

Faculté des bioingénieurs

Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle-A des eaux du lac Tanganyika

Observation de la qualité de l'eau à l'aide de la télédétection

Auteur : Aurélie Vinel
Promoteurs : Marnik Vanclooster
Alice Alonso
Lecteurs : Pierre Defourny
François Jonard

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et qui m'ont soutenue durant sa rédaction.

Je voudrais d'abord remercier mes promoteurs, les professeurs M. Vanclooster et A. Alonso pour les échanges précieux que j'ai pu avoir tout au long de cette année. Leurs conseils m'ont permis d'avancer et de découvrir le domaine de la télédétection. Merci pour leurs disponibilités et pour les réponses aux nombreuses questions posées.

Je remercie également F. Toussaint pour les remarques pertinentes évoquées et qui m'ont permis d'aller plus loin dans mes recherches.

Je tiens également à remercier Pierre-Denis Plisnier et Jean-Pierre Descy pour les informations fournies et pour leurs réponses à mes questions.

Merci enfin à ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de l'année et pour la relecture de ce mémoire.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Etat de l’art	3
2.1	Principe de la télédétection de l’eau	3
2.1.1	Propagation de l’énergie lumineuse	3
2.1.2	Propriétés optiques inhérentes aux masses d’eau	5
2.1.3	Caractéristiques des capteurs satellites	6
2.1.4	Particularités de l’observation des masses d’eau par satellite	7
2.1.5	Niveaux de pré-traitements des images	8
2.2	Analyse bibliométrique sur le lac Tanganyika	9
2.3	Estimation de la chlorophylle-A	13
2.3.1	Définition de la chlorophylle-A	13
2.3.2	Classification des masses d’eau	14
2.3.3	Historique de l’observation de la chlorophylle-A sur le lac	15
2.3.4	Upwelling saisonnier sur le lac Tanganyika	16
3	Présentation de la zone d’étude	18
4	Méthodologie	21
4.1	Description globale de la méthodologie	21
4.2	Données satellites	22
4.2.1	MODIS Aqua et Terra	22
4.2.2	Estimation des concentrations en chlorophylle-A avec MODIS	24
4.2.3	Correction atmosphérique	25
4.2.4	Retrait des données aberrantes	26
4.3	Comparaison des données MODIS avec des données in-situ	27
4.4	Variabilité spatiale de la chlorophylle-A sur le lac	27
4.5	Variabilité temporelle de la chlorophylle-A entre 2000 et 2021	28
4.6	Relation entre la chlorophylle-A, la température de l’eau et ENSO	29
5	Résultats	31
5.1	Validation des concentrations en chlorophylle-A collectées avec MODIS	31
5.1.1	Comparaison entre les données MODIS et les données in-situ	31
5.1.2	Variabilité spatiale de la chlorophylle-A sur le lac	32
5.2	Dynamique temporelle des zones nord, centre et sud du lac	38
5.2.1	Observation générale des données	38
5.2.2	Cycle annuel	40
5.2.3	Tendance entre 2000 et 2021	43
5.3	Relation entre la chlorophylle-A, la température de surface de l’eau et ENSO	45

5.3.1	Dynamique temporelle des températures de surface de l'eau	45
5.3.2	Comparaison de la chlorophylle-A et des températures de surface avec les périodes El Niño	48
6	Discussion	50
6.1	Fiabilité, opportunités et limites de l'observation de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika à l'aide de MODIS	50
6.2	Variabilité spatiale de la chlorophylle-A sur le lac	51
6.3	Dynamique temporelle de la chlorophylle-A observée sur les trois zones . . .	52
6.4	Perspectives	55
7	Conclusion	57
	Bibliographie	59
	Annexes	65
	Annexe A Bandes des produits MODIS Aqua et Terra de niveau 3	65
	Annexe B Coordonnées délimitant les sites d'étude	66
B.1	Mpulungu et Kigoma	66
B.2	Lac Tanganyika	67
B.3	Zones nord, centrale et sud du lac	72
	Annexe C Script GEE utilisé pour extraire les données	77
C.1	Cartes mensuelles	77
C.2	Evolution temporelle de la chlorophylle-A par zone	80
	Annexe D Chlorophylle-A	84
	Annexe E Température de surface de l'eau par zone	87

Table des figures

1	Spectre électromagnétique (KARTABLE, 2021).	3
2	Téledétection optique d'une masse d'eau. Propagation des ondes électromagnétiques depuis le soleil jusqu'au capteur du satellite (DEKKER et al., 2001).	4
3	Réfectances de différents constituants présents dans l'eau (PALACIOS, s. d.).	6
4	Niveaux de pré-traitement des données.	9
5	Nuage de mots représentant la co-occurrence des mots-clés des publications produites sur le lac Tanganyika. La taille des noeuds indique la fréquence d'occurrence. Les courbes entre les noeuds représentent leur co-occurrence dans la même publication. Plus la distance entre deux noeuds est courte, plus le nombre de co-occurrences des deux mots-clés est important. Les cinq groupes observés sont les études sur la Tanzanie en bleu, la génétique des espèces en vert, les Cichlidés en jaune, les poissons et la biodiversité en rouge, l'adaptation et l'évolution des espèces en mauve.	11
6	Principaux domaines de recherches sur la qualité des eaux du lac Tanganyika : la productivité primaire en rouge, les études des périodes géologiques en jaune, l'utilisation des sols en vert, la pollution des eaux en bleu.	12
7	Dynamique des vents et upwelling du lac Tanganyika (PLISNIER et al., 1999).	17
8	Hydrologie et limnologie du lac Tanganyika (CAZENAVE-PIARROT et al., 2015).	19
9	Bilan hydrologique mensuel moyen du lac Tanganyika (CAZENAVE-PIARROT et al., 2015).	20
10	Description générale de la méthodologie.	21
11	Relation entre les concentrations médianes en chlorophylle-A collectées et le nombre de pixels disponibles par image.	26
12	Zones de 16 km ² de collecte des données MODIS centrées sur les coordonnées GPS des lieux d'échantillonnages in-situ au niveau de Kigoma et de Mpulungu. Les coordonnées utilisées pour extraire les données sur GEE sont disponibles à l'annexe B.1.	27
13	Délimitation des trois zones observées sur le lac : la zone nord en rouge, la zone centrale en jaune et la zone sud en vert.	28
14	Données MODIS (n = 2822 à Mpulungu et n = 1496 à Kigoma) et in-situ (n = 124 à Mpulungu et n = 99 à Kigoma) collectées entre 2002 et 2006.	31
15	Comparaison des concentrations in-situ et des concentrations MODIS à Kigoma et Mpulungu. La ligne en pointillé représente les correspondances exactes entre les deux jeux de données.	32
16	Principaux intervalles de temps observés entre deux données exploitables. Grâce à la combinaison des données de MODIS Aqua et Terra jusqu'à deux données par jour peuvent être observées, réduisant alors l'intervalle à zéro jour.	33
17	Pourcentage de la surface du lac couverte par image.	34

18	Distribution spatiale mensuelle du nombre de données collectées par pixel provenant de MODIS Aqua et Terra.	35
19	Distribution spatiale mensuelle des concentrations en chlorophylle-A médianes par pixel.	36
20	Distribution spatiale mensuelle de l'intervalle des interquartiles des concentrations en chlorophylle-A par pixel.	37
21	Évolution de la concentration en chlorophylle-A entre 2000 et 2021 et distribution des concentrations observées.	39
22	Répartition mensuelle des concentrations en chlorophylle-A par zone. Une boîte à moustache est réalisée pour chaque mois de l'année ainsi que sur l'année entière, les valeurs extrêmes sont visibles sous la forme de croix rouges. L'échelle des ordonnées est deux fois plus élevée pour la zone sud que pour les deux autres zones.	41
23	Évolution annuelle des concentrations en chlorophylle-A mensuelles pour chaque année entre 2000 et 2021.	42
23	Évolution annuelle des concentrations en chlorophylle-A mensuelles pour chaque année entre 2000 et 2021 (suite).	43
24	Evolution temporelle des concentrations annuelles médianes pour les zones (a) nord, (b) centrale et (c) sud. Les percentiles 25 et 75 sont représentés en pointillé.	44
25	Répartition mensuelle des températures de surface de l'eau par zone.	46
26	Évolution temporelle des températures de surface de l'eau annuelles médianes pour les zones (a) nord, (b) centrale et (c) sud.	46
27	Comparaison des concentrations en chlorophylle-A mensuelles et des températures de surface de MODIS avec les périodes El Niño et La Niña.	48
28	Intervalle de temps observé entre deux données collectées. Grâce à la combinaison des données de MODIS Aqua et Terra jusqu'à deux données par jour peuvent être observées, correspondant alors à un intervalle de zéro jour.	84
29	Évolution des concentrations mensuelles médianes en chlorophylle-A entre 2000 et 2021.	85
29	Évolution des concentrations mensuelles médianes en chlorophylle-A entre 2000 et 2021 (suite).	86
30	Évolution des températures de surface de l'eau médianes par zone entre 2000 et 2021.	87
31	Évolution des températures de surface de l'eau mensuelles médianes par zone entre 2000 et 2021.	88
31	Évolution des températures de surface de l'eau mensuelles médianes par zone entre 2000 et 2021 (suite).	89

Liste des tableaux

1	Classification des concentrations en chlorophylle-A (KLEMAS, 2011).	15
2	Noms et descriptions des différents masques appliqués aux produits MODIS Aqua et Terra (NASA OCEAN COLOR, 2022a).	23
3	Caractéristiques des capteurs MODIS et des données MODIS Aqua et Terra.	24
4	Nombre de données collectées avec MODIS Aqua et Terra.	33
5	Statistiques des concentrations par zone (mg/m^3).	40
6	Paramètres du test de Mann-Kendall. Les étoiles (*) informent sur le niveau de confiance α : (*) indique un niveau de confiance de $\alpha = 0.1$; (**) indique un niveau de confiance de $\alpha = 0.05$; (***) indique un niveau de confiance de $\alpha = 0.001$	45
7	Paramètres du test de Mann-Kendall pour la température de surface de l'eau.	47
8	Bandes spectrales des produits MODIS Aqua et Terra de niveau 3 (GEE, s. d.).	65

Liste des abréviations, des sigles et des symboles

λ	Longueur d'onde
CDOM	Matières organiques dissoutes colorées (Colored Dissolved Organic Matter)
ENSO	Oscillation australe El Niño (El Niño Southern Oscillation)
EOS	Earth Observing System
GEE	Google Earth Engine
IQR	Intervalle interquartile
LATAWAMA	Lake Tanganyika Water Management
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
OBPG	Ocean Biology Processing Group
ODD	Objectif du Développement Durable
OLCI	Ocean and Land Colour Instrument
ONI	Indice océanique Niño (Oceanic Niño Index)
RDC	République Démocratique du Congo
Rrs	Réflectance de la télédétection (Reflectance remote sensing)
SeaWIFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SHER	Société pour l'Hydraulique, l'Environnement et la Réhabilitation
SMI	Standard Mapped Image
sr	Stéradian
SST	Température de surface de l'eau (Sea Surface Temperature)

1 Introduction

L'eau est une ressource essentielle pour la vie partout sur Terre. Son utilisation ne se limite pas à la consommation d'eau potable ni à la production de nourriture. L'eau offre d'importantes fonctions écosystémiques pour l'environnement. Cependant, les ressources en eau subissent beaucoup de pressions notamment liées aux activités anthropiques à proximité ou encore à cause du changement climatique actuel. Le maintien de la qualité de cette eau est donc capital pour continuer à profiter des bienfaits des fonctions écosystémiques qu'elle apporte. Dans cette optique de maintenir une bonne qualité de l'eau, une première étape est d'être capable de surveiller la qualité actuelle de l'eau des océans, des lacs et des rivières.

La qualité de l'eau est également une préoccupation mise en évidence par les Objectifs du Développement Durable (ODD) (UNESCO, 2016). L'objectif six vise à assurer une disponibilité et une gestion durable de l'eau afin d'assurer la protection des écosystèmes aquatiques. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de l'état actuel des milieux aquatiques, de caractériser et comprendre les variabilités spatiales et temporelles naturelles et les changements qui pourraient résulter de l'activité humaine. Les variabilités spatiales et temporelles de la qualité de l'eau sont néanmoins difficiles à observer à l'échelle d'une rivière, d'un lac ou encore d'un océan, car elles peuvent être amenées à varier rapidement. 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. Pour observer cela, de nouvelles techniques de mesures doivent être optimisées pour permettre d'augmenter la résolution spatio-temporelle des observations. Une solution possible consiste à exploiter des images issues de la télédétection.

Ce mémoire s'inscrit dans le contexte du projet européen Lake Tanganyika Water Management (LATAWAMA) mis en œuvre par la coopération technique belge Enabel en partenariat avec le secrétariat de l'Autorité du Lac Tanganyika (LATAWAMA, 2020). Leur objectif est d'améliorer durablement la gestion et le contrôle de la qualité de l'eau du lac, via le développement d'un réseau et d'un programme de surveillance, ainsi que via la mise en place d'un outil de gestion et de diffusion des données. Des mesures in-situ de la qualité de l'eau vont ainsi être réalisées à partir du printemps 2022 sur le lac pour une durée totale de quatre ans. Les données récoltées seront disponibles sur une plateforme webGIS conçue par la société belge SHER (Société pour l'Hydraulique, l'Environnement et la Réhabilitation).

Le lac Tanganyika, localisé en Afrique, est connu pour être le plus long et le deuxième plus profond lac au monde. L'écosystème qui le constitue est un habitat aquatique idéal au développement de nombreux poissons. L'activité de pêche y est très importante et impacte plus de dix millions d'Africains (MÖLSÄ et al., 1999). Ce lac est par ailleurs, entouré par quatre pays et son bassin versant transfrontalier en couvre cinq : le Burundi, la République

Démocratique du Congo (RDC), le Rwanda, la Tanzanie et la Zambie. Diverses pressions importantes y sont observées telles que des flux de sédiments ou encore des écoulements d'eaux usées en provenance des bassins versants à proximité pouvant influencer la qualité de l'eau du lac (VANDELANNOOTE et al., 1996 ; LANGENBERG et al., 2003).

La qualité de l'eau du lac plus spécifiquement étudiée dans ce mémoire est la dynamique de chlorophylle-A observée sur le lac Tanganyika au cours du temps. La chlorophylle-A est un pigment vert présent dans les organismes photosynthétiques. L'observation de la chlorophylle-A est importante sur ce lac car elle est un indicateur du taux de productivité primaire du lac. La productivité primaire étant à la base de la chaîne alimentaire, la quantité de chlorophylle-A du lac est en lien avec la quantité de poissons disponibles. Cette information est d'autant plus importante que les poissons sont la principale source de protéines pour les habitants de la région (LANGENBERG et al., 2008).

L'objectif principal de ce mémoire est de caractériser et d'expliquer la variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle-A, sur le lac Tanganyika, à l'aide des capteurs MODIS Aqua et Terra. Les données MODIS offrent actuellement l'opportunité d'analyser une série temporelle de données s'étalant sur une période de 22 ans.

Le mémoire vise à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les opportunités et limites de l'utilisation des données MODIS pour l'observation du lac Tanganyika ?
- Les données des produits MODIS Ocean Color SMI sont-elles fiables ?
- Quelle est la variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle-A sur le lac ?
- Une relation est-elle visible entre les dynamiques de température de surface de l'eau et de chlorophylle-A ?
- L'influence du phénomène d'oscillation australe El Niño est-elle observée sur les dynamiques temporelles de chlorophylle-A du lac ?

Ce mémoire va présenter une revue de la littérature sur la télédétection de l'eau ainsi que sur la qualité de l'eau et sur la chlorophylle-A du lac Tanganyika. La méthodologie et les résultats informent sur les données MODIS utilisées, les valident, observent les variabilités spatiales et temporelles de la chlorophylle-A sur le lac et enfin vérifient si un lien est visible entre la dynamique temporelle de la chlorophylle-A, les températures de surface de l'eau et les périodes El Niño. Basée sur les résultats, la discussion va répondre aux questions qui constituent l'objectif de ce mémoire.

2 Etat de l'art

2.1 Principe de la télédétection de l'eau

La télédétection peut être définie comme étant une technique «qui consiste à recueillir des informations au sujet de la surface de la Terre en utilisant l'énergie réfléchie ou émise qui est acquise par des capteurs montés sur des satellites, des avions ou des drones» (RESSOURCES NATURELLES CANADA, 2020). Autrement dit, le bénéfice majeur qu'offre la télédétection est de fournir des informations sur un objet sans pour autant être en contact direct avec celui-ci grâce notamment à l'utilisation de capteurs à distance.

La télédétection 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 satellites récoltées sur base de différentes longueurs d'ondes.

2.1.1 Propagation de l'énergie lumineuse

La télédétection optique utilise des rayonnements électromagnétiques afin de déduire des informations sur les cibles observées. Le spectre électromagnétique présenté à la figure 1 montre différentes classes de longueurs d'ondes (λ) allant des rayons gamma aux ondes radio. Chaque longueur d'onde correspond à un niveau d'énergie spécifique sur lequel les photons sont propagés. L'observation de l'eau va principalement être réalisée en utilisant les longueurs d'ondes du visible et du proche infrarouge allant de 400 nm à 900 nm (DÖRNHÖFER & OPPELT, 2016).

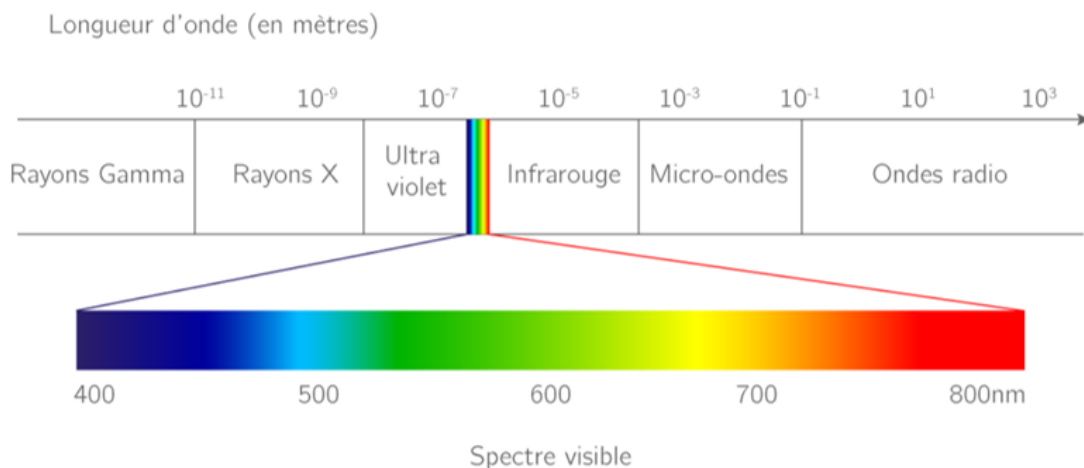


FIGURE 1 – Spectre électromagnétique (KARTABLE, 2021).

L'observation par télédétection est possible car le rayonnement électromagnétique subit plusieurs transformations lors de sa propagation depuis le soleil jusqu'au capteur. Ces différentes transformations sont illustrées sur la figure 2.

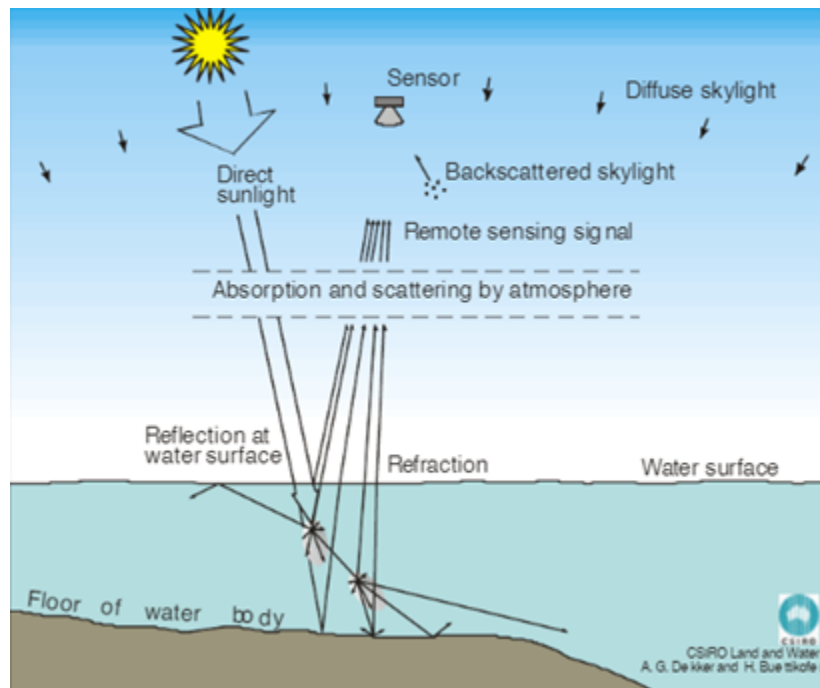


FIGURE 2 – Télédétection optique d'une masse d'eau. Propagation des ondes électromagnétiques depuis le soleil jusqu'au capteur du satellite (DEKKER et al., 2001).

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère avant d'atteindre la surface de l'eau. Lors de son passage à travers l'atmosphère, ce rayonnement va être modifié par absorption et diffusion des photons lumineux principalement à cause des aérosols et des molécules d'air contenus dans l'atmosphère. À son arrivée à la surface de l'eau, le signal va subir deux transformations : la réflexion et la réfraction. Le rayonnement finalement transmis dans la colonne d'eau va ensuite interagir avec l'eau et ses constituants par absorption et diffusion. La fraction du signal sortant de l'eau traversera alors à nouveau l'atmosphère jusqu'à atteindre le capteur satellite. Le signal perçu par le capteur satellite va donc être influencé par toutes les transformations subies par le rayonnement solaire (DEKKER et al., 2001).

Au total, près de 90% du signal reçu par le capteur est dû à des effets atmosphériques, moins de 10% de la lumière totale détectée correspond à la radiance de sortie de l'eau contenant les informations sur les constituants de la masse d'eau (DÖRNHÖFER & OPPELT, 2016). Le signal obtenu par les capteurs satellites doit donc être corrigé afin de pouvoir déterminer plus spécifiquement quels sont les constituants présents dans l'eau et ainsi en déterminer leur concentration.

Une première correction des données doit permettre de retirer les informations du signal liées à l’atmosphère. Le signal sera ensuite à nouveau corrigé pour l’angle zénithal du soleil. Suite à ces deux corrections, des valeurs de radiance normalisée de l’eau sont obtenues et peuvent être utilisées dans des algorithmes afin d’obtenir des informations sur des variables d’intérêt comme par exemple la concentration en chlorophylle-A. Estimer la radiance normalisée de l’eau revient à déterminer la radiance lorsque la surface de l’eau est plate, lorsque le soleil est au zénith et en absence d’effets atmosphériques (WINARSO & MARINI, 2014).

Les réflectances de télédétection Rrs (Remote Sensing Reflectance) utilisées dans les algorithmes correspondent au rapport des radiances de sortie de l’eau L_w avec l’énergie incidente solaire mesurée à la surface de l’eau E_s , pour chaque longueur d’onde λ , tel que présentée par l’équation 1 (MOBLEY, 1994).

$$Rrs(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_s(\lambda)} \quad (1)$$

2.1.2 Propriétés optiques inhérentes aux masses d’eau

De multiples constituants présents dans les masses d’eau vont conférer des propriétés optiques inhérentes à celles-ci en interagissant avec le rayonnement entrant dans l’eau, ces constituants sont alors également appelés des constituants optiquement actifs. Les interactions observées dans la colonne d’eau sont principalement l’absorption et la diffusion du rayonnement et vont toutes les deux influencer la réflectance perçue par télédétection via l’équation 2 (GORDON et al., 1975 ; OLMANSON et al., 2015 ; LO PREJATO et al., 2020).

$$Rrs(\lambda) \approx F \frac{retrodiff(\lambda)}{abs(\lambda) + retrodiff(\lambda)} \quad (2)$$

avec F une fonction polynomiale, abs l’absorption totale et $retrodiff$ la rétrodiffusion.

L’absorption totale (abs) de la lumière dans le milieu consiste en la somme des absorptions respectives des phytoplanctons, des sédiments en suspension, des matières organiques dissoutes colorées (CDOM) ainsi que des molécules d’eau (DÖRNBÖFER & OPPELT, 2016). Quant à la diffusion, elle est liée à la présence de particules en suspension dans l’eau. La diffusion propage le rayonnement dans différentes directions mais seuls les rayons diffusés en direction du capteur satellite sont repris dans l’équation 2, cette diffusion est plus spécifiquement appelée rétrodiffusion ($retrodiff$).

L’eau est une cible dont les différents constituants sont difficilement différenciables à l’œil nu, liée notamment à sa couleur foncée. Les capteurs satellites utilisés pour réaliser des observations de la qualité de l’eau doivent donc avoir une sensibilité suffisante pour observer des surfaces aquatiques. Cette sensibilité se traduit par un rapport signal sur bruit élevé

des capteurs satellites (DÖRNHÖFER & OPPELT, 2016). L'avantage d'utiliser les capteurs satellites est de pouvoir observer plus finement les variations de réflectances en fonction de la longueur d'onde utilisée comme le montre la figure 3. Le pic de réflectance des sédiments est nettement plus élevé que celui de l'eau, des CDOM ou encore de la chlorophylle-A. La chlorophylle-A possède quant à elle une réflectance plus élevée dans le vert aux longueurs d'ondes allant de 500 à 600 nm. Sur la figure 3, de fortes réflectances dans le domaine du proche infrarouge sont observées pour la détection de sédiments alors que la réflectance de l'eau dans ce domaine est nulle. Une réflectance élevée dans le proche infrarouge lors d'observations aquatiques indiquera la présence de sédiments en suspension dans l'eau (PALACIOS, s. d.).

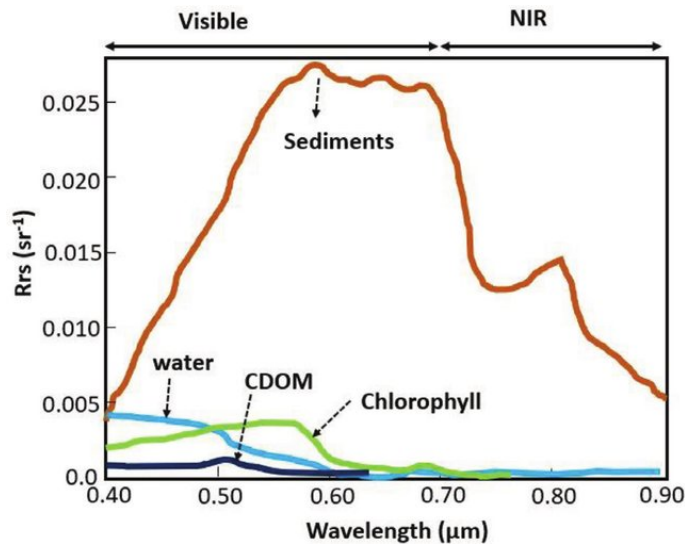


FIGURE 3 – Réflectances de différents constituants présents dans l'eau (PALACIOS, s. d.).

2.1.3 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 la qualité de l'eau. Les deux types de capteurs satellites sont les capteurs passifs et actifs.

Les **capteurs passifs** détectent l'énergie lumineuse réfléchiée sur la surface observée. Les longueurs d'ondes principalement observées sont dans le visible, l'infrarouge et les micro-ondes. 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 par tout temps et à chaque moment de la journée (MAI, 2017).

Les **capteurs actifs** ont la particularité d'émettre un signal et d'en mesurer le signal 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).

Ensuite, différentes résolutions sont également à prendre en compte lorsque l'on observe des images satellites. 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.

La **résolution spatiale**, exprimée en mètres, mesure la surface de la Terre couverte par un pixel sur une image satellite. Plus la résolution spatiale est grande, plus la surface couverte par un seul pixel sera petite.

La **résolution temporelle**, exprimée en jours, est aussi appelée le temps de revisite d'un satellite et détermine l'intervalle de temps entre deux observations d'une même localisation vue sous un angle identique.

La **résolution spectrale** d'un capteur, exprimée en nanomètres, est déterminée en fonction du nombre de gammes de longueurs d'ondes, appelées "bandes", qu'il propose. Cette résolution décrit la capacité du capteur à détecter de fins intervalles de longueur d'onde le long du spectre électromagnétique. Plus les bandes visibles par le capteur sont étroites, plus la résolution spectrale est fine. Affiner les bandes spectrales permet d'améliorer la différenciation de ce qui est observé par télédétection.

Enfin, la **résolution radiométrique**, exprimée en bits, décrit la capacité d'un capteur à distinguer les différences d'énergie ou de radiance. Une résolution radiométrique élevée signifie que le capteur est sensible aux faibles variations de radiance.

2.1.4 Particularités de l'observation des masses d'eau par satellite

Les signaux perçus par les capteurs satellites doivent subir plusieurs corrections afin de fournir des informations les plus précises possibles sur les constituants présents dans l'eau. Plusieurs corrections et masquages sont donc appliqués au signal perçu.

Premièrement, une correction atmosphérique doit être réalisée. Cette correction est liée à la présence de particules, d'aérosols, de vapeur d'eau et de gaz dans l'atmosphère qui interagissent avec le signal. Le modèle de correction atmosphérique utilisé aura pour but de soustraire la réflectance provenant de l'atmosphère du signal total afin d'isoler la radiance de sortie de l'eau. La correction atmosphérique est d'autant plus importante lors de l'observation d'une surface aquatique car la cible est sombre (PALACIOS, s. d.) ; peu de lumière est réfléchié donc le signal observé est plus faible que lors d'observations terrestres. Les capteurs satellites

utilisés pour des observations aquatiques doivent donc être suffisamment sensibles au signal reçu et cela se caractérise par un rapport signal sur bruit élevé qui leur permet d’observer la masse d’eau même lorsque la correction atmosphérique est appliquée aux images.

La deuxième correction concerne l’angle zénithal solaire (WINARSO & MARINI, 2014). Les données de réflectances utilisées dans les algorithmes sont corrigées pour avoir un angle zénithal de 0° . Une variabilité de l’angle zénithal solaire représente une variabilité dans l’épaisseur de la couche d’atmosphère traversée par le rayonnement.

Suite à ces deux corrections, les valeurs de réflectance peuvent être utilisées dans des algorithmes afin de déterminer des valeurs de concentrations des variables d’intérêt telles que la turbidité, la chlorophylle ou encore les CDOM. Cependant, plusieurs pixels contenant des informations erronées sont encore présentes dans le jeu de données obtenu à cause de différents effets optiques. Ces données erronées doivent alors être masquées pour ne pas fournir de concentrations incorrectes de la variable observée. Plusieurs masques généralement utilisés sont le masquage des pixels nuageux, des pixels de qualité douteuse, des reflets du soleil, des pixels terrestres, etc. L’élimination de ces pixels retire également une partie de l’information fournie par les satellites mais assure une meilleure fiabilité des données restantes.

2.1.5 Niveaux de pré-traitements des images

Les données satellitaires brutes recueillies par les capteurs doivent être traitées afin d’obtenir des données dérivées telles que la concentration en chlorophylle-A. Plusieurs étapes successives de traitements sont réalisées sur ces données. L’utilisateur, lors de l’obtention des données, peut choisir le niveau de pré-traitement déjà réalisé en fonction de ses besoins pour, par exemple, choisir lui-même le modèle de correction atmosphérique à appliquer. Les niveaux de pré-traitement vont de L0 à L4 comme le montre la figure 4.

Les produits de **niveau L0** sont des données brutes du capteur, non traitées et à pleine résolution. Ensuite, les produits de **niveau L1A** sont basés sur les produits de niveau L0 mais ayant été référencés dans le temps. De plus, ces produits comportent des informations auxiliaires telles que des coefficients d’étalonnage radiométriques et géométriques ainsi que des paramètres de géoréférencement. Ces informations auxiliaires sont jointes au produit mais non appliquées aux données de niveau L0. Les produits de **niveau L1B** proposent quant à eux une amélioration des produits L1A avec l’application des étalonnages radiométrique et géométrique aux données. Les produits de **niveau L2** sont des variables géophysiques aussi appelées produits de données. Ces variables sont par exemple la chlorophylle-A ou encore la température de la surface de l’eau. Les produits de **niveau L3** ont été agrégés ou encore projetés sur une grille spatiale et pour une période définie. Enfin, les produits de **niveau L4** sont des sorties de modèles ou des résultats d’analyses de données (PALACIOS, s. d. ; ESA, 2022b).

Le parcours des différentes étapes de traitement est synthétisé à la figure 4. Les produits de niveau L0, L1 et L2 sont majoritairement utilisés par des utilisateurs expérimentés dans le domaine de la télédétection car ces produits sont plus difficiles à utiliser. Les produits de niveau L3 et L4 sont plus faciles à utiliser pour des utilisateurs moins expérimentés en télédétection.

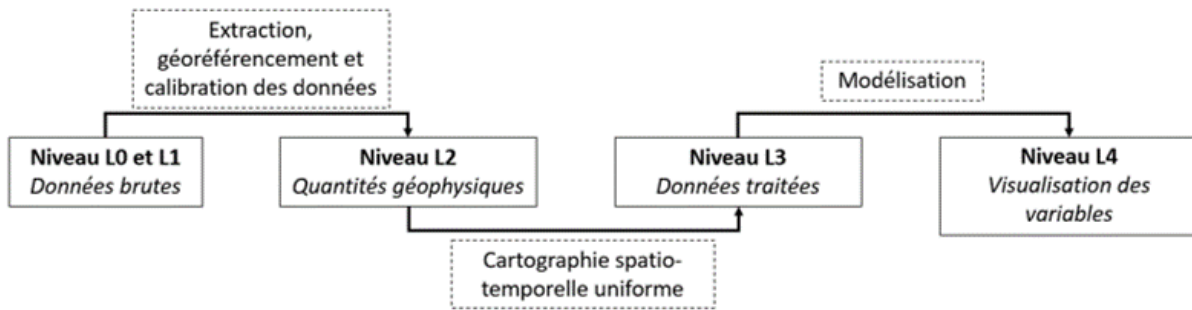


FIGURE 4 – Niveaux de pré-traitement des données.

2.2 Analyse bibliométrique sur le lac Tanganyika

Afin d’avoir un premier aperçu des études scientifiques ayant porté sur le lac Tanganyika, une mise en évidence des principaux sujets d’études liés au lac est effectuée par la réalisation d’une analyse bibliométrique de la littérature. À l’aide de la base de données Scopus et du mot-clé « Tanganyika », 2271 publications publiées entre 1876 et 2021 ont été recensées. Les informations essentielles de ces 2271 articles, telles que le titre, l’auteur, le résumé et les mots-clés, ont été exportées depuis Scopus sous la forme d’un fichier CSV et utilisées sur le logiciel VOSviewer 1.6.16¹ (van ECK & WALTMAN, 2020). La plateforme VOSviewer permet de rassembler tous les mots-clés présents dans les documents exportés et d’en réaliser un nuage de mots. Ce nuage met en évidence la fréquence d’occurrence des mots à l’aide de couleurs, de liens et de la taille des noeuds. Plus un mot sera fréquemment énoncé, plus la taille du noeud sur le schéma sera grande. Les mots cités fréquemment ensemble seront rassemblés au sein du nuage. Les thématiques spécifiques sur lesquelles beaucoup de publications sont déjà parues sortiront ainsi du lot.

1. Pour éviter de rencontrer des problèmes lors de l’importation des données de Scopus sur VOSviewer, seuls les champs suivants sont exportés sur le fichier CSV : « Authors(s) », « Author(s) ID », « Document title », « Year », « Source title », « volume, issue, pages », « Citation count », « Source & document type », « Publication stage », « DOI », « Publisher », « Editor(s) », « Abstract », « Author Keywords », « Index Keywords ».

L'intérêt de la recherche sur le lac Tanganyika reste constant avec entre 30 et 70 publications par an depuis les années 2000. Les trois pays publiant le plus sur le lac sont les États-Unis, le Royaume-Uni et la Belgique avec respectivement 440, 255 et 237 publications.

Étant donné le nombre élevé d'articles exportés depuis Scopus, le nombre minimum d'occurrences des mots-clés est posé à 20. Sur les 8079 mots-clés rassemblés sur la totalité des articles, seuls 145 seront présents sur le schéma. Il est tout de même important de noter que même les plus petites bulles présentes sur le schéma seront des mots qui ont été répétés au minimum 20 fois.²

Le nuage de mots sur le lac Tanganyika est présenté à la figure 5. Les quatre mots ayant la plus grande occurrence, présentés avec de plus gros noeuds, sont "cichlid", "animals", "Tanzania" et "fishes". Cinq groupes sont également visibles sur cette figure représentés avec différentes couleurs. **Le groupe bleu** représente toutes les études réalisées en lien avec la Tanzanie au niveau des eaux côtières du lac Tanganyika mais également sur les zones côtières. Des études sont menées sur la qualité de l'eau et de la nourriture provenant du lac et consommé en Tanzanie (CHALE, 2002; CAMPBELL et al., 2008). **Le groupe vert** se concentre plus particulièrement sur les aspects génétiques des animaux du lac. **Le groupe jaune** montre l'importance de l'étude des Cichlidés sur ce lac. Les Cichlidés sont des poissons dont plusieurs lignées sont endémiques au lac Tanganyika et sont fortement étudiés à cause de leur spéciation rapide influencée par les changements climatiques et géologiques de leur milieu (KOBBLMÜLLER et al., 2008). **Le groupe rouge** étudie plus globalement les poissons et la biodiversité du lac. Enfin, **le groupe mauve** décrit les études réalisées sur la faune du lac avec un intérêt plus particulier pour l'adaptation et l'évolution des espèces dans ce milieu.

La longueur des liens entre les différents noeuds nous informe également de l'importance du nombre de co-occurrences observées. Par exemple, les mots "genotype" et "phylogeny" sont fréquemment observés ensemble alors que les mots "cichlid" et "Tanzania" le sont beaucoup plus rarement. Le mot "animals" est par ailleurs localisé au centre car il concerne autant les cichlides, les poissons que la génétique des espèces. Les distances entre les différents noeuds dans la partie gauche de la figure 5 sont généralement plus petites car les catégories verte, bleue et jaune sont toutes liées aux animaux du lac alors que les informations récoltées en Tanzanie concernent également les terres côtières.

2. Un fichier thesaurus est également utilisé afin de rassembler les mêmes mots-clés orthographiés différemment ou encore de retirer certains mots moins pertinents tels que « article » ou « lake ».

Parmi ces cinq publications, les premières observations ont été réalisées par PETIT et VANDENABEELE (2005) afin de surveiller la chlorophylle, les matières en suspension et les matières organiques dissoutes. Des informations complémentaires sur la chlorophylle-A ont ensuite été recherchées par BERGAMINO et al. (2007) avec le capteur Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) entre 1997 et 2004 ainsi que par HORION et al. (2010) et BERGAMINO et al. (2010) avec MODIS Aqua entre 2002 et 2006. Une synthèse des résultats de ces études est donnée à la section 2.3.3. Enfin, une étude plus récente réalisée par BUSCH et al. (2018) s'est concentrée sur l'impact de l'utilisation des terres sur le bassin versant de Katumbi en observant par télédétection les panaches de sédiments dans les eaux du lac Tanganyika.

Aucune étude n'a pour le moment été réalisée sur l'observation de la variabilité des concentrations en chlorophylle-A sur le lac Tanganyika sur le long terme. Grâce à la disponibilité des données MODIS sur une période de plus de 20 ans, l'observation de série temporelle de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika est rendue possible. La disponibilité de cette longue série de données est donc le point de départ de la réalisation de ce mémoire.

2.3 Estimation de la chlorophylle-A

2.3.1 Définition de la chlorophylle-A

La chlorophylle-A est un pigment vert présent dans les chloroplastes de la biomasse photosynthétique. Ce pigment assure l'absorption de la lumière essentielle à la réalisation de la photosynthèse. La mesure de la concentration en chlorophylle-A est ainsi un bon indicateur de la biomasse photoautotrophe telle que les phytoplanctons (SALONEN et al., 1999). Les algues ne sont en elles-mêmes pas toxiques pour l'environnement. Cependant, une croissance rapide des organismes photosynthétiques aquatiques peut être à l'origine d'un déséquilibre de l'écosystème aquatique. Un environnement aquatique favorable à une croissance phytoplantonique élevée va induire une diminution de la concentration en oxygène dans l'eau liée à l'augmentation du nombre de phytoplancton consommant l'oxygène. Les conditions anoxiques de la colonne d'eau sont alors dangereuses pour la vie des organismes aquatiques. La croissance rapide de la concentration en phytoplancton dans le lac est fortement influencée par l'environnement aquatique. Un environnement favorable à la production massive de phytoplancton dépend principalement des concentrations en nutriments disponibles et de la température de l'eau. Une eau de température élevée et riche en nutriment favorisera la production primaire (AMBROSE-IGHO et al., 2021). La croissance des organismes photosynthétiques est généralement limitée par les concentrations en azote et phosphore présent dans l'eau. Cette augmentation rapide de la concentration en phytoplancton est également appelée "*efflorescence*" ou encore "*bloom*" phytoplantonique.

L'utilisation de la télédétection afin d'observer les blooms phytoplanctoniques comporte différents avantages. L'opportunité de prendre des mesures en continu et sur de larges surfaces est certes l'une des plus importantes. Les efflorescences sont des phénomènes qui peuvent survenir sur de courtes durées, entre quelques jours et quelques semaines, et peuvent également se produire localement (HAFEEZ et al., 2018). L'observation de l'entièreté d'un lac peut de ce fait permettre de mieux comprendre le fonctionnement des processus amenant aux efflorescences et ainsi permettre d'en trouver plus facilement les causes. Néanmoins, l'utilisation de la télédétection comporte tout de même certaines limites telles que l'observation de nuages. La présence de nuages dans le ciel empêche l'observation de la chlorophylle-A dans l'eau par télédétection optique. Les pixels contenant des nuages sont alors masqués et diminuent parfois considérablement la quantité de données de chlorophylle-A obtenues. Ensuite, la télédétection permet uniquement une estimation de la chlorophylle-A présente en surface de la colonne d'eau. Les efflorescences présentes en profondeur ne peuvent pas être déterminées grâce aux observations de surface.

2.3.2 Classification des masses d'eau

Eaux du Cas I ou Cas II

Deux classes d'eaux sont identifiées par MOREL et PRIEUR (1977) et GORDON et MOREL (1983) lors de leur recherche sur les algorithmes bio-optiques d'estimation de la chlorophylle-A. Les masses d'eau sont soit dans le cas I, dominées par la chlorophylle-A par rapport aux concentrations des autres particules présentes dans l'eau, soit dans le cas II, dominées par les particules inorganiques présentes dans l'eau lorsque les concentrations en chlorophylle-A sont plus faibles. L'estimation des concentrations en chlorophylle-A par télédétection, lorsque l'eau est dans le cas II, est beaucoup plus compliquée car les pigments de chlorophylle n'influencent pas de manière majoritaire l'absorption du rayonnement dans la masse d'eau. Il est donc difficile de déterminer la contribution plus spécifique de la chlorophylle-A sur l'absorption totale. Le lac Tanganyika est classé comme un lac de cas I dont la contribution des phytoplanctons à l'atténuation du rayonnement photosynthétiquement disponible est supérieure à 50% (HORION et al., 2010).

Eaux oligotrophes, mésotrophes ou eutrophes

Une classification de l'eau peut également être réalisée en fonction des concentrations en chlorophylle-A. Cette classification informe de la teneur en éléments nutritifs présents dans l'eau. Plus les eaux seront riches en nutriments, plus les concentrations en chlorophylle-A observées sur le lac seront élevées. La classification définie par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis et reprise par KLEMAS (2011) est présentée dans la table 1.

TABLE 1 – Classification des concentrations en chlorophylle-A (KLEMAS, 2011).

Classe	Concentration
Oligotrophe	<5 mg/m ³
Mésotrophe	5-20 mg/m ³
Eutrophe	>20 mg/m ³

2.3.3 Historique de l’observation de la chlorophylle-A sur le lac

Les préoccupations concernant les concentrations en chlorophylle-A sur le lac Tanganyika ne sont pas récentes. Des mesures de concentrations en chlorophylle-A étaient déjà réalisées bien avant les années 2000 (CALJON, 1987; SALONEN et al., 1999). Les dynamiques spatiales et temporelles des concentrations en chlorophylle-A ont été étudiées dans un premier temps à l’aide de mesures in-situ sur différents points du lac. Depuis peu ces dynamiques ont été observées grâce à des instruments de télédétection. La surveillance en continu des concentrations en chlorophylle-A permettrait d’identifier les effets du changement climatique sur ce grand lac. Plusieurs recherches ont par ailleurs estimé que l’impact du changement climatique sur ce lac résulterait en une baisse de sa productivité primaire (BERGAMINO et al., 2010) liée, d’une part, à l’augmentation des températures de surface augmentant la stabilité de la colonne d’eau et d’autre part à la diminution de la vitesse des vents diminuant le mélange des couches d’eau (O’REILLY et al., 2003).

Afin d’observer la variabilité spatiale sur le lac, des campagnes de mesures ont été réalisées au niveau des principales villes entourant le lac telles que Bujumbura (Burundi) et Kigoma (Tanzanie) au nord du lac et Mpulungu (Zambie) au sud. Des croisières à travers le lac ont également été réalisées afin d’obtenir plus d’informations sur toute la longueur du lac (SALONEN et al., 1999; LANGENBERG et al., 2002; DESCY et al., 2005; LANGENBERG et al., 2008; DESCY et al., 2010).

Les variabilités spatiales et temporelles observées grâce aux diverses mesures in-situ réalisées ont déjà permis de mettre en évidence la principale cause de blooms phytoplanctoniques sur ce lac. La cause la plus fréquemment relevée est le phénomène d’upwelling observé dans le sud du lac en saison sèche. L’upwelling va avoir pour effet d’augmenter les concentrations en chlorophylle-A grâce à une remontée des eaux des profondeurs riches en nutriments (SALONEN et al., 1999; LANGENBERG et al., 2008).

Les observations réalisées à l’aide de la télédétection ont par la suite permis d’observer l’entière du lac sur un période de plusieurs années. BERGAMINO et al. (2007) ont observé la dynamique spatio-temporelle des phytoplanctons sur le lac Tanganyika entre 1997 et 2004 à l’aide des données satellites provenant de SeaWiFS. Trois régions nord-centre-sud ont été

délimitées à l'aide d'une fonction empirique orthogonale, pour regrouper les régions possédant des caractéristiques temporelles de chlorophylle-A similaires. La région centrale a été considérée comme une zone de transition entre les régions nord et sud en possédant sa propre dynamique temporelle. Un délai d'un mois a par ailleurs été observé entre les pics de concentration des régions nord et sud. Par la suite, les observations de BERGAMINO et al. (2010) basées sur des données MODIS de 2002 à 2006 ont montré plus en détail le gradient de concentration en chlorophylle-A du nord au sud du lac en découpant le lac en 13 régions. Les observations de BERGAMINO et al. (2010) étaient alors en accord avec celles de BERGAMINO et al. (2007) mais en informant en plus de la dynamique particulière des régions côtières qui ne participent pas à ce gradient nord-sud.

2.3.4 Upwelling saisonnier sur le lac Tanganyika

Une des principales causes influençant la dynamique de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika est l'upwelling apparaissant en saison sèche dans le sud du lac. L'upwelling du lac Tanganyika est au centre d'une grande partie des publications sur l'observation de la chlorophylle-A sur ce lac (COULTER, 1991; BERGAMINO et al., 2007; BERGAMINO et al., 2010; CORMAN et al., 2010; MZIRAY et al., 2018). Cet upwelling est initialement induit par une variation des conditions climatiques saisonnières sur le lac.

Deux saisons sont observées durant l'année : la saison sèche de mai à septembre et la saison humide entre octobre et avril. Les observations de DESCY et al. (2010) réalisées à Mpulungu et Kigoma entre 2002 et 2006 montrent que différentes conditions climatiques sont observées entre la saison sèche et la saison humide. La saison sèche est caractérisée par des températures de l'air généralement plus faibles, des vents de plus fortes intensités et peu de pluie.

L'influence des vents sur l'upwelling du lac en saison sèche est illustrée schématiquement à la figure 7 de PLISNIER et al. (1999). Les remontées d'eaux froides et riches en nutriments induisent l'augmentation des concentrations observées durant la saison sèche. Une augmentation de l'intensité des vents et une diminution de la température de l'air (Plisnier et al., 1999) sont à l'origine du mouvement des masses d'eau menant à l'inclinaison de la thermocline dans le lac et à un upwelling dans le sud du lac. Une thermocline est une zone de transition séparant la couche d'eaux de surface appelée épilimnion, plus chaudes et pauvres en nutriments, de la couche d'eaux des profondeurs appelée hypolimnion, plus froides et riches en nutriments. De janvier à avril lorsque la thermocline est en équilibre, les eaux des profondeurs ne sont pas en contact avec la zone euphotique où sont présents les organismes photosynthétiques. De mai à septembre, des vents de plus fortes intensités dirigés vers le nord poussent les eaux de surface et induisent un déséquilibre de la thermocline (NAITHANI et al., 2002). Lors du déséquilibre de la thermocline observé durant la saison sèche, la thermocline va alors remonter vers la surface du côté sud du lac et descendre plus en profondeur dans

la partie nord (PLISNIER et al., 1999). L'élévation de la thermocline observée dans la partie sud du lac va permettre aux organismes photosynthétiques de disposer des éléments nutritifs nécessaires à leur croissance (EHRENFELS et al., 2021). Leur croissance ne sera donc plus limitée par les faibles concentrations en nitrates et phosphates présentes dans l'épilimnion en saison humide (PLISNIER et al., 1999).

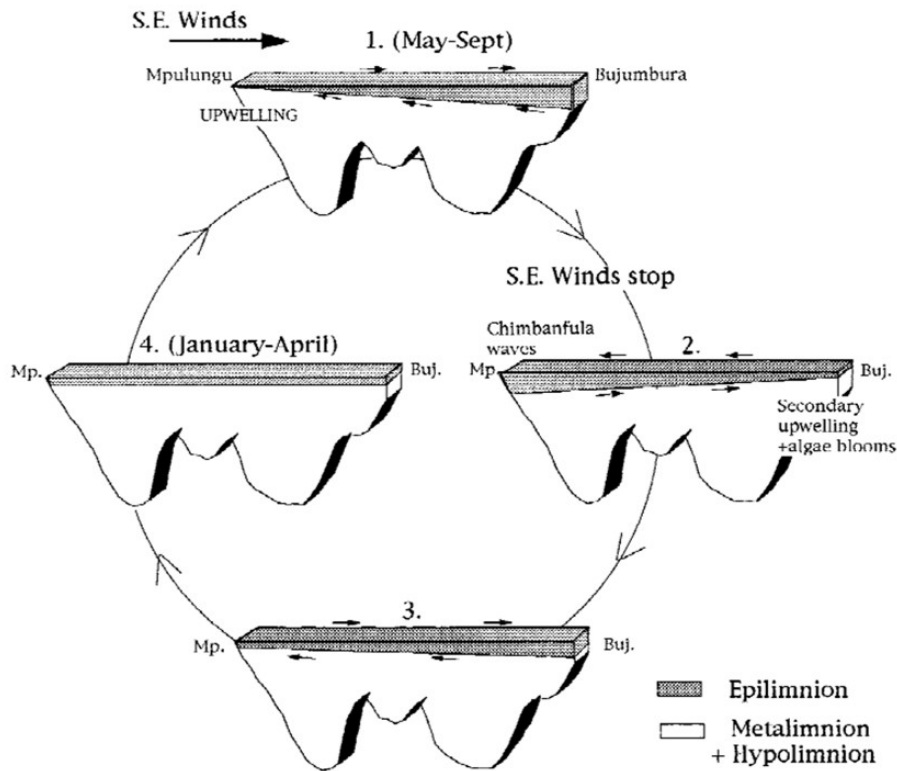


FIGURE 7 – Dynamique des vents et upwelling du lac Tanganyika (PLISNIER et al., 1999).

En fin de saison sèche, les vents diminuent d'intensité et un balancement de la thermocline est observé jusqu'à atteindre à nouveau l'état d'équilibre. Ce balancement induit l'élévation des concentrations en chlorophylle-A dans le nord du lac en septembre suite à la diminution des vents. Cette augmentation des concentrations dans le nord est considérée comme un second upwelling et des vagues importantes sont observées dans le sud du lac appelées "Chimbanfula waves", connues pour provoquer la mort des poissons (PLISNIER et al., 1999).

3 Présentation de la zone d'étude

Le lac Tanganyika est situé en Afrique dans la vallée du rift est-africain entre le Burundi, la République Démocratique du Congo (RDC), la Tanzanie et la Zambie. Il est situé plus précisément entre les latitudes 3°30' et 8°50' Sud et les longitudes 29°05' et 31°15' Est. Ce lac est connu pour être le plus long lac d'eau douce au monde avec ses 677 km de longueur et une largeur moyenne de 50 km (PLISNIER et al., 1999). Il est également le plus large réservoir d'eau douce en Afrique pouvant contenir un volume de presque 19 000 km³ (LANGENBERG et al., 2003), soit environ 9% des ressources en eau douce terrestre (BERGAMINO et al., 2007). La biodiversité autour et dans le lac est importante car plus de 500 espèces endémiques d'invertébrés et de vertébrés aquatiques ont été recensées (CAZENAVE-PIARROT et al., 2015).

Le bassin hydrologique du lac Tanganyika est présenté à la figure 8. Le bassin versant du lac est entouré en mauve, celui-ci est largement étendu sur le territoire de la Tanzanie et comprend également l'entièreté du lac Kivu en partie situé au Rwanda. La surface du lac Tanganyika, de 32 600 km², ne représente que 14% de la surface totale du bassin versant (CAZENAVE-PIARROT et al., 2015).

Trois grandes rivières entament ou finissent leur parcours dans le lac Tanganyika : les rivières Rusizi, Malagarasi et Lukaga. La rivière Rusizi relie le sud du lac Kivu (située en partie au Rwanda et en RDC) jusqu'au nord du lac Tanganyika proche de Bujumbura au Burundi. Ensuite, la rivière Malagarasi qui prend sa source au Burundi, traverse le lac Chanza et finit par se jeter dans le lac Tanganyika au niveau de la Tanzanie. Enfin, la rivière Lukaga qui prend sa source dans le lac Tanganyika en RDC va ensuite se jeter dans la rivière Lualaba et son eau finira par atteindre le fleuve Congo.

Plusieurs grandes villes entourent le lac telles que Kigoma en Tanzanie, Kalemie en RDC, Mpulungu en Zambie et Bujumbura, la capitale du Burundi. La population est fortement concentrée dans ces villes contrairement au reste du territoire. La répartition de la population autour du lac n'est donc pas homogène, des densités de populations plus élevées ont par ailleurs été recensées dans la partie nord du lac (CAZENAVE-PIARROT et al., 2015).

Le bilan hydrologique moyen du lac permet de définir les flux entrant et sortant du lac ainsi que le niveau d'eau moyen sur une année (figure 9). Les apports d'eau sont principalement liés aux précipitations sur le lac (environ 36 km³/an) et aux écoulements en provenance du bassin versant (environ 30 km³/an). Les pertes d'eau sont quant à elles liées à l'évaporation (environ 56 km³/an) et à l'exutoire de la rivière Lukuga (environ 10 km³/an) (CAZENAVE-PIARROT et al., 2015). La figure 9 montre que le niveau de l'eau atteint généralement un pic en avril-mai et tend vers son minimum en octobre.

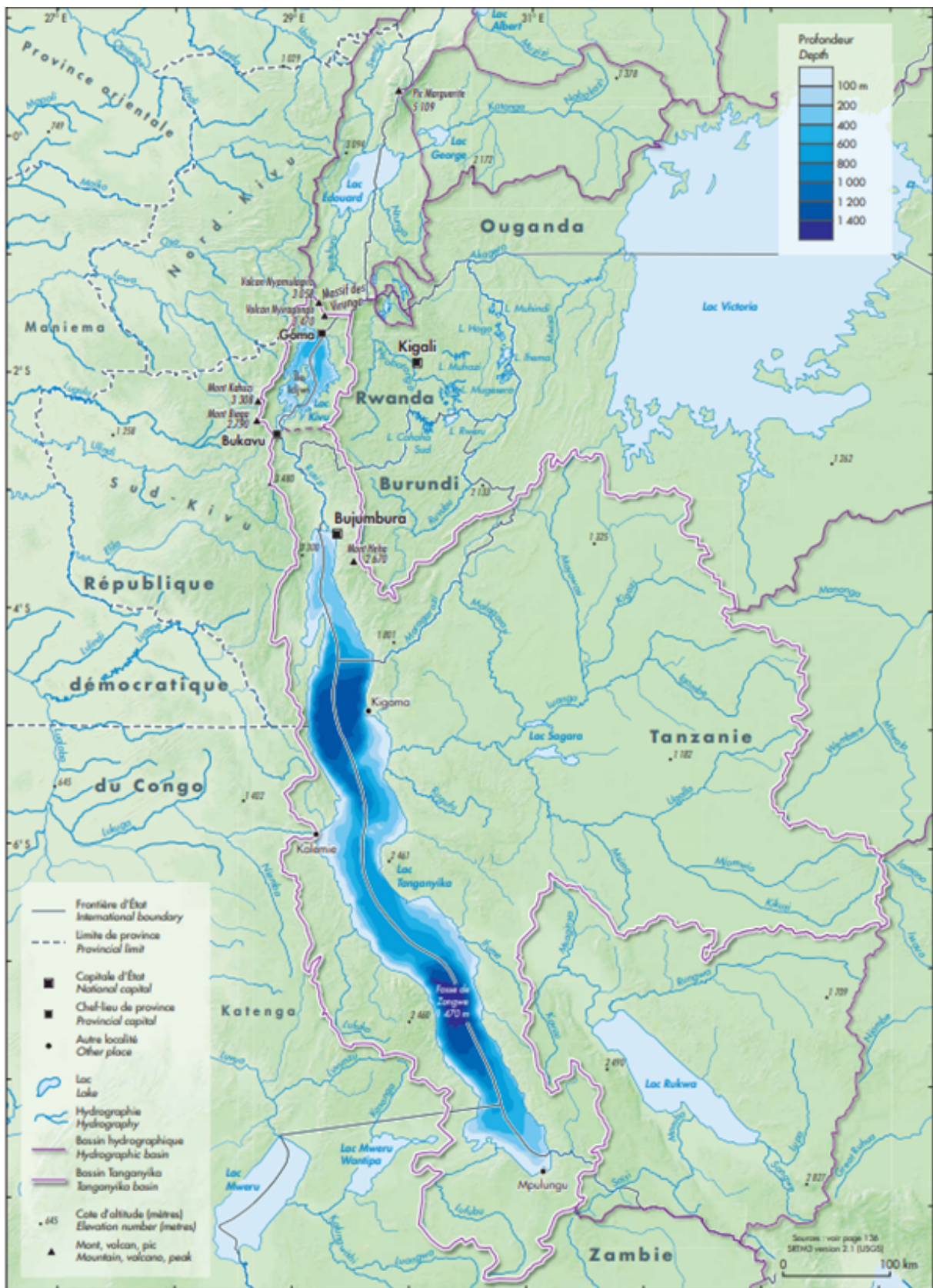


FIGURE 8 – Hydrologie et limnologie du lac Tanganyika (CAZENAIVE-PIARROT et al., 2015).

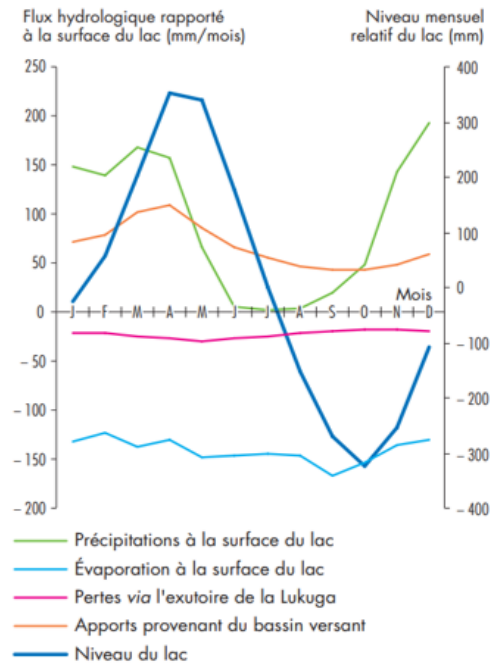


FIGURE 9 – Bilan hydrologique mensuel moyen du lac Tanganyika (CAZENAVE-PIARROT et al., 2015).

Une autre particularité du lac Tanganyika est qu’il compte parmi les lacs les plus profonds de la Terre en atteignant une profondeur maximale de 1470 m. La figure 8 montre également la répartition spatiale des profondeurs observées sur le lac en fonction de la teinte de bleu. Deux bassins sont ainsi mis en évidence au nord et au sud. Les pics de profondeur sont respectivement de 1350 m dans le nord et de 1470 m dans le sud. Une profondeur de 600 m est observée à l’intersection entre les deux bassins. Les grandes profondeurs présentes dans ce lac lui permettent d’être un lac méromictique (COULTER, 1991 ; PLISNIER et al., 1999) ce qui signifie qu’il possède une couche d’eau profonde qui ne se mélange que rarement avec les eaux de surface. La stratification est observée par la présence d’une thermocline qui sépare les eaux de surface plus chaudes et les eaux des profondeurs plus froides. Les eaux de surface forment une couche appelée également épilimnion et les eaux de profondeurs peuvent également être appelées hypolimnion.

4 Méthodologie

4.1 Description globale de la méthodologie

Une description globale de la méthodologie est réalisée afin de mieux comprendre la chronologie des étapes suivies. Un schéma de cette méthodologie est présentée à la figure 10.

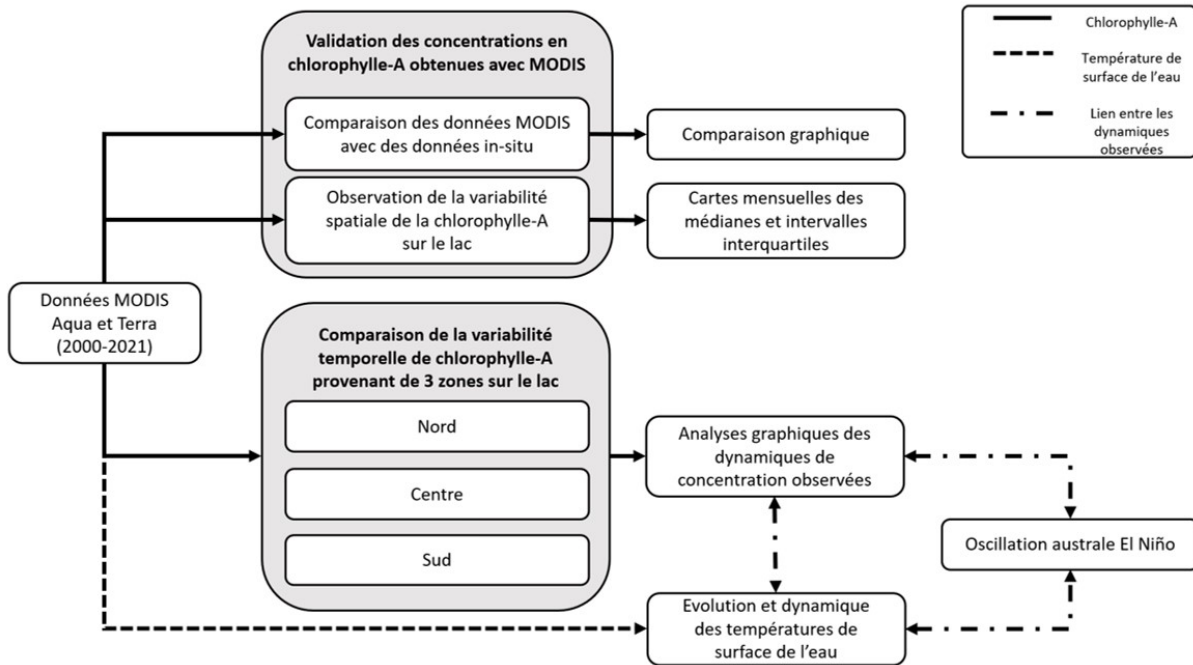


FIGURE 10 – Description générale de la méthodologie.

L'étude réalisée repose sur des données MODIS sélectionnées entre 2000 et 2021. La première étape consiste en une validation des concentrations en chlorophylle-A issues des produits dérivés de chlorophylle-A de MODIS Aqua et Terra. La validation est réalisée en comparant les données observées à des données collectées in-situ et, par la suite, en observant la dynamique spatiale de la chlorophylle-A à l'aide de cartes. Ces premiers résultats, combinés à différentes publications scientifiques permettront d'évaluer la fiabilité des résultats obtenus.

La deuxième étape consiste en une observation de la dynamique temporelle de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika découpé en trois zones. L'intérêt se porte plus particulièrement sur la comparaison de la dynamique des trois zones observées. Ces trois zones ont déjà montré des différences dans leur dynamique spatiale et temporelle (BERGAMINO et al., 2007 ; BERGAMINO et al., 2010). Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre la dynamique plus spécifique de la chlorophylle-A sur le lac et également d'observer leur évolution à long terme.

La dernière étape permet d'estimer si le phénomène d'oscillation australe El Niño influence la dynamique temporelle de chlorophylle-A observée. La dynamique temporelle de la température de surface de l'eau, également issue des produits dérivés de MODIS Aqua et Terra, est par la même occasion mise en relation avec les concentrations en chlorophylle-A observées et les périodes d'oscillations australes El Niño.

4.2 Données satellites

L'utilisation de données issues de capteurs satellites permet d'obtenir un plus grand nombre d'observations qu'avec des données prises in-situ. Les capteurs satellites permettent ainsi d'étendre les observations au niveau spatiale et de considérer une plus large durée d'étude. Les données provenant des capteurs satellites MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua et Terra ont été choisies pour observer la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika car elles permettent d'observer la chlorophylle-A sur une période de 22 ans (2000-2021) pour analyser la tendance à long terme de la chlorophylle-A sur le lac. Les données provenant de la télédétection ont été collectées via la plateforme Google Earth Engine (GEE). Cette plateforme offre l'opportunité de pouvoir traiter un grand volume de données en même temps, ce qui est particulièrement utile pour l'étude de séries temporelles s'étalant sur plusieurs années.

4.2.1 MODIS Aqua et Terra

Les capteurs MODIS Terra et Aqua sont installés à bord des satellites Earth Observing System (EOS) et réalisent des mesures du rayonnement visible et infrarouge. MODIS Terra fut premièrement lancé par la NASA en 1999, suivit de près par le deuxième capteur MODIS Aqua en 2002. Les images prises par ces deux capteurs permettent une observation de la totalité de la surface de la Terre en 1 à 2 jours seulement. Les données spectrales sont récoltées dans 36 bandes et la résolution spatiale des capteurs varie entre 250 m, 500 m ou 1000 m en fonction de la bande spectrale choisie. La majorité des bandes ont cependant une résolution de 1000 m.

Les produits MODIS utilisés afin d'observer la chlorophylle-A sont le "Ocean Color SMI : Standard Mapped Image MODIS Terra Data " et le "Ocean Color SMI : Standard Mapped Image MODIS Aqua Data". Ces deux produits sont collectés séparément et ensuite fusionnés afin de réunir un maximum d'observations. Des concentrations en chlorophylle-A quotidiennes du lac sont collectées mais l'entièreté du lac n'est pas couvert chaque jour. Certains jours, seule une partie du lac est survolée. Ces produits, disponibles sur la plateforme Google Earth Engine, offrent une résolution spatiale de 4,6 km avec des données disponibles de mars 2000 à 2021 pour MODIS Terra et de juillet 2002 à 2021 pour MODIS Aqua. La résolution spatiale faible du produit MODIS utilisé est liée à son niveau de traitement. Pour les produits de

niveau 1 et 2, la taille des pixels augmente en largeur avec l’angle de balayage. Lorsqu’on applique un traitement de niveau 3 aux images, elles sont alors regroupées dans l’espace et dans le temps, la taille des pixels lors des regroupements est alors augmentée à 4000 m ou encore 9000 m. Les données MODIS de niveau 3 utilisées ont donc été regroupées avec une résolution spatiale plus grossière de 4600 m au lieu des 250-1000 m obtenue avec les niveaux de traitement 1 et 2.

Une autre particularité du produit de niveau 3 est la présence de masques sur certains pixels. Les produits de niveau 2 présentent souvent des drapeaux associés à chaque pixels qui informent sur la qualité de ceux-ci. Sur le produit de niveau 3, ces drapeaux sont appliqués sous forme de masques sur les données et peuvent alors réduire considérablement le nombre de données disponibles. La liste des différents masques appliqués aux produits MODIS Aqua et Terra de niveau 3 est reprise dans la table 2. Beaucoup de données sont donc masquées, parmi ces masques sont présents les masques des nuages, de mauvaises corrections atmosphériques ou encore des pixels contenant des reflets du soleil. Tous ces masques permettent de s’assurer de la bonne qualité des données restantes.

TABLE 2 – Noms et descriptions des différents masques appliqués aux produits MODIS Aqua et Terra (NASA OCEAN COLOR, 2022a).

Nom	Description du masque
ATMFAIL	Défaut de correction atmosphérique
LAND	Pixel sur la terre
HIGLINT	Refllet du soleil élevé
HILT	Radiance observée très élevée ou saturée
HISATZEN	Angle zénithal élevé de la vue du capteur
STRAYLIGHT	Contamination probable par la lumière parasite
CLDICE	Contamination probable par les nuages ou la glace
COCCOLITH	Coccolithophores détectés
HISOLZEN	Zénith solaire élevé
LOWLW	Radiance très faible de l’eau (ombre des nuages)
CHLFAIL	Échec de l’algorithme du produit dérivé
NAVWARN	Qualité de la navigation réduite
MAXAERITER	Les itérations sur les aérosols ont dépassé le maximum
CHLWARN	Qualité du produit dérivé est réduite
ATMWARN	Correction atmosphérique suspecte
NAVFAIL	Mauvaise navigation

Les différentes bandes fournies par les deux produits MODIS utilisés sont présentées dans le tableau de l’Annexe A. Parmi les 14 bandes proposées, dix bandes fournissent des réflectances de télédétection de longueurs d’ondes (λ) allant de 400 à 700 nm et les quatre autres

bandes offrent des données sur les concentrations en chlorophylle-A (*chlor_a*), sur la hauteur de ligne de fluorescence normalisée (*nflh*), sur les carbones organiques particulaires (*poc*) et sur la température de l'eau (*sst*).

Le tableau suivant reprend les principales caractéristiques des produits MODIS utilisés pour la collecte des données.

TABLE 3 – Caractéristiques des capteurs MODIS et des données MODIS Aqua et Terra.

Satellites (capteur)	Lancement	Bandes spectrales	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Agence
EOS (MODIS)	1999 (T)/2002 (A)	36	250-1000 m	1-2 jours	NASA
Produit GEE	Période étudiée	Bandes disponibles	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Niveau de prétraitement
Produits GEE Aqua-Terra	Terra : 2000-2021 Aqua : 2002-2021	10 (λ) + 4 (<i>chlor_a</i> , <i>poc</i> , <i>nflh</i> , <i>sst</i>)	4600 m	1-2 jours	3

4.2.2 Estimation des concentrations en chlorophylle-A avec MODIS

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 de télédétection perçues par les capteurs avec des concentrations en chlorophylle-A présentes dans l'eau. La chlorophylle-A peut être observée à l'aide des bandes de longueurs d'ondes dans le visible telles que le vert et le bleu. La chlorophylle-A étant un pigment vert, elle va avoir une influence sur la couleur de l'eau. Plus la concentration en chlorophylle-A augmente dans l'eau, plus l'eau passe du bleu au vert.

L'estimation des concentrations en chlorophylle-A sur le lac Tanganyika est réalisée avec la bande de chlorophylle-A fournie par les produits MODIS Aqua et Terra, appelée bande "*chlor_a*" (annexe A). L'algorithme utilisé par défaut pour créer cette bande "*chlor_a*" comprend en réalité plusieurs parties selon les concentrations en chlorophylle-A estimées.

Lorsque les concentrations en chlorophylle-A sont inférieures à 0,15 mg/m³, l'indice de couleur (CI) de HU et al. (2012) est utilisé avec les bandes bleue, verte et rouge. L'algorithme CI est présenté à l'équation 3.

$$CI = R_w^{555} - \frac{R_w^{443} + (555 - 443)}{(667 - 443) * (R_w^{667} - R_w^{443})} \quad (3)$$

avec R_w les réflectances de sortie de l'eau pour les bandes bleue, verte et rouge correspondant respectivement aux bandes 443, 555, 667 nm utilisées avec les capteurs MODIS. La bande de

longueur d'onde de 555 nm n'étant pas proposée par les produits MODIS, HU et al. (2012) ont proposé de remplacer ces valeurs par la bande de 547 nm en la multipliant par 0,93 pour obtenir leurs résultats.

Lorsque les concentrations sont supérieures à 0,20 mg/m³ l'algorithme OC3 de O'REILLY et al. (2000) est plutôt utilisé avec les bandes bleu et verte uniquement. L'algorithme OC3 est composé des équations 4 et 5.

$$Chl_{OC3} = 10^{0,2424 - 2,7423R_{SM} + 1,8017R_{SM}^2 + 0,0015R_{SM}^3 - 1,2280R_{SM}^4} \quad (4)$$

$$R_{SM} = \log_{10}(R_{547}^{443} > R_{547}^{488}) = \log_{10} \frac{\max(R_w^{443}, R_w^{488})}{R_w^{547}} \quad (5)$$

L'algorithme OC3 présenté à l'équation 5 utilise le rapport des bandes 443 nm et 488 nm dans le bleu avec la bande 547 nm dans le vert. Les coefficients présents dans cet algorithme ont premièrement été définis par O'REILLY et al. (2000), et par la suite ont été utilisés par HORION et al. (2010) sur le lac Tanganyika. Ces coefficients ont ensuite été modifiés par le OCEAN BIOLOGY PROCESSING GROUP (OBPG) et NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER (2010) pour obtenir les coefficients actuellement proposés par la NASA et présentés dans l'équation 4.

Entre 0,15 et 0,20 mg/m³ les algorithmes de rapport de bande OC3 et d'indice de couleur CI sont fusionnés sous le nom de CHL depuis le retraitement des données effectuées par l'OBPG en 2014 (O'REILLY & WERDELL, 2019).

Différentes mesures in-situ de concentrations en chlorophylle-A ont été relevées lors de précédentes études réalisées sur le lac Tanganyika. Celles-ci montrent généralement des concentrations en chlorophylle-A supérieures à 0,20 mg/m³ à la surface de l'eau (CHALE, 2004; DESCY et al., 2005; STENUITE et al., 2007; LANGENBERG et al., 2008; PLISNIER et al., 2009). Cependant, des concentrations en chlorophylle-A inférieures à 0,20 mg/m³ ont tout de même été observées sur le lac mais généralement plus en profondeur.

4.2.3 Correction atmosphérique

L'importance d'une correction atmosphérique des données a été évoquée précédemment. Une correction atmosphérique standard est appliquée aux données MODIS collectées. Cette correction atmosphérique standard est adaptée à des masses d'eau se trouvant au niveau de la mer. Cependant, HORION et al. (2010) font remarquer que le lac Tanganyika n'est pas situé au niveau de la mer, mais bien à 770 m d'altitude. Une adaptation de la correction atmosphérique standard doit donc être appliquée aux données.

L'adaptation de la correction atmosphérique des données n'a, néanmoins, pas pu être réalisée dans le cadre de ce mémoire étant donné l'utilisation de la plateforme Google Earth Engine pour observer une large série temporelle de données. Il n'existe à ce jour pas suffisamment d'informations pour réaliser cette correction atmosphérique adaptée grâce à un code sur GEE. De ce fait, il a été décidé de ne pas appliquer d'adaptation de la correction atmosphérique aux données satellites collectées sur GEE. Les données collectées, corrigées avec une correction atmosphérique standard, permettront tout de même l'observation des dynamiques temporelles et spatiales de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika.

4.2.4 Retrait des données aberrantes

Une médiane spatiale des pixels de chaque image du lac a été réalisée pour collecter des concentrations en chlorophylle-A quotidiennes du lac. Le graphique mettant en relation les concentrations médianes en chlorophylle-A observées sur le lac avec le nombre de pixels non masqués par image est présenté à la figure 11. Cette figure montre que les concentrations les plus élevées ont été obtenues lorsque moins de 100 pixels sont collectés sur le lac, ce qui correspond à une surface inférieure à 8% de la surface totale du lac. Il a donc été décidé de ne pas utiliser les données pour lesquelles moins de 100 pixels sont obtenus sur le lac. La principale raison est liée au nombre de pixels masqués. Lorsque peu de pixels sont collectés sur le lac, cela signifie que beaucoup de pixels sont masqués pour différentes raisons reprises dans la table 2 présentée précédemment. Les pixels restants ont alors plus de chance d'être également influencés par différents paramètres, fournissant alors probablement une valeur erronée de concentration en chlorophylle-A.

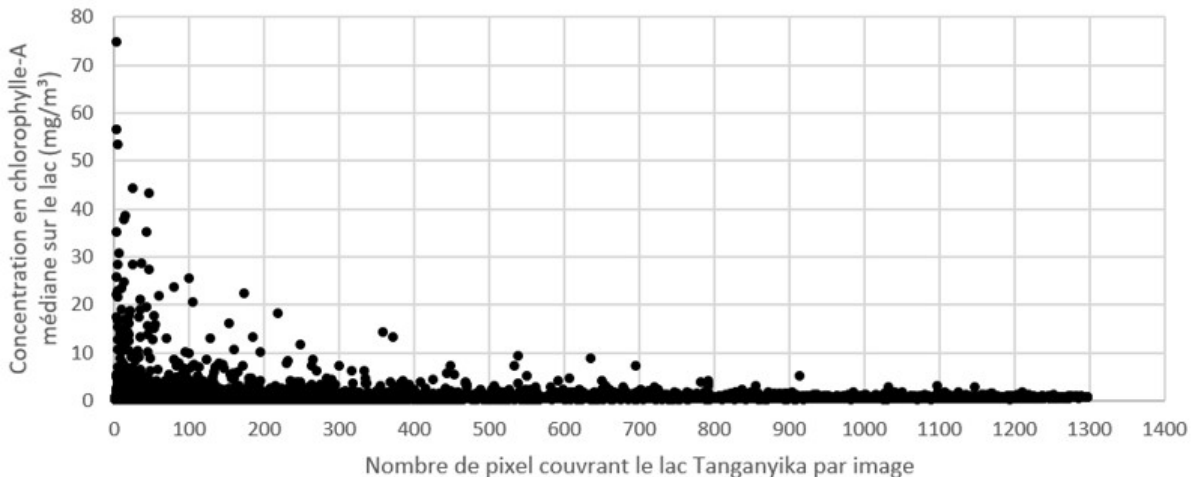


FIGURE 11 – Relation entre les concentrations médianes en chlorophylle-A collectées et le nombre de pixels disponibles par image.

4.3 Comparaison des données MODIS avec des données in-situ

Les données provenant de MODIS Aqua et Terra vont dans un premier temps être comparées à des données prises in-situ sur le lac Tanganyika. Les données in-situ utilisées proviennent des projets BELSPO (Belgian Science Policy Office) CLIMLAKE sur l'impact de la variabilité climatique sur le lac Tanganyika et CLIMFISH concernant l'impact du changement climatique sur l'utilisation durable des pêcheries du lac Tanganyika (SPP POLITIQUE SCIENTIFIQUE, 2022). Ces données ont été produites pour l'article de DESCY et al. (2010). Les concentrations en chlorophylle-A ont été déterminées grâce à une analyse HPLC (DESCY et al., 2005).

Les données in-situ de chlorophylle-A ont été collectées dans les eaux côtières de Kigoma, situé au nord du lac, et de Mpulungu situé plus au sud, respectivement aux coordonnées de 4°51.26'S et 39°35.54'E pour Kigoma et de 8°43,98'S et 31°02.43'E pour Mpulungu. Les données MODIS ont quant à elles été récupérées sur une surface de 16 km², autour des coordonnées in-situ, au vu de la faible résolution spatiale offerte par les produits MODIS utilisés. Les surfaces côtières observées à l'aide de MODIS sont présentées à la figure 12.

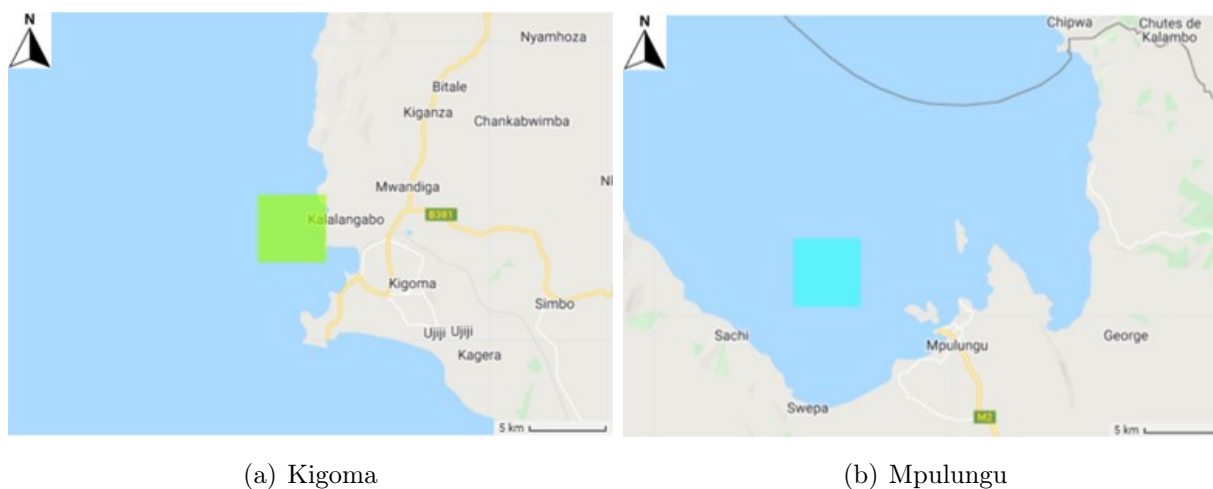


FIGURE 12 – Zones de 16 km² de collecte des données MODIS centrées sur les coordonnées GPS des lieux d'échantillonnages in-situ au niveau de Kigoma et de Mpulungu. Les coordonnées utilisées pour extraire les données sur GEE sont disponibles à l'annexe B.1.

Les données de chlorophylle-A médianes sur les zones considérées sont collectées et misent en relation avec les données présent in-situ sur les périodes de mars 2002 à février 2006 pour Kigoma et de février 2002 à août 2006 pour Mpulungu.

4.4 Variabilité spatiale de la chlorophylle-A sur le lac

La variabilité spatiale de la chlorophylle-A est observée sur le lac en utilisant les données MODIS de mars 2000 à décembre 2021. Ces données sont observées pour chacun des 12 mois de l'année sur l'entièreté du lac. Les coordonnées du lac sont disponibles à l'annexe B.2. Différents types de cartes mensuelles sont réalisées : des cartes présentant les médianes et les

intervalles interquartiles mensuels interannuels pour chaque pixel sur les 22 années. Le script utilisé sur Google Earth Engine permettant d’obtenir ces cartes mensuelles est fourni à l’annexe C.1. Une hypothèse de travail a été posée lors de la filtration des données par mois : les mois de février sont considérés comme comptant chaque année 28 jours.

4.5 Variabilité temporelle de la chlorophylle-A entre 2000 et 2021

BERGAMINO et al. (2007) et BERGAMINO et al. (2010) ont précédemment montrés que plusieurs zones peuvent être définies sur le lac. À l’aide d’une fonction empirique orthogonale, les auteurs ont regroupé les régions possédant des caractéristiques temporelles de chlorophylle-A similaires en trois régions. Basées sur leurs observations, une découpe du lac a été réalisée en trois zones nommées zone nord, centrale et sud du lac. Ces trois zones sont présentées à la figure 13. Les coordonnées GPS utilisées pour délimiter chacune des zones sont disponibles à l’annexe B.3.



FIGURE 13 – Délimitation des trois zones observées sur le lac : la zone nord en rouge, la zone centrale en jaune et la zone sud en vert.

L’observation de la dynamique temporelle des concentrations en chlorophylle-A de chacune de ces zones va être réalisée sur base de données allant de mars 2000 à décembre 2021.

L'observation des dynamiques de chlorophylle-A se fait à l'aide de concentrations médianes journalières de chlorophylle-A par zone. La collecte des concentrations médianes quotidiennes est réalisée à l'aide du script utilisé sur Google Earth Engine et présenté à l'annexe C.2.

Les différents graphiques réalisés permettront d'une part de caractériser la variabilité intra et inter-annuelle de la chlorophylle-A sur le lac et, d'autre part, de déterminer si une tendance est observée à long terme. Afin de déterminer si les tendances observées sont significatives ou non, le test de Mann-Kendall est également appliqué. Ce test est non paramétrique et permet d'identifier les tendances dans les séries temporelles. Plusieurs résultats de ce test permettent, d'une part, de connaître la probabilité d'observer une tendance significative sur la dynamique temporelle observée à l'aide de la p-value et, d'autre part de connaître l'inclinaison de la pente grâce au paramètre Z. Le paramètre Z (da SILVA et al., 2015 ; GÜÇLÜ, 2020) est calculé grâce aux équations suivantes :

$$Z = \begin{cases} (S - 1)/\sqrt{Var(S)}, & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S + 1)/\sqrt{Var(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (7)$$

avec n, le nombre d'observations, x_j et x_k , les observations réalisées au temps j et k ($j > k$), et $\text{sgn}()$ la fonction de signe calculée via l'équation 8.

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

La variance de S est calculée via l'équation 9

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (9)$$

Une valeur de Z négative informe d'une diminution des concentrations à long terme et inversement pour une valeur de Z positive.

4.6 Relation entre la chlorophylle-A, la température de l'eau et ENSO

Suite à l'observation de la dynamique temporelle de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika, il est intéressant de déterminer si cette dynamique est influencée par les phénomènes El Niño observés périodiquement. Le phénomène d'oscillation australe El Niño (El Niño Southern Oscillation - ENSO) induit, en général, des changements dans les précipitations et les vents

(da ROSA WIELICZKO et al., 2021). L'intérêt est donc de déterminer si ces changements sont également observés sur le lac Tanganyika et comment ils influencent les concentrations en chlorophylle-A.

L'influence de ENSO sur le lac Tanganyika a précédemment été analysée par PLISNIER (1998) qui a montré qu'une augmentation de la température de l'air et une diminution de la capture de poissons sont observées lors des épisodes de ENSO.

Oscillation australe El Niño et La Niña

La variabilité temporelle de l'oscillation australe El Niño (ENSO) a été estimée à l'aide de l'Indice Océanique Niño (ONI). Cet indice est une moyenne mobile sur trois mois des anomalies de température de surface de l'eau (SST) obtenues à partir du ERSST.v5 (HUANG et al., 2017) et ciblée sur la région El Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°E-170°W). Les ONI de 2000 à 2021 ont été obtenus sur le site web de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Les ONI supérieurs à 0,5°C sont considérés comme étant des mois El Niño. Des ONI inférieurs à -0,5°C sont considérés comme étant des mois La Niña. De plus, suivant la méthodologie proposée par TRENBERTH (1997) et citée par da ROSA WIELICZKO et al. (2021), les années présentant une anomalie de température de surface de l'eau supérieure (inférieure) à + (-) 1,5°C sont considérées comme des années dont El Niño (La Niña) est de forte intensité, entre + (-) 1 et + (-) 1,5°C d'intensité modérée et entre + (-) 0,5 et + (-) 1°C d'intensité faible. Les années pour lesquelles un phénomène El Niño de forte intensité ont été observés sont 2009-2010 et 2015-2016, d'intensité modérée en 2002 et de faible intensité en 2004, 2006, 2009, 2014-2015 et 2018-2019. Pour La Niña, les phénomènes de fortes intensités ont été observés en 2007-2008 et en 2010, d'intensité modérée en 2000 et en 2020, d'intensité faible en 2001, 2005-2006, 2016, 2017-2018 et en 2021.

Température de surface de l'eau

Les températures de surface de l'eau du lac Tanganyika vont également être obtenues grâce à un produit dérivé de MODIS. Les informations proviennent des mêmes produits MODIS SMI Aqua et Terra qu'utilisés pour l'observation de la chlorophylle-A. L'algorithme d'estimation de la température de surface de l'eau utilise les bandes proches de 4 µm, faisant parties des rayonnements infrarouges. Ces bandes ont une sensibilité élevée et sont situées dans la région du spectre où l'atmosphère est relativement transmissive (NASA OCEAN COLOR, 2022b).

Comparaison

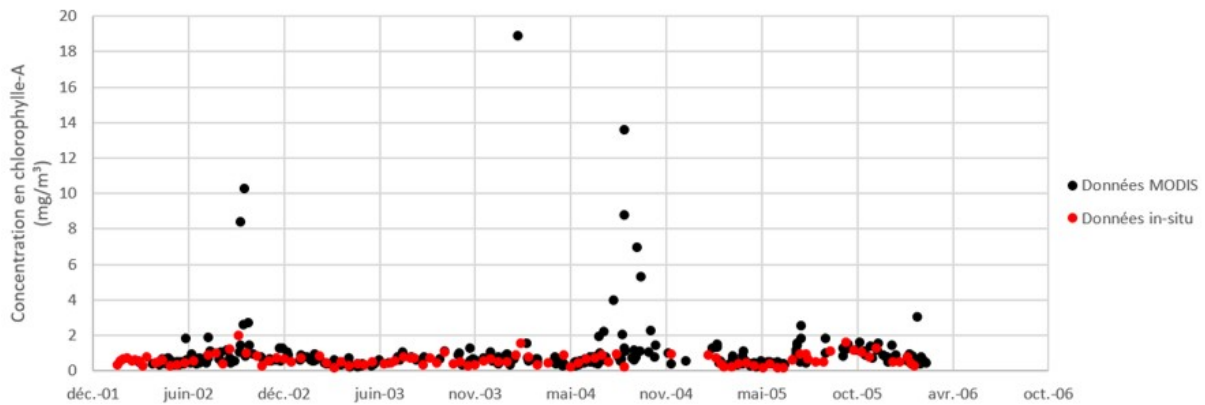
Les dynamiques de chlorophylle-A observées pour chacune des zones vont être observées parallèlement aux données de températures de surface de l'eau et aux ONI afin de voir si des influences de ENSO sont observées sur le lac Tanganyika.

5 Résultats

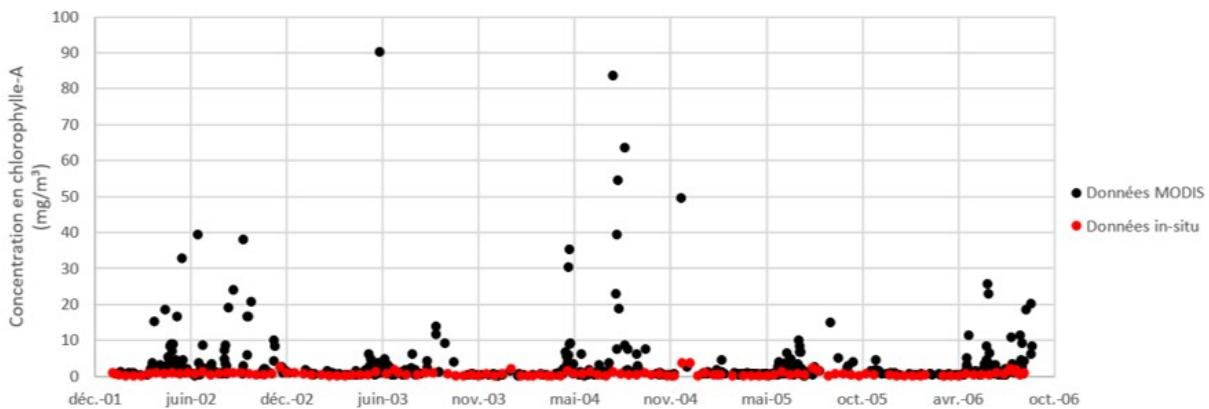
5.1 Validation des concentrations en chlorophylle-A collectées avec MODIS

5.1.1 Comparaison entre les données MODIS et les données in-situ

Les graphiques présentés à la figure 14 montrent les données MODIS et in-situ collectées entre 2002 et 2006 dans les eaux côtières de Kigoma et de Mpulungu. Les données in-situ atteignent au maximum 2 mg/m³ à Kigoma et restent inférieure à 4 mg/m³ à Mpulungu. Les données MODIS montrent quant à elles des pics de concentration en septembre 2002 ainsi que de juillet à septembre 2004 à Kigoma et chaque année de mai à décembre à Mpulungu. Les pics de concentration observés à Mpulungu sont fréquemment plus élevés que ceux observés à Kigoma. Outre les différents pics de chlorophylle-A observés avec MODIS sur ces deux graphiques, le reste des données MODIS observées est majoritairement inférieur à 4 mg/m³.



(a) Kigoma



(b) Mpulungu

FIGURE 14 – Données MODIS ($n = 2822$ à Mpulungu et $n = 1496$ à Kigoma) et in-situ ($n = 124$ à Mpulungu et $n = 99$ à Kigoma) collectées entre 2002 et 2006.

Pour observer plus précisément les correspondances entre les concentrations MODIS et in-situ inférieures à 5 mg/m^3 , les données MODIS et in-situ mesurées simultanément ont été sélectionnées et comparées sur des graphes 1 :1 (figure 15). Seules 17 % des données in-situ ont pu être gardées à Mpulungu et 24 % à Kigoma, les autres données n'ayant pas de données MODIS mesurées dans une fenêtre temporelle inférieure à un jour. Plusieurs données supplémentaires ont été écartées pour le graphe de Mpulungu car les concentrations MODIS observées étaient supérieures à 5 mg/m^3 , ne présentant alors aucune correspondance avec les données in-situ. Plus les données sont proches de la ligne en pointillé, plus il y a une correspondance entre celles-ci. Ces graphiques montrent que les données de Kigoma restent assez proches de la ligne alors que les données de Mpulungu s'écartent de plus en plus de la ligne lorsque les concentrations augmentent.

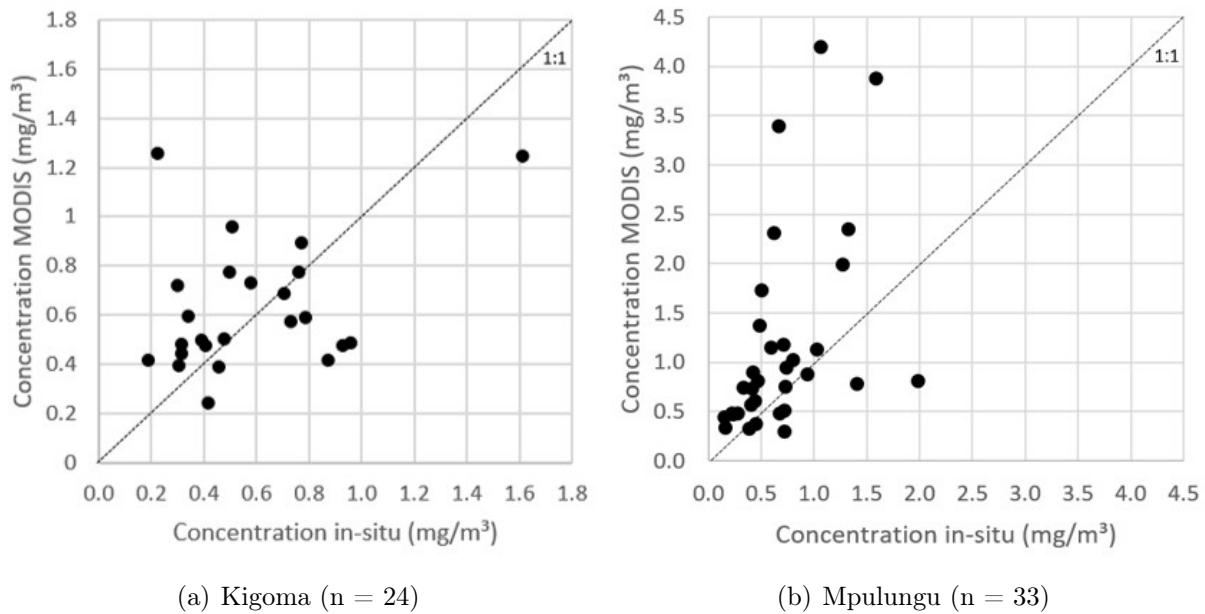


FIGURE 15 – Comparaison des concentrations in-situ et des concentrations MODIS à Kigoma et Mpulungu. La ligne en pointillé représente les correspondances exactes entre les deux jeux de données.

5.1.2 Variabilité spatiale de la chlorophylle-A sur le lac

Données MODIS Aqua et Terra collectées

Les capteurs MODIS Aqua et Terra collectent chacun des données quotidiennes de réflectance permettant de déterminer les concentrations en chlorophylle-A sur le lac. La mauvaise qualité des pixels, alors masqués, va cependant fortement diminuer le nombre de données réunies. De plus, le retrait des données dont moins de 100 pixels couvrent le lac réduit également le nombre de données observées. Au final, seules 33% des données sont disponibles pour étudier la variabilité de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika, comme le montre le tableau 4.

TABLE 4 – Nombre de données collectées avec MODIS Aqua et Terra.

Période considérée	01/03/2000 - 31/12/2021
Nombre de jours sur la période considérée	7 975 jours
Nombre d'images idéalement disponibles avec MODIS Aqua et Terra	15 094
Nombre d'images disponibles suite au masquage et au retrait de certaines données	4 928

La figure 16 permet ensuite de déterminer quels sont les intervalles de temps les plus fréquemment observés entre deux images collectées. Les intervalles les plus fréquemment observés sont de zéro et un jour, autrement dit, deux observations par jour sont assez souvent obtenues et, la majorité du temps, les observations sont quotidiennes. Des intervalles de temps plus longs sont néanmoins observés avec un intervalle maximum de 46 jours entre juin et août 2021. Plusieurs données par mois seront donc la plupart du temps disponibles. Ce graphique est également réalisé pour chacune des zones étudiées (figure 28 de l'annexe D), des résultats similaires sont obtenus avec majoritairement des intervalles d'un jour entre deux concentrations en chlorophylle-A collectées.

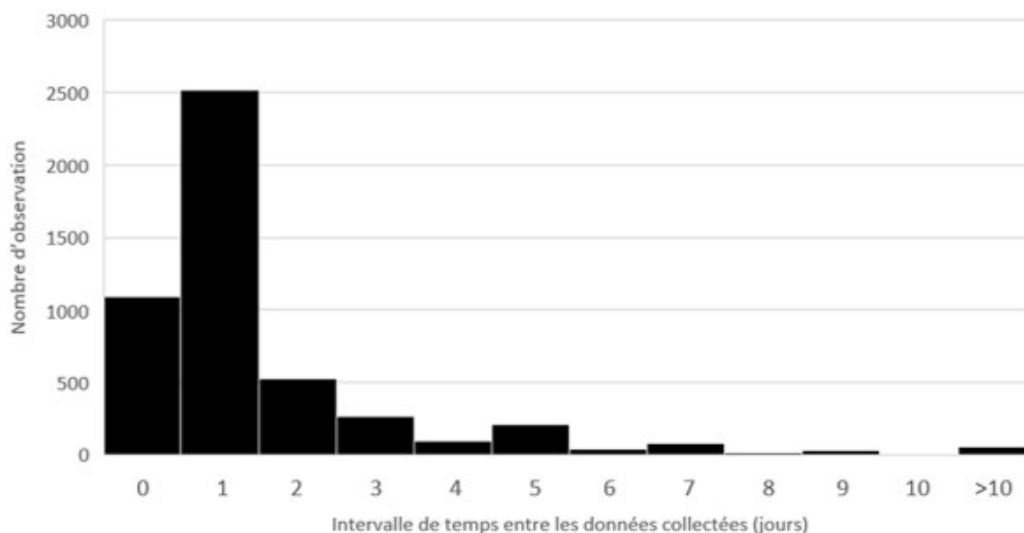


FIGURE 16 – Principaux intervalles de temps observés entre deux données exploitables. Grâce à la combinaison des données de MODIS Aqua et Terra jusqu'à deux données par jour peuvent être observées, réduisant alors l'intervalle à zéro jour.

La quantité de pixels obtenus par image est toutefois variable d'un moment à l'autre, la figure 17 présente les pourcentages de surface du lac couverte par des pixels par image. Cette figure a été réalisée sans prendre en compte les images de moins de 100 pixels précédemment exclues. Cette figure montre que la majorité des images collectées couvrent moins de 50% de la surface du lac.

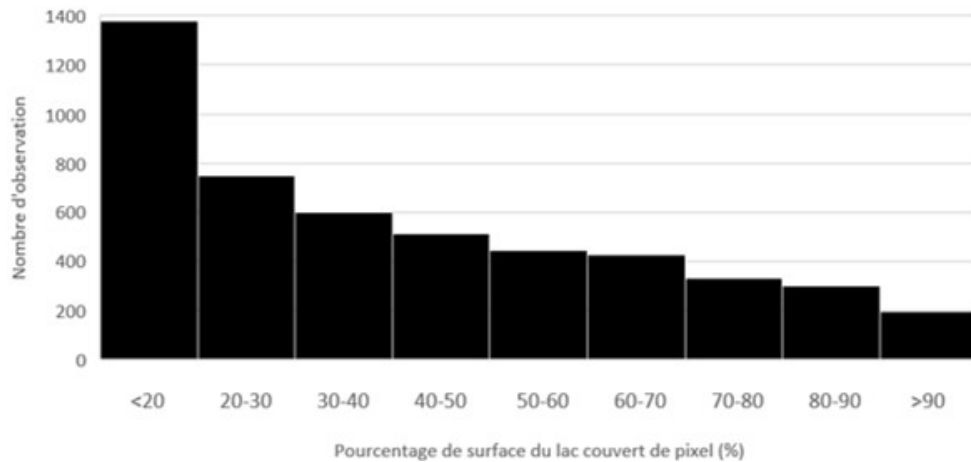


FIGURE 17 – Pourcentage de la surface du lac couverte par image.

La figure 18 permet d’observer la distribution spatiale et temporelle des pixels observés. La distribution du nombre de données mensuelles collectées par pixel permet de voir que le mois contenant le plus de données est le mois de mai avec par endroit plus de 900 données collectées par pixel. Une grande disparité est toutefois observée en mai entre la partie nord et la partie sud du lac. Le nombre de données collectées par pixel dans le nord du lac est généralement inférieure à celui de la partie sud. De septembre à février, les données collectées par pixel sont inférieures à 160.

Variabilité spatiale de la chlorophylle-A sur le lac

La variabilité spatiale de la chlorophylle-A est présentée sur les cartes mensuelles des figures 19 et 20.

La figure 19 montre les médianes inter-annuelles mensuelles des concentrations en chlorophylle-A sur le lac basées sur des observations quotidiennes allant de 2000 à 2021. Les données médianes sont calculées par mois pour chaque pixel du lac. Ces cartes permettent de réaliser plusieurs observations sur la variabilité spatiale présente sur le lac.

Premièrement, les concentrations médianes observées montrent une augmentation de la concentration en chlorophylle-A dans la partie sud du lac de mai à octobre avec des pics de concentration observés en août et septembre. Les pics de concentration observés en jaune présentent des concentrations supérieures ou égales à 2 mg/m^3 .

Deuxièmement, plusieurs localisations situées dans la partie nord du lac présentent également des pics de concentration. À l’extrémité nord du lac, au niveau de la ville de Bujumbura (Burundi) et dans la partie du lac s’enfonçant dans les terres, sont observées des zones fréquemment colorées en jaune avec des concentrations en chlorophylle-A atteignant les 2 mg/m^3 de juin à février.

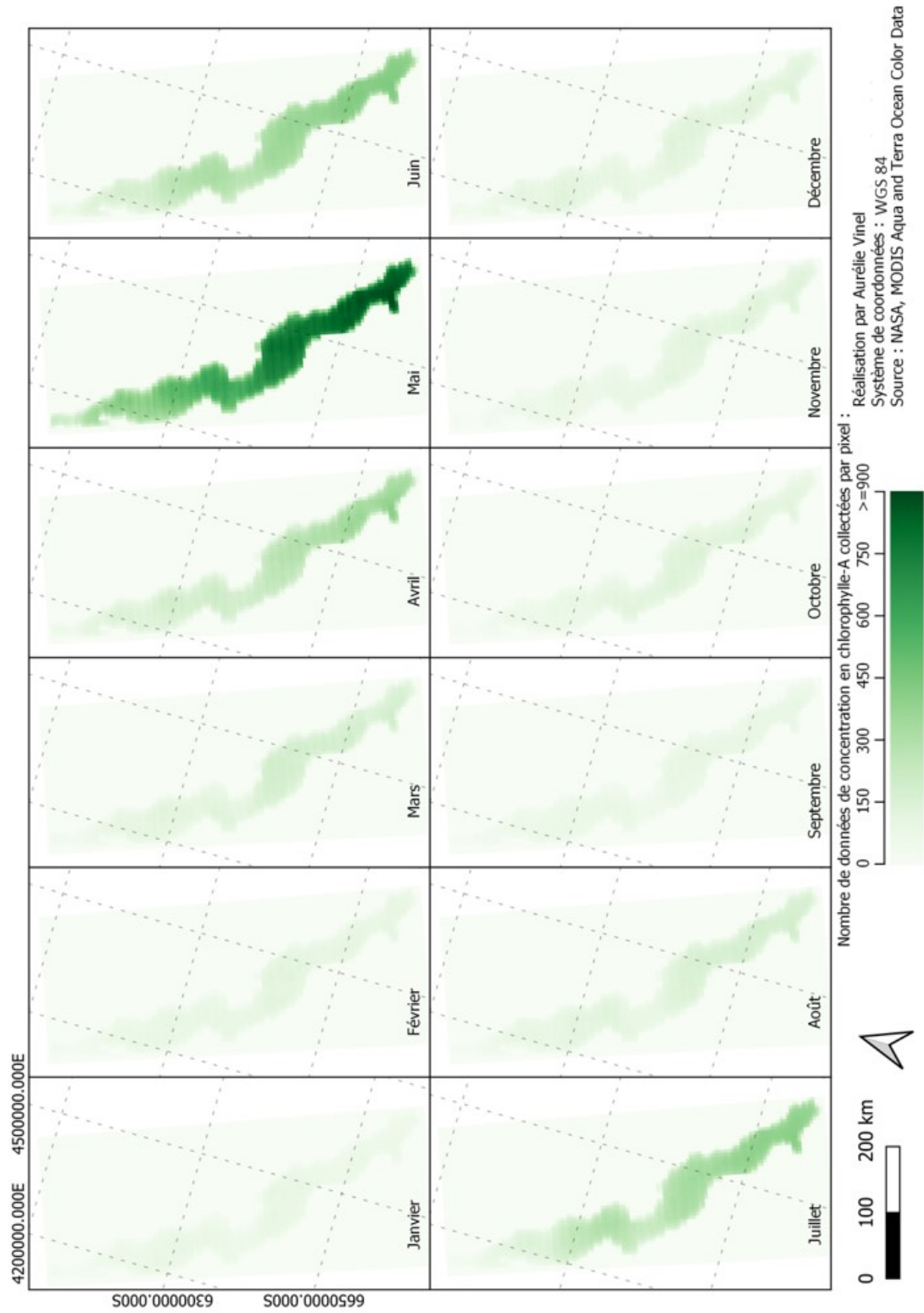


FIGURE 18 – Distribution spatiale mensuelle du nombre de données collectées par pixel provenant de MODIS Aqua et Terra.

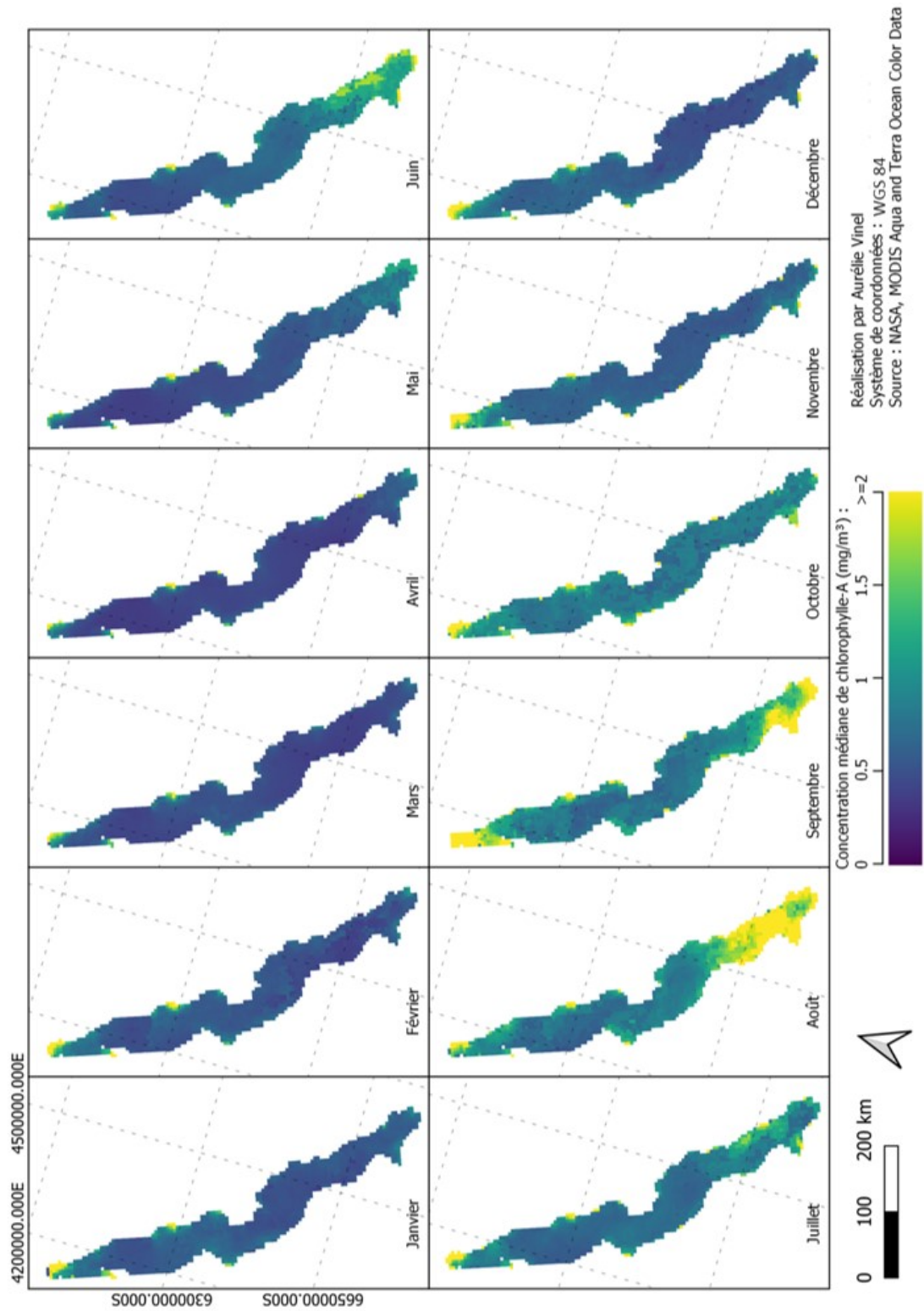


FIGURE 19 – Distribution spatiale mensuelle des concentrations en chlorophylle-A médianes par pixel.

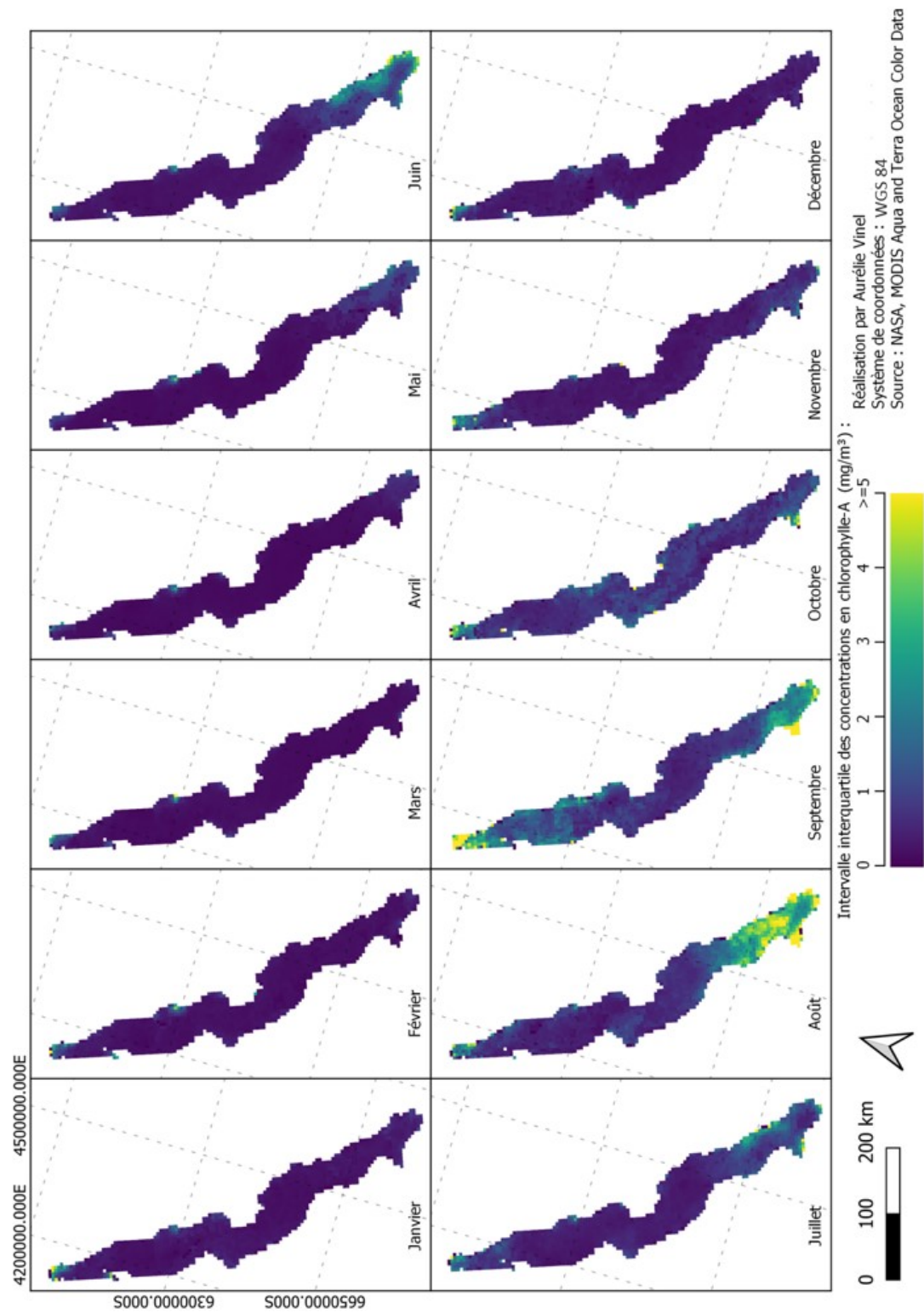


FIGURE 20 – Distribution spatiale mensuelle de l'intervalle des interquartiles des concentrations en chlorophylle-A par pixel.

L'observation de la chlorophylle-A sur la côte est, au niveau de l'embouchure de la rivière Malagarasi, montre également des concentrations en chlorophylle-A supérieures à 2 mg/m^3 tout au long de l'année.

Une dernière zone sur le lac montre aussi des hausses de concentrations entre juillet et octobre. Cette zone se situe sur la côte ouest du lac, au niveau de la ville de Kalémie (RDC), où la rivière Lukuga prend sa source.

La figure 20 permet d'observer la variabilité des données pour chaque localisation sur le lac à l'aide d'intervalles interquartiles (IQR). Les plus fortes variabilités observées en jaune présentent des intervalles interquartiles supérieurs ou égaux à 5 mg/m^3 . Les principales variabilités observées se situent aux extrémités nord et sud du lac. Ces fortes variabilités sont surtout observées en août et septembre et plus faiblement en juin, juillet et octobre.

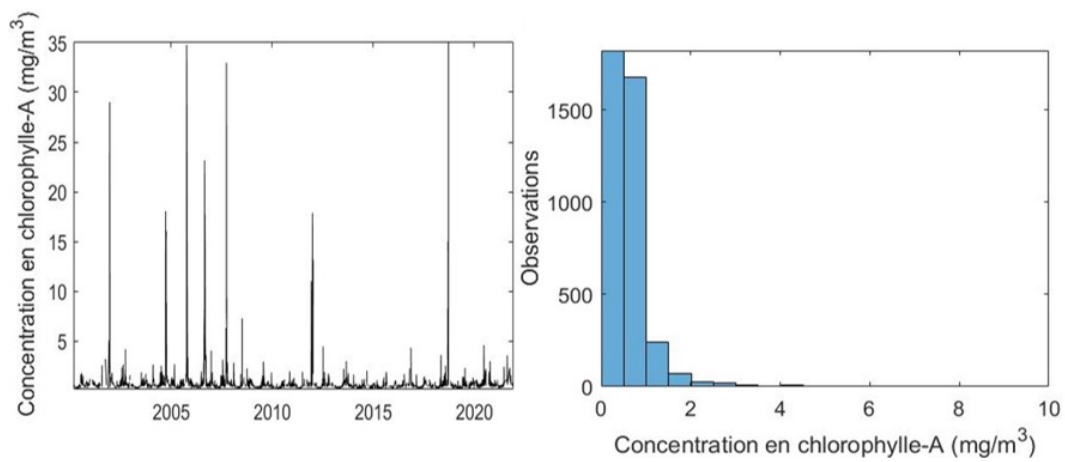
5.2 Dynamique temporelle des zones nord, centre et sud du lac

5.2.1 Observation générale des données

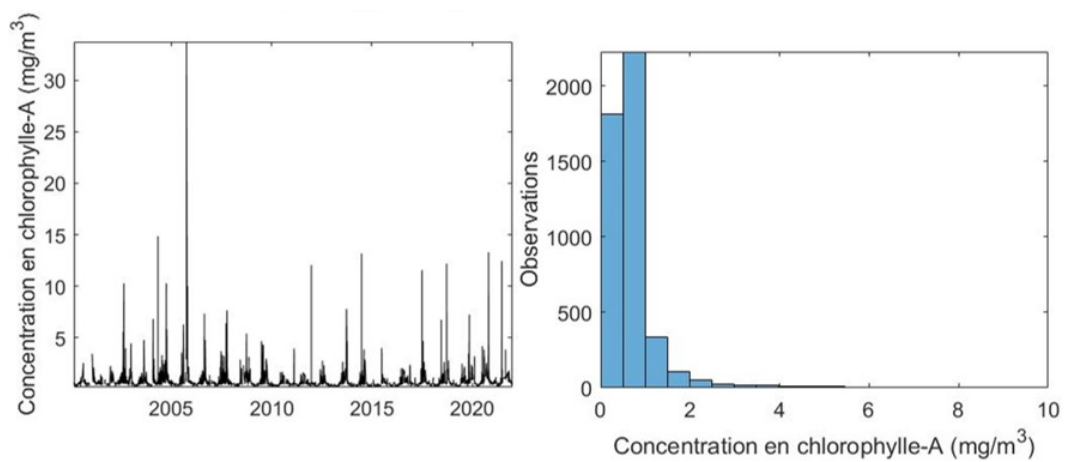
Les graphiques de gauche de la figure 21 présentent l'évolution temporelle des concentrations, observées respectivement sur les zones nord, centrale et sud du lac, entre mars 2000 et décembre 2021. Ces graphiques montrent des différences dans les dynamiques observées d'une zone à l'autre. La zone sud atteint les pics de concentration les plus élevés avec trois pics de concentration observés au-dessus de 50 mg/m^3 . Les zones nord et centrale montrent quant à elles des pics pouvant dépasser par moment les 30 mg/m^3 . Des pics de concentration annuels sont fortement visibles pour la zone sud du lac et beaucoup plus faibles pour les zones nord et centrale. La majorité des pics supérieurs à 30 mg/m^3 est observée avant 2010 sauf pour la zone nord où un pic a également été observé en 2018.

Les graphiques de droite de la figure 21 présentent les différentes observations réalisées triées par classes de concentrations. La majorité des observations présente des concentrations entre 0 et 1 mg/m^3 pour chacune des zones. La zone sud présente également une quantité non négligeable de données observées entre 1 et 2 mg/m^3 avec plus de 500 observations réalisées entre 1 et $1,5 \text{ mg/m}^3$. Les concentrations observées dans les zones nord et centrale sont nettement plus faibles que celles observées dans le sud entre 1 et 4 mg/m^3 .

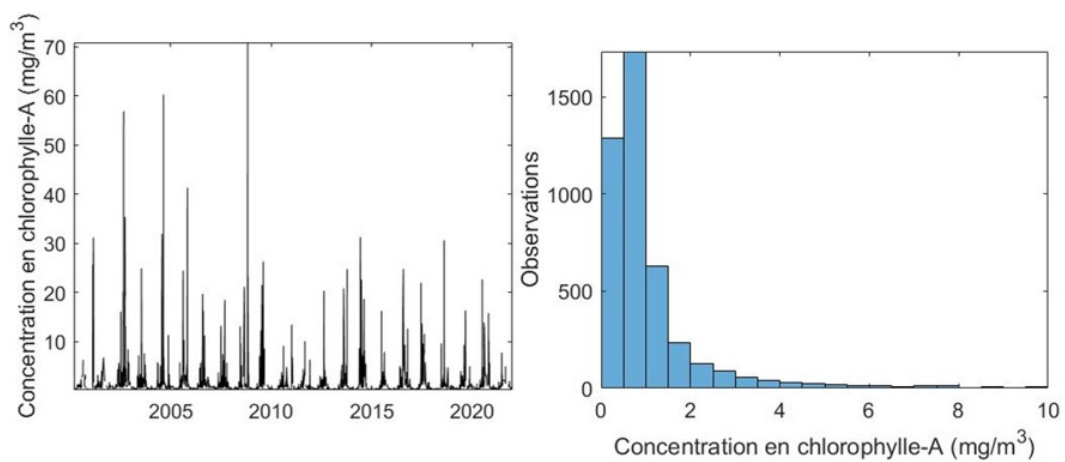
Des statistiques plus précises sont fournies pour chaque zone dans la table 5. Les données présentées dans ce tableau montrent que les concentrations en chlorophylle-A moyennes sont presque deux fois plus importantes au sud que pour les deux autres zones, bien que les concentrations médianes ne montrent pas de différences aussi importantes. La déviation standard permet ensuite de classer les zones selon leur variabilité : la zone sud possède la déviation standard la plus élevée, suivie de la zone nord et enfin de la zone centrale du lac.



(a) Zone nord du lac



(b) Zone centrale du lac



(c) Zone sud du lac

FIGURE 21 – Évolution de la concentration en chlorophylle-A entre 2000 et 2021 et distribution des concentrations observées.

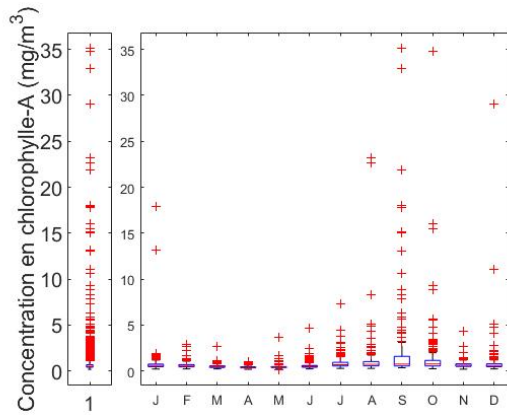
TABLE 5 – Statistiques des concentrations par zone (mg/m³).

Zone	Nord	Centre	Sud
Moyenne	0.745	0.734	1.353
Déviation standard	1.536	0.941	2.957
Minimum	0.172	0.180	0.158
p10	0.347	0.362	0.367
p25	0.412	0.437	0.469
Médiane	0.517	0.539	0.687
p75	0.695	0.736	1.180
p90	1.025	1.126	2.330
Maximum	35.094	33.738	70.862
IQR	0.283	0.299	0.711

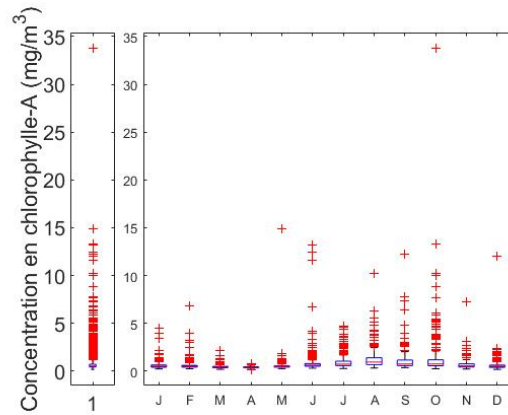
Cette variabilité est également observée à l'aide de l'intervalle interquartile montrant moins de différence entre les concentrations observées au nord et au centre qu'avec les concentrations observées au sud du lac. Les concentrations en chlorophylle-A minimales observées sont du même ordre de grandeur pour les trois zones, tandis que la concentration maximale observée dans la zone sud est deux fois plus élevée que pour les zones nord et centrale. L'observation des différents percentiles permet de constater que la grande majorité des données présente des concentrations inférieures à 2,3 mg/m³ au sud et à 1,2 mg/m³ au nord et au centre. Au vu de toutes les observations réalisées sur ce tableau, une grande disparité entre les données provenant du sud et celles provenant du nord et du centre est constatée.

5.2.2 Cycle annuel

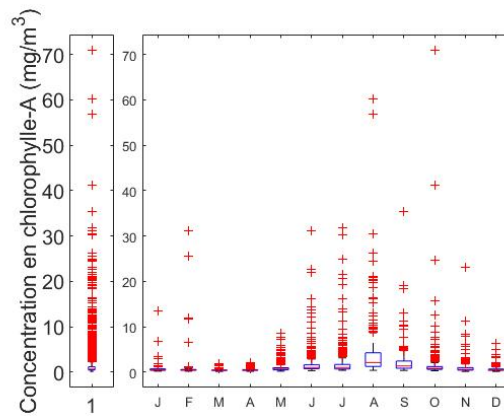
Les données informant sur le cycle annuel de la chlorophylle-A sont d'abord présentées à la figure 22 sous la forme de boîtes à moustache mensuelles et annuelles. Ces boîtes à moustache montrent que les principaux pics de concentration sont observés en septembre pour la zone nord et en août pour la zone sud. La zone centrale ne présente pas de pics de concentration pour un mois en particulier mais plutôt une élévation des concentrations généralement observées entre juillet et octobre. La variabilité mensuelle des valeurs extrêmes est également fortement marquée sur ces graphiques. Les mois de mars et avril présentent des valeurs extrêmes inférieures à 5 mg/m³ pour chacune des zones surveillées. Ces deux mois présentent les variabilités les plus faibles, tandis que les mois de juin à novembre montrent des données beaucoup plus variables. Au niveau de la distribution des pics, le mois de septembre présente le plus de valeurs extrêmes élevées pour la zone nord, les mois d'août, septembre et octobre pour la zone centrale et les mois de juin, juillet et août pour la zone sud.



(a) Zone nord



(b) Zone centrale



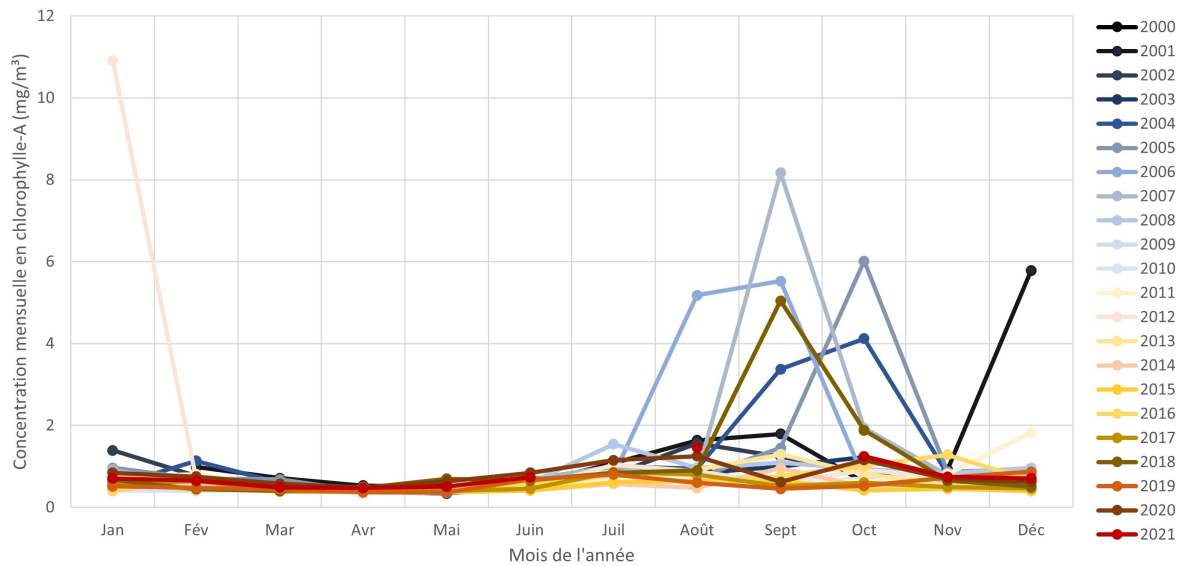
(c) Zone sud

FIGURE 22 – Répartition mensuelle des concentrations en chlorophylle-A par zone. Une boîte à moustache est réalisée pour chaque mois de l’année ainsi que sur l’année entière, les valeurs extrêmes sont visibles sous la forme de croix rouges. L’échelle des ordonnées est deux fois plus élevée pour la zone sud que pour les deux autres zones.

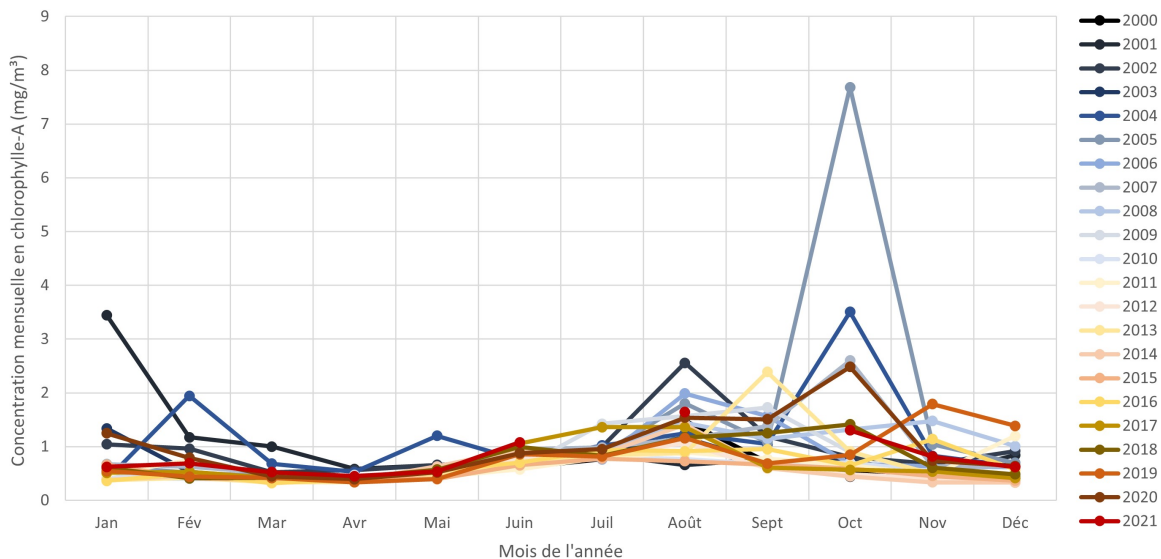
Des observations inter-annuelles sont réalisées grâce aux graphiques de la figure 23 présentant les concentrations mensuelles moyennes triées par année. Ces graphiques vont déterminer plus précisément les contributions annuelles des données observées dans les boîtes à moustache de la figure 22. Sur ces trois graphiques, les mois de juillet et octobre 2021 ne comptent aucune donnée pour chacune des zones. De plus, les concentrations ne sont pas disponibles pour le mois de janvier 2001 pour les zones nord et sud, ni pour le mois de septembre 2009 pour la zone sud.

Le graphique de l’évolution de la concentration mensuelle dans la zone nord (figure 23 (a)) montre que les valeurs les plus extrêmes observées en janvier sont liées à des observations réalisées en 2012, de même que les valeurs supérieures à 10 mg/m^3 observées en décembre sont liées à des observations de 2001. Outre ces deux premières observations, les années

possédant des concentrations moyennes mensuelles les plus élevées durant la saison sèche sont 2004, 2005, 2006, 2007 et 2018. Les autres années possèdent des concentrations moyennes mensuelles inférieures à 2 mg/m^3 .



(a) Zone nord du lac



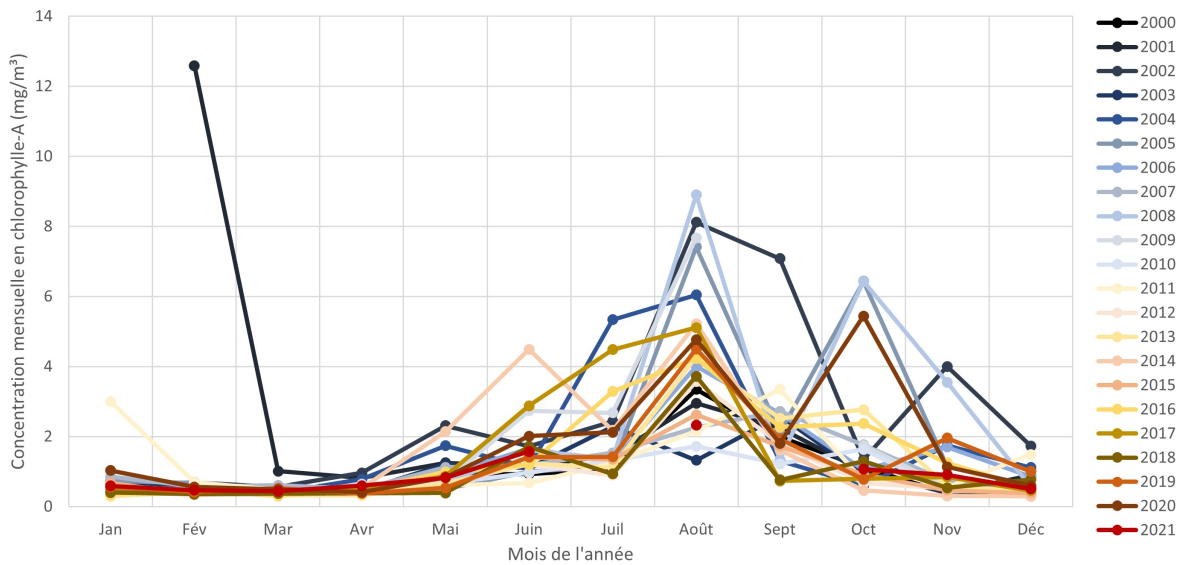
(b) Zone centrale du lac

FIGURE 23 – Évolution annuelle des concentrations en chlorophylle-A mensuelles pour chaque année entre 2000 et 2021.

Le graphique de la figure 23 (b), décrivant la zone centrale, présente quant à lui une variabilité annuelle des concentrations observées plus importantes en août entre 0.7 et 2.5 mg/m^3 et en octobre avec des concentrations supérieures à 2 mg/m^3 observées en 2004, 2005, 2007 et 2020. En septembre, la concentration mensuelle de 2013 dépasse également le 2 mg/m^3 . De

plus, les concentrations observées en 2004 diffèrent, en février et en mai, des concentrations habituellement observées les autres années.

Enfin, le graphique de la figure 23 (c), de la zone sud, présente le plus de variabilité sur l'année. Pour chacune des années, une augmentation de la concentration est observée durant la saison sèche avec un pic généralement observé en août. Des pics de concentration sont observés en octobre 2005, 2008 et 2020 et des plus faibles en mai 2002, 2004 et 2014. De plus, un pic de concentration est observé en février 2001, en novembre 2002 et un plus faible en janvier 2011.



(c) Zone sud du lac

FIGURE 23 – Évolution annuelle des concentrations en chlorophylle-A mensuelles pour chaque année entre 2000 et 2021 (suite).

5.2.3 Tendence entre 2000 et 2021

L'observation des données sur 22 ans permet de déterminer si une tendance à long terme est visible. Les graphiques de la figure 24 montrent, dès lors, l'évolution temporelle des concentrations annuelles médianes de chlorophylle-A entre 2000 à 2021. Sur les graphiques (a), (b) et (c) de cette figure est présenté l'évolution des concentrations respectivement pour les zones nord, centrale et sud du lac. La tendance globale observée dans chacune des zones est une légère diminution des concentrations entre 2000 et 2015 suivit d'une augmentation progressive de 2015 à 2021. L'année de 2002 présente les concentrations les plus élevées pour chacune des zones observées, avec toutefois une valeur maximale observée dans la zone sud. Des pics d'amplitude semblable à celle de 2002 sont également observés en 2004 dans la zone nord et centrale et en 2020 dans la zone nord uniquement. Il est à noter que les concentrations

utilisées pour l'année 2000 ne couvrent en réalité uniquement que les mois de mars à décembre et que pour l'année 2002, les données de MODIS Aqua ne sont disponibles qu'à partir de juillet.

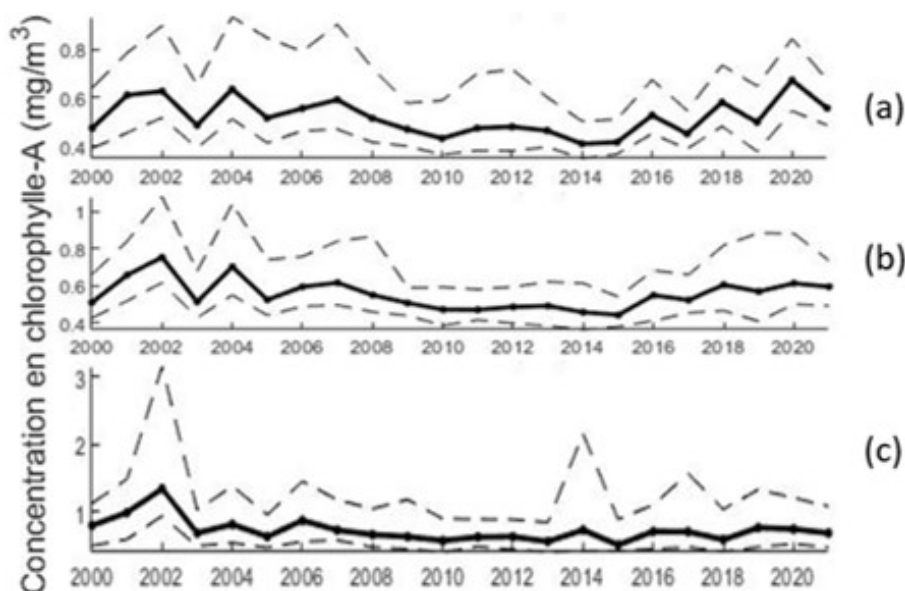


FIGURE 24 – Evolution temporelle des concentrations annuelles médianes pour les zones (a) nord, (b) centrale et (c) sud. Les percentiles 25 et 75 sont représentés en pointillé.

Des observations mensuelles sont réalisées pour observer les tendances spécifiques à chaque mois. Les graphiques mensuels de la figure 29 (annexe D) présentent l'évolution des concentrations mensuelles médianes de chlorophylle-A entre 2000 et 2021. Ces graphiques présentent également des courbes de tendance permettant de faciliter l'observation de l'évolution sur 22 ans.

La figure 29 (annexe D) montre que des pics inhabituels de concentration sont observés en janvier 2012 dans la zone nord, en janvier 2001 dans la zone centrale et en janvier 2011, février 2001, juin 2014 et juillet 2017 dans la zone sud. Pour la majorité des mois, une diminution progressive des concentrations est observée à l'exception des mois d'avril, mai et juin dans la zone nord, de juin, juillet et décembre dans la zone centrale et janvier, juin et juillet dans la zone sud, où la tendance est plutôt à l'augmentation.

Le tableau 6 permet, par la suite, de déterminer si les tendances observées sont significatives ou non à l'aide de la p-value et du paramètre Z fourni grâce au test de Mann-Kendall.

En reliant les informations visualisées dans la figure 29 avec les paramètres du tableau 6, les tendances significatives sont mises en évidence. Les p-value permettent de déterminer que les tendances les plus significatives sont observées entre février et mai, plutôt en saison humide. Néanmoins, dans le nord du lac des tendances significatives sont également observées en septembre et décembre. Le paramètre Z informe sur l'inclinaison de la pente de la

courbe de tendance. Les mois dont la pente est inférieure à 0 montrent une diminution de la concentration en chlorophylle-A avec le temps. Pour les trois zones, les paramètres Z sont généralement inférieurs à 0, autrement dit, l'évolution temporelle présente une diminution de la chlorophylle-A à l'exception des mois de avril, mai et juin pour la zone nord, de juin, octobre et novembre pour la zone centrale et de juin, juillet, août et novembre pour la zone sud. Cependant, tous les mois présentant une tendance significative montrent une diminution de la concentration en chlorophylle-A avec le temps.

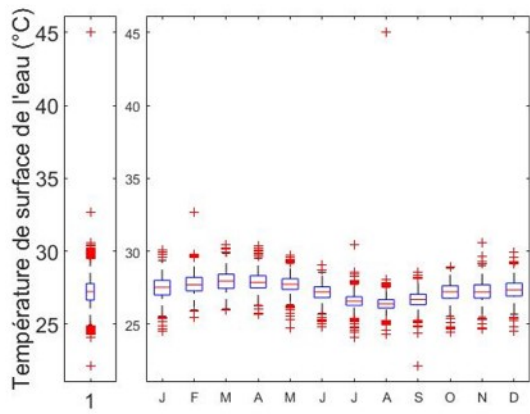
TABLE 6 – Paramètres du test de Mann-Kendall. Les étoiles (*) informent sur le niveau de confiance α : (*) indique un niveau de confiance de $\alpha = 0.1$; (**) indique un niveau de confiance de $\alpha = 0.05$; (***) indique un niveau de confiance de $\alpha = 0.001$.

Zone	Nord		Centre		Sud	
	p-value	Z	p-value	Z	p-value	Z
Janvier	0.209	-0.811	0.102	-1.268	0.436	-0.162
Février	0.043 **	-1.721	0.027 **	-1.933	0.004 **	-2.657
Mars	0.016 **	-2.143	0.040 **	-1.128	0.051 *	-1.636
Avril	0.411	0.226	0.043 **	-1.720	0.051 *	-1.636
Mai	0.411	0.226	0.130	-1.128	0.0212 **	-2.030
Juin	0.5	0	0.368	0.338	0.347	0.395
Juillet	0.108	-1.238	0.370	-0.332	0.234	0.725
Août	0.118	-1.184	0.455	-0.113	0.5	0
Septembre	0.097 *	-1.299	0.225	-0.755	0.128	-1.136
Octobre	0.215	-0.790	0.433	0.170	0.433	-0.169
Novembre	0.444	-0.141	0.215	0.790	0.268	0.620
Décembre	0.057 *	-1.579	0.455	-0.113	0.199	-0.846

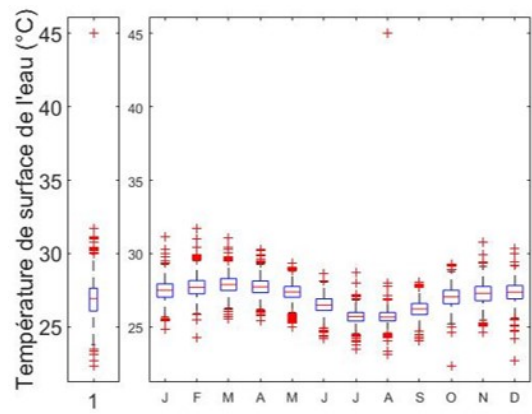
5.3 Relation entre la chlorophylle-A, la température de surface de l'eau et ENSO

5.3.1 Dynamique temporelle des températures de surface de l'eau

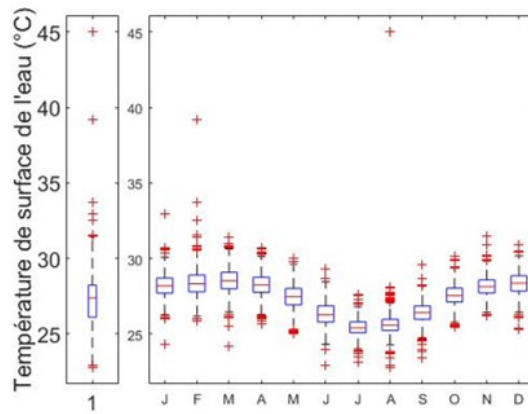
Les données médianes des températures de surface de l'eau collectées pour chacune des zones sont présentées à la figure 30 de l'annexe E. Ces graphiques montrent des températures de surface généralement observées entre 20 et 30°C. Les graphiques de la figure 25 montrent les dynamiques annuelles des données observées sous la forme de boîtes à moustache mensuelles pour chacune des zones. Les températures les plus faibles sont généralement observées en août au nord, en juillet et août au centre et en juillet au sud. La colonne de gauche sur les graphiques permet d'observer la variabilité de l'ensemble des données. Cette variabilité est la plus élevée pour la zone sud, suivie de la zone centrale et enfin de la zone nord.



(a) Zone nord



(b) Zone centrale



(c) Zone sud

FIGURE 25 – Répartition mensuelle des températures de surface de l'eau par zone.

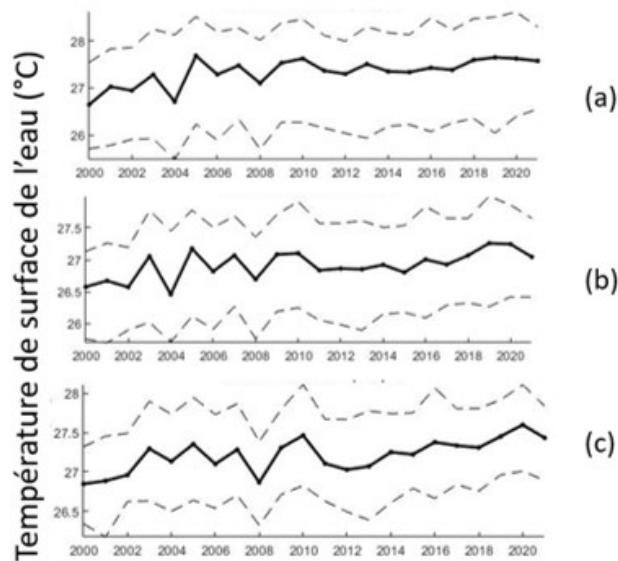


FIGURE 26 – Évolution temporelle des températures de surface de l'eau annuelles médianes pour les zones (a) nord, (b) centrale et (c) sud.

Les graphiques de la figure 26 présentent alors l'évolution à long terme des températures de surface médianes annuelles entre 2000 et 2021. Pour chacune des zones observées, une augmentation progressive des températures est constatée au cours du temps.

Les graphiques présentant l'évolution mensuelle des températures de surface de l'eau sont disponibles à la figure 31 de l'annexe E. L'observation de ces graphiques combinée aux résultats du test de Mann-Kendall, présenté dans le tableau 7, permet de déterminer si des tendances significatives sont également observées pour les données de température de surface de l'eau.

Les p-values présentées dans le tableau 7 montrent que la plupart des mois présentent des tendances significative positives contrairement aux observations réalisées précédemment avec la chlorophylle-A qui montraient des tendances négatives pour seulement quelques mois. Les mois présentant les tendances les plus significatives sont observés en juillet et août uniquement. Les seuls mois ne présentant pas de tendances significatives sont les mois de février, mars et septembre pour la zone nord, de mars et octobre pour la zone centrale et de janvier, février et juin pour la zone sud. La majorité des mois ne présentant aucune tendance significative correspond aux quelques mois où des tendances significatives négatives ont été observées lors de l'observation des concentrations en chlorophylle-A.

Toutes les tendances sont positives, telles que attestées par le paramètre Z. Les températures de surface tendent donc à augmenter avec le temps.

TABLE 7 – Paramètres du test de Mann-Kendall pour la température de surface de l'eau.

Zone	Nord		Centre		Sud	
	p-value	Z	p-value	Z	p-value	Z
Janvier	0.033 **	1.842	0.043 **	1.721	0.244	0.695
Février	0.191	0.876	0.033 **	1.842	0.119	1.178
Mars	0.155	1.015	0.199	0.846	0.097 *	1.297
Avril	0.040 **	1.748	0.045 **	1.692	0.043 **	1.720
Mai	0.071 *	1.466	0.006 **	2.538	0.012 **	2.256
Juin	0.010 **	2.312	0.071 *	1.466	0.306	0.508
Juillet	0.0001 ***	3.654	0.000617 ***	3.231	0.0006 ***	3.231
Août	0.0004 ***	3.356	0.0000245 ***	4.061	0.002 **	2.820
Septembre	0.014	2.199	0.006 **	2.538	0.005 **	2.594
Octobre	0.057 *	1.579	0.232	0.733	0.051 *	1.636
Novembre	0.028 **	1.918	0.097 *	1.297	0.060 *	1.551
Décembre	0.045 **	1.692	0.003 **	2.707	0.007 **	2.453

5.3.2 Comparaison de la chlorophylle-A et des températures de surface avec les périodes El Niño

Les graphiques de la figure 27 présentent l'indice d'oscillation australe (ONI), les températures de surface de l'eau et les concentrations en chlorophylle-A entre 2000 et 2021 pour les trois zones.

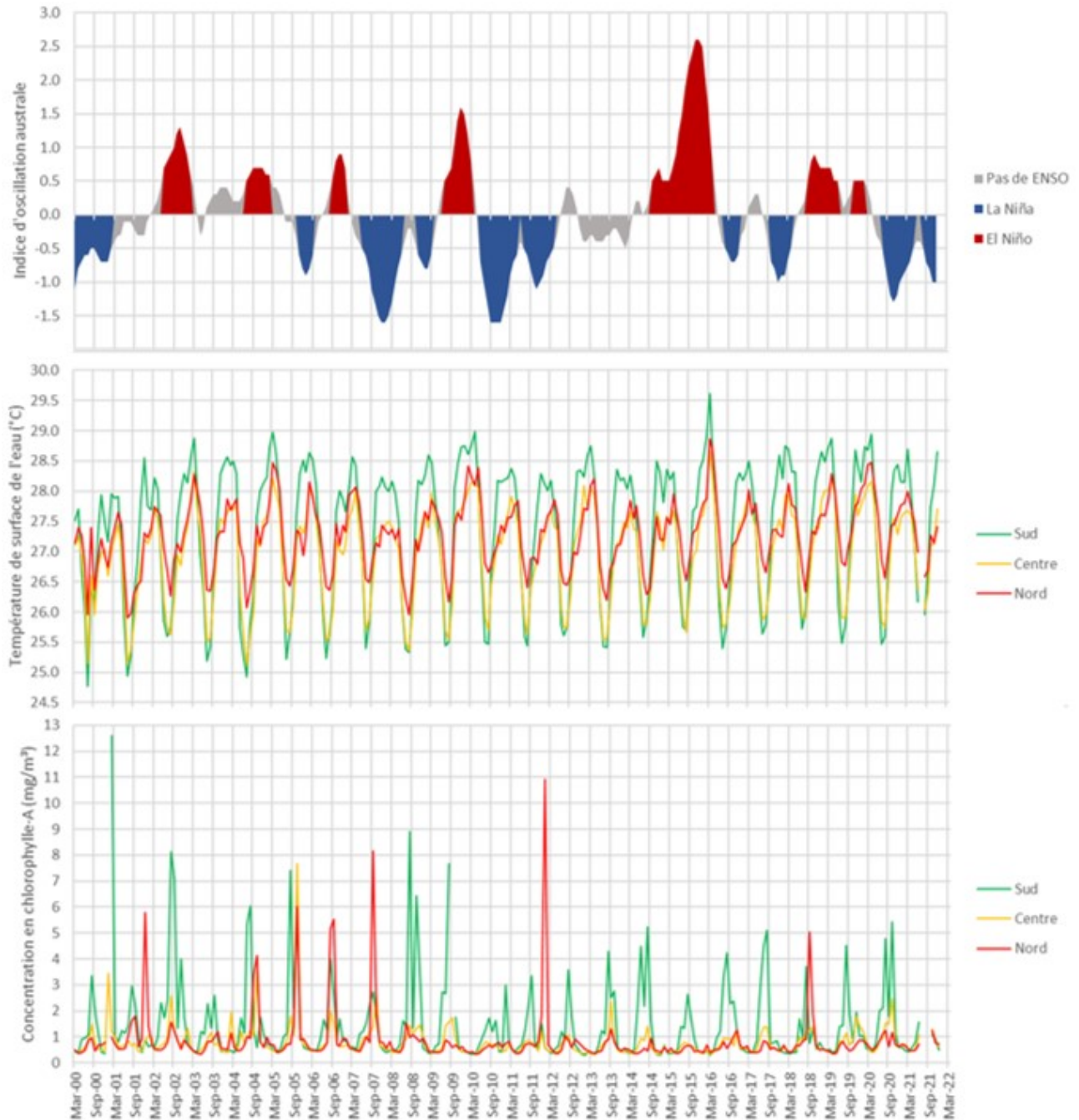


FIGURE 27 – Comparaison des concentrations en chlorophylle-A mensuelles et des températures de surface de MODIS avec les périodes El Niño et La Niña.

Selon la figure 27 les périodes El Niño sont observées tous les 2 à 6 ans. La période El Niño la plus intense sur ces 22 années fût observée en 2015-2016 et La Niña en 2007-2008 et 2010.

L'amplitude des variations de température de surface change fortement entre les zones nord, centre et sud. Une distinction est clairement visible entre la zone sud et les zones nord et centrale en saison sèche avec des températures dans le sud plus élevées. De même, lors de la saison sèche, les températures de l'eau au centre et au sud diminuent plus que dans le nord. En période de El Niño, des augmentations de températures sont observées dans chacune des zones en saison humide et par moment en saison sèche. Lors des périodes de La Niña, les températures sont généralement plus faibles en saison humide.

L'influence de El Niño sur les concentrations en chlorophylle-A du lac n'est pas facilement visible sur base de la figure 27. Cependant, les concentrations en chlorophylle-A observées en période ou suite à une période de El Niño montrent tout de même une diminution d'amplitude des pics de chlorophylle-A observés en saison sèche telle qu'observée en 2003 et 2015. Les périodes de La Niña correspondent, d'autre part, aux moments où les plus hauts pics de concentration en chlorophylle-A sont observés tels qu'en 2001 et 2008 dans la zone sud, et en 2008 et 2012 dans la zone nord. Ces observations restent trop vagues pour estimer de manière fiable si El Niño influence la chlorophylle-A ou non sur le lac Tanganyika.

6 Discussion

6.1 Fiabilité, opportunités et limites de l'observation de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika à l'aide de MODIS

La comparaison entre les données MODIS et les données in-situ (figure 15) montre que de relativement bonnes correspondances sont observées lorsque les concentrations sont inférieures à 3 mg/m^3 . Des pics de concentration, supérieurs à 3 mg/m^3 , sont néanmoins observés grâce à MODIS alors que les données in-situ aux dates correspondantes restent faibles (figure 14). Un certain nombre d'éléments permet de penser que les concentrations élevées telles que renseignées par MODIS ont bien eu lieu. Les capteurs MODIS, fournissant des données quotidiennes, offrent l'opportunité de collecter plus fréquemment des données sur le lac et de ce fait d'observer des efflorescences phytoplanctoniques ayant une durée de seulement quelques jours (HORION et al., 2010), contrairement aux données in-situ prises à des intervalles de temps de deux semaines.

L'observation de ces pics est possible car des variabilités importantes sont observées sur le lac. Les concentrations observées sont spatialement très hétérogènes et des pics de concentration supérieurs à 10 mg/m^3 ont déjà été observés par HECKY et KLING (1981). Par ailleurs, certaines méthodes de mesure in-situ de la concentration en chlorophylle-A pourraient sous-estimer les concentrations mesurées. Il faut toutefois noter que l'utilisation d'observations satellites aussi proches des côtes, telles que celles utilisées étant donné la localisation des points de mesure in-situ, peut impacter les concentrations obtenues. Les surfaces terrestres peuvent en effet interagir avec les rayonnements et impacter les réflectances obtenues. Des réflectances provenant des côtes terrestres, des fonds de faibles profondeurs et des eaux turbides côtières peuvent contribuer au signal perçu par le capteur. L'influence des côtes terrestres n'est pas négligeable lorsqu'une résolution de 4.6 km est utilisée. (Pierre-Denis Plisnier et Yves Cornet , "com. pers.")

Il est également important de mentionner que l'utilisation d'une correction atmosphérique adaptée à l'altitude du lac devrait augmenter encore la fiabilité des données MODIS utilisées. HORION et al. (2010) proposent l'utilisation d'un modèle avec des paramètres d'épaisseur optique des aérosols adaptés aux zones côtières caractérisées par une humidité relative de 90% pour obtenir la meilleur correspondance possible pour le lac Tanganyika.

Observer la Chlorophylle-A avec MODIS offre également la possibilité d'observer ce grand lac de $32\,600 \text{ km}^2$ dans son entièreté et sur une large période temporelle de 22 ans. De plus, les concentrations collectées sont la plupart du temps quotidiennes avec parfois même deux images disponibles par jour et plus rarement à des intervalles de 2 à 46 jours (figure 16).

Certaines limitations sont néanmoins observées lors de l'utilisation de données MODIS SMI de niveau 3 sur le lac Tanganyika telles que, d'une part, le faible nombre de pixels collectés par image et d'autre part, la distribution spatiale des données observées.

Suite au masquage des pixels de mauvaises qualités et au retrait des images contenant moins de 100 pixels sur le lac, seules 33% des images réalisées ont pu être utilisées au final (tableau 4). Parmi ces images, seules 11% d'entre elles comptent suffisamment de pixels pour couvrir plus de 75% de la surface du lac (figure 17). Une faible quantité d'images apporte finalement de l'information sur l'entièreté du lac. Par ailleurs, la distribution spatiale mensuelle des données collectées (figure 18) montre une grande disparité du nombre de données collectées par mois. Le mois de mai compte le plus de pixels visualisés contrairement aux mois allant de septembre à février qui n'en comptent que très peu sur une période de 22 ans. La distribution spatiale des données collectées montre également une grande différence entre le nombre de pixels disponibles dans le nord et dans le sud du lac, la partie nord du lac possédant moins de données disponibles que la partie sud probablement liées à des conditions climatiques moins favorables à l'obtention de données par télédétection optique.

Les données collectées sont donc considérées comme fiables et permettent l'étude d'une série temporelle d'observations de la chlorophylle-A sur le lac sur 22 ans. Les données MODIS sont disponibles sur une longue période et permettent de poursuivre les observations réalisées par BERGAMINO et al. (2007), BERGAMINO et al. (2010) et HORION et al. (2010) réalisées, à l'aide de la télédétection, seulement sur de courtes périodes de temps.

6.2 Variabilité spatiale de la chlorophylle-A sur le lac

La variabilité spatiale observée à l'aide des cartes réalisées à la figure 19 montre plusieurs causes influençant la dynamique de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika.

L'observation mensuelle des concentrations en chlorophylle-A médianes entre 2000 et 2022 (figure 19) confirme la présence du phénomène d'upwelling en saison sèche. Les concentrations en chlorophylle-A commencent à augmenter en mai-juin dans le sud du lac et restent élevées jusqu'en septembre. Le balancement de la thermocline présenté à la figure 7 explique quant à lui les concentrations élevées observées dans la partie nord du lac en septembre.

Ces cartes permettent également d'observer que ces pics de concentration supérieurs où égaux à 2 mg/m^3 ne sont atteints pour aucun mois de l'année dans la partie centrale du lac. Cependant, de juillet à octobre, l'ensemble du lac montre des concentrations en chlorophylle-A plus élevées qu'en saison humide.

Des effets plus locaux sur le lac sont également observés notamment au niveau des principaux affluents du lac que sont les rivières Rusizi et Malagarasi. LANGENBERG et al. (2003) ont déterminé que, parmi les différentes rivières se jetant dans le lac, la rivière Rusizi apportait la plus grande contribution en nutriments, suivie de la rivière Malagarasi. Ces apports de nutriments sont probablement à l'origine des concentrations en chlorophylle-A plus élevées observées à proximité des embouchures. Cependant, les cartes présentées à la figure 19 permettent de voir que l'influence de ces apports en nutriments sur les concentrations en chlorophylle du lac restent très limités autour des embouchures car les eaux provenant de ces rivières sont généralement plus froides et denses que les eaux de surface du lac, ces eaux rejoignent alors rapidement les eaux des profondeurs (PLISNIER et al., 1999).

Des concentrations élevées en chlorophylle-A sont également observées tout au long de l'année dans la baie de Bujumbura et par moment également dans une zone située au nord ouest du lac, en RDC. Plusieurs causes peuvent expliquer l'observation de concentrations plus élevées à ces deux endroits. La cause la plus probable est liée à la présence d'une turbidité importante de l'eau. Une turbidité élevée peut être à l'origine d'une surestimation des concentrations en chlorophylle-A estimées avec MODIS (HORION et al., 2010).

L'observation de la variabilité spatiale des données grâce aux intervalles interquartiles (figure 20) montre que les principales variabilités observées sont liées au balancement de la thermocline qui a lieu en saison sèche et en début de saison humide. De novembre à mai, les variabilités observées sont particulièrement faibles sur l'entièreté du lac.

6.3 Dynamique temporelle de la chlorophylle-A observée sur les trois zones

Les résultats du tableau 5 ont montré que les concentrations observées la plupart du temps sur le lac sont estimées entre 0 et 5 mg/m³, avec des valeurs médianes observées entre 0.5 et 0.7 mg/m³, ce qui confirme que la majorité du temps, les eaux de surface du lac sont considérées comme oligotrophes (PLISNIER et al., 1999) selon la classification de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis reprise par KLEMAS (2011). Cependant, quelques pics de concentration sont également visibles à des concentrations supérieures à 20 mg/m³. Des conditions mésotrophes et eutrophes sont donc également visibles par moment.

Les pics de concentration les plus élevés et fréquents, supérieurs à 20 mg/m³, sont observés dans la zone sud. La zone centrale présentant, quant à elle, plus de pics de concentration que la zone nord. Une diminution du nombre de pics de fortes intensités est observée après 2010 dans chacune des zones (figure 21). Les pics de concentration passant de 55-70 mg/m³ à maximum 30 mg/m³ après 2010 dans le sud, de 30 mg/m³ à 15 mg/m³ dans le centre et

de 30-35 mg/m³ à 20 mg/m³ dans le nord, à l'exception du pic de chlorophylle-A observé en septembre 2018 dans le nord du lac. Cet inhabituel pic de concentration, visible uniquement dans le nord du lac, fût observé grâce à un ensemble de conditions favorables au développement des phytoplanctons : saison sèche très venteuse, beaucoup d'ensoleillement et une température de l'air plus chaude (COCQUYT et al., 2021).

Une justification probable de cette diminution pourrait être liée au changement climatique à l'origine de l'augmentation des températures de l'air et de la diminution de la vitesse des vents (PLISNIER et al., 2018). Ces deux changements vont avoir pour effet de renforcer la stabilité de la colonne d'eau en réduisant les apports en nutriments par upwelling.

Cycle annuel

La distribution des concentrations sur une base annuelle (figure 22) montre que les concentrations les plus élevées sont observées en saison sèche avec une variabilité plus importante des données sur cette période pour chacune des zones. Des pics atteignant 35 mg/m³ dans le nord et le centre et 70 mg/m³ dans le sud sont observés par moment, même si les concentrations médianes mensuelles ne dépassent pas les 5 mg/m³.

Les résultats obtenus confirment le délai d'un mois visible entre les pics de concentration observés entre les zones nord et sud pointées par BERGAMINO et al. (2007). Cependant, contrairement à l'étude de BERGAMINO et al. (2007), les pics sont observés plutôt en août qu'en septembre-octobre dans le sud et en septembre au lieu d'octobre-novembre dans le nord. La partie centrale du lac est une transition entre les parties nord et sud avec des pics de concentration moins forts, mais répartis sur plusieurs mois. Contrairement aux observations de BERGAMINO et al. (2007), les plus hauts pics de concentration de la zone centrale sont également observés en saison sèche et non durant les mois de janvier et février.

La faible variabilité des concentrations observées en mars et avril, correspondant à la fin de la saison humide, montre que lorsque la thermocline a retrouvé son équilibre, la productivité du lac est à nouveau limitée par les faibles concentrations en nutriments disponibles dans l'épilimnion. Les concentrations en chlorophylle-A sont alors les plus faibles car elles sont limitées par les faibles apports de nutriments dans le lac durant cette période.

L'observation de la moyenne mensuelle des concentrations triées par année (figure 23) a permis de déterminer plus spécifiquement les mois pour lesquels des pics de concentration en chlorophylle-A sont observés. Une fois de plus, les pics de concentration sont majoritairement observés en saison sèche avec une variabilité importante entre mai et décembre pour la partie sud, de août à février pour la zone centrale et de juillet à novembre pour la partie nord. D'autres mois ont par ailleurs été mis en évidence tels que les mois de janvier 2012 et décembre 2001 dans la zone nord et février 2001 dans la zone sud. Les dates où ces pics ont été observés sont le 2 et 13 janvier 2012 avec respectivement 13.12 et 17.89 mg/m³ et le 15

décembre 2001 avec 29.02 mg/m³. Pour la zone sud, les dates du 13, 15, 20, 23, 24 février 2001 présentent également des concentrations élevées, respectivement de 11.74, 25.68, 11.94, 6.61 et 31.16 mg/m³.

Tendance à long terme

L'observation des concentrations annuelles en chlorophylle-A sur une période de 22 ans (figure 24) a montré une tendance globale à la diminution des concentrations. Une légère augmentation des concentrations est toutefois visible sur la figure 24 à partir de 2016. La cause de cette augmentation n'est à l'heure actuelle pas définie.

L'analyse mensuelle des tendances de la chlorophylle-A reprise dans le tableau 6 révèle, par la suite, que les tendances significatives sont majoritairement observées pour les mois de février à mai avec des tendances allant plutôt vers une diminution des concentrations à long terme. Les tendances significatives sont généralement observées en fin de saison humide, lorsque les concentrations en chlorophylle-A sont déjà les plus faibles, ce qui pourrait impacter les pêches de certaines années.

Le changement climatique serait à l'origine d'une augmentation de la variabilité annuelle des précipitations sur le lac, composée d'une succession de saison sèche et pluvieuses extrêmes, ainsi qu'une tendance à l'augmentation des températures de l'air (PLISNIER et al., 2018). Les variations de précipitations et de température de l'air annuelles au cours du temps pourrait influencer la légère diminution des concentrations en chlorophylle-A observée entre 2000 et 2015. Ces deux changements serait préjudiciables au lac car selon LANGENBERG et al. (2003), les précipitations apportent des nutriments dans le lac et selon PLISNIER (1998), l'augmentation de la température de l'air augmente la stabilité de la masse d'eau.

Comparaison entre les dynamiques de température de surface et de chlorophylle-A

La répartition mensuelle des températures de surface de l'eau (figure 25) montre qu'il existe une relation entre les températures de surface et la chlorophylle-A. Les températures de surface de l'eau sont plus faibles en saison sèche pour chacune des zones, correspondant au moment où les concentrations en chlorophylle-A sont les plus élevées. Ces deux observations s'expliquent par les remontées d'eau froides et riches en nutriments de l'upwelling. Tout comme les dynamiques de chlorophylle-A observées à la figure 22, l'amplitude des variabilités observées est plus grand pour la zone sud que pour les autres zones, avec la variabilité la moins importante observée dans la zone nord.

Les évolutions annuelles des températures de surface présentées à la figure 26 montre que les températures tendent à augmenter avec le temps. Cet observation est confirmée par les données présentes dans le tableau 7 qui montre que des tendances significatives sont observées neuf à dix mois par an selon la zone observée. Les tendances les plus significatives sont

observées en juillet et août, lors de la période d'upwelling. Visiblement ces diminutions de températures n'impactent pas les concentrations en chlorophylle-A étant donné qu'aucune diminution de concentrations significative n'a été observée en saison sèche.

Influence de l'oscillation australe El Niño

L'observation en parallèle de la dynamique des concentrations en chlorophylle-A avec les périodes d'oscillation australe El Niño et La Niña (figure 27) ne montre pas de relation évidente au vu des résultats présentés. Selon PLISNIER (1998) un écart de 4 mois est observé entre les pics d'indice d'oscillation australe El Niño observé dans l'océan Pacifique (Polynésie française et Australie) avec les températures de l'air observé à Bujumbura. En prenant en compte l'écart de quatre mois entre les pics d'indice d'oscillation australe El Niño, la dynamique des températures de surface de l'eau observée lors des périodes El Niño et La Niña (figure 27) montre que ce phénomène impacte tout de même le lac, car celles-ci augmentent généralement lors des épisodes El Niño. Des analyses plus approfondies doivent être réalisées pour déterminer si le phénomène ENSO a bel et bien une influence sur les concentrations en chlorophylle-A observées.

6.4 Perspectives

L'observation de la chlorophylle-A à l'aide d'images satellites offre des possibilités encore peu exploitées à l'heure actuelle afin de collecter des données sur le lac Tanganyika. Des mesures en continu et à différentes résolutions spatiales sont accessibles afin d'observer l'évolution de la qualité de l'eau. De nos jours, de larges séries temporelles de données sont disponibles pour étudier les tendances à long terme des facteurs climatiques et géologiques sur la qualité de l'eau des milieux aquatiques. Outre MODIS Aqua et Terra, d'autres capteurs peuvent également être utilisés pour observer la chlorophylle-A présente dans l'eau tels que le capteur Sentinel 3 Ocean and Land Colour Instrument (OLCI). La période d'observation couverte est cependant plus restreinte, de 2016 à nos jours mais avec une résolution spatiale plus fine de 300 m et une résolution temporelle quotidienne. Ces données offrent donc une résolution spatiale plus fine que les données MODIS utilisées dans ce rapport. Cette fine résolution permettrait d'observer plus localement les efflorescences et d'analyser spatialement leur dynamique pour déterminer plus précisément leurs causes.

La surveillance des lacs est mis au centre des préoccupations actuelles car ils sont des indicateurs des changements environnementaux et climatiques locaux. Observer l'évolution de différents paramètres sur les lacs permet de mieux comprendre les variabilités hydrodynamiques présentes et ainsi de mettre en place des gestions efficaces et durables des ressources en eau.

Le projet Lakes_cci actuellement mis en place par l'ESA (ESA, 2022a) vise à développer des produits dérivés de satellites afin de surveiller différentes variables climatiques essentielles sur de nombreux lacs répartis sur la surface du globe. Les différentes variables climatiques observées sur le lac Tanganyika seront dans un premier temps le niveau d'eau du lac, la température de l'eau de surface, la couverture de glace du lac et la réflectance de sortie d'eau. Ces variables permettront de déterminer les dynamiques d'apports et de pertes d'eau annuelles, de surveiller les processus biogéochimiques et saisonniers à l'origine notamment des variabilités saisonnières de phytoplancton observées et de surveiller la fréquence d'apparition des événements extrêmes. Le projet Lakes_cci observera également l'étendue de l'eau des lacs pour une série d'autres lacs dont une expansion est visible en période glaciaire et une sécheresse dans les milieux arides. L'ensemble de ces informations permettra d'avoir une vue plus globale des variables du lac et ainsi de mieux comprendre les processus biogéochimiques complexes présents.

L'influence du changement climatique et des oscillations australe El Niño n'a que faiblement été étudiée dans ce mémoire. Le changement climatique serait à l'origine de la diminution de concentrations en chlorophylle-A principalement observées et les effets de El Niño sur la chlorophylle-A restent indéterminés à l'issue de ce travail. Cependant, il ressort que les dynamiques influençant la chlorophylle-A sur le lac sont multiples : variabilité des précipitations, des vents, de la température de l'air et de l'eau, de la disponibilité de la lumière, du changement climatique, etc. Pour discerner plus clairement les différentes contributions sur les séries temporelles observées, il serait intéressant de réaliser une analyse spectrale des données de chlorophylle-A.

7 Conclusion

L'objectif de ce mémoire était de caractériser et d'expliquer la variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika à l'aide de la télédétection. La nouveauté apportée par cette étude consiste à exploiter une longue série temporelle de données s'étalant sur 22 ans, grâce aux deux capteurs MODIS Aqua et Terra. Les précédentes études ne se concentraient que sur de courtes périodes de quelques années.

Les données utilisées, provenant de la bande de chlorophylle-A dérivée des produits MODIS SMI Aqua et Terra de niveau 3, ont permis l'observation de l'évolution de la chlorophylle-A entre 2000 et 2021. La combinaison de ces deux capteurs a permis une observation quasi-quotidienne du lac malgré une résolution spatiale relativement grossière. Au final, peu d'images observées contenaient suffisamment de pixels pour couvrir plus de 75% de la surface du lac, à cause notamment du nombre important de pixels masqués. La distribution spatiale et temporelle des pixels disponibles n'est cependant pas homogène, étant plus accentuée dans la partie sud du lac et durant le mois de mai.

La variabilité spatiale de la concentration en chlorophylle-A cartographiée, montre une augmentation saisonnière causée par le phénomène d'upwelling dans le lac. Cette élévation est observée, en saison sèche, sur l'ensemble du lac mais avec des pics de concentration deux fois plus élevés dans la partie sud. La variabilité spatiale est visible de manière plus locale avec des pics de concentration à proximité de l'embouchure des rivières Rusizi et Malagarasi. Dans la baie de Bujumbura, zone à forte turbidité, des concentrations élevées de chlorophylle-A sont détectées. Cependant, cette turbidité pourrait être à l'origine d'une surestimation des concentrations en chlorophylle-A estimées par les algorithmes bio-optiques utilisés.

Une analyse intra-annuelle des données révèle qu'une augmentation des concentrations en chlorophylle-A est observée en saison sèche, en parallèle à une diminution des températures de surface de l'eau. Ces effets sont tous deux influencés par les remontées d'eaux froides et riches en nutriments de l'upwelling.

La tendance, sur les 22 années observées, montre une diminution des concentrations en chlorophylle-A, probablement liée au changement climatique. L'évolution globale des températures de surface de l'eau montre, sur l'ensemble du lac, des tendances significatives à l'augmentation, reflet des effets du changement climatique.

Depuis 2016, une augmentation progressive des concentrations en chlorophylle-A est toutefois visible et reste à confirmer dans les prochaines années.

Au vu des résultats présentés, aucune relation claire n'a pu être déterminée entre les concentrations en chlorophylle-A et le phénomène périodique El Niño. Toutefois, l'effet de ce dernier sur le lac est visible par l'augmentation des pics de température de surface des eaux en période El Niño.

Plusieurs perspectives peuvent donner suite à cette étude. Il serait intéressant, d'une part, de comparer les données observées avec MODIS avec celles provenant d'autres capteurs ayant de meilleures résolutions spatiale et temporelle, afin d'affiner les observations. D'autre part, il serait pertinent d'analyser plus précisément les effets du changement climatique sur le lac Tanganyika. Une analyse spectrale pourrait mettre en évidence les contributions des multiples facteurs environnementaux et géologiques de la région sur les dynamiques de chlorophylle-A.

Références

- AMBROSE-IGHO, G., SEYOUM, W. M., PERRY, W. L. & O'REILLY, C. M. (2021). Spatiotemporal Analysis of Water Quality Indicators in Small Lakes Using Sentinel-2 Satellite Data : Lake Bloomington and Evergreen Lake, Central Illinois, USA. *Environmental Processes*, 8(2), 637-660. doi : 10.1007/s40710-021-00519-x.
- BERGAMINO, N., HORION, S., STENUITE, S., CORNET, Y., LOISELLE, S., PLISNIER, P.-D. & DESCY, J.-P. (2010). Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and primary production in Lake Tanganyika using a MODIS based bio-optical time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 772-780. doi : 10.1016/j.rse.2009.11.013.
- BERGAMINO, N., LOISELLE, S. A., CÓZAR, A., DATTILO, A. M., BRACCHINI, L. & ROSSI, C. (2007). Examining the dynamics of phytoplankton biomass in Lake Tanganyika using Empirical Orthogonal Functions. *Ecological Modelling*, 204(1), 156-162. doi : 10.1016/j.ecolmodel.2006.12.031.
- BUSCH, J., SOREGHAN, M., de BEURS, K., MCGLUE, M., KIMIREI, I., COHEN, A. & RYAN, E. (2018). Linking watershed disturbance with nearshore sedimentation and the shell beds of Lake Tanganyika (Mahale Mountains, Tanzania). *Environmental Earth Sciences*, 77(13), 514. doi : 10.1007/s12665-018-7644-7.
- CALJON, A. G. (1987). A recently landlocked brackish-water lagoon of Lake Tanganyika : physical and chemical characteristics, and spatio-temporal distribution of phytoplankton. *Hydrobiologia*, 153(1), 55-70. doi : 10.1007/BF00005504.
- CAMPBELL, L., VERBURG, P., DIXON, D. G. & HECKY, R. E. (2008). Mercury biomagnification in the food web of lake tanganyika (tanzania, east africa). *Science of The Total Environment*, 402(2), 184-191. doi : 10.1016/j.scitotenv.2008.04.017.
- CAZENAVE-PIARROT, A., NDAYIRUKIYE, S. & VALTON, C. (2015). *Atlas des pays du nord-Tanganyika*. (IRD Ed.) Marseille. 144 pp.
- CHALE, F. M. M. (2002). Trace metal concentrations in water, sediments and fish tissue from lake tanganyika. *Science of The Total Environment*, 299(1), 115-121. doi : 10.1016/S0048-9697(02)00252-8.
- CHALE, F. M. M. (2004). Inorganic nutrient concentrations and chlorophyll in the euphotic zone of Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 523(1), 189-197. doi : 10.1023/B:HYDR.0000033125.87313.53.
- COCQUYT, C., PLISNIER, P.-D., MULIMBWA, N. & NSHOMBO, M. (2021). Unusual massive phytoplankton bloom in the oligotrophic Lake Tanganyika. *Plant Ecology and Evolution*, 154, 351-361. doi : 10.5091/plecevo.2021.1890.
- CORMAN, J., MCINTYRE, P., KUBOJA, B., MBEMBA, W., FINK, D., WHEELER, C., GANS, C., MICHEL, E. & FLECKER, A. (2010). Upwelling couples chemical and biological dynamics across the littoral and pelagic zones of Lake Tanganyika, East Africa. *Limnology and Oceanography*, 55, 214-224. doi : 10.4319/lo.2010.55.1.0214.
- CORNET, Y. (2022). *Professeur démissionnaire. Université de Liège. Échange du 31 mai 2022*.
- COULTER, G. W. (1991). *Lake Tanganyika and its life*. (Coulter Ed.) London. 354 pp.
- da ROSA WIELICZKO, A., CROSSETTI, L. O., CAVALCANTI, J. R., HESSEL, M. S., da MOTTA-MARQUES, D. & RODRIGUES, L. R. (2021). Meteorological drivers and ENSO influence on

- phytoplankton biomass dynamics in a shallow subtropical lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(8), 536. doi : 10.1007/s10661-021-09288-4.
- da SILVA, R. M., SANTOS, C. A. G., MOREIRA, M., CORTE-REAL, J., SILVA, V. C. L. & MEDEIROS, I. C. (2015). Rainfall and river flow trends using mann-kendall and sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. *Natural Hazards*, 77(2), 1205-1221. doi : 10.1007/s11069-015-1644-7.
- DEKKER, A., BRANDO, V., ANSTEE, J., PINNEL, N., KUTSER, T., HOOGENBOOM, E., PETERS, S., PASTERKAMP, R., VOS, R., OLBERT, C., MALTHUS, T., VANDERMEER, F. & DEJONG, S. (2001). Imaging Spectrometry of Water. *Imaging Spectrometry : Basic Principles and Prospective Applications*, 4, 307-359. doi : 10.1007/978-0-306-47578-8_11.
- DESCY, J.-P., HARDY, M.-A., STENUITE, S., PIRLOT, S., LEPORCQ, B., KIMIREI, I., SEKADENDE, B., MWAITEGA, S. & SINYINZA, D. (2005). Phytoplankton pigments and community composition in Lake Tanganyika. *Freshwater Biology*, 50(4), 668-684. doi : 10.1111/j.1365-2427.2005.01358.x.
- DESCY, J.-P., TARBE, A.-L., STENUITE, S., PIRLOT, S., STIMART, J., VANDERHEYDEN, J., LEPORCQ, B., STOYNEVA, M. P., KIMIREI, I., SINYINZA, D. & PLISNIER, P.-D. (2010). Drivers of phytoplankton diversity in Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 653(1), 29-44. doi : 10.1007/s10750-010-0343-3.
- DÖRNHÖFER, K. & OPPELT, N. (2016). Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. *Ecological Indicators*, 64, 105-122. doi : 10.1016/j.ecolind.2015.12.009.
- EHRENFELS, B., BARTOSIEWICZ, M., MBONDE, A., BAUMANN, K., DINKEL, C., JUNKER, J., KAMULALI, T., KIMIREI, I., NIEDERDORFER, R., ODERMATT, D., POMATI, F., SWEKE, E., WEHRLI, B., FERREIRA, T., ALMEIDA, S., AS, M., KBL, B., DINKEL, C. & TM, K. (2021). Diazotrophic Cyanobacteria are Associated With a Low Nitrate Resupply to Surface Waters in Lake Tanganyika. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 1. doi : 10.3389/fenvs.2021.716765.
- ESA. (2022a). *Lakes* [ESA Climate Office]. Récupérée 6 juin 2022, à partir de <https://climate.esa.int/en/projects/lakes/>
- ESA. (2022b). *Sentinel-3 - Data Products - OLCI*. Récupérée 27 avril 2022, à partir de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3/data-products/olci>
- GEE. (s. d.). *Ocean Color SMI : Standard Mapped Image MODIS Terra Data*. Récupérée 7 mai 2022, à partir de https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_OCEANDATA_MODIS-Terra_L3SMI
- GORDON, H., BROWN, O. & JACOBS, M. M. (1975). Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. *Applied optics*, 14(2), 417-427. doi : 10.1364/AO.14.000417.
- GORDON, H. & MOREL, A. Y. (1983). In — water algorithms. In H. R. GORDON & A. Y. MOREL (Éd.), *Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery : a review* (p. 24-67). Springer US.
- GÜÇLÜ, Y. S. (2020). Improved visualization for trend analysis by comparing with classical mann-kendall test and ITA. *Journal of Hydrology*, 584, 124674. doi : 10.1016/j.jhydrol.2020.124674.

- HAFEEZ, S., WONG, M., ABBAS, S., NICHOL, J. & KWOK, C. Y. T. (2018). Detection and Monitoring of Marine Pollution Using Remote Sensing Technologies.
- HECKY, R. E. & KLING, H. J. (1981). The phytoplankton and protozooplankton of the euphotic zone of lake tanganyika : species composition, biomass, chlorophyll content, and spatio-temporal distribution1 [_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.4319/lo.1981.26.3.0548>]. *Limnology and Oceanography*, 26(3), 548-564. doi : 10.4319/lo.1981.26.3.0548.
- HORION, S., BERGAMINO, N., STENUITE, S., DESCY, J.-P., PLISNIER, P.-D., LOISELLE, S. & CORNET, Y. (2010). Optimized extraction of daily bio-optical time series derived from MODIS/Aqua imagery for Lake Tanganyika, Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 781-791. doi : 10.1016/j.rse.2009.11.012.
- HU, C., LEE, Z. & FRANZ, B. (2012). Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans : A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research*, 117, C1. doi : 10.1029/2011JC007395.
- HUANG, B., THORNE, P. W., BANZON, V. F., BOYER, T., CHEPURIN, G., LAWRIK, J. H., MENNE, M. J., SMITH, T. M., VOSE, R. S. & ZHANG, H.-M. (2017). Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5) : Upgrades, Validations, and Intercomparisons. *Journal of Climate*, 30(20), 8179-8205. doi : 10.1175/JCLI-D-16-0836.1.
- KARTABLE. (2021). *Réflexion et réfraction de la lumière (La santé, L'univers)*. Récupérée 25 novembre 2021, à partir de <https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/reflexion-et-refraction-de-la-lumiere-la-sante-lunivers/12885>
- KLEMAS, V. (2011). Remote Sensing of Algal Blooms : An Overview with Case Studies. *Journal Coastal Research*, 28(1A), 34-43. doi : 10.2112/JCOASTRES-D-11-00051.1.
- KOBLMÜLLER, S., SEFC, K. M. & STURMBAUER, C. (2008). The lake tanganyika cichlid species assemblage : recent advances in molecular phylogenetics. *Hydrobiologia*, 615(1), 5. doi : 10.1007/s10750-008-9552-4.
- LANGENBERG, V., MWAPE, L., TSHIBANGU, K., TUMBA, J.-M., KOELMANS, A., ROIJACKERS, R., SALONEN, K., SARVALA, J. & MÖLSÄ, H. (2002). Comparison of thermal stratification, light attenuation and chlorophyll-a dynamics between the ends of Lake Tanganyika. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 5(3), 255-265. doi : 10.1080/14634980290031956.
- LANGENBERG, V., NYAMUSHAHU, S., ROIJACKERS, R. & KOELMANS, A. (2003). External Nutrient Sources for Lake Tanganyika. *Journal of Great Lakes Research*, 29(3-4), 169-180. doi : 10.1016/S0380-1330(03)70546-2.
- LANGENBERG, V., TUMBA, J., TSHIBANGU, K., LUKWESA, C., CHITAMWEBWA, D., BWEBWA, D., MAKASA, L. & ROIJACKERS, R. (2008). Heterogeneity in physical, chemical and plankton-community structures in Lake Tanganyika. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 11, 16-28. doi : 10.1080/14634980701879528.
- LATAWAMA. (2020). *LATAWAMA – Lake Tanganyika Water Management*. Récupérée 26 septembre 2021, à partir de <https://latawama.org/>

- LO PREJATO, M., MCKEE, D. & MITCHELL, C. (2020). Inherent optical properties-reflectance relationships revisited. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 125(11), e2020JC016661. doi : 10.1029/2020JC016661.
- MAI, T. (2017). *What are passive and active sensors ?* [NASA]. Récupérée 26 avril 2022, à partir de http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_passive_active.html
- MOBLEY, C. (1994). *Light and Water : Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press. San Diego.
- MÖLSÄ, H., REYNOLDS, J., COENEN, E. & LINDQVIST, O. (1999). Fisheries research toward resource management on Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 407, 1-24. doi : 10.1023/A:1003712708969.
- MOREL, A. & PRIEUR, L. (1977). Analysis of variations in ocean color1 : ocean color analysis. *Limnology and Oceanography*, 22(4), 709-722. doi : 10.4319/lo.1977.22.4.0709.
- MZIRAY, P., KIMIREI, I., STAEHR, P., LUGOMELA, C., PERRY, W., TROLLE, D., O'REILLY, C. & MGANA, H. (2018). Seasonal patterns of thermal stratification and primary production in the northern parts of Lake Tanganyika. *Journal of Great Lakes Research*, 44(6), 1209-1220. doi : 10.1016/j.jglr.2018.08.015.
- NAITHANI, J., DELEERSNIJDER, E. & PLISNIER, P.-D. (2002). Origin of intraseasonal variability in Lake Tanganyika. *Geophysical Research Letters*, 29(23), 8-1-8-4. doi : 10.1029/2002GL015843.
- NASA OCEAN COLOR. (2022a). *Level 2 Ocean Color Flags*. Récupérée 7 mai 2022, à partir de <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/ocl2flags/>
- NASA OCEAN COLOR. (2022b). *Short-Wave Sea Surface Temperature (SST4)*. Récupérée 2 juin 2022, à partir de <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/sst4/>
- NOAA NATIONAL WEATHER SERVICE. (2022). *Cold Warm Episodes by Season*. Récupérée 1 mai 2022, à partir de https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- OCEAN BIOLOGY PROCESSING GROUP (OBPG) & NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. (2010). *Chlorophyll a (chlor_a)*. Récupérée 13 avril 2022, à partir de https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/
- OLMANSON, L. G., BREZONIK, P. L. & BAUER, M. E. (2015). Remote sensing for regional lake water quality assessment : capabilities and limitations of current and upcoming satellite systems. In T. YOUNOS & T. E. PARECE (Éd.), *Advances in watershed science and assessment* (p. 111-140). Springer International Publishing.
- O'REILLY, C., ALIN, S., PLISNIER, P., COHEN, A. & MCKEE, B. (2003). Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, 424, 766-768. doi : 10.1038/nature01833.
- O'REILLY, J. E., MARITORENA, S., SIEGEL, D. A., O'BRIEN, M. C., TOOLE, D., MITCHELL, B. G., KAHRU, M., CHAVEZ, F. P., STRUTTON, P., COTA, G. F., HOOKER, S. B., MCCLAIN, C. R., CARDER, K. L., MULLER-KARGER, F., HARDING, L., MAGNUSON, A., PHINNEY, D., MOORE, G. F., AIKEN, J., ... CULVER, M. (2000). Ocean color chlorophyll a algorithms

- for SeaWiFS, OC2 and OC4 : version 4. *Journal of geophysical research*, 103(C11), 24937-24953.
- O'REILLY, J. E. & WERDELL, P. J. (2019). Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment*, 229, 32-47. doi : 10.1016/j.rse.2019.04.021.
- PALACIOS, S. L. (s. d.). *Fundamentals of Aquatic Remote Sensing* [NASA]. Récupérée 26 novembre 2021, à partir de <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/users/fundamentals/fundamentals-aquatic-web.pdf>
- PETIT, C. & VANDENABEELE, J. (2005). Supporting coastal and lake applications with the help of remote sensing. 4, 2771-2774. doi : 10.1109/IGARSS.2005.1525642.
- PLISNIER, P.-D., CHITAMWEBWA, D., MWAPE, L., TSHIBANGU, K., LANGENBERG, V. & COENEN, E. (1999). Limnological annual cycle inferred from physical-chemical fluctuations at three stations of Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 407, 45-58. doi : 10.1023/A:1003762119873.
- PLISNIER, P.-D. (1998). Lake Tanganyika : recent climate changes and teleconnections with ENSO. In G. DEMARÉE, J. ALEXANDRE & M. DE DAPPER (Éd.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology* (p. 228-250). Royal Academy of Overseas Sciences.
- PLISNIER, P.-D. (2022). *PhD. Chercheur à l'Université de Liège. Échange du 31 mai 2022.*
- PLISNIER, P.-D., MGANNA, H., KIMIREI, I., CHANDE, A., MAKASA, L., CHIMANGA, J., ZULU, F., COCQUYT, C., HORION, S., BERGAMINO, N., NAITHANI, J., DELEERSNIJDER, E., ANDRÉ, L., DESCY, J.-P. & CORNET, Y. (2009). Limnological variability and pelagic fish abundance (*Stolothrissa tanganyicae* and *Lates stappersii*) in Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 625, 117-134. doi : 10.1007/s10750-009-9701-4.
- PLISNIER, P.-D., NSHOMBO, M., MGANNA, H. & NTAKIMAZI, G. (2018). Monitoring climate change and anthropogenic pressure at Lake Tanganyika. *Journal of Great Lakes Research*, 44, 1194-1208. doi : 10.1016/j.jglr.2018.05.019.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA. (2020). *Science de la télédétection*. Récupérée 24 novembre 2021, à partir de <https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/science-recherche/science-teledection/21752>
- SALONEN, K., SARVALA, J., JÄRVINEN, M., LANGENBERG, V., NUOTTAJÄRVI, M., VUORIO, K. & CHITAMWEBWA, D. B. R. (1999). Phytoplankton in lake tanganyika — vertical and horizontal distribution of in vivo fluorescence. In O. V. LINDQVIST, H. MÖLSÄ, K. SALONEN & J. SARVALA (Éd.), *From limnology to fisheries : lake tanganyika and other large lakes* (p. 89-103). Springer Netherlands.
- SPP POLITIQUE SCIENTIFIQUE. (2022). *Projet de recherche*. Récupérée 9 mai 2022, à partir de <https://www.belspo.be/>
- STENUITE, S., PIRLOT, S., HARDY, M.-A., SARMENTO, H., TARBE, A.-L., LEPORCQ, B. & DESCY, J.-P. (2007). Phytoplankton production and growth rate in Lake Tanganyika : evidence of a decline in primary productivity in recent decades. *Freshwater Biology*, 52(11), 2226-2239. doi : 10.1111/j.1365-2427.2007.01829.x.
- TRENBERTH, K. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771-2777.

- UNESCO. (2016). *The global water quality challenge & SDGs*. Récupérée 13 octobre 2021, à partir de <https://en.unesco.org/waterquality-iiwq/wq-challenge>
- VANDELANNOOTE, A., ROBBERECHT, H., DEELSTRA, H., VYUMVUHORE, F., BITETERA, L. & OLLEVIER, F. (1996). The impact of the river ntahangwa, the most polluted burundian affluent of lake tanganyika, on the water quality of the lake. *Hydrobiologia*, 328(2), 161-171. doi : 10.1007/BF00018713.
- van ECK, N. J. & WALTMAN, L. (2020). *VOSviewer Manual*. Universiteit Leiden ; CWTS. 52 pp.
- WINARSO, G. & MARINI, Y. (2014). MODIS standard (OC3) chlorophyll-A algorithm evaluation in Indonesian seas. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 11(1), 11-20. doi : 10.30536/J.IJRESES.2014.V11.A2597.

Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle-A des eaux du lac Tanganyika

Observation de la qualité de l'eau à l'aide de la télédétection

Aurélie Vinel

La surveillance de la chlorophylle-A sur le lac Tanganyika est importante pour suivre la productivité primaire du lac influençant la pêche, source majeure de protéines pour les habitants de la région. Les capteurs satellites MODIS permettent à l'heure actuelle l'exploitation des données de chlorophylle-A sur une période de 22 ans.

L'objectif de ce mémoire est de caractériser et d'expliquer la variabilité spatiale et temporelle de la chlorophylle-A du lac Tanganyika grâce à MODIS. La dynamique spatiale est observée à l'aide d'une cartographie des concentrations. Les dynamiques temporelles des trois zones caractéristiques du lac sont ensuite comparées entre elles en se basant sur les observations disponibles entre 2000 et 2021. L'influence de El Niño sur l'évolution de la chlorophylle-A et des températures de surface de l'eau est estimée.

Les résultats ont mis en évidence l'influence de l'upwelling et des rivières sur la variabilité spatiale des concentrations en chlorophylle-A. Les variabilités temporelles quant à elles montrent des pics de concentration en saison sèche, avec les amplitudes les plus fortes situées dans la partie sud du lac.

A long terme, les concentrations en chlorophylle-A tendent à diminuer, probablement dû au changement climatique.

Enfin, l'étude n'a pas permis d'estimer une relation entre El Niño et l'observation des dynamiques de chlorophylle-A. Par ailleurs, une relation inverse est visible entre les températures de surface de l'eau et la chlorophylle-A.

L'utilisation de données satellitaires prouve son efficacité pour l'observation de ce grand lac sur une longue période ; d'autres capteurs satellites peuvent également être envisagés afin d'obtenir une résolution spatiale plus fine.