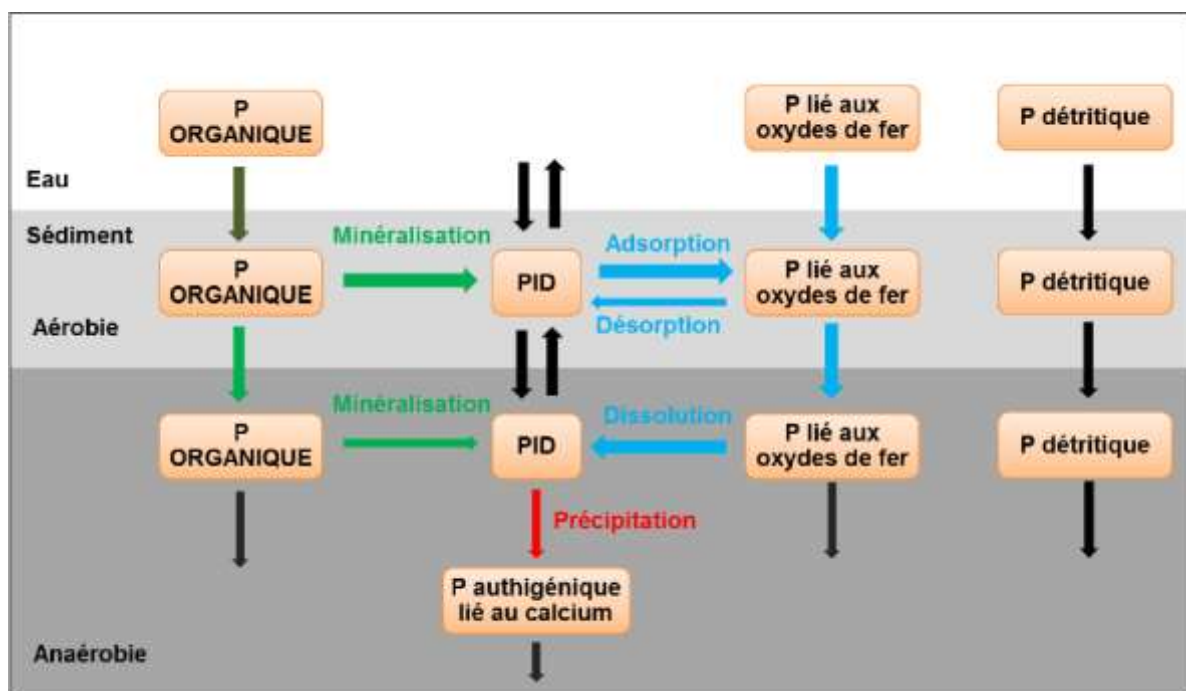


Figure 2: Cycle du phosphore dans les sédiments d'après Slomp et al. (1996).

1.3.1.1 L'assimilation et la minéralisation

Dans les sédiments, la minéralisation du phosphore organique est réalisée dans le milieu aérobie en présence d'oxygène par les bactéries autotrophes qui produisent du phosphore inorganique dissous (PID). Le phosphore inorganique dissous produit dans les eaux interstitielles du sédiment (EIS) constitue la fraction assimilable par les organismes aquatiques. Il peut ensuite diffuser vers la colonne d'eau ou être remobilisé dans les sédiments (Ratmaya 2018) ou il subit d'autres transformations.

1.3.1.2 L'adsorption et la désorption

L'adsorption est définie comme étant une réaction qui fait transférer les ions PO_4^{3-} d'une phase liquide par l'augmentation de la concentration dans une phase solide. Cette réaction s'effectue à la surface des particules. En d'autres termes, c'est une fixation d'éléments dissous à la surface de particules et selon sa rapidité et sa réversibilité, on parle d'adsorption chimique ou d'adsorption physique (Stumm et Morgan 1970, Bostrom et al. 1988a).

L'adsorption chimique est un phénomène lent et non totalement réversible qui met en jeu des liaisons chimiques, comme les complexes de coordination, lors de l'adsorption des ions PO_4^{3-} sur des hydroxo-complexes polynucléaires par échanges de ligands. (Stumm et Morgan 1970, Rao et Davidson 1982). Ainsi dans les sédiments aérobies le PID produit lors de la minéralisation est adsorbé sur les particules des sédiments en présence des liaisons chimiques, précipité sur les oxydes de fer (ou de manganèse) ou les minéraux apatitiques (Hyacinthe & Van Cappellen 2004, Ruttenberg 2014). L'association du PID avec les oxydes de fer est réversible. Par ailleurs, le phosphore peut se fixer sur les ions ferriques des complexes humiques pour former des composés humiques phosphate-ferrique qui sont plus stable que les composés minéraux en cas de diminution du potentiel redox (Bostrom et al. 1982). La présence des oxydes de fer dans les sédiments de surface (oxygénés) peut donc limiter la diffusion du PID vers la colonne d'eau. (Ratmaya 2018)

L'adsorption physique c'est-à-dire la désorption est un phénomène rapide et totalement réversible au cours de laquelle une partie du phosphore inorganique dissous fixé sur les oxydes de fer est libéré dans les eaux interstitielles. L'adsorption physique met en jeu des liaisons de faibles énergies, de type Van Der Waals (Ku et al. 1978 ; Boström et al. 1982).

Les processus d'adsorption des ions PO_4^{3-} sont affectés par plusieurs paramètres, mais d'une manière générale, des auteurs ont défini le pH, le potentiel redox et la température comme les paramètres les plus importants pour la mobilité des ions PO_4^{3-} (Bostrom et al. 1988a). Cependant, d'autres facteurs comme l'activité biologique et la concentration des ions PO_4^{3-} peuvent aussi jouer un rôle dans la modification des équilibres établis au sein du sédiment (Kuo et Lotse 1972, Lijklema 1980, Martin 1985).

1.3.1.3 La précipitation et la dissolution

La précipitation est un processus chimique au cours de laquelle un ou plusieurs éléments se déplacent d'une solution par leur combinaison mutuelle dans un nouveau composé solide pour former un précipité. La formation des précipités demande des concentrations non négligeables des ions dissous tels que PO_4^{3-} , Ca_2^+ et Fe_3^+ ou Fe_2^+ (Enell et al., 1988). Elle a lieu dans le milieu anaérobie en absence d'oxygène. Ainsi, lorsque les sédiments deviennent anoxiques, la réduction des oxydes de fer conduit à la libération du PID, qui peut alors précipiter avec le calcium pour former du phosphore antigénique apatitique (Froelich et al. 1988, Slomp et al. 1996) ou diffuser vers la couche superficielle.

1.3.2 Cycle de l'azote dans le sédiment

En tant qu'élément limitant, l'azote est un élément nutritif fondamental pour la productivité biologique, il occupe un rôle central dans la biogéochimie des écosystèmes aquatiques exerçant une influence significative sur les cycles de nombreux autres éléments, en particulier le carbone et le phosphore (Gruber 2008).

Dans les écosystèmes aquatiques, les composés azotés sont présents sous des formes organiques ou inorganiques sous cinq états d'oxydation différents (Galloway et al. 2003). Ils peuvent se trouver dans le milieu aquatique sous forme de nitrate NO_3^- , avec un état d'oxydation de +V, de nitrite, NO_2^- (+III), d'oxyde d'azote, N_2O (+I), d'azote moléculaire, N_2 (0) et d'ammonium, NH_4^+ (-III). L'azote en excès dans les systèmes terrestres est partiellement exporté sous l'effet de la précipitation vers les milieux aquatiques. Une fois dans les systèmes aquatiques, le N peut être assimilé par les plantes et les autres organismes vivants, sédimenter, transporté par advection, et/ou dénitrifié (Saunders et al., 2001).

Dans les écosystèmes côtiers peu profonds, les sédiments représentent le principal lieu de stockage de la matière organique particulaire produite dans la colonne d'eau par sédimentation de la cellule morte, ou par décomposition du biofilm bactérien présent en surface des sédiments. Le sédiment est donc alimenté par de l'azote organique (N organique)

provenant de la matière organique qui s'accumule sous forme particulière (NOP) pour y être décomposé sous forme d'azote organique dissous (NOD), puis minéralisé sous forme d'azote ammoniacal (ammonification) (Ratmaya, 2018). En effet, le cycle de l'azote dans les sédiments est constitué d'une succession de réactions d'oxydoréduction aérobies et anaérobies permettant la transformation des composés azotés suivant plusieurs mécanismes biochimiques que sont : l'ammonification ; la nitrification ; dénitrification ; la Réduction dissimilatrice du nitrate en ammonium (RDNA) et le phénomène d'anammox.

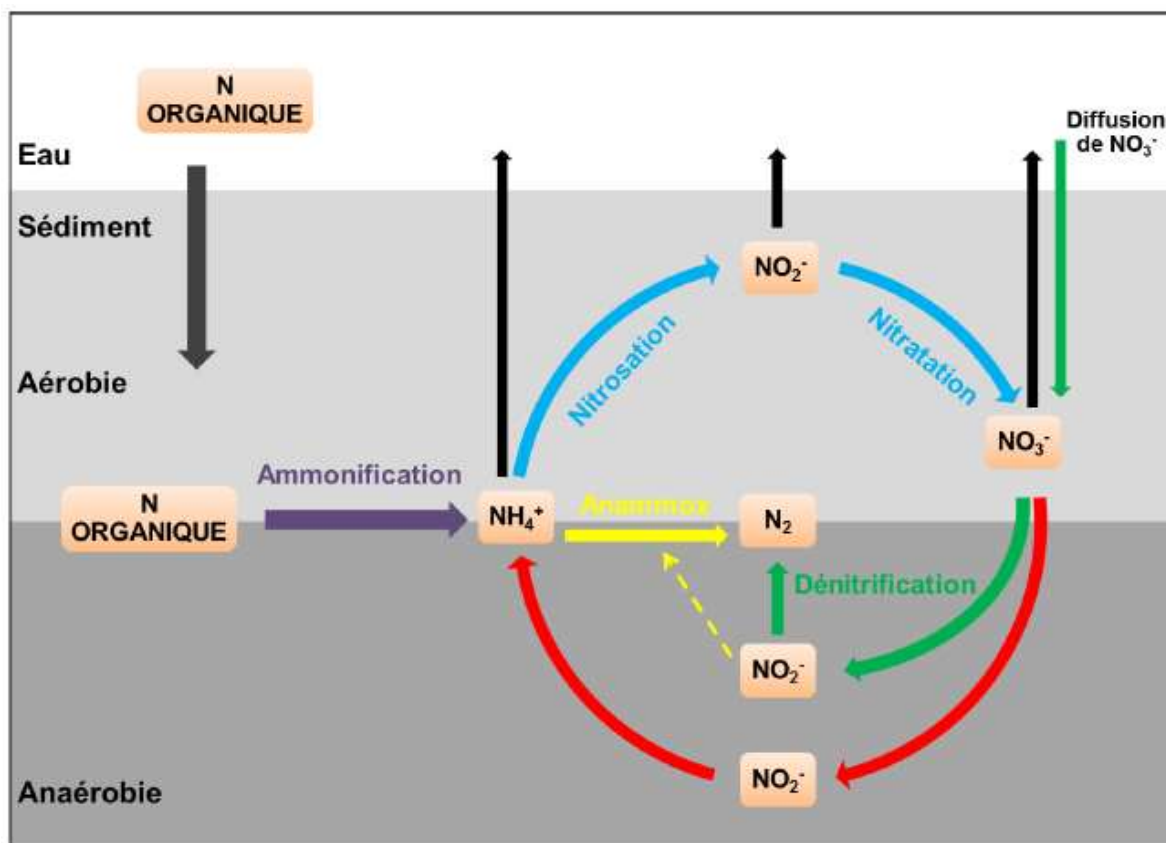


Figure 3: cycle de l'azote d'après Trimmer et al (2003) avec les cinq processus principaux: ammonification (violet), nitrification (bleu), dénitrification (vert), réduction dissimilatoire de nitrate en ammonium, RDNA (rouge) et anammox (jaune).

1.3.2.1 Processus conduisant à la production d'ammonium

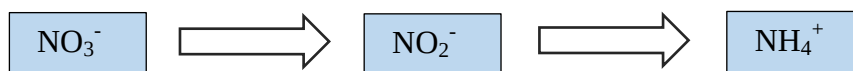
❖ Minéralisation-ammonification de l'azote :

Dans les écosystèmes aquatiques, les sédiments sont des lieux privilégiés de stockages de la matière organique, de transformation et de régénération des nutriments. La production d'ammonium à partir de la matière organique (ammonification) dépend de la qualité et la quantité de la matière organique (Zaghmouri 2013). La matière organique particulière est minéralisée par l'ammonification grâce à une réaction

bactérienne transformant le N organique en NH_4^+ . L'ammonification est réalisée en présence des bactéries hétérotrophes et est cinétiquement plus rapide que la nitrification. L'ammonification est de ce fait rarement une réaction limitante (Kowarzyk 2009). Une large gamme de microorganismes aérobies et anaérobies (Pseudomonas, Vibrio, Proteus, Bacillus et Clostridium) participent à cette réaction de régénération (Herbert 1999).

❖ Réduction dissimulatrice du nitrate en ammonium (RDNA)

Dans le milieu aquatique, la dénitrification est souvent considérée comme le seul processus de réduction dissimulatrice du nitrate (utilisation du nitrate comme accepteur d'électrons), alors que la réduction dissimulatrice du nitrate en ammonium (RDNA) comme son nom l'indique est un processus conduisant à la production de l'ammonium par réduction anaérobie des nitrates, ne conduisant pas à une perte d'azote pour l'écosystème, mais à la production d'ammonium, forme disponible pour la chaîne trophique (Bonin et *al.* 1998, Herbert 1999).



Équation 2: Réduction dissimilatoire du nitrate en ammonium (RDNA)

La présence de sulfides semble être le facteur déterminant le destin des NO_3^- , étant donné que la RDNA est favorisée par la présence de sulfides dans le milieu et que les sulfides inhibent la dénitrification (Burgin and Hamilton 2007). Les microorganismes impliqués dans la RDNA sont autotrophes, hétérotrophes, fermentatifs, anaérobies strictes ou facultatifs. Les bactéries de la RDNA les plus couramment décrites sont des fermentatives appartenant aux genres Aeromonas, Vibrio, Clostridium et Desulfovibrio (Bonin 2000, Canfield 2005). La réduction du nitrite NO_2^- en ammonium NH_4^+ est réalisée en une seule étape par l'intermédiaire d'une enzyme : la NrfA (Simon 2002).

1.3.2.2 Processus conduisant à la production de nitrate

❖ La nitrification

La nitrification est un processus chimio-autotrophe, qui se déroule en deux étapes en présence d'oxygène (réaction aérobique) permettant l'oxydation de NH_4^+ en nitrites (NO_2^-) (nitritation) puis du nitrite en NO_3^- (nitration). Cette réaction est réalisée par deux communautés distinctes. La première étape de la nitrification qui est la nitritation consiste à l'oxydation de NH_4^+ en NO_2^- et est réalisée en présence des bactéries du genre Nitrosomonas, Nitrosococcus et Nitrospira.



Équation 3: Processus d'oxydation de l'ammonium en nitrite

La deuxième étape de la nitrification qui est la nitrification consiste à l'oxydation des NO_2^- en NO_3^- en présence des bactéries du genre *Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrococcus* et *Nitrospira* sont les plus communs réalisant cette réaction.



Équation 4: Processus d'oxydation du nitrite en nitrate

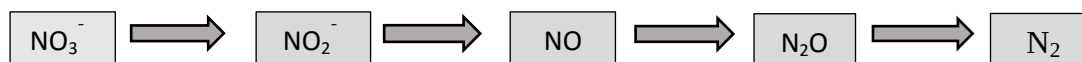
De nombreux facteurs environnementaux influent sur les réactions impliquées dans la nitrification. La présence d'oxygène est indispensable au développement de ces microorganismes qui réalisent une respiration aérobie. Elle inhibe la réaction à des concentrations inférieures approximativement à $\sim 3 \text{ mg L}^{-1}$ (Ward 2000). L'oxydation de NO_2^- est diminuée en présence de lumière. Le pH et la température sont aussi des facteurs importants puisqu'ils agissent sur l'affinité de l'enzyme pour son substrat. La salinité semble avoir un effet très marqué sur la structure des communautés nitrifiantes par une diminution des taux de nitrification de 50% à des concentrations de sel de 10 ppm (Rysgaard et al. 1999). La présence de racines de macrophytes peut stimuler l'activité nitrifiante à cause de la production d'oxygène dans la rhizosphère. De même, l'activité de bioturbation par le macrobenthos altère les gradients de NH_4^+ et d' O_2 et stimule donc la nitrification (Bonin 2000, Sorokin et al. 2001). La présence de composés oxydés dans les sédiments (tels que les oxydes de manganèse) peut de façon abiotique induire une oxydation de l'ammonium en nitrate et par conséquent une nitrification anaérobie (Hulth et al. 1999, Thamdrup & Dalsgaard 2000).

1.3.2.3 Production d'azote N_2

❖ Dénitrification

La dénitrification, transformation du nitrate en diazote, est une succession de réductions au cours desquelles le nitrate initial (NO_3^-) est successivement réduit en nitrite (NO_2^-), oxyde nitrique (NO), oxyde nitreux (N_2O) pour aboutir à l'azote moléculaire (N_2) (Canfield 2005). Cette réaction a lieu en présence des enzymes spécifiques. Elle est une réaction de respiration anaérobie effectuée par des bactéries hétérotrophes (les genres les plus communs sont : *Bacillus*, *Enterobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* et *Spirillum*) qui réalisent cette réaction de façon facultative étant donné qu'elles peuvent aussi respirer en milieu aérobie. En présence d' O_2 , ces bactéries favorisent la respiration aérobie qui est plus rentable énergétiquement que

la dénitrification. Les bactéries dénitrifiantes se retrouvent de façon ubiquitaire et de ce fait, ce processus peut avoir lieu tant dans les milieux terrestres, que les milieux d'eau douce et d'eau salée. Pour chaque réaction, les substrats oxydés servent comme accepteurs d'électrons dans la respiration, processus couplé à l'oxydation de la matière organique. La première étape de ce processus, la réduction des NO_3^- en NO_2^- , est appelée la réduction dissimilaire de NO_3^- et a lieu dans une grande variété de bactéries, alors que la réduction des NO_3^- en N_2O ou N_2 n'est effectuée que par un sous échantillon de ces bactéries (Knowles 1982).



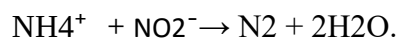
Équation 5: Processus conduisant à la production d'azote

La dénitrification a souvent été considérée comme la seule réaction importante qui élimine le N des systèmes aquatiques (Nixon et al. 1996). Cependant, d'autres réactions transformant le N peuvent aboutir à la production de N_2 . En milieu naturel, les taux de dénitrification sont variables en fonction des écosystèmes, des apports en nitrate, mais aussi en fonction du temps. En zone côtière, les estuaires sont des milieux soumis à des apports d'azote par voies naturelles et anthropiques et constituent de véritables points à la dénitrification. Ce processus va, par conséquent, constituer un réel frein naturel à l'eutrophisation (Seitzinger 1988, Howarth et al. 1996). Lorsque les apports allochtones de nitrate sont faibles, le processus de dénitrification est principalement lié au couplage nitrification/dénitrification (Jenkins & Kemp 1984). Dans les sédiments marins intertidaux, la bioturbation et les apports en oxygène en surface des sédiments sont généralement importants et favorisent la synthèse de nitrate et sa pénétration dans les couches profondes du sédiment et donc la dénitrification (Gilbert et al. 1995).

La présence et l'amplitude de la dénitrification dépend de plusieurs facteurs tels que la présence des nitrates, la concentration de l'oxygène ainsi que le pH et la température sont des facteurs qui contrôlent le processus de dénitrification.

❖ *Anammox*

Le processus d'anammox effectué par des bactéries appartenant au phylum des planctomycètes (Planctomyces et Pirellula étant les genres les mieux connus), produit du N_2 par l'oxydation anaérobie de NH_4^+ par les NO_2^- (Kuypers et al. 2005) :



Certaines recherches stipulent que l'anammox pourrait être responsable de 67% du N_2 produit dans les sédiments marins (Thamdrup and Dalsgaard 2002). À l'échelle globale, l'importance de l'anammox reste à être vérifiée (Francis et *al.* 2007). Selon (Trimmer et *al.* 2006) le rôle de l'anammox dans le cycle de l'azote et son importance n'a cessé d'être discuté. L'oxydation anaérobie de NH_4^+ , c'est-à-dire anammox, récemment mise en évidence dans les sédiments côtiers (Thamdrup & Dalsgaard 2002, Trimmer et *al.* 2003), utilise l'oxygène du NO_2^- pour transformer le NH_4^+ en N_2 (Ratmaya, 2018).

1.4 Stocks des nutriments dans les sédiments des lacs côtiers

Dans les écosystèmes lagunaires, où la profondeur est faible, le sédiment devient le lieu central des cycles biogéochimiques, le lieu d'une intense productivité biologique et le lieu de stockage des sels nutritifs. Ces éléments nutritifs reconnus comme étant la cause majeure de la dégradation environnementale des écosystèmes côtiers proviennent de l'augmentation des activités anthropiques. Les lagunes sont particulièrement touchées par ces phénomènes d'eutrophisation qui conduisent à de profondes modifications de la structure, du fonctionnement et des services que rendent ces écosystèmes.

Une étude portant sur la restauration des écosystèmes lagunaires a permis de voir l'évolution du stock d'azote et du phosphore total entre 1999 et 2010 dans la lagune de Bages-Sigean en France. Cette étude a été effectuée sur des données de 6 ans, en raison du fait que les concentrations en azote et en phosphore total dans le compartiment benthique ne varient pas de manière instantanée, mais sur des temps plus longs. Les concentrations en azote et phosphore total dans les sédiments (intégré sur 5 cm de profondeur) de ces lagunes méditerranéennes françaises sont hétérogènes avec des valeurs allant de 0,20 à 11,35 g kg⁻¹ pour l'azote total et de 0,065 à 1,249 g kg⁻¹ pour le phosphore total. Bien que le sédiment De Thau paraisse le plus enrichi en azote et phosphore total, la variabilité spatiale y est importante et est attribuée en partie à la profondeur et aux pratiques culturales de la lagune.

Les stocks sédimentaires en azote total (médiane des valeurs de chaque lagune) varient entre 0,0 g m⁻² à 124,3 g m⁻² au sein des lagunes méditerranéennes. Pour le phosphore total, les stocks sont moins hétérogènes en variant de 8,2 g m⁻² à 25,7 g m⁻². Les concentrations mesurées aujourd'hui dans le sédiment sur ces lagunes (2011 ou 2012) mettent ainsi en évidence l'inertie du compartiment benthique vis-à-vis du stockage de l'azote et du phosphore. Le sédiment est devenu une source potentielle d'azote et de phosphore pour les organismes autotrophes et le transfert des nutriments entre le sédiment et la colonne d'eau est encore mal connu, en particulier pour des sédiments particulièrement eutrophisés.

1.5 Etat de connaissance sur l'interaction à l'interface eau-sédiment du lac Nokoué

Il est important de noter qu'au niveau de la matrice sédimentaire du lac Nokoué la connaissance en teneurs en éléments nutritifs est très peu étudiée dans les sédiments. Contrairement aux métaux tels que le Pb, Cd, Cu et le Zinc plusieurs études ont été abordées dans le but de voir l'état de pollution du lac Nokoué les travaux de Adechina, 2017 ont révélé des teneurs moyennes en Pb, Cd, Cu et Zinc de 11,7 mg/kg, 124,6 mg/kg, 21,6 mg/kg et 80,9 mg/kg dans les sédiments. Comparativement aux études menées par Edoh et *al.* (2010) cités par Hounkpatin et *al.* (2011) montrant une baisse de la teneur en Pb dans les sédiments du lac (moyenne de 0,93 mg/kg), celles de Kaki et *al.* (2011b) ont révélé des teneurs atteignant 13,94 et 22,07 mg/kg pour le Pb et le Cd. Des résultats de Youssao et *al.* (2011), montrent une augmentation spectaculaire à Calavi (Pb : 895,33 mg/kg) et au milieu du lac Nokoué (Pb : 233,25 mg/kg). Ces teneurs en métaux dans les sédiments du lac nokoué témoigneraient d'une pollution des eaux du lac.

En ce qui concerne les teneurs en éléments nutritifs dans les sédiments, une étude récente menée par Djihouessi en 2018 ont révélé des teneurs moyennes en Azote total de 853.33 mg/kg au niveau de Djonou à l'ouest du lac : 794.75 mg/kg au sud précisément Dantopka : 359.72 mg/kg au centre-ouest. Dans le nord-est précisément à Dékanmè la valeur moyenne en azote total est de 543.60 mg/kg par contre dans le nord-ouest elle est de 1240.30 mg/kg au niveau de Ganvié. Pour le phosphore total elle varie respectivement de 8871.68 µg/kg à l'ouest du lac : 21063.16 µg/kg : au sud : 7061.53 µg/kg au centre-ouest : 26376.77 µg/kg au nord-est et de 32458.89 µg/kg au nord –ouest du lac Nokoué. Ces valeurs de phosphore total obtenue au niveau du lac Nokoué sont toutes supérieures à celle obtenue dans la lagune de Porto-Novo qui varie de 11880g/g à 18517,71 µg/g avec une moyenne d'environ 15432,48 µg/g (Chouti et *al* 2017) l'estimation des stocks d'azote et phosphore dans les sédiments étudiés à partir des concentrations mesurées indique que la zone nord-ouest du lac représentait l'endroit où les sédiments ont un potentiel élevé de libération de nutriments avec une moyenne de 157.51 gN/m² et 4.12 gP/m².

Partie II : matériel et méthodes

2 APPROCHE METHODOLOGIQUE

Pour répondre aux objectifs fixés dans cette étude, une démarche méthodologique a été adoptée. Cette démarche tient compte des objectifs spécifiques fixés dans le cadre de cette étude. L'approche mise en œuvre prend en compte aussi bien les travaux de terrain que ceux effectués en laboratoire. Ainsi, le présent chapitre décrit dans un premier temps le milieu d'étude et dans un second temps la technique adoptée pour la collecte des données.

2.1 Présentation de la zone d'étude

Situé au Sud-Est du Bénin et compris entre les parallèles 6°20' et 6°30' Nord et les méridiens 2°20' et 2°35' Est, le lac Nokoué couvre une superficie de 150 km² à l'étiage. Il a une longueur moyenne de 20 km dans sa direction Est-Ouest et une largeur de 11 km dans sa direction Nord-Sud (P. A. Lalèyè, 1995, F. Dovonou et al, 2011). Il s'étend sur les départements de l'Ouémé, de l'Atlantique et du Littoral. Il est limité à l'Ouest par le plateau d'Abomey-Calavi, à l'Est par la lagune de Porto-Novo, au Nord par la plaine d'inondation du fleuve Ouémé et de la rivière Sô puis au Sud par la ville de Cotonou. Le chenal de Cotonou et le canal de Totchè relient respectivement le lac à l'Océan Atlantique et à la lagune de Porto-Novo. Le lac Nokoué est caractérisé par une eau saumâtre à salinité variable selon les périodes, le site et la profondeur (C. Niyonkuru et al. 2012) Il reçoit les eaux de trois affluents qu'est le fleuve Ouémé (nord- est) ; la rivière Sô (nord-est) et la rivière Djonou (sud- est) (Djihouessi, 2018) et le chenal de Cotonou par lequel arrive l'eau de mer. Les grands centres urbains qu'on retrouve sur les berges du lac sont : Cotonou au sud ; Abomey-Calavi à l'Ouest, Sèmè Kpodji à l'Est et So Ava au Nord. Les activités telles que la pêche, l'agriculture, le tourisme, le commerce y sont développées.

Pour cette étude nous nous sommes intéressés sur la zone Sud-Est du lac en s'appuyant sur des études antérieures qui n'ont pas accordé un intérêt particulier en ce qui concerne le stock des nutriments dans les sédiments du lac et aussi en considérant à la fois la densité de la population riveraine, les activités anthropiques aux environs et dans le lac et la portée de chaque site de prélèvement.

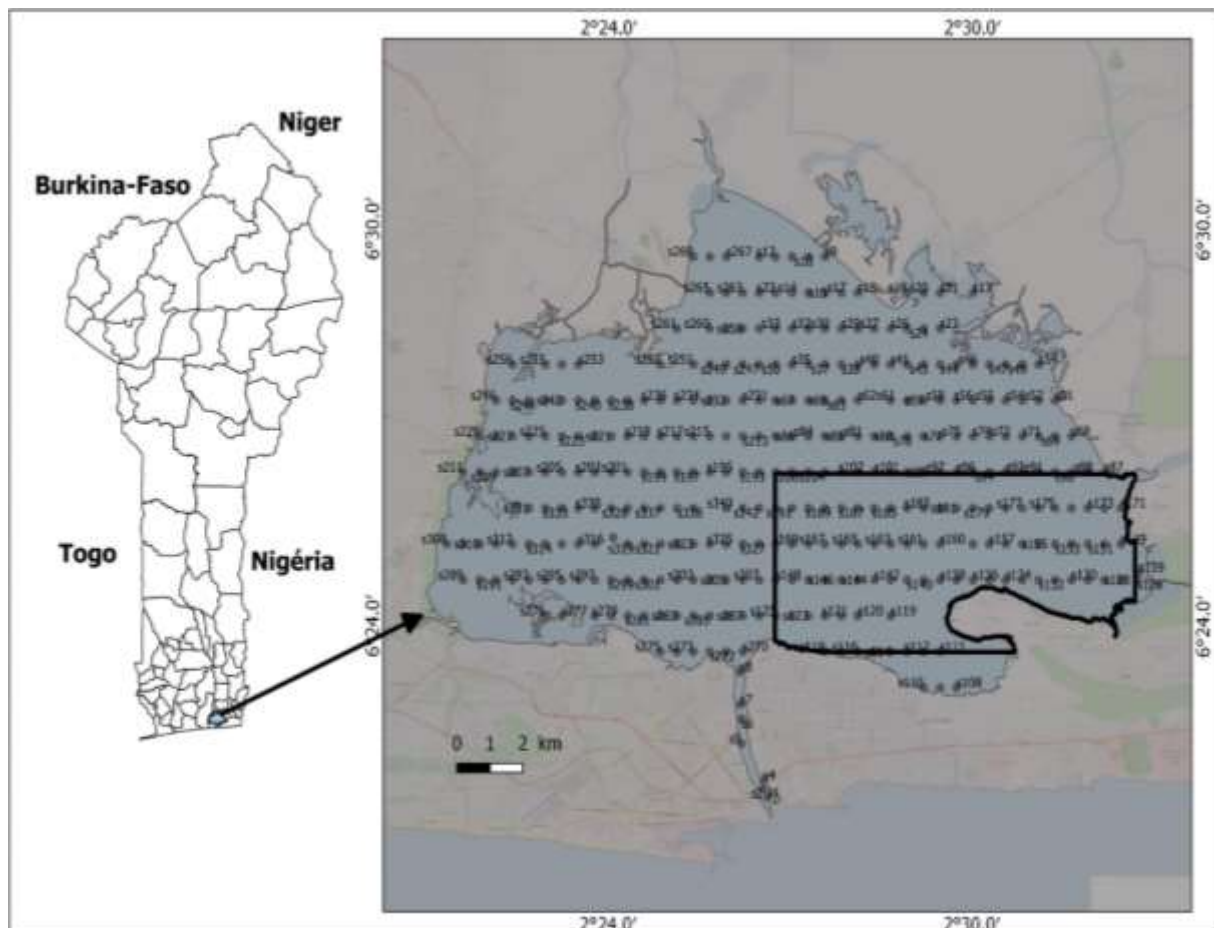


Figure 4: Carte de localisation du lac Nokoué (Viainon, 2022)

2.1.1 Environnement physique

2.1.1.1 Conditions climatiques

La notion de climat est basée sur des éléments tels que : la température, les précipitations, l'humidité relative et les vents. Le climat est de type équatorial avec une alternance de deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches :

- une grande saison des pluies de mi- mars à mi- juillet ;
- une petite saison sèche de mi-juillet à mi-septembre ;
- une petite saison des pluies de mi-septembre à mi- novembre ;
- une grande saison sèche de mi-novembre à mi- mars

La température moyenne du lac varie entre 22,4 °C en aout et 32,9°C en mars (Mama, 2010).

La précipitation annuelle moyenne du lac varie de 960 mm au nord à 1340 mm au sud. Les vents dominants sont le harmattan qui est un vent sec venant du nord de décembre à février et les vents de mousson venant du sud-ouest pendant la saison pluvieuse (Djihouessi, 2018).

2.1.1.2 Régime hydrologique du lac Nokoué

Le régime hydrodynamique du lac Nokoué est principalement contrôlé par les apports d'eaux fluviales provenant des bassins versants et océanique suivant deux processus (Mama, 2010). Le régime saisonnier du fleuve Ouémé à travers le canal de Totchè et la rivière Sô contrôle l'apport d'eau douce dans le lac notamment en période des hautes eaux tandis que le régime des échanges avec la mer à travers le chenal de Cotonou contrôle les apports d'eau salée dans le lac en période des basses eaux (Le Barbé et *al.* 1993 ; Mam et *al.* 2011a ; Zandagba et *al.*, 2016a ; Djihouessi, 2018). Son régime hydrologique est caractérisé par une faible crue de mai à juin qui correspond à la grande saison des pluies au sud du Bénin, c'est-à-dire sur le lac lui-même ; une forte crue de septembre à novembre correspondant à la grande saison des pluies au Nord et aux apports d'eau par le fleuve Ouémé ; une période d'étiage de décembre à mars. La durée des crues varie suivant que le chenal de Cotonou est fermé ou ouvert selon l'importance des pluies, M. P. (Gnoghossou, 2006 ; Pivot S. A. Sachi et *al.*, 2016).

2.1.1.3 Faciès sédimentaires du lac Nokoué.

Au plan morphologique, la répartition spatiale des différents faciès sédimentaires présents dépend de la nature topographique du fond lagunaire et le déplacement des masses d'eaux continentales et marines. La charge sédimentaire et le comportement hydrodynamique peuvent varier considérablement au cours des saisons. Les travaux antérieurs effectués par certains auteurs sur la morphologie sédimentaire du lac révèlent qu'il est caractérisé par quatre faciès : le faciès sableux ; argilo-sableux ; sablo-argileux et le faciès vaseux (Oyede, 1991 ; Kaki et *al.*, 2011). En effet, les faciès sédimentaires du lac qui présentaient un fond sableux sont observés à l'est au niveau du fleuve de l'Ouémé et au sud au niveau du canal de Cotonou. Les autres parties du lac présentaient un fond vaseux riche en matière organique (Adounvo, 2001 ; Mama et *al.*, 2011b ; Djihouessi, 2018). Le comportement hydrodynamique des faciès étudiés d'après (Kaki et *al.*, 2011) indiquait que le sable vaseux qui était déposé à l'exutoire du fleuve So est à l'origine de la relative faiblesse de ce fleuve tandis que les vases déposés dans la zone centrale étaient à l'origine de la diminution du courant d'eau vers la zone centrale.

2.1.2 Milieu humain et activités socio-économiques

Les populations autochtones vivant autour du lac, ou sur le lac, ont développé diverses activités qu'ils pratiquent chaque jour. La pêche, la principale activité de la population riveraine du lac Nokoué est exercée par environ 70% de la population et concentre à lui seul

près de 80% de la richesse halieutique du site RAMSAR (Hessou et *al.*, 2004). Elle est une tradition qui se transmet de génération en génération. À cela s'ajoutent plusieurs autres activités socio-économiques telles que : l'agriculture, le marché flottant, le tourisme, l'élevage et l'exploitation de sable (Sossou-Agbo., 2006).

2.2 Collecte des données :

2.2.1 Choix des points de prélèvement et de la période d'échantillonnages

Pour la détermination des faciès, du stock d'azote et du phosphore dans le sédiment, un maillage du milieu d'étude a été nécessaire pour identifier le nombre de sites pouvant nous permettre de couvrir l'ensemble de la surface sédimentaire de la zone Sud-Est du lac Nokoué. Au total, 103 stations ont été identifiées suivant un maillage régulier à maille rectangulaire sur une distance de 1km sur 500m. Le choix de cette distance entre les points nous permettra d'avoir plus de précision dans les données collectées sur les sédiments.

Les prélèvements des échantillons de sédiment ont été effectués pendant une seule campagne durant la période de la saison sèche. Il a été réalisé sur une durée d'un mois et demi et a débuté le 12 Janvier 2022 et a pris fin le 22 Février 2022. Ces prélèvements ont été réalisés sur la zone sud-Est du lac Nokoué au Sud du Bénin au moyen d'une barque motorisée.

2.2.2 Technique d'échantillonnage de sédiment

À chaque station deux prélèvements ont été effectués. Un prélèvement destiné pour les analyses chimiques et un prélèvement pour les analyses physiques. Ces prélèvements ont été effectués à l'aide d'une benne de type Birg-Eckman qui sert à faire des prélèvements de sédiments dans les lacs peu profonds ou l'extraction se fait sur les premiers centimètres ou dizaines de centimètres de profondeur tout au plus.



Planche 1: Prélèvement des sédiments du fond lagunaire avec la benne de Eckman (Viainon, 2022)

2.2.3 Détermination des paramètres physiques des sédiments

2.2.3.1 La teneur en eau

La teneur en eau correspond au rapport de la masse d'eau sur la masse du sédiment humide exprimée sous forme d'un pourcentage. L'échantillon de sédiment humide est séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La teneur en eau est calculée par différence entre les poids vides, humides puis secs selon la formulation suivante (Denis et Grenz, 2003).

$$teneur\ en\ eau = \left(\frac{poids\ humide - poids\ sec}{poids\ humide} \right) * 100$$

Après la détermination de la teneur en eau, une partie des sédiments séchés est récupérée et stockée dans des sachets pour la détermination de la matière organique ainsi que les paramètres chimiques.

2.2.3.2 La porosité des sédiments

Pour un volume donné de sédiment, la porosité correspond au rapport entre le volume d'eau et le volume de sédiment humide. Pour l'appréhender, il est nécessaire de déterminer auparavant la teneur en eau du sédiment. La porosité est un rapport de volumes et ne possède donc pas d'unité. Elle varie entre 0 et 1. Globalement, des sédiments de type sableux seront caractérisés par de faibles porosités, allant de 0,3 à 0,5, alors que des sédiments de type vaseux peuvent avoir des porosités supérieures à 0,95 dans les centimètres superficiels du sédiment. (Denis et Grenz, 2003). La porosité d'un sédiment se calcule à partir de la formulation suivante :

$$\text{Porosité} = \frac{\text{volume d'eau dans les pores interconnecté}}{\text{volume total du sédiment}}$$

2.2.3.3 La granulométrie

Elle est réalisée pour connaître la répartition quantitative de chaque classe dimensionnelle de particules élémentaires constituant l'échantillon. Pour ce faire :

Une masse de 200 g de chaque échantillon de sédiments préalablement séchés est prélevée, puis passée à un tamisage humide sur un tamis à mailles carrées, d'arêtes égales à 50 µm. Ce tamisage humide permettra de séparer la fraction grossière (diamètres grains > 50 µm) de la fraction fine (diamètres des grains < 50 µm). La fraction grossière retenue est séchée à l'étuve, puis pesée sur une balance de précision au millième de gramme. Le refus ainsi séché et pesé subit un tamisage à sec sur une colonne constituée des tamis à mailles carrées de la série AFNOR d'arêtes suivantes : 2 mm ; 1 mm ; 0,5 mm ; 0,25 mm ; 0,125 mm ; 0,063 mm. Le tamisage est effectué par un appareil de type "Rotap" pendant 10 minutes avec une amplitude de 70 vibrations/minute. Ce temps de tamisage permet de réduire raisonnablement l'erreur relative au poids d'une fraction à moins de 2% (Tricart et Cailleux, 1959). Chaque refus de tamis est pesé et la masse enregistrée à des fins statistiques.

2.2.4 Détermination des paramètres chimiques dans les sédiments.

Elle est réalisée sur des sédiments séchés et tamisée. Les sédiments sont par la suite broyés et tamisés sur des mailles de 2mm comme le préconise la norme AFNOR des sols X31-101 (AFNOR, 1994). La fraction inférieure à 2mm est recueillie et conservée à l'abri de l'air pour la détermination de la teneur en matière organique, la teneur en phosphore total et de l'azote total est simultanément déterminée selon la méthode de Koreleff qui consiste à ramener l'azote et le phosphore organique sous la forme inorganique.

2.2.4.1 Teneur en matière organique

Les teneurs en matière organique (MO) sont déterminées par la méthode de la perte au feu. La méthode de la perte au feu représente une estimation de la matière organique volatile ainsi que des carbonates dissociables sous forme de CO₂. La détermination est effectuée sur des échantillons préalablement séchés. Le principe de cette méthode consiste à calciner une prise d'essai dans un four à une température de 600°C ± 10°C pendant 2 heures.

$$\%MO = \frac{(P1 - P0) - (P2 - P0)}{(P1 - P0)} * 100$$

Avec P0, la masse du creuset vide, P1, la masse finale, P2, la masse du creuset contenant les cendres.



Planche 2: Sédiment avant calcination (à droite) et après calcination (à gauche) (Viainon, 2022)

2.2.4.2 Teneur en phosphore et azote total dans les sédiments

La teneur en phosphore total et de l'azote total sont simultanément déterminés selon la méthode de Koreleff qui consiste à ramener l'azote et le phosphore organique sous la forme inorganique. Le tableau 2 présente la méthode de mesure d'azote et du phosphore total dans le sédiment.

Tableau 2: Méthodes de mesure d'azote et phosphore total (APHA 2005)

paramètres	Formules	Méthodes
Azote total	NT	N digestion + methode de salcyate de sodium
Phosphore total	PT	P digestion + methode à l'acide ascorbique

Principe et théorie

La détermination du phosphore total et de l'azote total s'effectue simultanément en deux étapes :

La première étape consiste à digérer et à oxyder toutes les formes de phosphore et d'azote avec du persulfate de potassium, en milieu alcalin sous pression à 120C.

Dans la seconde étape, l'ion orthophosphate réagit avec l'ion molybdate et l'ion antimoine pour former un complexe phosphomolybdate. Ce dernier est réduit avec de l'acide ascorbique

en milieu acide pour provoquer l'apparition du molybdène dont l'absorbance à 885nm est proportionnelle à la concentration de l'ion orthophosphate présent dans l'échantillon.

La digestion de l'azote permet de convertir l'azote organique sous la forme nitrate en présence du salicylate de sodium après traitement en milieu acide qui donne du paranitrosalicylate de sodium coloré en jaune dont l'absorbance à 420 nm est proportionnelle à la concentration de l'ion nitrique présent dans l'échantillon.

Pour ce faire, 0,1g de sédiment préalablement traité est pesé dans des flacons auquel on ajoute 5ml de la solution oxydante et placé à l'autoclave à 120°C pendant 2h.

Après la minéralisation et le refroidissement à température ambiante, le phosphore total est déterminé en ajoutant une solution mixte composée d'ammonium de molybdate, d'acide sulfurique, d'acide ascorbique et de la solution d'antimoine-tartra de potassium suivant un ratio donné qui permet la mise en évidence du phosphore. Plus la solution est bleue, plus il y a de phosphore. La préparation ainsi obtenue est ensuite placée dans le spectrophotomètre qui mesure le phosphore total.

L'azote total est déterminé après minéralisation par la méthode de salicylate de sodium. Dans une solution acidifiée, on ajoute une solution de tartra de sodium-potassium. Plus la solution est jaune, plus il y a de l'azote. La préparation ainsi obtenue est placée au spectrophotomètre pour lecture. En effet, ce volume de la solution oxydante est utilisé à la suite d'un test d'optimisation sur 4 types d'échantillons effectués au laboratoire. Le test d'optimisation à consister à varier le volume de la solution oxydant afin de trouver le volume pour lequel la minéralisation est complète. Ainsi, 0,1g de sédiment est prélevé dans les boîtes en pyrex auxquels nous avons ajouté différents volumes de la solution oxydante : 1ml, 2ml, 4ml, 5ml et 10ml. Après analyses, nous avons constaté que la minéralisation est complète avec un volume de 5ml. Le volume utilisé dans le cadre de notre étude est spécifique à la teneur en matière organique du sédiment.

2.3 Traitement des données

2.3.1 Traitement des paramètres physico-chimiques

- Le Microsoft Excel 2019 et le logiciel R ont été utilisés pour faire les calculs et les analyses descriptives, les box plots ont été réalisés.
- le logiciel Qgis 2.18 a été utilisé pour la réalisation des cartes de spatialisation des nutriments dans les sédiments superficiels du lac Nokoué grâce à la méthode d'interpolation IDW cette méthode détermine les valeurs en calculant une moyenne pondérée à partir des

valeurs des points du voisinage échantillonnés. La pondération est inversement proportionnelle à la distance séparant le centre de la cellule des points du voisinage. Les valeurs de sortie de la fonction IDW sont limitées par les valeurs utilisées pour faire l'interpolation. La fonction IDW est une moyenne et une moyenne ne peut pas être plus grande que la valeur la plus grande. Il est donc impossible de créer des crêtes ou vallées si les valeurs nécessaires ne sont pas présentes dans la donnée de départ. Un certain nombre de paramètres peuvent être pris en compte : le nombre de points de voisinage à utiliser, le rayon de recherche des points et la puissance, c'est-à-dire le poids accordé en fonction de la distance. Pour avoir un bon résultat, il faut un échantillon suffisamment dense, et ce en fonction des variations locales. Si les données d'entrée sont clairsemées ou inégales, le résultat obtenu ne sera pas vraiment représentatif.

La distribution granulométrique des sédiments superficiels

Pour caractériser des sédiments, nous avons utilisé la nomenclature de Chamley (1987-2000). Les fractions granulométriques sont :

- les galets fractions $> 2 \text{ mm}$;
- les sables fractions comprises entre 2 et 0,063 mm ;
- les silts fractions comprise entre 0,063 et 0,004 mm ;
- les argiles fractions $< 0,004 \text{ mm}$;

La nomenclature adoptée pour la nature des sédiments est celle qui tient compte des teneurs en sable de l'échantillon. Ainsi on a :

- l'indice d'arénique (pourcentage de sable) $> 75\%$: faciès de sable ;
- l'indice d'arénique compris entre 50% -75% : faciès de sable argileux ;
- l'indice d'arénique compris entre 25% - 50% : faciès de vase sableuse ;
- l'indice d'arénique $< 25 \%$ faciès de vase.

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés sous forme de graphiques à l'aide du logiciel CANVAS 6 et d'Excel ; ce qui permet de voir la distribution de la taille des grains. Les courbes cumulatives à ordonnées de probabilité sont construites. Ces courbes cumulatives mettent en évidence les écarts de distribution par rapport à une courbe gaussienne et permettent d'individualiser des stocks granulométriques. L'échelle granulométrique utilisée pour la représentation de ces courbes cumulatives est l'échelle phi (ϕ) de Krumbein. C'est une échelle où la valeur en unité phi correspond à $-\log_2$ de la valeur en millimètre (mm). Les

diamètres des grains correspondant respectivement à 5 %, 16 %, 50 %, 84 % et 95 % du poids total des grains sont déduits des courbes cumulatives pour calculer les paramètres granulométriques tels que le mode, la médiane, le tri ou classement, l'asymétrie et le grain moyen, à partir des formules proposées par Folk et Ward (1957).

Les paramètres de position : elles permettent de définir la valeur centrale autour de laquelle se distribue l'échantillon étudié. On distingue :

- Le mode (Mo) qui est la classe granulométrique pour laquelle la fréquence est maximale ;
- La médiane (Md) qui représente le diamètre de particules correspondant à 50% de la courbe cumulative $Md = \phi_{50}$

La moyenne granulométrique (Mz) : elle représente la distribution granulométrique moyenne des sédiments et permet l'individualisation d'un certain nombre de faciès. Elle donne une bonne idée de la grossièreté du sédiment. Sa formule est :

$$Mz = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

Le grain moyen et la médiane donnent une indication des conditions moyennes des facteurs hydrodynamiques.

Tableau 3: Terminologie de caractérisation de la moyenne (Mz)

$Mz < 1,00$	Sables grossiers et graviers
$1,00 < Mz < 2,31$	Sables moyens
$2,31 < Mz < 3,22$	Sables fins
$3,32 < Mz < 4$	Silts, argiles

Le Sorting index ou indice de tri ou de classement (So) : il renseigne sur l'hydrodynamisme lors du dépôt du sédiment. Il indique la qualité du classement ; plus il est faible, plus le sédiment est bien classé. Sa formule est :

$$So = \sqrt{\frac{Q_{25}(mm)}{Q_{75}(mm)}}$$

Tableau 4: Terminologie caractéristique du sorting index

So	Classement
1 à 1.17	Très bien classé
1.17 à 1.20	Bien classé
1.20 à 1.35	Assez bien classé
1.35 à 1.87	Moyennement classé
1.87 à 2.75	Mal classé
> 2.75	Très mal classé

L'indice d'asymétrie de Krumbein ($Sk\sigma$) caractérise la forme et informe sur l'enrichissement en particules grossières, l'enrichissement en particules fines, ou s'il y a symétrie. Sa formule est :

$$Sk\sigma = \frac{(\phi_{25} + \phi_{75} - 2\phi_{50})}{2}$$

Tableau 5: Terminologie caractéristique de Krumbein ($Sk\sigma$)

$Sk\sigma = 0$	Très asymétrique
$Sk\sigma > 0$	Asymétrique vers les grossiers
$Sk\sigma < 0$	Asymétrique vers les fins

2.3.1.1 Traitements des données de stock d'azote et phosphore total dans les sédiments

Les concentrations d'azote et de phosphore ont été mesurées dans les couches superficielles (**cinq premiers centimètres**) du sédiment. Cette couche superficielle du sédiment contient la fraction mobilisable des stocks sédimentaires (remise en suspension, diffusion des nutriments vers la colonne d'eau). Le stock d'azote et de phosphore dans les sédiments est estimé à partir des concentrations mesurées, la superficie de chaque point et de la hauteur d'intégration de la mesure (5cm) des sédiments selon l'équation suivant :

$$\text{Stock X} = (\text{Conc. SEDX} \times \text{Hauteur} \times \text{superficie})$$

Avec X correspondant à l'élément calculé (Azote total ou Phosphore total), Conc.SEDX à la concentration d'élément X adsorbé aux particules.

Partie III : Résultats et Discussions

3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente les résultats issus de la collecte des données. Il aborde les paramètres physico-chimiques liés aux sédiments et les traits sédimentaires du lac Nokoué.

3.1 Caractéristiques morphologiques du lac Nokoué

3.1.1 Evolution spatiale des différents faciès en fonction de la superficie

Coelleuil et Kaki et *al* ont présentés les résultats des études sédimentologiques du lac Nokoué en 1984 et 2011 (figure 6 a et b). Une analyse statistique sur l'évolution des faciès en fonction de la superficie est présentée dans le tableau 6. L'analyse de ce tableau montre que la superficie qu'occupent les différents faciès présents dans la zone d'étude varie d'une année à une autre. Le faciès de sable occupait une superficie de 23,92 % en 1984 et 28,72 % en 2011. Ce faciès de sable a connu une légère augmentation en termes de superficie tandis qu'en 2022, une légère diminution est observée avec une superficie de 27,44 %. Pour ce qui est de la fraction sablo-vaseux il représentait le faciès majoritaire avec une superficie de 56,83% en 1984. Ce faciès représentait également la fraction majoritaire en 2011 et couvre une superficie de 32,49%. Contrairement aux années 1984 et 2011, elle couvre une superficie de 31,67 % de la superficie de la zone d'étude en 2022 et représente le faciès majoritaire. Quant à la vase sableuse il occupait 18,14 % de la superficie totale de la zone d'étude en 1984 et 28,76% en 2011. En 2022 le faciès de vase sableuse occupe une superficie de 31,0.3%. La vase était de 1,10 % en 1984 et 10,01 % en 2011. Elle a occupé une superficie de 9,84 % de la superficie de la zone d'étude en 2022.

L'analyse comparative sur l'évolution des faciès en fonction de la superficie de 1984 à 2022 révèle que les différents faciès présents dans la zone Sud-Est du lac Nokoué à subir une évolution spatiale dans le temps. En effet les différentes superficies occupées par les différents faciès de 1984 à ce jour, montre une augmentation de la superficie de la vase sableuse et traduit le phénomène de comblement du lac. Ce phénomène de comblement pourrait être dû aux différentes activités exercées dans ce milieu.

Tableau 6: Superficies des différents faciès en pourcentage

Faciès	Superficie des faciès en pourcentage % en fonction de la superficie de la zone d'étude		
	1984	2011	2022
Sable	23,92	28,72	27,44
Sable vaseux	56,83	32,49	31,67
Vase sableuse	18,14	28,76	31,03
Vase	1,10	10,01	9,84

3.1.2 Répartition spatiale des faciès de la zone sud est du lac Nokoué

La carte de répartition spatiale établie grâce aux données issues de l'analyse granulométrique des sédiments superficiels de la zone Sud-Est a permis de distinguer quatre faciès à savoir : le faciès de sable, le faciès de sable vaseux, le faciès de vase sableuse et le faciès de vase. La répartition spatiale de ces différents faciès est représentée sur la carte à la figure 5. Il ressort après analyse de la carte que :

- le faciès de sables : il est principalement rencontré à l'entrée du chenal de Cotonou dans le lac et à l'Est de la zone d'étude près du débouché du canal de Totchè. On note également la présence de ce faciès dans la partie nord de la zone d'étude avec une extension vers le centre à l'entrée du chenal. Il se présente en bande parallèle aux cordons littoraux. Il est essentiellement composé des sables moyens des sables fins à moyens et des sables fins et occupe une superficie de 27,44 % de la superficie totale de la zone d'étude.
- Le faciès de sables vaseux : il entoure la bande sableuse située à l'entrée du chenal et au niveau de l'exutoire du fleuve Ouémé ainsi que la bande de sable présent dans la partie nord de la zone d'étude. Ce faciès est adjacent au faciès sableux décrit ci-dessus avec une superficie de 31,67 %. Il est représenté par des sables fins argileux et les sables moyens argileux. Il représente le faciès dominant des sédiments superficiels de la zone d'étude.
- Le faciès vase sableuse : ce faciès est majoritairement représenté dans la zone sud-est du lac Nokoué avec une superficie de 31,03 %. Il est bordé par le faciès de vase et sable vaseux. Il est observé à l'ouest de la zone d'étude avec une extension dans le

centre. Il est également observé aux abords du cordon littoral au sud de la zone d'étude.

- Le faciès de vase : la vase est présente au niveau du cordon littoral de la zone d'étude et est également présente au centre de la zone d'étude où il est entouré du faciès de vase sableuse avec une superficie de 9,84%. Les vases sont le plus souvent de couleur sombre et parfois verdâtre.

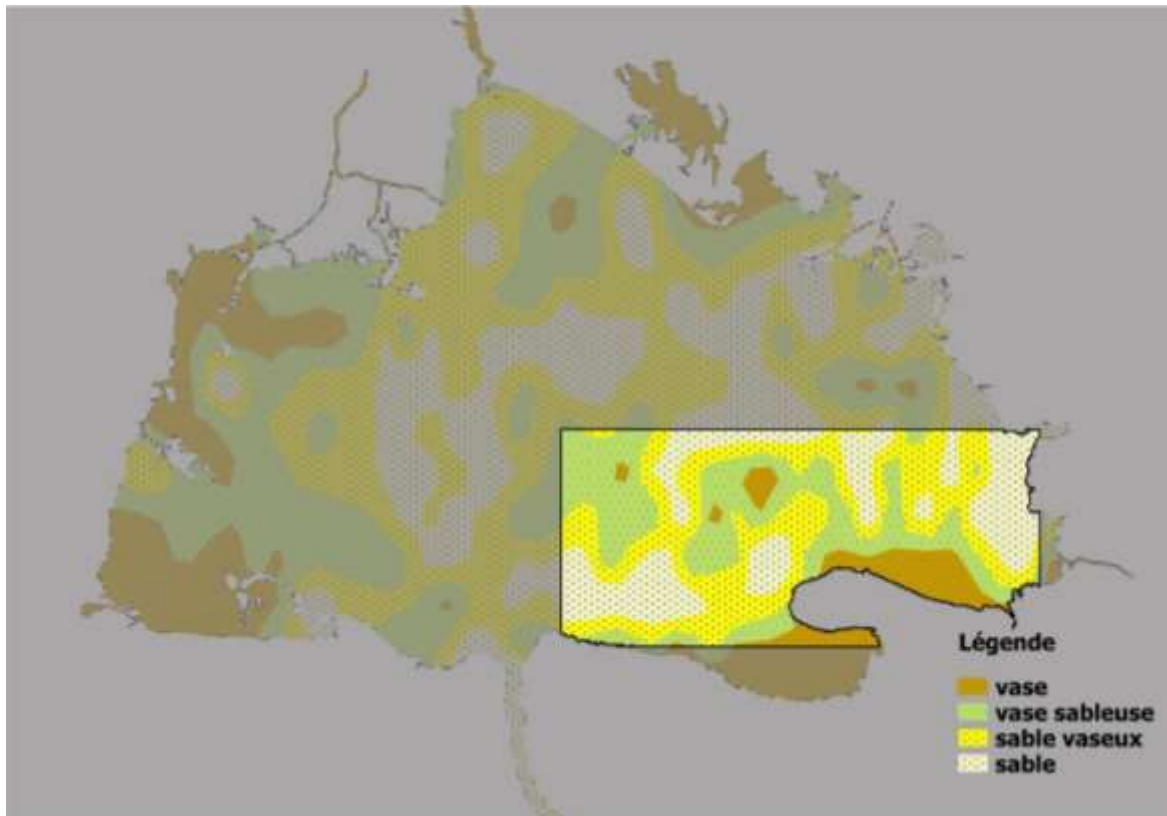


Figure 5: carte de répartition des lithofaciès des sédiments superficiels de la zone Sud-Est du lac Nokoué (Viainon, 2022)

De l'analyse de la carte de répartition, il ressort que le lac est constitué par quatre faciès. Chacun de ces faciès occupe une superficie donnée avec pour dominance le faciès de sable vaseux. Ensuite viennent le faciès de vase sableuse de sable et en fin le faciès de vase. La présence du sable et du sable vaseux dans la zone d'étude pourrait provenir de deux sources. À travers l'océan qui au clapot des vagues font transiter du sable dans le lac grâce au chenal qui est un moyen de communication entre le lac et l'océan. Par le canal de Tochè qui reçoit les eaux provenant du bassin versant et est en générale de couleur variable : brun, gris et parfois sombre. Ces couleurs pourraient être également associées aux apports provenant des cordons de sable qui encadre le lac. Les vases et vases sableuses sont le plus souvent de couleur sombre et parfois verdâtre. Cette couleur peut être liée à la décomposition des débris

végétaux provenant des acadjas utilisés pour les pêches lesquels sont laissés dans le lac après utilisation.

3.1.3 Comparaison de la répartition des lithofaciès actuels du lac avec ceux des années (1984 et 2011)

La carte de répartition des lithofaciès actuels élaborée à partir des travaux de terrain de 2022 a été comparée avec ceux des études antérieures (Colleuil. 1984 et Kaki et *al.*, 2011) en vue de comprendre l'évolution du milieu sédimentaire durant les trois dernières décennies. Cette comparaison prend en compte uniquement notre zone d'étude qui est le sud-est du lac Nokoué.

La répartition des sédiments superficiels du lac montre une évolution significative depuis 1984 à 2022. En effet, la carte sédimentologique établie par Colleuil (1984) montre que dans la zone sud-est du lac, les sédiments sableux se présentaient en bande assez large parallèle aux cordons littoraux et longeaient la bordure sud-est du lac. Ces sables se retrouvent également à l'exutoire du fleuve Ouémé dans la zone orientale et occupaient une superficie de 23,92 % de la superficie de la zone d'étude. Contrairement aux faciès de sable vaseux, elle se présentait en bande assez large et se retrouvait autour des faciès de sable et de vase sableuse avec une superficie de 56,83 %. Il constitue le faciès majoritaire de la zone d'étude. Ensuite, le faciès de vase sableuse qui se retrouve dans la partie Nord de la zone d'étude constitue le faciès moins représenté avec une superficie de 18,14 % et est bordé par le faciès de sable vaseux. Il est présent en proportion très faible avec une occupation superficielle de 1,10 % des stations de la zone d'étude. Il est entouré par la vase sableuse.

En 2011, les travaux de Kaki et al ont révélé la présence de ces quatre faciès. La disposition structurale de ces faciès présents suivait une même disposition qu'en 1984. La différence principale s'observe au niveau de la superficie qu'occupent les faciès. Le sable qui longeaient la bordure des cordons littoraux et qui se présentait en bande assez large en 1984 a subi un rétrécissement tandis que la bande de sable qui se retrouvait à l'exutoire du fleuve Ouémé a subi une large extension. Il couvrirait une superficie de 28,72 % de la surface total de la zone d'étude alors qu'elle était de 2,92 % en 1984. En ce qui concerne le faciès de sable vaseux, il a subi une diminution et se retrouve entre la bande de sable et le faciès de vase sableuse avec une superficie de 32,49 %. Quant au faciès de vase sableuse et vase, ils ont subi une large extension ce qui est à l'origine de la diminution de la bande de sable vaseux. Ils présentent une superficie comprise entre 28,76 % et 10,01 %. L'extension de la bande de sable à

l'exutoire du fleuve Ouémé pourrait être due aux apports en sédiments fins provenant des bassins versants.

En 2022, la carte établie révèle un changement dans la succession des couches comme ils se présentaient en 1984 et 2011. On constate la présence du faciès de vase et vase sableuse aux abords du cordon littoral alors en 2022 tandis qu'il était bordé par une bande de sable dans les années 1984 et 2011. Ce changement dans la disposition des couches pourrait être dû d'une part à la présence de la zone marécageuse qui était absente en 1984 et 2011 et d'autre part aux activités anthropiques exercées aux abords du lac. Aussi on note une extension assez large de la vase sableuse et du sable vaseux qui tend à tapisser le fond de la cuvette.

L'essai de comparaison entre ces deux cartes lithofaciologiques (1984, 2011) et celle issue de la présente étude révèle que la répartition spatiale des sédiments superficiels de la zone sud-est a connu une évolution spatio-temporelle avec pour conséquence un envasement du lac. Ce qui témoigne d'une large extension des faciès de vase et de vase sableux qui tend à tapisser le fond du lac. Cet envasement pourrait être dû à l'effet probable de la destruction des acadjas et de la mort de la jacinthe d'eau en période de haute salinité qui se sédimente au fond du lac (Mama et *al.*, 2011). Ce remplissage du fond de la cuvette en vase sableuse pourrait être une source de dégradation de l'état écologique du lac.

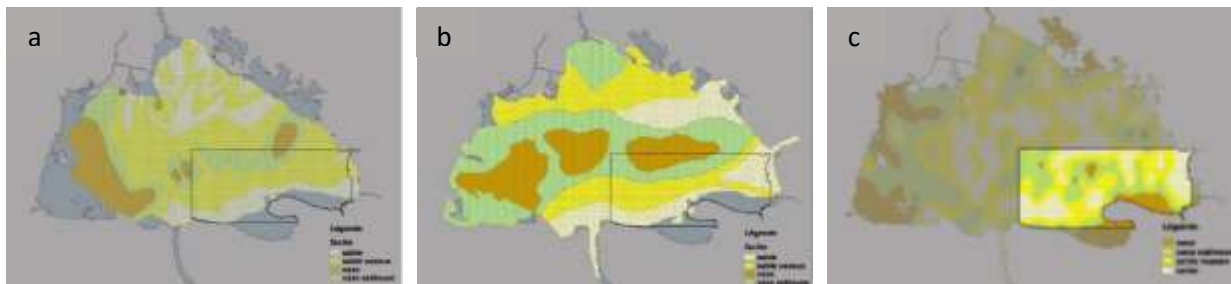


Figure 6: cartes sédimentologies établies par (Colleuil, 1984(a)) , (Kaki et al, 2011(b)) et (Viainon, 2022(c))

3.1.4 Distribution granulométrique des sédiments superficiels de la zone sud-est du lac Nokoué

L'analyse granulométrique des quatre principaux faciès (sables, les sables vaseux, les vases sableuses et les vases) que composent les sédiments superficiels du lac Nokoué révèle une variabilité de la distribution des grains au sein de différents faciès.

3.1.4.1 Distribution granulométrique des faciès sableux

Les sédiments caractéristiques du faciès de sables sont regroupés en trois catégories comprenant : les sables moyens, les sables fins à moyens et les sables fins.

- **Sables moyens**

Les échantillons de sédiment constitué de sable moyens sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7: paramètre granulométrique des échantillons de sable moyen.

échantillons	%d'argile sableuse	% en sable fin	% en sable moyen	%en sable grossier	Mode en Φ	Moyenne (Mz)	indice de Trask (So)	Indice asymétrie de Krumbein $Sk\sigma$
A11	10,11	17,72	67,465	4.7	2	1,72	1.50	0,08
A48	3,51	7,11	78,66	10,72	1	1	1,46	-0,04

Les sables moyens sont moins représentatifs dans la zone Sud-Est du lac Nokoué et sont représentés par les échantillons A11 et A48. La distribution des grains est unimodale avec un mode compris entre 1 et 2 Φ (Figure7). Ces sédiments identifiés du côté Est du lac témoignent d'un courant hydrodynamique d'énergie moyenne. Le grain moyen Mz varie de 1 à 1,72 Φ et l'indice de Trask (So) compris entre 1,46 et 1,50 ; indique que ces sédiments sont moyennement classés. L'indice d'asymétrie de Krumbein déterminé oscille entre -0,04 et 0,08 ; ce qui témoigne de l'allure presque symétrique des courbes cumulatives.

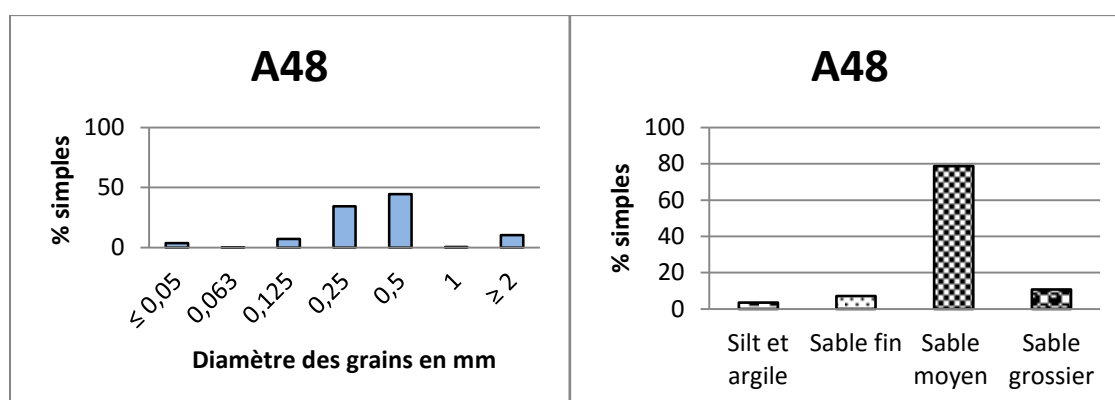


Figure 7: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable fin à moyen montrant une prédominance de sable fin (échantillon A48)

- **Sables fins à moyens**

Les échantillons de sédiment constitué de sable fin à moyens sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 8: paramètre granulométrique des échantillons de sable fin à moyen.

échantillons	%d'argile sableuse	% en sable fin	%en sable moyen	%en sable grossie	Mode en Φ	Moyenne (Mz)	indice de Trask (So)	Indice asymétrie de Krumbein $Sk\sigma$
A9	9,73	47,85	32,07	10,35	3			
A14	13,185	57,77	27,79 5	1,25	3	2,66	1,58	0,16
A15	19,15	38,99	41,21	0,65	2			
A16	20,87	43,675	34,01 5	1,44	3			
A20	5,66	36,83	40,05 5	17,455	2			
A30	11,735	49,96	35,22 5	3,08	3	2,27	1,24	-0,17
A35	29,23	27,3	36,22	7,25	2			
A41	6,72	36,525	46,88 5	9,87	2	1,55	1,56	-0,15
A42	18,585	49,96	31,08	0,375	3			
A62	6,01	30,595	32,52	4,28	2	1,77	1,48	0,08
A64	18,605	44,595	45,19 5	4,695	3			
A83	8,56	41,55	45,19 5	4,695	2	2,16	1,38	0,32
A88	14,85	47,185	33,82	4,145	3	2,60	1,60	0,05

Bien qu'il ne représente pas le faciès dominant de la zone sud-est du lac Nokoué ; les sables localisés dans la zone étudiée sont majoritairement constitués de grains fins à moyens. Ces sables accumulés dans la zone Sud-Est présentent une distribution unimodale avec un mode qui varie de 2 à 3 Φ leur histogramme de fréquence révèle que ces sédiments sont déposés

sous un régime hydrodynamique faible à moyen (Figure 8). Les grains moyens (Mz) sont compris entre 1,55 et 2,67 Φ . Les sédiments du dit faciès sont moyennement classés avec des indices de classement de Trask So compris entre 1,24 et 1,83. Les coefficients d'asymétrie de Krumbein variant entre -0,16 à 0,09 sont ceux des courbes cumulatives indiquant un étalement presque asymétrique ou étalé vers les particules grossières. La moyenne, l'indice d'asymétrie et de Trask n'ont pas été déterminés pour certains échantillons en raison du pourcentage cumulé qui est inférieur à 75%.

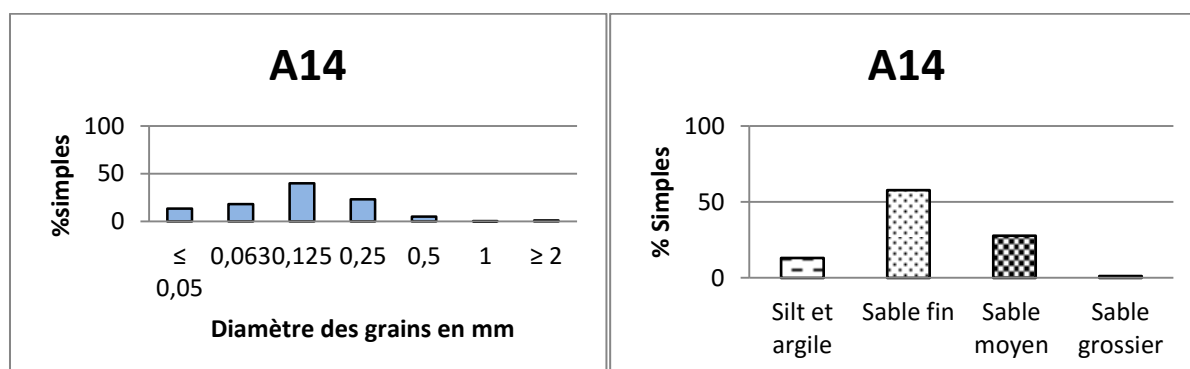


Figure 8: histogramme de fréquence d'un échantillon de sable fin à moyen montrant une prédominance de sable fin (échantillon A14)

• Sables fins

Les échantillons de sédiments constitués de sable fin sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 9: Paramètres des échantillons constitués de sable fin

échantillons	%d'argile sableuse	% en sable fin	% en sable moyen	%en sable grossie	Mode en Φ	Moyenne (Mz)	indice de Trask (So)	Indice asymétrie de Krumbein $Sk\sigma$
A13	9,095	81,15	9,23	0,525	3	2,90	1,49	-0,008
A17	7,89	73,415	18,515	0,18	3	2,82	1,59	-0,22
A18	8,855	78,495	9,03	3,62	3		1,76	-0,02
A31	11,385	59,77	19,895	8,95	3	2,55	2,07	-0,38
A36	21,88	57,745	20,185	0,19	3			
A43	8,95	68,725	20,855	1,47	4	2,62	1,38	-0,23
A68	20,52	55,615	9,955	13,91	3			3
A92	16,635	74,47	3,67	5,225	3			3
A93	9,425	81,56	4,215	4,8	3	2,77	1,31	0,11

A94	10,945	74,99	7,665	6,4	3	2,75	1,31	0,11
A95	12,57	81,525	4,4	1,505	3	3,08	0,94	0,46
A96	10,17	77,825	8,385	3,62	3	3,25	1,41	-0,88
A97	20,265	70,13	8,155	1,45	3			3

La distribution des grains est unimodale avec un mode compris entre 3 et 4 Φ tandis que le grain moyen oscille entre 2,16 et 2,90 Φ . La courbe cumulative indique un faciès à tendance logarithmique avec un coefficient d'asymétrie compris entre -0,009 et -0,39 ce qui note que les particules présentent une asymétrie vers les fractions grossières déposés sous un courant faible.

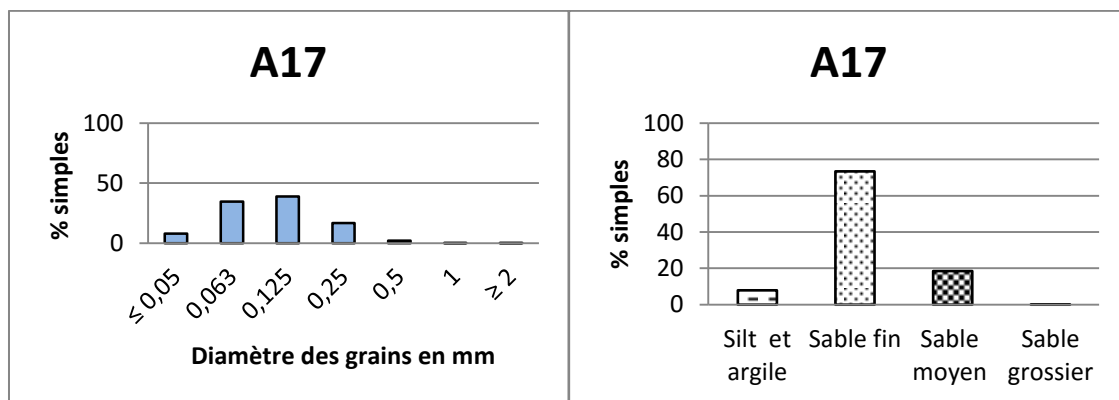


Figure 9: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable fin à moyen montrant une prédominance de sable moyen (échantillon A17)

3.1.4.2 Distribution granulométrique des faciès de sable vaseux

Les faciès de sables vaseux sont un peu plus répandus dans le lac. Ils sont essentiellement constitués par des sables fins argileux. Toutefois, dans ces faciès, les sables moyens argileux sont moins représentés.

❖ Les sables moyens argileux

Les échantillons de sédiments constitués de sable moyen argileux, sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 10: Paramètre granulométrique des échantillons constitués de sable moyen argileux

<u>échantillons</u>	%d'argile sableux	%en sable fin	% en sable moyen	%en sable grossier	Mode en Φ	Moyenne (Mz)	indice de Trask (So)	Indice asymétrie de Krumbein Skσ
A12	36,185	22,02	39,955	1,84	2	=		
A45	36,64	29,87	34,35	2,14	4,47			
A65	43,865	24,46	29,51	2,165	4,47			

Les sables moyens argileux sont constitués de 56,13 à 70,77 % de sables et de 33,64 % à 43,86 % d'argile-silteuse. Les modes varient de 2 à plus de 4,47 Φ avec une distribution bimodale des grains constitutifs de ce faciès. Les indices d'asymétrie et de Trask n'ont pas été déterminés en raison du pourcentage cumulés qui est inférieur à 75%

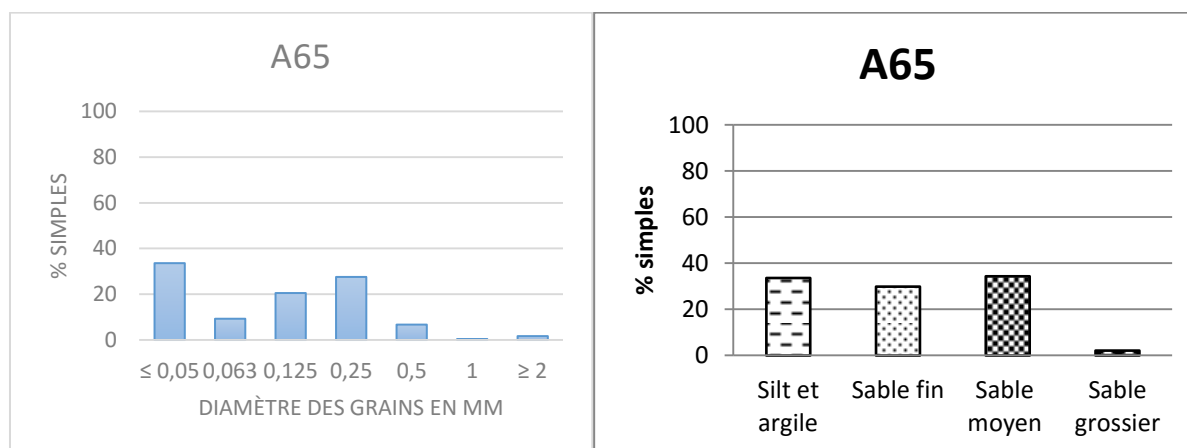


Figure 10: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable moyen argileux montrant une prédominance de sable fin (échantillon A65)

❖ Les sables fins argileux

Les échantillons de sédiments constitués de sable fin argileux fin sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 11: Paramètre granulométrique des échantillons constitués de sables fins à argileux

echantillon	%d'argil e sableux	%en sable fin	% en sable moyen	%en sable grossier	Mode en Φ	Moyenne (Mz)	indice de Trask (So)	Indice asymétrie de Krumbein Sk σ
A40	36,55	34,275	24,64	4,535	4,47	-	-	-
A46	28,22	49,88	21,055	0,845	3	-	-	-
A50	38,635	30,175	27,475	3,715	4,47	-	-	-
A55	49,7	30,495	3,525	16,28	4,47	-	-	-
A56	36,005	32,59	29,455	1,95	4,47	-	-	-
A61	31,8	50,245	10,37	7,585	3	-	-	-
A66	40,615	52,61	6,535	0,24	4,47	-	-	-
A69	45,23	34,69	16,59	3,49	4,47	-	-	-
A76	28,27	41,245	20,755	9,73	3	-	-	-
A77	42,11	10,68	3,71	43,05	-1	-	-	-
A78	30,44	56,385	12,805	0,36	3	-	-	-
A85	36,89	28,035	6,04	29,035	4,47	-	-	-
A89	27,605	43,58	25,77	3,045	4,47	-	-	-
A90	41,775	44,43	8,17	5,625	4,47	-	-	-

Les sables fins argileux sont constitués de 50,3 % à 71,78 % de sables et se retrouvent majoritairement dans la partie centrale du lac Nokoué et près de l'embouchure du canal Toché dans le lac Nokoué. Les pourcentages en argile-silteuse contenue varient de 28,22% à 42,7 % et les modes varient de 3 à plus de 4,47 Φ .

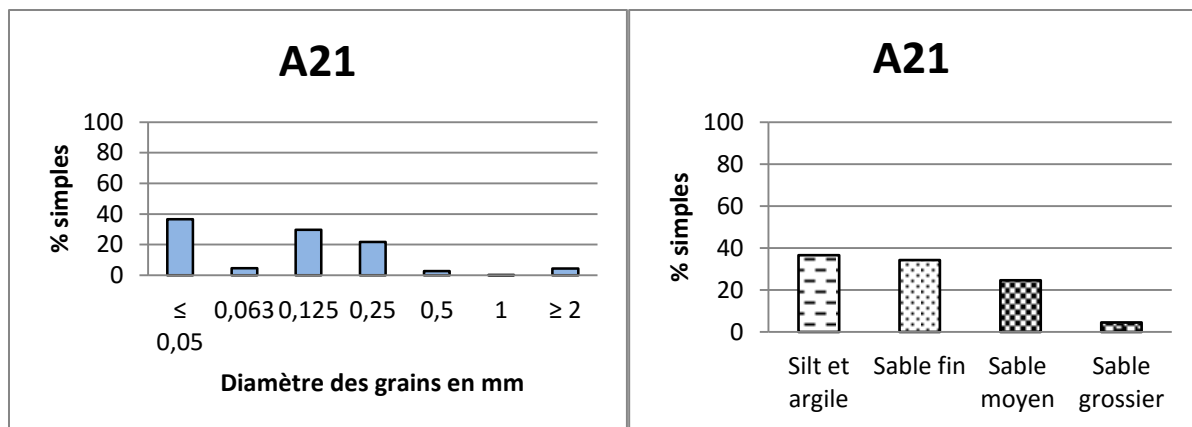


Figure 11: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable fin à argileux montrant une prédominance de sable fin (échantillon A21)

3.1.4.3 Distribution granulométrique des faciès de vase sableuse

Les échantillons de sédiments constitués de vase sableuse sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 12: Paramètre granulométrique des échantillons constitués de vase sableuse

échantillon	%d'argile sableux	%en sable fin	% en sable moyen	%en sable grossier	Mode en Φ	Moyenne (Mz)	indice de Trask (So)	Indice asymétrie de Krumbein $Sk\sigma$
A4	56.09	29.23	12.535	2.145	4.47	-	-	-
A19	70.505	20.17	6.19	3.135	4.47	-	-	-
A22	65.78	20.68	12.735	0.805	4.47	-	--	-
A29	60.74	27.885	7.745	3.63	4.47	-	-	-
A32	64.515	22.36	10.93	2.195	4.47	-	-	-
A33	66.765	23.975	6.395	2.865	4.47	-	-	-
A37	50.95	33.245	9.99	5.815	4.47	-	-	-
A51	53.785	29.57	6.925	9.72	4.47	-	-	-
A53	55.465	34.73	6.95	2.855	4.47	-	-	-
A58	64.755	10.33	1.185	23.74	4.47	-	-	-
A59	53.425	37.535	7.205	1.835	4.47	-	-	-
A60	66.945	14.45	17.32			-	-	-
A63	58.785	34.125	3.855	3.235	4.47	-	-	-
A71	74.68	15.08	1.435	8.805	4.47	-	-	-
A75	61.215	28.765	1.74	8.28	4.47	-	-	-

A81	54.88	28.17	13.01	3.94	4.47	-	-	-
A86	68.98	28.365	1.93	0.725	4.47	-	-	-
A99	69.625	21.395	5.265	3.715	4.47	-	-	-
A100	50.39	24.25	18.44	6.92	4.47	-	-	-
A101	59.31	25.475	6.915	8.3	4.47	-	-	-
A102	71.24	21.46	3.275	4.025	4.47	-	-	-

Les pourcentages de sables et d'argile-silteuse du faciès vaso-sableux varient respectivement de 29,49 % à 49,05% et de 50,95 % à 74,68 % avec des modes $> 4,47 \Phi$. La moyenne, les indices d'asymétrie et de Trask n'ont pas été déterminés en raison du pourcentage cumulé qui est inférieur à 75%

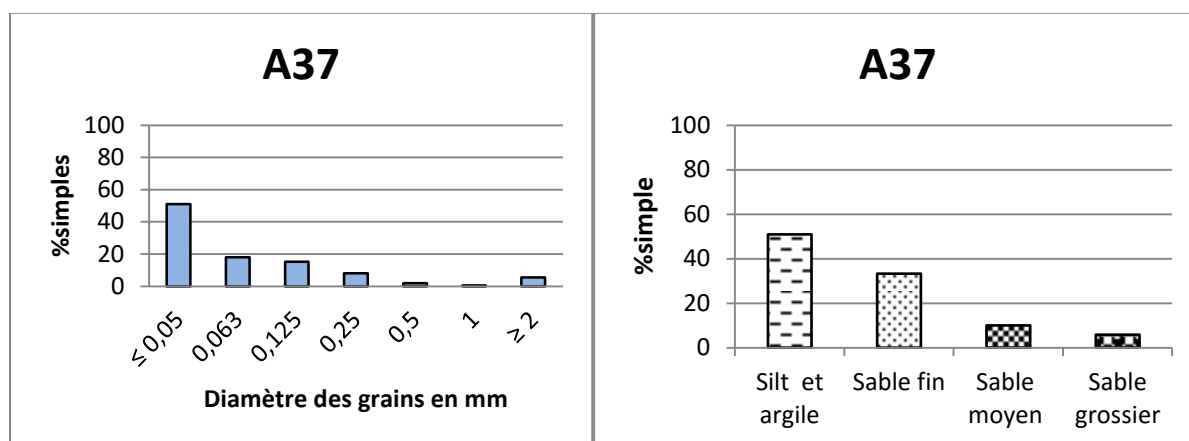


Figure 12: Histogramme de fréquence d'un échantillon de sable moyen argileux montrant une prédominance de sable fin (échantillon A37)

3.1.4.4 Distribution granulométrique des faciès de vase

La vase constitue le faciès le plus répandu dans la zone Sud-est du lac avec un pourcentage d'argile-silteuse compris entre 75,43 % et 98,96 %. La moyenne, les indices d'asymétrie et de Trask n'ont pas été déterminés en raison du pourcentage cumulé qui est inférieur à 75%. Les échantillons de sédiments constitués de vase sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 13: Paramètre des échantillons de sédiments constitués de vase

<u>echantillon</u>	%d'argile sableux	%en sable fin	% en sable moyen	%en sable grossier	Mode en Φ	Moyenne (Mz)	indice de Trask (So)	Indice asymétrie de Krumbein $Sk\sigma$
A1	97,235	0,075	0,04	2,65	4,47	-	-	-
A2	90,625	0,335	0,915	8,125	4,47	-	-	-
A3	92,835	0,465	0,655	6,045	4,47	-	-	-
A5	84,96	0,14	0,755	14,145	4,47	-	-	-
A6	93,27	0,53	4,6	1,6	4,47	-	-	-
A7	64,9	12,065	20,4	2,635	4,47	-	-	-
A8	92,235	4,655	0,915	2,195	4,47	-	-	-
A10	94,025	3,62	0,965	1,39	4,47	-	-	-
A23	93,315	2,98	0,73	2,975	4,47	-	-	-
A24	96,81	1,255	0,605	1,33	4,47	-	-	-
A25	98,96	0,545	0,315	0,18	4,47	-	-	-
A26	91,325	0,14	0,67	7,865	4,47	-	-	-
A27	90,43	0,58	0,855	8,135	4,47	-	-	-
A28	87,92	7,425	3,035	1,62	4,47	-	-	-
A34	87,175	6,22	0,655	5,95	4,47	-	-	-
A38	77,115	20,77	1,945	0,17	4,47	-	-	-
A44	75,435	19,145	1,09	4,33	4,47	-	-	-
A47	82,57	8,335	5,17	3,925	4,47	-	-	-
A49	86,005	3,06	4,195	6,74	4,47	-	-	-
A52	85,725	7,705	1,565	5,005	4,47	-	-	-
A54	97,315	1,485	0,18	1,02	4,47	-	-	-
A57	84,67	12,445	1,75	1,135	4,47	-	-	-
A67	79,495	15,84	1,16	3,505	4,47	-	-	-
A70	84,99	5,2	1,195	8,615	4,47	-	-	-
A72	82,8	14,73	1,83	0,64	4,47	-	-	-
A73	96,66	1,46	0,68	1,2	4,47	-	-	--
A74	76,32	2,865	1,04	19,775	4,47	-	-	-
A79	91,345	5,455	0,575	2,625	4,47	-	-	-

A80	78,58	16,725	1,34	3,355	4,47	-	-	-
A82	83,92	9,53	1,355	5,195	4,47	-	-	-
A87	80,52	14,725	2,29	2,465	4,47	-	-	-

La vase constitue le faciès le plus répandu dans la zone Sud-est du lac avec un pourcentage d'argile-silteuse compris entre 75,43 % et 98,96 %. La moyenne, les indices d'asymétrie et de Trask n'ont pas été déterminés en raison du pourcentage cumulés qui est inférieur à 75%

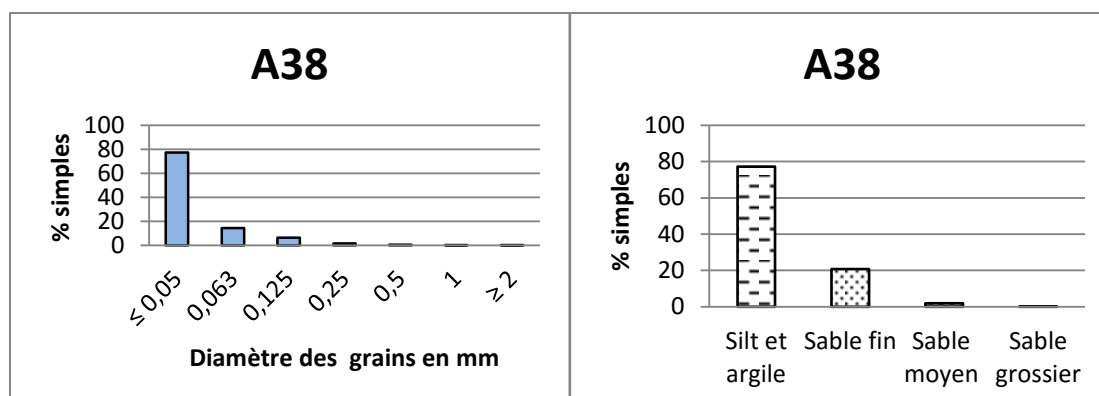


Figure 13: Histogramme de fréquence d'un échantillon de vase (échantillon A38)

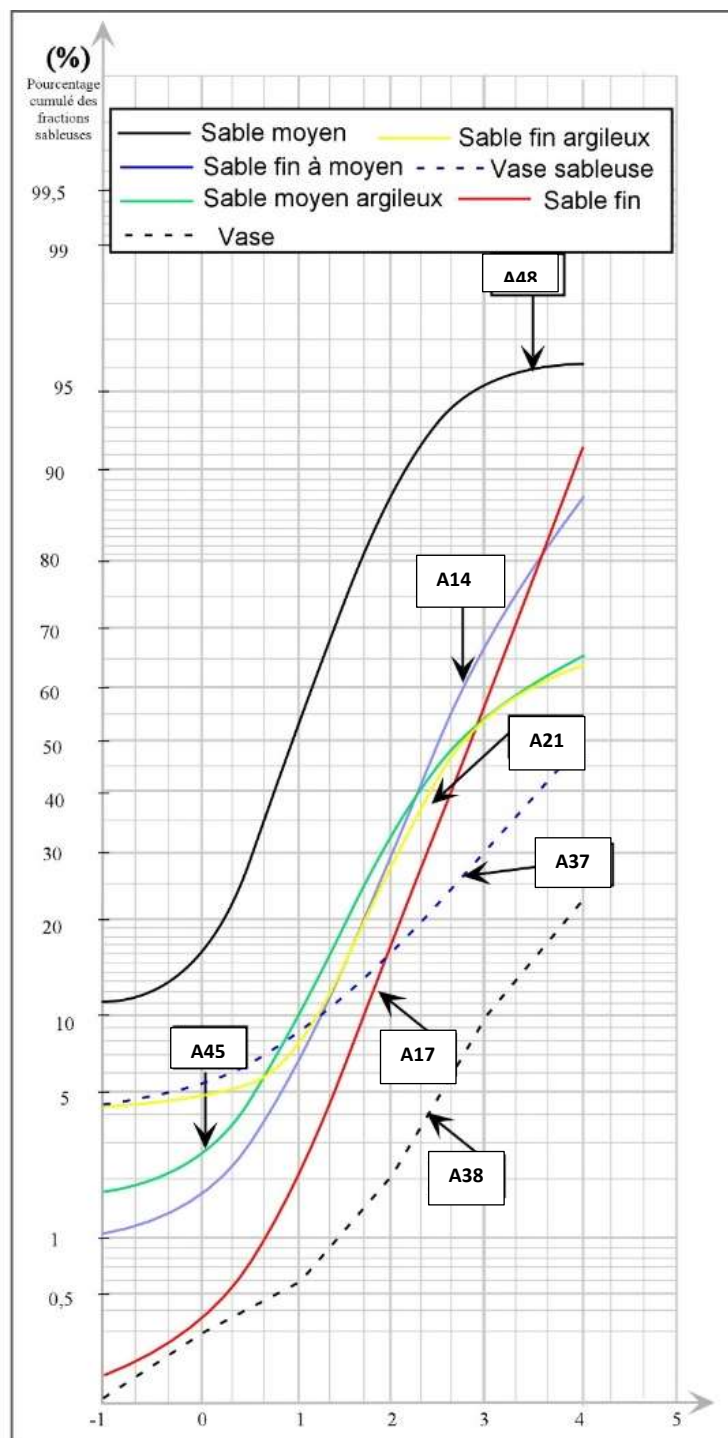


Figure 14: Courbe cumulatives des différents faciès de sédiments superficiels de la zone Sud-Est du lac Nokoué.

Conclusion partielle :

Le lac Nokoué est un plan d'eau situé entre le milieu continental franc et la mer, un environnement à la rencontre des eaux douces de continent et les eaux salées de la mer.

L'organisation sédimentaire dans le lac Nokoué montre que la zone Sud-Est du lac est constituée de faciès de sable, sable vaseux, vase sableuse et la vase. L'analyse de l'évolution spatiale entre les cartes de 1984, 2011 et 2022 à montrer que les différents faciès constitutifs des sédiments de la zone d'étude ont subi une évolution spatio-temporelle de 1984 à 2022. Les sédiments de la zone Sud-Est sont principalement constitués de sable situé à l'entrée du chenal de Cotonou dans le lac et à l'Est près du débouché du canal de Totché avec une superficie de 27,44 % en 2022 et est majoritairement pourvue de vase sableuse avec une superficie de 31,03% et de sable vaseux avec une superficie de 31,67 % de la superficie totale de la zone d'étude la distribution granulométrique des différents faciès des sédiments de la zone Sud-Est du lac Nokoué sont en liaison avec les phénomènes hydrodynamiques qui varie d'un régime hydrodynamique faible à un régime hydrodynamique fort. Ces sables sont à dominance constituée de grains fins à moyens.

L'analyse comparative des cartes sédimentologiques des années successives a montré que le lac se comble au fil des ans particulièrement dans sa partie Sud-Est. Les vases et vases sableuses occupent de plus en plus la partie Sud-Est du lac alors qu'elle se limitait seulement vers le nord du fond des cuvettes de la zone d'étude en 1984 et 2011. Les vases sableuses et vases tendent à recouvrir les sables qui se présentent désormais en bande discontinue dans la zone d'étude. Cette observation permet de comprendre que le lac subit un enrichissement en vases qui pourrait être dû à l'utilisation excessive d'acadja dans le milieu. Cet enrichissement en vases offre une possibilité d'accumulation des polluants dans les sédiments.

3.2 Caractéristique physico-chimique des sédiments

3.2.1 Caractéristique physique

3.2.1.1 Porosité

Au niveau de la variation de la teneur en porosité on note que la teneur en porosité varie de façon homogène dans les sédiments du lac. Elle oscille entre 0,16 à 0,99 % avec une moyenne de 0,55%.

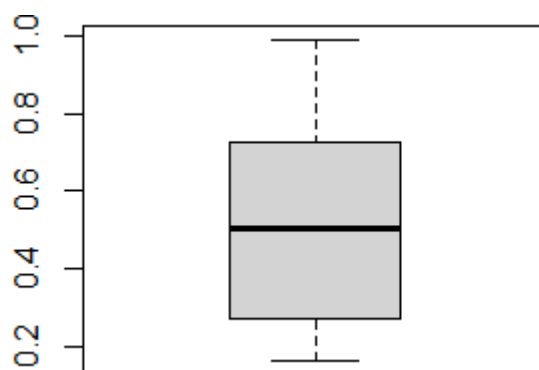


Figure 15: variation de la teneur en porosité dans les sédiments superficiels

Une analyse statistique montrant la moyenne de la porosité en fonction de chaque faciès est effectuée pour mieux apprécier la variation de la porosité dans les sédiments étudiés (tableau14).

Tableau 14: Moyenne de la teneur en porosité en fonction de la nature du sédiment

Nature du sédiment	Moyenne de la teneur en porosité
sable	0,45
Sable vaseux	0,45
Vase	0,5
Vase sableuse	0,47

D'après analyse, on constate que les sédiments de type sableux et sable vaseux présentent en moyenne une teneur en porosité de 0,45 alors que celle des sédiments de type vaseux et vase sableuse est comprise entre 0,47 à 0,5. La porosité varie en fonction de la nature des sédiments.

De l'analyse de la carte de variation de la teneur en porosité des sédiments étudiés (figure16d) on constate qu'il existe un lien entre la variation de la porosité et les différents faciès que composent les sédiments de la zone sud-est. On remarque que les faibles teneurs de porosité s'observent dans les zones où les sables sont rencontrés. Par contre, les sédiments à porosité élevée sont observés dans les secteurs où les vases et vases sableuses sont majoritaires. Selon (Denis et Grenz, 2003), les sédiments de type sableux seront généralement caractérisés par de faibles porosités allant de 0,3 à 0,5 alors que des sédiments de type vaseux peuvent avoir des porosités supérieures à 0,95 dans les centimètres superficiels du sédiment, ce qui est conforme aux valeurs obtenues au niveau des sédiments étudiés où on constate que les faibles valeurs varient de 0,16 à 0,45 et sont caractéristiques des sédiments à faciès sableux.

Comparativement aux faciès de sable, les vases et vases sableuses présentent une porosité élevée allant de 0,71 à 0,99.

Les fortes valeurs de la porosité pourraient s'expliquer par le faible débit d'écoulement des eaux dans le lac qui est de 0,03 m/s à l'intérieur du lac Zandagba et *al*, (2016) permettant aux particules fines de se sédimenter.

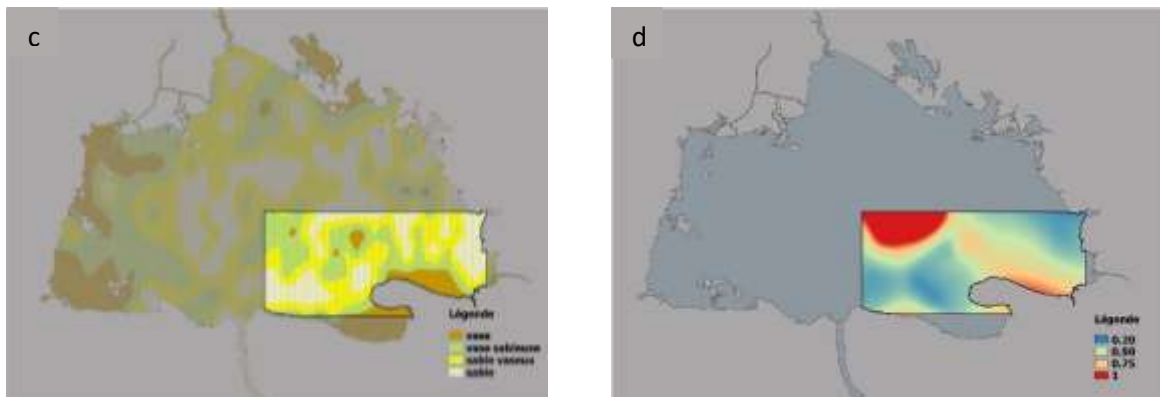


Figure 16: Carte des lithofaciès(a) et variation de la teneur en porosité des sédiments(d) (Viainon, 2022)

3.2.1.2 Teneur en eau

Le pourcentage en teneur en eau dans les sédiments superficiels de la zone sud-est du lac Nokoué varie entre 19,36 à 86,60 % avec une moyenne de 51,50 %.(Figure17). La variation en teneur en eau est répartir de façon hétérogène dans les sédiments (figure16). Les valeurs minimales en teneur en eau observées au niveau des sédiments sont inférieures aux valeurs minimales obtenues dans les sédiments du lac Dalinouer en chine tandis que les valeurs maximum sont supérieures aux valeurs maximum du lac Dalinouer (Hou. 2013) 37.4 % à 69.6 % avec une moyenne de 54.6 %. Le lac Dalinouer est principalement caractérisé par des sédiments dont le faciès variait du limon très fin à l'argile (Xiao et al. 2008). Cette caractéristique des sédiments du lac Dalinouer est semblable à celle du lac Nokoué dont le fond est principalement tapissé par les sédiments de vase et vase sableuse. Ces valeurs sont semblables aux valeurs obtenues dans les lagunes Françaises (Ouisse et al.. 2020) qui varie entre 18.6 % et 85.3%.

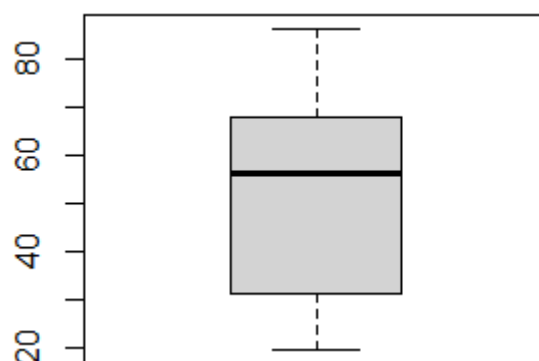


Figure 17: Répartition spatiale de la teneur en eau

Une analyse statistique montrant la moyenne de la teneur en eau en fonction de chaque faciès est effectuée pour mieux apprécier la variation de la teneur en eau dans les sédiments étudiés (tableau15).

Tableau 15: Moyenne de la teneur en eau en fonction de la nature du sédiment

Nature du sédiment	Moyenne de la teneur en eau (%)
Sable	30.11
Sable vaseux	38.55
Vase	65
Vase sableuse	52.25

L'analyse de la carte de répartition spatiale de la teneur en eau (figure17) révèle que les valeurs élevées en teneur en eau se retrouvent dans les sédiments situés au centre et à l'Est du cordon littoral de la zone Sud-Est tandis que les faibles valeurs se retrouvent du côté Ouest et à l'Est près du débouché du canal de Totché. Ces faibles valeurs sont également retrouvées dans les sédiments situés au Nord de la zone d'étude. Il est important de noter qu'une forte similitude est observée entre la teneur en eau et la porosité d'une part et les différents faciès observés au niveau des sédiments de la zone d'étude d'autre part. En effet, on remarque que les fortes teneurs en eau sont observées dans les secteurs où nous avons des teneurs de porosité élevée contrairement aux valeurs de teneurs en eau faibles elles sont observées au niveau des sédiments de faible porosité. Aussi les sédiments à teneur élevée en eau sont observés dans les secteurs caractérisés des faciès de vase et vase sableuse tandis que les sédiments dont les teneurs en eau sont faibles sont présents dans le secteur où la nature de sédiment est de type sableux et sableux vaseux (tableau 15).

Les teneurs élevées en eau dans les sédiments dénotent que les sédiments étudiés ont un fort pouvoir potentiel en matière d'absorption en eau ce qui reflète une fluidité légèrement forte de ces sédiments. Ce potentiel d'absorption peut être lié à la texture du sédiment et la porosité du sédiment. Plus les pores des sédiments sont grands plus la capacité d'absorption est élevée. La répartition de la teneur en eau s'accorde avec le comportement granulométrique qui est géré par l'hydrodynamisme de l'écosystème. En effet La saturation en eau des sédiments est liée au pouvoir d'absorption et peut être à l'origine du stockage de polluants dans les sédiments. Aussi la texture du sédiment influence sur le pouvoir d'absorption en eau dans les sédiments. Il ressort de ces analyses que les sédiments étudiés sont en majoritairement pourvus d'eau ce qui pourrait contribuer au mécanisme de stockage des polluant dans les sédiments. et ce potentiel d'adsorption est caractéristique du type de sédiments rencontré dans la zone d'étude.

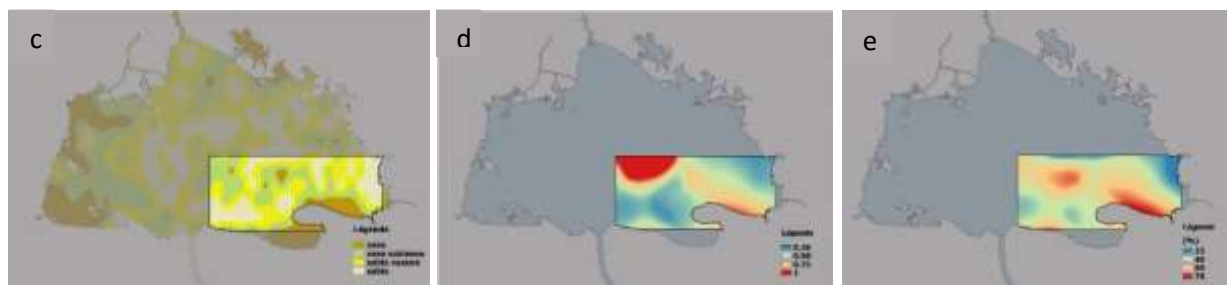


Figure 18: Carte de répartition des lithofaciès(c), de la porosité(d) et la teneur en eau(e) dans les sédiments (Viainon, 2022)

3.2.2 Caractéristique chimique des sédiments

3.2.2.1 Matière organique

De façon globale, les résultats montrent que les teneurs en matières organiques des sédiments superficiels de la zone sud-est varient de 0,4 % à 50 % avec une moyenne de 11,13 %. Ces valeurs se rapprochent de valeurs obtenues dans le lac Nokoué qui varient entre 1,29 % et 44,16 % (Azon. 2020). Il est également de noter que ces valeurs sont très supérieures aux valeurs obtenues dans le lac Ahémé et est compris entre 1,44 % et 22,44 % (Azon. 2020).

L'analyse statistique de la matière organique effectuée au niveau des différents faciès (tableau14) a montré que la teneur en matière organique présente dans les faciès de sable et sable vaseux varie entre 9,30 % à 9,43 % par contre celle obtenue au niveau du fond vaseux et vaso-sableux est de 9,84 % à 11,09%. Ces valeurs obtenues au niveau des différents faciès du fond du lac sont toutes supérieures à 4.4% (Ifremer. 2002). Cette forte charge en matière organique dénote un état mauvais du lac (Ifremer. 2002) car toutes les valeurs sont supérieures à 4,4%. L'enrichissement en teneur organique dans les sédiments étudiés dénote que le lac est sous l'influence d'une pollution organique.

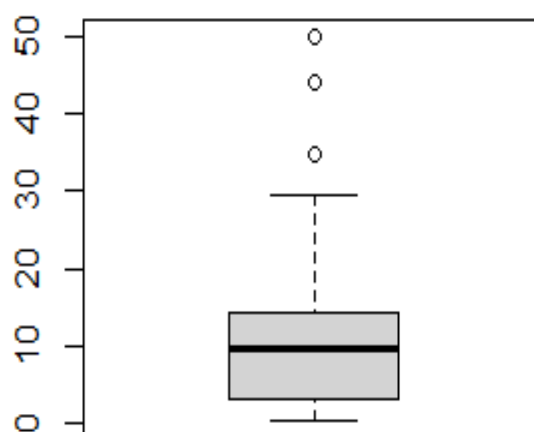


Figure 19: Variation de la matière organique

Tableau 16: Moyenne en matière organique en fonction de la nature du sédiment

Nature de sédiments	Moyenne en matière organique%
Sable	9.43
Sable vaseux	9.30
vase	11.09
Vase sableuse	9.84

La teneur en matière organique est présente à des concentrations élevées dans les sédiments superficiels de la zone Sud-Est du lac Nokoué (figure19). Par ailleurs, l'étude comparative entre la variation en teneur en matière organique et la répartition des faciès sédimentaires (figure20c et f) du lac indique que les différents faciès rencontrent au niveau du fond sédimentaire du lac présent des teneurs élevées en matière organique, mais elle est très élevée dans les fonds vaseux et vaso-sableux. Ce qui indique qu'il existe une relation étroite entre la matière organique et les différents faciès décrits précédemment. Il faut noter que la nature du sédiment influence en partie sur la teneur en matière organique. L'enrichissement en matière organique du lac pourrait être dû à la décomposition des débris végétaux provenant des acadjas utilisés pour la pêche de la mort saisonnière des jacinthes d'eau aux fonds du lac des eaux usées provenant des activités anthropiques qui par le phénomène de la diagenèse se trouvent enfouis dans les sédiments qui constituent le lieu de stockage de la matière organique.

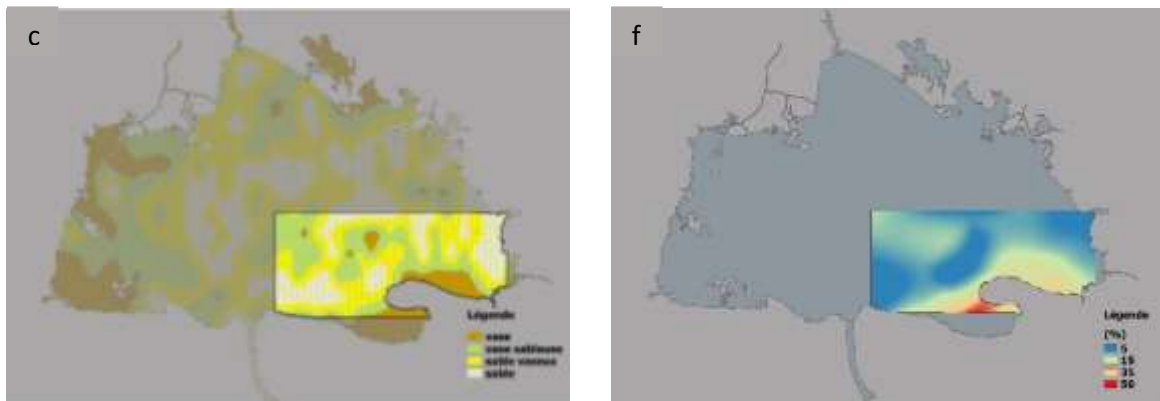


Figure 20: Carte de répartition des lithofaciès(c) et la variation de la matière organique(f) (Viainon, 2022)

3.2.2.2 Azote total

La figure ci-dessous présente de façon globale la variation spatiale en azote total dans les sédiments de la zone d'étude. De façon globale on constate que la concentration en azote totale oscille entre 281,5 à 9639 mg/kg avec une moyenne de 4334,6 mg/kg. Cette valeur obtenue est supérieure aux résultats trouvés par Djihouessi (2018) dans les sédiments du lac Nokoué qui est compris entre 220,05 à 1240,30 mg/kg.

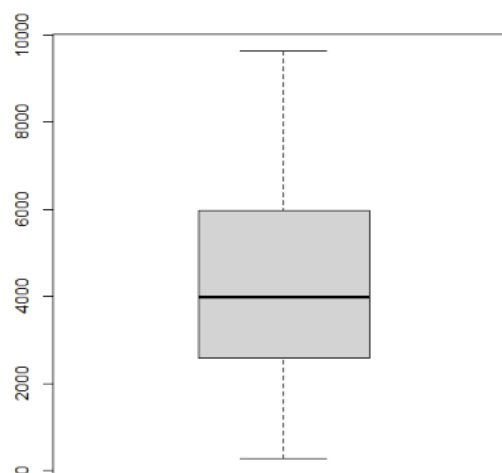


Figure 21: Variation spatiale de la teneur en azote total

En comparant cette valeur à la grille de diagnostic pour les sédiments du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo, on remarque que ces valeurs sont toutes supérieures aux valeurs de la grille.

Les concentrations en azote obtenues indiquent que les sédiments ont un grand potentiel d'apport d'azote vers la colonne d'eau. Les sédiments du lac sont donc riches en azote, car les valeurs excèdent les valeurs définies par la grille de diagnostic des sédiments du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo. La variation spatiale de l'azote indique que les

sédiments qui sont caractérisés par les concentrations en azote élevées se situent dans la partie Nord de la zone d'étude. L'évolution de ces teneurs montre une variation spatiale très importante, ce qui peut être attribué à la texture du sédiment qui est différente au fond de la cuvette de la zone d'étude. L'enrichissement des sédiments en azote pourrait être dû par l'apport des eaux usées des activités anthropiques qui sont drainées dans le lac lors des précipitations ou ils subissent le processus de sédimentation. Aussi, elle peut également provenir de la mort des organismes aquatiques et des macrophytes ainsi que des acadjas qui pourrissent dans le lac après usage. Les sédiments constituent donc une source endogène d'azote. Ces valeurs sont supérieures aux valeurs obtenues dans le lac de Dalinouer avec une variation de 371 à 8.353 mg/kg et une moyenne qui oscille autour de 3.492 mg/kg.

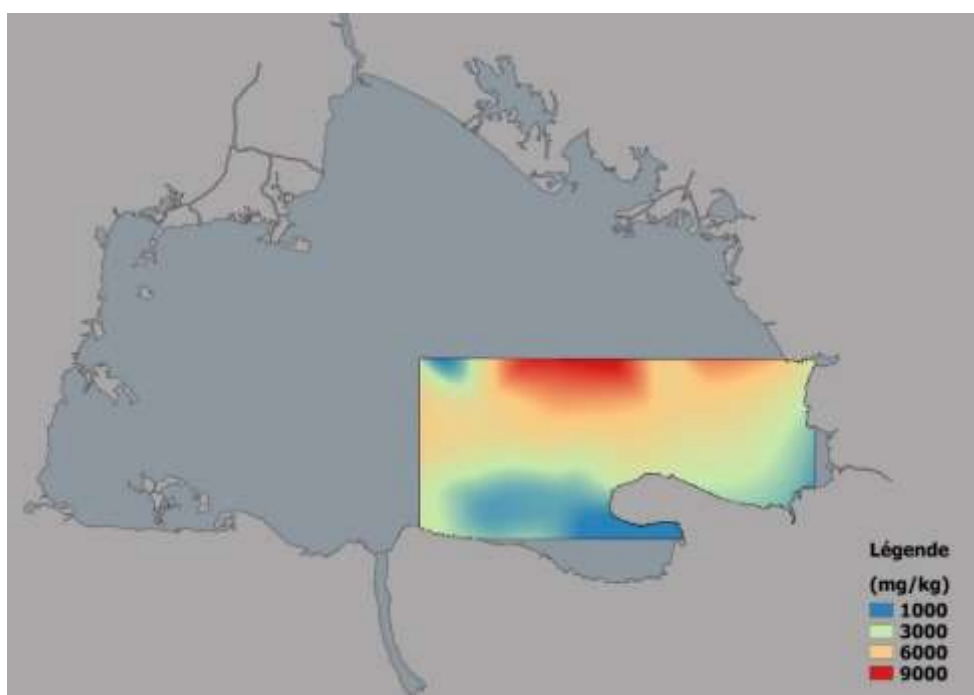


Figure 22: Variation de l'azote total dans les sédiments (Viainon, 2022)

3.2.2.3 Phosphore total

Contrairement à l'azote total, le phosphore total varie entre 25231 à 412889 $\mu\text{g/kg}$ avec une moyenne de 124716 $\mu\text{g/kg}$. Ces valeurs obtenues sont toutes supérieures aux valeurs obtenues par (Djihouessi, 2018) dans les sédiments du lac Nokoué qui est de 3514.49 à 32458.89 $\mu\text{g/kg}$ ces valeurs sont inférieures aux valeurs obtenues dans les sédiments de la lagune de Porto-Novo qui varient de 11880 $\mu\text{g/g}$ à 18517.71 $\mu\text{g/g}$.

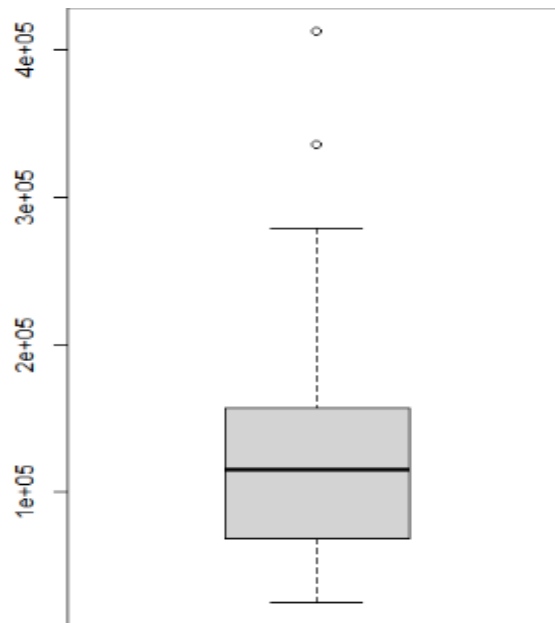


Figure 23: Variation du phosphore total dans les sédiments

Les valeurs de phosphores totaux obtenus dans les sédiments indiquent que les sédiments ont un grand potentiel pour fournir du phosphore à l'eau et sa distribution spatiale est plus importante. Les fortes concentrations de Phosphore total pourraient s'expliquer par le faible débit d'écoulement des eaux des lacs permettant aux particules fines de sédimenter. Plusieurs auteurs ont rapporté que les teneurs en phosphore augmentent lorsque la taille des particules diminue, car les petites particules ont tendance à se lier à la matière organique et à s'associer aux oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium Wang. J. et *al.* (2011) ; Vervier. P, (2009). En effet, une étude comparative entre les eaux courantes et les eaux stagnantes a montré que les sédiments des eaux courantes avaient des teneurs en phosphore total inférieures à celles des eaux stagnantes (Kuefel et *al.*, 1993). Cette différence s'expliquerait par deux phénomènes conjugués. D'une part intervient l'effet granulométrique étant donné que les particules qui sédimenter dans les eaux stagnantes (débit quasiment nul) sont plus fines que celles des cours d'eau (débit plus élevé) et donc a priori plus riches en phosphore (Kouakou et *al.*, 2014). D'autre part, une sédimentation autochtone due à la biomasse planctonique formée in situ celle-ci apportant un matériel riche en matière organique et en phosphore et aussi des apports externes riches en phosphore provenant des activités anthropiques. Aussi notons que la présence des acadjas contribue en grande partie à l'enrichissement en éléments nutritifs du lac qui sédimente après leurs morts.

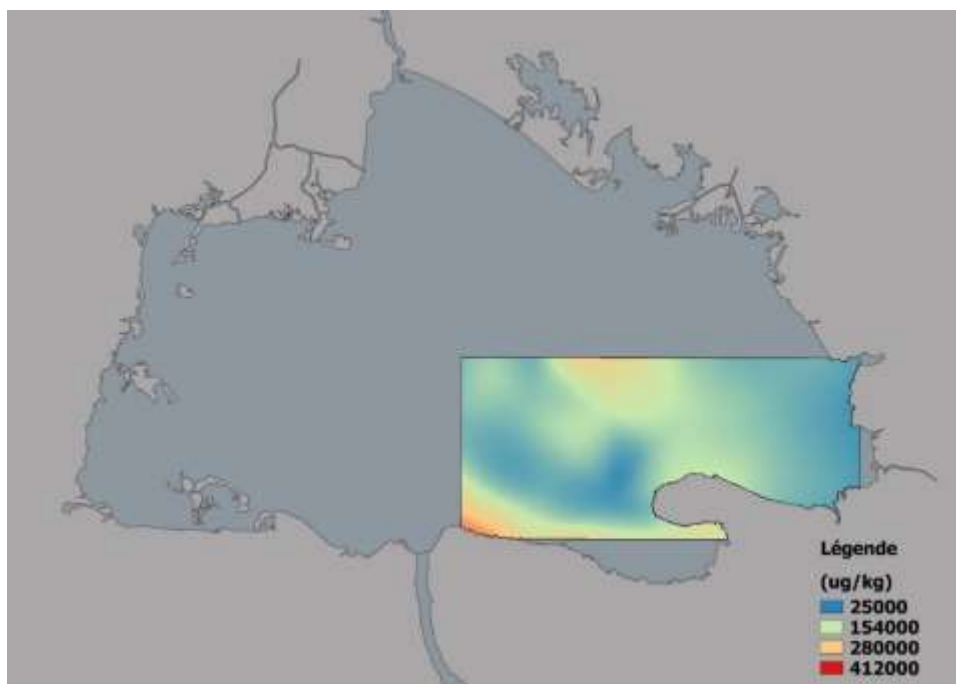


Figure 24: Carte de variation du phosphore total dans les sédiments (Viainon, 2022)

Tableau 17: Variation des paramètres physico-chimiques dans les sédiments

	Minimum	maximum	moyenne
Teneur en eau (%)	19,36	86,60	51,50
Porosité (%)	0,1628	0,9904	0,5114
Matière organique (%)	0,40	50,00	11,13
Azote total (mg/kg)	281,5	9639,3	4334,6
Phosphore total (µg /kg)	25231	412889	124716

Conclusion partielle

Du point de vue de la superficie, le lac Nokoué se présente comme le plan d'eau le plus concentré en azote et phosphore dans les sédiments 4334,6mg/kg d'azote total et 124761 µg /kg de phosphore total. La variation de ces teneurs dans les sédiments est liée à la texture granulométrique et aux activités anthropiques que subit le lac. En effet, la structure (granulométrie, porosité...) et le fonctionnement (cycle de la matière) de ces sédiments seraient influencés par la présence des apports externes et internes (les détritux végétaux, les acadjas) qui contribuent à l'augmentation de la sédimentation et donc à l'enrichissement en matière organique, azote et phosphore (apports sous forme de feuille morte) dans les premiers centimètres des sédiments.

3.3 Estimation des stocks sédimentaires d'azote et de phosphore total dans les sédiments

Le calcul des stocks d'azote et de phosphore total dans les sédiments superficiels de la zone Sud-Est du lac Nokoué ont été estimées en fonction de la superficie des différents faciès présents dans la zone d'étude et aussi en fonction de la hauteur de prélèvement qui est de 0.05m.

3.3.1 Stock sédimentaire d'azote total

Le stock sédimentaire d'azote total dans les sédiments superficiels de la zone d'étude est présenté dans le tableau ci-dessus.

Tableau 18: Valeurs moyennes du stock d'azote total en fonction de la nature des sédiments de la zone d'étude.

Nature des sédiments	Superficie des faciès (m ²)	Valeurs moyennes (mg/kg.m ³)
Sable	13,15	2109,19
Sable vaseux	15,18	3483,08
vase	4,72	1081,15

Vase sableuse	14.87	3753,19
---------------	-------	---------

De l'analyse du tableau 18 il ressort que le stock d'azote dans les sédiments superficiels de la zone sud-est varie en fonction de la nature du sédiment. La plus grande valeur est observée au niveau des sédiments de type vaso-sableux avec une moyenne de 3753,19 mg/kg.m³ sur une superficie de 14,87 m².

3.3.2 Stock sédimentaire en phosphore total

Les valeurs moyennes du stock en phosphore total que compose les sédiments superficiels de la zone d'étude sont présentés dans le tableau 19.

Tableau 19: valeurs moyennes du stock en phosphore total en fonction de la nature des sédiments de la zone d'étude.

Nature des sédiments	Superficie des faciès (m ²)	Valeurs moyennes (µg /kg.m ³)
Sable	13,15	57505,2043
Sable vaseux	15,18	63746,849
Vase	4.72	42296,851
Vase sableuse	14,87	84408,6603

Les valeurs moyennes du stock en phosphore total présenté dans le tableau ci-dessous varient en fonction de la nature du sédiment et de la superficie occupée par chaque faciès. Cette valeur est très importante au niveau des sédiments de type vaso-sableux. Ces sédiments de nature vaseux sont en générale très riche en matière organique ce qui se traduit par la présence élevée du phosphore total dans les sédiments.

Conclusion partielle

Du point de vue de la superficie, les sédiments de la zone sud-est présentent une quantité importante d'azote et de phosphore total. La variation de ces teneurs dans les sédiments est liée à la texture granulométrique et aux activités anthropiques que subit le lac. Cette forte teneur peut être expliquée par la présence de la matière organique provenant de la décomposition des végétaux qui se sédimente au fond du lac.

Conclusion et suggestion

Ce travail a permis d'estimer le stock d'azote et du phosphore total dans les sédiments de la zone sud-est du lac Nokoué. Au terme de cette étude, l'analyse granulométrique a révélé quatre types de faciès dans le lac Nokoué : le faciès de sable, le faciès de sable vaseux, le faciès de vase sableuse et le faciès de vase. En effet l'organisation sédimentaire du lac Nokoué montre que le lac est en majeure partie pourvu de vase sableux qui tend à tapisser le fond du lac tandis que les sables sont localisés au niveau du débouché du canal de Toché et du chenal de Cotonou. L'étude comparative entre les différentes cartes analysées témoigne d'une évolution spatio-temporelle et qui a pour conséquence un comblement du lac. Notons également que les sédiments étudiés présentent de fortes teneurs en eau et une porosité forte observée au niveau des sédiments vaseux ce qui dénote que ces sédiments ont un pouvoir d'accumulation importante des polluants. Les très fortes teneurs en matière organique dénotent par ailleurs d'un état anoxique avancé du lac dû à une augmentation excessive de la demande en oxygène ; ce qui aggrave l'état d'envasement du lac. L'azote et le phosphore présents dans les sédiments analysés indiquent que ces sédiments contribuent à l'enrichissement du lac en éléments nutritifs dans le lac et participent de façon indirecte au phénomène de l'eutrophisation du lac. Ces éléments nutritifs présents dans les sédiments proviennent des différentes activités exercées autour du plan d'eau.

Tenant compte de cet état de choses, il importe donc de veiller sur l'évolution ce plan d'eau à travers un schéma directeur d'aménagement qui garantit une bonne maîtrise et le suivi hydro-sédimentologie de ce plan d'eau pour le maintien de la santé hydrologique. Aussi la connaissance du stock d'azote et du phosphore dans les sédiments est insuffisante pour évaluer la quantité relarguée dans la colonne d'eau. Il est donc impératif qu'une approche basée sur la spéciation soit envisagée. Une analyse comparative entre l'évolution spatiale de la jacinthe d'eau et la variation spatiale des éléments nutritifs dans les sédiments doit être envisagée dans le but de mieux apprécier le rôle des sédiments dans le processus d'eutrophisation. Afin de préserver les usages que procure cet écosystème aux populations riveraines, il importe qu'une approche intégrée de la gestion de celle-ci et de son bassin versant soit instaurée pour sa protection et les organismes vivants qui y habitent.

Références

- Abdallaoui, A. 1998** Contribution à l'étude du phosphore et des métaux lourds contenus dans les sédiments et de leur influence sur les phénomènes d'eutrophisation et de la pollution. Cas du bassin versant de l'oued Beht et de la retenue de barrage El Kansera. Thèse de Doctorat, Université Moulay Ismail, Meknès, Maroc.
- Adechina A. R. M. A., KElome C. N., Laibi L. A., Hounkpe J. B. et Mensah G. A. 2017.** Influence des facteurs géologiques, paléoclimatiques et anthropiques dans l'estuaire du fleuve Ouémé au Bénin pp. 26-45.
- Aw S., (2009)** Etudes physico-chimiques et microbiologiques d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). Thèse, Chimie et Microbiologie de l'Eau, Université de Poitiers, France (2009) 234p.
- Azon N. B. N. 2020.** Etude de la pollution mercurielle et des risque eco-toxicologique du lac Nokoué et du lac Ahémé au sud du Bénin (Afrique de l'Ouest). Thèse Environnement et Eco-hydrologie Université d'Abomey Calavi.
- Azzouz. S, 2014** Spéciation du Phosphore dans des Sédiments Aquatiques Optimisation Analytique Application Environnementale. Thèse de Doctorat ; Université Constantine I 154p.
- Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel. Y. and Gualde R., 1993.** Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Paris: ORSTOM, 1993, 540 p. (Monographies Hydrologiques ; 11). ISBN 2-7099-1168-X.
- Bonin P., Omnes P., Chalamet A., 1998.** Simultaneous occurrence of denitrification and nitrate ammonification in sediments of the french mediterranean coast. *Hydrobiologia* 389:169-182
- Bonin P., 2000.** Le cycle de l'azote dans les ecosystèmes marins côtiers. *Oceanis* 26:697-710
- Bostrom B., Andersen J.M., Fleischer S. & Jansson M. (1988),** Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. *Hydrobiologia*, 170, 229-244.
- Berner R.A., 1980.** Early diagenesis: a theoretical approach / Robert A. Berner. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Burgin, A. J., and S. K. Hamilton. 2007.** Have we overemphasized the role of denitrification in aquatic ecosystems? A review of nitrate removal pathways. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5: 89-96.
- Canfield D. E., 2005.** The Nitrogen cycle. In: Elsevier (ed) *Advances in marine biology*,

Book 48.

Chouti K W, Atchichoe W, Tometin L, Daouda M. 2017. Biodisponibilité et mobilité du phosphore des sédiments de la lagune de Porto-Novo.

Cloern, J.E., 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Mar Ecol Prog Ser* 210, 223-253.

Colin D., 2003 Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. CAEN.

Dauphin P, Hammond D, Hartman B, Maynard V (1979) Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic : suboxic diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43 :1075–1090.

Dovonou F., M. Aïna, M. Boukari et A. Allassane, 2011. “ Pollution physico-chimique et bactériologique d’un écosystème aquatique et ses risques écotoxicologiques : cas du lac Nokoué au Sud-Bénin,” *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 5, no. 4, pp. 1590-1602.

Djihouessi, 2018. Nutrient budget approach for the management of eutrophication and ecosystem services of Lake Nokoué. *These Hydrology and Integrated Water Resource Management (H-IWRM) University of Abomey-Calavi* 193p.

Dubois V., “Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière,” pp. 1–311,

Erwan Tessier, 2012 Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/métalloïdes dans la rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité. Autre. Université de Toulon. Français.

Enell M., Lofgren S., 1988, Phosphorus in interstitial water : methods and dynamics. *Hydrobiologia*, 170, 103-132.

Francis C.A., Beman J.M., Kuypers M., 2007 New processes and players in the nitrogen cycle: the microbial ecology of anaerobic and archaeal ammonia oxidation. *Isme J* 1:19-27.

Froelich P.N., Klinkhammer G.P., Bender M.L, Luedtke N.A., Heath G.R, Cullen D, Golterman H.L. (1984), Sediments, modifying and equilibrating factors in the chemistry of freshwater. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22, 23-59.

Froelich P.N., Arthur M.A., Burnett W.C., Deakin M., Hensley V., Jahnke R., Kaul L., Gounou, C. 2008. Mobilité des éléments traces métalliques dans les sédiments - couplage et comparaison des approches chimique et microbiologique. *Thèse de Doctorat, Université Paris 12-Val De Marne*, 314p.

- Gilbert F., Bonin P., Stora G., 1995.** Effect of Bioturbation on Denitrification in a Marine Sediment from the West Mediterranean Littoral. *Hydrobiologia* 304:49-58.
- Gnohossou, P., 2006.** La faune benthique d'une lagune ouest africaine (le lac nokoue au benin), diversité, abondance, variations temporelles et spatiales, place dans la chaîne trophique. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.
- Grenz C, Denis L, Boucher G, Chauvaud L, Clavier J, Fichez R, Pringault O (2003)** Spatial variability in Sediment Oxygen Consumption under winter conditions in a lagoonal system in New Caledonia (South Pacific). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 285-286: 33–47.
- Herbert R.A., 1999** Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems. *Fems Microbiology Reviews* 23:563-590.
- Howarth R.W., Billen G., Swaney D., Townsend A., Jaworski N., Lajtha K., Downing J.A., Elmgren R., Caraco N., Jordan T, Berendse F, Freney J, Kudryarov V, Murdoch P., Zhu Z.L., 1996** Regional nitrogen budgets and riverine N&P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. *Biogeochemistry* 35:75-139.
- Hounkpatin, A., S., Y., A. P. Edoth, L. Koumolou, M. Boko, 2011.** Métaux lourds (Pb et Cd) dans les sédiments de la cité lacustre de Ganvié et qualité toxicologique de l'eau et des poisons, pp. 1-3. 6ème Journées Scientifiques du 2iE, 4-8 avril 2011, campus 2iE Ouagadougou (Burkina Faso).
- Hou. D, He.J, Lu".C, Dong.S, Wang.J, Xie.Z, Zhang.F 2013.** Spatial variations and distributions of phosphorus and nitrogen in bottom sediments from a typical north-temperate lake, China .Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hulth S., Aller R.C., Gilbert F., 1999.** Coupled anoxic nitrification/manganese reduction in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63:49-66.
- Hyacinthe C, Van Cappellen P., 2004.** An authigenic iron phosphate phase in estuarine sediments: composition, formation and chemical reactivity. *Mar Chem* 91:227-251.
- Jenkins M.C., Kemp W.M., 1984.** The Coupling of Nitrification and Denitrification in 2 Estuarine Sediments. *Limnol Oceanogr* 29:609-619.
- Kasmi A., 2014** "Prétraitement et traitement des sédiments fluviaux en vue d'une valorisation en technique routière.
- Kim K.H., Roe K., Soutar A., Vathakanon C. (1988.** Early diagenesis of organic-matter in Peru continental-margin sediments - phosphorite precipitation. *Mar Geol* 80:309-343.
- Kowarzyk, 2009** Concentrations et flux d'azote dans les sédiments hypoxiques de

l'Estuaire Maritime du St-Laurent. grade de Maître ès science (M. Sc.) en sciences biologiques.

Kaki, C., P. Guedenon, N. Kélomè, P. Edoth, and R. Adechina, 2011. Evaluation of heavy metals pollution of Nokoue lake. *Afri.journ. ofEnvir. Sci. and Tech.*..5(3): 255-261.

Kuypers, M. M. M. and others 2005. Massive nitrogen loss from the Benguela upwelling system through anaerobic ammonium oxidation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **102:** 6478-6483.

Lalèyè P. A. 1995, Ecologie comparée de deux espèces de *Chrysichthys*, poissons siluriformes (Claroteidae) du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo au Bénin, Thèse de Doctorat en Sciences de l'Université de Liège, Belgique, pp. 152, 1995. F.

Léreau J., 2006. “ Cours de Géotechnique,” *Inst. Natl. des Sci. appliquées Toulouse*, p. 22p.

Lhote, A., 2000. Critères d'évaluation de la qualité de l'eau d'un système lacustre tropical. Approche statistique. Université de Poitiers, Poitiers, France (2000) 154p.

Loustau cazalet, M. 2012. Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques - Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France. 239p.

Martin G., 1985, Les échanges phosphate/eau/sédiments. *Laboratoire C.N.G.E.* Rennes, France, 12-34.

Moreno, O.M., 2015. Variabilité spatiale et temporelle des cycles biogéochimiques à l'interface eau-sédiment dans la lagune de Términos, Mexique. Thèse de Doctorat, L'Université Aix-Marseille, 250p

Nixon, S. W. and others 1996. The fate of nitrogen and phosphorus at the land sea margin of the North Atlantic Ocean, p. 141-180. Kluwer Academic Publ.

Niyonkuru. C. and P. Lalèyè, 2012 “Comparative ecological approach of the length-weight relationships and condition factor of *Sarotherodon melanocheilus* Rüppell, 1852 and *Tilapia guineensis* (Bleeker 1862) in lakes Nokoué and Ahémé (Benin, West Africa),” *International Journal of Business, Humanities and Technology*, Vol. 2, no. 3, pp. 41-50.

Oyede L.M. 1991. Present sedimentary dynamic and signals recorded in the quaternary and neogene sequences in margino-littoral area of Benin. University of Bourgogne- National university of Bénin (Doctoral Thesis in Geol. Matine), p. 302.

Power, E. A., and Chapman, P. M., 1992. Assessing sediment quality, In Burton, G.A.J (Eds). *Sediment Toxicity Assessment*, Lewis, MI, USA 1-18.

- Ramaroson, J. 2008** Calcination des sédiments de dragage contaminés. Études des propriétés physico-chimiques. Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France. 181p.
- Rao P.S.C. & Davidson J.M. (1982)**, Retention and transformation of selected pesticides and phosphorus in soil-water systems: a critical review. Environ. Reseach. Lab. Off. Research. develop. U.S. Environ. Protec. Agency. Athens, Georgia 30613. EPA 600/3-82-060. Grant n° R. 805529-01, 341 p.
- RATMAYA W. 2018.** Rôle des sédiments dans le cycle des nutriments et impacts sur l'eutrophisation des écosystèmes côtiers.
- Rysgaard, S., P. Thastum, T. Dalsgaard, P. B. Christensen, and N. P. Sloth. 1999.** Effects of salinity on NH_4^+ adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuarine sediments. *ESTUARIES* **22**: 21-30.
- Schulz H. D., 2006.** Quantification of early diagenesis: dissolved constituents in pore water and signals in the solid phase. *Marine Geochemistry* **3**:73-124.
- Seitzinger S.P., 1988.** Denitrification in Fresh-Water and Coastal Marine Ecosystems Ecological and Geochemical Significance. *Limnol Oceanogr* **33**:702-724.
- Simon J. 2002.,** Enzymology and bioenergetics of respiratory nitrite ammonification. *Fems Microbiology Reviews* **26**:285-309.
- Slomp C.P., 2011.** Phosphorus Cycling in the Estuarine and Coastal Zones : Sources, Sinks, and Transformations. In: Wolanski E, McLusky D (eds) *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Academic Press, Waltham.
- Slomp C.P, Epping E.H.G, Helder W., Raaphorst W.V (1996)** A key role for iron-bound phosphorus in authigenic apatite formation in North Atlantic continental platform sediments. *J Mar Res* **54**:1179-1205.
- Song Y.,2017** “Traitement électrocinétique des sédiments de dragage et valorisation par solidification / stabilisation To cite this version : HAL Id : tel-01410065,” 2017.
- Sorokin D., Tourova T., Schmid M.C., Wagner M., Koops H.P., Kuenen J.G., Jetten M., 2001.** Isolation and properties of obligately chemolithoautotrophic and extremely alkali-tolerant ammonia-oxidizing bacteria from Mongolian soda lakes. *Archives of Microbiology* **176**:170-177.
- Thamdrup B., Dalsgaard T., 2000.** The fate of ammonium in anoxic manganese oxide-rich marine sediment. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* **64**:4157-4164
- Tran N. T., 2009** “Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse Dr. Ec. des Mines Douai, p. 189.

Trimmer M., Nicholls J.C., Deflandre B., 2003. Anaerobic ammonium oxidation measured in sediments along the Thames estuary, United Kingdom. *Appl Environ Microb* 69:6447-6454.

Trimmer M, risgaard-Petersen N, Nicholls J.C, Engstrom P (2006) Direct measurement of anaerobic ammonium oxidation (anammox) and denitrification in intact sediment cores. *Marine Ecology-Progress Series* 326:37-47.

Ward B. 2000. Nitrification and the marine nitrogen cycle. Kirchmann, D.L. (Ed.) *Microbial ecology of the oceans. Wiley Series in Ecological and Applied Microbiology.*: 427-453.

Zaghmouri, 2013 Impact des fluctuations de salinité sur le cycle de l'azote dans les sédiments de l'étang de Berre THESE DE DOCTORAT D'AIX-MARSEILLE UNIVERSITE.

Zandagba, J., Adandedji, F.M., Mama, D., Chabi, A. and Afouda, A., 2016. Assessment of the Physico-Chemical Pollution of a Water Body in a Perspective of Integrated Water Resource Management: Case Study of Nokoué Lake. *Journal of Environmental Protection*, 7(05), p.656.

ZERAOUI A., 2011. Approche opérationnelle pour une gestion durable des sédiments de dragage dans des filières de génie civil L'UNIVERSITÉ DE LILLE.

Zentar R., Miraoui M., Abriak N. E., and Benzerzour M., 2011. "Natural Dewatering of Marine Dredged Sediments," *Dry. Technol.*, vol. 29, no. 14, pp. 1705–1713, 2011.

STUMM W. & MORGAN J.J. (1970), *Aquatic Chemistry. John Wiley & Sons pub.*, New-York, 583 p.