UNIVERSITE D'ABOMEY- CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

GUIDI Eustache Achille

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Ecohydrologie

Transport et dispersion de la salinité dans la lagune de Grand-Popo

Maître de Mémoire

Dr ZANDAGBA E. B. Josué

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

PROMOTION : 2021-2022

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation

Pour l'obtention du diplôme de

Licence professionnelle en Hydrologie

Option : Ecohydrologie

Transport et dispersion de la salinité dans la lagune de Grand-Popo

Présenté par :

GUIDI Eustache Achille

Sous la supervision scientifique du :

Maitre de mémoire :

Dr ZANDAGBA E. B. Josué

Promotion : 2021-2022

DEDICACE

A mon père GUIDI Joachim, ma mère GODONOU Virginie pour tous les sacrifices consentis à mon égard.

REMERCIEMENTS

La réussite du présent travail ne serait possible sans l'apport d'un certain nombre de personnes à qui je tiens à montrer toute ma reconnaissance. J'adresse mes sincères remerciements à :

- Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE), pour nous avoir permis l'insertion dans son établissement ;
- Docteur DOVONOU Flavien**,** le chef du département d'Hydrologie et Gestion des Ressource en Eau (HGRE), pour son amour et sa lutte pour nous assurer une formation de qualité ;
- Docteur ZANDAGBA E. B. Josué, mon maitre mémoire, pour son encadrement et sa disponibilité à suivre de loin et de près ce travail ;
- Dr Ousmane Touré BOUKARI, coordonnateur de la formation en écohydrologie, pour tous ses efforts ;
- tous les responsables de la Formation Professionnelle en Hydrologie à l'Institut National de l'Eau (INE) ;

- tous les Honorables membres du Jury qui ont accepter apprécier ce travail ; merci pour le temps que vous sacrifierez au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;

- tous nos camarades étudiants de la promotion 2019-2020 qui ont œuvré au maintien d'une atmosphère de convivialité entre nous, spécialement à ceux de l'écohydrologie pour tout leur amour, tous leurs soutiens de natures diverses ;
- nos aînés de la formation Professionnelle en Hydrologie pour leurs conseils avisés ;
- mon père GUIDI Joachim pour son amour et sa lutte quotidienne pour assurer un avenir meilleur à ses enfants ;
- ma mère GODONOU Virginie pour son amour, sa force à garder la tête haute peu importe les difficultés de la vie ;
- mon cher CEREDA Andrea pour son amour et son soutien à la fois inconditionnel et indéfectible ;
- mes frères et sœurs GUIDI Judith Calmette, GUIDI Yollande Stéphanie, GUIDI Aristide Ulrich, GUIDI Privael Christian pour leur amour, leurs conseils et leurs motivations ;

- mes chers amis SOSSOU Gildas Charles, DOSSOU Toyigbé Maxime, AYIDE Antoine pour leur soutien ;
- mes cousines GUIDI Rose Sylvie, GUIDI Rosette Sylviane pour leur soutien inconditionnel ;
- mon cousin GODONOU Bruce pour ses conseils et orientations ;
- toute la famille GUIDI ;
- toute la famille GODONOU.

RESUME

La modélisation écologique vise à sauvegarder ou restaurer l'intégrité écologique de nos écosystèmes. La lagune de Grand-Popo, par la diversité des espèces vivantes qu'on y rencontre, constitue un écosystème potentiel qui, face à la menace que représente les activités anthropiques, mérite qu'on lui accorde une attention particulière. La présente étude vise à connaitre le mécanisme de transport et de la dispersion de la salinité dans la lagune de Grand-Popo. La campagne de collecte de données effectuée en 17 points sur cette lagune nous a permis, dans un premier temps, d'apprécier la qualité physique des eaux de la lagune. L'analyse des données collectées révèle que sur le plan physique, les eaux de la lagune de Grand-Popo ne sont pas en bonne conformité avec la norme NQE pour une eau de surface. La modélisation de la dispersion de la salinité avec le modèle SMS montre qu'en période de crue, du fait de l'apport d'eau douce par le fleuve Mono et la Sazué, la salinité diminue considérablement et rapidement de l'amont de la lagune vers son aval. Au début de simulation (jour 0 heure 0), la salinité, sur la majeure partie de lagune, se trouve entre 3 et 10 psu et est de 0 psu au niveau des points de contact de la lagune avec le Mono et la Sazué. La diminution s'observe progressive le long de la lagune jusqu'à la fin de la simulation (jour 30 heure 23) où la salinité, de l'amont de la lagune jusqu'à plus d'un kilomètre en aval de l'embouchure où la salinité qui, au départ était comprise entre 3 et 10 psu, varie entre 0 et 3 psu. En fin de simulation, malgré l'apport d'une importante quantité d'eau douce, on note des teneurs en salinité assez élevées (entre 3 et 20 psu) par endroit au niveau de l'embouchure, témoignant de l'impact de la marée qui se fait ressentir dans cette zone. En période d'étiage, la lagune, sous l'influence de la marée, connait une augmentation conséquente en salinité de l'embouchure vers l'amont et l'aval de la lagune. Au début de la simulation, la salinité est de 31 psu au niveau de l'embouchure contre 3 à 10 psu sur l'ensemble de la lagune. En fin de simulation, la salinité, à plus de 3 Km en amont comme en aval de l'embouchure, est devenu aussi importante qu'au niveau de l'embouchure même (31 psu). En étiage comme en période de crue, la salinité sur la lagune, augmente progressive du point de contact de la lagune avec le fleuve Mono vers l'embouchure.

Mots clés : Dispersion, salinité, embouchure, lagune de Grand-Popo.

ABSTRACT

Ecological modelling aims to safeguard or restore the ecological integrity of our ecosystems. The Grand-Popo lagoon, with its diversity of living species, is a potential ecosystem which, in the face of the threat posed by human activities, deserves special attention. The present study aims at knowing the mechanism of transport and dispersion of salinity in the lagoon of Grand-Popo. The data collection campaign carried out at 17 points in the lagoon enabled us to assess the physical quality of the lagoon's water. The analysis of the data collected reveals that, physically, the waters of the Grand-Popo lagoon do not comply with the EQS standard for surface water. The modelling of the dispersion of salinity with the SMS model shows that during the flood period, due to the fresh water from the Mono river and the Sazué, salinity decreases considerably and rapidly from the upstream part of the lagoon to its downstream part. At the beginning of the simulation (day 0 hour 0), the salinity, on the lagoon is between 3 and 10 psu and is 0 psu at the contact points of the lagoon with the Mono and the Sazué. The decrease is observed progressively along the lagoon until the end of the simulation (day 30 hour 23) when the salinity, from the upstream of the lagoon to more than one kilometer downstream of the mouth where the salinity, which at the beginning was between 3 and 10 psu, varies between 0 and 3 psu. At the end of the simulation, despite the addition of a large quantity of fresh water, we note fairly high salinity levels (between 3 and 20 psu) in places at the mouth of the lagoon reflecting the impact of the tide in this area. During the low-water period, the lagoon, under the influence of the tide, experiences a significant increase in salinity from the mouth to the upstream and downstream parts of the lagoon. At the beginning of the simulation, the salinity already reached 31 psu at the mouth, compared to 3 to 10 psu over the entire lagoon. At the end of the simulation, the salinity, at more than 3 km upstream and downstream of the mouth, has become as important as at the mouth itself (31 psu). In low water as well as in high water, the salinity in the lagoon increases progressively from the point of contact of the lagoon with the Mono towards the mouth.

Key words: Dispersion, salinity, mouth, Grand-Popo lagoon.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

INE	Institut National de l'Eau
HGRE	Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau
SPGEB	Société Publique de Gestion de l'Eau Belge
PGPE	Programme de Gestion et de Protection de l'Environnement
LHA	Laboratoire d'Hydrologie Appliquée
pH	Potentiel d'Hydrogène
TDS	Solides Dissous Totaux
IBGE	Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement
IAEA	Agence Internationale de l'Energie Atomique
CETMEF	Centre d'Etude Techniques Maritimes Et Fluviales
1D/2D/3D	Une/deux/trois Dimension(s)
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PDC	Plan de Développement Communal
SMS	Surface-water Modeling System
m	Mètre
m^2/s	Mètre carré par seconde
m^3/s	Mètre cube par seconde
°C	Degré Celsius
ppm	Partie par million
PSU	Unité pratique de salinité
mg/L	Milligramme par litre
NQE	Norme de Qualité de l'Eau
ADELAC	Agence pour le Développement intégré de la zone Economique du Lac Ahémé et ses Chenaux
EQS	Environmental quality standard

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Influence du profil horizontal surfacique des champs de vitesses sur la dispersion d'un polluant dans une rivière. 8
Figure 2 : Effet du profil vertical des champs de vitesse sur la dispersion d'un polluant..... 8
Figure 3 : Représentation tridimensionnelle des zones de mélange initial et complet à partir d'un rejet ponctuel dans une rivière. 9
Figure 4 : Représentation tridimensionnelle de l'évolution d'un polluant dans un cours d'eau suite à un rejet linéaire vertical. 11
Figure 5 : Représentation tridimensionnelle de l'évolution d'un polluant dans un cours d'eau suite à un rejet linéaire horizontal. 11
Figure 6 : Carte de localisation de la commune de Grand-Popo. 14
Figure 7: Carte hydrographique de la commune de Grand-Popo. 14
Figure 8 : Diagramme ombrothermique de la commune de Grand-Popo. 15
Figure 9 : Courbe de la température dans la commune de Grand-Popo. 16
Figure 10 : Courbe d'humidité dans la commune de Grand-Popo. 16
Figure 11 : Heures d'ensoleillement à Grand-Popo. 17
Figure 12 : Carte géomorphologique de l'estuaire du Mono. 18
***Figure 13** : Carte pédologique locale de la commune de Grand-Popo.* 19
Figure 14 : Localisation des points de mesure des paramètres physiques. 25
Figure 15 : Schéma de fonctionnement du logiciel SMS 27
Figure 16 : Bathymétrie de la lagune de Grand-Popo. 29
Figure 17 : Maillage triangulaire de la lagune de Grand-Popo. 29
Figure 18 : Localisation des points identifiés pour le suivi de la variation de salinité..... 32
Figure 19 : Variation du pH des eaux de la lagune de Grand-Popo. 34
Figure 20 : Variation de la température sur la lagune de Grand-Popo. 35
Figure 21 : Variation de la conductivité électrique des eaux de la lagune de Grand-Popo..... 36
Figure 22 : Variation du TDS dans les eaux de la lagune de Grand-Popo. 36
Figure 23 : Variation de la salinité des eaux de la lagune de Grand-Popo. 37
Figure 24 : Variation du taux d'oxygène dissous dans les eaux de la lagune de Grand-Popo.38
Figure 25 : Variation du degré de saturation en oxygène dans les eaux de la lagune de Grand-Popo. 38
Figure 26 : Variation de la salinité en période de crue 48
Figure 27 : Variation de la salinité en période d'étiage 48

LISTE DES PLANCHES

Planche 1 : Matériel de terrain 24

Planche 2: Dispersion de la salinité en période de crue. 42

Planche 3 : Dispersion de la salinité en période d'étiage 46

Table des matières

DEDICACE i

REMERCIEMENTS ii

RESUME iv

ABSTRACT v

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES vi

LISTE DES FIGURES vii

LISTE DES PLANCHES viii

INTRODUCTION GENERALE 1

Objectifs de l'étude 2

Objectif général 2

Objectifs spécifiques 2

Hypothèses 2

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 4

1.1. Clarification 4

1.1.1. Lagune 4

1.1.2. Embouchure 4

1.1.3. Estuaire 4

1.1.4. Marée 4

1.1.5. Crue 5

1.1.6. Etiage 5

1.2. Quelques paramètres physiques des eaux lagunaires 5

1.4.1. Le pH 5

1.4.2. La température 5

1.4.3. La conductivité 5

1.4.4. L'oxygène dissous 6

1.4.5. La salinité 6

1.4.6. Solide Totaux Dissous 6

1.4.7. Degré de saturation en oxygène 6

1.3. Généralités sur le phénomène de transport dans les eaux de surface 6

1.4. Théorie de la dispersion dans un cours d'eau 9

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DU MILIEU D'ÉTUDE 13

2.1. Situation géographique 13

2.2. Caractéristiques climatiques 15

2.3. Végétation 17

2.4. Géomorphologique 18

2.5. Pédologie 18

2.6. Hydrologie sur la lagune de Grand-Popo 19

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODOLOGIE 22

3.1. Matériel de terrain 22

3.2. Méthodologie 22

3.2.1. Recherche documentaire 22

3.2.2. La campagne de terrain 22

3.2.3. Modélisation de la dispersion de la salinité 26

3.2.4. Suivi de la variation de la salinité de la Bouche du Roy vers le Mono 31

3.2.5. Traitement des données 31

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION 34

4.1. Résultats 34

4.1.1. Caractérisation physique de la lagune de Grand-Popo 34

4.1.2. La dispersion de la salinité sur la lagune de Grand-Popo 39

4.1.3. La variation de la salinité de la Bouche du Roy vers le Mono 47

4.2. Discussion 49

4.2.1. Caractérisation physique de la lagune de Grand-Popo 49

4.2.2. Dispersion de salinité sur la lagune de Grand-Popo 49

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 54

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE 55

WEBOGRAPHIE 59

ANNEXE 60

INTRODUCTION GENERALE

La Nature, que ce soit à partir de ses propres moyens ou avec l'intervention humaine, fournit une panoplie de biens et services indispensables à la vie dont le plus important est la ressource en eau. Elle est indispensable à la survie de l'Homme et au développement de ses activités. La Terre porte le nom de planète bleue parce que c'est ainsi qu'elle apparaît depuis l'espace du fait que sa surface est couverte d'eau à 71 % (Belhadj et al., 2011). Mais si l'eau est abondante, l'eau douce ne représente que 2,53 % de toute l'eau de la planète et seule l'eau douce soutien la vie terrestre notamment la vie humaine (Lefèvre,2013). C'est parce que l'eau existait sur la Terre que la vie s'y est développée (Lamy, 1995 in Tchokpon, 2020). L'eau douce est donc un bien rare et précieux qui, si elle est contaminée, peut ne plus pouvoir remplir ses différents rôles écologiques (Lefèvre,2013).

Les ressources en eau constituent particulièrement un milieu sensible aux pressions anthropiques car c'est principalement par elles que s'effectuent la collecte et le transfert des substances ou composés polluants dans l'environnement (Zandagba, 2017). Les lagunes côtières sont connues comme des nurseries et des milieux très productifs en raison de facteurs physiques très variables, de l'hétérogénéité spatiale des structures des peuplements fortement liée à la disponibilité des ressources alimentaires (Villanueva, 2004 in Chouti et al., 2017). Le Bénin dispose d'un écosystème aquatique, fourni et varié, représenté de l'aval vers l'amont par une composante maritime importante, un système de lagunes et de lacs et un réseau hydrographique dans lequel s'inscrit la lagune côtière. Cette dernière, classée site RAMSAR, est l'un des plus importants plans d'eau du pays de par sa productivité et son exploitation. La lagune de Grand-Popo, l'une des composantes de la lagune côtière est confrontée à un véritable problème de comblement dû à l'érosion des plateaux, des bassins versants et des berges, les mauvaises pratiques de pêche contribuant à accélérer le processus de dégradation de l'environnement (ADELAC, 2019). Cette situation a eu pour conséquence, la réduction considérable des captures des ressources halieutiques.

Cette lagune côtière est soumise à une dynamique hydrologique caractérisée par des apports en eau salée de l'océan Atlantique et d'eau douce du fleuve Mono et de la rivière Sazué. Par ailleurs, les estimations faites donnent une élévation de l'ordre de 20 cm pour l'an 2030, de 40 cm pour 2070, et de 60 à 70 cm pour la fin du siècle du niveau marin (Adam et al.,2007). Dans le temps, l'intrusion d'eau marine va accentuer le degré de salinité de l'eau de la lagune et de tout l'environnement autour.

Face à cela et dans le souci de garantir l'intégrité écologique de ce milieu, la lagune de Grand-Popo a fait l'objet de plusieurs études. C'est ainsi que Chouti et al. (2017) dans leur étude sur la *Caractérisation Physico-Chimique suivie d'une étude de la toxicité de la lagune côtière, de Togbin À Grand-Popo* ont montré que la lagune est fortement minéralisée et que l'apport de l'eau de mer en haute marée est l'une des causes de cette forte minéralisation. ADELAC (2019) et Kaki et al., (2020) par contre, se sont intéressés au *fonctionnement hydrodynamique ainsi qu'à la dynamique sédimentaire au niveau de de la lagune*. Cependant, ces différentes études n'ont pas abordé le mécanisme de dispersion de la salinité au niveau de la lagune qui reste une préoccupation, jusque-là, sans une étude approfondie. C'est donc pour satisfaire à cela que le présent sujet de recherche intitulé « Transport et dispersion de la salinité dans la lagune de Grand-Popo » a été formulé. A cet effet, les résultats de la présente étude auront pour but d'apporter une réponse à la question scientifique suivante : Quel est le mécanisme de transport et de dispersion de la salinité dans la lagune de Grand-Popo ?

Le mémoire, rapport de notre étude, est structuré en quatre chapitres : le premier chapitre présente la Synthèse bibliographique ; le deuxième chapitre présente la zone d'étude ; le troisième chapitre quant à lui expose le matériel et la méthodologie utilisés alors que le chapitre 4 présente les résultats essentiels et la discussion.

Objectifs de l'étude

Objectif général

L'objectif général de cette étude est d'étudier le mécanisme de transport et de dispersion de la salinité dans la lagune de Grand-Popo.

Objectifs spécifiques

De façon spécifique, il s'agit de :

- faire une caractérisation physique de l'eau de la lagune de Grand-Popo ;
- modéliser la dispersion de la salinité sur la lagune de Grand-Popo.

Hypothèses

Les hypothèses émises pour atteindre les objectifs fixés sont les suivantes :

- les paramètres physiques de la lagune de Grand-Popo ne respectent pas les normes pour une eau de surface ;
- la salinité se disperse de façon hétérogène sur l'ensemble de la lagune et varie en fonction de la période hydrologique.

CHAPITRE 1 :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Clarification

1.1.1. Lagune

Une lagune est une étendue d'eau côtière généralement peu profonde séparée de la mer par un cordon littoral de largeur variable.

Selon Nichols et Allen (1981), on peut distinguer quatre types de lagunes (classification qui reflète à la fois le degré d'ouverture de la lagune sur l'océan et les processus hydrodynamiques qui sont responsables de leur conformation géomorphologique) :

- *lagunes de type ouvertes*, souvent associée à un marnage important lors des marées et où les passes sont maintenues par l'effet d'un autodragage lors de la vidange à marée basse;
- *lagunes de type fermées* (souvent moins salées)
- *lagunes de type semi-fermées*, souvent expliquées par la dérive littorale qui tend à fermer les passes tout ou partie du temps ;
- *lagunes de type estuariennes*, où les courants de marée combinent leurs effets à ceux du courant fluvial.

1.1.2. Embouchure

Une embouchure est le lieu où un cours d'eau se jette dans un lac, un réservoir, une mer ou un océan. Elle se distingue d'une confluence qui correspond à la rencontre avec un autre cours d'eau.

1.1.3. Estuaire

Un estuaire est la portion de l'embouchure d'un fleuve où l'effet de la mer ou de l'océan dans lequel il se jette est perceptible. Pour certains, il correspond à toute la portion du fleuve semi close où l'eau est salée ou saumâtre

1.1.4. Marée

La marée est la variation de la hauteur du niveau des mers et des océans, causée par la combinaison des forces gravitationnelles dues à la Lune et au Soleil et des forces d'inertie dues à la révolution de la Terre autour du centre de masse du couple Terre-Lune et de celui du couple Terre-Soleil, le tout conjugué à la rotation de la Terre sur son axe.

Dans les écosystèmes lagunaires, la marée résulte de la propagation de l'onde océanique incidente (Zandagba, 2017). Elle joue un rôle important pendant la période de salinisation car elle régule les échanges d'eaux avec les océans (Okpeitcha et al., 2021).

On distingue la basse marée (diminution de la hauteur du niveau des mers et océans) et la haute marée (augmentation de la hauteur du niveau des mers et océans)

1.1.5. Crue

La crue est une forte augmentation, un accroissement du débit et de la hauteur d'eau en écoulement d'un fleuve, d'une rivière, d'un cours d'eau.

1.1.6. Etiage

L'étiage est, en hydrologie, le débit minimal d'un cours d'eau. Il correspond statistiquement, sur plusieurs années, à la période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint son point le plus bas (basses eaux).

1.2. Quelques paramètres physiques des eaux lagunaires

L'évaluation de la qualité physique des eaux de surface se base sur la mesure d'un certain nombre de paramètres physiques comme : le pH, la température, la salinité, le TDS, l'oxygène dissous, la conductivité et le degré de saturation en oxygène dissous.

1.4.1. Le pH

Le pH est une échelle logarithmique qui varie de 0 à 14. Il traduit l'acidité, l'alcalinité ou la neutralité d'une eau et mesure l'activité des ions H^+ contenus dans cette eau. Le pH a une influence majeure sur les formes physico-chimiques du métal et des composants métalliques dans l'environnement aquatique, du fait qu'il contrôle la solubilité et la concentration des métaux (Gendronneau, 2006).

1.4.2. La température

Il est important de connaitre la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et des gaz, dans la dissociation des sels dissous, donc sur la conductivité électrique et dans la détermination du pH.

La température est un facteur important dans la répartition de la vie végétale dans les eaux courantes. Ses variations ont une grande influence sur la vie aquatique, en particulier sur les phénomènes respiratoires (les eaux froides étant plus riches en oxygène que les eaux chaudes). Ses variations peuvent tuer certaines espèces, mais également, elles en favorisent le développement d'autres.

1.4.3. La conductivité

La conductivité est une expression numérique de l'aptitude d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs, par contre les

composés organiques ne le sont pas (IBGE, 2005). La conductivité électrique s'exprime généralement en microsiemens par centimètre (µS/cm).

1.4.4. L'oxygène dissous

Les concentrations en oxygène dissous constituent avec les valeurs de pH l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. L'oxygène dissous dans les eaux de surfaces provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques (IBGE, 2005). La teneur en oxygène dissous varie en fonction de la journée ou de la saison car elle dépend de certains paramètres tels que : la pression partielle de l'atmosphère en oxygène, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments. Elle est également fonction de la vitesse d'appauvrissement du milieu en oxygène par l'activité des organismes aquatiques et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans.

1.4.5. La salinité

Elle désigne la quantité de sel dissous dans un liquide. Le sel ainsi dissous modifie les propriétés de l'eau mais surtout la capacité de l'eau à dissoudre et sa densité. La quantité de sels dissous dans un liquide agit également sur la pression osmique de celle-ci (Chouti et al., 2010).

1.4.6. Solide Totaux Dissous

Le TDS signifie le total des solides dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Il est composé de sels inorganiques tels que (calcium, magnésium, potassium et sodium) et des carbonates (nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates) ainsi que quelques matières organiques.

Des sources d'eau minérales contiennent de l'eau avec un taux élevé de solides dissous parce qu'elles ont coulés à travers des régions où les roches contiennent beaucoup de sels (Bouchebbah et Ayache, 2011).

1.4.7. Degré de saturation en oxygène

Le taux de saturation en oxygène dissous est le rapport exprimé en pourcentage entre la teneur en oxygène immédiat et la solubilité maximale dans l'eau à une température et à une pression donnée.

1.3. Généralités sur le phénomène de transport dans les eaux de surface

La modélisation du comportement d'un polluant au sein d'un cours d'eau suite à un rejet accidentel requiert la connaissance de certaines notions fondamentales.

Le transport de matières dans les cours d'eau (fleuves, rivières, ruisseaux, canaux d'irrigation...) est généré par différents phénomènes tels que la diffusion, l'advection, la dispersion, l'adsorption, la désorption, la précipitation, la sédimentation, l'évaporation... (Shenetal, 1995 ; Hibbsetal, 1999 in Jabbour, 2006). Ces phénomènes dépendent à la fois de la nature de la matière rejetée et des caractéristiques hydrodynamiques intrinsèques au cours d'eau.

- **L'advection**

C'est un pur phénomène de translation de la matière (soluble ou en suspension) d'un point à un autre dans les sens vertical, transversal, ou longitudinal. Cette translation, imposée par le flux du courant (gradient hydraulique), n'affecte en aucun cas les concentrations du produit rejeté.

- **La diffusion**

La diffusion est une vibration intramoléculaire caractéristique de chaque produit soluble. Elle permet le mouvement des molécules d'un milieu où le potentiel chimique est élevé vers un milieu où le potentiel est inférieur. Le coefficient de diffusion d'une molécule est généralement de l'ordre de$10^{-9}m^2/s$ (Rutherford1994).

- **La dispersion**

Le phénomène de dispersion est créé par la non uniformité des champs de vitesses horizontaux et verticaux. Cette non uniformité est due essentiellement à la rugosité du lit du cours d'eau qui réduit les amplitudes des champs de vitesse à proximité du fond et des bords. Par conséquent, un gradient de vitesse se crée entre le centre de la surface horizontale du cours d'eau où la vitesse est maximale, et les bords et le fond où la vitesse est minimale, voire nulle (Jabbour, 2006).

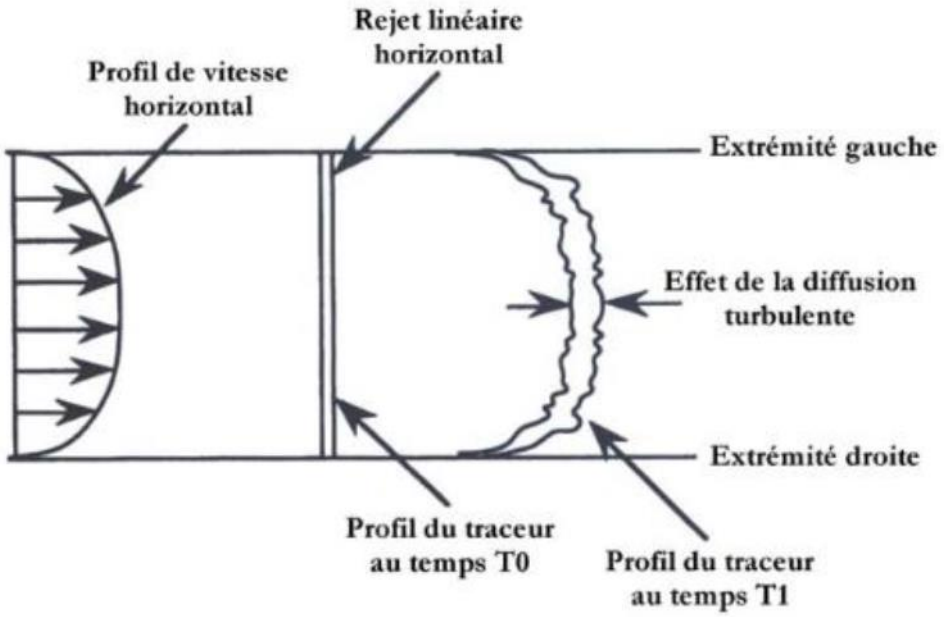


Figure 1 *: Influence du profil horizontal surfacique des champs de vitesses sur la dispersion d'un polluant dans une rivière.*

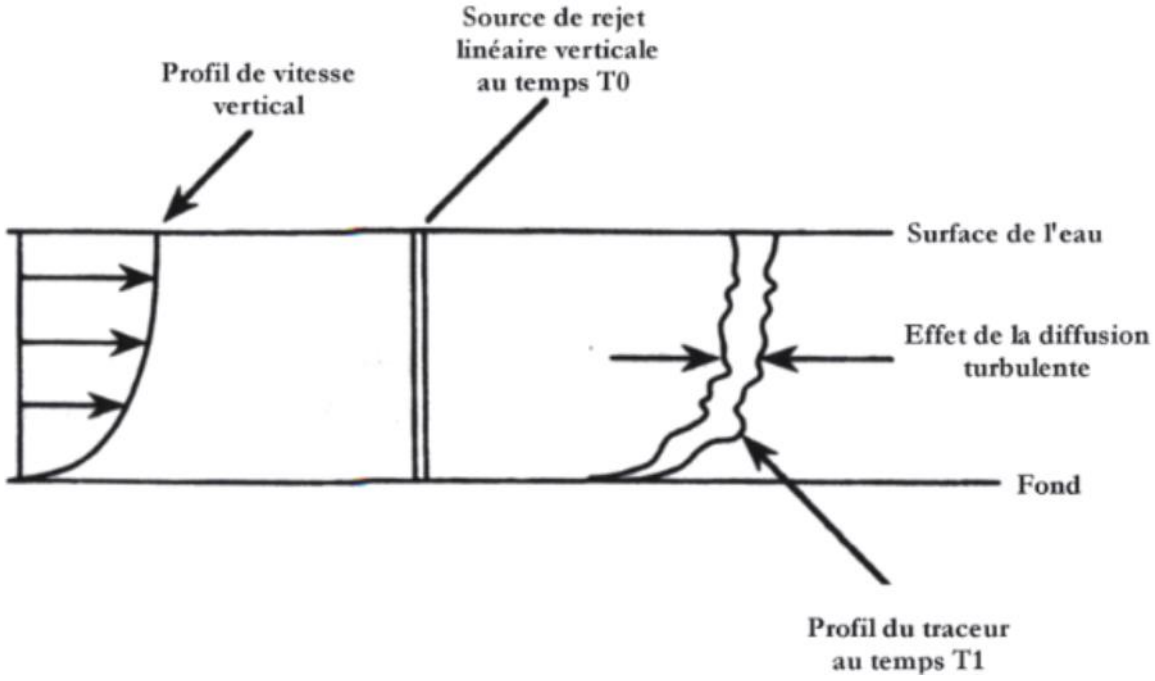


Figure 2 *: Effet du profil vertical des champs de vitesse sur la dispersion d'un polluant.*

Il convient de noter que la dispersion désigne l'action conjuguée de l'advection, du cisaillement et diffusion turbulente (en cas de régime turbulent). Ces phénomènes constituent les principaux modes de transport quelque soit la nature de la matière étudiée à l'exception de la diffusion qui ne concerne que les produits solubles ou miscibles dans l'eau (Jabbour, 2006).

1.4. Théorie de la dispersion dans un cours d'eau

Le processus de dispersion d'un produit miscible suite à un rejet instantané dans un cours d'eau est généralement considéré comme étant constitué de trois zones distinctes (Fischer, 1967 ; Jobson, 1997) que sont la zone de mélange initial, la zone de mélange complet et la zone de champ lointain.

- **La zone de mélange initial**

La dispersion d'un produit miscible rejeté ponctuellement au centre de la surface de l'eau s'effectue dans les trois dimensions de l'espace : verticalement dans le sens de la profondeur, latéralement vers les deux extrémités et longitudinalement dans le sens du courant. Le domaine situé entre la source du rejet et le point où le produit est homogène verticalement à travers la hauteur d'eau s'appelle zone de mélange initial. La distance délimitant cette zone est atteinte relativement vite dans la mesure où la dispersion verticale est prédominante dans cette zone de mélange et que par ailleurs, la hauteur d'eau est souvent inférieure à la largeur du cours d'eau. Certains chercheurs estiment que la distance nécessaire pour atteindre cette zone est comprise entre 50 à 200 fois la profondeur du cours d'eau (Jabbour, 2006).

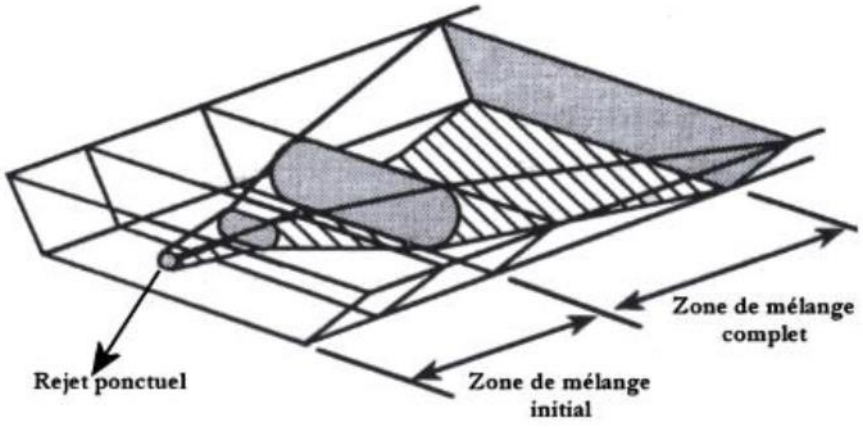


Figure 3 *: Représentation tridimensionnelle des zones de mélange initial et complet à partir d'un rejet ponctuel dans une rivière.*

- **La zone de mélange complet**

La zone de mélange complet débute à la limite de la zone de mélange initial. Elle prend fin lorsque le produit rejeté devient homogène à travers toute la section du cours d'eau, dans les directions verticale et latérale.

Rutherford 1994 estime que la longueur nécessaire pour obtenir un mélange homogène à travers la section est de 100 à 300 fois la largeur du cours d'eau. D'autres auteurs (Sanchez-Cabeza and Pujol, 1999), l'évaluent entre 3 à 10 Km en aval du point de rejet.

Cette distance, appelée longueur de mélange, varie de façon importante, d'un site à l'autre, en fonction du débit, de la géométrie, des caractéristiques du rejet (Jabbour, 2006).

- **La zone de champ lointain**

Cette étape de dispersion se prolonge de la zone de mélange complet jusqu'à l'infini.

La dispersion est unidimensionnelle dans le sens du courant, par conséquent, les dispersivités verticale et latérale sont négligeables par rapport à la dispersivité longitudinale.

Les trois zones de dispersion citées précédemment sont définies pour une source de rejet ponctuelle. Cependant, l'injection peut aussi être linéaire, horizontale ou verticale, sur une partie ou sur la totalité de la largeur ou de la profondeur du cours d'eau.

- Si l'injection du polluant est linéaire verticale, la zone de mélange initial ou vertical est considérée comme atteinte dès l'injection puisque cette dernière couvre toute la colonne d'eau. Dans ce cas, seule la zone de mélange complet existe.
- Si l'injection est linéaire horizontale sur toute la largeur du cours d'eau, le polluant est considéré comme homogène à travers la largeur uniquement. Dans ce cas, la zone de mélange initial est prise en compte (Jabbour, 2006).

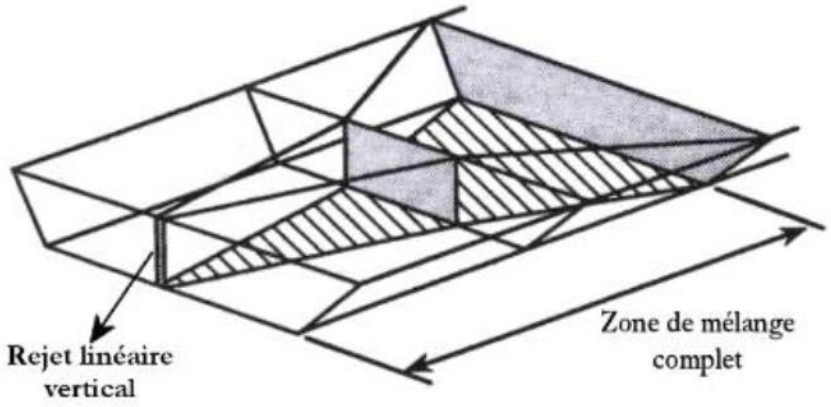


Figure 4 *: Représentation tridimensionnelle de l'évolution d'un polluant dans un cours d'eau suite à un rejet linéaire vertical.*

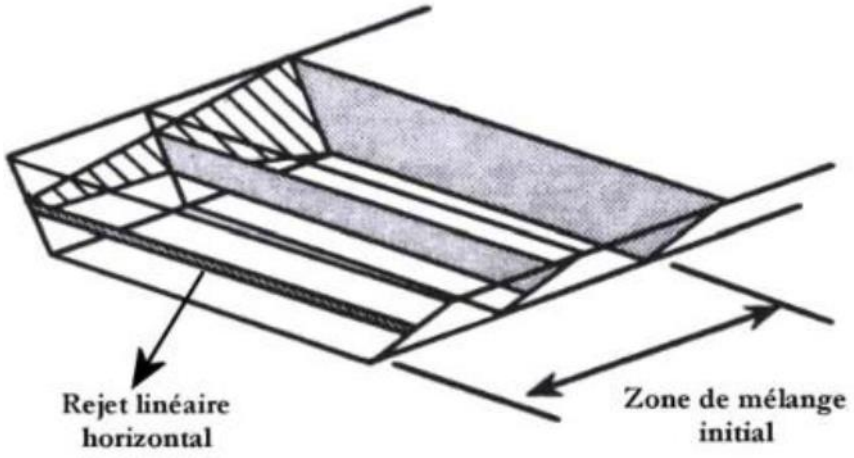


Figure 5 *: Représentation tridimensionnelle de l'évolution d'un polluant dans un cours d'eau suite à un rejet linéaire horizontal.*

CHAPITRE 2 :

PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DU MILIEU D'ÉTUDE

2.1. Situation géographique

La zone d'étude est la lagune de Grand-Popo. Elle est située dans la commune de Grand-Popo. La Commune de Grand-Popo est située au Sud-Ouest du département du Mono entre les longitudes 1°35'E et 1°58'E et entre les latitudes 6°13'N et 6°27'N. Elle est limitée au Nord par les Communes d'Athiémé, de Comé et de Houéyogbé, au Sud par l'Océan Atlantique, au Sud-Ouest par les Communes de Ouidah et de Kpomassè et à l'Ouest par la République du Togo. La Commune de Grand-Popo s'étend sur une superficie de 289 Km², soit 7,2 % de l'ensemble du département du Mono pour une densité moyenne de population d'environ 140 habitants/Km^2. Elle compte sept arrondissements et 44 villages. Géographiquement, le territoire se subdivise en trois zones :

- La côte qui correspond à toute la partie Sud le long de la mer. C'est un cordon littoral sablonneux plat et rectiligne dans son ensemble dont l'altitude ne dépasse pas 5m au-dessus du niveau de la mer ;
- Les zones marécageuses ou zones de bas-fonds et les zones inondables qui couvrent la plus grande partie des terres ;
- Le plateau continental terminal qui recouvre des formations fines, sableuses ou sablo-argileuses souvent ferrugineuses, qui s'étend de l'ouest vers le nord.

La lagune de Grand-Popo forme, avec celle de Ouidah, la lagune côtière du Bénin. D'une superficie d'environ 12 Km^2 et une longueur de 60 Km, la lagune côtière est constituée d'un chenal étroit d'une largeur maximum de 500 m par endroit qui s'étire parallèlement à la côte depuis le village Agbanankin (au voisinage de Grand-Popo) à l'Ouest, jusqu'au village de Togbin à l'Est, dans la commune d'Abomey-Calavi. Elle est alimentée par le fleuve Mono et son défluent, la Sazué. Les profondeurs varient entre 0 et 6 m ; les plus importantes se situent entre la Bouche du Roy et Grand-Popo. La lagune côtière est reliée au lac Ahémé par le chenal Ahô long de 10 Km et forme avec lui un système lagunaire en intercommunication avec la mer et alimenté par les fleuves Mono et Couffo. Les échanges d'eau avec l'océan sont effectués par le biais de la Bouche du Roy (ADELAC, 2019).

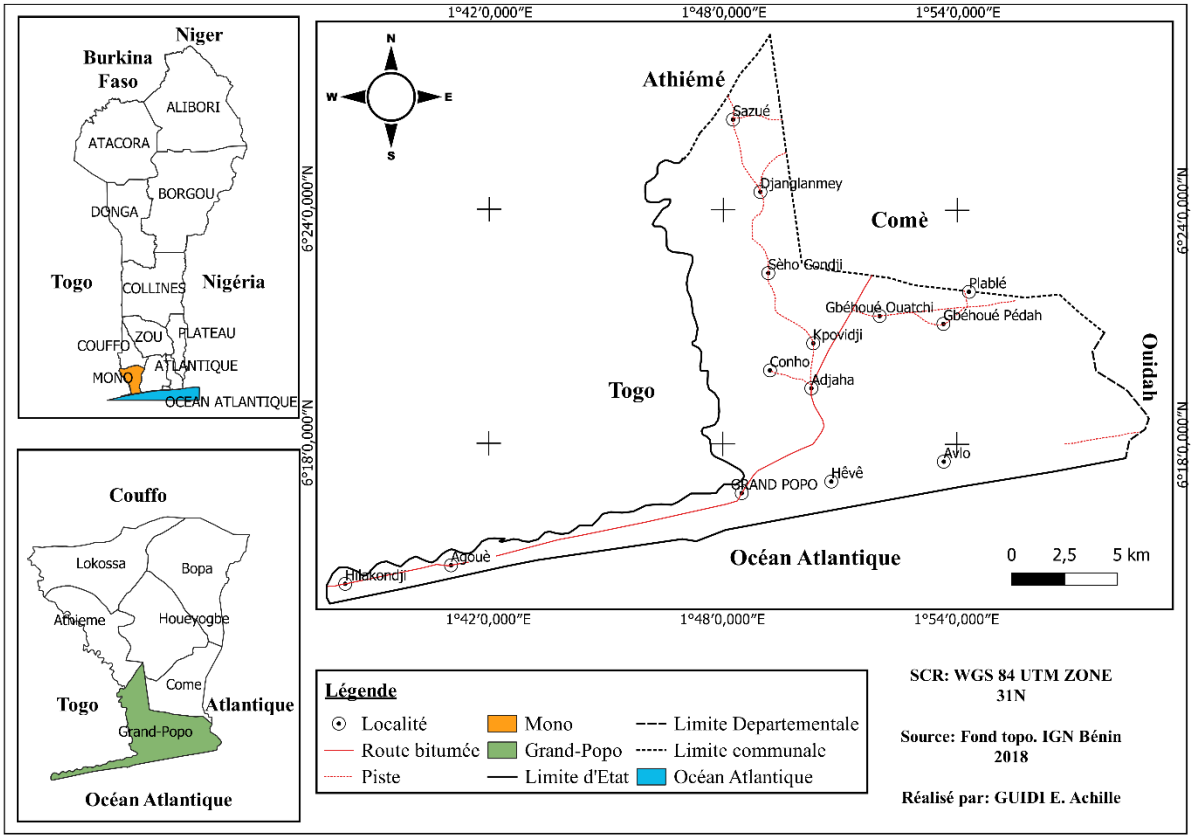


Figure 6 *: Carte de localisation de la commune de Grand-Popo.*

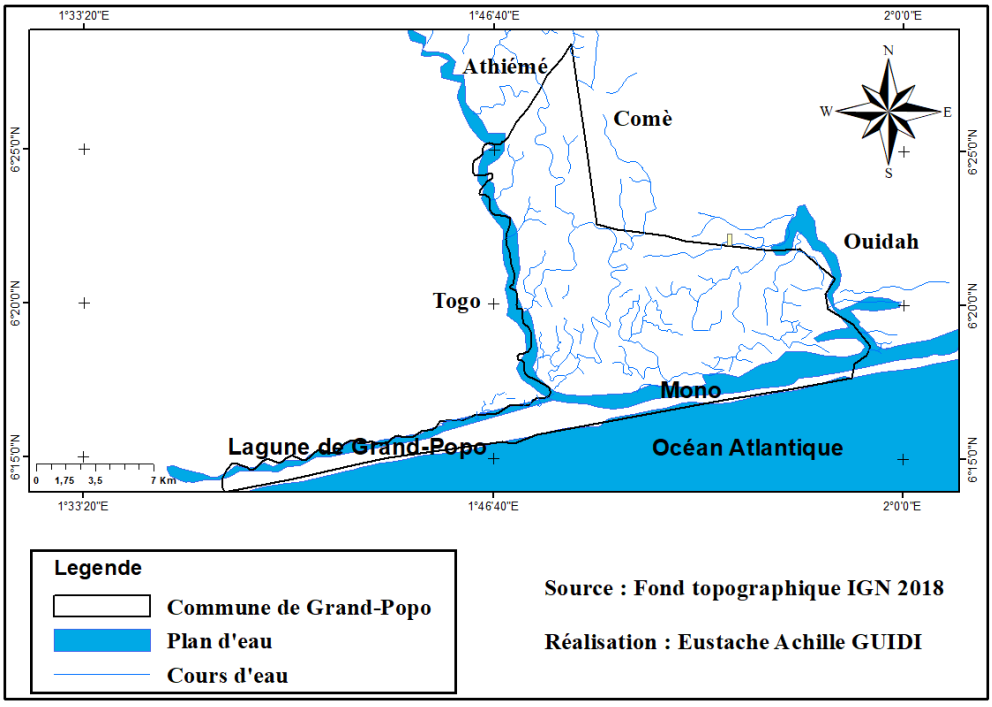


Figure 7*: Carte hydrographique de la commune de Grand-Popo.*

2.2. Caractéristiques climatiques

La commune de Grand-Popo a un climat de type tropical caractérisé par quatre saisons plus ou moins marquées :

- Une grande saison sèche de mi-novembre à mi-mars ;
- Une grande saison de pluie de mi-mars à mi-juillet ;
- Une petite saison sèche de mi-juillet à mi-septembre ;
- Une petite saison de pluie de mi-septembre à mi-novembre.

La température moyenne sur toute l'année à Grand-Popo est de 27 °C avec une précipitation totale annuelle de 1377mm.

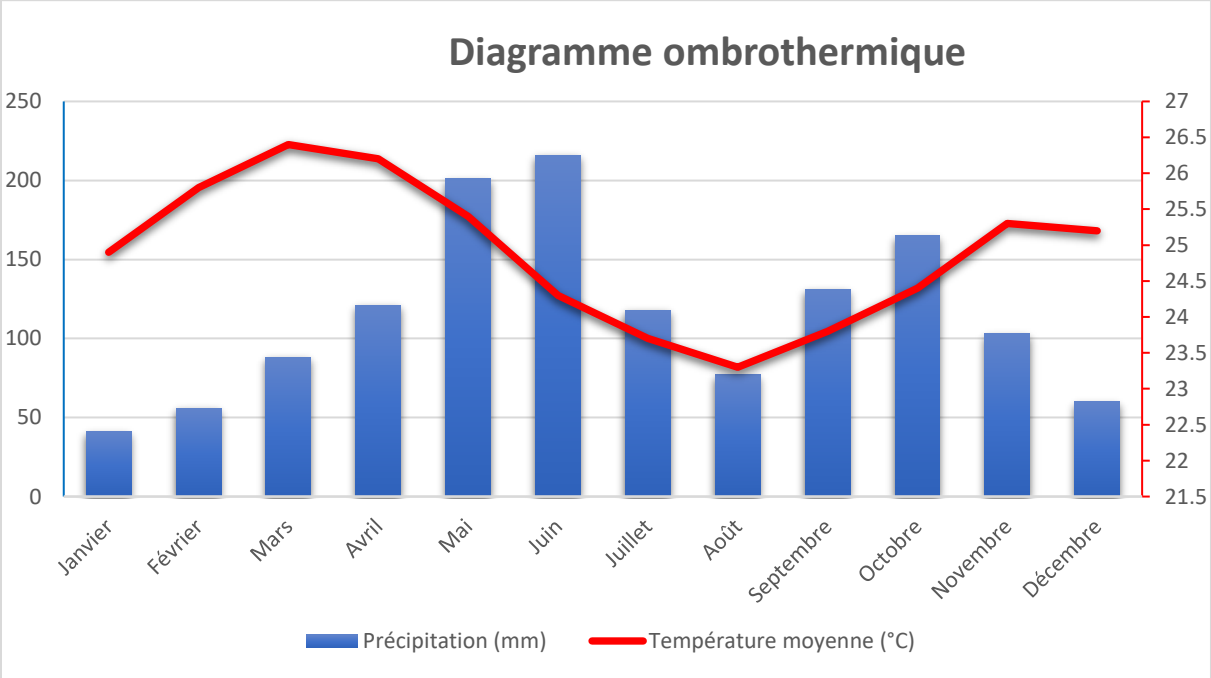


Figure 8 *: Diagramme ombrothermique de la commune de Grand-Popo.*

Avec 41 mm, le mois de Janvier est le plus sec. Les précipitations records sont enregistrées en Juin. Elles sont de 216mm en moyenne.

Entre le plus sec et le plus humide des mois, l'amplitude des précipitations est de 175mm.

Le mois de Mai (25,67 jours) a, en moyenne, les jours les plus pluvieux par mois. Le moins de jours de pluie est mesuré en Janvier (12,23 jours).

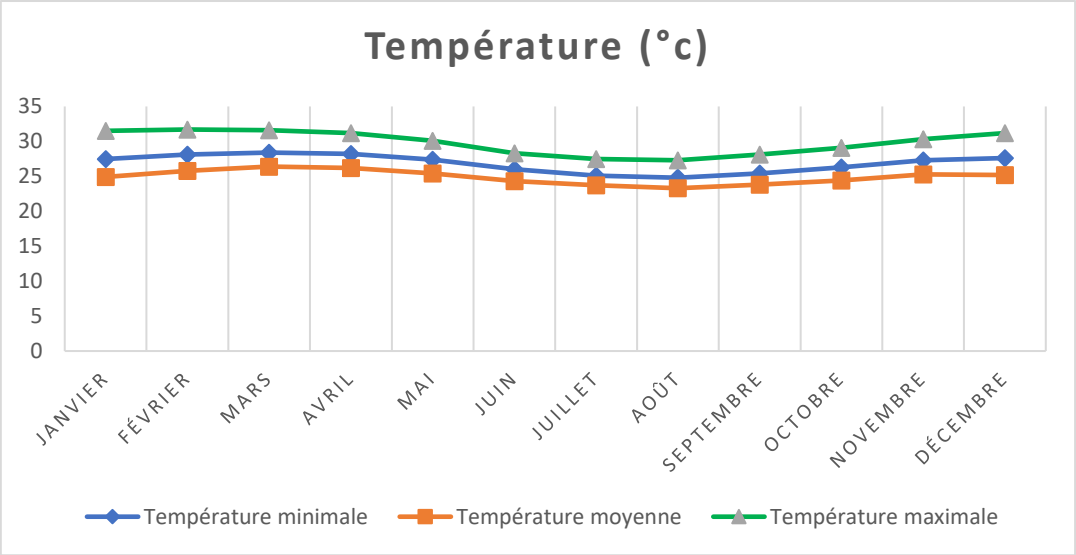


Figure 9 : *Courbe de la température dans la commune de Grand-Popo.*

- 3,6°C de variation en termes de température sont affichés sur l'ensemble de l'année.

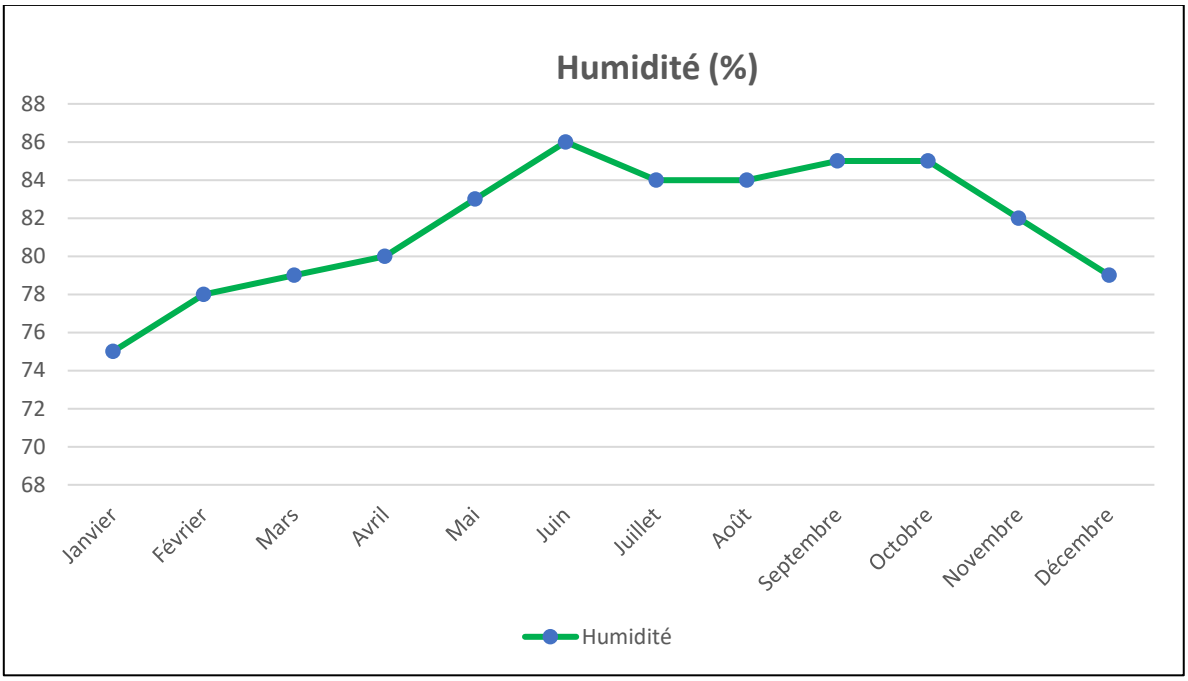


Figure 10 *: Courbe d'humidité dans la commune de Grand-Popo.*

- L'humidité relative la plus élevée est mesurée en Juin (85.76 %). Le plus bas en Janvier (74.76 %).

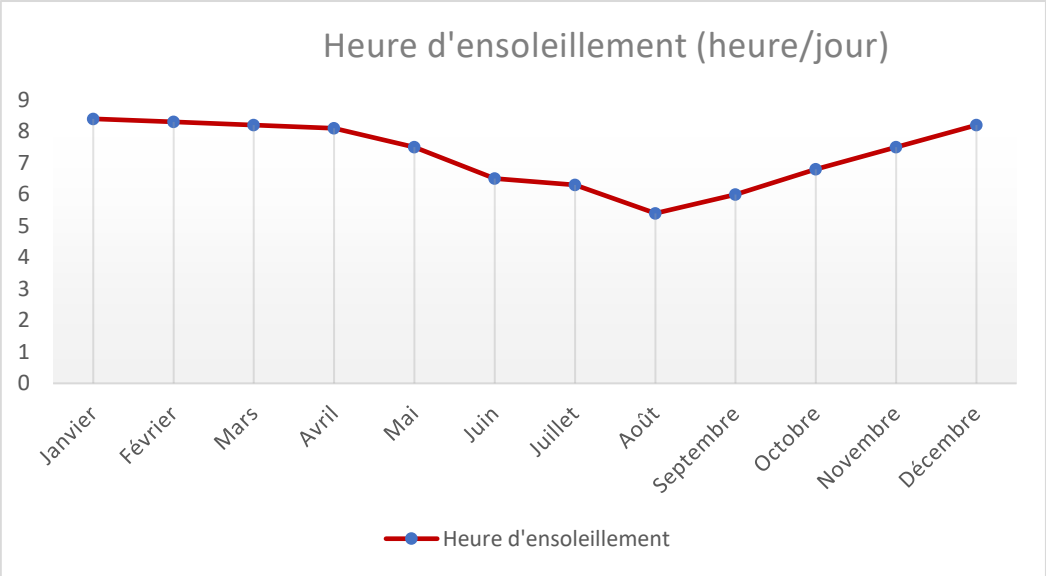


Figure 11 *: Heures d'ensoleillement à Grand-Popo.*

- En Janvier, il y a en moyenne 8,4 heures d'ensoleillement par jour et un total de 260,4 heures d'ensoleillement en Janvier.
- En Août, il y a en moyenne 5,39 heures d'ensoleillement par jour et un total de 167,4 heures d'ensoleillement.
- Environ 2650,2 heures d'ensoleillement sont comptées à Grand-Popo tout au long de l'année. Il y a en moyenne 220,85 heures d'ensoleillement par mois.

2.3. Végétation

En ce qui concerne la végétation, on y observe également trois types de végétations dominantes.

- Sur les sols sablonneux du littoral, se dresse une végétation de Cocos nucifera (cocotier).
- Au niveau du plateau, la végétation est constituée de savane arborée à Elæis guineensis (palmier à huile), Borasus aethiopium (rônier) en voie de disparition parce que utilisées pour la vannerie, Mitragyna inermis, Adansonia digitata (baobab), Ceiba pentandra (fromager), Milicia excelsa (Iroko).
- Enfin, les zones lagunaires et marécageuses sont le siège de la mangrove. Elles donnent naissance à une végétation dominée par une formation herbacée, des espèces lacustres plus ou moins denses telles que les palétuviers : Avicennia africana (palétuvier blanc) et Rhizophora racemosa (palétuvier rouge), les joncacées : Juncus effusus (jonc) et les graminées tel que Cynodon dactylon (Chiendent pied de poule).

2.4. Géomorphologique

La commune de Grand-Popo est bien localisée dans la zone côtière qui occupe une bonne partie du Sud-Bénin. Cette zone est faite d'une plaine côtière prolongée vers le Nord par une série de plateaux. Ce sont : les plateaux de Comè, d'Allada et de Sakété (Laibi, 2011).

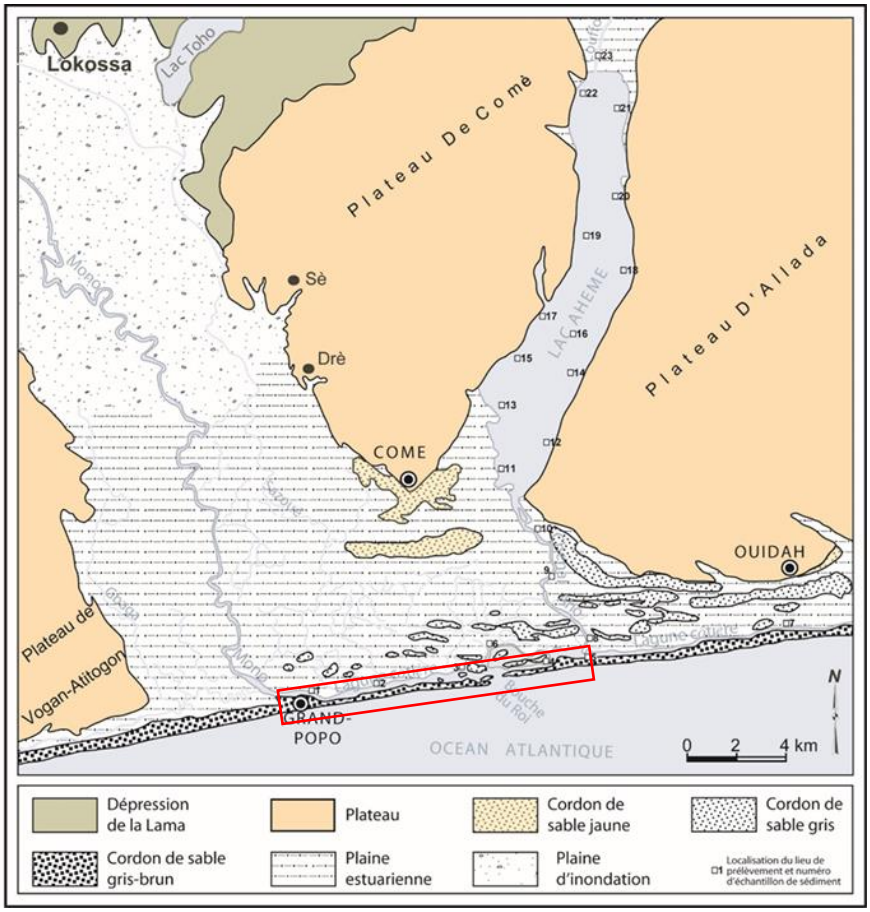


Figure 12 *: Carte géomorphologique de l'estuaire du Mono.*

Source : Laibi, 2011.

2.5. Pédologie

Du point de vue pédologique, quatre grands types de sols peuvent être distingués dans le secteur de l'embouchure « la Bouche du Roy » du fleuve Mono et des écosystèmes associés. Il s'agit des sols hydromorphes moyennement organiques humiques à gley, des sols hydromorphes peu humifère à glay de profondeur, des sols hydromorphes peu humifère à pseudo-glay et des sols peu évolués sur sables marins littoraux (cordons et plaines côtières).

Ces plateaux sont séparés les uns des autres par les vallées des principaux cours d'eau (Ouémé-Sô, Couffo, Mono et Sazué). La commune de Grand-Popo occupe une portion de la plaine côtière au Sud du plateau de Comé. Cette plaine est constituée d'une série de cordons littoraux formant entre la bordure des plateaux et la ligne de rivage, trois générations de cordons sableux disposés parallèlement à la côte et entrecoupées de dépressions marécageuses ou lagunaires. Il s'agit : du cordon interne de ''sable jaune'', du cordon médian de ''sable gris à blanc'', et du cordon externe de ''sable brun'' longeant la mer. La plaine côtière se prolonge en mer par l'estran et la plage sous-marine (Laibi, 2011).

De par sa situation dans la basse vallée du fleuve Mono, la zone d'étude présente une topographie relativement peu accidentée. Les altitudes sont très faibles et varient entre 0 et 20m. On relève toutefois par endroits des cotes situées en dessous du niveau marin. Les pentes sont très douces, voire parfois nulles. Seules les berges de quelques cours et plans d'eau présentent une dénivellation notable. Dans l'ensemble, les pentes varient entre 0 et 10°.

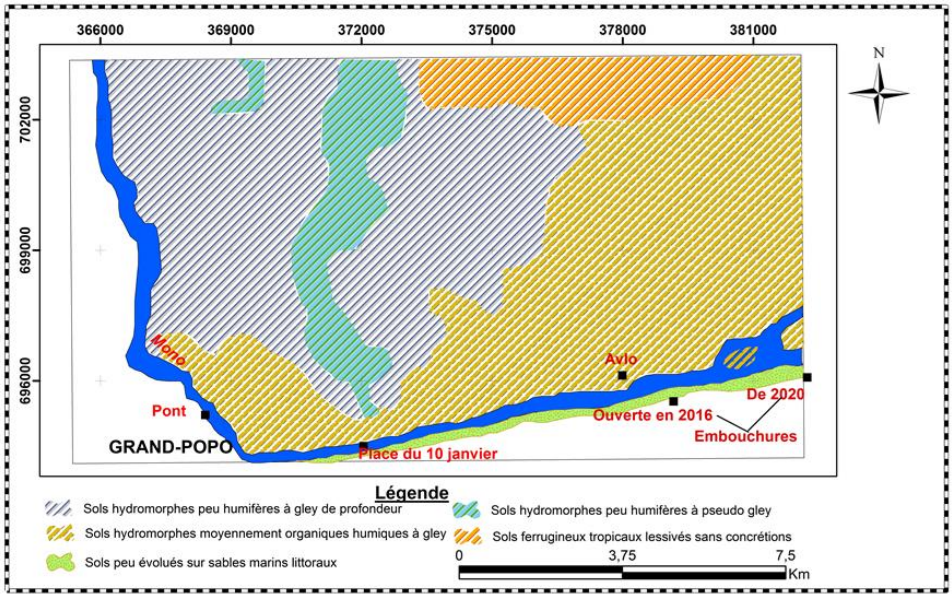


Figure 13 *: Carte pédologique locale de la commune de Grand-Popo.*

Source : Kaki et al., 2020.

2.6. Hydrologie sur la lagune de Grand-Popo

Durant l'étiage du Mono, avant la mise en service du barrage de Nangbéto, du fait qu'aucun apport d'eau douce substantiel n'arrive dans l'estuaire, les échanges hydrologiques s'effectuent quasi exclusivement avec les eaux marines et la salinité dans l'estuaire reste élevée (Oyédé, 1983 in PNUD, 1987). Après la réalisation du barrage de Nangbéto, sous l'effet de la permanence des écoulements du fleuve Mono et de l'importance de leurs débits, les équilibres

d'eau dans l'estuaire s'effectuent désormais avec un mélange eaux marines - eaux du Mono. Ainsi, le régime d'eau purement marine de l'estuaire en saison sèche avant le barrage fait place à un régime d'eaux saumâtres après le barrage (Oyédé, 1983 in ADELAC, 2019).

Par ailleurs, après la mise en eau du barrage de Nangbéto, l'installation d'un écoulement fluvial d'étiage permanent et non négligeable fait que le niveau d'eau dans le système est désormais plus élevé à l'étiage qu'auparavant (on passe de 0,09 m^3/s à 39 m^3/s) (ADELAC, 2019).

Ainsi, avant comme après le barrage de Nangbéto, le système lagunaire voit ses eaux s'écouler dans un sens ou dans l'autre en fonction des marées et des saisons hydrologiques des fleuves Mono et Couffo. La salinité des eaux de l'estuaire varie également en fonction des coefficients de marée et des saisons hydrologiques des fleuves Mono et Couffo (ADELAC, 2019).

La marée est de type semi-diurne avec des marnages de +1,95 m à – 0,20 m et une amplitude située généralement autour de 1m (marée de type micro-tidal). Les courants marins béninois sont ceux du golfe de Guinée caractérisés par deux principaux courants : le courant équatorial et le contre-courant équatorial.

CHAPITRE 3 :
MATERIEL ET METHODOLOGIE

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODOLOGIE

Dans ce chapitre, il est question de présenter le matériel et les méthodes utilisés aussi bien pour la caractérisation physique de l'eau de la lagune que pour la modélisation du transport de la salinité.

3.1. Matériel de terrain

La collecte des données sur le terrain a nécessité l'utilisation d'un matériel comprenant :

- une barque motorisée pour le déplacement sur la lagune ;
- un crayon et d'une gomme ;
- une fiche de mesure ;
- un GPS de marque GARMIN 72 Hz pour le repérage des points de mesure des paramètres physiques préalablement définis;
- un smartphone pour prendre les photos ;
- un multiparamètre de marque HANNA pour la mesure des paramètres physiques.

3.2. Méthodologie

L'étude du transport et de la dispersion de la salinité dans la lagune de Grand-Popo suivra une méthodologie répartie en plusieurs étapes.

3.2.1. Recherche documentaire

Avant toute activité, nous avons jugé utile de prendre connaissance des travaux déjà effectués sur la lagune de Grand-Popo, les phénomènes de transport et de dispersion ainsi que tout travaux ayant rapport avec le sujet de la présente étude. Ces recherches documentaires ont servi de base pour la mise en place de la démarche suivi pour atteindre les différents objectifs fixés. Plusieurs sites internet et plusieurs documents ont été consultés à cet effet.

3.2.2. La campagne de terrain

Il était question de faire une mesure in situ des paramètres que sont : le pH, la conductivité électrique, la température, la salinité, de l'oxygène dissous, le degré de saturation en oxygène dissous et les solides dissous totaux (TDS) à l'aide d'un multi paramètre.

Lors de la campagne, les mesures des paramètres physiques sont faites sur l'ensemble de la lagune suivant un pas de mesure d'environ 1 Km. Au total 17 points ont fait l'objet de mesure (Figure 14). Pour chaque point, deux mesures sont effectuées : une mesure en surface à 50 cm en dessous de la surface de l'eau et une autre au fond de la lagune. Les points, préalablement déterminés lors de la préparation de la campagne de terrain, sont identifiés à l'aide du GPS sur

le terrain. L'appareil utilisé pour la mesure est le multiparamètre « HI 9829 » de marque HANNA. Il est relié à un système de sonde constitué de deux capteurs : un capteur pour la mesure du pH et un autre pour la mesure des autres paramètres. Le système constitué par l'ensemble de ces éléments de mesure est montré par la photo 1 ci-dessous. Tous les capteurs ont été calibrés avant le démarrage de la campagne conformément aux protocoles du fabricant, adapté et mise à jour pour les bonnes pratiques du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA), propriétaire de ces appareils.



Photo 1 *: Multiparamètre HI 9829 de marque HANNA avec son dispositif de sondes.*

Les photos 2 à 5 de la planche 1 ci-dessous présente le matériel utilisé lors de la campagne de terrain.



Photo 2 *: GPS GARMIN 72H*



Photo 3 *: multiparamètre HI 9829 de marque HANNA*



Photo 4 *: Capteurs reliés au multiparamètre (le capteur du pH en jaune ; le capteur des autres paramètres en blanc-noir)*



Photo 5 *: Barque motorisée utilisée pour la campagne de terrain*

Planche 1 *: Matériel de terrain*

Source : Cliché Eustache, 2022

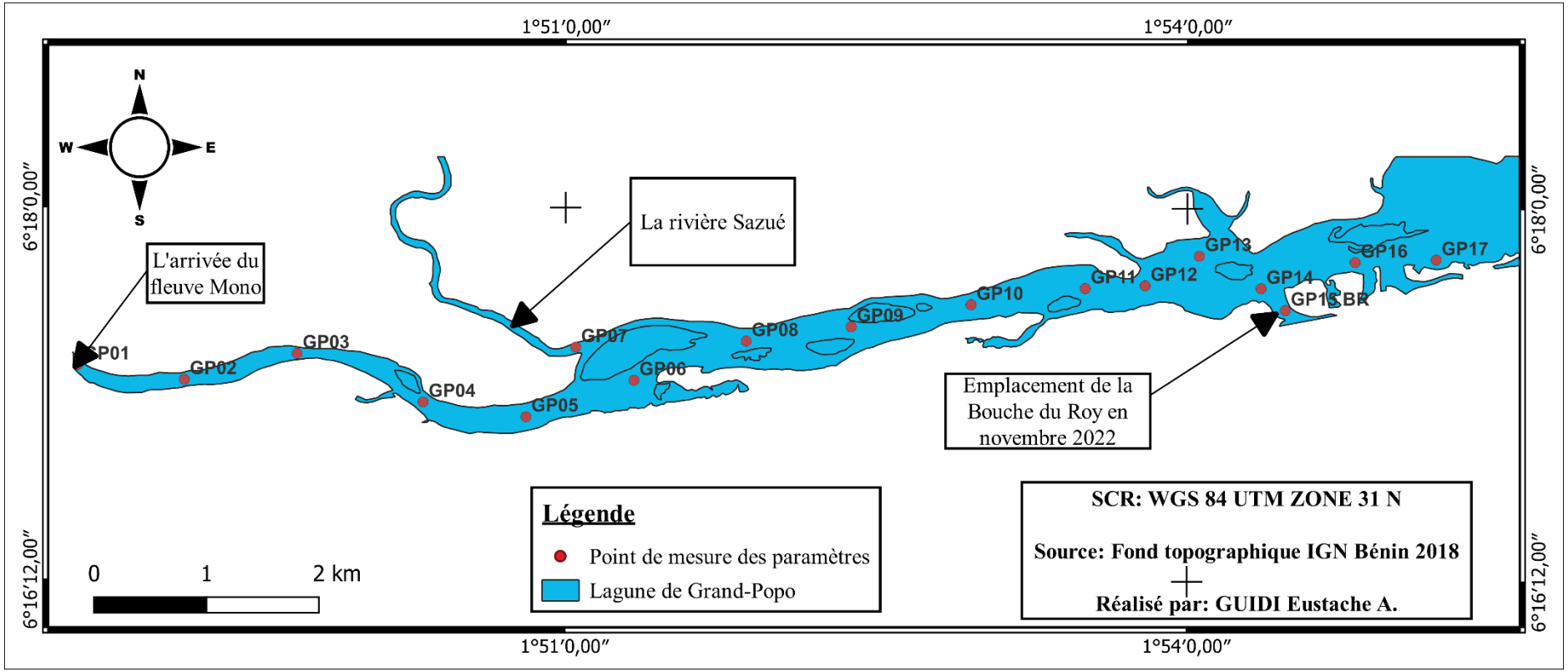


Figure 14 *: Localisation des points de mesure des paramètres physiques.*

3.2.3. Modélisation de la dispersion de la salinité

Dans le but de comprendre le mécanisme du transport-dispersion de la salinité sur la lagune, la modélisation du transport de la salinité est faite sur ladite lagune. Pour cela, le modèle numérique SMS (Surface-water Modeling System) à 2D adapté aux écosystèmes lagunaires peu profonds est utilisé.

3.2.3.1.Structure générale de sms

SMS (version 10) est un modèle numérique qui comprend, outre le module de calcul hydrodynamique, des modules préprocesseur pour le maillage et post-processeur pour l'analyse des résultats (figure 15).

Les modules utiles de ce logiciel sont : le module « ***GFGEN*** » qui est le module de maillage, qui permet d'introduire la géométrie et la bathymétrie du domaine d'étude et ensuite de créer et éditer le maillage du domaine, le module « ***RMA2*** » qui est le module de simulation de l'hydrodynamique à 2 dimensions et qui permet de résoudre les équations de l'écoulement, et le module « ***RMA4*** » qui est le module de simulation de la dispersion d'un polluant quelconque dans le milieu.

- **Le module *GFGEN***

Le module *GFGEN* (ou "*Geometry File GENeration*") a pour rôle de générer le maillage en éléments finis du domaine.

- **Le module RMA2**

Le module *RMA2* est un modèle hydrodynamique numérique bidimensionnel (sur le plan horizontal définit par O, x, y). *RMA2* résout numériquement les équations de bilans de masse et de quantité de mouvement intégrées sur la hauteur d'eau.

- **Le module RMA4**

Le module *RMA4* permet de calculer l'évolution spatio-temporelle des concentrations en polluants ou en sédiments en suspension. C'est aussi un modèle bidimensionnel, où les concentrations sont moyennées sur la hauteur d'eau.

Pour le calcul des valeurs numériques des concentrations en chaque nœud du maillage, le module *RMA4* utilise les résultats du modèle hydrodynamique (résultats de *RMA2*) car il utilise les vitesses calculées par ce dernier au niveau des nœuds et des éléments du maillage pour simuler la dispersion du polluant dans le milieu considéré.

SMS est un modèle numérique de qualité d'eau dont l'efficacité a été prouvée par plusieurs travaux de recherche. Zandagba et al. (2021) ont obtenu de résultats satisfaisants avec

ce modèle par la modélisation de la variation spatio-temporelle de la dispersion de la salinité sur le lac Nokoué. Le modèle a également été utilisé par Kaki et al. (2020) dans le cadre de de l'étude hydro-sédimentaire de la lagune de Grand-Popo nécessaire à l'élaboration d'un guide pratique de gestion de l'embouchure « la Bouche du Roy » du fleuve mono. En prenant en compte tous ces aspects et aussi de la facilité de manipulation du modèle, le modèle SMS apparait comme le modèle idéal pour la présente étude. Dans le cadre de la présente étude, les paramètres calés et validés par Kaki et al. (2020) sont utilisés pour les simulations.

La structure générale du logiciel SMS est schématisé sur la figure 15. Les modules nécessaires sont encadrés par des traits épais, les autres modules sont facultatifs.

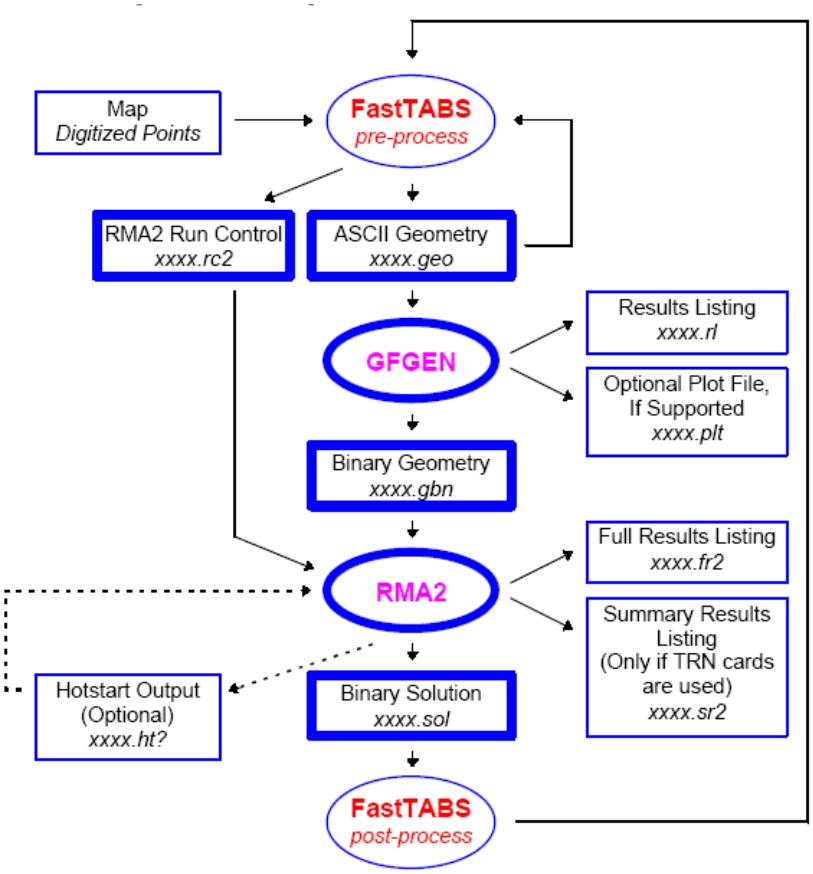


Figure 15 *: Schéma de fonctionnement du logiciel SMS*

Source *: SMS, 2003*

3.2.3.2.Processus de modélisation

Le processus de modélisation a consisté à l'étude du transport (dispersion) de la salinité sur la lagune. Trois étapes sont essentielles dans ce processus :

(1) la construction du modèle;

(2) la simulation du transport de la salinité ;

(3) l'analyse des résultats de simulations.

- ✓ **Construction du modèle**

Il s'agit ici (1) de faire le maillage du domaine d'étude à partir de la géométrie et la bathymétrie du milieu avec le module GFGEN du modèle SMS, (2) de définir les conditions aux limites du domaine (les frontières fermées, les lieux des échanges, les communications avec l'Océan, etc.).

Dans le cadre de la présente étude, Le maillage est effectué en utilisant une ancienne bathymétrie de la lagune dont la carte est illustrée par la figure 16 ci-dessous.

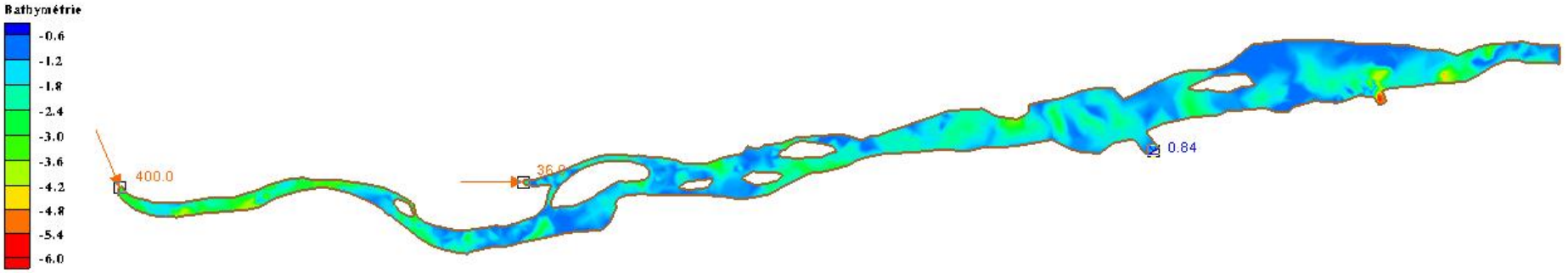


Figure 16 *: Bathymétrie de la lagune de Grand-Popo.*

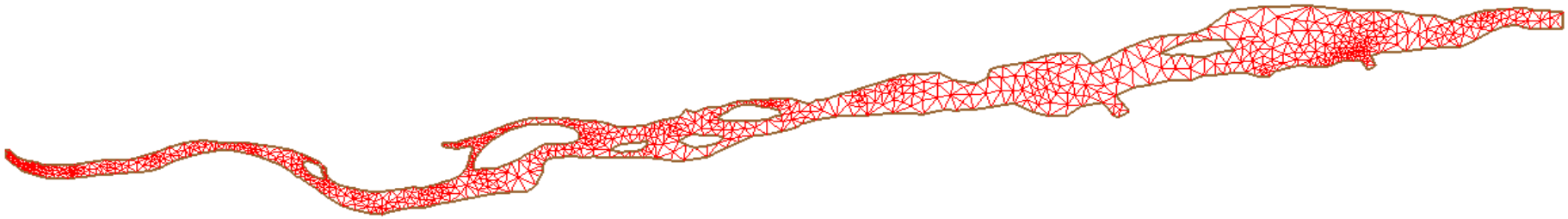


Figure 17 *: Maillage triangulaire de la lagune de Grand-Popo.*

Les conditions aux limites prises en compte pour la simulation du fonctionnement hydrodynamique sont les débits aux niveaux des entrées et sorties de la zone d'étude. Il s'agit des débits du fleuve Mono, des débits de la Sazué et des hauteurs de marée à l'embouchure au niveau de la communication avec l'Océan atlantique.

- ✓ **La simulation du transport de la salinité**

La dispersion de la salinité sera modélisée à l'aide du Resource Management Associates module 4 (RMA4) de SMS. Pour exécuter RMA4, les solutions hydrodynamiques (simulations de vitesse et de niveau d'eau) en période de crue et en période d'étiage obtenues sur la lagune par Kaki et al. (2020) sont utilisée comme donnée d'entrée pour déterminer l'évolution sur le terrain des concentrations de salinité respectivement en période de crue et en période d'étiage. Il intègre les propriétés d'advection et de diffusion de l'écoulement, ainsi que les processus de base se produisant dans la colonne d'eau résultant de l'interaction entre les courants et aux interfaces de surface et de fond ainsi que les principaux facteurs biochimiques en interaction (Panda et al., 2015).

L'équation de transport de polluant dans les eaux de surface est la suivante :

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu}{\partial x} + \frac{\partial hCv}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left[hD\frac{\partial C}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[hD\frac{\partial C}{\partial y}\right] - khC$$

où **h** : hauteur d'eau (m), **C**: concentration du polluant (mg/L), **t** : temps (s), **u**: vitesse suivant l'axe Ox (m/s), **v**: vitesse suivant l'axe Oy (m/s), et **D**: coefficients de la dispersion turbulente suivant Ox et Oy; **K**: coefficient de disparition (s^{-1}) (RMA4, 2011).

La dispersion de la salinité peut être traitée comme la dispersion d'un polluant quelconque dans la lagune. Cependant, notons quand même que le sel est un paramètre conservatif qui ne disparait donc pas lors de sa dispersion. Par conséquent, son coefficient de disparition est nul.

Le coefficient de dispersion (D) est le facteur de calibrage dans la simulation de salinité. Des scenarios ont été simulés avec différentes valeurs de D et optimisés avec la valeur $1.1 m^2/s$.

Les différentes simulations seront faites en prenant en compte les périodes hydrologiques (crue et étiage) et les périodes de marée (basse et haute).

Pour la simulation de la dispersion de la salinité sur la lagune, les conditions aux limites définies sont les suivantes :

❖ En période de crue :

Une salinité de 0 psu est apportée par le fleuve Mono et la Sazué contre une salinité de 31,5 psu au niveau de l'embouchure. La salinité initiale sur l'ensemble de la lagune est de 3 psu.

❖ En période d'étiage :

En étiage, une saliné de 0.05 psu est mesurée au niveau du contacte de la lagune avec le fleuve Mono contre 0.28 psu au niveau de la Sazué. La salinité à l'embouchure est de 31,5 psu et de 6,99 psu initialement sur la lagune.

Chacune des simulations de dispersion (en période de crue et en étiage) est réalisée sur une durée de 30 jours avec un pas de simulation d'une (1) heure.

3.2.4. Suivi de la variation de la salinité de la Bouche du Roy vers le Mono

Pour pouvoir bien apprécier la dispersion de la salinité sur la lagune, quatre points ont été identifiés, après simulation, de la Bouche du Roy jusqu'au point de contact de la lagune avec le fleuve Mono. Les concentrations en sel simulées en chacun de ces points et pour chaque période hydrologique (crue et étiage) ont été collectées sur toute la période de simulation et à l'aide du tableur Excel 2016 pour la réalisation des diagrammes utiles à la compréhension de la variation de la salinité de la Bouche du Roy au fleuve Mono en particulier et sur l'ensemble de la lagune en général.

3.2.5. Traitement des données

Le tableur Excel 2016 a permis de préparer des données à utiliser dans le logiciel QGIS 3.22 qui, à son tour, a permis de réaliser les différentes cartes. Quant au traiteur de texte Word, il a permis de rédiger le mémoire.

A l'aide du tableur Excel 2016, on a pu réaliser les différents graphes et procéder aux diverses analyses statistiques des données collectées sur le terrain et aussi des données ayant servi au suivi de la variation de la salinité.

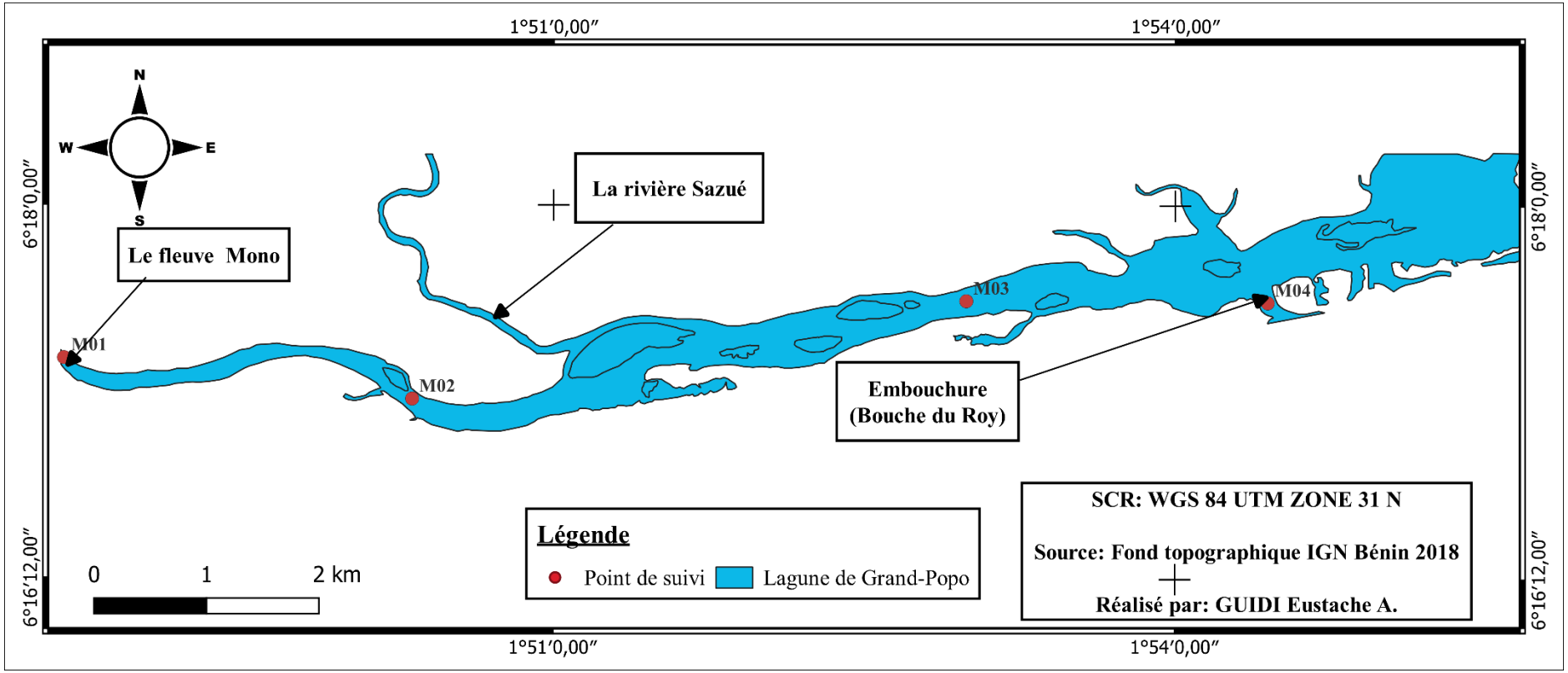


Figure 18 *: Localisation des points identifiés pour le suivi de la variation de salinité*

CHAPITRE 4 :
RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Résultats

Dans le cadre de la présente étude, un ensemble de données a été collecté pour la caractérisation physique des eaux et pour la compréhension du mécanisme de dispersion de la salinité sur la lagune de Grand-Popo. Le présent chapitre présente l'essentiel des résultats de collecte et de simulation.

4.1.1. Caractérisation physique de la lagune de Grand-Popo

Les résultats des mesures du potentiel d'hydrogène, de la température, de la conductivité, des solides totaux dissous, de la salinité, du taux d'oxygène dissous et du degré de saturation en oxygène dissous se présentent dans le Tableau (Annexe1).

❖ **Potentiel d'hydrogène (pH)**

La figure 19 montre la variation du pH des eaux sur l'ensemble de la lagune de Grand-Popo. L'analyse de cette figure révèle qu'en surface de la lagune, la valeur minimale du pH est 6,4 au point 6 et 8 contre une valeur maximale de 7,23 mesurée au point 13. La valeur moyenne du pH à la surface de la lagune est de 6,84.

Les valeurs minimale et maximale du pH, au fond de la lagune, sont respectivement de 6,14 au point 8 et de 7,1 au point 17 avec une moyenne de 6,57.

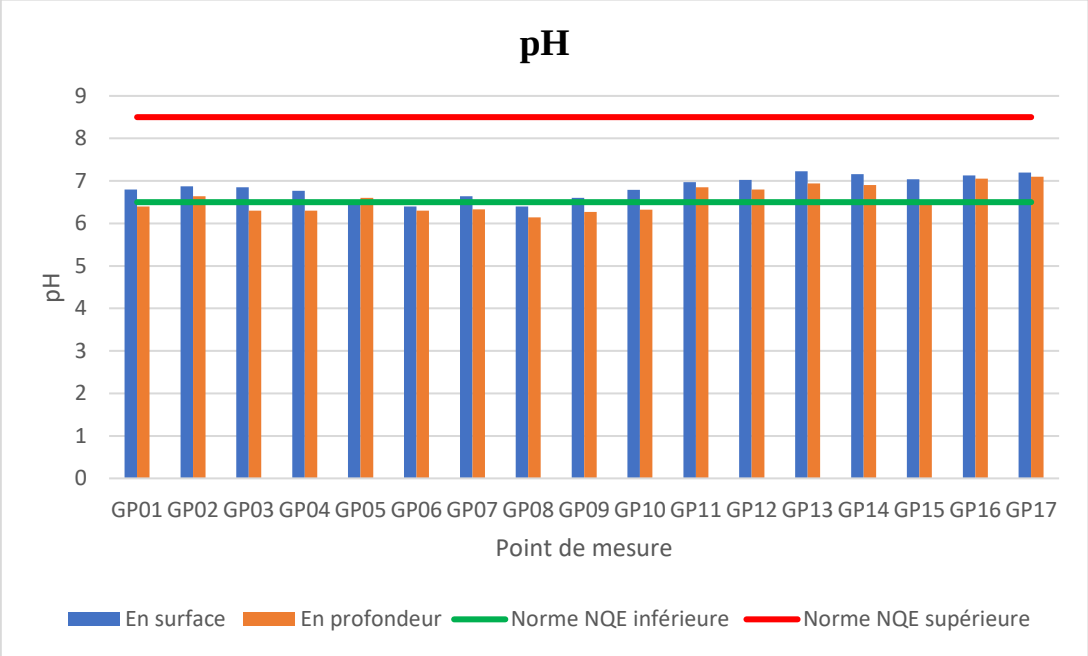


Figure 19 *: Variation du pH des eaux de la lagune de Grand-Popo.*

❖ Température

L'analyse des résultats de la variation de la température révèle qu'il n'y a pas une grande variation d'un point de mesure à un autre.

La température des eaux, en surface de la lagune, varie entre 28,70 et 31,04 °C avec une moyenne de 29, 94 °C. Au fond de la lagune, la température varie entre 28,56 et 30,81 °C avec une moyenne de 29,85 °C.

La figure 20 montre la variation de la température des eaux de la lagune de Grand-Popo.

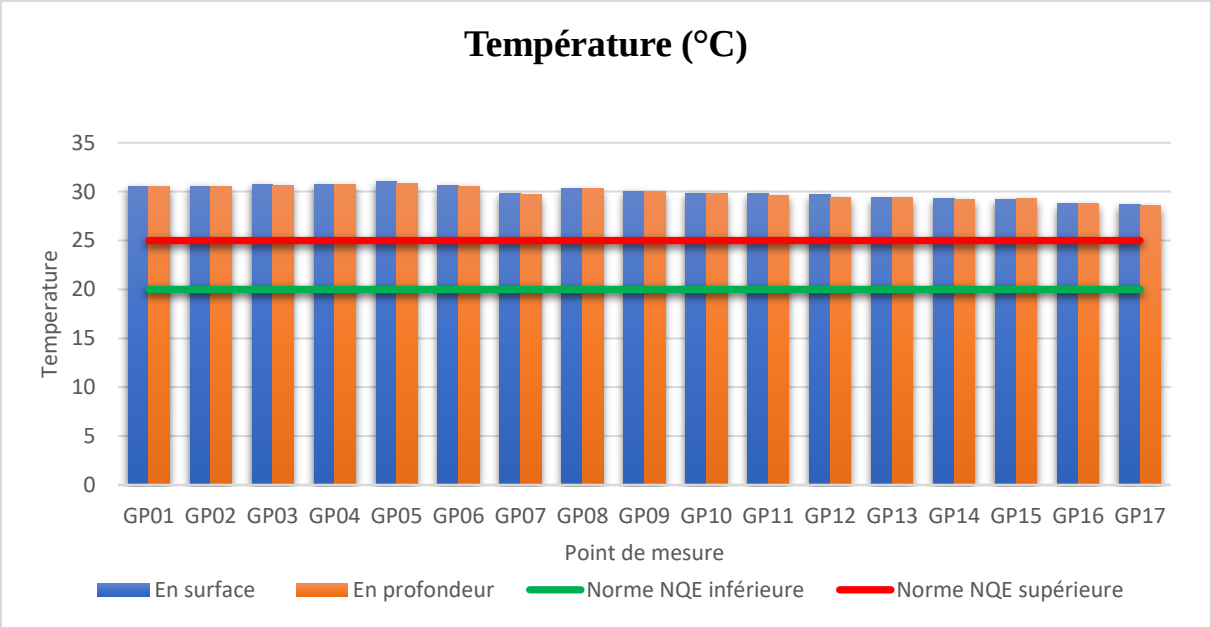


Figure 20 *: Variation de la température sur la lagune de Grand-Popo.*

❖ Conductivité électrique

La figure 21 ci-dessous illustre les différentes variations de la conductivité électrique des eaux de la lagune de Grand-Popo. La valeur moyenne de la conductivité électrique obtenue à la surface de la lagune est de 624,70 µS/cm. Les valeurs minimale et maximale de la conductivité électrique, en surface de la lagune, sont respectivement de 11,69 µS/cm au point 12 et de 6413 µS/cm au point 11.

En fond de la lagune, la conductivité électrique varie entre 12,11 µS/cm (point 12) et 6780 µS/cm (point 11) avec une valeur moyenne de 653,70 µS/cm.

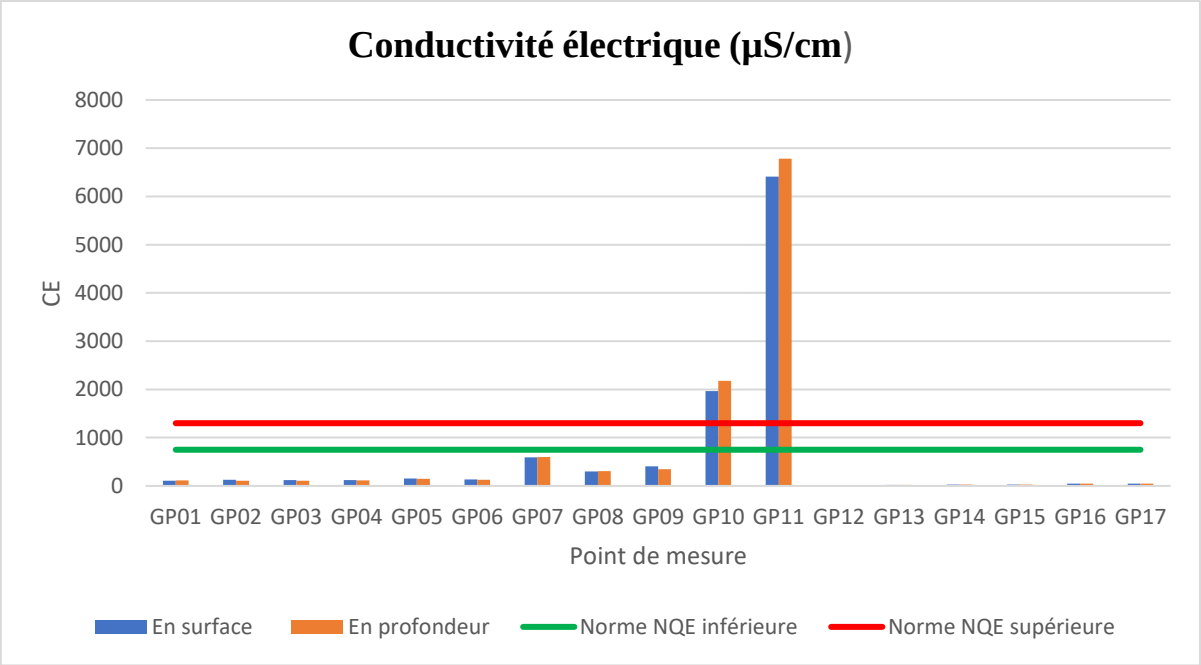


Figure 21 *: Variation de la conductivité électrique des eaux de la lagune de Grand-Popo.*

- **Solides dissous totaux (TDS)**

Les concentrations en TDS, en surface de la lagune, sont comprises entre 14,11 et 9532 ppm avec une moyenne de 1185,19 ppm.

Au fond de la lagune, la valeur moyenne de TDS est de 1309,33 ppm. La plus faible concentration en TDS est de 13,71 ppm au point 14 tandis que la plus forte est de 9945 ppm au point 13.

Ces différentes variations du TDS dans les eaux de la lagune de Grand-Popo sont illustrées par la figure 22 ci-dessous.

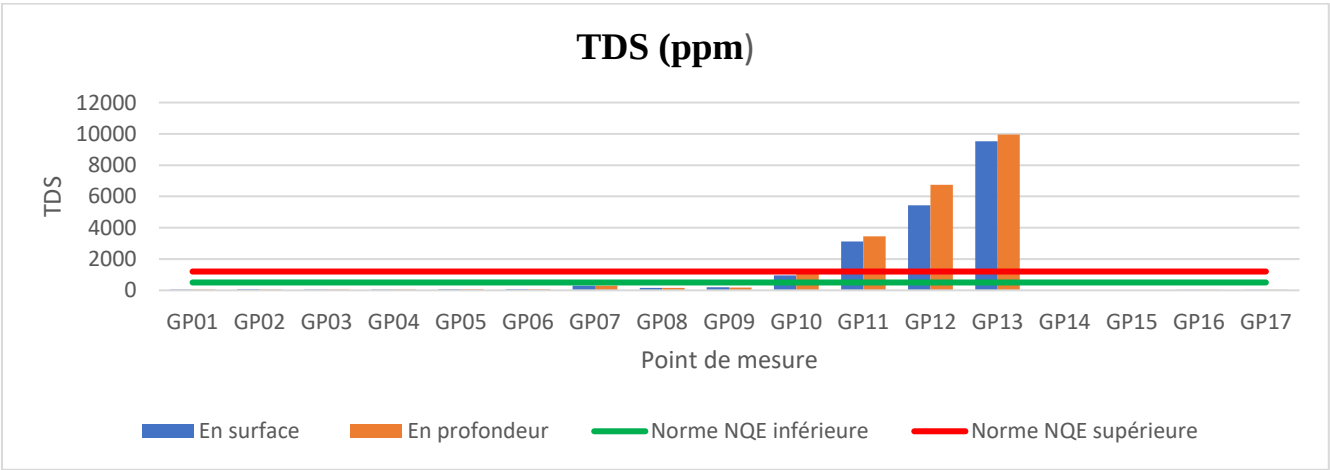


Figure 22 *: Variation du TDS dans les eaux de la lagune de Grand-Popo.*

❖ Salinité

La concentration en sel, en surface de la lagune, est comprise entre 0,05 et 31,24 psu avec une moyenne de 6,99 psu. La plus faible valeur est mesurée aux point 1 et 4 tandis que la plus forte est obtenue au point 16.

La moyenne de la salinité au fond de la lagune est de 7,22 psu. Au fond, la salinité varie entre 0,05 psu mesurée aux points 1, 2, 3, 4 et 31,5 psu au point 17. Ces variations de salinité des eaux sont montrées par la figure 23 ci-dessous.

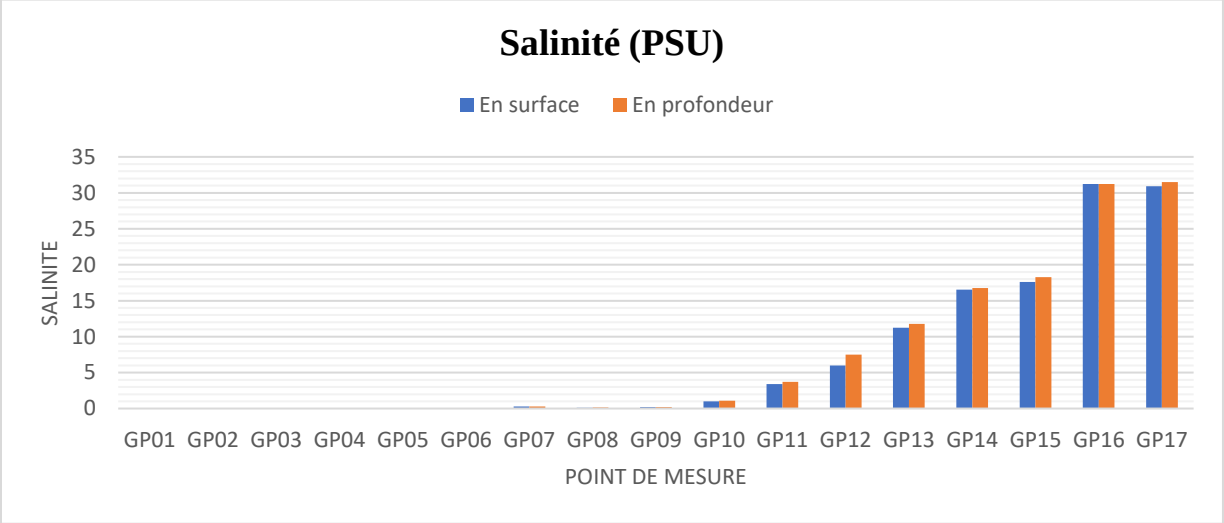


Figure 23 *: Variation de la salinité des eaux de la lagune de Grand-Popo.*

❖ Oxygène Dissous (OD)

La figure 24 présente la variation du taux d'oxygène dissous dans les eaux de la lagune de Grand-Popo. L'analyse de cette figure révèle que le taux d'oxygène dissous dans la partie superficielle de la lagune de Grand-Popo est comprise entre 1,5 et 3,60 mg/L avec une moyenne de 3,27 mg/L. La valeur minimale est mesurée au point 7 alors que la valeur maximale est obtenue au point 6.

Au fond de la lagune, le taux d'oxygène dissous varie entre 1,5 mg/L (point 7) et 3,71 mg/L (point 3) avec un taux moyen de 3,28 mg/L.

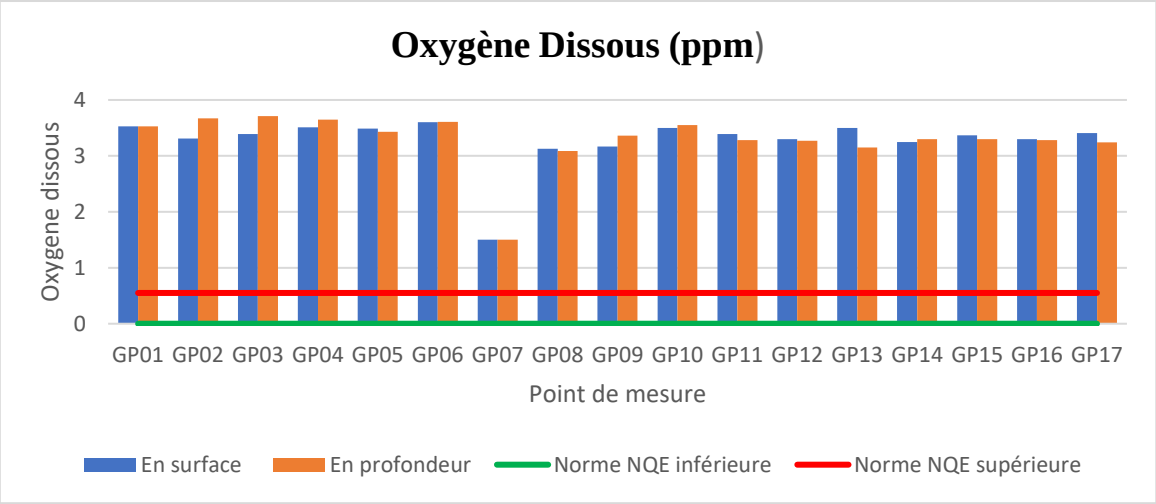


Figure 24 *: Variation du taux d'oxygène dissous dans les eaux de la lagune de Grand-Popo.*

❖ **Degré de saturation en oxygène dissous**

La figure 25 ci-dessous présente la variation en degré d'oxygène dissous dans les eaux de la lagune de Grand-Popo. L'analyse de cette figure révèle que le degré de saturation en oxygène dissous, en surface, dans la lagune est compris entre 19,6 (point 7) et 52,2 (point 17) avec une moyenne de 44,92.

Au fond de la lagune, le degré de saturation est de 45,38 en moyenne avec une variation comprise entre 19,9 et 50,5. La plus faible valeur est obtenue au point 7 tandis que la plus forte est obtenue au point 16.

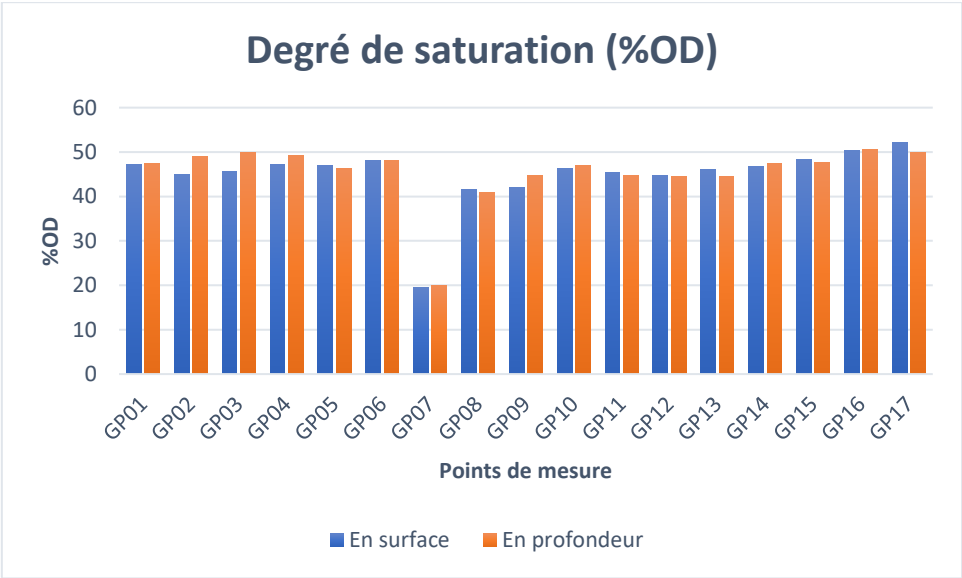


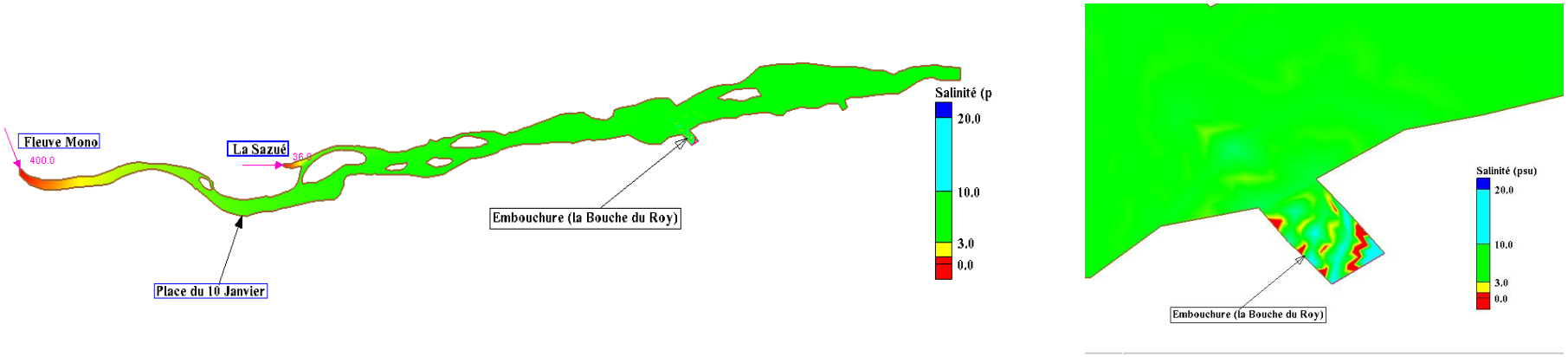
Figure 25 *: Variation du degré de saturation en oxygène dans les eaux de la lagune de Grand-Popo.*

4.1.2. La dispersion de la salinité sur la lagune de Grand-Popo

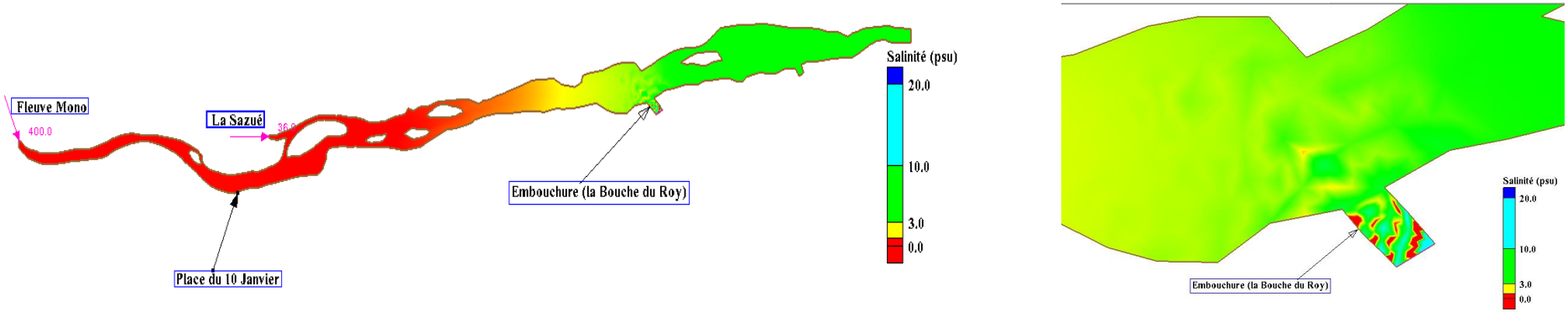
❖ **Période de crue**

En période de crue, l'eau douce provenant du fleuve Mono et de la Sazué et qui s'étend en direction de l'embouchure entraine une diminution progressive, rapide et importante de la salinité de l'eau de la lagune. A partir de la sixième heure (Figure b), on observe que la presque totalité de la partie amont de la lagune jusqu'à environ 320 m de l'embouchure, présente une salinité autour de 0 psu. Du troisième jour (précisément à la cinquième heure) (Figure c) à la fin de la simulation la totalité de la lagune est rempli d'eau douce avec des teneurs en sel qui varie entre 0 et 3 psu. Après 8 jours de simulations sur les 30 et précisément à partir de la quinzième heure, la variation de la salinité devient faible et ceci même au niveau de l'embouchure comparativement au début de la simulation. En fin de simulation (Figure d), la teneur en salinité reste importante au niveau de l'embouchure (entre 10 et 20 psu par endroit).

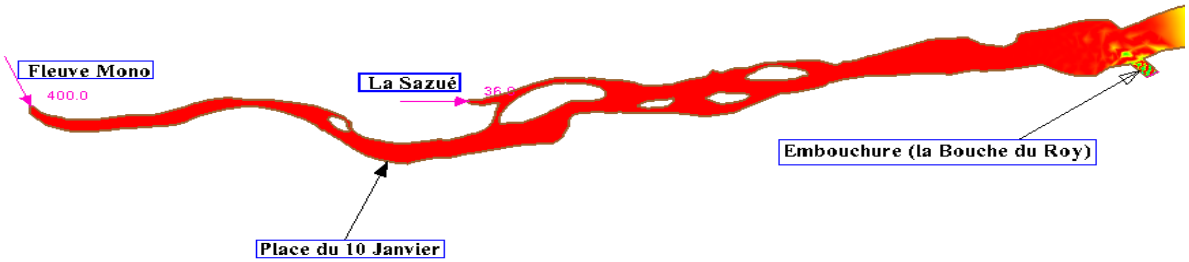
La planche 2 ci-dessous présente la dispersion de la salinité en période de crue sur la lagune de Grand-Popo.

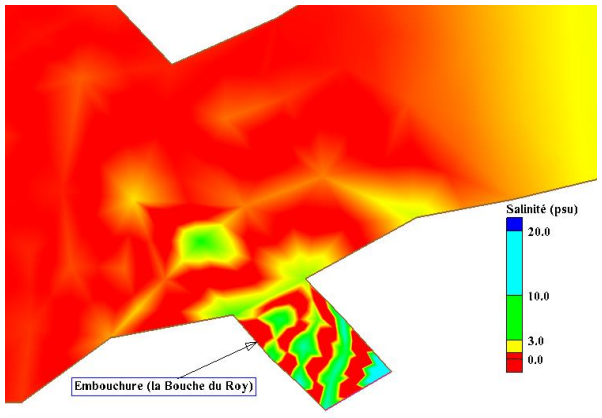


a : Jour 0 heure 0

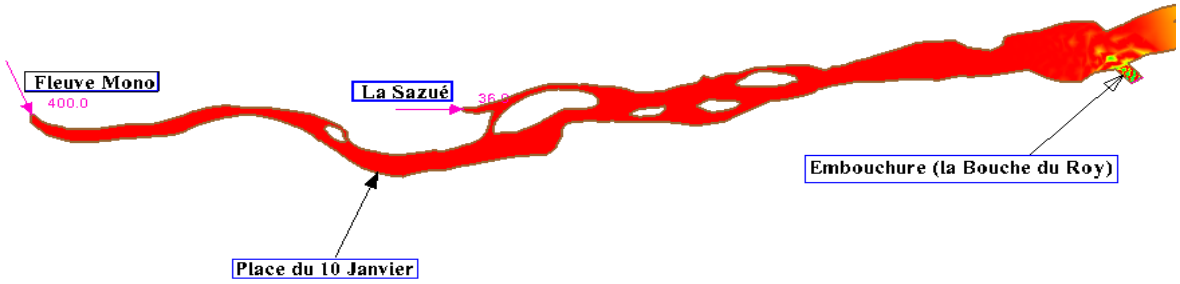


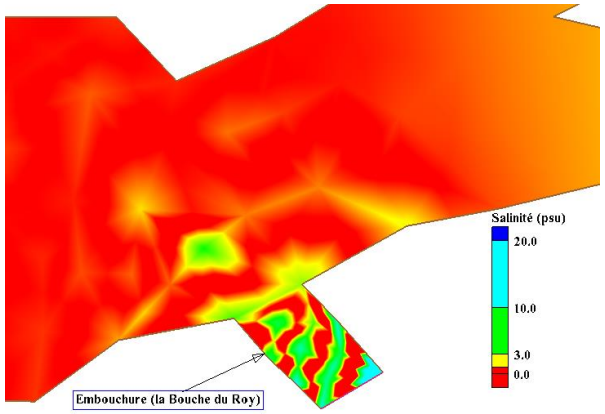
b : Jour 0 heure 6



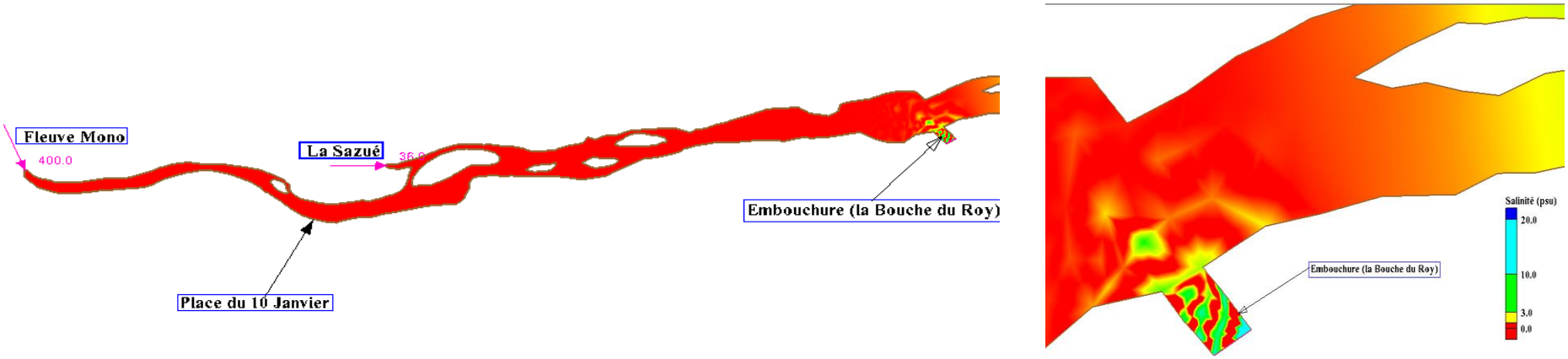


c : Jour 3 heure 5





d : Jour 8 Heure 15



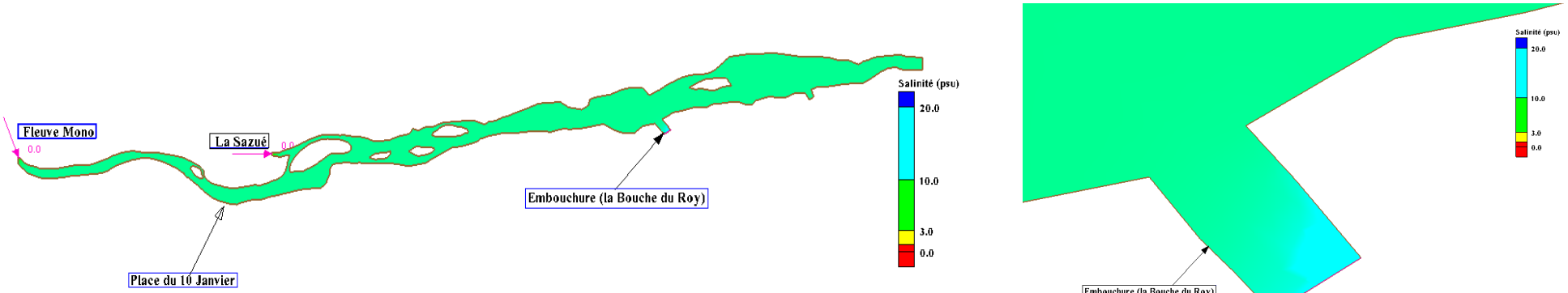
e : Jour 30 heure 23

Planche 2*: Dispersion de la salinité en période de crue.*

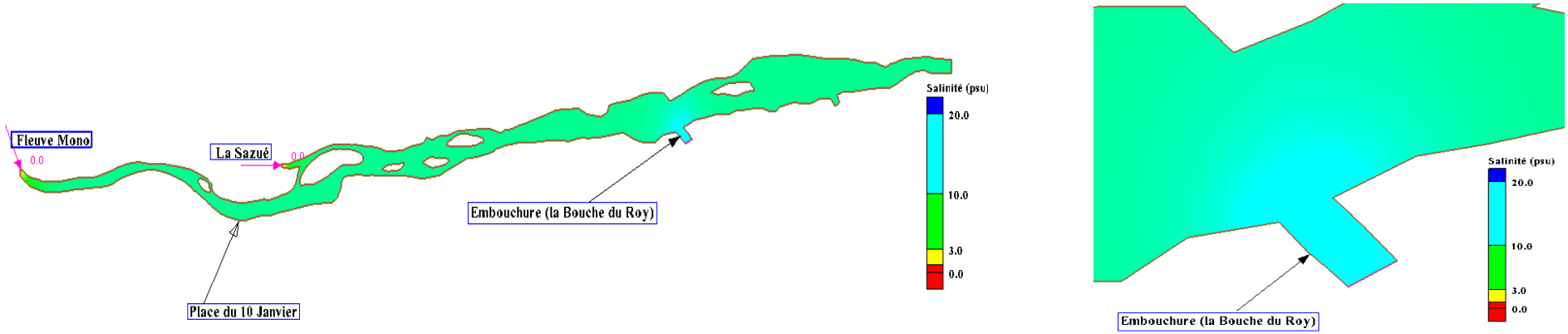
- **Période d'étiage**

Durant la période d'étiage, on observe une salinisation progressive mais importante sur l'ensemble de la lagune. Au début de la simulation (Figure A), on note déjà une importante salinité allant à 31 psu à l'extrémité de la Bouche du Roy tandis que sur le reste de la lagune la salinité est uniforme et comprise entre 3 et 10 psu. Après 24 heures de simulation (jour 1 heure 0) (Figure B), on commence par observer une augmentation progressive de la salinité de l'embouchure vers le reste de la lagune. Au cinquième jour de simulation à 20 heures (Figure C), le transport de la salinité s'est fait jusqu'à 1,1 Km environ en amont de l'embouchure et à 1,2 Km environ vers l'aval (entre 10 et 20 psu). De même au dixième jour de simulation et précisément à la vingtième heure (Figure D), le transport et dispersion de la salinité s'est fait jusqu'à 1,3 Km environ en amont de l'embouchure et à 1,4 Km environ en aval de l'embouchure. Au même moment et à la même heure, on observe une légère augmentation de la salinité dans les environs de la place du 10 janvier tandis qu'au niveau des entrées (les extrémités en contact avec le fleuve Mono et la Sazué), l'influence de la salinité se fait moins ressentir avec des valeurs supérieures à 5 psu alors qu'elles étaient autour de 3 psu en début de simulation. A la fin de simulation au trentième jour à 23 heures (Figure E), d'importantes teneur en sel sont observées à environ 3,4 Km en aval et à 3 Km en l'amont de l'embouchure. Ces teneurs peuvent atteindre 20 psu alors qu'elles étaient proche de 3psu en début de simulation. En ce moment, la salinité au niveau de la place du 10 janvier est devenue plus considérable tendant vers 10 psu.

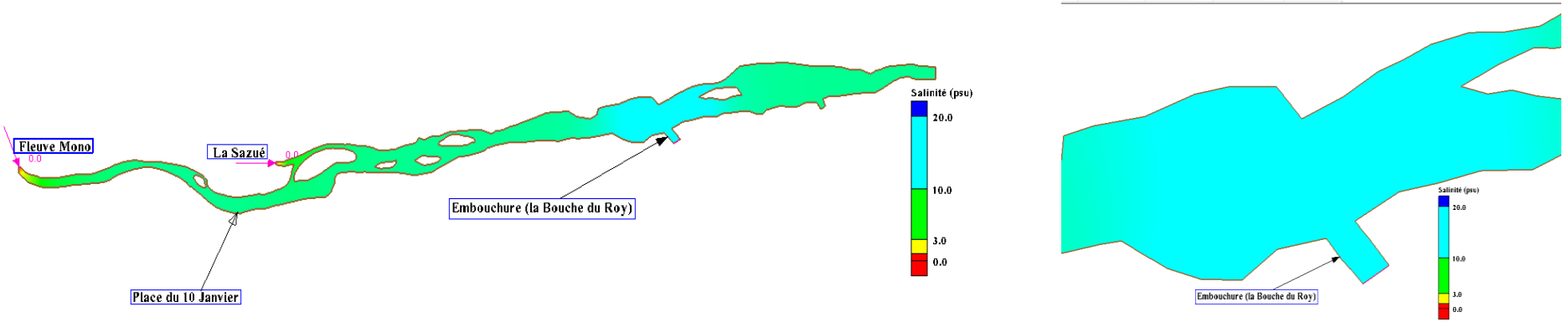
La planche 3 ci-dessous illustre la dispersion de la salinité en période d'étiage.



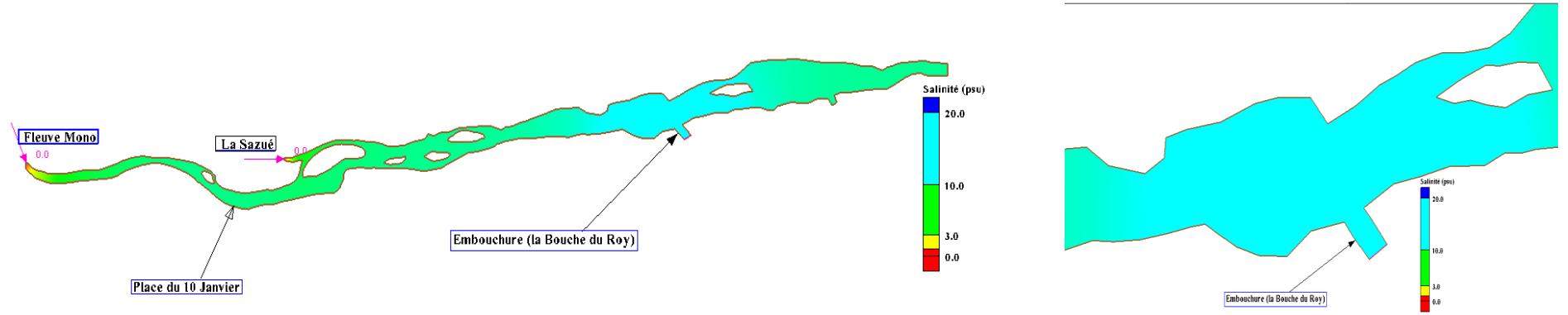
A : Jour 0 heure 0



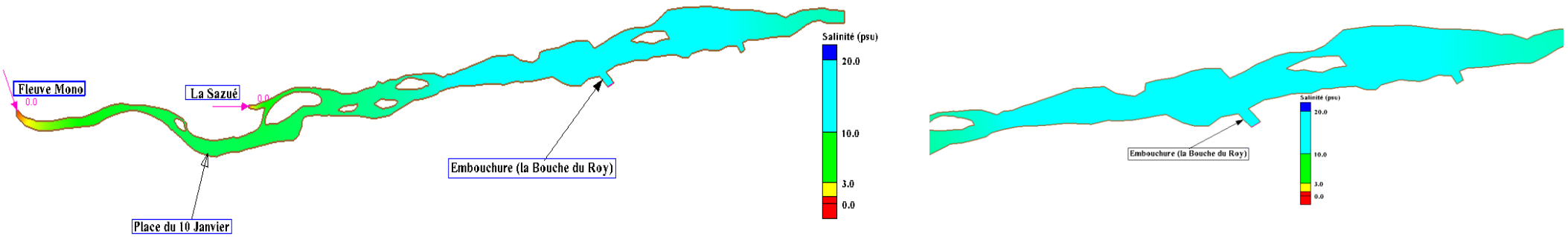
B : Jour 1 heure 0



C : Jour 5 heure 20



D : Jour 10 heure 20



E : Jour 30 heure 23

Planche 3 *: Dispersion de la salinité en période d'étiage*

4.1.3. La variation de la salinité de la Bouche du Roy vers le Mono

Les figures 26 et 27 présentent la variation de la salinité, de l'embouchure vers le fleuve Mono respectivement en période de crue et d'étiage sur la lagune de Grand-Popo.

L'analyse de la figure 26 révèle qu'en période de crue, la salinité est relativement nulle au niveau des points 2 et 3 après quelques heures de simulation et quasi nulle au point 1 sur toute la période de simulation. Pour ce qui est du point 4 situé au niveau de l'embouchure, la salinité est supérieure à 0 psu sur toute la période de simulation. Au début de la simulation, la salinité au point 4 est de l'ordre de 4,9 psu avant de revenir à 2,1 psu après 14 heures de simulation et devient constant pour le reste de la période de simulation.

Quant à la figure 27, elle révèle qu'en période d'étiage, la salinité au point 1 est la plus faible et envoisine 0 psu sur toute la période simulation. La salinité aux points 2 et 3 est restée, de façon générale, dans l'intervalle de 5 à 10 psu sur les 30 jours de simulation. La salinité au point 2 diminue avec le temps et celle au point 3 augmente avec le temps. Au point 4, une variation assez importante de salinité est observée. En début de simulation, la salinité est de 7,9 psu. Avec le temps, ce taux de salinité (au point 4) augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale de 24,9 psu en fin de simulation.

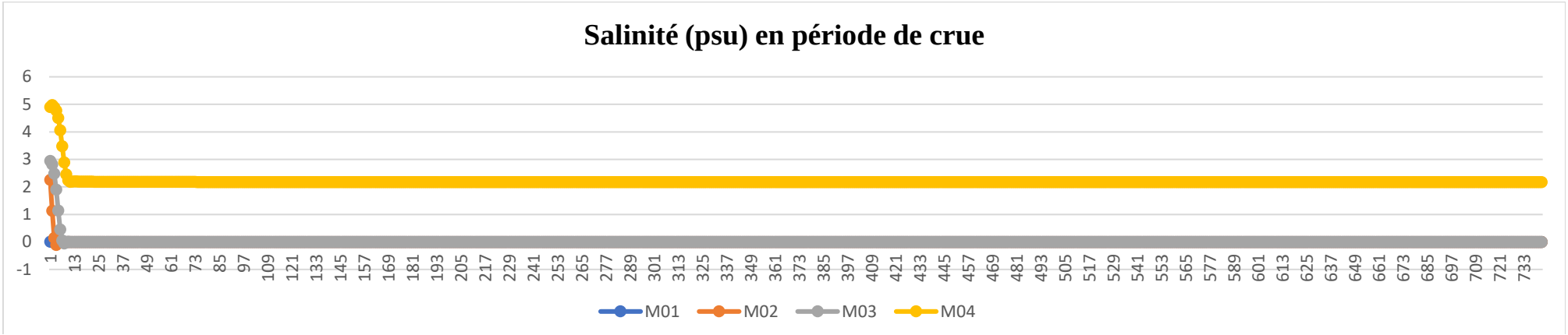


Figure 26 *: Variation de la salinité en période de crue*

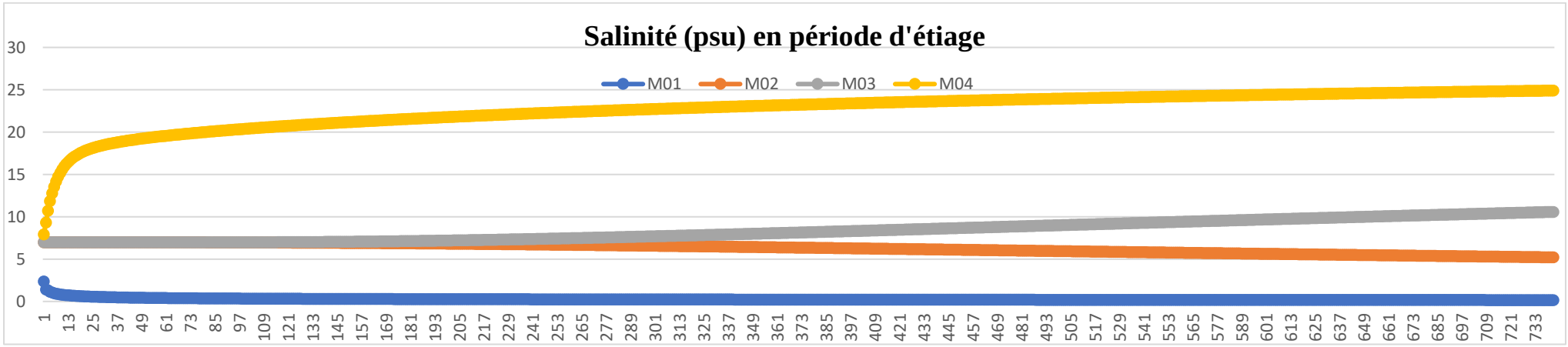


Figure 27 *: Variation de la salinité en période d'étiage*

4.2. Discussion

4.2.1. Caractérisation physique de la lagune de Grand-Popo

Les valeurs des paramètres physiques collectées au cours de nos travaux ont permis d'apprécier de façon sommaire la qualité des eaux de la lagune de Grand-Popo.

En effet, les valeurs de pH enregistrées à la surface de la lagune varient entre 6,4 et 7,23 puis entre 6,14 et 7,1 au fond de la lagune. Ces valeurs appartiennent, pour la majorité, à la plage de pH (6,5-8,5) indiquée par la Norme de Qualité des eaux (NQE) et montrent également que les eaux de la lagune de Grand-Popo sont relativement de nature neutre. Sur toute la lagune, les valeurs de pH sont plus élevées en surface qu'au fond. La nature géologique du fond et la nature des éléments constitutifs du fond seraient à l'origine de cette baisse du pH au fond de la lagune. Ces résultats de mesure de pH se rapprochent des résultats (6,96 à 7,8) de Kambiré et al. (2014) sur la lagune ABY en Côte d'Ivoire et également de ceux de Mama et al. (2010) et de Zandagba et al. (2016) sur le lac Nokoué. Ainsi, les valeurs de pH obtenues sur la lagune de Grand-Popo sont dans l'intervalle de tolérance. Ces valeurs de pH sont, pour la majorité, en-dessous de celles (7,2 à 7,53) obtenues par Chouti et al. (2017) sur la lagune côtière du Bénin et aussi à celles obtenues par Maham Ould Sidi et al. (2018) puis Issola et al. (2008) respectivement sur le lac d'Aleg en Mauritanie et sur la lagune de Fresco en Côte d'Ivoire. D'un autre côté, les travaux de Dimon et al. (2014) et de Odjohou et al. (2020) ont révélé des valeurs de pH au-dessus des présentes valeurs respectivement sur le lac Ahémé et sur le lac Labion en côte d'Ivoire. Abboudi et al. (2014), sur le bassin versant de Guigou au Maroc, ont, par ailleurs, révélé que l'eau de ce système a un caractère basique (pH compris entre 7,73 et 8,89) ; ce qui est contraire à nos résultats.

Quant aux valeurs de température mesurées, on observe une variation entre 28,7 et 31,04 °C en surface contre une variation de 28,56 à 30,81 °C au fond de la lagune. Les moyennes de température en surface (29,94 °C) et au fond (29,85 °C) de la lagune montrent une faible différence de température entre les deux compartiments de la lagune. Une variation de température d'un point de mesure à un autre est également fonction de la période, du temps ou encore de l'heure à laquelle les mesures ont été effectuées. Par ailleurs, ces résultats concordent avec ceux de Chouti et al. (2011, 2017) sur la lagune de Porto-Novo (entre 28,3 et 29,3 °C) et sur celle côtière du Bénin (entre 29,8 et 31,7 °C) et aussi avec ceux de Dimon et al. (2014) sur le lac Ahémé (entre 28,8 et 30 °C). Aussi, ces valeurs de température se situent dans la plage (24 à 35 °C) de températures favorables à la croissance des espèces aquatiques selon Dèdjiho (2011) et Pouomogne (1998) et caractéristiques de celles des eaux des lagunes tropicales qui

oscillent entre 25°C et 30°C en moyenne (Isabelle, 1999 ; Abulude et al., 2006 ; Bawa et al., 2007). Conformément à ce qui a été observé par Odjohou et al. (2020) sur le lac Labion, la température des eaux de la lagune de Grand-Popo présente une faible variation d'un point de mesure à un autre. Par ailleurs, ces valeurs de température des eaux de la lagune de Grand-Popo sont largement au-dessus des observations effectuées par Abboudi et al. (2014) et Maham Ould Sidi et al. (2018) respectivement sur le bassin versant de Guigou au Maroc et sur le lac d'Aleg en Mauritanie. On remarque également que les valeurs de température mesurées sont légèrement supérieures à celles prévues par la norme NQE (25-30) pour une eau de surface.

En ce qui concerne la conductivité électrique, les mesures en surface de la lagune oscillent entre 11,69 et 6413 µS/cm puis entre 12,11 et 6780 µS/cm au fond de la lagune ; ce qui atteste d'une minéralisation moyenne de 624,70 µS/cm en surface et de 653,70 µS/cm au fond de la lagune. Tout comme sur le lac Labion (Odjohou et al., 2020), les valeurs de conductivité présentent une inégale répartition le long de la lagune de Grand-Popo. Ces valeurs de conductivité sont hors de la plage (750-1300) prévue par la norme NQE pour les eaux de surface. Aussi, ces mesures de conductivité ne concordent pas avec celles effectuées par Chouti et al. (2011, 2017) sur la lagune de Porto-Novo (70,5 à 85 µS/cm) et sur la lagune côtière du Bénin (7830-15490 µS/cm). Par contre, elles se rapprochent des valeurs obtenues par Kaki et al. (2020) sur la lagune de Grand-Popo. Ces différences de valeurs sont liées à la durée et à la période sur lesquelles les différentes études ont été menées. Notons que les fortes valeurs de minéralisation des eaux ont été obtenues au niveau des points 10 et 11 situés dans les environs de Allongo. A défaut d'une mauvaise manipulation du multiparamètre lors des mesures, la hausse de la minéralisation des eaux en ces deux points serait causée par une rétention des minéraux par des espèces végétales qui y sont présentes. Kambiré et al. (2014), sur la lagune de ABY en Côte d'Ivoire, ont obtenus des résultats de conductivité (705,2 à 2440,7 µS/cm) plus ou moins conformes aux présents résultats. Les travaux de Merhabi et al. (2019), de Dimon et al. (2014), de Abboudi et al. (2014) et ceux de Maham Ould Sidi et al. (2018) respectivement sur la rivière Kadicha au Liban, le lac Ahémé, sur le bassin versant de Guigou au Maroc et sur le lac d'Aleg en Mauritanie, ont révélé des valeurs de conductivité comprises dans la plage des mesures effectuées sur la lagune de Grand-Popo.

Les valeurs de TDS enregistrées sur la lagune de Grand-Popo sont comprises entre 14,11 et 9532 ppm en surface puis entre 1309,33 et 9945 ppm au fond de la lagune. Seules les valeurs de TDS (960 ppm en surface contre 1045 ppm au fond) au point GP10 se trouvent dans la plage (500-1200) prescrite par la norme NQE pour une eau de surface. Les valeurs de TDS obtenues

ne sont pas en concordance avec les résultats obtenus par Kaki et al. (2020) sur la lagune de Grand-Popo qui révèlent des valeurs de TDS comprises entre 3,50 et 640 ppm. Chouti et al. (2017) ont également obtenu des valeurs de TDS (7040-15630 ppm) supérieures aux présents résultats. Par ailleurs, le TDS dans les eaux de la lagune de Porto-Novo (Chouti et al., 2011) est inférieur à la majorité des mesures effectuées sur la lagune de Grand-Popo. On note également une similarité entre les résultats obtenus par Merhabi et al. (2019) et Dimon et al. (2014) et les observations effectuées sur la lagune de Grand-Popo. Maham Ould Sidi et al. (2018) ont observé une variation du TDS comprise entre 169 et 351 ppm ; ce qui se situe dans la plage des valeurs obtenues lors de la présente étude. Les valeurs de TDS connaissent une augmentation extrêmement importante dans les environs de Allongo jusqu'à Ohlihoué (du point 10 au point 13). La dissolution des rejets (assez importants) dans cette section de la lagune expliquerait ce constat.

La variation de la salinité est caractérisée par une augmentation progressive de celle-ci du fleuve Mono en direction de la Bouche du Roy et ceci à cause du contact permanent de la Bouche du Roy avec l'océan Atlantique. La valeur maximale (31,5 psu) est obtenue au fond de la lagune en aval de l'embouchure au point 17 contre une valeur maximale de 31,24 psu en surface de la lagune au point 16. Sur toute la lagune, la salinité varie entre 0,05 et 31,24 psu en surface de la lagune puis entre 0,05 et 31,5 psu au fond. La salinité mesurée au niveau de l'embouchure est de 17,6 psu en surface et de 18,27 psu au fond de la lagune, inférieur aux mesures effectuées aux point 16 et 17. Cette situation est due au fait que les mesures ont été effectuées en basse marée au niveau de l'embouchure. En effet, en basse marée, l'écoulement des eaux de la lagune vers l'océan entraine un retrait et une dilution conséquente des eaux salées par les eaux douces du fleuve Mono et de la rivière Sazué. Les taux élevés de la salinité aux point 16 et 17 sont liés au fait les eaux salées envoyées en ces points lors de la haute marée ne se sont pas encore retirées en basse marée au moment de la prise des mesures. Les fortes valeurs de salinité (supérieur à 10) observée en cette période indiquent que la lagune de Grand Popo se comporte comme tous les écosystèmes lacustres tropicaux caractérisés par la dessalure en saison de crue (due à l'apport des rivières et fleuves) et une forte salinité pendant la période d'étiage (Zandagba, 2017). Les mesures de salinité obtenues sur la lagune contredisent les résultats des travaux de Chouti et al. (2011, 2017) sur la lagune de Porto-Novo (0 psu sur toute la lagune) et sur celle côtière (une moyenne de 3,9 psu). Une différence entre les périodes d'étude peut expliquer cette différence des résultats. Les études de Issola et al. (2008), sur la lagune Fresco en Côte d'Ivoire, ont révélé une variation de la salinité moyenne comprise entre 12,48 et 18, 05

psu tandis que les valeurs moyennes obtenues sur la lagune de Grand-Popo sont de 6,99 psu en surface contre 7,22 au fond. Les valeurs élevées de la salinité des eaux de cette lagune, dues à son contact avec l'océan Atlantique, favorisent le ralentissement du phénomène de l'eutrophisation (Dimon et al.,2014) malgré les diverses activités menées autour et sur la lagune.

L'oxygène dissous intervient dans la respiration des organismes aquatiques, l'oxydation et la dégradation des polluants, l'activité photosynthétique de la flore et les échanges avec l'atmosphère. Les taux d'oxygène mesurés sur la lagune de Grand-Popo varient entre 1,5 et 3,6 mg/L en surface puis entre 1,5 et 3,71 mg/L au fond de la lagune. Toutes ces valeurs sont inférieures à la recommandation de la norme NQE (>6 mg/L) et ceci témoigne d'une forte teneur en matière organique car les bactéries aérobies, pour dégrader la matière organique, se nourrissent de l'oxygène du milieu (Dimon et al., 2014). Les faibles teneurs en Oxygène dissous enregistrées peuvent être attribuées au manque d'écoulements continus de l'eau, aux rejets d'eaux usées des riverains en aval ou en ces points ou à la décomposition des macrophytes dans la lagune. La valeur moyenne obtenue est supérieure à la valeur limite de 2 mg/L en dessous de laquelle la mortalité des poissons est courante (Francis-Floyd, 2003). Ces organismes ne sont donc pas en danger car des concentrations réduites d'oxygène dissous entraînent des effets létaux ou sublétaux (physiologiques et comportementaux) chez divers organismes en particulier les poissons. Ces résultats ne sont pas compatibles aux résultats de l'étude menée par Agbandou et al. (2018) sur le complexe lagunaire lac Nokoué/lagune de Porto-Novo qui ont révèlent une teneur en oxygène dissous comprise entre 3,94 et 5,69 mg/L sur l'ensemble du complexe. De même, les taux d'oxygène dissous sur la lagune de Grand-Popo sont largement inférieurs aux taux d'oxygène sur le lac Labion (Odjohou et al., 2020) et dans les eaux de Guigou au Maroc (Abboudi et al., 2014). Cependant, certains écosystèmes comme la lagune de Porto-Novo (Chouti et al., 2011), le lac Ahémé (Dimon et al., 2014) et le lac d'Aleg en Mauritanie (Maham Ould Sidi et al., 2018) sont plus appauvris en oxygène dissous que la lagune de Grand-Popo. Aussi, le degré de saturation est, en moyenne, inférieur à 50% sur l'ensemble de la lagune. En effet, en surface de la lagune, une moyenne de 44,92 %OD est obtenue contre une valeur moyenne de 45,38 %OD au fond de la lagune.

4.2.2. Dispersion de salinité sur la lagune de Grand-Popo

La modélisation de la dispersion de la salinité sur la lagune de Grand-Popo montre une importante différence de mécanisme entre la période de crue et celle d'étiage.

En période de crue, on observe une diminution assez importante de la salinité de l'amont jusqu'à plus d'un kilomètre en aval de l'embouchure (en fin de simulation). Ceci est, en effet, dû à la

dilution de l'eau de la lagune par l'apport important d'eau douce du fleuve Mono et de la rivière Sazué durant cette période. Les débits d'eau douce au niveau du Mono et de la Sazué, en cette période, sont les plus importantes sur toute l'année (Kaki el al., 2020). Autrement dit, en période de crue, les courants fluviaux s'opposent aux courants de flot et renforcent les courants de jusant (Wango et al., 2014). Ce qui rend difficile le transport de l'eau salée de l'océan, de l'embouchure vers la lagune. Notons que la propagation des eaux douces est fonction de la bathymétrie du milieu et de l'intensité des débits fluviaux (Wango et al., 2014). Ces résultats sont en accord avec ceux de Zandagba et al. (2021) selon laquelle la persistance d'apport d'eau douce en période de crue, chasse l'eau salée vers l'océan. Adandédji et al. (2017) ont également montré que les forts débits au niveau du fleuve chassent l'eau vers l'océan. Aussi, des fortes valeurs de salinité sont observées au niveau de l'embouchure malgré la forte dilution sur toute la lagune et sont dues au contact permanent de l'embouchure avec l'océan et donc à l'influence des eaux salée en haute marée. Les travaux de Hariati et al. (2019) sur l'estuaire Ségara Anakan en Indonésie, attestent les présents résultats.

Par contre, en période d'étiage, on constate une augmentation progressive de la salinité sur la lagune et cette fois-ci de l'embouchure vers le reste de la lagune. On assiste, en étiage, à une colonisation des eaux de la lagune par les eaux salées océaniques et donc une augmentation de la salinité sur la lagune (Wango et al., 2014). En effet, en période d'étiage, l'apport d'eau douce devenu négligeable au niveau du fleuve Mono et de la Sazué (Kaki et al., 2020), le système est soumis à l'influence de l'océan et précisément à l'influence de la marée. L'intrusion de l'eau salée sur la lagune devient importante et s'étant aussi bien vers l'amont que vers l'aval de la lagune ; ce qui est conforme au résultat de Zandagba et al. (2016) selon lequel la dynamique des systèmes est contrôlée par la marée en période d'étiage. Par ailleurs, Hariati et al. (2019) ont montré que les faibles débits en eau douce entrainent d'importantes variations de la salinité du fait de l'importance de la propagation de l'eau salée. Vers la fin de la simulation, la salinité devient un peu plus importante dans les environs de la place du 10 janvier comparativement au début de simulation de même qu'au niveau de l'extrémité aval de la lagune. Selon Harzallah (2003), l'augmentation de la salinité sur la lagune pourrait persister jusqu'à ce que le gradient de densité avec la mer soit suffisamment fort pour entrainer une sortie d'eau salée. Le faible apport d'eau douce au niveau du Mono et de la Sazué engendre une dilution locale en ces points.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les eaux de surface en général et les systèmes lagunaires en particuliers constituent un habitat pour le développement de plusieurs espèces aquatiques aussi bien animales que végétales. Il parait donc indispensable de penser à la sauvegarde de leur intégrité. La présente étude intitulée : « Transport et dispersion de la salinité sur la lagune de Grand-Popo » nous a permis d'évaluer la qualité physique de l'eau de la lagune et d'appréhender le mécanisme de dispersion de la salinité sur cette dernière aussi bien en période de crue qu'en période d'étiage. Les résultats pertinents issus de la campagne de collecte de donnée en 17 points de la lagune indiquent qu'en dehors du pH, les autres paramètres physiques tels que la conductivité, la température, le TDS, l'oxygène dissous…des eaux de la lagune de Grand-Popo ne sont pas en conformité avec la Norme de Qualité des Eaux (NQE) de surface. La modélisation de la dispersion de la salinité sur la lagune à l'aide du module RMA4 du modèle SMS a révélé qu'en période de crue, la salinité diminue de façon importante et rapide de l'amont de la lagune vers l'aval en prenant par l'embouchure et ceci en raison de l'apport important d'eau douce par le fleuve Mono et la Sazué. En période d'étiage, le système est soumis à l'influence de la marée de la part de l'océan et on assiste à une migration de l'eau salée de la Bouche du Roy vers le reste de la lagune. Ceci entraine une augmentation importante de la salinité sur la lagune, de l'embouchure vers le reste de la lagune. Peu importe la période hydrologique, la salinité est plus élevée au niveau de l'embouchure de la lagune que sur le reste de sa superficie. Elle diminue considérablement lorsqu'on quitte l'embouchure vers le fleuve Mono.

Pour enrichir la connaissance scientifique sur le mécanisme de dispersion des constituants sur les systèmes lagunaires, nous envisageons :

- reprendre les simulations sur une année et en considérant une bathymétrie récente;
- étendre l'étude à toute la lagune côtière (caractérisation physico-chimique et modélisation de la dispersion de la salinité) ;
- analyser l'influence de différentes amplitude de marée et du vent sur le transport et la dispersion de la salinité.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

(1) Abboudi Akil, Tabyaoui Hassan, El Hamichi Fatima ; *Etude de la qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant Deguigou, Maroc ;* European Scientific Journal, August 2014, vol.10, No.23, Pp : 1857 – 7881.

(2) Abulude, F.O., Fapohunda, O.O. and Awanlenhen, B.E. (2006). *Determination of Some Heavy Metals in Procambaris clakii, Paleanon sp., Macrobrahium vollenhovenii and Penaeus notalis from the Coastal Water of Ondo State, Nigeria*. Journal of Animal and Veterinary Advances, 5, 38-41.

(3) Adam Kolawolé Sikirou, Emile Fiogbe, Adrien Dossou-Yovo et Euloge Ogouwale, 2007, *Rapport National sur l'Environnement Marin et Côtier du Bénin,* Rapport de projet 68p.

(4) Adandedji Firmin M., Sintondji Luc O., Mama Daouda, Vested Hans Jacob; *Pollutants dispersion in tropical coastal lake based on numerical modeling approach: A case study of Nokoué Lake in the republic of Benin;* International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 4, April-2017, Pp: 2229-5518.

(5) ADELAC, 2019, *Etude sur la modélisation hydrologique du lac Ahémé et ses chenaux,* Rapport de projet, 8p.

(6) Agbandou B. et al., 2018, *Déséquilibre écosystémique du complexe lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo,* Rapport de projet.

(7) Bawa L.M., Djaneye-Boundjou G., Boyode B.P. and Assih B.T., (2007), *Water Quality Evaluation from Lomé's Lagoon: Effects on Heavy Metals Contamination on Fishes,* Journal of Applied Science and Environmental Management, 11, pp. 33-36.

(8) Belhadj Z., Boudoukha A., Mezedjri L., 2011, *Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la Wilaya de Skikda (Nord-Est de l'Algérie). (Contamination naturelle par le mercure),* European Journal of Scientific Research, Vol. 56 No.2 (2011), Pp : 204-211.

(9) Bouchebbah et Ayache, 2011, *Caractéristique des eaux de surface de l'Oued Djemaa de la région de Bejaia*, Mémoire d'ingénieur en écologie et environnement, Université de Bejaia, 88p.

(10) Chouti Waris K., Mama Daouda, Alapini François, 2010, *Etude des variations spatio-temporelles de la pollution des eaux de la lagune de Grand-Popo*, International Journal of Biological and Chemical Sciences, Vol. 4(4), Pp : 1017-1029.

(11) Chouti Waris, Mama Daouda, Alassane Abdoukarim, Changotade Odilon, Alapini François, Boukari Moussa, Aminou Taoffiki et Afouda Abel ; *Caractérisation physico-chimique de la lagune de Porto-Novo (sud Bénin) et mise en relief de la pollution par le mercure, le cuivre et le zinc ;* Journal of Applied Biosciences, Vol. 43, 2011, Pp : 2882 – 2890.

(12) Chouti W. K., Chitou N. E., Kelome N., Kpako B. Boniface H., Vlavonou Dorcas H., Tossou M. et al., 2017, *Caractérisation Physico-Chimique Et Étude De la toxicité de la lagune Côtière, De Togbin À Grand-Popo (Sud-Ouest Bénin),* European scientific Journal, Vol. 13 No. 27, doi : https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n27p131, 131p.

(13) Dèdjiho, 2011, *Evaluation de la chaîne trophique d'une aire marine protégée en relation avec sa physico-chimie : cas de Gbèzoumè dans la commune de Ouidah*, Mémoire de DEA, FAST/UAC, Pp : 50.

(14) Dimon Fidèle, Dovonou Flavien, Adjahossou Naéssé, Chouti Waris, Mama Daouda, Alassane Abdoukarim, Boukari Moussa ; *Caractérisation physico-chimique du lac Ahémé (Sud Bénin) et mise en relief de la pollution des sédiments par le plomb, le zinc et l'arsenic ;* Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie ; J. Soc. Ouest-Afr. Chim. (2014), Vol.037, 19ème Année, Juin 2014 ; Pp : 36- 42.

(15) Francis-Floyd, 2003, *L'oxygène dissous pour la production du poissons*, Institut de l'alimentation et de l'agriculture, Université de Floride.

(16) Fischer, 1967, *The mechanics of dispersion in natural streams*, Journal Hydraulics Division Proceedings, ASCE, Vol. 93, No.6, 1967, Pp: 187-216.

(17) IBGE, 2005, *Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général*, Rapport d'étude, Pp : 16.

(18) Hariati Feril, Ajiwibowo Harman, Hadihardaja Iwan K. et Nugroho Joko; *Modeling adaptation to salinity intrusion in Segara Anakan estuary due to sea level rise; International Journal of GEOMATE, Jan. 2019, Vol.16, Issue 53, pp:9-17; DOI: https://doi.org/10.21660/2019.53.05655*.

(19) Harzallah Ali ; *Transport de polluants dans la lagune de Bizerte simule par un modèle de circulation de l'eau ;* Bull. Inst. Natn. Scien. Tech. Mer de Salammbô, Vol. 30, 2003, Pp : 121-133.

(20) Issola Yacoub, Kouassi Aka Marcel, Dongui B. K. et Biemi Jean ; *Caractéristiques physico-chimiques d'une lagune côtière tropicale : lagune de Fresco (Côte d'Ivoire) ;* Afrique Science Vol.04(3), 2008, Pp : 368 – 393.

(21) Jabbour D., 2006, *Etude expérimentale et modélisation de la dispersion en champ lointain suite à un rejet accidentel d'un polluant miscible dans un cours d'eau. Application à la gestion de crise*, Thèse de Doctorat à l'université de Provence (Aix-Marseille I) 247p.

(22) Jobson, 1997, *Predicting travel time and dispersion in rivers and streams,* Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123, Novembre 1997, doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:11(971).

(23) Kaki et al., 2020, *Etude hydro-sédimentaire de la lagune de Grand-Popo nécessaire à l'élaboration d'un guide pratique de gestion de l'embouchure « la bouche du Roy » du fleuve mono,* Rapport de projet WACA.

(24) Kambiré o., Adingra A.A., Eblin S.G., Aka N., Kakou A.C., Koffi-Nevry R., 2014, *Caractérisation des eaux d'une lagune estuarienne de la Côte d'Ivoire : la lagune ABY,* Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°20, Décembre 2014, pp. 95-110.

(25) Laibi, 2011, *Dynamique actuelle d'une embouchure fluviale estuarienne à flèche sableuse, la Bouche du Roy, Bénin, Golfe de Guinée : Caractérisation hydrosédimentaire et géomorphologique*, Thèse, Université d'Abomey-Calavi, Pp : 302.

(26) Maham Ould Sidi Yahya, El azzouzi Elhabib, Benaakam Rachid, Bellaouchou Abdlekbir, Mkadmi Yahya, kankou M.S., Dick Brahim Ahmed, Chaair Hassan et Fekhaoui Mohamed ; *Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux du lac d'Aleg, Mauritanie ;* Proceedings des JIC2017 : J. Maurit. Chem. Soc., Vol.01, 2018, Pp : 52-61.

(27) Mama Daouda, (2010), *Méthodologie et résultats du diagnostic de l'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin).* Thèse de Doctorat en Chimie et microbiologie de l'eau, Ecole Doctorale de Science Technologie et Santé. Université de Limoges, 157 p.

(28) Merhabi F., Amine H., Halwani J. ; *Evaluation de la qualité des eaux de surface de la rivière Kadicha* ; Lebanese Science Journal, Vol. 20, No. 1, 2019, Pp : 10-34 ; http://dx.doi.org/10.22453/LSJ-020.1.010-034.

(29) Odjohou Ella, Amani Mireille, Soro Gbombélé et Monde Sylvain ; *Caractérisation physico-chimique des eaux d'un système lacustre du cordon littoral ivoirien : cas du lac Labion ;* Int. J. Biol. Chem. Sci. Vol.14(5), June 2020 ; Pp : 1878-1892.

(30) Olaègbè Okpeitcha Victor, Alexis Chaigneau, Yves Morel, Thomas Stieglitz, Yves Pomalegni, Zacharie Sohou, Daouda Mama, 2021, *Variabilité saisonnière et interannuelle de la salinité dans une grande lagune ouest-africaine (Lagune de Nokoué, Bénin),* Estuarine Coastal and Shelf Science Vol. 264 (72) : 107689, doi : https://doi.org/10.1016.j.ecss.2021.107689.

(31) Pouomogne, 1998, *Pisciculture en milieu tropical africain*, Article de journal, presse universitaire d'Afrique, Yaoundé, 263P.

(32) Rutherford, 1994, *River mixing*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 229, 25 Septembre 1995, Pp : 406-407 ; doi : https://doi.org/10.1017/S0022112095213557.

(33) Sanchez-cabeza et Pujol, 1999, *Optimisation of liquid scintillation counting conditions for rapid tritium determination in aquaeous samples* , Journal Radioanal Nucl Chem, Vol. 242, Pp : 391-398, doi : https://doi.org/10.1007/BF02345568.

(34) Tchokpon Maxime, 2020, *Evaluation de la qualité physico-chimique de l'eau et des sédiments du lac Toho dans la commune de Lokossa,* Mémoire de licence professionnelle en Hydrologie à l'Université d'Abomey-Calavi, Pp : 1-2.

(35) Wango Ted-Edgard, Akpetou Lazare et Adopo Kouassi L. ; *Simulation de la dispersion sel - eau douce dans la lagune ABY (Côte d'Ivoire) ;* Rev. Ivoir. Sci. Technol., Vol.24, 2014, Pp : 213 – 222.

(36) Zandagba E. B. Josué, 2022, *Modélisation Ecohydrologique,* support de cours.

(37) Zandagba E. B. Josué, Mahmoud M., Obada E., Afouda A., 2016. *Hydrodynamic modeling of Nokoué Ecosystem Lake in Benin*. Hydrology 2016, 3, 44 ; doi : https://doi.org/10.3390/hydrology3040044.

(38) Zandagba E. B. Josué, Eric Adéchina Alamou, Ezechiel Obada, Amédée Chabi, Eliézer Iboukoun Biao, and Abel Afouda (2021). *Modeling of Spacio-temporal Evolution of Salt Dispersion on Nokoue Lake*. Proc. IAHS, 98, 1–6, 2021 https://doi.org/10.5194/piahs-98-1-2021.

(39) Zandagba E.B.Josué, (2017). *Gestion Intégrée des Ressources en eau du lac Nokoué : fonctionnement hydrodynamique et qualité physico chimique des eaux*. Thèse de Doctorat en Hydrologie et GIRE, CIPMA/FAST/UAC. Université de Limoges, 176 p.

WEBOGRAPHIE

(1) https://fr.wikipedia.org/wiki/lagune, *Lagune*, Publication web.

(2) https://fr.climate-data.org/afrique/benin/mono-1335/, *Climat Grand-Popo*, publication scientifique.

(3) https://fr.wikipedia.org/wiki/Grand-Popo, *Grand-Popo commune de Mono, Bénin* ; publication web.

(4) https://www.memoireonline.com/09/13/7357/m_contraintes-environnementales-et-urbanisation-dans-la-commune-de-Grand-Popo-au-Benin10.html,*Contraintes environnementales et urbanisation dans la commune de Grand-Popo au Bénin*, mémoire scientifique.

(5) https://www.yumpu.com/fr/document/view/24141893/monographie-de-la-commune-de-grand-popo-association-, *Monographie de la commune de Grand-Popo*, rapport de projet.

(6) www.greenfacts.org/fr, *Disponibilité en eau dans le pays suivant : Bénin.*

(7) www.spge.be, *L'eau dans le monde.*

(8) Lefèvre T., 2013, *La répartition de l'eau sur la terre*, Publication web, www.planeteviable.org/repartition-eau-sur-terre/.

ANNEXE

Annexe 1 **:** *Tableau climatique de la commune de Grand-Popo.*

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température minimale (°C)	27,5	28,1	28,4	28,2	27,4	26	25,1	24,8	25,4	26,3	27,3	27,6
Température moyenne (°C)	24,9	25,8	26,4	26,2	25,4	24,3	23,7	23,3	23,8	24,4	25,3	25,2
Température maximale (°C)	31,5	31,7	31,6	31,2	30,1	28,3	27,5	27,3	28,1	29,1	30,3	31,2
Précipitation (mm)	41	56	88	121	201	216	118	77	131	165	103	60
Humidité (%)	75%	78%	79%	80%	83%	86%	84%	84%	85%	85%	82%	79%
Jours de pluie (jr)	9	11	15	16	19	19	16	13	16	19	17	13
Heure de soleil (h)	8,4	8,3	8,2	8,1	7,5	6,5	6,3	5,4	6,0	6,8	7,5	8,2

Source : www.climate-data.org/

Annexe 2 : *Caractéristiques physiques de la lagune de Grand-Popo.*

			pH		Température		Conductivité		TDS	
Points	**Longitude**	**Latitude**	**En surface**	**En profondeur**	**En surface**	**En profondeur**	**En surface**	**En profondeur**	**En surface**	**En profondeur**
GP01	368451	695112	6,8	6,4	30,55	30,51	107	113	54	56
GP02	369400	694980	6,87	6,64	30,56	30,52	127	108	63	57
GP03	370403	695210	6,85	6,3	30,78	30,6	119	108	60	56
GP04	371524	694779	6,77	6,3	30,74	30,72	119	115	60	58
GP05	372439	694647	6,53	6,6	31,04	30,81	154	148	81	66
GP06	373400	694972	6,4	6,3	30,59	30,53	132	129	63	65
GP07	372882	695266	6,64	6,33	29,78	29,69	593	596	294	296
GP08	374399	695320	6,4	6,14	30,34	30,3	303	306	145	159
GP09	375333	695447	6,6	6,27	30,03	30	407	346	203	183
GP10	376400	695643	6,79	6,32	29,86	29,78	1963	2177	960	1045
GP11	377415	695787	6,97	6,85	29,8	29,58	6413	6780	3120	3446
GP12	377948	695812	7,02	6,8	29,67	29,43	11,69	12,11	5437	6750
GP13	378431	696075	7,23	6,94	29,37	29,36	19,5	20,5	9532	9945
GP14	378980	695785	7,16	6,9	29,3	29,19	28	27,83	14,11	13,71
GP15	379196	695591	7,04	6,5	29,25	29,27	28,8	29,5	14,5	14,7
GP16	379817	696018	7,13	7,05	28,78	28,76	47,44	48,22	23,9	24,04
GP17	380538	696040	7,2	7,1	28,7	28,56	47,58	48,84	23,8	24,28

			Salinité		OD		%OD	
Points	**Longitude**	**Latitude**	**En surface**	**En profondeur**	**En surface**	**En profondeur**	**En surface**	**En profondeur**
GP01	368451	695112	0,05	0,05	3,53	3,53	47,3	47,4
GP02	369400	694980	0,06	0,05	3,31	3,67	45	49,1
GP03	370403	695210	0,06	0,05	3,39	3,71	45,6	49,8
GP04	371524	694779	0,05	0,05	3,51	3,65	47,1	49,3
GP05	372439	694647	0,07	0,06	3,49	3,43	46,9	46,2
GP06	373400	694972	0,06	0,06	3,6	3,61	48,2	48,1
GP07	372882	695266	0,28	0,28	1,5	1,5	19,6	19,9
GP08	374399	695320	0,12	0,15	3,13	3,09	41,5	41
GP09	375333	695447	0,19	0,18	3,17	3,36	42,1	44,7
GP10	376400	695643	0,98	1,08	3,5	3,55	46,4	46,9
GP11	377415	695787	3,4	3,72	3,39	3,28	45,5	44,8
GP12	377948	695812	6	7,51	3,3	3,27	44,8	44,5
GP13	378431	696075	11,26	11,78	3,5	3,15	46,1	44,4
GP14	378980	695785	16,55	16,76	3,25	3,3	46,8	47,5
GP15	379196	695591	17,6	18,27	3,37	3,3	48,3	47,6
GP16	379817	696018	31,24	31,22	3,3	3,28	50,4	50,5
GP17	380538	696040	30,9	31,5	3,41	3,24	52,2	49,9

Annexe 3 *: Campagne de Terrain*



Photo 1 *: Mesure des paramètres au fond de la lagune.*



Photo 2 *: Mesure des paramètres en surface de la lagune.*



Photo 3 *: Lecture des valeurs des paramètres.*



Photo 4 *: Relevé des valeurs mesurées.*

Source : Cliché Eustache, 2022