REPUBLIQUE DU BENIN

=======

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

=======

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme de Master Professionnel En Hydrologie

Option : ECOHYDROLOGIE

ESTIMATION DE LA CHLOROPHYLLE-A DES EAUX DU COMPLEXE FLUVIO-LAGUNAIRE LAC NOKOUE-LAGUNE DE PORTO-NOVO A PARTIR D'IMAGES SATELLITAIRES LANDSAT ET SENTINEL

Présenté et soutenu le 02/05/2024 par :

Sessi Victaurya Eurydice ZINZINDOHOUE

Devant le jury composé de :

1. **Président du jury :** Pr. Daouda MAMA
2. **Examinateur (1) :** Dr. Edia Flavien DOVONOU
3. **Examinateur (2) :** Dr. Ousmane BOUKARI
4. **Rapporteur :** Dr. Firmin M. ADANDEDJI

MENTION :
EXCELLENTE

Encadreur :
Dr Firmin M. ADANDEDJI
(Chercheur à l'INE)

Superviseur :
Dr. Edia Flavien DOVONOU
(Maître de Conférence Enseignant-Chercheur à l'INE)

PROMOTION : 2022-2023

DEDICACE

A

mes parents Eustache Zinzindohoué et Mireille Yêhouessi, pour toute l'affection dont je bénéficie depuis mon enfance jusqu' aujourd'hui. Ce travail ne saurait aboutir sans vos encouragements et votre soutien sans faille. Rien ne pourrait estimer l'amour et le respect que j'ai pour vous.

REMERCIEMENTS

Je voudrais à travers ce travail, remercier en premier lieu le bon Dieu, pour son amour, son assistance tout au long de sa réalisation, pour la grâce qu'il m'a accordée de finir en beauté cette formation et également toutes les généreuses personnes qu'il a mises sur mon chemin afin d'accomplir ce travail.

Le présent travail a pu voir le jour grâce à la détermination d'hommes et de femmes qui n'ont ménagé aucun effort pour contribuer à son heureux aboutissement. Vous êtes nombreux à m'avoir apporté votre assistance technique ou financière. Certes, je ne peux vous citer tous ici car la liste est longue : recevez ici mes profondes gratitudes.

Ces dernières s'adressent particulièrement aux personnes suivantes :

- Professeur **Flavien DOVONOU**, superviseur de ce travail, qui n'a ménagé aucun effort pour sa réalisation ;
- Docteur **Firmin M. ADANDEDJI**, encadreur du présent mémoire, pour avoir accepté d'encadrer le présent travail malgré ses multiples occupations. Je le remercie également pour la sollicitude avec laquelle il a guidé ce travail, sa rigueur et sa volonté de mener à terme ce présent projet de recherche ;
- Professeur **Daouda MAMA**, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE) et Coordonnateur du Centre d'Excellence pour l'Eau et l'Assainissement (C2EA) pour nous avoir permis l'insertion dans son établissement ;
- Professeur **Luc SINTONDJI**, Directeur Adjoint de l'Institut National de l'Eau pour les efforts consentis dans la formation des jeunes scientifiques ;
- **le personnel du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA)**, pour leur précieuse contribution à la réalisation de ce travail ;
- **tous les Honorables membres du Jury** qui apprécieront ce modeste travail ; et pour le temps consacré en vue d'apprécier la qualité scientifique de ce travail ;
- Professeurs **Abel AFOUDA, Moussa BOUKARI, Emmanuel LAWIN** et tous les autres enseignants de l'INE qui n'ont ménagé aucun effort pour faire de la formation en Hydrologie une formation de référence dans le domaine de l'eau au Bénin et en Afrique de l'Ouest ;
- Monsieur **Romaric HEKPAZO**, pour son aide et ses conseils lors de l'accomplissement de ce travail ;
- Monsieur **Rachad FOUSSENI**, pour son aide dans la réalisation de ce travail ;

- Monsieur **Renaud MITCHOZOUNOU,** pour sa précieuse contribution dans l'élaboration de ce travail ;
- **tous mes camarades de promotion d'Hydrologie et spécialement ceux d'Ecohydrologie,** pour la bonne ambiance qui a régné au cours de notre formation ;
- **mes frères Harold et Sèdami ZINZINDOHOUE**, toute ma famille, mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines pour l'amour, le soutien, l'orientation et les conseils de tous les jours ;
- **tous ceux qui ont contribué de près ou de loin** à l'élaboration de ce document, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

RESUME

Le complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo représente l'un des plus grands estuaires de l'Afrique de l'Ouest. Ses abondantes ressources naturelles ont permis à des générations d'habitants de vivre et d'être le moteur d'échanges socio-économiques depuis des siècles. À l'instar d'autres masses d'eaux adjacentes à des villes fortement urbanisées, l'augmentation de la charge organique et des nutriments provenant des déchets domestiques, industriels et agricoles non traités a des conséquences néfastes sur la qualité de l'eau. Une surveillance fréquente de la qualité de l'eau s'avère donc nécessaire. Les données issues des méthodes traditionnelles d'échantillonnage sur le terrain pourraient ne pas être suffisantes pour évaluer les variations spatiales et temporelles des facteurs environnementaux. La collecte de données directe de terrain requiert de nombreux moyens aussi bien technique, humain que financier. Ce qui limite un suivi sur une longue durée de la qualité de l'eau, notamment de l'eutrophisation. La télédétection répond au besoin en donnant une vue d'ensemble fréquente et complète de la qualité de l'eau spatiale. L'objectif du présent travail est d'estimer la chlorophylle (a) à partir des images Landsat 8 et Sentinel-2 dans ce complexe. Au total 20 sites de prélèvement sont suivis, les images Landsat 8 et Sentinel-2 à l'échelle de la zone d'étude ont été acquises. L'approche méthodologique a consisté dans un premier temps à évaluer la dynamique saisonnière et spatiale de la chlorophylle (a) dans le complexe, dans un second temps à calibrer un algorithme d'estimation de la concentration en Chl-a sur la base des données prises sur sites de 2020-2021 et les images satellites correspondantes. L'algorithme est validé par les données collectées de septembre, octobre 2023 et de février 2024. La performance du modèle a été évaluée à l'aide du critère de NASH, le RMSE et R^2. Le rapport de bande correspondant au NDCI (Bande 4 et 5) pour l'image Sentinel-2 a été choisi pour estimer la concentration en Chl-a en fonction de sa plus grande corrélation avec les valeurs collectées et des faibles valeurs d'erreurs obtenues. Ce modèle a donné un R^2 de 0,623, NASH de 0,858 et RMSE= 2,806 pour le mois de septembre. Pour le mois d'octobre, un R^2 de 0,3292, NASH de 0,6651 et RMSE= 1,603. Quant au mois de février un R^2 de 0,8852, NASH de 0,7008 et RMSE= 0,6341. Les écarts observés étant minimes, le modèle proposé est validé et permettrait d'estimer la chlorophylle (a) dans le complexe en vue d'une gestion durable.

Mots clés : *Chlorophylle (a), SIG, Lac Nokoué, Lagune de Porto-Novo, Pollution*

ABSTRACT

The lake Nokoue-Porto-Novo lagoon complex represents one of the largest estuaries in West Africa. Its abundant natural resources have sustained generations of inhabitants and driven socio-economic exchanges for centuries. As with other bodies of water adjacent to highly urbanized cities, increasing organic and nutrient loads from untreated domestic, industrial and agricultural waste are having a detrimental effect on water quality. Frequent monitoring of water quality is therefore essential. Data from traditional field sampling methods may not be sufficient to assess spatial and temporal variations in environmental factors. Direct field data collection requires considerable technical, human and financial resources. This limits long-term monitoring of water quality, particularly eutrophication. Remote sensing meets this need by providing a frequent and comprehensive overview of spatial water quality. The aim of the present work is to estimate chlorophyll (a) from Landsat 8 and Sentinel-2 images in this complex. A total of 20 sampling sites were monitored, and Landsat 8 and Sentinel-2 images at the scale of the study area were acquired. The methodological approach consisted firstly in assessing the seasonal and spatial dynamics of chlorophyll (a) in the complex, and secondly in calibrating an algorithm for estimating Chl-a concentration on the basis of data taken at sites in 2020-2021 and the corresponding satellite images. The algorithm was validated using data collected in September, October 2023 and February 2024. Model performance was evaluated using the NASH criterion, RMSE and R^2. The band ratio corresponding to the NDCI (Band 4 and 5) for the Sentinel-2 image was chosen to estimate the Chl-a concentration based on its highest correlation with the collected values and the low error values obtained. This model gave an R^2 of 0.623, NASH of 0.858 and RMSE= 2.806 for the month of September. For October, it gave an R^2 of 0.3292, NASH of 0.6651 and RMSE= 1.603. For February, R^2 of 0.8852, NASH of 0.7008 and RMSE= 0.6341. As the observed deviations are minimal, the proposed model is validated and would enable chlorophyll (a) in the complex to be estimated with a view to sustainable management.

Key words: *Chlorophyll (a), GIS, Lake Nokoue, Porto-Novo Lagoon, Pollution*

TABLE DES MATIERES

DEDICACE i

REMERCIEMENTS ii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES x

LISTE DES FIGURES xi

LISTE DES PLANCHES xiii

LISTE DES TABLEAUX xiv

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART 6

1.1. Généralités sur l'eau 6

1.1.1. Les eaux atmosphériques 6

1.1.2. Les eaux de mer et les océans 6

1.1.3. Les eaux souterraines 6

1.1.4. Les eaux de surface 7

1.2. Généralités sur la pollution des eaux de surface 7

1.2.1. La pollution d'origine domestique 8

1.2.2. La pollution d'origine industrielle 8

1.2.4. La pollution d'origine atmosphérique 8

1.2.5. Conséquences de la pollution des eaux de surface 9

1.3. Les paramètres physico-chimiques des eaux de surface 9

1.3.1. Le potentiel d'hydrogène 9

1.3.2. La température 10

1.3.3. L'oxygène dissous 10

1.3.4. La salinité 10

1.3.5. Les matières en suspension 11
1.3.6. La turbidité 11
1.3.7. La transparence 11
1.3.8. La couleur 11
1.3.9. La conductivité électrique 11
1.3.10. Les Solides Totaux Dissous 12
1.4. Quelques paramètres biologiques des eaux de surface 12
1.4.1. La Demande Biologique en Oxygène sur cinq jours 12
1.4.2. La chlorophylle (a) 12
1.5. Les plantes aquatiques et les eaux de surface 14
1.6. Généralités sur la Télédétection 15
1.6.1. Etapes de la mise en œuvre de la télédétection 16
1.6.2. Avantages et inconvénients de la télédétection 17
1.6.3. Caractéristiques des capteurs (satellites) 17
1.6.4. Résolution des images 18
1.6.5. Quelques exemples d'images satellitaires 19
1.7. Revue de littérature sur la surveillance de la chlorophylle (a) à partir des images satellitaires 21
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 26
2.1. Description générale du complexe lac Nokoué-lagune de Porto-Novo 26
2.2. Climat 27
2.3. Réseaux hydrographiques 28
2.4. Type de sols et ressources naturelles 29
2.4.1. Type de Sols 29
2.4.2. Ressources Naturelles 31
2.4.2.1. Flore 31
2.4.2.2. Faune du complexe 32

2.4.2.3. Géologie et nature du fond 32
2.5. Aspects socio-économiques 32
2.5.1. Population 32
2.5.2. Activités économiques 33
2.5.2.1. Agriculture 33
2.5.2.2. La pêche 33
2.5.2.3. Le secteur industriel 34
2.5.2.4. Le commerce 34
2.5.2.5. Exploitation du sable lagunaire 35
CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODES 37
3.1. Matériel utilisé 37
3.1.1. Matériel de terrain 37
3.1.2. Matériel de Laboratoire 38
3.1.3. Traitement des données 39
3.2. Approche méthodologique 39
3.2.1. Recherche documentaire 39
3.2.2. Méthodologie relative à la variation spatiale et temporelle de la chlorophylle (a) dans le complexe 39
3.2.2.1. Méthodes d'échantillonnage d'eau 39
3.2.2.2. Méthode d'analyse de la chlorophylle (a) 41
3.2.3. Méthodologie relative à l'estimation de la concentration en Chl-a à partir des images satellitaires. 43
3.2.3.1. Acquisition d'images satellitaires 43
3.2.3.2. Conception d'un algorithme pour l'estimation des valeurs de Chl-a à partir des images Landsat 8 et Sentinel 2 dans le complexe 43
3.2.4. Validation du modèle et performance 49
Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSION 51

4.1. Variation spatiale et temporelle des valeurs de chlorophylle (a) dans le complexe lagunaire 51

4.1.1. Dynamique spatiale et temporelle de la Chl-a dans le complexe lagunaire 51

4.1.1.1. Statistique descriptive des valeurs obtenues 51

4.1.1.2. Variation spatiale de Chl-a à l'échelle du complexe lagunaire 52

4.1.1.3. Variation temporelle de la Chl-a dans le complexe lagunaire 53

4.1.2. Etat trophique du complexe lagunaire 54

4.1.3. Relation entre la Chl-a et la qualité physico-chimique de l'eau 55

4.2. Estimation de la concentration en chlorophylle (a) à partir des images satellitaires Landsat 8 et Sentinel-2 56

4.2.1. Estimation de la concentration en chlorophylle (a) à partir des images Landsat 8 ..... …56

4.2.2. Estimation de la Chl-a à partir des images Sentinel-2 58

4.2.2.1. Algorithme d'estimation de la Chl-a à partir des images Sentinel-2 58

4.2.3. Test du modèle calibré sur le complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo 60

4.3. Performance du modèle 65

4.4. Discussion 66

CONCLUSION 69

SUGGESTIONS ET PERSPECTIVES 71

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 73

ANNEXES 82

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

Sigle/Acronyme	Définition
CRSES	Comité de Recherche et Sensibilisation d'Eau Secours
Chl-a	Chlorophylle (a)
ESA	European Space Agency
ESE	Erreur Standard d'Estimation
EQMR	Erreur Quadratique Moyenne Relative
INE	Institut National de l'Eau
LHA	Laboratoire d'Hydrologie Appliquée
MSI	Multispectral Instrument
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDCI	Normalized Difference Chlorophyll Index
OLI	Operational Land Imager
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
pH	Potentiel d'Hydrogène
PT	Phosphore Total
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SIG	Système d'Information Géographique
TDS	Total Dissolved Solids

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Structure moléculaire de la chlorophylle (a) 12
Figure 2: Spectres d'absorption des chlorophylles a et b (Bahru, 2022) 13
Figure 3: 1. Plante aquatique ; 2. Spirogyra (algue microscopique) agrandie 640 fois (2a) et 400 fois (2b) ; 3. Agrandissement d'une algue microscopique contenant de la chlorophylle (a) ; 4 et 5 Deux espèces d'algues microscopiques vertes contenant de la chlorophylle a agrandies 400 fois. **Source :** (Laurentides, 2009) 14
Figure 4: Composants élémentaires d'un système de télédétection (Houli & Merrouche, 2017) 16
Figure 5: Le spectre électromagnétique (Pedrocca, 2013) 18
Figure 6: Caractéristiques des bandes spectrales Sentinel-2 (source : https://esamultimedia.esa.int/) 21
Figure 7: Carte de présentation du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo .. 26
Figure 8: Pluie moyenne mensuelle de la station de Cotonou (1990-2017) (Météo Bénin) ... 28
Figure 9: Carte du réseau hydrographique du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo 29
Figure 10: Formations pédologiques autour du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo 30
Figure 11: Evolution de la population autour du complexe (RGPH,1979, 1992, 2002 et 2013) 33
Figure 12: Carte d'échantillonnage de la Zone d'étude 40
Figure 13: Schéma conceptuel du modèle d'estimation de la Chlorophylle (a) à partir des images Landsat et Sentinel (Zinzindohoué,2024) 48
Figure 14: Variation de la concentration en Chl-a au cours des trois mois pour chaque station 52
Figure 15: Valeurs moyennes de la Chl-a dans le complexe lagunaire pour les différentes stations 52
Figure 16: Variation moyenne de la concentration en chlorophylle (a) au cours des trois mois 53
Figure 17: Loi de régression permettant le passage de la valeur de NDCI en chlorophylle (a) 60

Figure 18: Représentation graphique des valeurs observées et des valeurs calculées pour le mois de Septembre 2023 62
Figure 19: Représentation graphique des valeurs observées et des valeurs calculées pour le mois d'Octobre 2023 63
Figure 20 : Représentation graphique des valeurs observées et des valeurs calculées pour le mois de Février 2024 64

LISTE DES PLANCHES

Planche 1: Flore dans le complexe lagunaire (Cliché Zinzindohoué,2023)..... 31
Planche 2: Technique de pêche sur le complexe (Cliché Zinzindohoué, 2023) 34
Planche 3 : Activités commerciales autour du Complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo (Cliché Zinzindohoué, 2023)..... 35
Planche 4: Exploitation du sable au niveau de la lagune de Porto-Novo (Cliché Zinzindohoué, 2023)..... 35
Planche 5: Quelques matériels de terrain (Cliché Zinzindohoué, 2023) ; **a)** : GPS ; **b)** : Bouteille d'échantillonnage 1,5l L remplie ; **c)** : multi paramètre AQUARED ; **d)** : glacière 37
Planche 6: Quelques appareils de mesure au Laboratoire (Cliché Zinzindohoué, 2023) **a)** : pompe de filtration ; **b)** : colorimètre DR 890 ; **c)** : tubes ; **d)** : spectrophotomètre DR 5000. 38
Planche 7: Quelques images prises lors de l'échantillonnage (Cliché Zinzindohoué, 2023).. 41
Planche 8 : Variation spatiale des valeurs de Chl-a 54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les bandes spectrales de Landsat 8 (Pedrocca, 2013) 20
Tableau 2: Performances des algorithmes fréquemment utilisés pour la détermination de la chlorophylle (a) dans les eaux faiblement troubles (Yan et al., 2022) 23
Tableau 3: Les différents algorithmes et les rapports de bande largement utilisés pour l'estimation de la concentration en chlorophylle (a) (Behnaz et al., 2022) 24
Tableau 4: Matériels de terrain 37
Tableau 5: Matériels de laboratoire 38
Tableau 6: Matériels de traitement des données 39
Tableau 7: Notation des différentes absorbances à mesurer (Rodier et al., 2009) 42
Tableau 8: Classification des concentrations en chlorophylle (a) (Klemas, 2011) 43
Tableau 9: Images satellites collectées et campagnes de mesure sur le lac (Sentinel-2A) 45
Tableau 10: Images satellites collectées et campagnes de mesure sur le lac (Landsat 8) 45
Tableau 11 : Recueil des formes d'équations retrouvées dans la littérature (Mishra & Mishra, 2012) 46
Tableau 12: Statistique descriptive des valeurs de chlorophylle (a) obtenues dans le complexe lagunaire 51
Tableau 13 : Matrice de corrélation entre la Chl-a et les paramètres physico-chimiques 56
Tableau 14: Résumé des modèles mathématiques établis pour Landsat 8 57
Tableau 15: Modèles mathématiques et paramètres d'estimation de la Chl-a ou de validation associée 58
Tableau 16 : Valeurs de Chl-a mesurées (27/09 et 29/09/2023) et valeurs de Chl-a calculées image du 27/09/2023 (Sentinel L2A 2-A) 61
Tableau 17: Valeurs de Chl-a mesurées (26/10 et 27/10/2023) et valeurs de Chl-a calculées image du 27/10/2023 (Sentinel L2A 2-A) 62
Tableau 18: Valeurs de Chl-a mesurées (28/02 et 29/02/2024) et valeurs de Chl-a calculées image du 29/02/2023 (Sentinel L2A 2-B) 64
Tableau 19 : Critères de performance du modèle 65

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est le seul composé présent, à l'état naturel, sous ces trois phases : liquide, solide et gazeuse (Merouani & Bouguedah, 2013). Elle est présente partout et constitue la base de la vie (Pedrocca, 2013). En effet, les premières formes de vie se sont développées dans les océans et, encore aujourd'hui, plus de la moitié des espèces animales et végétales vivent dans l'eau (Alvain, 2005). Par ailleurs, comme toutes les autres composantes de l'environnement, l'eau ne peut pas être considérée isolément. Une étendue d'eau peut être un océan, une mer, un lac, un étang, un fleuve, une rivière, un ruisseau ou un canal. (Sossou-Agbo, 2013). Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), l'eau douce ne représente que 2,5% de l'ensemble des eaux qui couvrent notre planète ; une infime partie de cette eau, soit environ 0,0007% est aisément accessible à l'homme dans les cours d'eau, les lacs et les réservoirs (Sossou-Agbo, 2013). Parmi les différentes masses d'eau, les plans d'eau représentent 97,8% des eaux douces superficielles libres dans le monde (Barbe *et al.,*2003). On remarque que les eaux de surface occupent la plus grande partie du globe terrestre. Environ 98% de ces eaux sont des eaux marines. Les 2% restant représentent les eaux douces qui sont les rivières, les lacs, les étangs (Elegbede *et al.,* 2019).

Aujourd'hui, les problèmes environnementaux prennent une place importante dans les différents débats relatifs au développement durable. L'expansion démographique et l'essor économique que connaissent les pays du monde, particulièrement ceux de l'Afrique engendrent des conséquences sur l'environnement. Ainsi les ressources en eau, composante essentielle de l'environnement, sont soumises à une forte pression exercée par les activités anthropiques (agriculture, industrie, élevage, pêche, santé, usages domestiques, etc.) (Adjagodo *et al.,* 2016). De par le monde, les plans d'eau subissent des dommages irréversibles dus à des pollutions de différentes natures, qu'elles soient ponctuelles ou diffuses. L'impact de ces pollutions sur l'état écologique des écosystèmes, peut être significatif. Les altérations chimiques, physiologiques ou comportementales observées chez une espèce ou un groupe d'espèces témoignent d'une modification de la qualité de l'eau au sein de l'écosystème (Tortajada, 2013). La santé d'un écosystème est donc mieux reflétée par les caractéristiques des communautés biologiques (Reyjol *et al.*, 2013). Ces organismes constituent des bioindicateurs de la qualité des eaux et permettent donc d'évaluer la santé des écosystèmes. Parmi ces bioindicateurs figurent les algues.

Il est donc nécessaire de mettre en place des outils de suivis de ces plans d'eaux (Pedrocca, 2013). Pour y arriver, il faut l'évaluation des éléments associés à la présence d'algues tels que les facteurs environnementaux (Pedrocca, 2013).

Les activités humaines constituent la principale source de l'eutrophisation des eaux de surface. La prolifération des plantes aquatiques (algues, cyanobactéries et macrophytes) s'est amplifiée ces dernières décennies avec l'utilisation accrue de fertilisants chimiques en agriculture et par le développement de l'élevage intensif (Mama, 2010). La concentration en Chlorophylle (a) (Chl-a) est un bon descripteur de l'abondance des plantes aquatiques (Ayad, 2017).
En effet, sa détermination permet d'évaluer la composition végétale de l'écosystème.
Au Bénin, les plans d'eau subissent de nombreuses pressions dues aux activités humaines sans qu'il soit possible d'attribuer clairement la responsabilité à divers intervenants, en l'absence d'une politique d'aménagement bien définie. Dans les lacs, les apports massifs de nutriments liés à ces multiples activités ont provoqué très souvent l'eutrophisation, caractérisée par la prolifération des plantes aquatiques (Mama *et al.,* 2011). Ces plantes envahissantes sont à la base du déséquilibre écologique et entrainent la disparition de certaines espèces aquatiques.
Les grands estuaires comme le lac Nokoué et la lagune de Porto-Novo au Bénin sont sous une pression démographique intense. La dynamique hydrologique des plans d'eau, souvent complexe, est couplée à un manque criard de données quantitatives tant au niveau des tributaires que des différents émissaires d'eaux grises. Cela peut en partie s'expliquer par le manque de moyens humains, techniques et financiers que requiert la collecte des données.

Des données prises in-situ de manière ponctuelle ne peuvent pas être considérées comme représentatives de l'ensemble d'une large surface d'eau et donc nous informer sur les variabilités spatiales et temporelles de celle-ci dans son entièreté (Vinel, 2022). Actuellement, la seule façon de prendre des mesures fréquentes de la Chl-a sans contraintes de terrain (finances, temps etc…) est d'utiliser la télédétection (satellite remote sensing).

Pour minimiser les coûts liés à la collecte des données et le temps de collecte qui constituent des défis liés au monitoring de la qualité des eaux d'un plan d'eau, de nombreux produits satellitaires peuvent être utilisés. Par exemple nous avons les images : LANDSAT, SENTINEL MODIS, SEAWIFS, etc.

La plupart des systèmes développés pour surveiller et prédire la biomasse algale se concentrent sur celles qui sont toxiques et en utilisant des données recueillies in situ (Pedrocca, 2013).

Les techniques de télédétection offrent des avantages significatifs par rapport à la surveillance in situ en fonction de la couverture temporelle et spatiale et la réduction des coûts. Étant donné que la Chl-a est un pigment photosynthétique, elle cause des changements distinctifs dans la couleur de l'eau en absorbant et dispersant la lumière du soleil. La concentration en Chl-a peut-être estimée à partir des données spectrales de réflexion captées à distance, et en faisant la relation entre la lumière reflétée dans des longueurs d'onde spécifiques et la concentration de Chl-a (Pedrocca, 2013). En effet, la réflexion des rayons de soleil dans l'eau change d'un environnement à l'autre. Ces changements sont occasionnés par le type d'eau (lacustre, côtière, etc…), les caractéristiques de sa flore et sa faune, de même que le niveau de pollution de l'eau. Pour cela, les modèles qui ont été développés pour une surface (un lac, par exemple) ne fonctionnent pas bien pour d'autres surfaces. Il s'avère alors important de trouver le modèle adapté au lac Nokoué qui est l'un des grands lacs du Bénin, et la lagune de Porto-Novo.

Ainsi se justifie ce sujet de recherche intitulé **« Estimation de la Chlorophylle (a) des eaux du complexe fluvio-lagunaire Lac Nokoué-Lagune de Porto-Novo (Sud-Bénin) à partir d'images satellitaires Landsat et Sentinel ».**

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres : le premier chapitre présente la revue de littérature ; le deuxième chapitre présente la zone d'étude ; le troisième chapitre expose le matériel et les différentes méthodes utilisées et les résultats pertinents auxquels nous avons abouti sont présentés dans le quatrième chapitre.

- **Objectifs de l'étude**

La présente étude vise à estimer la chlorophylle (a) des eaux du complexe lagunaire Lac Nokoué Lagune de Porto-Novo à partir d'images satellitaires Landsat et Sentinel.

De manière spécifique il s'agira de :

- déterminer la variation spatio-temporelle de la chlorophylle (a) dans le lac Nokoué et la lagune de Porto-Novo ;
- évaluer la capacité des images satellitaires Landsat 8 et Sentinel-2 à estimer la concentration en chlorophylle (a) dans les eaux du complexe lagunaire;
- évaluer la performance des algorithmes établis dans l'estimation des concentrations en chlorophylle (a) dans le complexe lagunaire.

- **Hypothèses**

Pour atteindre ces objectifs, les hypothèses suivantes ont été émises :

- la concentration en chlorophylle (a) présente des variations spatio-temporelles significatives dans le lac Nokoué et la lagune de Porto-Novo, influencées par des facteurs environnementaux et saisonniers ;
- les données satellitaires Landsat 8 et Sentinel-2 fournissent des estimations de la concentration en chlorophylle (a) dans les eaux du complexe avec une corrélation significative par rapport aux données in situ ;
- les algorithmes établis démontrent des performances satisfaisantes dans la prédiction de la concentration en chlorophylle (a) dans les eaux du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo, avec des résultats fiables par rapport aux données in situ.

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

Ce chapitre propose un aperçu des principaux concepts de base en relation avec l'eau, la chlorophylle (a) et la télédétection afin de connaitre l'aspect primordial de notre recherche et d'avoir un canevas général de l'ensemble des paramètres de mesures qualitatives de l'eau. Il situe le sujet de recherche dans un contexte plus large de la littérature existante afin de fournir une base solide pour la méthodologie de la recherche.

1.1. Généralités sur l'eau

L'eau, de formule chimique H_2O appelée encore or bleu, est le premier élément naturel vital indispensable à la vie (Kias, 2020). Définie comme une substance sans couleur, ni odeur, ni goût, c'est le seul élément qui peut coexister sous les trois formes physiques : solide, liquide, gazeuse (Zidane, 2019). Si l'on se réfère à l'histoire, l'eau a toujours été la matière première la plus utilisée par l'homme primitif, afin de développer sa vie (Belghiti *et al.*, 2013). De multitudes études sur le sujet ont démontré que l'eau a toujours été considérée comme faisant partie des énergies renouvelables et intégrantes du développement énergétique, de la production, et aussi un élément fondamental du développement économique durable (Liu *et al.,* 2017).

1.1.1. Les eaux atmosphériques

Une quantité immense de vapeur d'eau contenue dans l'air sous forme de gaz se concentre afin d'alimenter l'atmosphère. L'atmosphère représente un réservoir ou une source d'eau issue de l'évaporation des eaux de surface, ainsi que l'évapotranspiration des végétaux chlorophylliens. Ces vapeurs d'eau se régénèrent par leurs intégrations dans le cycle hydrologique afin de garder son équilibre (Zidane, 2019).

1.1.2. Les eaux de mer et les océans

Il est bien connu que la plus grande quantité d'eau sur la terre est présente dans la mer et les océans. Elle recouvre les deux tiers de la surface du globe terrestre. À cause de la salinité extrême, les eaux de mer sont impossibles à consommer. Mais grâce à l'évolution des méthodes et des techniques de dessalement, ces eaux sont de plus en plus consommées (Kias, 2020).

1.1.3. Les eaux souterraines

Ce sont des eaux situées en dessous de la surface du sol. Elles sont présentes dans le sous-sol. La composition de ces eaux dépend de la nature et du mode d'alimentation de la nappe.

Elle y remplit les interstices entre les particules du sol ou encore les crevasses et les fissures du roc. La formation de nappes d'eau souterraine ou « nappes phréatiques » résulte de l'accumulation d'eau infiltrée depuis la surface du sol suite, par exemple, à un épisode de pluie. L'accumulation de réserves souterraines se produit alors que l'eau ainsi infiltrée rencontre une couche géologique imperméable (Touati, 2021).

1.1.4. Les eaux de surface

Les eaux de surface sont des eaux qui circulent ou qui sont emmagasinées à la surface de la Terre. L'eau de surface constitue une ressource non négligeable, voire indispensable à de nombreux usages comme l'irrigation, la production d'eau destinée à la consommation humaine, l'utilisation dans les procédés industriels ou les loisirs (baignade) (Bensiaahmad & Ghalmi, 2013). Elles ont pour origine, soit des nappes profondes dont l'émergence constitue une source de ruisseau, de rivière, soit les eaux de ruissellement (Valiron, 1994). Elles peuvent être produites par le ruissellement généré par les précipitations ou l'affleurement des eaux souterraines. La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux constituent des réservoirs pour le développement des activités microbiennes à cause des déchets rejetés dans le complexe et du contact permanent avec le milieu extérieur.

Elles ont l'avantage de la quantité, mais l'inconvénient majeur d'être fortement chargées en matières en suspension, voire en éléments pathogènes ; ce qui implique des traitements souvent complexes et onéreux pour rendre l'eau potable pour des usages domestiques (PS-Eau, 2012).

Les eaux de surface ne sont consommées directement que dans les milieux ruraux en absence d'adduction d'eau publique ou lorsque les forages sont hors service (Hounsounou, 2013).

1.2. Généralités sur la pollution des eaux de surface

La pollution de l'eau est due à sa contamination par des corps étrangers tels que des microorganismes, des produits chimiques, des déchets industriels ou autres. Ces substances et corps étrangers dégradent la qualité de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités. La pollution des eaux se traduit par des effets très spécifiques dus aux particularités écologiques propres aux milieux aquatiques. L'eau est capable de dissoudre un peu, assez ou beaucoup, mais souvent avec facilité, la plupart des substances chimiques minérales ou organiques.

De plus, elle met en suspension les matières entraînées par le jeu du cycle hydrologique en aval de la source de contamination (Chaouki, 2016). La pollution de l'eau est due majoritairement aux activités anthropiques et à quelques phénomènes naturels.

Ses effets sont multiples et touchent aussi bien la santé publique que les espèces aquatiques et les organismes terrestres (Chaouki, 2016). Nous distinguons plusieurs origines de la pollution.

1.2.1. La pollution d'origine domestique

La pollution d'origine domestique provient des ménages. Elle constitue l'ensemble des eaux vannes (toilettes) et les eaux ménagères et se compose surtout de polluants organiques (matières fécales, urines, graisses, déchets organiques, papier …), microbiologiques (microbes dans les eaux vannes) et chimiques (détergent, savon utilisé) (Chaouki, 2016).

1.2.2. La pollution d'origine industrielle

D'après le Comité de Recherche et Sensibilisation d'Eau Secours (CRSES, 2006), des milliers de produits chimiques différents sont utilisés dans la fabrication des biens de consommation courants. Bien souvent, ces produits chimiques se retrouvent dans l'eau, puis rejetés dans l'environnement après que les eaux aient été traitées. C'est le cas de plusieurs usines manufacturières, métallurgiques et de fabriques de pâtes et de papiers notamment.

1.2.3. La pollution d'origine agricole

La pollution liée à l'agriculture est causée par l'utilisation anarchique d'engrais, de pesticides et d'herbicides ou de fongicides. L'agriculture constitue la première cause des pollutions diffuses des ressources en eau. Les activités agricoles sont, en particulier, largement impliquées dans les apports d'azote et de ses dérivés. Environ 55% d'une surface agricole est classée en zone vulnérable du fait de la pollution par les nitrates.

Dans les régions où les activités agricoles représentent l'activité de base, 92% des points mesure dans les cours d'eau et 70% des points de mesure pour les eaux souterraines sont touchés par les pesticides (Chaouki, 2016).

1.2.4. La pollution d'origine atmosphérique

Une part importante de la pollution des eaux provient de la pollution par voie atmosphérique. Les fumées provenant de l'industrie, des transports ou des maisons peuvent véhiculer un très grand nombre de polluants tels que les hydrocarbures, les métaux lourds, les soufres et le gaz carbonique (responsables notamment des pluies acides) (Woito, 2018). Ainsi sous l'effet des pluies, ces polluants peuvent contaminer le sol, ceci par ruissellement ou infiltration. Ils migrent vers les eaux superficielles et souterraines.

1.2.5. Conséquences de la pollution des eaux de surface

Au sein d'un écosystème, l'action d'un polluant est conditionnée par son interaction avec les facteurs abiotiques et biotiques. Toutefois, l'évaluation de ses conséquences potentielles sur l'ensemble de l'écosystème reste délicate et nécessite de considérer différentes échelles spatio-temporelles afin de mieux cerner l'action de ce polluant sur chaque niveau trophique. Il apparait néanmoins que les désordres initiaux ne touchent qu'un petit nombre d'espèces sensibles aux pollutions pour lesquelles la croissance, le développement voire la reproduction sont principalement affectés (Amoussou, 2020).

Ces impacts peuvent se traduire par une diminution de la densité (abondance) et de la richesse spécifique au sein de l'écosystème. À la suite d'une pollution, une recolonisation du milieu par les espèces opportunistes tolérantes aux pollutions peut également survenir (Ayad, 2017). Enfin, au niveau de l'écosystème, une possible disparition d'espèces, une biodiversité réduite et des modifications de dominances entre les populations sont les principaux impacts qui peuvent survenir et modifier le fonctionnement global de l'écosystème.

Ainsi, la diminution de l'abondance des consommateurs par rapport à celle des producteurs affecte les relations de dominance dans ces peuplements et peut à terme déséquilibrer l'écosystème.

Les conséquences sanitaires sont celles à prendre en compte en priorité. Elles peuvent être liées à l'ingestion d'eau, des poissons, etc…, mais aussi au simple contact avec le milieu aquatique (cas de nombreux parasites). Les germes bactériens et les parasites transmissibles à l'homme, rejetés dans le milieu occasionnent les problèmes sanitaires. Des problèmes d'intoxication graves sont parfois rencontrés pour le bétail (abreuvage en rivière polluée). La conséquence sanitaire d'une pollution est variable dans le temps en fonction de l'usage de l'eau (Woito, 2018).

1.3. Les paramètres physico-chimiques des eaux de surface

L'évaluation de la qualité des eaux de surface s'appuie sur la mesure de certains paramètres physico-chimiques, bactériologiques et autres, qui sont des indicateurs donnant plus ou moins une idée claire sur la qualité de l'eau.

1.3.1. Le potentiel d'hydrogène

Le pH ou le potentiel d'Hydrogène est le logarithme décimal de l'inverse de sa concentration en ion hydrogène (H^+). Il traduit l'acidité, l'alcalinité ou la neutralité d'une eau et mesure l'activité des ions H^+ contenus dans cette eau (Gendronneau, 2006).

Le pH conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. Il est inférieur ou supérieur à 7 suivant que l'eau soit acide ou basique. Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés (Hamouche & Sebai, 2021). Notons que selon Mama *et al.* (2011), le pH moyen varie de 6,6 à 7,5 pour les eaux du fond du lac et de 6,9 à 7,8 pour les eaux de surface du lac. Le pH varie très peu entre le fond du lac et la surface du lac.

1.3.2. La température

Elle est une grandeur physique liée à la notion immédiate de chaud et froid. Elle se mesure au moyen d'un thermomètre ou d'un multi-paramètre. C'est un paramètre physique qui influence considérablement la multiplication microbienne ainsi que le métabolisme. L'évolution de la température dépend du mode d'utilisation de l'eau avant son rejet et surtout le parcours de l'eau avant l'exutoire ou la station d'épuration. En général, l'eau doit être évacuée vers l'environnement à des températures inférieures à 30 °C (Amoussou, 2020).

Une eau plus chaude constitue une pollution (Hamouche & Sebai, 2021). Aussi, la température est un facteur important dans la répartition de la vie végétale dans les eaux courantes. Ces variations ont une grande influence sur la vie aquatique, en particulier sur les phénomènes respiratoires (les eaux froides étant plus riches en oxygène que les eaux chaudes). Ces variations peuvent tuer certaines espèces, mais également elles favorisent le développement d'autres (Valiron, 1994).

1.3.3. L'oxygène dissous

Les concentrations en oxygène dissous constituent avec les valeurs de pH l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère, de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. La teneur en oxygène dissous varie en fonction de la journée ou de la saison, car elle dépend de certains paramètres tels que : la pression partielle de l'atmosphère en oxygène, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriment (Rodier *et al*., 2009).

1.3.4. La salinité

Elle fait référence à la concentration totale de sels dissous dans les eaux (Chouti, 2011). Le sel ainsi dissous modifie les propriétés de l'eau, mais surtout la capacité de l'eau à dissoudre et sa densité. La quantité de sels dissous dans un liquide agit également sur la pression osmique de celle-ci. L'évaluation de la salinité permet de déduire la conductivité d'une eau, elle s'exprime en PSU : Practical Salinity Unit qui équivaut approximativement à 1 mg/L de sel.

1.3.5. Les matières en suspension

Les matières en suspension rencontrées dans les eaux sont très diverses tant par leur nature que par leurs dimensions. Elles sont constituées par du quartz, des argiles, des sels minéraux insolubles et des particules organiques composées de microorganismes et de produits de dégradation animaux ou végétaux (Hamouche & Sebai, 2021). La détermination des matières en suspension dans l'eau s'effectue par filtration ou par centrifugation.

1.3.6. La turbidité

La turbidité constitue l'un des paramètres physiques descriptifs de la colonne d'eau. On entend ici par turbidité, l'obstruction à la pénétration de la lumière dans l'eau. Elle est liée à la masse de ces particules en suspension et sa mesure se fait de manière indirecte, à partir de capteurs acoustiques ou optiques. La turbidité est exprimée en unités normalisées communément appelées Nephelometric Turbidity Unit (NTU) (Degrémont, 2004).

1.3.7. La transparence

Pour une description complète et satisfaisante d'une masse d'eau, la mesure de la transparence du milieu est indispensable, c'est-à-dire la pénétration de la lumière.

La connaissance de ce facteur a une double importance. Il détermine l'intensité lumineuse pénétrant sous la surface, donc l'épaisseur de la couche photosynthétique productive, où s'élabore la matière vivante grâce à la photosynthèse. Il permet également une approche de la quantité de particules en suspension (Bachari, 2009).

1.3.8. La couleur

La couleur est due à la présence des matières organiques dissoutes. Une eau colorée n'est pas agréable pour les usages domestiques, en particulier pour le poisson, car elle provoque toujours un doute sur la potabilité (Rodier *et al.,* 2009).

1.3.9. La conductivité électrique

La conductivité électrique est une expression numérique de l'aptitude d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs, en revanche les composés organiques ne le sont pas (Degrémont, 2004). La conductivité électrique standard s'exprime généralement en millisiemens par mètre (mS/m) à 20°C. La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 µS/cm (Rodier *et al.,* 2009).

1.3.10. Les Solides Totaux Dissous

Les Solides Totaux Dissous (TDS) représentent la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Ils sont composés de sels inorganiques (calcium, magnésium, potassium et sodium) et des carbonates (nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates) ainsi que de quelques matières organiques. Des sources d'eau minérale contiennent de l'eau avec un taux élevé de solides dissous parce qu'elles ont coulées à travers des régions où les roches contiennent beaucoup de sels (Bouchebbah & Ayache, 2011).

1.4. Quelques paramètres biologiques des eaux de surface

1.4.1. La Demande Biologique en Oxygène sur cinq jours

La demande biologique en oxygène sur cinq jours représente la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes pour dégrader la matière organique biodégradable présente dans un échantillon d'eau maintenu à 20 °C, à l'obscurité pendant 5 jours. La mesure de la DBO_5 est faite pour surveiller les rejets (Rodier *et al.,* 2009).

1.4.2. La chlorophylle (a)

La chlorophylle est un pigment qui colore en vert la plupart des feuilles, des végétaux et absorbe la lumière utilisée par la photosynthèse. Dans les milieux aquatiques, les algues possèdent une diversité de pigments dont les plus importants sont les chlorophylles a, b, c1, c2 et d (Bachari, 2009). La formule chimique de la chlorophylle (a) est : $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ (Figure 1).

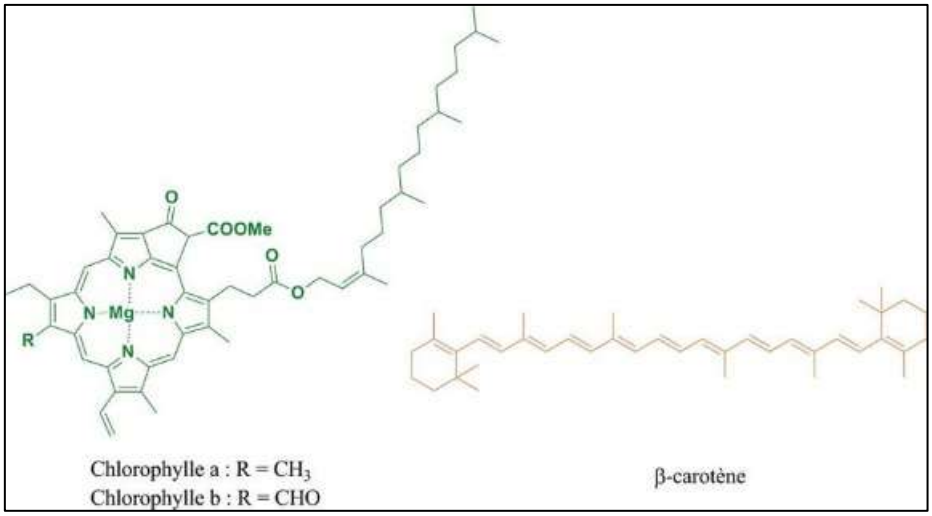


Figure 1: Structure moléculaire de la chlorophylle (a)

(Source *:* www.aquaportail.com)

La chlorophylle (a) est un pigment qui colore en vert la plupart des feuilles des végétaux et absorbe la lumière utilisée par la photosynthèse des algues. Son dosage sert à estimer la biomasse phytoplanctonique du milieu aquatique. Les concentrations en chlorophylle dans les eaux superficielles présentent une variabilité saisonnière ; le développement phytoplanctonique n'est qu'en effet, tributaire de l'énergie lumineuse, de la concentration en sels nutritifs, de la stabilité des masses d'eaux et de l'intensité de la consommation par le zooplancton (Kias, 2020). La chlorophylle (a) absorbe les rayonnements violets et orange-rouge du spectre solaire et réfléchit la lumière verte et jaune (d'où sa couleur). La chlorophylle (a) (Chl-a) représente 75% de la chlorophylle des plantes vertes et est le paramètre le plus couramment pris en compte pour l'évaluation de la biomasse végétale planctonique dans les eaux (ADE, 2022).

La Chl-a présente, en milieu aqueux, deux maximums d'absorption spectrale, aux environs de 430 à 400 nm dans le bleu et de 670 nm dans le rouge, et une plage d'absorption très faible à nulle d'environ 470 à 610 nm, ce qui correspond à toutes les gammes de vert et donne leur couleur dominante aux organismes qui contiennent de la chlorophylle (Figure 2).

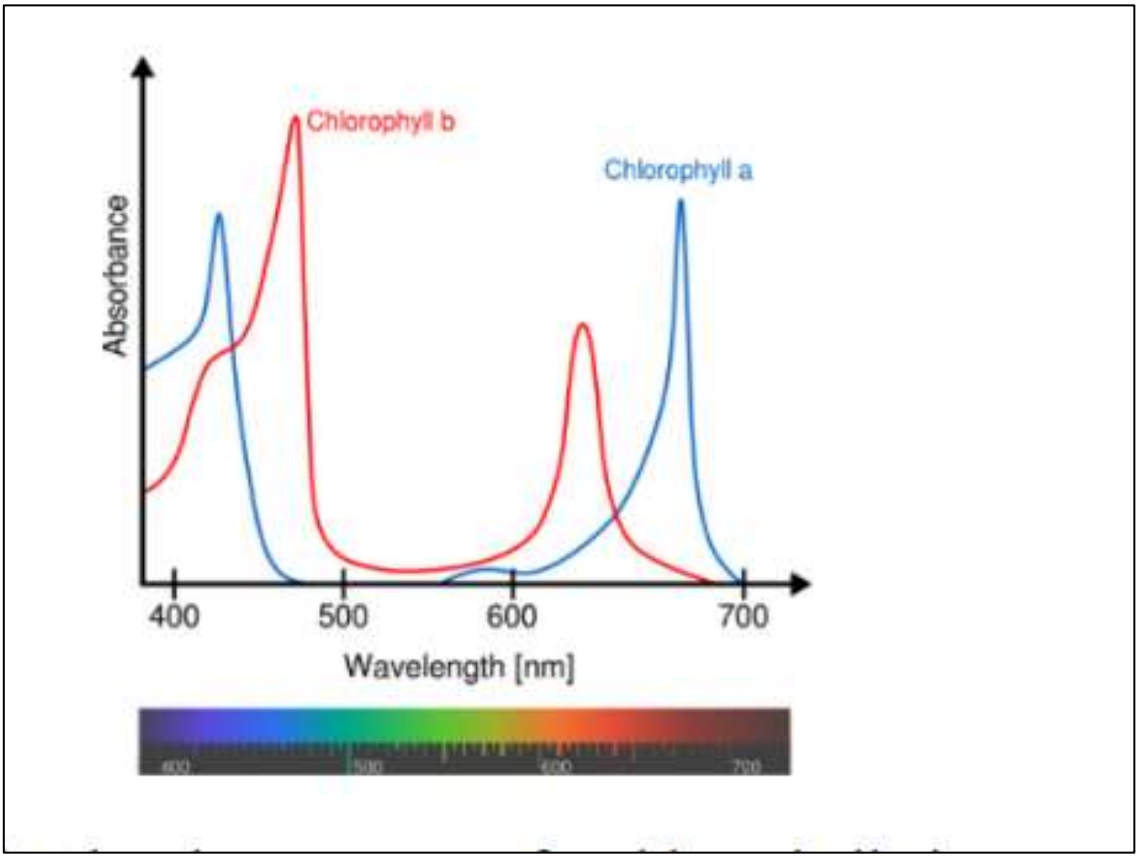


Figure 2: Spectres d'absorption des chlorophylles a et b (Bahru, 2022)

1.5. Les plantes aquatiques et les eaux de surface

Le développement des algues en eau douce est lié à la présence de nutriments (azote et phosphore essentiellement), mais aussi à des conditions de milieu favorisantes. Les croissances algales ont principalement lieu en période chaude ensoleillée. Les retenues sont particulièrement touchées, mais aussi les fleuves et les rivières en période d'étiage. En effet, des temps de séjour longs et un faible renouvellement de l'eau sont propices au développement algal. Les algues se développent essentiellement à la surface des réservoirs. Quand les développements algaux deviennent très importants, on parle de blooms, d'efflorescences ou de fleurs d'eau (Paolini, 2003).

Les proliférations d'algues, allant du phytoplancton microscopique aux grandes algues macroscopiques, se produisent lorsque les conditions de luminosité, de température et de nutriments sont idéales pour la croissance végétale.

Toutes les efflorescences algales ne sont pas nuisibles. En fait, la plupart d'entre elles entretiennent la vie marine, apportant une source de nutriments vitale pour de nombreuses espèces. Quelques fois, cependant, ces colonies d'algues se développent de manière incontrôlable et produisent des toxines qui représentent une grave menace pour la santé humaine.

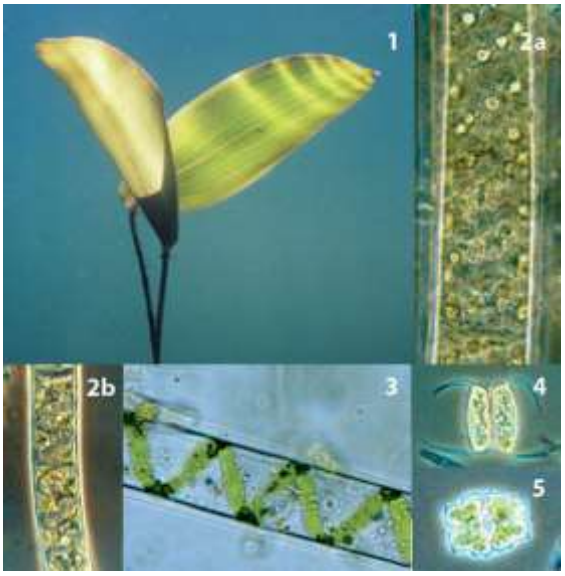


Figure 3: 1. Plante aquatique ; 2. *Spirogyra* (algue microscopique) agrandie 640 fois (2a) et 400 fois (2b) ; 3. Agrandissement d'une algue microscopique contenant de la chlorophylle (a) ; 4 et 5 Deux espèces d'algues microscopiques vertes contenant de la chlorophylle a agrandies 400 fois. **Source :** (Laurentides, 2009)

- **Effet de la prolifération des plantes aquatiques**

- **Effet sur la santé humaine :** la consommation d'organismes aquatiques qui ont ingéré des algues toxiques peut entraîner de graves problèmes de santé. Les symptômes peuvent aller de la nausée et d'une perte de mémoire à une lésion cérébrale et à la paralysie. Dans les cas les plus sévères, la concentration de toxine peut être létale.
- **Effet sur les écosystèmes marins :** les algues sont une source de nutrition importante pour la faune aquatique et sont à la base du cycle alimentaire. Les algues nuisibles perturbent le réseau alimentaire marin, en entraînant l'intoxication et la mort de nombreux mammifères, oiseaux et tortues marins.
- **Effet sur l'économie :** les algues nuisibles entrainent la fermeture de zone d'aquaculture et d'agrément causant d'importantes pertes économiques. Elles entraînent aussi une forte diminution d'activités liées à la pêche, d'activités touristiques et de services connexes. Cela a pour conséquences une augmentation du chômage, des primes d'assurance et des prix des produits aquatiques.

La présence d'algues dans les eaux peut être estimée par les analyses de la chlorophylle (a). En effet, la quantité de chlorophylle(a) est corrélée à la biomasse vivante des organismes photosynthétiques (Rodier *et al.,* 2009).

1.6. Généralités sur la Télédétection

La télédétection (en anglais « remote sensing ») est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images terrestres, obtenues à l'aide des plateformes aéroportées. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté ou l'évènement observé (Weng, 2010). Elle est également définie, comme la technique qui, par l'acquisition d'image, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci.

La télédétection, englobe tous les processus qui consistent à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information (Paolini, 2003). Elle se révèle fort utile dans le domaine de l'observation des eaux, car elle permet de réaliser des mesures sur des surfaces qui peuvent être très étendues, spatialement hétérogènes ou encore rapidement variables dans le temps.

Une observation en continu de ces surfaces est ainsi rendue possible grâce à l'utilisation des données satellitaires récoltées sur la base de différentes longueurs d'onde (Houli & Merrouche, 2017).

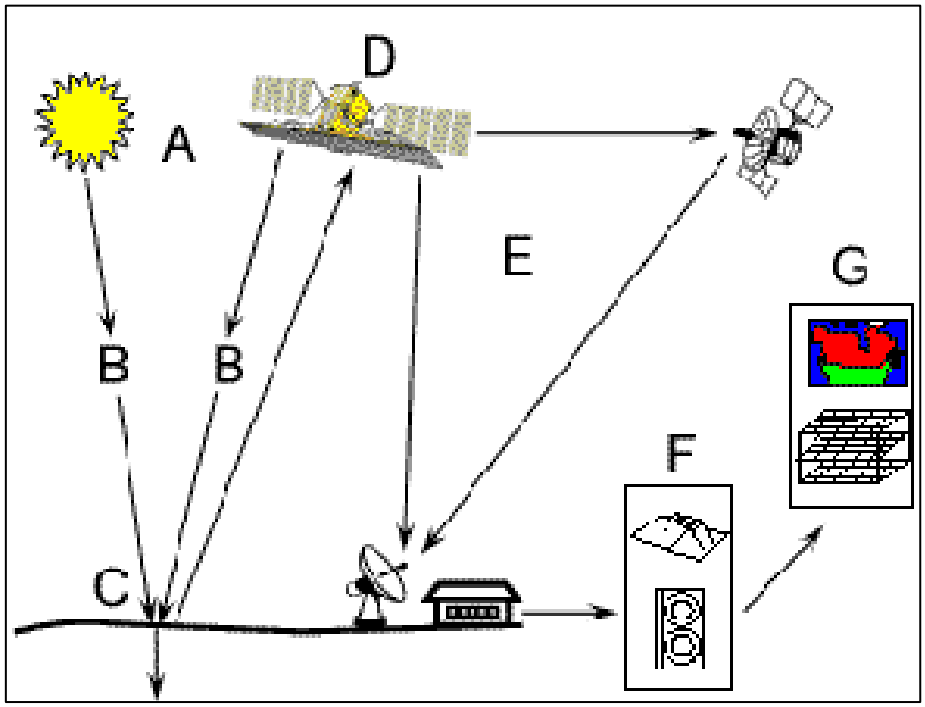


Figure 4: Composants élémentaires d'un système de télédétection (Houli & Merrouche, 2017)

1.6.1. Etapes de la mise en œuvre de la télédétection

La télédétection se résume de la manière suivante (voir Figure 4) :

A. Source d'énergie : il nous faut avoir une source d'énergie pour illuminer la cible. Cette énergie peut être les rayons du soleil eux-mêmes ou elle peut être émise par le dispositif de télédétection (par exemple, dans le cas du radar). On appelle cette énergie le rayonnement ;

B. Interaction avec l'atmosphère : durant son parcours à travers l'atmosphère, l'énergie utilisée pour illuminer la cible interagit avec l'atmosphère, et ce, dans l'aller et le retour. Selon les conditions atmosphériques, il faudra plus tard faire une correction pour composer les altérations introduites par l'interaction avec l'atmosphère ;

C. Interaction avec la cible : une fois l'énergie arrivée à la cible, elle interagit avec celle-ci. L'énergie peut être reflétée vers le capteur (satellite) ou pourrait être réfractée (dans le cas des lacs et rivières). Cela dépend toujours de la nature de la cible ainsi que de l'angle d'incidence du rayonnement.

D. Télédétection : le rayonnement de retour émis par la cible revient aux capteurs à distance et est enregistré ;

E. Transmission des données : les données enregistrées par les capteurs sont transmises à des stations de réception où l'information est transformée en image ;

F. Interprétation et analyse : une interprétation visuelle ou numérique de l'image est faite pour obtenir des informations que l'on désire obtenir de la cible. Dans cette partie du processus, on fait aussi des corrections aux images, par exemple, des corrections atmosphériques ou par rapport à l'angle du satellite ;

G. Application : une fois les images obtenues, on utilise cette information pour mieux comprendre la cible ou pour résoudre un problème particulier (Houli & Merrouche, 2017).

1.6.2. Avantages et inconvénients de la télédétection

- **Avantages**

- Couverture globale et périodique sur de vastes zones de la Terre ;
- Observation multi-échelle ;
- Information sur les régions non visibles du spectre ;
- Traitement numérique des images ;
- Réalisation pour un faible coût des enquêtes rapides sur de grandes surfaces ;
- Accès à des renseignements impossibles à obtenir par d'autres méthodes ;
- Suivre l'évolution des phénomènes biologiques grâce à la possibilité d'utiliser des données multi-temporelles, fournies en particulier, par des satellites d'observation de la Terre (Kias, 2020).

- **Inconvénient**s

- Impossibilité d'obtenir des modèles avec grande précision en comparaison avec les observations in situ ou de photographie aérienne ;
- Couverture nuageuse abondante lors des périodes de pluie ce qui rend les images inexploitables (Kias, 2020).

1.6.3. Caractéristiques des capteurs (satellites)

Chaque capteur satellite possède ses propres caractéristiques en fonction des surveillances qu'il est destiné à réaliser. Une première distinction se trouve au niveau du type de capteur choisi pour l'observation des paramètres de qualité de l'eau. Les deux types de capteurs satellites sont les **capteurs passifs et les capteurs actifs.**

- Les capteurs passifs : ils détectent l'énergie lumineuse réfléchie sur la surface observée.

Les capteurs passifs sont fortement utilisés pour observer l'eau, par exemple afin d'observer la couleur de l'eau grâce aux longueurs d'ondes dans le visible ou encore pour détecter la température de l'eau grâce aux mesures dans l'infrarouge. Les données sont collectées en tout temps et à chaque moment de la journée (Kias, 2020).

- Les capteurs actifs : ils ont la particularité d'émettre un signal et d'en mesurer le signal de retour. Ces capteurs utilisent alors des signaux radar, sonar ou lidar pour réaliser les mesures (Olmanson *et al.,* 2015). Les capteurs actifs sont préférentiellement utilisés pour observer différents paramètres parmi lesquels la topographie des océans, les courants de surface des mers ou encore les pollutions de pétrole (Hafeez *et al.,* 2018).

Différentes résolutions sont également à prendre en compte lorsque l'on observe des images satellitaires. Celles-ci sont dépendantes de la configuration de l'orbite du satellite ainsi que du capteur choisi pour l'observation. Ces résolutions vont influencer la précision et la fréquence des données recueillies.

1.6.4. Résolution des images

Il y a plusieurs façons de définir la résolution d'une image satellite :

- **Résolution spatiale :** la résolution spatiale donne la relation entre la taille de la surface et chaque pixel de l'image. Par exemple, si on dit qu'un capteur a une résolution spatiale de 20 m, ceci veut dire que chaque pixel de l'image représente une aire de 20 m x 20 m (Pedrocca, 2013).
- **Résolution spectrale :** la résolution spectrale définit la capacité d'un capteur de percevoir des bandes différentes dans le spectre électromagnétique. En effet, on peut diviser le spectre électromagnétique en plusieurs régions, aussi appelées bandes, tel qu'illustre la figure ci-dessous ; ces bandes vont des micro-ondes, passant par l'infrarouge, vers la partie visible du spectre (rouge, vert, bleu) jusqu'à l'ultraviolet.

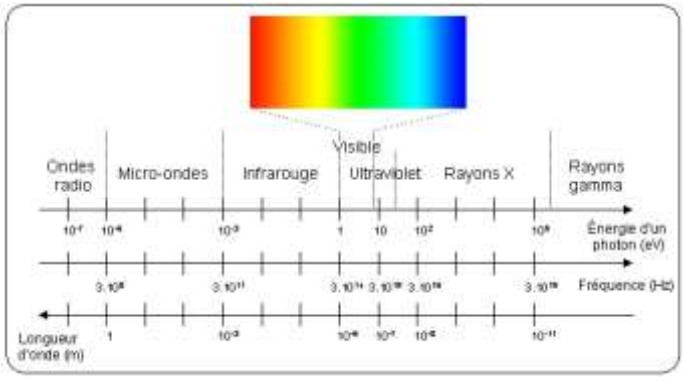


Figure 5: Le spectre électromagnétique (Pedrocca, 2013)

Chaque classe d'objet (l'eau, la végétation, les roches) a une réponse différente en termes de longueur d'onde ; pour faire une classification plus détaillée du type d'objet, une résolution spectrale élevée s'impose.

- **Résolution radiométrique :** la résolution radiométrique est la capacité d'un capteur à détecter des variations d'amplitude (c'est-à-dire intensité) du signal capté. Cette résolution est toujours exprimée en puissance de deux (2n). Si un capteur a une résolution radiométrique de 4 bits, il peut détecter 24=16 échelons d'intensité et ainsi de suite (Pedrocca, 2013).
- **Résolution temporelle :** la résolution temporelle est l'intervalle qui s'écoule entre les prises d'images d'une aire déterminée. En effet, la période de revisite d'un satellite peut comprendre plusieurs jours (c'est-à dire pour qu'un satellite survole la même aire, entre 1 et 5 jours peuvent s'écouler).

1.6.5. Quelques exemples d'images satellitaires

Les images satellitaires ou images de télédétection sont des images prises à partir d'une lune artificielle (un satellite) qui orbite bien au-dessus de la Terre (Houli & Merrouche, 2017).
Un satellite est un engin construit par l'homme et placé en orbite (trajectoire effectuée par un satellite autour de la Terre et choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et de l'objectif de la mission) autour d'un astre, en particulier la Terre, à l'aide d'une fusée ou d'un système de transport spatial. Apparus pour des motifs politiques, de nos jours les satellites sont devenus des outils nécessaires pour la science, la défense, la télécommunication et pour des applications telles que la prévision du temps, la lutte contre la pollution des eaux, etc… (Brahim & Nebih, 2020). Comme exemple d'image satellitaire nous avons : les images LANDSAT, MODIS, SENTINEL, MERIS, SEAWIFS, SPOT, etc…

- **LANDSAT 8**

Les satellites Landsat font l'acquisition d'information sur la Terre depuis 1972 (Larose, 2014). Landsat est un satellite héliosynchrone qui enregistre l'énergie solaire réfléchie, dont l'orbite repasse tous les 18 jours à la verticale d'un même lieu. Les données sont transférées sur bandes analogiques dont on obtient des images photographiées. Ces mêmes données sont transférées sur bandes numériques utilisables par l'intermédiaire de calculateurs électroniques (Houli & Merrouche, 2017).
Le satellite Landsat 8 portant le capteur OLI (Operational Land Imager) lancé en Février 2013, offre une radiométrie améliorée (16-bits) qui est adaptée à l'étude des lacs.

Chaque bande spectrale de l'image Landsat 8 possède une information qui lui est propre et donc complémentaire avec les autres bandes (Tableau 1).

Tableau 1: Les bandes spectrales de Landsat 8 (Pedrocca, 2013)

Nombre de bandes	Région EM	La Range spectral en micromètres	Résolution (m)
Bande 1	Aérosol	0.43-0.45	30
Bande 2	Bleu	0.45-0.51	30
Bande 3	Vert	0.53-0.59	30
Bande 4	Rouge	0.60-0.67	30
Bande 5	Proche Infrarouge	0.64-0.67	30
Bande 6	Moyen infrarouge 1	0.85-0.88	30
Bande 7	Moyen infrarouge -1	1.57-1.65	30
Bande 8	Panchromatique	2.11-2.29	15
Bande 9	Cirus	0.50-0.68	30
Bande 10	Infrarouge thermique (tirs-1)	10.60-11.19	100
Bande 11	Infrarouge thermique (tirs-2)	11.50-12.51	100

- **SENTINEL-2**

Bien que non conçu pour les applications aquatiques, le satellite de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) Sentinel-2 (S2) avec à son bord l'Instrument Multispectral (MSI) apporte une amélioration par rapport aux précédentes générations de capteurs utilisés pour la surveillance des constituants des eaux de surfaces. Lancés en 2016 pour Sentinel-2A et en 2018 pour Sentine-2B, leurs performances ont été démontrées à plusieurs reprises lors d'études menées sur les lacs, les eaux côtières et certaines rivières. MSI offre des images à haute résolution spatiale (10-60 m) avec une fréquence de revisite de cinq jours à l'équateur. MSI est muni de 13 bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge (Figure 6) (Dagnelie, 2020). Les données satellites SENTINEL-2 sont envoyées à la base d'enregistrement de la mission Copernicus automatiquement que les images sont prises par les satellites. De la base d'enregistrement, elles sont directement mises en ligne, disponibles et téléchargeables gratuitement via le site officiel de Copernicus Open Acess Hub (https://dataspace.copernicus.eu). La mission Sentinel-2 fait partie du programme d'observation de la Terre Copernicus, porté par la Commission Européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ESA) depuis 2014.

Elle a pour objectif de fournir des images multispectrales haute résolution régulièrement actualisées par l'agence, contribuant ainsi aux services de Copernicus classés en six thèmes : gestion du territoire, environnement marin, atmosphère, intervention d'urgence, sécurité et changement climatique.

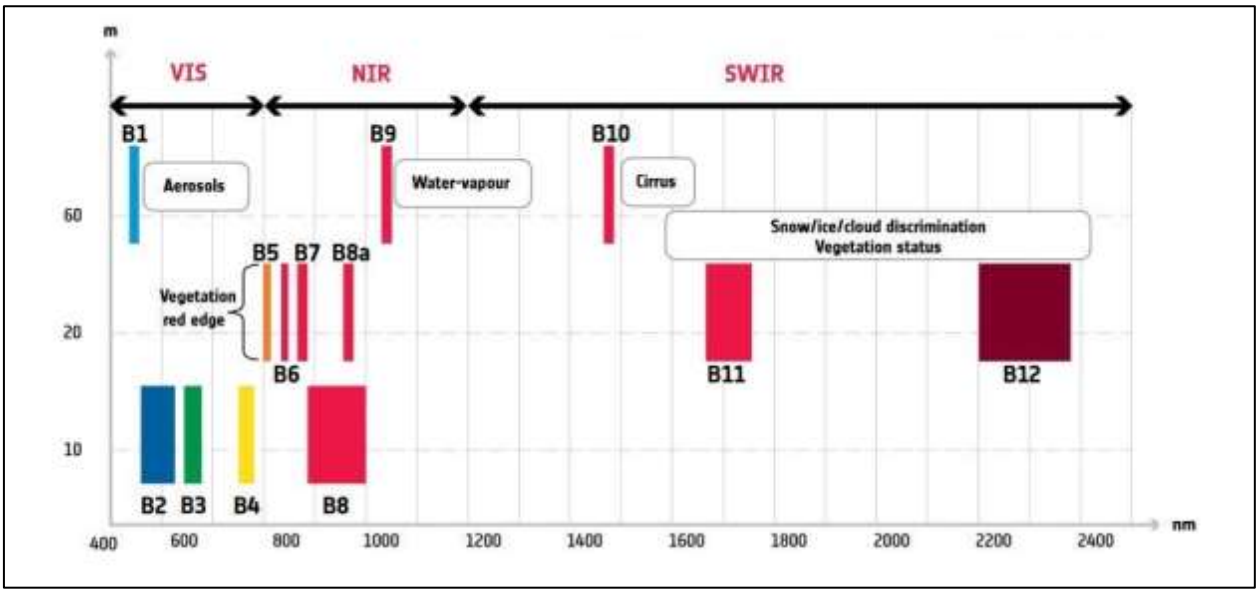


Figure 6: Caractéristiques des bandes spectrales Sentinel-2 (source : https://esamultimedia.esa.int/)

1.7. Revue de littérature sur la surveillance de la chlorophylle (a) à partir des images satellitaires

L'occurrence et l'intensité de l'extension des plantes aquatiques, ont connu un développement important au cours des dernières années dans les plans d'eau douces partout sur la planète (El Alem, 2014). Bien que ces microorganismes aient toujours fait partie intégrante des écosystèmes aquatiques, leur prolifération reflètent un état avancé d'eutrophisation et causent divers dommages variant d'une simple perturbation à un déséquilibre plus sérieux et une réduction des services rendus par ces écosystèmes (El Alem, 2014). Le moyen le plus utilisé actuellement pour évaluer la présence de ces plantes est l'échantillonnage in-situ. Toutefois, ce processus de surveillance, laborieux et coûteux, demeure limité dans le temps et dans l'espace. Les techniques de télédétection à distance offrent des avantages significatifs par rapport à la surveillance in-situ en fonction de la couverture temporelle, spatiale et la réduction des coûts (Pedrocca, 2013).

Les multiples combinaisons possibles entre les propriétés optiques de l'eau et les particules en suspension dans l'eau permettent d'estimer les concentrations des diverses composantes de l'eau et d'identifier la nature de la pollution (Houli & Merrouche, 2017).

L'activité bio-optique de la chlorophylle (a), est caractérisée par une signature spectrale typique détectable par les capteurs satellitaires. L'estimation des concentrations en chlorophylle (a) dans l'eau est réalisée à l'aide d'algorithmes bio-optiques. Ces algorithmes sont basés sur des relations empiriques permettant de relier les réflectances perçues par les capteurs avec des concentrations en Chl-a présentes dans l'eau (Vinel, 2022). La chlorophylle (a) peut-être observée à l'aide des bandes de longueurs d'ondes dans le visible telles que le vert (490-573 nm) et le bleu (466-490nm). La chlorophylle (a) étant un pigment vert, elle va exercer une influence sur la couleur de l'eau (Vinel, 2022).

Dans divers pays, plusieurs auteurs ont développé des algorithmes dans le but d'estimer la concentration en chlorophylle (a) dans les eaux marines et les eaux douces. Ainsi nous distinguons les algorithmes semi-analytiques et les algorithmes empiriques. Les algorithmes semi-analytiques sont basés sur un certain nombre de paramètres physiques de l'eau, comme la réflectance, le coefficient d'absorption non particulaire ou encore le coefficient de rétrodiffusion, et nécessitent donc d'effectuer de nombreuses mesures in situ (Rintz, 2020).

Les algorithmes empiriques sont quant à eux établis par régression de la turbidité/chlorophylle (a) en fonction de la réflectance de l'eau, en sélectionnant la meilleure équation de régression selon certains critères (R^2 proche de 1, faible RMSE, …).

Cela nécessite donc moins de paramètres à mesurer (Rintz, 2020). Les approches empiriques sont les plus utilisées avec succès au niveau des masses d'eau intérieure (Sélima, 2014).

Tableau 2: Performances des algorithmes fréquemment utilisés pour la détermination de la chlorophylle (a) dans les eaux faiblement troubles (Yan *et al.,* 2022)

Combinaison de bande	Modèle	Référence	Indices spectral	R^2	R^2(log)	MRD (%)	URMSD (%)	MedRatio
Bleu-Vert	OC3	O'Reilly et Werdell,2019	Max (Rrs (443), Rrs (488)) /Rrs (547)	0.47	0.73	30.27	32.66	0.98
Vert-Rouge	GR2	Le *et al.,*2013	Rrs (667) /Rrs (547)	0.14	0.20	45.04	51.17	1.
Rouge-Proche Infrarouge	RN3	Gitelson *et al.*, 2008	(1/Rrs (665) - 1/Rrs (678)) x Rrs (748)	0.06	0.12	57.93	59.63	1.41
CI	CI	Hu *et al*., 2012	BL (443,555,667) *	0.10	0.47	47.19	50.13	0.97
FLH	FLH	Letelier et Abbott,1996	BL (667,678,748)	0.23	0.51	51.80	49.86	1.33
MCI	MCI	McCullough,2007	BL (645,748,859)	0.04	0.19	58.23	58.49	1.36
SCI	SCI	Shen *et al*.,2010	SCI (555, 645, 667, 678) **	0.00	0.05	61.13	59.26	1.41
Modèle Semi analytique	QAA	Lee *et al*.,2002		0.47	0.38	43.49	45.77	1.38

*BL (b1, b2, b3) indique Rrs, b2-(Rrs, b1+(b2-b1) /(b3-b1) x (Rrs, b3-Rrs, b1)

**SCI (b1, b2, b3, b4) indique -BL (b4, b3, b2) -BL (b4, b2, b1)

Tableau 3: Les différents algorithmes et les rapports de bande largement utilisés pour l'estimation de la concentration en chlorophylle (a) (Behnaz *et al.,* 2022)

Satellite	Algorithmes	Références
Landsat 8	$\frac{b5}{b4}$	Buma&Lee,2020 ; Ha *et al.,*2017 ; Mishra&Mishra,2012
	$NDCI = \frac{(b4 - b3)}{(b4 + b3)}$	Shi *et al*., 2022 ; Buma&Lee,2020 ; Ha *et al*., 2017 ; Mishra&Mishra,2012
	$\frac{b3}{b4}$	Buma&Lee,2020 ; Vinh *et al.,* 2019 ; Ha *et al.,* 2017 ; Mishra&Mishra,2012
Sentinel-2	$\frac{b5}{b4}$	Toth *et al.,*2021 ; Buma&Lee,2020 ; Ha *et al.,*2017 ; Mishra&Mishra,2012
	$NDCI = \frac{(b5 - b4)}{(b5 + b4)}$	Shi *et al.,* 2022 ; Toth *et al.,*2021 ; Buma&Lee,2020 ; Ha *et al.,* 2017 ; Mishra&Mishra,2012
	$3BAND = (\frac{1}{b4} - \frac{1}{b5}) \times$ b8a	Shi *et al.,*2022 ; Toth *et al*.,2021 ; Buma&Lee,2020 ; Ha *et al*.,2017 ; Mishra&Mishra,2012

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. Description générale du complexe lac Nokoué-lagune de Porto-Novo

Situés au Sud-Est du Bénin (6°25'N, 2°36 E), le lac Nokoué et la lagune de Porto-Novo (environ 180 km^2 pour l'ensemble en période d'étiage) forment la plus importante superficie d'eaux saumâtres du Bénin (Gnohossou, 2006). La figure 7 présente la carte de localisation du complexe.

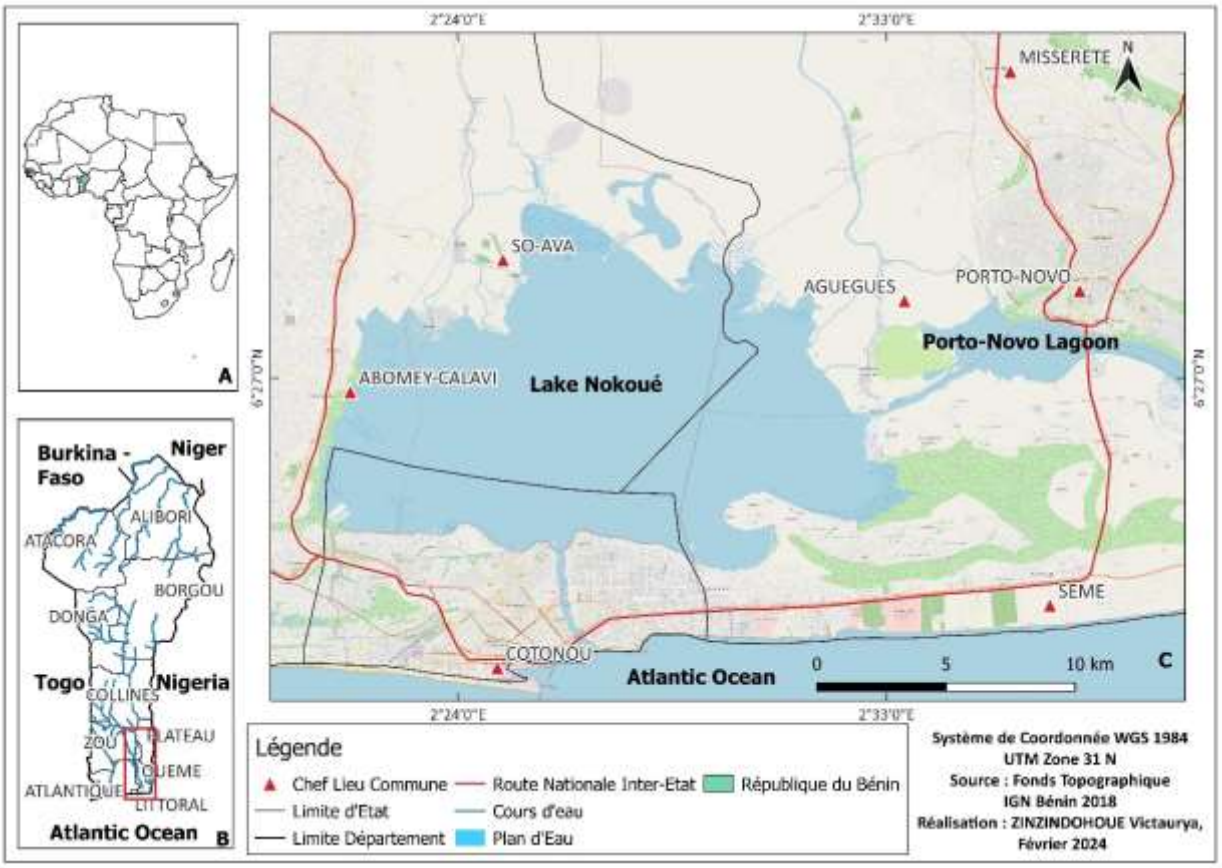


Figure 7: Carte de présentation du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo

Le lac Nokoué, le plus grand lac du Bénin, couvre une superficie de 150 km^2 à l'étiage. Situé au Sud-Est du pays, il est compris entre les parallèles 6°20' et 6°30' Nord et les méridiens 2°20' et 2°35' Est. 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, a une longueur moyenne de 20 km dans sa direction Est-Ouest et une largeur de 11 km dans sa direction Nord-Sud (Dovonou *et al.*, 2011). La profondeur moyenne du lac est de 1,5 m. La bathymétrie du lac montre des valeurs caractéristiques des lacs peu profonds.
La lagune de Porto-Novo est située au Sud-Est du Bénin (6°25'N, 2°36 E) plus précisément au Sud-Ouest de la ville de Porto-Novo, au Sud-Est des Aguégués et Dénou, à l'Est du lac Nokoué et au Nord de la plaine littorale (Chouti, 2011). La lagune de Porto-Novo, est moins étendue que le lac Nokoué (35 km^2 en période de basses eaux et 50 km^2 en période de hautes eaux) et constitue l'exutoire par lequel les eaux du fleuve Ouémé se jettent dans l'Océan par le chenal de Lagos (Dovonou *et al.,* 2011). Longue de 17 km et large de 1 à 4 km, la lagune de Porto-Novo est à l'image de ces cours d'eau, lacs et lagunes de certaines grandes villes de l'Afrique de l'Ouest dans lesquels se déversent presque toutes les eaux usées de la ville. Les eaux de ruissellement constituent une source de pollution non négligeable (PDM, 2021-2026). C'est l'une des principales voies de transport des produits du secteur informel et du commerce illicite. Plusieurs canaux d'infiltration et de refuge la sillonnent de part et d'autre des rives dans les environs de la frontière bénino-nigériane (Sossou-Agbo, 2013).

2.2. Climat

Le climat est l'ensemble des valeurs moyennes des éléments météorologiques en un endroit donné, durant un intervalle de temps déterminé. Cette notion est basée sur des éléments tels que : la température, les précipitations, l'humidité relative, l'insolation (rayonnement solaire) et les vents (Amoussou, 2020).

Le complexe bénéficie d'un climat subéquatorial (un climat tropical humide particulier appelé climat sous-équatorial) caractéristique du Sud-Bénin : deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses (Agbohessi *et al.,* 2023). Les deux saisons sèches vont de mi-novembre à mi-mars et de mi-juillet à mi-septembre.
Les deux saisons humides vont de mi-mars à mi-juillet et mi-septembre à mi-novembre (PDM, 2021-2026).
L'humidité est importante (75%) et les températures varient entre 21,9°C et 32,8°C (PDM, 2021-2026). Notons que le climat est un facteur qui influence indirectement la concentration en Chl-a dans un écosystème aquatique ; ceci en fonction des hauteurs de pluies. La figure 8 présente la pluie moyenne mensuelle de la station de Cotonou (1990-2017).

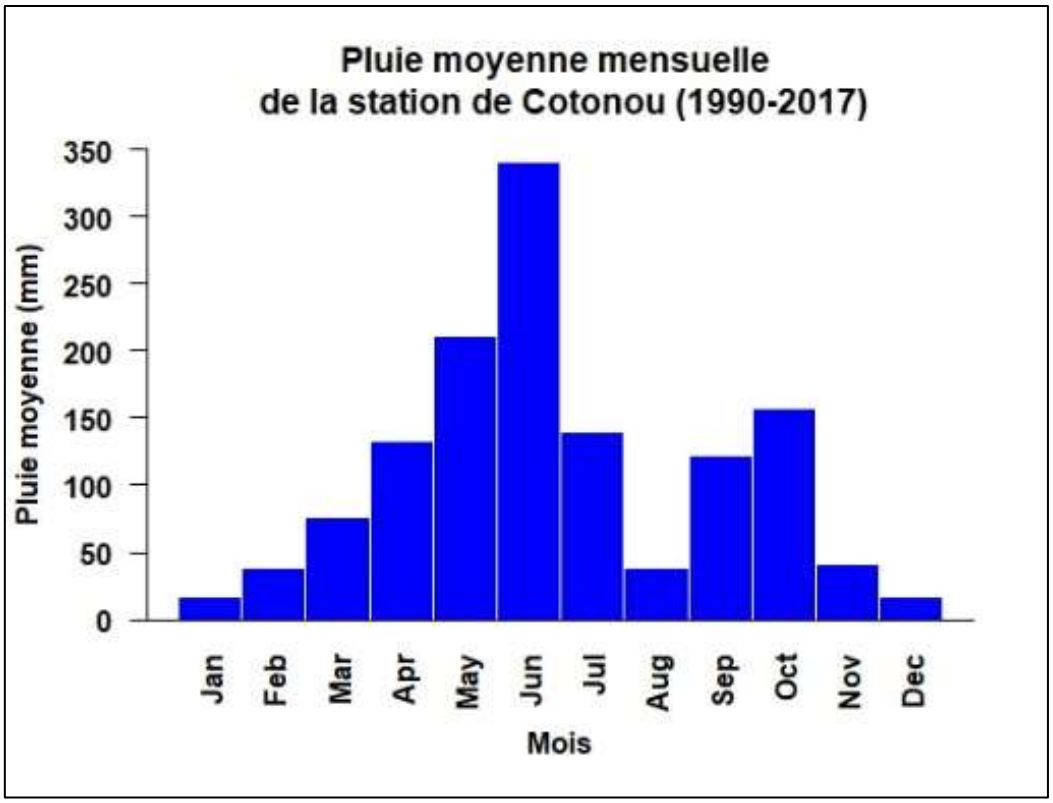


Figure 8: Pluie moyenne mensuelle de la station de Cotonou (1990-2017) (Météo Bénin)

2.3. Réseaux hydrographiques

Les principaux tributaires du lac Nokoué sont :

- le fleuve Ouémé, de bassin versant 46500 km^2 et de longueur 523 km, traverse le pays du Nord au Sud. Il est, en termes d'apport d'eau douce, largement sous l'influence de la pluviométrie de son bassin supérieur (Ouémé supérieur) ;
- la rivière Sô, de bassin versant 1000 km^2 et de longueur 70 km est connectée au fleuve Ouémé en hautes eaux et entretient un bon niveau de débit en saison sèche ;
- le chenal de Cotonou de longueur 4,5 km, de largeur 300 m. Il est le tributaire d'eau de mer du lac Nokoué (Mama *et al.,* 2011).

La lagune de Porto-Novo constitue l'un des exutoires par lequel les eaux du fleuve Ouémé se jettent dans l'Océan par le chenal de Lagos.

Elle est caractérisée par deux types d'apports : un apport d'eaux douces par le fleuve Ouémé, qui prend sa source au Nord Bénin, par quelques rivières ainsi que quelques sources de la nappe phréatique du plateau et un apport d'eau salée provenant du lac Nokoué voisin, qui communique avec le l'Océan par le chenal de Cotonou (Figure 9) (Chouti, 2011).

Ces tributaires sont intrinsèquement liés à la variation de la concentration en Chl-a dans le milieu aquatique de par l'augmentation de la hauteur limnimétrique de ces derniers.

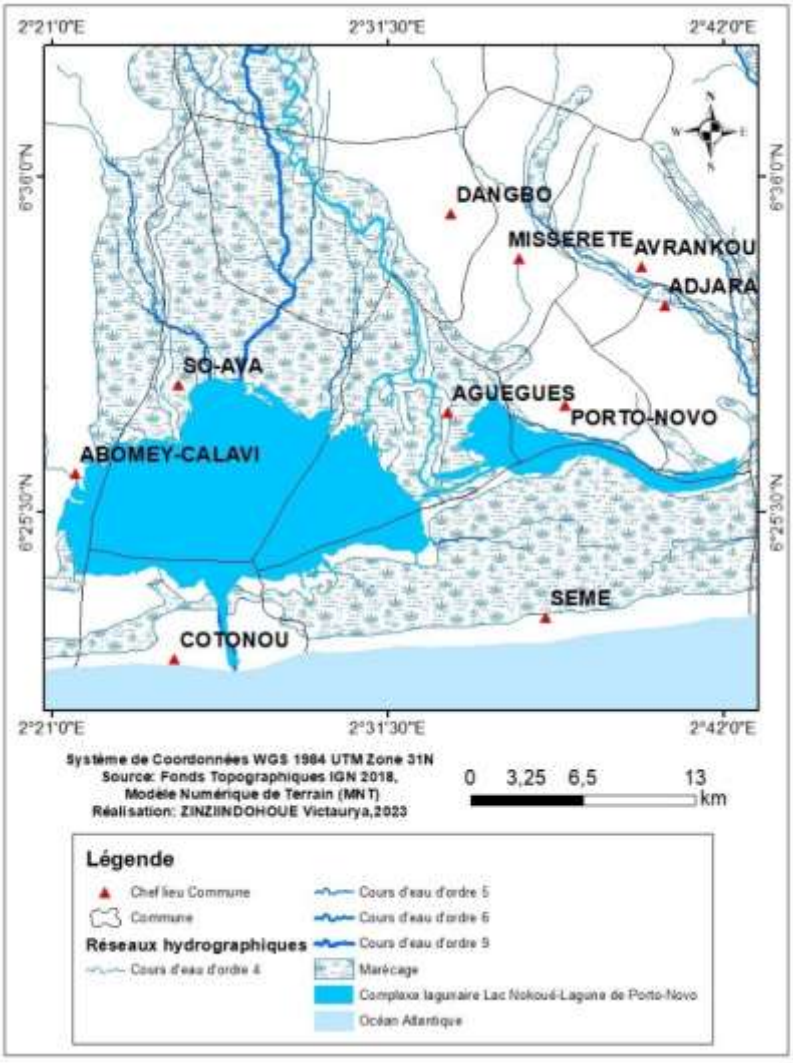


Figure 9: Carte du réseau hydrographique du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo

2.4. Type de sols et ressources naturelles

2.4.1. Type de Sols

D'après la carte pédologique du complexe, nous pouvons dire que le complexe est entouré de sols ferrallitiques et sols peu évolués. Mais les types de sols qui sont très proches du complexe sont les sols hydromorphes et par endroits les sols ferrugineux tropicaux (voir Figure 10).

Les sols ferrallitiques sont issus des sédiments meubles argilo-sableux du Continental Terminal (Terre de barre) et des grès sur sédiments du Crétacé. Relativement fertiles, ils sont très sensibles à l'érosion, riches en fer et perméables.

Les milieux étant aujourd'hui très anthropisés du fait de la forte pression démographique foncière, ces sols sont caractérisés par une altération très poussée des minéraux primaires (Amoussou, 2020). Les propriétés des sols hydromorphes dépendent de leur position topographique. Ce sont des vertisols lithomorphes grumosoliques modaux ou de sols noirs montmorillonitiques, très fertiles, développés sur les formations argileuses, marneuses ou calcaires du Paléocène et de l'Eocène. Imperméables, plus ou moins asphyxiants, mais très fertiles, ils sont engorgés d'eau en période pluvieuse (Amoussou, 2020). Les types de sols autour du complexe sont présentés dans la figure 10 ci-dessous.

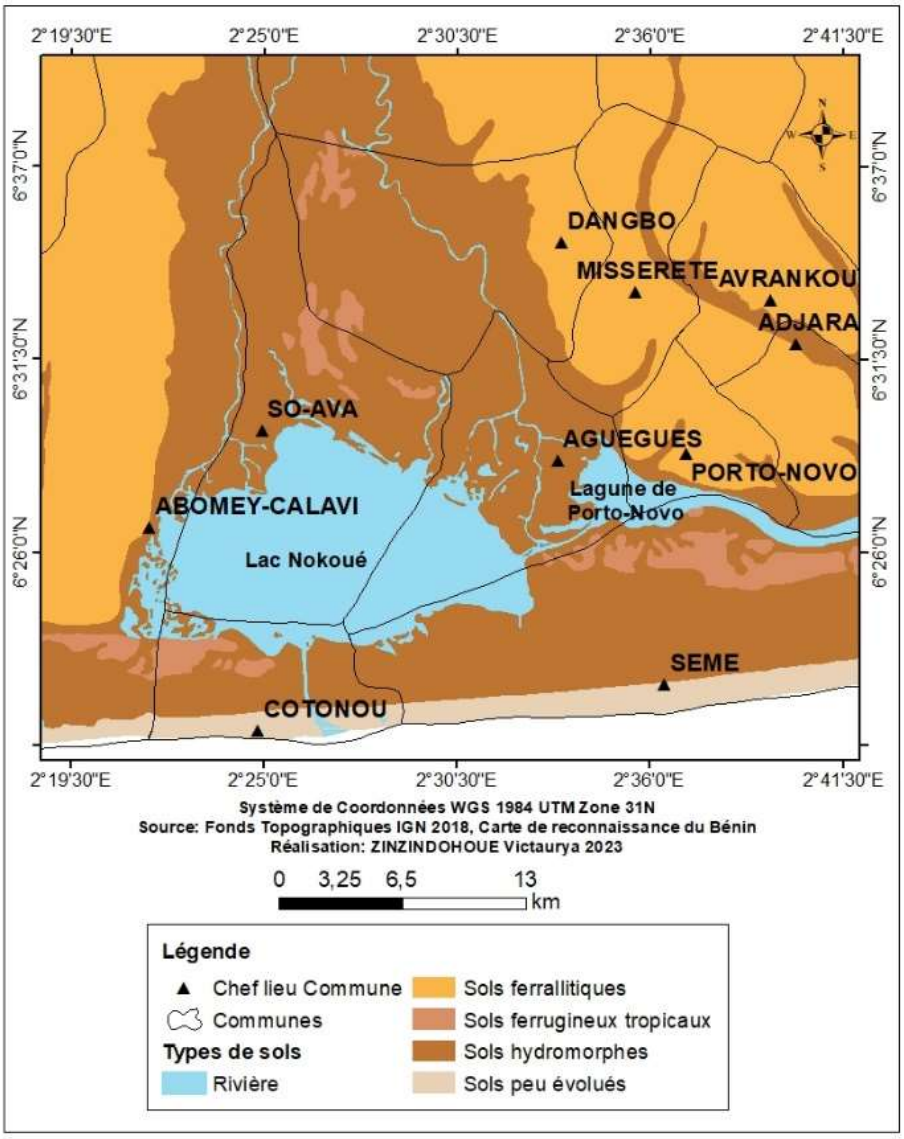


Figure 10: Formations pédologiques autour du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo

2.4.2. Ressources Naturelles

2.4.2.1. Flore

D'après les travaux de (Paradis, 1976), le système lagunaire oriental béninois (Lac Nokoué et Lagune de Porto-Novo) était entouré d'une forêt marécageuse d'eau douce jusqu'à la création du chenal de Cotonou en 1885.

La végétation s'est alors adaptée à ces eaux devenues peu à peu saumâtres, s'accompagnant classiquement d'une baisse de la variété spécifique des peuplements.

On distingue actuellement deux principaux types de végétation répartis en fonction du régime hydrologique des différentes régions des plans d'eau lagunaires : une végétation des rives saumâtres constituée de Paspalum vaginatum et de jacinthe d'eau et une végétation d'eau douce telles que Echinochloa pyramidalis, Vetiveria nigritana, Phragmites australis, Vossa cuspidita, Sesbania pubescens et Mitragyna ciliata. En période de crue, une végétation continentale flottante à Pistia stratiotes (Aracé), Aspilia africana, Ipomea aquatica et Nymphaea lotus se rencontre tout au long des bras deltaïques et du chenal de Totchè, jusqu'à la remontée de la salinité d'étiage (Lawani, 2013).

La diversité et la densité de la flore sont fonction de l'alternance des saisons qui entraine la diminution et l'augmentation alternées de la salinité. Cette dernière conditionne elle aussi l'apparition ou la disparition de la jacinthe d'eau. En effet, en période de crue, la diminution de la salinité entraine un développement de la jacinthe d'eau qui envahit le plan d'eau causant aux pêcheurs des difficultés pour la pêche et pour la navigation (Mama, 2010). La planche 1 présente quelques images de la flore dans le complexe.

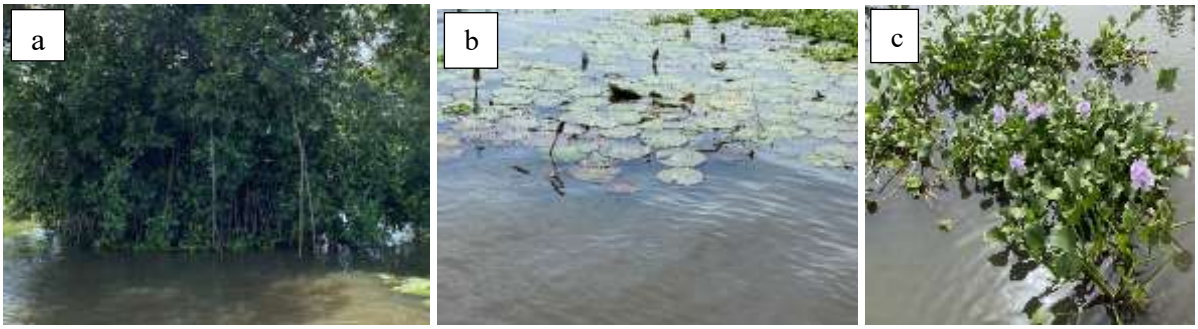


Planche 1: Flore dans le complexe lagunaire (Cliché Zinzindohoué,2023)

a) : mangrove, **b)** : feuille de Lotus ; **c)** : jacinthe d'eau

2.4.2.2. Faune du complexe

La faune domestique est composée de bovins, porcins, ovins et de volailles généralement en divagation. La faune aquatique comprend : les mollusques (huîtres, tarets), les crustacés (crabes, crevettes, etc.…) et les poissons qui constituent la faune ichtyologique. La faune ichtyologique est extrêmement abondante et variée.

En effet, les inventaires réalisés au niveau du lac en 2000 et 2001 révèlent la présence de 51 espèces de poissons réparties en trois grands groupes : espèces marines, espèces d'eau douce et espèces lagunaires (Niyonkuru, 2003).

Parmi ces espèces, on distingue : Tilapia guneensis, Hermicromis fasciatus, Bracinus carolinae, Clarias (Chouti, 2011). Du point de vue de la production halieutique annuelle, la lagune de Porto-Novo représente le troisième plan d'eau productif du Sud-Bénin après le lac Nokoué et le lac Ahémé (Chouti, 2011).

2.4.2.3. Géologie et nature du fond

Ce complexe lagunaire se situe au contact de trois structures géologiques et géomorphologiques qui sont :

- les plateaux subhorizontaux du Continental Terminal à l'Est et à l'Ouest,
- l'échancrure du bassin inférieur de l'Ouémé-Sô,
- les cordons littoraux Ogoliens et Holocènes du Sud.

Les fonds du lac Nokoué sont en grande partie vaseux notamment à l'Ouest et dans les zones profondes du Centre. Des bancs sableux sont observés dans les zones peu profondes littorales du Sud et de l'Est, notamment près du delta de l'Ouémé (Gnohossou, 2006).

2.5. Aspects socio-économiques

2.5.1. Population

L'installation humaine sur le plan d'eau remonte au XVIIe siècle. Les Goun, les Tori, les Seto et les Toffin, sont des populations spécialisées dans les activités de production comme la pêche, l'agriculture et l'artisanat. Elles sont majoritairement de confessions chrétiennes, toutes églises confondues. Les Toffins, sont souvent qualifiés comme les « les hommes de l'eau ». Spécialisés dans la pêche et la pisciculture en lagune (à travers la technique des « acadjas », ils habitent les berges de la lagune, dans un habitat particulier, composé de maisons sur pilotis (PDM, 2021-2026). La figure 11 présente l'évolution de la population au tour du complexe. Une estimation a été faite sur 2024 en fonction du taux d'accroissement.

On remarque que la population la plus élevée est celle d'Abomey-Calvi. Cet accroissement de la population représente une source de pollution de l'écosystème en fonction des activités humaines.

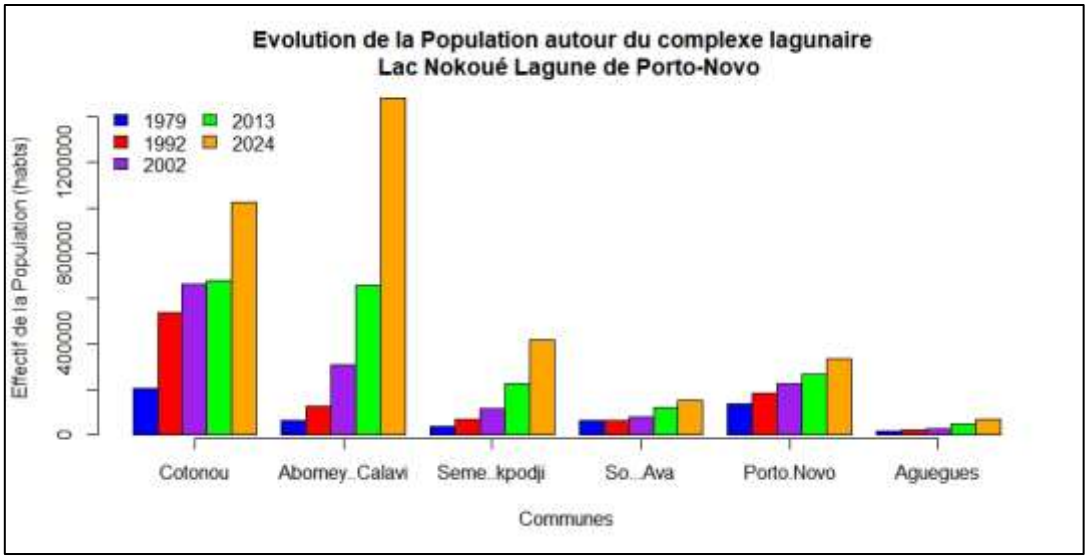


Figure 11: Evolution de la population autour du complexe (RGPH,1979, 1992, 2002 et 2013)

2.5.2. Activités économiques

Les principales activités économiques sont la pêche et l'agriculture dont l'exercice est régi par le régime du fleuve Ouémé (Chouti, 2011).

2.5.2.1. Agriculture

Autour de la lagune, l'agriculture est très diversifiée. Elle occupe près de 80% de la population active. Les principales cultures vivrières pratiquées sont le maïs, l'igname, le manioc, le niébé, une variété locale de légumineuses cultivée dans la basse vallée de l'Ouémé, en période de décrue. La riziculture est pratiquée près de l'embouchure du fleuve de Ouémé dans la zone dite des « Aguégués » (Adjibogoun, 2015).

2.5.2.2. La pêche

Les pêcheurs des plans d'eau du Sud-Bénin sont de véritables professionnels très inventifs qui excellent dans le métier et l'exercent de manière individualisée ou collective. Ils utilisent une gamme variée d'engins et de techniques de pêche. Les plus couramment utilisées sont :

- les filets (éperviers, filets maillants ou filets dormants) ;
- les lignes à hameçons individuels ou multiples (palangres) ;
- les barrages et les nasses-pièges ;
- le « mêdokpokonou » ou filet de barrage ;

- les « acadjas » : il s'agit d'un système traditionnel de pisciculture extensive qui consiste à créer un habitat artificiel fait de branchages disposés dans l'eau.

A l'intérieur du parc, les poissons sont protégés des prédateurs et trouvent de bonnes conditions d'alimentation à partir du périphyton qui se développe sur la partie immergée des branchages. Le rendement des acadjas varie de 1,5 à 8 t/ha/an (Adjibogoun, 2015). Quelques techniques de pêches sont présentées dans la planche 2.



Planche 2: Technique de pêche sur le complexe (Cliché Zinzindohoué, 2023)

a) : Pêche à filet épervier ; **b)** : Pêche à la nasse

2.5.2.3. Le secteur industriel

Le secteur industriel est peu développé au Bénin, mais se trouve tout de même en progression. Il est essentiellement constitué des industries agroalimentaires, de textiles et des matériaux de construction. 80% de ces industries sont installées près de Cotonou et les déchets qu'elles génèrent, évalués en 1992 à plus de 1200 tonnes de Demande Biologique en Oxygène (DBO) par an, sont directement déversés dans la lagune et/ou en mer (Gnohossou, 2006).

2.5.2.4. Le commerce

Après l'agriculture et la pêche, le commerce est une activité importante menée autour de ce complexe. C'est surtout les femmes qui mènent une activité commerciale (Chouti, 2011). Le marché Dantokpa, au Centre de Cotonou, constitue le plus grand marché de la sous-région. Le secteur informel représente 2/3 des activités commerciales et assure la subsistance de la majeure partie de la population. Le marché Dantokpa produit des milliers de tonnes de déchet qui participent au comblement du complexe lagunaire. Elles vendent du poisson et des produits alimentaires de première nécessité. Ce sont en général les Yoruba, Goun, etc, … qui mènent une activité intense de commerce. Le secteur informel est fortement présent et assure la subsistance de la majeure partie de la population.

La proximité du Nigéria favorise le trafic frauduleux à travers la lagune des produits pétroliers moins chers (Mama, 2010). Cette activité constitue un danger potentiel pour l'environnement aquatique. Quelques exemples d'activités commerciales autour du complexe sont présentés au niveau de la planche 3.



Planche 3 : Activités commerciales autour du Complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo (Cliché Zinzindohoué, 2023)

a) : marché Dantokpa ; **b)** : vente de contrebande sur la lagune (plastique)

2.5.2.5. Exploitation du sable lagunaire

Depuis l'interdiction de l'exploitation du sable marin par les autorités béninoises, les populations riveraines des lagunes en général et celles des Aguégués en particulier, s'adonnent à l'exploitation du sable lagunaire. En effet, les jeunes de la localité, munis de barques et de sceaux, vont en plein milieu de la lagune ramasser le sable (les sédiments) en profondeur. C'est une nouvelle activité génératrice de revenus pour les jeunes et même les femmes des Aguégués.



Planche 4: Exploitation du sable au niveau de la lagune de Porto-Novo (Cliché Zinzindohoué, 2023)

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODES

Pour mener à bien notre étude, un certain nombre de matériel ont été utilisés sur le terrain. C'est-à-dire sur le complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo, au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, puis pour le traitement des données. Également une méthodologie bien définie a été appliquée afin d'obtenir des résultats fiables.

3.1. Matériel utilisé

3.1.1. Matériel de terrain

Les équipements utilisés sur le terrain se résument dans le tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4: Matériels de terrain

Matériels de terrain	Rôles
Un GPS (GARMIN)	Repérage des sites d'échantillonnages
Des bouteilles en plastique de 1,5L	Recueillement des échantillons d'eau
Une glacière	Conservation et transports des échantillons
Des réfrigérants	Maintien d'une bonne température dans les glacières
Du papier adhésif et un marqueur	Etiquetage des échantillons
Un multi paramètre (AQUARED)	Mesure des paramètres in-situ comme : le pH, l'Oxygène dissous…
Un disque de Secchi	Mesure de la transparence
Une fiche de terrain	Prises de note des mesures et informations
Une barque	Déplacement sur le lac

La planche 5 ci-dessous présente quelques matériels de terrain que nous avons utilisés.

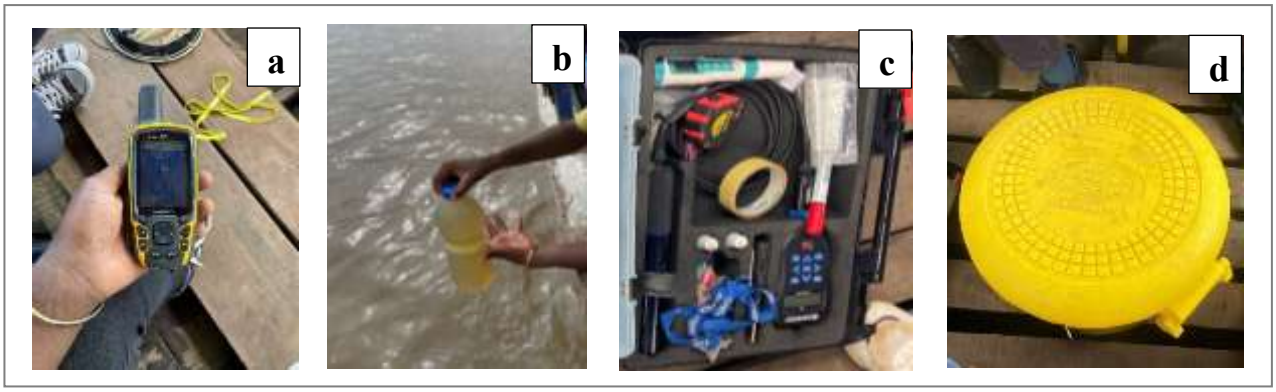


Planche5: Quelques matériels de terrain (Cliché Zinzindohoué, 2023) **a)** : GPS ; **b)** : échantillonnage d'eau ; **c)** : multi-paramètre AQUARED ; **d)** : glacière

3.1.2. Matériel de Laboratoire

Le laboratoire dispose de plusieurs équipements et outils qui nous ont servi pour nos analyses. Ces différents appareils sont présentés dans le tableau 5 qui suit, avec leurs rôles.

Tableau 5: Matériels de laboratoire

Equipements de Laboratoire	Rôles
Des congélateurs et réfrigérateurs	Conservation des échantillons de sédiments et certains réactifs
Une verrerie constituée de fioles, béchers, erlenmeyers, etc…	Récipient pour les analyses
Des réactifs : de l'alcool (acétone à 90%), de l'acide chlorhydrique 2N	Analyse de la chlorophylle (a)
Du papier Wattman de pore 0,45 µm	Filtration des échantillons d'eau
Une pompe de filtration	Filtration des échantillons d'eau
Des pipettes	Prélèvement de petit volume de solution
Des tubes et des cuves	Conservation des papiers filtres après filtration échantillons
Un spectrophotomètre DR 5000	Lecture des valeurs des absorbances des échantillons analysés
Un colorimètre DR 890	Analyse de la turbidité, des MES

La planche 6 présente la liste de quelques matériels utilisés au laboratoire.

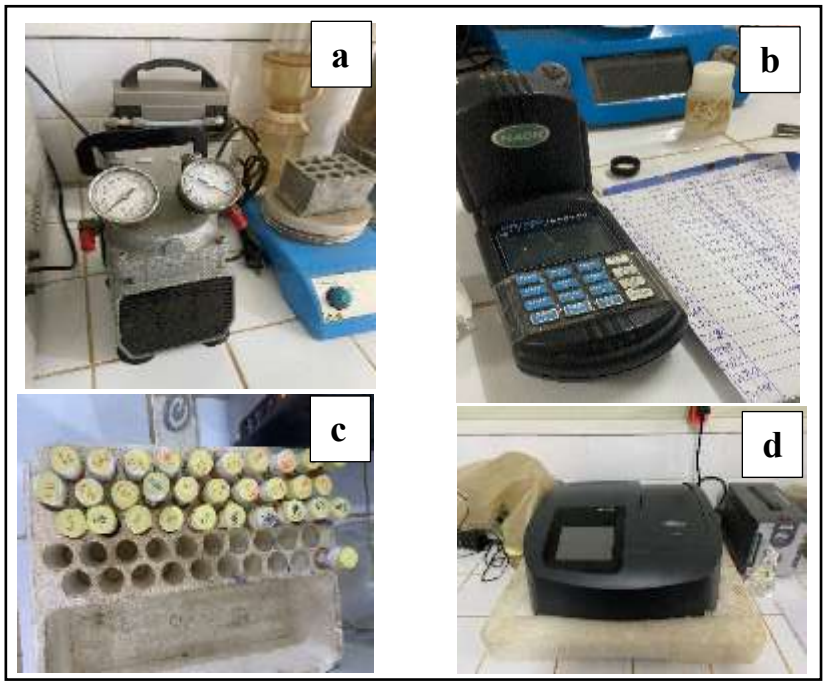


Planche 6: Quelques appareils de mesure au Laboratoire (Cliché Zinzindohoué, 2023) **a)** : pompe de filtration ; **b)** : colorimètre DR 890 ; **c)** : portoir avec tubes ; **d)** : spectrophotomètre DR 5000

3.1.3. Traitement des données

C'est l'ensemble des matériels que nous avons utilisés lors du traitement de nos données de terrain ainsi que pour celui des images satellitaires. Le tableau 6 ci-dessous présente cet ensemble ainsi que leur rôle.

Tableau 6: Matériels de traitement des données

Traitement des données	Rôles
Microsoft Word 2016	Traitement des textes
Qgis 3.30 et 3.22	Traitement des images satellitaires et réalisation des cartes
R-Studio	Répartition des stations pour établir l'algorithme
Microsoft Excel 2016	Calcul des erreurs, réalisation des graphes et les divers ajustements pour l'établissement de l'algorithme

3.2. Approche méthodologique

L'approche méthodologique s'est déroulée en trois étapes : la recherche documentaire, la collecte des données et l'analyse et l'interprétation des données.

3.2.1. Recherche documentaire

Cette étape de la méthodologie nous a permis de faire des recherches sur internet, dans les bibliothèques et sociétés sur notre cadre d'étude. Cette recherche a été orientée vers tous les documents ayant un rapport avec notre thème et les images satellitaires de ladite zone. Nous avons également parcouru les documents concernant l'estimation de la biomasse à partir de la concentration en chlorophylle (a). Les collectes de données faites ont permis d'avoir les informations générales sur nos zones d'études.

3.2.2. Méthodologie relative à la variation spatiale et temporelle de la chlorophylle (a) dans le complexe

3.2.2.1. Méthodes d'échantillonnage d'eau

- **Préparation des campagnes d'échantillonnage d'eau**

Avant la campagne d'échantillonnage, un plan des travaux à réaliser a été établi. Un grand soin a été porté à ce plan car il va influer sur toute l'étude.

Le but du plan d'échantillonnage est d'assurer la représentativité des échantillons à prélever (Tessier, 2012). Toute l'étendue du lac et de la lagune du Nord au Sud a été considérée pour le choix des stations de prélèvements.

- **Réalisation de la campagne d'échantillonnage**

Au total trois campagnes ont été effectuées dans le cadre de notre étude. Il s'agit de la campagne du mois de septembre 2023, d'octobre 2023 et la campagne de février 2024. En raison de toute l'étendue du milieu d'étude, chaque campagne comportait deux jours d'échantillonnage et ceux-ci sont choisis en fonction de la période de passage des satellites. Ainsi pour le mois de septembre on a le 27/09 et le 29/09/2023, pour le mois d'octobre on a le 26/10 et le 27/10/2023, et le 28/02/ et le 29/02/2024 pour le mois de février. Remarquons que les deux premiers mois correspondent à la montée des eaux au niveau du complexe et le mois de février, la période de basses eaux.

Les échantillons récoltés sont conservés dans des glacières à 4°C et automatiquement transportés au laboratoire où les analyses ont été effectuées. Au total dix (10) sites ont été échantillonnés sur le lac et ses différents affluents et dix (10) sur la lagune. La Figure 12 présente la carte d'échantillonnage de notre zone d'étude.

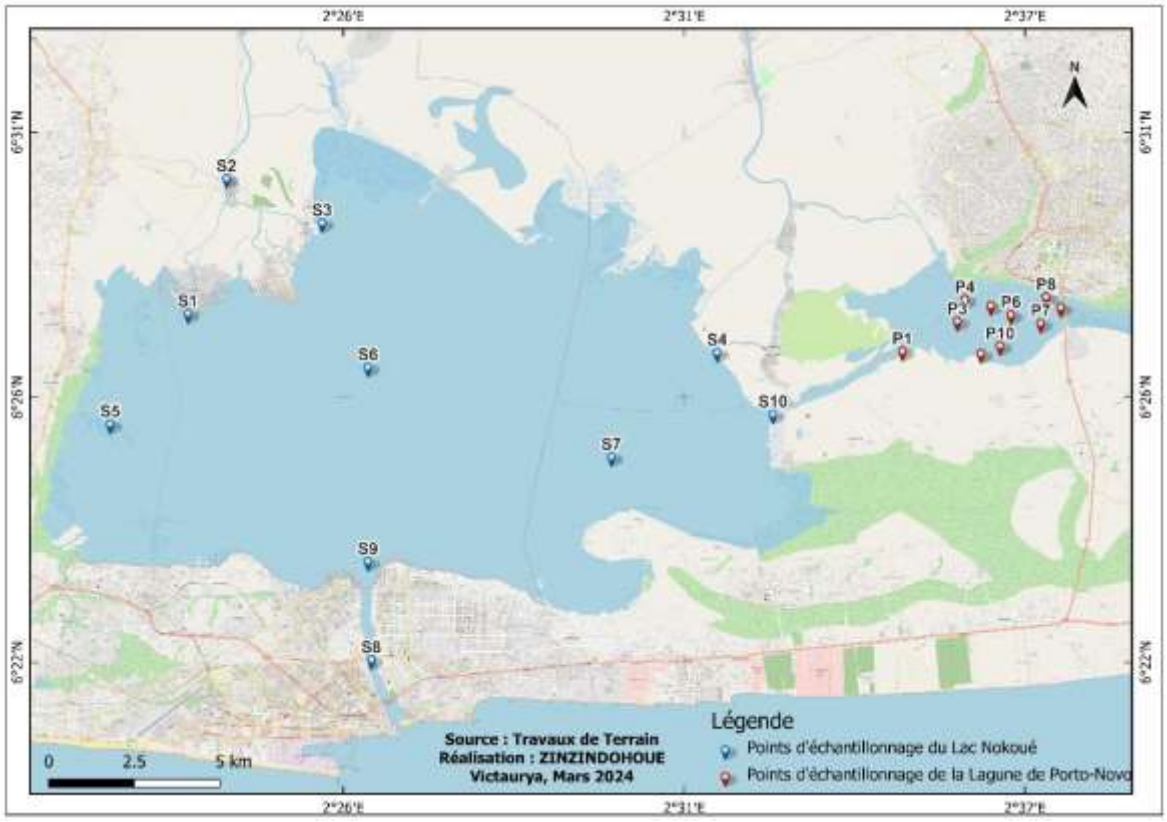


Figure 12: Carte d'échantillonnage de la Zone d'étude

La planche 7 présente quelques photos prises lors de nos campagnes d'échantillonnage.



Planche 7: Echantillonnage d'eau (Cliché Zinzindohoué, 2023)

3.2.2.2. Méthode d'analyse de la chlorophylle (a)

Le dosage de la chlorophylle (a) est réalisé selon la méthode monochromatique de Lorenzen (1967) utilisant comme solvant l'acétone à 90% (Rodier *et al.,* 2009). L'échantillon prélevé est filtré avec du papier filtre (Wattman) de porosité 0,45 µm.

- **Principe de la méthode**

Dans une première étape, l'absorbance est mesurée directement sur l'extrait à 750 nm et 665 nm. L'extrait est ensuite acidifié avant de faire une nouvelle mesure aux deux longueurs d'onde. L'acidification est réalisée directement dans la cuve du spectrophotomètre par ajout d'environ 10 µL d'acide chlorhydrique 2 N dans une cuve de 5 à 10 mL. La cuve est ensuite soigneusement bouchée et agitée. La dégradation des phéopigments est rapide et prend au maximum quelques minutes. On mesure donc l'absorbance à 665 et 750 nm toutes les 30 secondes jusqu'à 4 min (par rapport au blanc préparé précédemment). Les mesures d'absorbance choisies pour les calculs sont les valeurs minimales d'absorbances obtenues. Si l'absorbance mesurée est trop importante, l'extrait peut être dilué avec de l'acétone.

La notation des absorbances est la suivante (voir tableau 7) :

Tableau 7: Notation des différentes absorbances à mesurer (Rodier et al., 2009)

	750 nm	665 nm
Extrait non acidifié	A_0750	A_0665
Extrait acidifié	A_a750	A_a665

Le mode opératoire est le suivant :

- placer le filtre sur l'équipement de filtration et verser un volume de 250 mL de l'échantillon à travers le papier filtre ;
- récupérer le filtre puis le placer dans un tube contenant de l'acétone à 90% avec un volume de 10 mL ;
- agiter pendant 1 min, puis placer le tube à l'obscurité pendant une vingtaine d'heures au réfrigérateur, de façon à permettre l'extraction de la chlorophylle ;
- après l'extraction le tube est centrifugé à 4000 tr/min pendant 5 min ;
- transférer le surnageant dans la cuve du spectrophotomètre ;
- effectuer les mesures d'absorbances aux longueurs d'ondes de 750 et 665 nm ;
- acidifier par addition de 10 µL d'HCL (2 N ou 2 mol/L) dans la cuve, agiter puis attendre 4 min ;
- mesurer les absorbances brutes des extraits acidifiés à 750 et 665 nm.

La concentration en chlorophylle (a) est obtenue par la formule suivante :

$$\boldsymbol{Chla}(\mu\boldsymbol{g/L}) = \frac{\mathbf{26{,}7}\times(\boldsymbol{Ao}-\boldsymbol{Aa})\times\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{Vf}\times\boldsymbol{l}} \quad \textit{(Equation 1)}$$

A_0 : Absorbance avant acidification

A_a : Absorbance après acidification

v : Volume d'acétone utilisé en pour l'extraction en mL

Vf : Volume d'eau filtrée

l : Longueur du trajet de la cuvette (cm)

L'analyse des échantillons nous a permis de déterminer les valeurs de chlorophylle (a) pour les différentes stations. Cela nous a donc permis de déterminer la variation des valeurs de chlorophylle (a) au niveau du complexe.

- **Classification des valeurs de chlorophylle (a)**

Après analyse, les valeurs de chlorophylle (a) obtenues permettent de faire une classification du milieu. Cette classification donne un aperçu de l'état trophique de l'écosystème.

Tableau 8: Classification des concentrations en chlorophylle (a) (Klemas, 2011)

Classe	Concentration (µg/L)
Oligotrophe	< 5
Mésotrophe	5-20
Eutrophe	> 20

3.2.3. Méthodologie relative à l'estimation de la concentration en Chl-a à partir des images satellitaires.

3.2.3.1. Acquisition d'images satellitaires

Dans le but d'estimer les valeurs de chlorophylle (a) à partir d'images satellitaires, l'acquisition de ces dernières s'avère nécessaire. Dans notre étude les images Landsat 8 et Sentinel-2 ont été utilisées.

Les images satellitaires sont téléchargées conjointement aux dates d'échantillonnages afin de réaliser des match-up. Ainsi les images Landsat 8 sont téléchargées après inscription sur le site https://earthexplorer.usgs.gov// de l'Agence Spatiale Américaine (NASA). Les images Sentinel-2 ont été téléchargées pour leur part sur le site https://dataspace.copernicus.eu.

Après l'accès aux différents sites, nous avons créé un compte sur chaque site afin de nous faciliter le téléchargement des images satellitaires. Suite à la création du compte, nous avons délimité la zone d'étude qui dans notre cas ici, est le complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo. Puis, nous avons ajouté les informations suivantes : Choix du satellite (Landsat 8 collection 2 niveau 2 et Sentinel-2 Level 2A), choix de la période (date) dans laquelle nous voulons les images, la couverture nuageuse afin de réduire les images qui auraient des nuages, et enfin nous avons recherché les images présentant moins de couverture nuageuse. Les images satellites sont obtenues sous forme de fichiers compressés. Après avoir été téléchargées, elles sont décompressées et sont alors au format TIF. Elles peuvent être exploitées par la suite pour leur traitement afin d'extraire les valeurs de réflectances des différentes bandes concernées. Les images utilisées sont de type Landsat Oli 08 Tirs de la scène 192-052 et Sentinel de la mission 2A de la scène N0509_R122_T31NDH.

3.2.3.2. Conception d'un algorithme pour l'estimation des valeurs de Chl-a à partir des images Landsat 8 et Sentinel 2 dans le complexe

La chlorophylle (a) est un pigment qui colore en vert la plupart des feuilles des végétaux et qui absorbe la lumière utilisée par la photosynthèse.

La Chl-a représente 75% de la chlorophylle des plantes vertes. Elle est le paramètre le plus couramment pris en compte pour l'évaluation de la biomasse phytoplanctoniques des eaux. Les concentrations de la Chl-a sont calculées en mesurant l'absorbance de l'extrait colorant à 663 ;645 ;630 ;665 et 750 nm. Les satellites Sentinel-2 offrent des données sur la zone d'étude sous plusieurs résolutions 10, 20 et 60 m, et ceux Landsat offrent des données sous la résolution de 30 m.

Ces données sont en fait des bandes spectrales avec une longueur d'onde spécifique classée et perceptible suivant la résolution.

Avec Sentinel-2, les longueurs d'onde permettant notamment la lecture de la chlorophylle (a) sont exploitables avec des bandes spectrales repérées sous la résolution de 20 m :

- B03- Vert :560 nm (20 m)
- B04- Rouge :665 nm (20 m)
- B05- Proche Infrarouge : 708 nm (20 m)
- B06- Proche Infrarouge : 740 nm (20 m)

Avec Landsat 8, les longueurs d'onde permettant notamment la lecture de la chlorophylle (a) sont exploitables avec des bandes spectrales repérées sous la résolution de 30 m :

- B02- Bleu : 450-515
- B03- Vert : 525-600
- B04- Rouge : 630-680
- B05- Proche Infrarouge : 850-885

Dans le but de concevoir cet algorithme par rapport aux images Sentinel-2 et Landsat 8, nous avons employé une base de données d'archives sur les valeurs d'observation de la chlorophylle (a) sur le lac Nokoué de la période de juillet 2020 à juin 2021 pour dix-neuf (19) stations. D'une fréquence mensuelle, les données étaient recueillies par une équipe de chercheurs. Pour une homogénéité et une représentativité des données, nous avons veillé au téléchargement des données satellites dont les dates de captures sont les mêmes ou proches des dates de campagnes d'observation sur le lac, soit d'un écart temporel maximal de 7 jours. Ce maximum est défini en tenant compte du cycle de niveau de la marée qui aurait une influence sur la constitution du complexe dans un changement de niveau. Les tableaux 9 et 10 donnent plus de compréhension sur les dates de capture et de campagnes pour les deux satellites utilisés.

Tableau 9: Images satellites collectées et campagnes de mesure sur le lac (Sentinel-2A)

Dates			
Passage satellite	**Données d'observation**	**Ecart temporel (jr)**	**N Stations retenues**
13 Août 2020	13 Août 2020	-	15
15 Octobre 2020	12 Octobre 2020	3	10
16 Novembre 2020	14 novembre 2020	2	15
15 Décembre 2020	14 Décembre 2020	1	10
14 Janvier 2021	15 Janvier 2021	1	18
14 Avril 2021	13 Avril 2021	1	16
15 Juin 2021	09 Juin 2021	6	17
		Total	101

Tableau 10: Images satellites collectées et campagnes de mesure sur le lac (Landsat 8)

Dates			
Passage Satellite	**Données d'observation**	**Ecart temporel (jr)**	**N Stations retenues**
16 Juillet 2020	14 Juillet 2020	2	11
19 Novembre 2020	16 Novembre 2020	3	18
21 Décembre 2020	15 Décembre 2020	6	16
12 Avril 2021	14 Avril 2021	2	10
14 Mai 2021	17 Mai 2021	3	16
15 Juin 2021	15 Juin 2021	-	04
		Total	89

Les images étant déjà téléchargées sur les différentes plateformes, le logiciel Qgis 3.22 nous a permis de traiter ces dernières avec l'extension SCP. Ensuite nous avons procédé à la conversion en réflectance des bandes qui permettent l'extraction des valeurs de réflectance au niveau des stations de mesures. Les valeurs recueillies sont ensuite intégrées dans une base de données Excel regroupant au préalable des valeurs de chlorophylle (a) observées pour permettre l'établissement d'une loi de corrélation entre la réflectance et la Chl-a.

Étant donné qu'il est presque impossible d'avoir d'images satellites dépourvues de toute couverture nuageuse, nous avons établi une procédure de présélection des stations n'ayant pas été victimes de couvertures nuageuses ou d'ombres nuageuses. Ci-dessous, une liste de critères permettant la réalisation d'une bonne présélection :

- procéder à la création d'un raster virtuel dans le logiciel Qgis en combinant les différentes bandes pour permettre une bonne visualisation des zones de nuages et d'ombres ;
- définir les zones de couvertures de nuages qui sont bien évidemment les zones de formes blanches, de même que celles qui semblent être des tâches ;
- les points sous les nuages ou dans un rayon de 1km des zones nuageuses, sont éliminés, car sont jugés perturbés par les ombres et les réflexions spéculaires. Ils sont donc non représentatifs des réelles valeurs de réflectance.

Le choix du rayon a été fait d'une manière non opérationnelle, car nous ne disposons pas d'une méthode adéquate pour permettre de déterminer un périmètre de délimitation autour des zones des nuages. Ainsi après le respect de tous ces critères, les valeurs des points restants sont bien représentatives des valeurs radiométriques de réflectance de surface.

Dans l'objectif de configurer un modèle de prédiction de la chlorophylle (a), nous avons réparti le total des données recueillies en deux bases de données. La première base, 70% des données ont été utilisées pour étalonner le modèle et 30% pour la validation de l'équation suivant les paramètres d'estimation. La répartition est aléatoire et a été effectuée grâce au logiciel R Studio. Pour la calibration du modèle, nous avons employé plusieurs formes de combinaison pour l'obtention d'un meilleur coefficient de corrélation. Un récapitulatif des combinaisons effectuées au niveau des différents satellites a été fait (Tableau 11). Aussi, il est à noter qu'on s'est basé sur des combinaisons existantes de chercheurs pour déterminer le nôtre.

Tableau 11 : Recueil des formes d'équations retrouvées dans la littérature (Mishra & Mishra, 2012)

Types de combinaisons	**Sentinel**	**Landsat**
Deux bandes	$\frac{B5}{B4}$, $\frac{B5-B4}{B5+B4}$	$\frac{B4}{B3}$, $\frac{B4-B3}{B4+B3}$
Trois bandes	$B6 \times (\frac{1}{B4} - \frac{1}{B5})$	$B5 \times (\frac{1}{B3} - \frac{1}{B4})$

Pour sélectionner l'équation appropriée pour estimer le paramètre de qualité, l'Erreur Standard d'Estimation (ESE) et l'Erreur Quadratique Moyenne Relative (EQMR) ont été appliquées sur les 30% de données restantes.

L'ESE fourni une indication sur la dispersion ou la variabilité de la précision et sa formule est représentée au niveau de l'équation (El-Alem *et al.,* 2012).

$$ESE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(yi-\bar{y})^2}{n-k-1}} \textbf{ (Equation 2)}$$

où y est une variable dépendante des précédentes équations mathématiques qui peut être dans notre cadre la valeur du paramètre mesuré in situ, $\bar{y}$ est une approximation de y provenant des équations mathématiques, k le nombre de variables indépendantes et n l'effectif des stations sélectionnées. Le modèle mathématique retenue, donc qui présente un meilleur coefficient de corrélation est validée à l'aide des informations de données satellites et d'un ensemble de données collectées sur le lac durant les périodes de campagne. L'efficacité ou la fiabilité du modèle d'estimation de la chlorophylle (a) est déterminée par l'Erreur Quadratique Moyenne Relative (EQMR) comme le décrit l'équation (El-Alem *et al.,* 2012).

$$EQMR = \sqrt{\frac{\frac{1}{n}*\sum_{i=1}^{n}(y-\hat{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y})^2}} \textbf{ (Equation 3)}$$

où n est l'effectif des stations sélectionnées, donc le nombre total de points de stations, y la valeur de la Chl-a observée et $\hat{y}$ la valeur de la Chl-a calculée.

L'EQMR est utilisée pour comparer différentes techniques de mesure donc les équations mathématiques. Lorsque nos prédictions sont inexactes, cela entraîne une augmentation de EQMR. L'EQMR exprime l'erreur relative ou sous forme de pourcentage. La précision du modèle est :

- Excellent lorsque EQMR < 10% ;
- Bon lorsque EQMR se situe entre 10% et 20% ;
- Acceptable lorsque EQMR est comprise entre 20% et 30% ;
- Médiocre lorsque EQMR > 30%.

La Figure 13 présente un schéma récapitulatif de la méthodologie d'estimation.

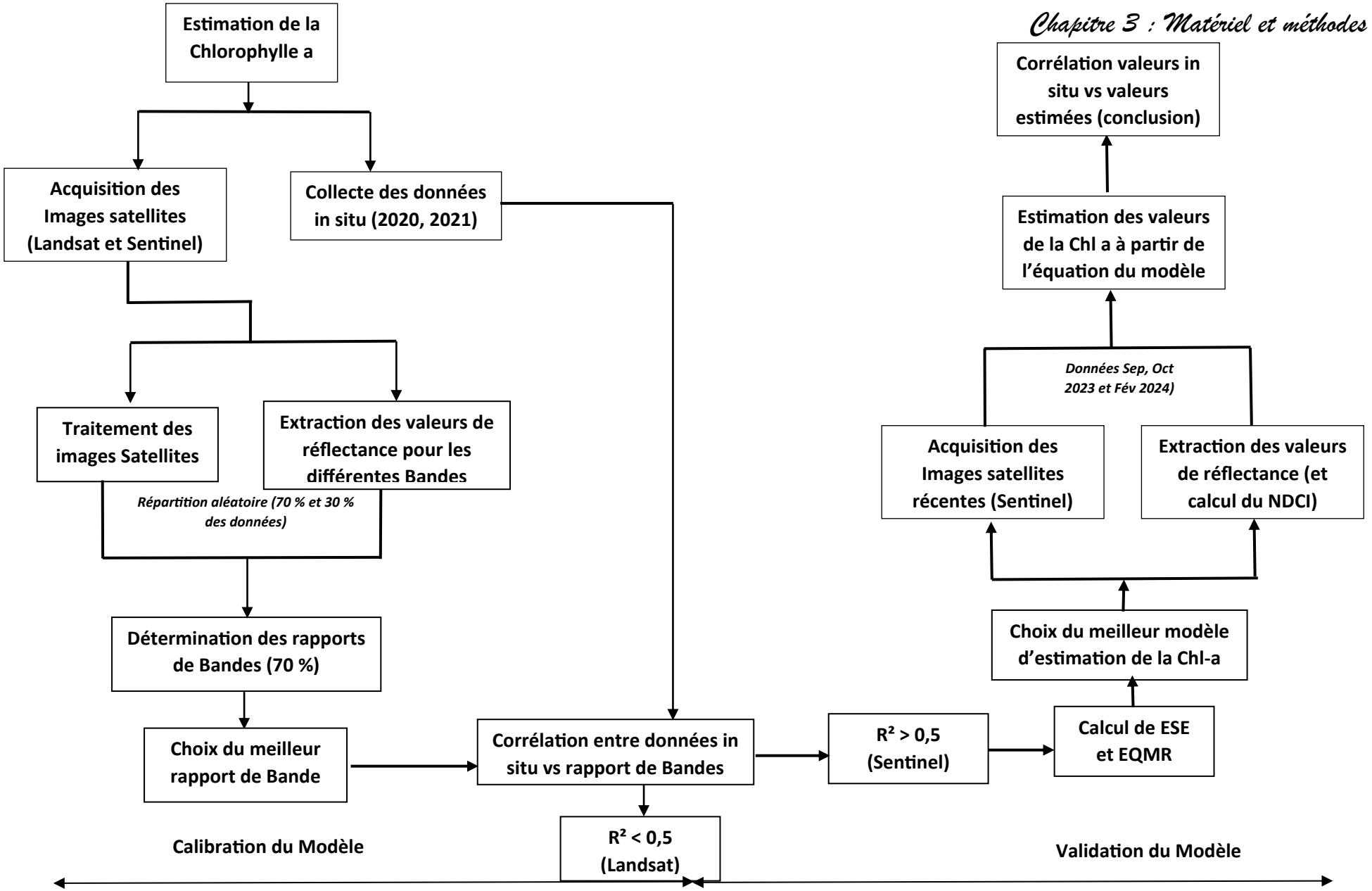


Figure 13: Schéma conceptuel du modèle d'estimation de la Chlorophylle (a) à partir des images Landsat et Sentinel (Zinzindohoué,2024)

3.2.4. Validation du modèle et performance

Le modèle ainsi choisi est validé sur la base des données collectées de l'échantillonnage. Cette étape de validation consiste à vérifier si le modèle établi s'ajuste au mieux avec les valeurs de terrain. Pour ce faire, nous avons effectué les mêmes étapes précédentes en traitant les images et en faisant l'extraction des valeurs de NDCI avec le logiciel Qgis pour les images de septembre, octobre et février. Ce travail est fait uniquement pour les stations éloignées des bruits qui peuvent affecter les valeurs de réflectances et par ricochet les valeurs de NDCI. Ces différentes valeurs sont intégrées dans le modèle choisi dans le but de faire une corrélation entre les valeurs de terrain et les valeurs estimées à partir des images. Les critères nous ayant permis de valider le modèle sont le coefficient de corrélation R^2, le critère de NASH et le calcul du RMSE.

Les formules utilisées pour le critère de NASH et pour le RMSE sont les suivantes (El-Alem *et al.,* 2012) :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i^{sim} - Q_i^{obs}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs}\right)^2} \quad (\textbf{\textit{Equation 4)}}$$

où Q_i^{sim} est la valeur de Chl-a simulée à partir du modèle pour chaque station, Q_i^{obs} la valeur observée de Chl-a pour chaque station et $Q_i^{obs}{}_{moy}$ la moyenne des valeurs de Chl-a observées.

Plus le NASH est proche de 1 le modèle est fiable.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Es_i - O_i}{Es_i}\right)^2} \quad \textbf{\textit{(Equation 5)}}$$

où n est le nombre d'échantillon considéré dans l'étude (nombre de station), Es_i les valeurs de Chl-a simulées et O_i les valeurs de Chl-a observées.

Plus l'erreur est moindre, le modèle est fiable.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

Le présent chapitre fait cas des résultats obtenus lors de nos recherches en rapport avec les différents objectifs fixés et la méthodologie adoptée. Aussi, ces résultats font-ils l'objet d'une analyse bien détaillée et d'une discussion bien fournie sur la base des travaux antérieurs.

4.1. Variation spatiale et temporelle des valeurs de chlorophylle (a) dans le complexe lagunaire

La variation des valeurs de la Chl-a a été analysée par la dynamique spatiale et temporelle des valeurs de la Chla-a à l'échelle du secteur d'étude.

4.1.1. Dynamique spatiale et temporelle de la Chl-a dans le complexe lagunaire

4.1.1.1. Statistique descriptive des valeurs obtenues

Le tableau 12 montre la statistique descriptive réalisée sur les données de Chl-a obtenues dans le complexe.

Tableau 12: Statistique descriptive des valeurs de chlorophylle (a) obtenues dans le complexe lagunaire

	Chl-a sep.23	Chl-a oct.23	Chl-a fev.24	Moyenne
Moyenne	9,96	12,92	23,02	15,30
Erreur-Type	1,82	1,39	2,80	2,00
Mediane	7,48	12,80	21,36	13,88
Mode	6,41	12,80	21,36	13,52
Écart-Type	8,15	6,21	12,54	8,97
Minimum	3,20	3,20	1,07	2,49
Maximum	40,05	24,90	51,26	38,74

On constate qu'à l'issue des trois mois de travaux, les valeurs minimale et maximale de concentration en Chl-a sont respectivement de 1,07 µg/L et de 51,26 µg/L. Aussi la valeur moyenne varie chaque mois, mais avec une moyenne globale de 15,30 ± 2,00 µg/L en tenant compte de la moyenne au niveau de chaque mois ainsi que de l'erreur type.

4.1.1.2. Variation spatiale de Chl-a à l'échelle du complexe lagunaire

Les graphes des figures 14 et 15 présentent, respectivement, la variation de la concentration en Chl-a dans le complexe et la distribution de cette concentration au niveau de chaque station.

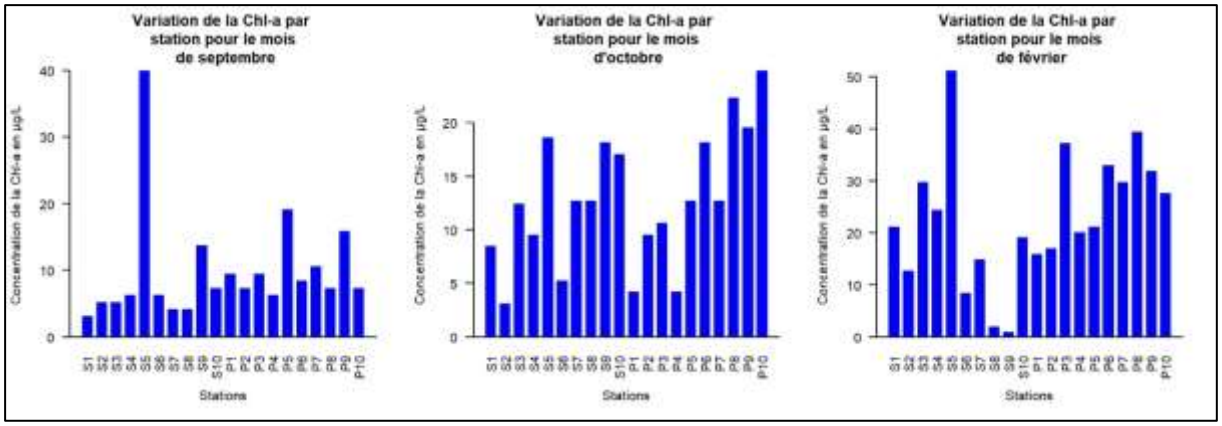


Figure 14: Variation de la concentration en Chl-a au cours des trois mois pour chaque station

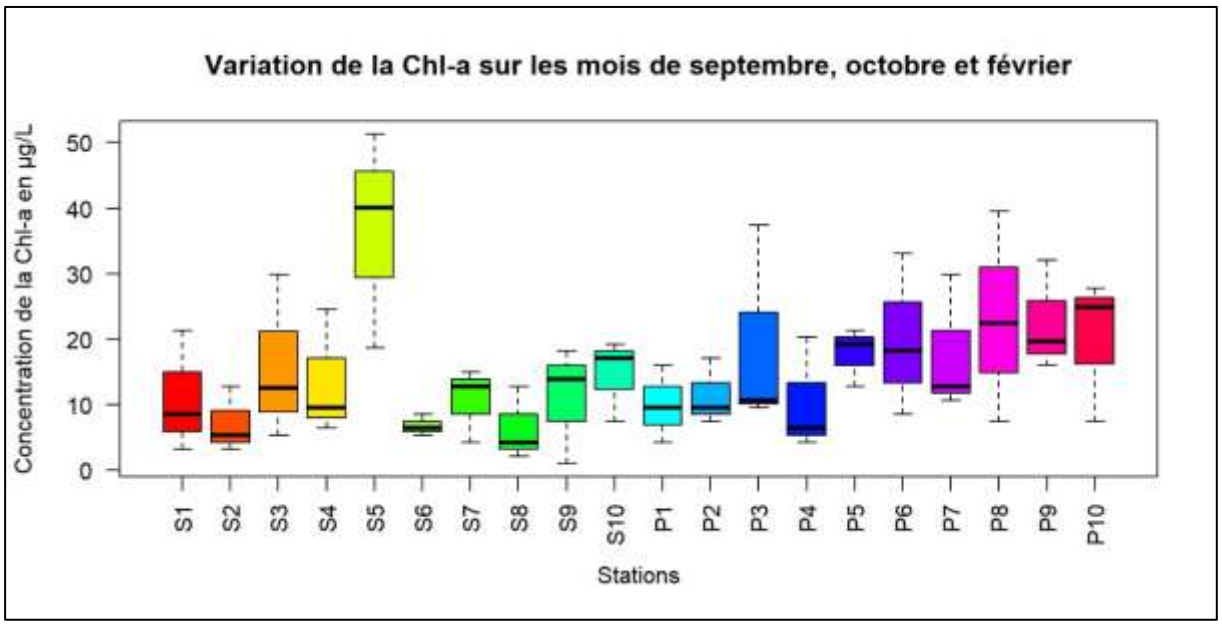


Figure 15: Valeurs moyennes de la Chl-a dans le complexe lagunaire pour les différentes stations

D'après les figures 14 et 15, on remarque une variation des concentrations de Chl-a sur les trois mois de campagne. Cette variation se présente comme suit : 3,2 à 40,5 µg/L et 3,2 à 18,7 µg/L sur le Lac Nokoué ; 6,4 à 19,2 µg/L et 4,27 à 24,9 µg/L au niveau de la lagune de Porto-Novo, respectivement pour les mois de Septembre et d'Octobre.

Quant au mois de février, elle varie entre 1,07 à 51,26 µg/L sur le lac Nokoué et de 16,02 à 39,52 µg/L au niveau de la lagune de Porto-Novo.

De manière générale la concentration maximale au niveau du lac Nokoué est obtenue au niveau de la station 5 au cours des trois mois et la valeur maximale pour la lagune est obtenue au point 8 (Figure 15).

Remarquons que pour les stations 8 et 9 qui sont situées au niveau du chenal de Cotonou, les concentrations en Chl-a ont connu leurs maximums au cours du mois d'octobre et une baisse totale au mois de février (de 12,8 à 2,14 µg/L pour la station 8 et de 18,2 à 1,07 µg/L pour la station 9). Cela se traduit par le fait qu'en saison sèche nous avons une intrusion des eaux de mer dans le lac, ce qui augmente la salinité dans le milieu. Cette salinité assure la destruction des plantes aquatiques par conséquent la diminution de la concentration en Chl-a à ces points.

Aussi d'après la figure 15, on remarque que les valeurs de concentration obtenues ne sont pas homogènes pour les différents points d'échantillonnage. Cela témoigne du caractère hétérogène du milieu et donc du bon choix des points d'échantillonnage en vue d'une meilleure représentativité du milieu par ces points.

4.1.1.3. Variation temporelle de la Chl-a dans le complexe lagunaire

La figure 16 nous présente la variation moyenne des concentrations en Chl-a dans le complexe au cours des trois mois d'échantillonnage.

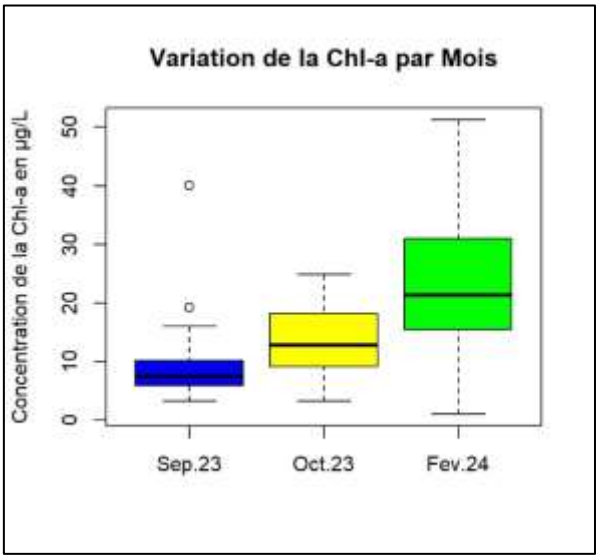


Figure 16: Variation moyenne de la concentration en chlorophylle (a) au cours des trois mois

On remarque qu'en moyenne les concentrations en Chl-a dans le milieu ont connu une légère augmentation à partir du mois d'octobre et ceci jusqu'au mois de février (toutes stations confondues). En outre, on note au niveau de la figure que pour le mois de septembre deux stations ont des valeurs qui s'éloignent des valeurs moyennes observées dans le milieu.

Il s'agit de la station 5 au niveau du lac et du point 5 au niveau de la lagune. Ce point est un prolongement du point 1. Il atteste donc de l'influence du lac sur la lagune en matière d'apport.

4.1.2. Etat trophique du complexe lagunaire

L'état trophique du milieu informe sur la teneur en nutriment présent dans le milieu. Lorsque les éléments nutritifs sont élevés, la concentration en chlorophylle (a) dans le milieu augmente. Et lorsqu'ils sont faibles dans le milieu, la concentration en chlorophylle (a) diminue. La planche 8 présente la carte de spatialisation des concentrations en Chl-a dans le complexe au cours des mois de septembre, octobre et février.

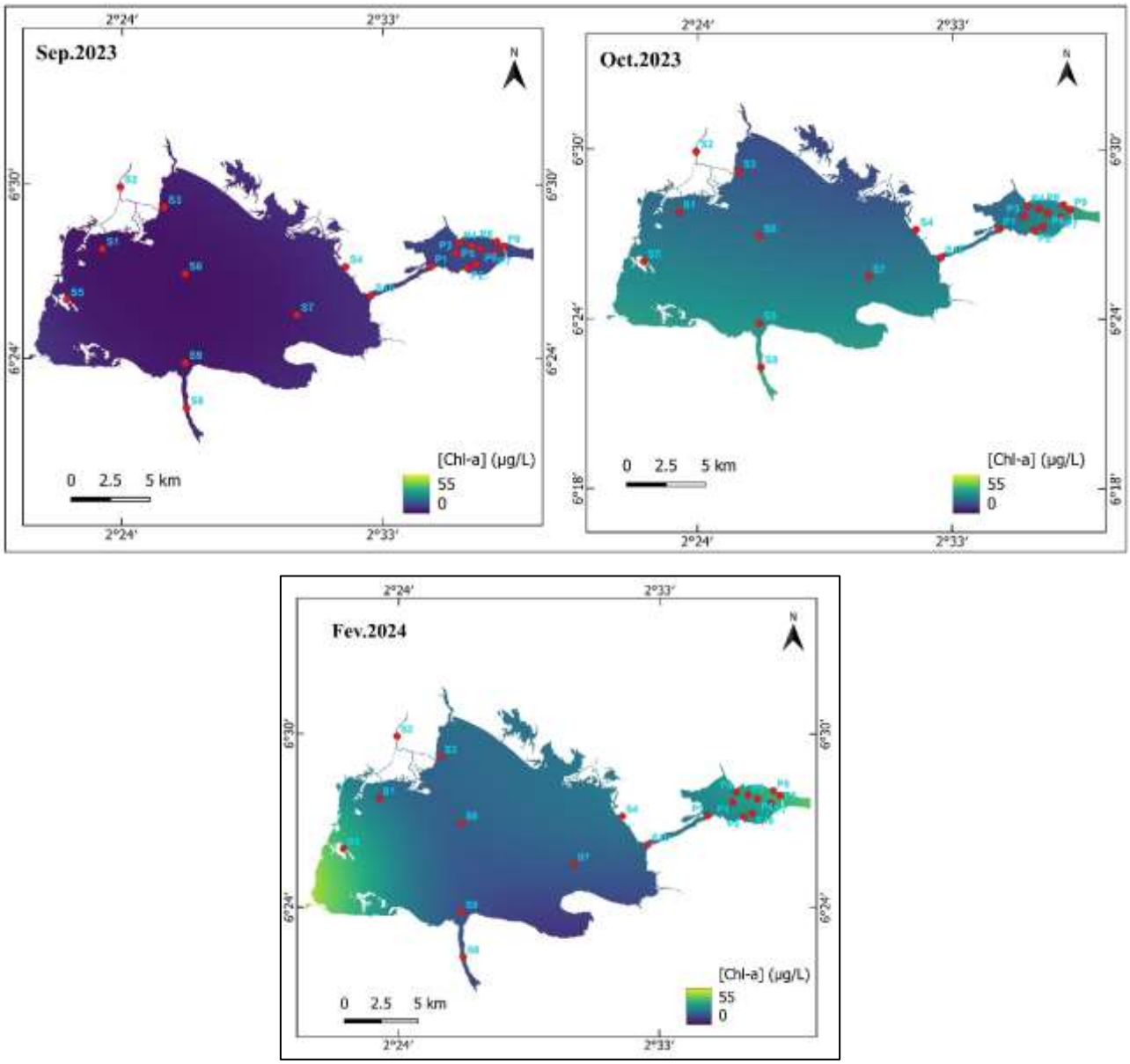


Planche 8 : Variation spatiale des valeurs de Chl-a

Au cours du mois de septembre, les valeurs de Chl-a sont fortes dans les zones Est et Ouest du lac et de la lagune. Contrairement à la partie centrale du lac qui présente des valeurs relativement faibles. Compte tenu des valeurs de Chl-a, obtenues dans les différentes zones, nous pouvons dire que le milieu est Eutrophe à l'Est et à l'Ouest et Mésotrophe au Centre du lac. Cependant, sur la lagune, le milieu présente le caractère Mésotrophe presque à tous les points. Pour le mois d'octobre on remarque qu'en moyenne presque tout le lac présente des concentrations de Chl-a élevées. En lien avec les valeurs obtenues nous pouvons dire qu'à toutes les stations du lac le milieu est mésotrophe, mais oligotrophe à la station 2 qui se trouve à Sô-Ava. Quant à la lagune, de l'Est vers l'Ouest, on constate que les valeurs sont élevées (moyennement mésotrophe).

Le mois de février quant à lui, permet d'observer une hétérogénéité du milieu pour les valeurs de Chl-a. On observe à l'Est du lac, c'est-à-dire vers la commune de Calavi, que les valeurs sont très élevées ; dans la partie centrale, on remarque une légère diminution des valeurs ; dans la partie Ouest (bras du fleuve Ouémé, canal Totchè) par contre les valeurs obtenues connaissent une légère augmentation. Sur la lagune, les valeurs les plus élevées sont perçues à l'Ouest de la lagune (vers le pont de Porto-Novo et vers le marché Ahouangbo).

Moyennement au cours de ce mois, on note une diminution des valeurs de Chl-a à certaines stations, mais une augmentation pour la plupart des stations. Les stations qui ont connu une diminution de leur concentration sont celles situées au niveau du Chenal de Cotonou.

4.1.3. Relation entre la Chl-a et la qualité physico-chimique de l'eau

La méthode statistique de corrélation a été appliquée aux valeurs de la Chl-a et aux différents paramètres physico-chimiques des différents points d'échantillonnage. La matrice de corrélation de Pearson présentée au tableau 13 illustre les potentielles relation entre la Chl-a et les autres paramètres. Les valeurs de la matrice de corrélation varient de -1 à 1. Le seuil fixé pour l'existence d'une corrélation est de 0,5.

Tableau 13 : Matrice de corrélation entre la Chl-a et les paramètres physico-chimiques

	pH	OD	Chl-a	Turb (NTU)	MES (mg/l)	SD (m)	PT
pH	1						
OD	-0,076	1					
Chl-a	-0,287	0,217	1				
Turb (NTU)	-0,273	0,067	**0,466**	1			
MES (mg/l)	-0,106	-0,139	**0,443**	**0,868**	1		
SD (m)	-0,127	-0,291	-0,213	-0,402	-0,445	1	
PT	-0,150	-0,134	**0,684**	**0,922**	**0,880**	-0,281	1

Comme l'illustre la matrice de corrélation consignée au tableau 13, la Chl-a se corrèle un peu faiblement avec la turbidité et les matières en suspension. Mais on observe une très bonne corrélation avec les valeurs du phosphore total. Il apparait dans ce tableau qu'il y a une relation entre la turbidité, les MES et le phosphore total. Aussi, on remarque de faible corrélation entre la Chl-a et la transparence. De l'analyse générale de tableau, nous pouvons dire que plus les matières en suspension augmentent dans le milieu, la turbidité devient élevée et la transparence diminue. De la même manière une forte teneur en phosphore total dans le milieu assure l'augmentation de la concentration en Chl-a.

4.2. Estimation de la concentration en chlorophylle (a) à partir des images satellitaires Landsat 8 et Sentinel-2

4.2.1. Estimation de la concentration en chlorophylle (a) à partir des images Landsat 8

Pour l'estimation de la concentration en Chl-a à partir des images satellitaires, nous avons procédé à l'acquisition des images correspondantes aux données antérieures afin de calibrer un modèle adéquat. Dans ce sens, les réflectances ont été extraites après traitement des images acquises en choisissant les bandes 3, 4 et 5 qui ont des longueurs d'onde proches du spectre d'absorption de la Chl-a. À partir de ces réflectances, des combinaisons ont été faites.

Les combinaisons ont été ensuite corrélées aux valeurs antérieures de terrain en vue de choisir le meilleur algorithme pouvant permettre d'estimer la Chl-a. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 14 ci-après.

Tableau 14: Résumé des modèles mathématiques établis pour Landsat 8

Combinaison	Equation Modèle	Paramètres Estimés R^2
$\frac{B4}{B3}$	Linéaire	0,0373
	Polynomiale 2	0,1521
	Polynomiale 3	0,2584
$\frac{B4-B3}{B4+B3}$ (NDCI)	Linéaire	0,0544
	Polynomiale 2	0,1007
	Polynomiale 3	0,2114
$B5 \times (\frac{1}{B3} - \frac{1}{B4})$	Linéaire	0,0427
	Polynomiale 2	0,1341
	Polynomiale 3	**0,2905**
$\frac{B4}{B3} \times (\frac{B4 - B3}{B4 + B3})$	Linéaire	0,0135
	Polynomiale 2	0,2490
	Polynomiale 3	0,2791

D'après le tableau 14 nous remarquons que les combinaisons de types deux bandes et trois bandes ont été effectuées, et ceux-ci avec différents ajustements de type linéaire, polynomiale d'ordre 2 et polynomiale d'ordre 3. Il est constaté que peu importe la combinaison de bande, les valeurs les plus élevées du coefficient de corrélation R^2 sont obtenues avec l'ajustement polynomiale d'ordre 3 en premier, l'ajustement polynomiale d'ordre 2 ensuite et pour finir par la régression linéaire qui s'avère être moins adaptée dans ce cas. Observons que la valeur la plus élevée **0,2905** est obtenue pour l'ajustement polynomiale d'ordre 3, avec une combinaison des trois bandes (B3, B4 et B5). On peut donc dire que l'association de plusieurs bandes dans ce cas précis représente mieux la réalité. Mais la valeur du paramètre estimé n'étant pas supérieure à 0,5 les images Landsat n'ont pas pu être exploitées pour estimer la chlorophylle dans le milieu. Une si faible valeur de R^2, ne saurait être adaptée pour évaluer la concentration en Chl-a dans le milieu.

La chlorophylle (a) absorbe la lumière fortement à des longueurs d'onde dans le bleu (près de 440 nm) et dans le rouge (près de 670 nm) du spectre électromagnétique. Cela se traduit par la teinte verte caractéristique des eaux naturelles abondantes en minéraux vert caractéristique des eaux naturelles riches en phytoplancton (Matthews, 2017).

Selon (ISEES, 2019), la capacité des images Landsat à détecter l'absorption à des longueurs d'onde dans le spectre du bleu (0,400 μm) et du rouge (0,600 μm) n'a pas encore été déterminée dans les eaux pures à faible concentration en chlorophylle (a). C'est pour cela que notre choix s'est accentué sur l'image Sentinel 2.

4.2.2. Estimation de la Chl-a à partir des images Sentinel-2

4.2.2.1. Algorithme d'estimation de la Chl-a à partir des images Sentinel-2

La méthodologie adoptée pour extraire les valeurs de réflectances dans le cadre des images Landsat, est la même pour extraire les valeurs de réflectances à partir des images Sentinel-2 (2A/2B). Après extraction de ces valeurs, les combinaisons de deux bandes à trois bandes ont été effectuées, mais ici avec les bandes B4, B5 et B6 sous la résolution 20 m.

Les valeurs de réflectances, ont permis de réaliser plusieurs régressions afin d'observer quelle loi s'ajuste le mieux aux valeurs de terrain. Également compte tenu des valeurs de R^2 obtenues (voir Tableau 15), nous avons procédé au calcul des erreurs standards d'estimation ainsi qu'au calcul de l'erreur quadratique moyenne qui est mieux adaptée pour le choix d'un modèle d'ajustement. Les résultats acquis sont détaillés dans le tableau 15 :

Tableau 15: Modèles mathématiques et paramètres d'estimation de la Chl-a ou de validation associée

Combinaison	Equation Modèle	Paramètres Estimés		
		R^2	ESE	EQMR (%)
$\frac{B5}{B4}$	Linéaire	0,51	7,52	8,29
	Polynomiale 2	0,51	7,21	7,98
	Polynomiale 3	0,53	7,47	8,12
$\frac{B5-B4}{B5+B4}$ (NDCI)	Linéaire	0,50	7,66	8,42
	Polynomiale 2	**0,52**	**7,17**	**7,95**
	Polynomiale 3	0,526	7,41	8,13

$B6 \times (\frac{1}{B4} - \frac{1}{B5})$	Linéaire	0,44	7,8	8,78
	Polynomiale 2	0,44	7,97	8,91
	Polynomiale 3	0,47	7,83	8,63
$\frac{B5}{B4} \times (\frac{B5 - B4}{B5 + B4})$	Linéaire	0,51	7,41	8,17
	Polynomiale 2	0,51	7,26	8,03
	Polynomiale 3	**0,54**	7,33	8,01

Le tableau 15 présente les modèles mathématiques et paramètres d'estimation ou de validation associés. Comme pour les images Landsat 8, on remarque que les fortes valeurs de R^2 sont observées pour la régression Polynomiale d'ordre 3, avec le maximum pour la méthode par multiplication et rapport simultané pour les bandes 4 et 5. En tenant compte des erreurs, cet ajustement n'a pas été choisi puisque, l'EQMR (8,01) se rapproche plus des 10%.

Il apparait de cette méthode d'analyse que, les coefficients de corrélation les plus faibles se présentent lors de l'association des trois bandes (B4, B5 et B6). Et ceci, peu importe les régressions établies (valeur variante entre 0,44 à 0,47).

Du Tableau 15, l'équation polynomiale d'ordre 2 sous le rapport des bandes 4 et 5 (NDCI) est celle qui présente une bonne régression avec un coefficient de corrélation (R^2=0,52) bien que les autres sont plus ou moins proches et supérieures. Elle est la plus appropriée pour l'estimation de la Chl-a, car, l'équation a un coefficient de corrélation (R^2) au-dessus de (0,5), donc est considéré comme modéré. L'ESE est moindre de tous (7,17) et l'EQMR (7,95%) étant inférieur à 10% atteste d'une précision excellente du modèle. Compte tenu de tous ces critères, cette équation est la meilleure option pour l'estimation de la Chl-a dans le complexe par l'exploitation des images Sentinel-2. Cela nous a donc permis par la suite d'estimer la Chl-a dans le milieu sur la base du modèle obtenu. La figure 17 présente, la loi de régression adaptée et choisie.

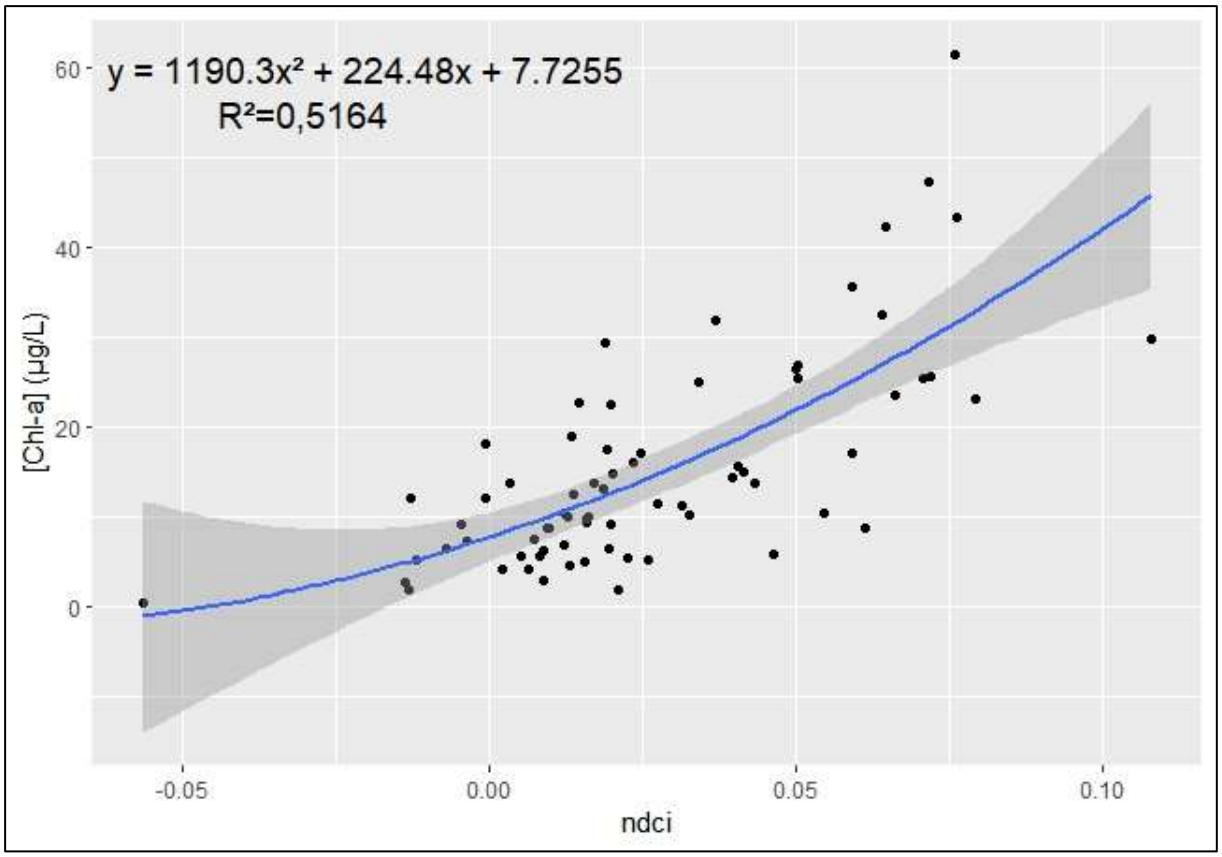


Figure 17: Loi de régression permettant le passage de la valeur de NDCI en chlorophylle (a)

La figure 17 présente les valeurs de Chl-a en fonction du NDCI (rapport entre les bandes 4 et 5). On remarque que la moyenne des valeurs de Chl-a s'ajuste correctement aux valeurs de NDCI avec la régression polynomiale d'ordre 2. Cela nous permet d'avoir l'équation de notre modèle calibré qui est $y = 1190,3x^2 + 224,48x + 7,7255$ qui peut se réécrire :

$$\textit{Chl-a(µg/L)} = 1190,3*NDCI^2+224,4*NDCI+7,7255 \quad \textit{(Equation 6)}$$

4.2.3. Test du modèle calibré sur le complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo

Le modèle établi et choisi sur la base des paramètres de calibration, n'est en réalité, qu'une équation mathématique basée sur deux variables : l'une indépendante qui est le NDCI et l'autre dépendante du premier qui est la concentration en Chl-a. Ce modèle sera utilisé pour estimer la concentration en Chl-a grâce aux valeurs du NDCI acquises sur les images satellites. Cette estimation est faite sur la période d'échantillonnage soit pour les mois de septembre, octobre 2023 et février 2024.

Pour chaque mois, nous avons choisi une image satellite qui couvre le complexe lagunaire. Les valeurs de NDCI ont été calculées avec le logiciel Qgis à partir de ces images acquises et extraites à chaque station de la zone d'étude. Ces valeurs ont permis l'estimation de la concentration de Chl-a à partir du modèle intégré.

- **Pour le mois de septembre**

Le tableau 16 présente les valeurs de Chl-a observées à partir des mesures de terrain ainsi que les valeurs calculées à partir du modèle. Au total, 12 (douze) stations ont été utilisées pour valider le modèle en fonction des stations qui présentaient moins de bruits.

Tableau 16 : Valeurs de Chl-a mesurées (27/09 et 29/09/2023) et valeurs de Chl-a calculées image du 27/09/2023 (Sentinel L2A 2-A)

Stations	Chl-a obs	Chl-a Cal
S1	3,204	8,298
S2	5,340	0,500
S6	6,408	7,598
S10	7,476	11,061
P1	9,612	8,812
P2	7,476	7,557
P3	9,612	7,037
P4	6,408	7,205
P7	10,680	15,060
P8	7,476	11,102
P9	16,020	20,911
P10	7,476	7,267

Ce tableau nous a permis d'établir le graphique entre les valeurs observées et calculées afin de pouvoir interpréter les résultats.

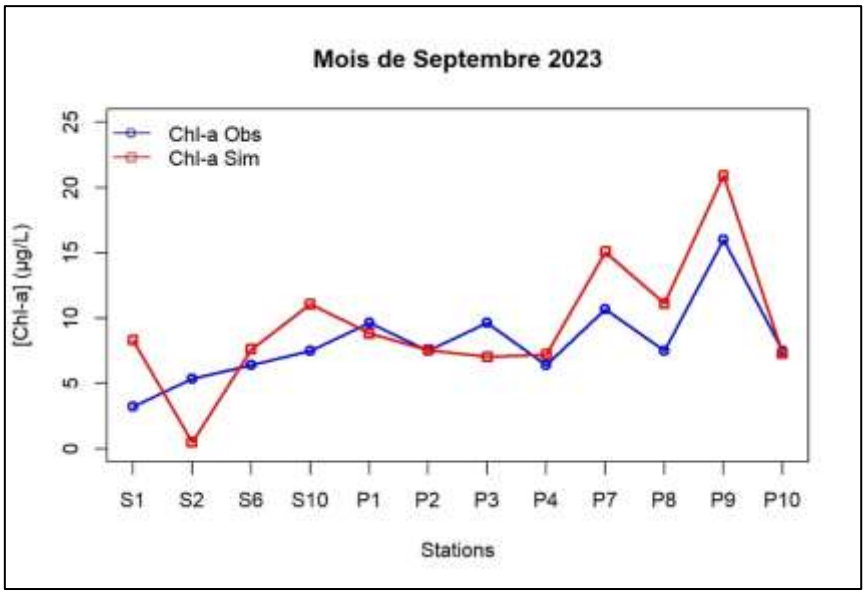


Figure 18: Représentation graphique des valeurs observées et des valeurs calculées pour le mois de Septembre 2023

De l'analyse du tableau 16 et du graphe 18, nous pouvons dire qu'en moyenne le modèle établi est fiable et efficace pour les valeurs observées. Les écarts observés sont minimes. On remarque que pour certaines stations les écarts sont faibles, mais pour d'autres ces écarts sont un peu élevés. Les écarts plus élevés sont observés pour les stations S1 et S2 au niveau du lac Nokoué et pour les points P7 et P9 pour la lagune de Porto-Novo.

- **Pour le mois d'Octobre**

Le tableau 17 présente les valeurs de Chl-a observées à partir des mesures de terrain ainsi que les valeurs calculées à partir du modèle. Pour ce mois du fait des bruits observés sur l'image, 11 stations ont été choisies pour valider le modèle.

Tableau 17: Valeurs de Chl-a mesurées (26/10 et 27/10/2023) et valeurs de Chl-a calculées image du 27/10/2023 (Sentinel L2A 2-A)

Stations	Chl-a obs	Chl-a Cal
S1	8,54	19,28
S2	3,20	4,37
S3	12,46	8,06
S4	9,61	8,59
S5	18,69	15,47
S6	5,34	8,23
S7	12,82	9,63

S8	12,82	7,80
S9	18,16	4,07
S10	17,09	5,31
P3	10,68	2,57

Ce tableau a servi de base pour la réalisation du graphique (figure 19) ci-après qui présente les valeurs de Chl-a observées pour le mois d'octobre ainsi que celles simulées à partir du modèle.

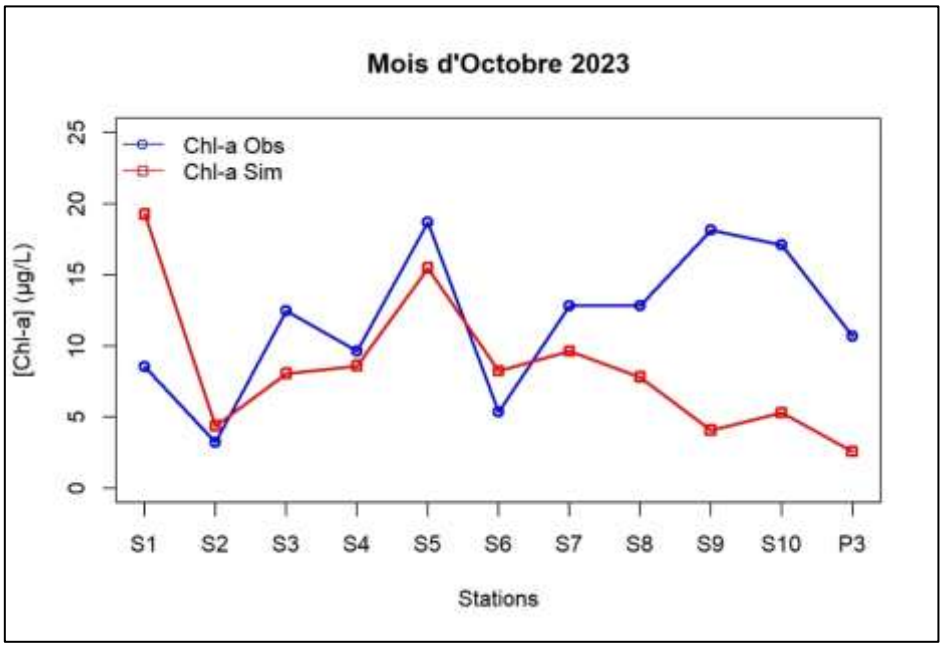


Figure 19: Représentation graphique des valeurs observées et des valeurs calculées pour le mois d'Octobre 2023

Comparativement au mois de septembre, on remarque ici une grande variation entre les valeurs observées et les valeurs calculées. Il n'y a que quelques stations qui présentent des écarts minimes. Et ceci s'observe plus vers les points qui se situent en bordure de la lagune. Nous pouvons dire que pour le mois d'octobre le modèle est faiblement efficace en lien avec les valeurs observées.

- **Pour le mois de février**

Le tableau 18 présente les valeurs de Chl-a observées à partir des mesures de terrain ainsi que les valeurs calculées à partir du modèle. Compte tenu des brouillards observés sur l'image, 14 stations ont été retenues pour la validation du modèle.

Tableau 18: Valeurs de Chl-a mesurées (28/02 et 29/02/2024) et valeurs de Chl-a calculées image du 29/02/2023 (Sentinel L2A 2-B)

Stations	Chl-a obs	Cha Cal
S1	21,36	16,65
S2	12,82	7,52
S4	24,56	15,43
S6	8,54	6,11
S7	14,95	6,55
S8	2,14	3,29
S9	1,07	3,27
S10	19,22	13,52
P1	16,02	15,19
P2	17,09	7,18
P4	20,29	15,47
P5	21,36	16,33
P6	33,11	28,12
P8	39,52	36,84

Ce tableau nous a permis de réaliser le graphique (figure 20) ci-dessous présentant une simulation des valeurs calculées et des valeurs observées.

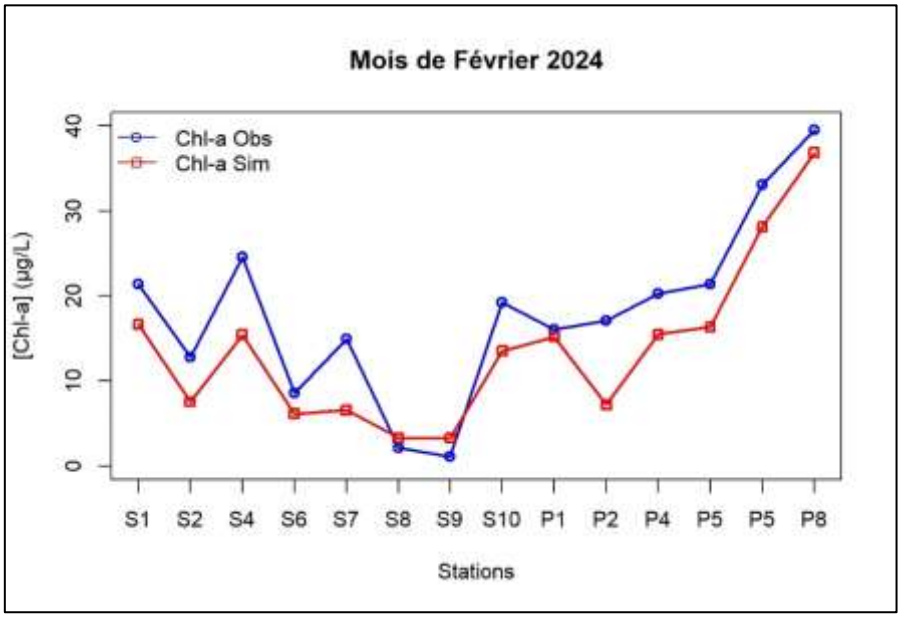


Figure 20 : Représentation graphique des valeurs observées et des valeurs calculées pour le mois de Février 2024

D'après la figure 20 nous pouvons remarquer que pratiquement tous les points observés présentent des écarts minimes par rapport aux valeurs calculées du modèle. Nous pouvons dire que le modèle a été efficace et fiable par rapport aux mois précédent. Les écarts observés représentent juste une partie minime de l'ensemble.

4.3. Performance du modèle

Pour valider le modèle construit, des critères d'évaluation sont calculés. Ces critères nous ont permis d'apprécier la robustesse du modèle à représenter la chlorophylle (a). Le tableau 19 présente les valeurs des critères de performance.

Tableau 19 : Critères de performance du modèle

Mois	R^2	NASH	RMSE
Septembre 2023	0,623	0,858	2,806
Octobre 2023	0,329	0,665	1,603
Février 2024	0,885	0,701	0,634

De l'analyse du tableau 19 nous pouvons dire que les valeurs les plus élevées varient d'un critère à un autre. La plus forte corrélation est obtenue pour le mois de février. En ce qui concerne le critère de NASH, la valeur la plus élevée est obtenue pour le mois de septembre. Quant au RMSE la valeur minimale est obtenue pour le mois de février. Ainsi, quel que soit le critère de performance choisi le mois d'octobre présente les valeurs les moins acceptables (valeur acceptable uniquement pour le RMSE). Les estimations de la chlorophylle (a) pour le mois de février correspondent mieux aux valeurs mesurées.

Nous pouvons donc conclure que le modèle est acceptable, et fiable pour l'estimation de la Chl-a dans le complexe.

4.4. Discussion

L'objectif de notre travail est d'estimer la concentration en chlorophylle (a) (Chl-a) dans le complexe lagunaire à partir des images satellites Landsat et Sentinel. Dans un premier temps nous avons observé la variabilité saisonnière et spatiale de la concentration en Chl-a dans le milieu, dans un second temps, nous avons testé les algorithmes en vue d'identifier l'algorithme qui permet de mieux représenter la variation de la chlorophylle (a) dans le complexe en se basant sur des critères de performance couramment utilisés.

De l'analyse des résultats, les valeurs obtenues pour l'ensemble des trois mois d'étude se retrouvent dans la gamme de 1,067 µg/L à 51, 264 µg/L avec une moyenne de 15,30 ± 2,00 µg/L. Ces valeurs sont proches de celles obtenues par Mama (2010) sur le lac Nokoué au cours des mois de Mai à Novembre (10 à 60 µg/L). Les écarts minimes observés pourraient être dus à la différence de répartition spatiale et l'écart entre les saisons. Nous pouvons ainsi conclure que les valeurs de Chl-a des eaux du complexe varient selon la période de mesure. La concentration en Chl-a dans le complexe varie d'une station à une autre. Les valeurs sont non homogènes donc témoignent de la représentativité de nos stations et des échantillons recueillies. La valeur la plus élevée s'enregistre au niveau de la station 5 sur le lac Nokoué et au point 8 pour la lagune de Porto-Novo. Notons que la station 5 sur le lac se situe à proximité de la ville de Calavi, proche de l'embarcadère de Ganvié. Ces fortes concentrations observées au niveau de cette station seraient dues à plusieurs facteurs dont :

- le rejet direct d'éléments nutritifs d'une part dans le lac à l'entrée de l'embarcadère mais aussi vers le pont de Djonou d'autre part ;
- la dégradation de la matière organique facilitée par les techniques prohibées de pêche les « acadjas » qui occupent majoritairement le complexe ;
- les apports d'eaux usées issues de la ville de Cotonou et de Calavi.

Ces résultats s'apparentent à ceux de Mama *et al.* (2011), qui estime que la variabilité spatiale de la Chl-a est très importante dans le lac Nokoué et que les taux élevés se retrouvent moyennement dans cette zone du lac en raison du fait que ce secteur soit fortement anthropisé. Selon Onyema *et al.* (2017), le transport des polluants qui proviennent des activités anthropiques, représente une source majeure susceptible d'augmenter la concentration en chlorophylle (a) à un point précis d'un écosystème.

Du mois de septembre au mois de février, on note une diminution progressive de la concentration en Chl-a à quelques stations du complexe. Ces stations sur lesquelles ces observations sont faites sont situées respectivement à l'entrée et dans le chenal de Cotonou.

Les mois de septembre et d'octobre, représentent la période de montée effective des eaux. Une diminution de la salinité des eaux est observée. Tandis que pour le mois de février la salinité est élevée dans le milieu. Cette variation de la salinité pourrait expliquer les valeurs obtenues à ces stations. Cela témoigne de la forte dynamique observée en raison de la connexion avec l'océan atlantique.

Majoritairement dans le complexe, les valeurs de Chl-a augmentent de septembre à février. La montée des eaux dans le complexe est un facteur qui constitue une source d'apport d'éléments nutritifs issus des activités menées sur le bassin versant. Les eaux provenant des tributaires et du lac sont acheminées par le chenal vers l'océan ce qui entraine une augmentation des matières en suspension dans le milieu et d'éléments nutritifs (Atanlé *et al.,* 2013). Ceci contribuerait à l'augmentation de la concentration de Chl-a au cours de ces mois. Aussi ces fortes valeurs de Chl-a dans le milieu au cours du mois de février indiquent une importante production primaire liée à la biomasse algale. Les résultats obtenus sont proches de ceux obtenus par Zandagba *et al.* (2016) sur le lac Nokoué et ceux de Achoh *et al.* (2021) sur le complexe lagunaire lac Toho-Todougba confortant les résultats obtenus. Onyema *et al.* (2017) dans la lagune du Nigéria, ont montré que pendant la saison sèche une biomasse de phytoplancton élevée est enregistrée comparativement à la saison pluvieuse. Cela pourrait être due à un facteur de limitation de la lumière ou des nutriments. Il a été noté que des situations de couverture nuageuse plus élevée associées à la saison des pluies nuisent à l'estimation de la chlorophylle (a) et au développement de la biomasse phytoplanctonique.

En se basant sur la grille de classification des milieux humides à partir des valeurs de chlorophylle (a) (Klemas, 2011), le complexe fluvio-lagunaire est classé oligotrophe à certains points, mésotrophe à certains et eutrophes à d'autres. Cela atteste du fait que les apports en nutriments subissent une dynamique d'une zone à une autre. Les résultats obtenus sont contraires à ceux de Zandagba *et al.* (2016) et Djihouessi (2018) indiquant homogénéité et hypereutrophie du milieu. Selon Henriquez *et al.* (2007), les principaux facteurs qui affectent l'abondance et la distribution de la chlorophylle (a) dans la zone côtière sont les forces physiques qui transportent non seulement le phytoplancton, mais aussi les nutriments vers la zone euphotique.

L'Indice de Différence Normalisé de la Chlorophylle (NDCI) a été proposé par (Mishra & Mishra, 2012) pour estimer la concentration de chlorophylle (a) à partir des données de télédétection des eaux productives turbides estuariennes et côtières.

Cet indice utilise réellement les longueurs d'onde qui répondent au spectre d'absorption de la Chl-a. Dans le cadre de nos travaux les performances obtenues avec le NDCI sont les meilleures. Nos résultats s'apparentent à ceux de (Bahru, 2022) et de (Behnaz *et al.,* 2022). Ils ont montré que les images Sentinel-2 répondaient mieux pour estimer la concentration en Chl-a dans un milieu en appliquant le NDCI aux valeurs de réflectances. Aussi selon Yadav *et al.* (2019) une légère sous-estimation de la chlorophylle (a) est observée pour les images Landsat 8. Pour les eaux d'un lac, les résultats de Sentinel-2A étaient relativement meilleurs ($R^2 > 0,70$) que ceux de Landsat 8, avec une RMSE < 1,0 µg/L. Les résultats obtenus seront utiles pour évaluer la productivité primaire des eaux douces et des eaux côtières.

Le modèle ainsi calibré, est validé avec les données collectées durant la période d'échantillonnage (Septembre-Octobre 2023 et Février 2024). De l'analyse de nos résultats, nous remarquons que les corrélations entre les valeurs in-situ et les valeurs simulées présentent des écarts qui sont minimes par rapport à la moyenne. Le plus grand écart est observé pour le mois d'octobre correspondant à la période des hautes eaux. Les images satellites correspondantes à ce mois présentent des bruits (nuages). Les bruits sont des facteurs qui influencent les valeurs de réflectance pour chaque station. Les valeurs de réflectances utilisées dans ce cas sont extraites des stations présentant moins de nuage. Ces écarts justifient la variation des critères de performances obtenus pour chaque mois. L'algorithme calibré et validé a permis d'estimer la chlorophylle (a) dans le complexe avec les performances de 0,623, 0,3292 0,8852 pour le R^2, de 0,858, 0,6651 et 0,7008 pour le NASH et 2,806, 1,603, 0,6341 pour le RMSE respectivement pour les mois de septembre, octobre et février. Ces performances concordent avec ceux de Behnaz *et al.* (2022), Gabila-Buma *et al.* (2020) ainsi que ceux de Hafeez *et al.* (2022) ayant montré que les bruits sont des facteurs influençant l'estimation de la chlorophylle (a).

De manière générale, l'estimation à distance de la chlorophylle (a) dans les estuaires turbides et productifs est difficile en raison de la complexité optique de ces eaux (Vinel, 2022). Bien que des progrès récents aient été réalisés grâce à l'utilisation d'approches empiriques pour l'estimation de la chlorophylle (a) dans ces environnements, la compréhension de la relation entre la réflectance spectrale et la chlorophylle (a) est principalement basée sur les systèmes estuariens tempérés et subtropicaux. De nombreuses études ont montré que d'autres images telles que MODIS, WorldView3 peuvent améliorer l'estimation de la Chl-a à partir des images, ceci en fonction de leurs caractéristiques spectrales (El-Alem *et al.,*2012 et Gabila-Buma *et al.,* 2020).

CONCLUSION

Au terme de la présente étude qui avait pour objectif principal d'estimer la concentration en chlorophylle a dans le complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo, plusieurs résultats traitants de la variation spatiale de la chlorophylle (a), ainsi que le modèle validé ont été obtenus.

La dynamique spatiale et temporelle de la Chl-a dans le complexe, nous permet de dire que la concentration en Chl-a est très élevée sur le lac au niveau de la station qui se trouve proche de la ville d'Abomey-Calavi. Sur la lagune le point de concentration le plus élevé se retrouve proche du pont. Ces deux stations représentent des points d'injonction en termes d'apport en nutriment dans le milieu. Ce sont ces apports qui favorisent la prolifération des plantes aquatiques et donc la concentration en Chl-a dans le milieu. On note une variation croissante de la concentration en Chl-a du mois de septembre au mois de février. Aussi remarquons nous que les zones tributaires pour les trois mois d'échantillonnages sont moyennement mésotrophes. Cela stipule que ce sont également des points sensibles dont la surveillance doit être régulière. L'état trophique du lac nous révèle que, le milieu est oligo- mésotrophe à certains points et eutrophe à d'autres. Dans les écosystèmes aquatiques, il existe une relation entre les paramètres physico-chimiques ainsi que les paramètres biologiques. Dans ce sens au cours de nos travaux, nous avons observé une bonne corrélation entre la Chl-a et le phosphore total. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle le temps et l'espaces sont des facteurs qui agissent sur la concentration en Chl-a.

Dans le but de trouver l'algorithme qui représenterait au mieux nos données d'observations, un modèle a été établi sur la base de données d'archives. Les différents ajustements ainsi que les corrélations observées nous ont permis d'éliminer l'utilisation de Landsat 8 pour la mise au point de l'algorithme et d'utiliser uniquement Sentinel-2. Les différentes réflectances étant extraites au préalable, le meilleur rapport correspondant au NDCI pour un ajustement polynomial d'ordre 2 a été choisi et soumis à la validation en vue d'apprécier la performance de ce dernier. Il est important de préciser qu'au cours de nos travaux, compte tenu des limites de la télédétection, seules les stations ayant moins de nuages ont été retenues.

Ce modèle a permis d'estimer effectivement les valeurs de Chl-a dans le complexe, avec des performances acceptables ce qui attestent des hypothèses émises.

LIMITES DE L'ETUDE

Dans le cadre de nos travaux, l'estimation de la Chl-a dans le milieu a été mieux réalisée grâce aux images Sentinel-2. Les images Landsat 8 n'ont pas permis d'avoir des résultats acceptables. Ceci est due à la faible corrélation entre les rapports de bandes et les valeurs d'observation de la Chl-a (anciennes données). Par contre les corrélations obtenues pour les images Sentinel-2 ont permis d'avoir un modèle mieux calibré pour estimer les valeurs de Chl-a. Les images satellites Landsat 8 ont une résolution temporelle faible par rapport aux images Sentinel-2 (16 jours contre 5 jours). Aussi la résolution spatiale des images Landsat 30 m ne permettent pas d'avoir de bons résultats (30 m contre 20 m). Plus la résolution est petite mieux la qualité de l'image est acceptable et aisé**e** à l'utilisation (Hafeez *et al.,* 2022). Une bonne estimation de la chlorophylle (a) nécessite une longue série de données collectées en vue d'améliorer la robustesse de l'algorithme utilisé.

SUGGESTIONS ET PERSPECTIVES

Au regard des résultats obtenus dans le cadre de ce projet de recherche, plusieurs actions doivent être menées à différentes échelles afin d'effectuer un bon suivi des masses d'eau continentales. L'équipe mise en place pour le suivi de la qualité de l'eau du complexe et qui génère une base de données sur les différents paramètres d'évaluation se doit d'accomplir brillamment les étapes ci-après :

- **Données pour le prétraitement**

Les satellites SENTINEL 2 ont un cycle de passage défini et automatique sur une surface terrestre donnée. Ayant rapport avec les ressources d'eau, une équipe doit être mise sur pied pour déjà :

- établir le calendrier de passage du satellite au-dessus de la ressource d'eau à étudier ;
- veiller à ce que le calendrier établi prenne en compte la période d'évaluation de la qualité de la ressource et opter pour des dates exactes de passage des satellites pour les mesures de terrain ;
- veiller à la variation saisonnière afin d'effectuer un choix permettant d'avoir des images moins bruitées ;
- rechercher d'autres satellites qui mettent à disposition des images avec une meilleure résolution et une fréquence plus restreinte (MODIS, WorldVIew 3 etc…).

En termes des données sur les paramètres de qualité, l'équipe de recherche doit standardiser les méthodes de mesure des lacs pour que toutes les valeurs collectées puissent être comparées les unes aux autres et respecter les protocoles d'analyse des différents paramètres. La mise en place d'une base de données s'avère nécessaire. Cette base de données sera destinée à être complétée par la suite lorsque d'autres campagnes seront menées. Plus elle sera fournie et répartie sur une large gamme de valeurs, meilleure sera la robustesse du modèle à réaliser pour la corrélation, et mieux on pourra étudier l'influence de certains facteurs.

- **Corrélation Analytique**

Dans la perspective d'obtenir de meilleures corrélations et vue l'objectif final qui est l'obtention d'un modèle d'estimation de paramètre de qualité de l'eau, nous recommandons : d'établir un programme de codage afin d'obtenir une réflectance issue des formes de combinaisons possibles des bandes spectrales, donc un procédé de combinaisons possédant une ou plusieurs opérations à la fois pour l'obtention d'une meilleure corrélation.

- **Développement d'une équation mathématique**

Bien qu'il y ait des résultats favorables observés au niveau des combinaisons mathématiques effectuées, de meilleures approches pourraient être obtenues à travers d'autres équations mathématiques et des assemblages d'algorithmes.

PERSPECTIVES

La présente étude devrait être poursuivie et approfondie afin de saisir les nouvelles opportunités de recherches qui s'offrent. Pour ce faire il serait judicieux de :

- explorer des approches visant à éliminer les bruits en vue d'une couverture temporelle plus large ;
- combiner les algorithmes afin d'améliorer les performances des estimations ;
- établir un modèle spécifique aux différentes saisons de l'écosystème ;
  étendre la période d'étude afin d'avoir une bonne base de données ;
- mettre en place un outil innovant pour le suivi de la qualité de l'eau des écosystèmes aquatiques.
- combiner plusieurs algorithmes (modèles mixtes) pour améliorer les résultats ;
- identifier les paramètres de qualité d'eau qui influencent l'estimation de chlorophylle (a)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Achoh, M., Agadjihouèdé, H., Gangbè, L., Houssou, A., Aïzonou, R., Ahouanssou Montcho, S., & Chikou, A. (2021). Ecological status of a West African lagoon complex under anthropogenic pressure, Toho-Todougba complex, Benin. International Journal of Aquatic Biology, V(9), 279-289p.

2. ADE. (2022). Agence Nationale Des Eaux (Rapport de perfomance de l'agence de l'eau Seine-Normandie), 43p.

3. Adjagodo, A., Agassounon, D., Kèlomè, C., & Lawani, R. (2016). Flux des polluants liés aux activités anthropiques, risques sur les ressources en eau de surface et la chaine trophique à travers le monde : synthèse bibliographique. Int. J. Biol. Chem. Sci, 3(10), 1459-1472p.

4. Adjibogoun, D. H. (2015). Diversité et de l'exploitation des poissons du complexe lagunaire lac Nokoué-Lagune de Porto-Novo au sud du Bénin. Mémoire de Master Professionel, Université d'Abomey-Calavi, Faculté des sciences agronomiques (Département d'Aménagement et de Gestion de l'Environnement), Abomey-Calavi, 74p.

5. Agbohessi, P., Guedegba, L., Pelebe, R., & Imorou Toko, I. (2023, Septembre). Exposition de la faune ichthyenne et autres animaux aquatiques aux polluants organiques, chimiques et biologiques dans le lac Nokoué au Sud du Bénin: Synthèse documentaire. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 360-372p.

6. Alvain, S. (2005). Étude de la distribution des principaux groupes de phytoplancton par télédétection satellitaire: Développement de la méthode PHYSAT à partir des données GeP&CO et application à l'archive SEAWIFS entre 1998 et 2004. Thèse de doctorat, Université Paris – Dénis Didérot, Paris, 249p.

7. Amoussou, A. R. (2020). Pollution mercurielle des eaux des milieux lacustres: cas des lacs Ahémé et Nokoué au Sud Bénin. Mémoire de Master Professionel, Université d'Abomey-Calavi, Institut National de l'eau (Ecohydrologie), Abomey-Calavi,94p.

8. Ansa-Asare, O., Marr , I., & Cresser, M. (2000). Evaluation of modeled and measured patterns of dissolved oxygen in a freshwater lake as an indicator of the presence of biodegradable organic pollution. Water Research, IV(34), 1079–1088p.

9. Atanlé, K., Bawa, L. M., Kokou, K., Djaneye-Boundjou , G., & Edorh, M. (2013). Distribution saisonnière du phytoplancton en fonction des caractéristiques physico-chimiques du lac de Zowla (Lac Boko) dans le Sud- Est du Togo : cas de la petite saison sèche et de la grande saison sèche. Journal of Applied Biosciences(64), 4847 – 4857p.

10. Ayad, W. (2017). Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines : cas des puits de la région d'el-harrouch (Wilaya de Skikda). Universite Badji mokhtar – Annaba, Faculté des Science (microbiologie). Alger: Universite Badji mokhtar – Annaba, 116p.

11. Bachari, H. F. (2009). Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire. Université du Valde Marne Paris, Sciences de l'Univers et de l'Environnement, Paris, 39p.

12. Bahru, J. (2022). Transformation of the normalized difference chlorophyll index to retrieve Chlorophyll-a concentrations in Manila bay. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 5p.

13. Barbe, J., Lafont, M., Mallet, L., Mouthon, J., Phillipe, M., & Vey, V. (2003). Actualisation de la méthode de diagnose rapide des plans d'eau – Analyse critique des indices de qualité des lacs et propositions d'indices de fonctionnement de l'écosystème lacustre. CEMAGREF, 35p.

14. Behnaz, K., Seyed Hossein, H., & Hossein, A. (2022,). Performance of Sentinel-2 and Landsat-8 satellites in estimating chlorophyll-a concentration in a shallow freshwater lake. Resarsh Square, 1-15p.

15. Belghiti, M., Chahlaoui, A., Bengoumi, D., & El moustaine, R. (2013). Etude de la qualité physico-chimique et Bactériologique des eaux souterraines de la Nappe plio-quaternaire dans la région de meknès (maroc). Larhyss Journal, 14, 21-36p.

16. Ben Hadid, N. (2021). Machine Learning modeling techniques for forecasting the trophic state in a restored South Mediterranean lagoon using Chlorophyll-a in

connection with the physico-chemical variables. Université de Perpignan , Institut national agronomique de Tunisie. Hal Open Sciences, 195p.

17. Bensiaahmad, M., & Ghalmi, K. (2013). Caractérisation physico-chimiques de la pollution d'Oued Meskiana. Mémoire de Mastère, Service de Biologie, Alger, 74p.
18. Bouchebbah, S., & Ayache, K. (2011). Caractéristique des eaux de surfaces de l'Oued Agrioun de la région de Bejaia. Mémoire d'Ingénierie, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Ecologie et environnement, 53p.
19. Brahim, A., & Nebih, A. (2020). Classification des images satellitaires pour l'aide à la gestion des catastrophes naturelles en utilisant l'apprentissage profond. Mémoire de Master, Université Saad Dahleb-Blida 1, Faculté des Sciences:Département d'Informatique, Alger, 117p.
20. Chaouki, M. (2016). Cours Pollution (Air, Eau, Sol). Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées (Département de Génie des procédés), 50p.
21. Chouti, W. (2011). Etude de la pollution chimique d'une lagune tropicale (eaux, sédiments, poissons) : Cas de la lagune de Porto-Novo (sud Bénin). Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Faculté des Sciences et Techniques (FAST), 100p+Annexes.
22. CRSES. (2006). Comité de Recherche et Sensibilisation d'Eau Secours.
23. Dagnelie, A. (2020). Surveillance de la turbidité de l'eau de la Meuse à l'aide de l'imagerie Sentinel-2. Mémoire de Master, Université catholique de Louvain, Faculté des bioingénieurs, Louvain, 89p.
24. Dèdjiho, C., Mama, D., Tomètin, L., Nougbodé, I., Chouti, W., Sohounhloué, C., & Boukari, M. (2013). Évaluation de la qualité physico-chimique de certains tributaires d'eaux usées du lac Ahémé au Bénin. Journal of Applied Biosciences(70), 5608-5616p.
25. Degrémont. (2004). Mémento techniques de l'eau (10eme édition). Tec et doc, 1928p.
26. Djihouessi, M. B. (2018). Nutrient budget approach for the management of eutrophication and ecosystem services of Lake Nokoué. Philosophiae Doctor, University of Abomey-Calavi, Hydrology and Integrated Water Resource Management (H-IWRM), 191p.

27. Dovonou, F., Aina, M., Boukari, M., & Alassane, A. (2011, Août). Pollution physico-chimique et bactériologique d'un écosystème aquatique et ses risques écotoxicologiques : cas du lac Nokoue au Sud Benin. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 1590-1602p.

28. El Alem, A. (2014). Développement d'une approche de suivi des fleurs d'eau d'algues à l'aide de l'imagerie désagrégée du capteur Modis, adaptée auc lacs du Québec méridional. Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique Centre Eau Terre Environnement, Québec, 265p.

29. El Alem, A., Chokmani, K., Laurion, I., & El-Adlouni, S. (2012, August 13). Comparative analysis of four models to estimate Chlorophyll-a concentration in case-2 waters using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Imagery. Remote Sensing(4), 2373-2400p.

30. Elegbede, M. B., Koumolou, L., N'tia, F., Atikou, M., Labite, H., Aina, M., & Edorh, P. (2019). Inconvenience of traditional fishing practice on aquatic ecosystem of Nokoué Lake in Benin Republic (West Africa). Int.J. Biol. Chem. Sci., 7(13), 14p.

31. Gabila-Buma, W., & Lee, S.-I. (2020). Evaluation of Sentinel-2 and Landsat 8 Images for Estimating Chlorophyll-a Concentrations in Lake Chad, Africa. Remote sensing (Remote Sens. 2020, 12, 2437), 18p.

32. Gboko, A., Akobe , A., Aka, A., Aka, C., Kouamé, A., Adou, K., . . . Aka, K. (2019). Etat d'eutrophisation de la lagune continentale Ono (Bonoua sud-est de la Côte d'Ivoire) dans un environnement agro-industriel durant la crue du fleuve Comoé. International Journal of Biological and Chemical Sciences, VI(13), 2942-2958p.

33. Gendronneau, M. (2006). Etude des secteurs du Croisic et de Pen-Bé : Estimation des apports continentaux et évaluation des stocks conchylicoles. Programme de surveillance et évaluation de l'état des eaux littorales. IFREMER, 267p.

34. Gnohossou, P. M. (2006). La faune benthique d'une lagune Ouest Africaine (le Lac Nokoué au Bénin), diversité, abondance, variations temporelles et saptiales, place dans la chaine trophique. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Discipline Scientifique/Ecologie : Environnement Aquatique, 184p.

35. Hafeez, S., Wong, M. S., Abbas, S., & Asim, M. (2022). Evaluating Landsat-8 and Sentinel-2 Data Consistency for High Spatiotemporal Inland and CoastalWater Quality Monitoring. Remote Sensing(14), 20p.

36. Hafeez, S., Wong, M., Abbas, S., Nichol, J., & Kwok, C. Y. (2018). Detection and Monitoring of Marine Pollution Using Remote Sensing Technologies, 20p.

37. Hamouche, S., & Sebai, K. (2021). Apport de la télédétection et des SIG pour le suivi de la qualité physico chimique des eaux de surface. Cas de Barrage de Beni Haroun (W. de Mila). Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, Hydraulique, 83p.

38. Henriquez, L., Daneri, G., Munoz, C., Montero, P., Veas, R., & Palma, A. (2007). Primary production and phytoplanktonic biomass in shallow marine environments of central Chile: effect of coastal geomorphology. Estuar Coast Shelf Sciences(73), 137-147p.

39. Houli, Z., & Merrouche, D. (2017). Suivi de la dynamique intrannuelle de la chlorophylle dans les eaux côtières Est de Jijel à partir d'images satellitaires. Mémoire de Master, Université Mohammed Seddik Ben Yahia-Jijel, Biologie (Monitoring des hydro systèmes continentaux), 44p.

40. Hounsounou, E. (2013). Hygiène, assainissement et qualité des sources d'approvisionnement en eau dans le sixième arrondissement de Cotonou. Mémoire de Master, Abomey-Calavi, 56p.

41. ISEES, I. S. (2019). Changes in the Trophic State Of Lake Valencia (Venezuela) from 2013 to 2019 According to Remote Sensing And Modelling Data. Atlantis express, 6p.

42. Kias, Z. (2020). Evaluation de la qualité des eaux du barrage El Agrem par utilisation des images satellitaires. Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Benyahia – Jijel, Hydrobiologie marine et continentale, Benyahia – Jijel, 53p.

43. Klemas, V. (2011). Remote sensing of algal blooms: an overview with case studies. Journal Coastal Research(28(1A)), 34-43p.

44. Larose, M.-A. (2014). Prédictions de la qualité de l'eau d'un milieu flavio-lacustre peu profond (Lac Saint-Pierre) à l'aide d'images Thematic Mapper de LANDSAT 5 ET 7. Mémoire de Maîtrise, Université du Québec, Sciences de l'environnement, 64p.

45. Laurentides, C. (2009). La chlorophylle a. Fiche technique, 1p.

46. Lawani, R. A. (2013). Evaluation des éléments traces métalliques et spéciation chimique du cuivre et du zinc dans les eaux et sédiments du lac Nokoué. Mémoire de Master Professionel, Université d'Abomey-Calavi, Hydrologie Appliquée, Option : Ecohydrologie, 80p.

47. Li , M., Xie, G., Dai , C., Yu , L., Li , F., & Yang, S. (2009). A study of the relationship between the water body chlorophyll a and water quality factors of the off coast of Dianchi Lake. Yunnan Geographic Environment Research, 2(21), 102–106p.

48. Liu, M., Wei, J., Wang, G., & Wang, F. (2017). Water resources stress assessment and risk early warning–a case of Hebei Province China. Journal of Ecological Indicators, 358-368p.

49. Mama, D. (2010). Méthodologie et résultats du diagnostic de l'eutrophisation du Lac Nokoué (Bénin). Thèse de doctorat, Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, Limoges, 117p.

50. Mama, D., Aina, M., Alassane, A., Boukari, O., Chouti, W., Deluchat, V., . . . Baudu, M. (2011). Caractérisation physico-chimique et évaluation du risque d'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 2076-2093p.

51. Mama, D., Deluchat, V., Bowen, J., Chouti, W., Yao, B., Gnon, B., & Baudu, M. (2011). Caractérisation d'un Système Lagunaire en Zone tropicale: Cas du Lac Nokoué (Bénin). European Journal of Scientific Research, 56(4), 516-528p.

52. Matthews, M. W. (2017). Bio-optical Modeling of Phytoplankton Chlorophyll-a. Bio-Optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters, 157–188p.

53. Merouani, S., & Bouguedah, A. (2013). Etude de la pollution chimique et la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla, 59p.

54. Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sensing of Environment(117), 394–406p.

55. Niyonkuru, C., Lalèyè, P., Villanueva, C., & Moreau, J. (2003). Population parameters of main fish species of Lake Nokoué in Benin. PICARTS Edition–Bénin, 192p.

56. Ogutu-Ohwayo, R., Hecky, R., & Cohen, S. K. (1997). Human Impacts on the African Great Lakes. Environmental Biology of Fishes. 50, 117–137p.

57. Olmanson, L., Brezonik, P., & Bauer, M. E. (2015). Remote sensing for regional lake water quality assessment : capabilities and limitations of current and upcoming satellite systems. (T. Y. (Éd.), Éd.) Advances in watershed science and assessment. Springer International Publishing 111-140p.

58. Onyema, I., Nmor, S., & Agboola, J. (2017). Estimate of water discharge and nutrient fluxes from Ogun River on Chlorophyll-a dynamics of the Lagos Lagoon,Nigeria. Nigerian Journal of Fisheries and Aquaculture, VI(2). Récupéré sur http://www.unimaid.edu.ng, 12p.

59. Paolini, G. (2003). Responsable de l'aquarium d'Aix les Bains. Entretien téléphonique du 7. 15-20p.

60. Paradis, G. (1976). Contribution à l'étude de la flore et de la végétation du bord de mer du Dahomey. Iill. Museum Nat Hist. Nature(383), 33-67p.

61. PDM. (2021-2026). Plan de Développement Municipal (PDM) de la Ville de Porto-Novo (Octobre 2021 à Septembre 2026). Porto-Novo, 170p.

62. Pedrocca, P. (2013). Estimation du niveau de Chlorophylle-A dans des lacs en utilisant l'observation à distance par satellite. Mémoire de Maîtrise, Université du Québec , Département d'informatique et d'ingénierie, 74p.

63. PS-Eau. (2012). Accès à l'eau potable dans les pays en développement, 18 questions pour des services durables. Guide pratique, 50p.

64. Reyjol, Y., Spyrato, S., Basilico, L., Archaimbault, V., & Argillier, C. (2013). Bioindication : des outils pour évaluer l'état écologique des milieux aquatiques, Perspectives en vue du 2e cycle DCE, Eaux de surface continentales. Synthèse des journées « DCE et bioindication » du séminaire « Méthodes d'évaluation de l'état des eaux –. ONEMA, Paris, 63p.

65. Rintz, C. L. (2020). Estimations satellitales de la couleur de l'eau lagonales à l'aide des produits Sentinel-2. Rapport de Stage, Ifrémer, Institut des Sciences et industries du vivant et de l'environnement, Nouvelle-Calédonie, 45p.

66. Rodier, J., Legube, B., & Merllet, N. (2009). Analyse de l'eau (éd. 9ème édition). Paris, France: Eaux. Ed. Dunobordas, 1529p.

67. Sélima, B. M. (2014). Étude de la variabilité spatio-temporelle des processus physiques et biologiques dans la mer de Beaufort par télédétection et dans un contexte de changements climatiques dans l'océan Arctique. Thèse de doctorat , Université de Sherbrooke, Département de géomatique appliquée (Faculté des lettres et sciences humaines), Sherbrooke(Canada), 266p.

68. Sossou-Agbo, A. L. (2013). La mobilité des populations dans le complexe fluvio-lagunaire de la basse vallée de l'Ouémé au Bénin,en Afrique de l'Ouest. Mémoire de Thèse, Université de Grenoble, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), Géographie, 357p.

69. Tessier, E. (2012). Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/metalloïdes dans la rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité. Thèse de doctorat, Université du sud Toulon Var, 270p.

70. Tortajada, S. (2013). De l'étude du fonctionnement des réseaux trophiques planctoniques des marais de Charente Maritime vers la recherche d'indicateurs. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France, 280p.

71. Touati, L. (2021). Cours de pollution des aux. Université Frères Mentouri Constantine 1, Biologie et Ecologie Végétale, 31p.

72. Valiron, F. (1994). Mémento du gestionnaire de l'alimentation en eau et de l'assainissement. (éd. Ed : Tec &Doc, Vol. Tome1), 464p.

73. Vinel, A. (2022). Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle-A des eaux du lac Tanganyika. Université catholique de Louvain, Faculté des bioingénieurs. Louvain: Prom. : Vanclooster, Marnik ;Alonso, Alice, 74p.

74. Weng, Q. (2010). Remote sensing and GIS integration: theory, methods, and applications. Mcgraw-hill professional, New York, 34-49p.

75. Woito, C. (2018). Caractérisation physico-chimiques et des éléments traces métalliques (cuivre, cadmium, plomb, zinc) dans les eaux de la rivière de l'Alibori pendant la période des hautes eaux. Mémoire de Licence, Université d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau (Hydrologie), 65p.

76. Yadav , S., Yamashiki , Y., Susaki, J., Yamashita, Y., & Ishikawa, K. (2019). Chlorophyll estimation of lake water and coastal water using LANDSAT-8 and SENTINEL-2A satellite. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-3/W7, 77-82p.

77. Yan, T., Lian, F., Dan, Z., Wang, X., & Chunmiao, Z. (2022, August). Remote sensing of chlorophyll-a concentrations in coastal oceans of the Greater Bay Area in China: Algorithm development and long-term changes. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 112, 1-26p.

78. Zandagba, J., Adandédji, F., Mama, D., Chabi, A., & 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), 656-669p.

79. Zidane, M. (2019). Apport de la télédétection et des SIG pour le suivi de la qualité physico-chimique des eaux du Barrage de Telesdit dans la wilaya de Bouira. Mémoire de Master, Université d'Akli mohand Oulhadj – Bouira, Algérie, 65p.

WEBOGRAPHIE

https://fr.wikipedia.org/wiki/Landsat_8 consulté le 18/01/2024 à 16H55

https://fr.wikipedia.org/wiki/Sentinel-2 consulté le 18/01/2024 à 18H00

https://fr.wikipedia.org/wiki/Moderate-Resolution_Imaging_Spectroradiometer consulté le 18/01/2024 à 20H15

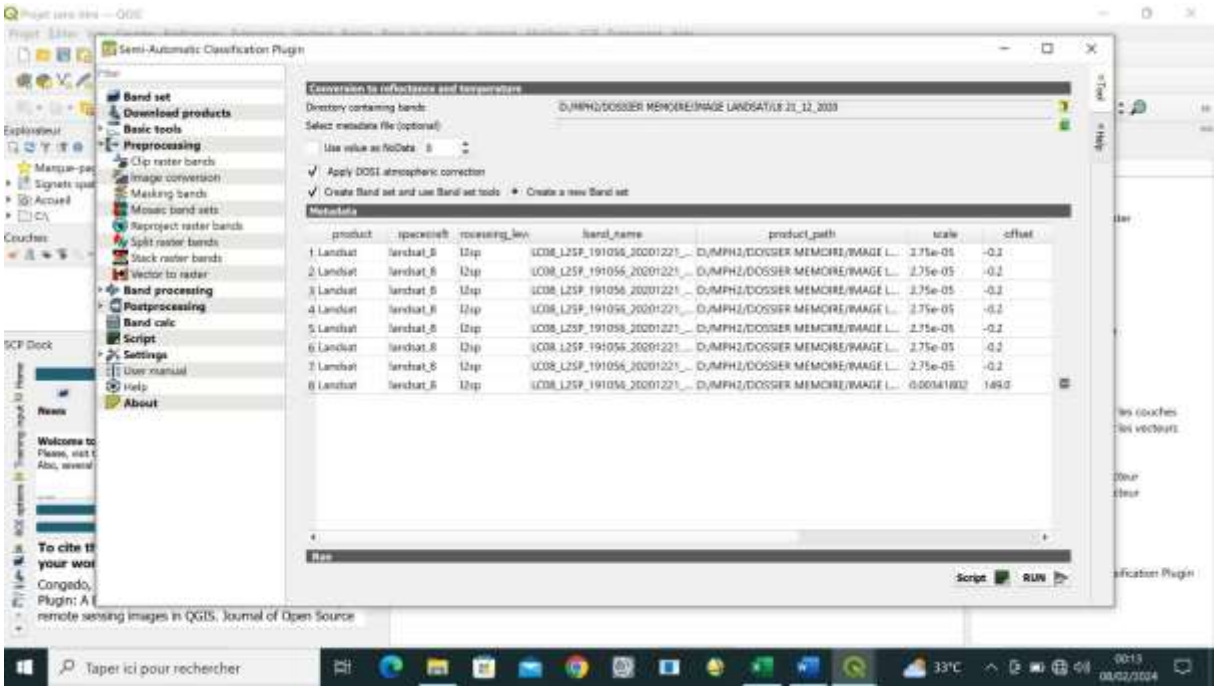
https://fr.wikipedia.org/wiki/Chlorophylle_a consulté le 18/01/2024 à 16H55

www.aquaportail.com , visité le 22/03/2024 à 00h30

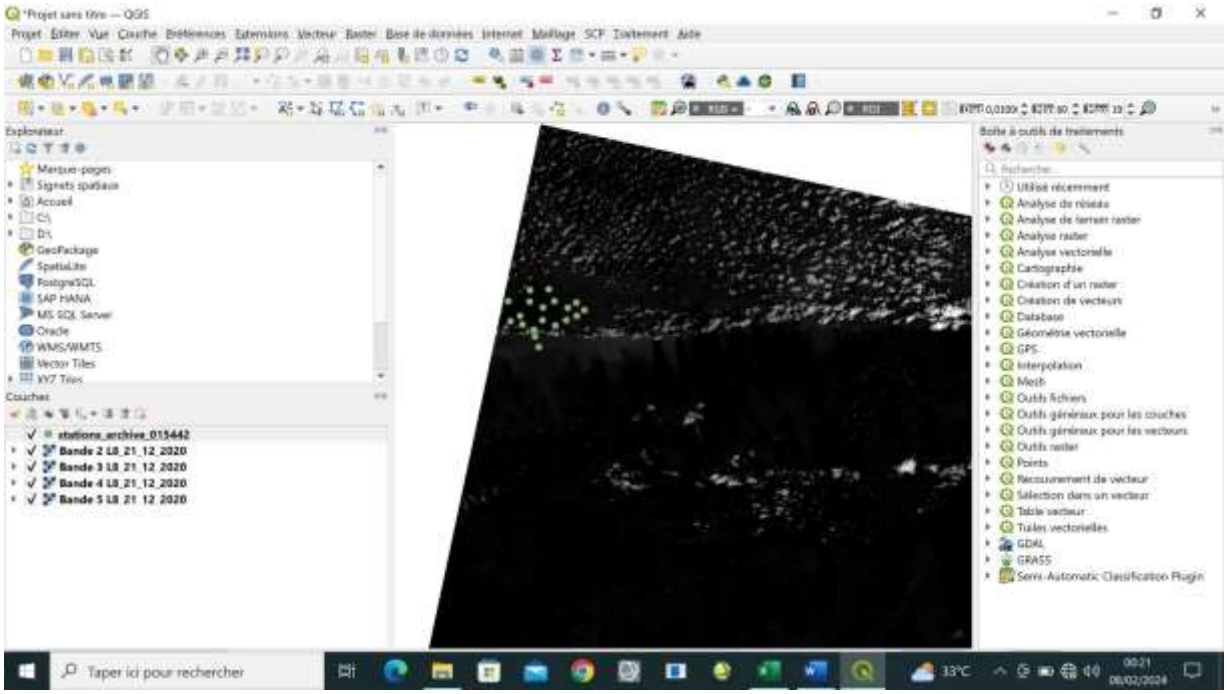
(www.cieau.com/connaitre-leau/la-pollution-de-leau/pollution-ressource-eau-comment-reduire/, visité le 19/03/2024 à 23h 46)

ANNEXES

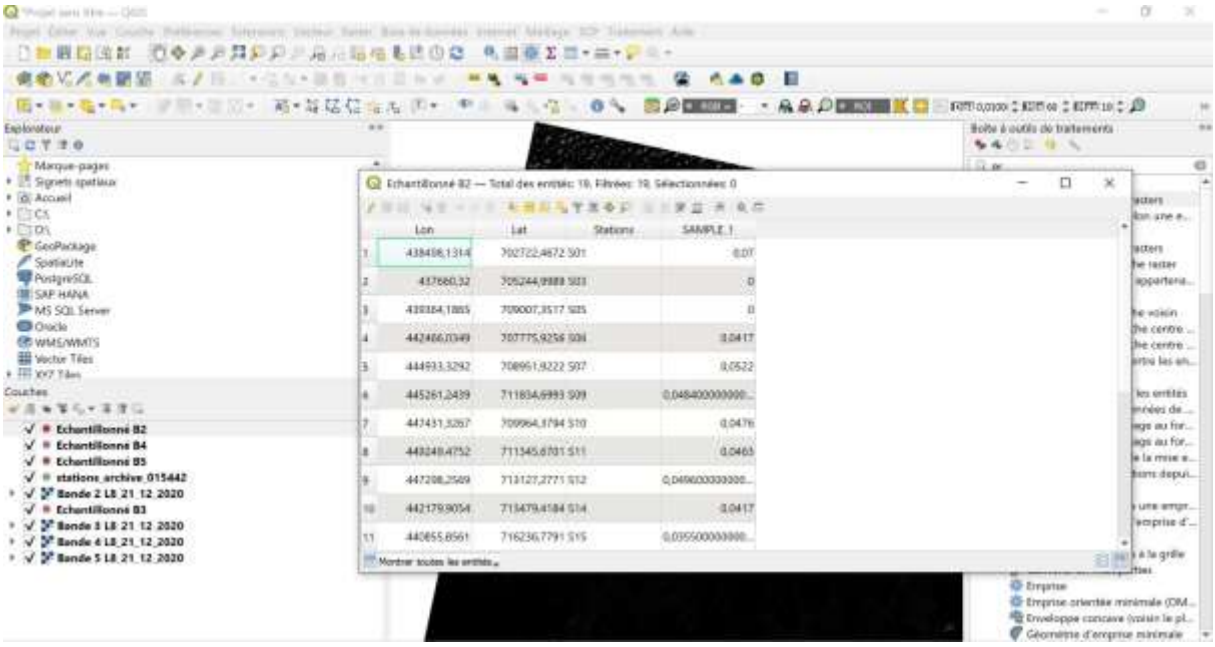
Annexe 1 : Quelques images montrant les étapes de traitement des images (Landsat)



Traitement de l'image Landsat avec le pluging SCP

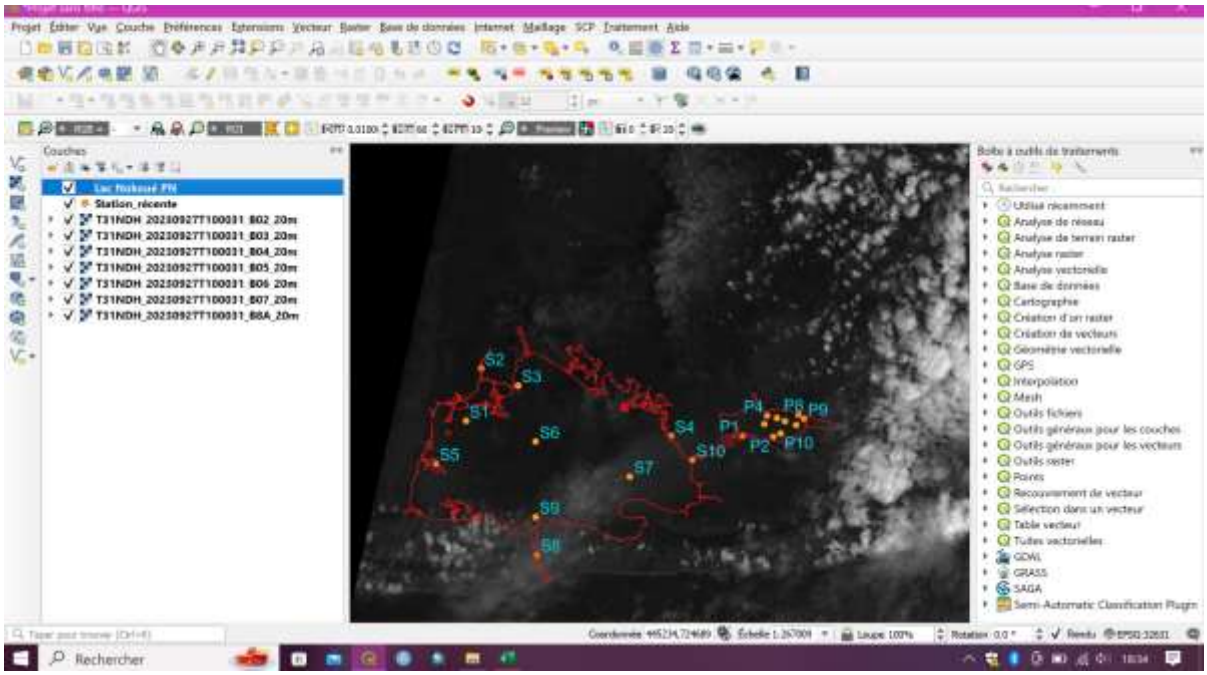


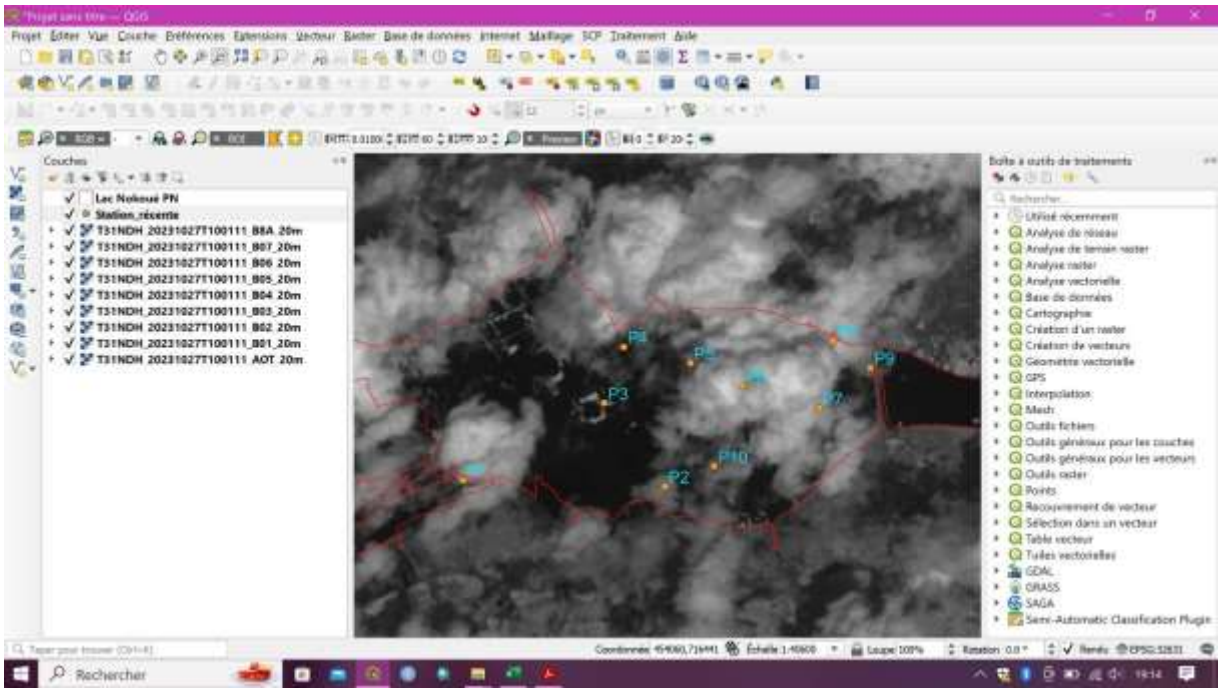
Affichage des différentes bandes dans Qgis après traitement

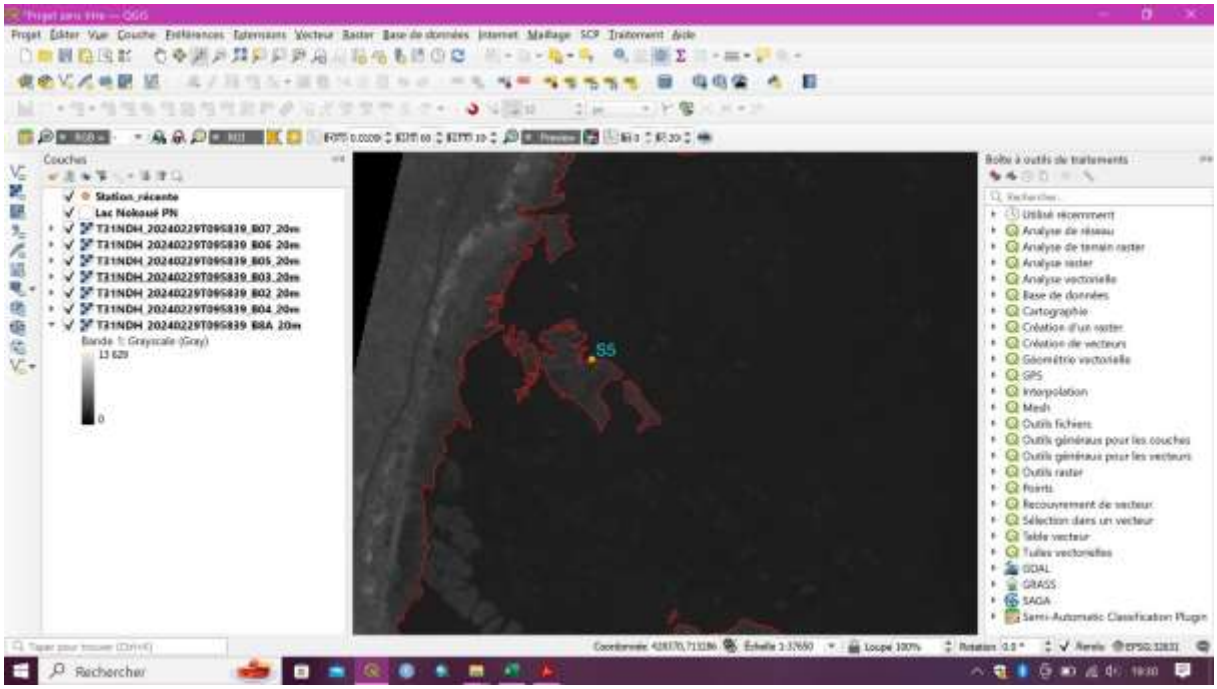


Valeurs de réflectances pour les différentes bandes au niveau des stations d'archives

Annexe 2 : Présentation des stations pour les images Sentinel pour les mois de notre étude







Présentation des 20 stations du complexe : seules les stations les moins nuageuses ont été retenues pour l'étude.

Annexe3 : Valeurs de NDCI obtenues pour les trois mois d'échantillonnages (septembre, octobre, février 2024

- Mois de septembre 2023

Stations	Chl-a	NDCI	Cha Cal
S1	3.204	0.0025	8.2982
S2	5.34	-0.0412	0.5004
S6	6.408	-0.0006	7.5982
S10	7.476	0.0138	11.0612
P1	9.612	0.0047	8.8115
P2	7.476	-0.0008	7.5569
P3	9.612	-0.0031	7.0365
P4	6.408	-0.0023	7.2053
P7	10.680	0.0284	15.0604
P8	7.476	0.0140	11.1020
P9	16.020	0.0470	20.9109
P10	7.476	-0.0021	7.2673

- Mois d'octobre 2023

Stations	Chl-a	NDCI	Cha Cal
S1	8.544	0.042	19.271
S2	3.204	-0.016	4.365
S3	12.46	0.001	8.060
S4	9.612	0.004	8.592
S5	18.69	0.030	15.467
S6	5.34	0.002	8.233
S7	12.816	0.008	9.632
S8	12.816	0.000	7.798
S9	18.156	-0.018	4.073
S10	17.088	-0.011	5.305
P3	10.68	-0.027	2.569

- Mois de février 2024

Stations	Chl-a	NDCI	Cha Cal
S1	21.36	0.03372	16.649
S2	12.816	-0.00093	7.518
S4	24.564	0.02967	15.433
S6	8.544	-0.00750	6.110
S7	14.952	-0.00541	6.547
S8	2.136	-0.02243	3.288
S9	1.068	-0.02256	3.268
S10	19.224	0.02302	13.524
P1	16.02	0.02884	15.190
P2	17.088	-0.00249	7.175
P4	20.292	0.02978	15.468
P5	21.36	0.03266	16.328
P6	33.108	0.06702	28.116
P8	39.516	0.08833	36.842