



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE
UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE
Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE : 2024-2025
N° D'ORDRE : 142

CANDIDAT

Nom : GOE

Prénoms : Bi Sehi Antoine

**Soutenue publiquement
le 27 Juin 2025**

THESE

**Pour l'obtention du grade de Docteur de
l'Université Jean LOROUGNON GUEDE
Mention : Géosciences et Environnement
Spécialité : Hydro-sédimentologie**

**Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire d'une
lagune sous l'influence des pressions anthropiques et
des variations de la marée : cas de la lagune Aghien
(Abidjan, Côte d'Ivoire)**

JURY

Président : M. DONGUI BINI KOUAME, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Co-directeur : M. KOUASSI KOUAKOU LAZARE, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Co-directeur : M. KAMAGATE BAMORY, Professeur Titulaire, Université NANGUI ABROGOUA

Rapporteur : M. KOUASSI AMANI MICHEL, Professeur Titulaire, Institut National Polytechnique Felix HOUPHOUËT BOIGNY

Examineur : M. KOUAKOU KOFFI EUGENE, Maître de Conférences, Institut National Polytechnique Felix HOUPHOUËT-BOIGNY

Examineur : M. ANOH KOUAO ARMAND, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE
UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE
Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

UFR ENVIRONNEMENT

ANNEE : 2024-2025
N° D'ORDRE : 142

CANDIDAT

Nom : GOE

Prénoms : Bi Sehi Antoine

**Soutenue publiquement
le 27 Juin 2025**

THESE

**Pour l'obtention du grade de Docteur de
l'Université Jean LOROUGNON GUEDE
Mention : Géosciences et Environnement
Spécialité : Hydro-sédimentologie**

**Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire d'une
lagune sous l'influence des pressions anthropiques et
des variations de la marée : cas de la lagune Aghien
(Abidjan, Côte d'Ivoire)**

JURY

Président : M. DONGUI BINI KOUAME, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Co-directeur : M. KOUASSI KOUAKOU LAZARE, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Co-directeur : M. KAMAGATE BAMORY, Professeur Titulaire, Université NANGUI ABROGOUA

Rapporteur : M. KOUASSI AMANI MICHEL, Professeur Titulaire, Institut National Polytechnique Felix HOUPHOUËT BOIGNY

Examineur : M. KOUAKOU KOFFI EUGENE, Maître de Conférences, Institut National Polytechnique Felix HOUPHOUËT-BOIGNY

Examineur : M. ANOH KOUAO ARMAND, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE

TABLE DES MATIERES.....	Pages
TABLE DES MATIERES.....	i
DEDICACE.....	viii
REMERCIEMENTS.....	ix
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTES DES FIGURES	xvi
LISTE DES ANNEXES	xx
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	5
CHAPITRE 1 : CADRE PHYSIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA LAGUNE	
AGHIEN.....	6
1.1. Présentation du bassin versant de la lagune Aghien.....	6
1.2. Climat du bassin versant de la lagune Aghien.....	8
1.2.1. Pluviométrie du bassin versant de la lagune Aghien.....	8
1.2.2. Humidité relative, vitesse et direction des vents	10
1.2.2.1. Vitesse et direction des vents	10
1.2.2.2. Humidité relative.....	11
1.3. Hydrométrie des tributaires de la lagune Aghien	12
1.3.1. Tributaires fluviaux	12
1.3.2. Marée dynamique	13
1.4. Relief du bassin versant de la lagune Aghien.....	14
1.5. Pédologie et occupation des sols dans le bassin versant de la lagune Aghien	15
1.5.1. Pédologie du bassin versant de la lagune Aghien	15
1.5.2. Occupation des sols du bassin versant de la lagune Aghien	15
1.6. Géologie du bassin versant de la lagune Aghien.....	16
Conclusion partielle.....	17
CHAPITRE 2 : ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA MODELISATION	
HYDRODYNAMIQUE ET LE TRANSPORT SEDIMENTAIRE.....	19
2.1. Etat de l’art sur la modélisation hydrodynamique.....	19
2.1.1. Hypothèses de Saint-Venant	19
2.1.1.1. Hypothèse de la pression hydrostatique	20
2.1.1.2. Hypothèse de l’imperméabilité du fond et de la surface	20
2.1.1.3. Hypothèse de Boussinesq.....	20

2.1.2.	Modèle de Saint-Venant	20
2.1.3.	Méthodes de discrétisation	24
2.1.3.1.	Méthode des différences finies (MDF)	24
2.1.3.2.	Méthode des éléments finis (MEF)	24
2.1.3.3.	Méthode des volumes finis (MVF)	24
2.1.4.	Schéma numérique de résolution	26
2.1.4.1.	Schéma Explicite	26
2.1.4.2.	Schéma Implicite	27
2.1.4.3.	Schéma Semi-Implicite	27
2.2.	Etat de connaissance sur le transport solide en suspension	27
2.2.1.	Paramètres caractéristiques du transport solide	28
2.2.1.1.	Vitesse de chute	28
2.2.1.2.	Taux de dépôt	29
2.2.1.3.	Taux d'érosion	30
2.2.1.4.	Evolution du lit	30
2.3.	Choix du modèle de simulation de la dynamique sédimentaire et de la diffusion de polluants	31
2.3.1.	Généralité sur le modèle MIKE 21 Flow Model FM	32
2.3.1.1.	Module hydrodynamique (HD)	32
2.3.1.2.	Module de transport (AD)	33
2.3.1.3.	Module de transport de sédiments cohésifs	33
	Conclusion partielle	33
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES		34
CHAPITRE 3 : MATERIEL		35
3.1.	Données	35
3.1.1.	Données hydro-climatiques	35
3.1.2.	Données océanographiques	35
3.2.	Outils	36
3.2.1.	Outils de terrain	36
3.2.1.1.	Outils d'échantillonnage des eaux	36
3.2.1.2.	Outils d'échantillonnage des sédiments	36
3.2.1.3.	Outils de mesure in situ	37
3.2.1.4.	Outils de sondage	38
3.2.1.4.1.	Outils de sondage bathymétrique	38

3.2.1.4.2. Outils de sondage topographique	38
3.2.1.5. Outils de jaugeage des paramètres hydrodynamiques.....	39
3.2.2. Outils de laboratoire	40
3.2.2.1. Outils de mesures des matières en suspension	40
3.2.2.2. Outils d'analyse des sédiments	41
3.2.3. Outils de traitement de données	42
3.2.3.1. Logiciels de traitement de données bathymétriques et topographiques	42
3.2.3.2. Logiciels de traitement de données de jaugeages.....	42
3.2.3.3. Outils de modélisation.....	43
Conclusion partielle.....	43
CHAPITRE 4 : APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	44
4.1. Caractérisation de la distribution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et de la morphologie de la lagune Aghien.....	44
4.1.1. Mesures des températures et salinités de la lagune Aghien	44
4.1.1.1. Prélèvement des échantillons d'eau et mesure in situ	44
4.1.1.1.1. Prélèvement des échantillons d'eau	44
4.1.1.1.2. Mesure <i>in situ</i> de la température et de la salinité	45
4.1.2. Caractérisation des sédiments de la lagune Aghien	46
4.1.2.1. Caractérisation des matières en suspension	46
4.1.2.1.1. Quantification des matières en suspension	46
4.1.2.1.2. Quantification des flux entrant de matières en suspension	47
4.1.2.1.3. Vitesse de chute des matières en suspension en condition d'eau calme ..	48
4.1.2.2. Sédiments du fond.....	50
4.1.2.2.1. Prélèvement des sédiments du fond	50
4.1.2.2.2. Analyse lithologique	50
4.1.2.2.3. Analyse granulométrique des sédiments de sable	51
4.1.2.2.4. Faciès sédimentologique	54
4.1.2.2.5. Analyse morphoscopique et minéralogique	54
4.1.3. Caractérisation géomorphologique de la lagune Aghien	55
4.1.3.1. Sondage bathymétrique et topographique	55
4.1.3.1.1. Sondage bathymétrique	55
4.1.3.1.2. Sondage topographique	56
4.1.3.2. Traitement des données sondées	57
4.1.3.2.1. Elimination des données aberrantes	57

4.1.3.2.2. Données bathymétriques	57
4.1.3.2.3. Bathymétrie de la lagune Aghien	58
4.1.3.2.4. Pentes du fond de la lagune Aghien	58
4.1.3.2.5. Surface et volume de la lagune Aghien.....	58
4.1.4. Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de la lagune Aghien et des tributaires.....	61
4.1.4.1. Jaugeage des sections	62
4.1.4.1.1. Mode d'emploi de l'ADCP Workhose Rio Grande	62
4.1.4.1.2. Mode d'emploi de l'ADCP OTT Qliner 2	63
4.1.4.1.3. Détermination des débits des Profileurs Acoustiques.....	63
4.1.4.2. Traitement des données de jaugeage	64
4.2. Simulation de l'influence des pressions anthropiques et naturelles sur la dynamique hydro-sédimentaire de la lagune Aghien	64
4.2.1. Préparation des données	64
4.2.1.1. Préparation des données de débits.....	65
4.2.1.2. Préparation des données de niveau d'eau à Aghien et Potou	65
4.2.2. Modélisation hydrodynamique.....	65
4.2.2.1. Discrétisation.....	65
4.2.2.1.1. Discrétisation temporelle	65
4.2.2.1.2. Discrétisation spatiale	66
4.2.2.2. Evaluation des flux	68
4.2.2.3. Résolution numérique	68
4.2.2.4. Conditions aux limites.....	69
4.2.2.5. Technique de couplage vitesse/pression.....	71
4.2.2.6. Calibration/Validation du modèle	74
4.2.2.7. Simulation hydrodynamique de la lagune Aghien	75
4.2.2.7.1. Hydrodynamique en 2021	75
4.2.2.7.2. Hydrodynamique en 2024	75
4.2.2.7.3. Hydrodynamique en 2070	76
4.2.3. Modélisation de la dynamique sédimentaire dans la lagune Aghien	76
4.2.3.1. Configuration du modèle Mike 21 Flow Model FM.....	76
4.2.3.1.1. Maillage du domaine.....	76
4.2.3.1.2. Conditions initiales et aux limites	77
4.2.3.1.3. Calibration et validation du modèle	77

4.2.3.2. Simulation de la dynamique des sédiments.....	78
4.2.3.2.1. Dynamique sédimentaire en 2021	79
4.2.3.2.2. Dynamique sédimentaire en 2024	79
4.3. Simulation de l'influence des pressions anthropiques et des variations de la marée sur la dynamique de la salinité dans la lagune Aghien.....	80
4.3.1. Modélisation de la dynamique de diffusion de la salinité.....	80
4.3.1.1. Avant l'ouverture de l'embouchure en 2021	80
4.3.1.2. Après l'ouverture de l'embouchure en 2024.....	81
4.3.1.3. Après l'ouverture de l'embouchure en 2025	81
4.3.1.4. A l'horizon 2070 suivant les scénarii RCP8.5 et SSP5-8.5	81
4.3.1.5. Simulations paramétriques de la diffusion de la salinité.....	82
4.3.2. Simulation prédictive de la dynamique de dispersion d'un polluant hypothétique.....	82
Conclusion partielle.....	84
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....	85
CHAPITRE 5 : DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET DE LA MORPHOLOGIE DE LA LAGUNE AGHIEN.....	86
5.1. Evolution de la température et de la salinité	86
5.1.1. Evolution de la température	86
5.1.2. Evolution de la salinité.....	87
5.2. Sédimentologie de la lagune Aghien	91
5.2.1. Matières en suspension.....	91
5.2.1.1. Concentration des matières en suspension	91
5.2.1.2. Flux de matières en suspension des tributaires fluviaux	92
5.2.1.3. Modèle débit d'apport-concentration de matière en suspension	93
5.2.1.4. Vitesse de chute des matières en suspension en condition d'eau calme	94
5.2.2. Sédiments du fond.....	96
5.2.2.1. Lithologie	96
5.2.2.2. Granulométrie.....	97
5.2.2.3. Morphoscopie.....	102
5.2.2.4. Minéralogie	104
5.3. Géomorphologie de la lagune Aghien	106
5.3.1. Relief du fond.....	107

5.3.1.1.	Bathymétrie	107
5.3.1.2.	Surface et volume.....	109
5.4.	Courantologie de la lagune Aghien et des tributaires.....	110
5.4.1.	Courantologie de la lagune Aghien.....	110
5.4.2.	Courantologie des tributaires de la lagune Aghien	111
5.4.2.1.	Courantologie de la Bété	112
5.4.2.2.	Courantologie de la Mé	112
5.4.2.3.	Courantologie du chenal.....	115
	Discussion	119
	Conclusion partielle.....	123
CHAPITRE 6 : INFLUENCE DES PRESSIONS ANTHROPIQUES ET NATURELLES SUR LA DYNAMIQUE HYDRO-SEDIMENTAIRE DE LA LAGUNE AGHIEN		124
6.1.	Données reconstituées	124
6.2.	Modèle hydrodynamique.....	125
6.2.1.	Maillage de la lagune	125
6.2.2.	Optimisation du modèle	126
6.2.2.1.	Variation du niveau d'eau	126
6.2.2.2.	Champs de vitesse	128
6.2.3.	Dynamique de la lagune Aghien en l'absence de pompage.....	129
6.2.4.	Dynamique de la lagune Aghien en condition d'exploitation.....	131
6.2.5.	Dynamique de la lagune Aghien à l'horizon 2070.....	132
6.3.	Modèle de la dynamique sédimentaire	133
6.3.1.	Maille du domaine.....	133
6.3.2.	Calibration du modèle Mike 21 Flow Model FM	134
6.3.2.1.	Période humide.....	134
6.3.2.2.	Période sèche.....	135
6.3.3.	Validation du modèle hydrodynamique	137
6.3.4.	Dynamique sédimentaire en 2021	138
6.3.4.1.	Concentration des matières en suspension en 2021	138
6.3.4.2.	Dynamique du fond en 2021	139
6.3.5.	Dynamique sédimentaire en 2024	140
6.3.5.1.	Concentration des matières en suspension en 2024	140
6.3.5.2.	Dynamique du fond en 2024	141

6.3.5.3. Dynamique au niveau de la zone de pompage	142
Discussion	143
Conclusion partielle.....	144
CHAPITRE 7 : INFLUENCE DES PRESSIONS ANTHROPIQUES ET DES VARIATIONS DE LA MAREE SUR LA DYNAMIQUE DE LA SALINITE DANS LA LAGUNE AGHIEN	146
7.1. Dynamique de diffusion de la salinité	146
7.1.1. Dynamique de diffusion en 2021	146
7.1.2. Dynamique de diffusion en 2024	147
7.1.3. Dynamique de diffusion en 2025	147
7.1.4. Dynamique de diffusion en 2070	149
7.2. Dynamique de diffusion d'un polluant anthropique.....	150
7.2.1. En période d'étéage.....	150
7.2.2. En période de crue.....	152
Discussion	153
Conclusion partielle.....	155
CONCLUSION.....	157
REFERENCES.....	161
ANNEXES.....	
PUBLICATIONS	

DEDICACE

In memorium

A mes géniteurs : SEHI Bi Goé Honoré et KAMBO Lou Zali Christine, mon souhait était de vous voir lors de la présentation de ce travail, fruit de vos nombreux efforts consentis. Mais, Dieu en a voulu ainsi... De là où vous êtes, soyez fier(e)s du résultat de vos efforts,

Paix à votre âme !

Je dédie également ce mémoire à toutes mes sœurs

GOE Léopoldine ; GOE Pélagie ; GOE Yolande, GOE Christy et GOE Claude.

Merci d'avoir assuré le rôle de papa et maman,

Que Dieu vous garde !

REMERCIEMENTS

Notre aventure qui a débuté en première année de Licence n'aurait pu arriver à son terme sans le soutien de bon nombre de personnes. Nous en oublierons certainement quelques-unes et pour cela, nous les prions de nous en excuser par avance pour cette erreur humaine.

Nous voudrions commencer par remercier les autorités de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE (UJLOG), avec à leur tête Mme ADOHI KROU Viviane, Professeur Titulaire par ailleurs Présidente de ladite Université, pour sa gestion efficace de l'université et pour nous avoir permis de mener à terme ce travail de recherche.

Nous remercions également M. SORO Dognimeton, Professeur Titulaire, Vice-président de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE (UJLoG) chargé de la pédagogie, de la recherche, de la vie universitaire et de l'innovation technologique pour avoir coordonné la mise en place de la formation doctorale.

Nous exprimons nos sincères remerciements à M. KONE Issiaka, Professeur Titulaire, Vice-président de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE (UJLoG) chargé de la planification, de la programmation et des relations extérieures pour son implication dans le bon déroulement de la formation doctorale.

Nous adressons nos profonds remerciements au Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement de l'UJLoG, M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire à UJLoG et au Directeur de l'Ecole Normale Supérieure (ENS), M. KAMAGATE Bamory, Professeur Titulaire à l'Université NANGUI ABROGOUA (UNA) et par ailleurs co-Directeurs de cette thèse. Nous nous sentons très honorés d'avoir appris à vos côtés la rigueur et surtout le travail bien fait. Nous vous sommes reconnaissants pour votre disponibilité, votre patience, encouragement et surtout votre générosité dont nous avons été bénéficiaires tout au long de notre parcours de recherche.

Nous remercions très sincèrement M. DONGUI Bini Kouamé, Professeur Titulaire à UJLoG pour avoir accepté de présider notre Jury de soutenance en contribuant ainsi à l'amélioration de nos travaux de recherche. Nous sommes aussi reconnaissants envers M. KOUASSI Amani Michel, Professeur Titulaire à l'INPHB, qui, malgré ses occupations, a bien voulu apporter ses critiques en tant que rapporteur de cette thèse. Nous remercions MM. KOUAKOU Koffi Eugène et ANOH Kouao Armand, Maître de Conférences respectivement à l'INPHB et UJLoG pour leur participation au Jury de notre soutenance en tant que examinateurs. Vos critiques et remarques pertinentes ont permis l'amélioration du manuscrit final. Merci chers maîtres !

Nos vifs remerciements vont à l'endroit du cabinet Environment Management Consulting (ENVIMA Consulting) qui a bien voulu financer nos travaux de recherche.

Nous voudrions remercier l'Institut Danois de l'Hydraulique (DHI) pour avoir mis à notre disposition une licence du logiciel MIKE 21 FLOW Model FM et toute la gamme du produit sur toute la durée de notre thèse pour mener à bien nos simulations de la dynamique sédimentaire et de dispersion de polluants.

Nous sommes reconnaissants envers les membres du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'UJLoG pour leur aimable accueil et leur disponibilité. Nous remercions plus particulièrement M. DIBI Brou, Professeur Titulaire par ailleurs Directeur du LSTE pour avoir accepté de nous accueillir dans son laboratoire.

Nous voudrions, du fond du cœur, adresser une mention spéciale de remerciement à l'endroit de M. BROU Akahoua David, Maître-Assistant à l'UJLOG. Dr. BROU Akahoua David est celui par qui nous avons appris les méthodes de résolution numérique des équations de Saint-Venant qui sont la base du modèle numérique développé dans cette thèse. Aucun mot ne serait assez significatif à nos yeux pour lui témoigner notre reconnaissance. Merci Docteur pour votre disponibilité et vos enseignements qui nous ont permis d'atteindre l'objectif de cette thèse.

Nous remercions également M. DAO Amidou, Maître de Conférences à l'Université NANGUI ABROGOUA pour sa disponibilité, ses riches conseils et sa contribution très appréciable dans la réalisation de cette thèse.

Nos remerciements vont également à l'endroit de tous nos enseignants à savoir M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Professeur Titulaire, M. KONAN Kouakou Séraphin, M. KOUADIO Zilé Alex, M. MANGOUA Oi Mangoua Jules, Mme YAO Affoué Berthe Epouse TOURE, M. EBLIN Sampah, tous Maîtres de Conférences et Ms. LOUKOU Brou Alexis, KOFFI Valentin et KOUAME Morton, tous Maîtres-Assistants pour leurs conseils pertinents et critiques qui nous ont permis de surmonter un certain nombre d'obstacles.

Nous tenons également à remercier très sincèrement notre encadreur de Master M. KOUA Tanoh Jean Jacques, Maître de Conférences à l'UJLoG. Sa rigueur et son sens du travail bien fait ont fait de nous des apprenants aguerris et tournés vers des résultats de qualité.

Nous n'oublions pas celui qui nous a initié au travail de la recherche, notre encadreur de Licence Feu M. KONAN Koffi Félix, Professeur Titulaire à l'UJLoG, pour son encadrement dont nous avons bénéficié et qui nous permet aujourd'hui de faire face à un certain nombre de problèmes sans prise de tête. Que Dieu, dans sa bonté, daigne vous accorder un repos paisible au regard de toutes les bonnes actions que vous avez posées à notre endroit professeur !

A nos aînés M. KOFFI Koffi Jean Thierry et M. KOFFI Ehouman Serge, tous deux Assistants à l'UNA, merci de nous avoir appris le fonctionnement de certains appareils de mesure et les aptitudes à avoir lors d'une mission de terrain. Merci également d'être restés à nos côtés pour le bon déroulement de la plupart de nos missions les plus périlleuses.

Nous remercions également M. MELEDJE N'Diaye Hermann, M. KOUASSI Kan Martin tous deux Chercheurs au CRE ainsi que M. ZABA Nicaise, Agent au CRE pour leur disponibilité. Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à tous les Docteurs et Doctorants du GRECE pour la bonne ambiance dans laquelle nous avons effectué nos travaux de thèse.

Nous tenons à remercier sincèrement la famille TCHEY, plus particulièrement M. TCHEYGO Bi Tchey Martin et son Epouse ZAH Lou Binlé Cécile pour leur soutien matériel et moral dont nous avons bénéficié durant tout notre cursus secondaire et universitaire. Aux enfants TCHEY, mes neveux et nièces, TCHEYBI Aimé, TCHEYBI Marius Joël, TCHEYLOU Reine Viliaty, TCHEYBI Yvan Rayan, TCHEYBI Elie, TCHEYBI Ange et TCHEYBI Jean Michel ainsi qu'à notre très chère regrettée « la vraie go » TCHEYLOU Eloïse merci pour la bonne ambiance, le respect et l'inoubliable accueil dont nous avons bénéficié lors de notre parcours scolaire à Yamoussoukro et lors de nos différentes missions à Abidjan.

A la famille GONEYA, plus particulièrement M. GONEYA Bi Zan Remy et son Epouse BLALI Lou Fernandette, merci de nous avoir accueilli et hébergé depuis notre arrivée à Daloa. A tous les enfants GONEYA, trouvez en ce mémoire, le fruit de la gentillesse, de la générosité et de l'humanisme de votre papa. Qu'il plaît à Dieu de bénir papa GONEYA pour qu'il puisse bénéficier des retombées de ses actes de bonté à l'égard des nécessiteux.

A nos très chers amis, ELLO Wilfried Enoch et KOUASSI Zia Jaurès, merci de combler le vide émotionnel. Vos soutiens matériel et moral nous ont permis d'affronter certains défis qui auraient pu anéantir plusieurs années de sacrifices. Ce travail est le vôtre puisqu'il est aussi le fruit de vos inestimables efforts personnels et de vos énergies positives que vous avez su nous communiquer lors de sa réalisation. Que la grâce de Dieu vous accompagne dans toute épreuve... Demeurez bénis !

A nos amis de très longue date qui nous ont toujours été d'un apport inestimable. M. ZONGO François, M. KONAN Brou Narcisse et M. KOUAME Aka Aristide recevez nos chaleureux remerciements. Trouvez en ces lignes notre marque de reconnaissance à votre égard pour vos conseils dont nous avons bénéficiés tout au long de la réalisation de ce travail.

A nos amis du Lycée « AS 35 » et membres de la « 2ALSY » recevez nos sincères remerciements pour votre soutien et précieux conseils qui ont constitué pour nous une source de motivation et d'abnégation lors de ce parcours sinueux et plein d'émotions. Nous voudrions

remercier plus particulièrement M. EHOUSSOU Jean Anoh, M. KOFFI Kouakou Levi Moïse et M. KONAN Anicet Guy pour tout l'amour, l'amitié et la considération qu'ils nous ont témoignés.

Nous avons de très bons souvenirs de nos amis de l'Université et de la ville de Daloa. Plus particulièrement de M. DIEBI Brice Aristide, M. AFFESSI Affessi Christian Désiré, M. ZAN Bi Larius Stéphane et M. GOULE Bi Alexis avec qui nous avons et continuons de passer des moments inoubliables. Chers amis, trouvez en ces lignes toute notre gratitude et notre marque de reconnaissance à votre égard.

A tous nos amis de la troisième promotion de Génie de l'Eau et de l'Environnement, nous voudrions à travers ces lignes vous témoigner notre profonde gratitude pour tous les services rendus.

Nous remercions également toutes les personnes qui nous ont accueilli, conseillé et soutenu dans la rédaction de ce travail et que de mémoire d'homme nous avons involontairement omis de mentionner.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

BNETD	:	Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement
CCHE2D	:	Centre for Computational Hydroscience and Engineering
CHIRPS	:	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CRE	:	Centre de Recherche en Ecologie
DHI	:	Danish Hydraulic Institute
EDPs	:	Equations aux Dérivées Partielles
ENVIMA	:	Environnement Management
GRECE	:	Groupe de Recherche en Eau Climat et Environnement
FAO	:	Food and Agriculture Organization
FIT	:	Front Inter-Tropical
GEE	:	Génie de l'Eau et de l'Environnement
HD	:	Hydrodynamic Module
INS	:	Institut National de la Statistique
IRD	:	Institut de Recherche et Développement
LSTE	:	Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
LGMSE	:	Laboratoire de Géologie Marine, Sédimentologie et Environnement
MT	:	Mud Transport
PDA	:	Personal Digital Assistance
PISO	:	Pressure Implicit Splitting of Operators
PSU	:	Practical Salinity Unit
SMS	:	Surface-water Modeling System
SOGREA	:	Société de Gestion de Réseaux d'Eau et d'Assainissement
SODEXAM	:	Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
TDMA	:	Tri-Diagonal Matrix Algorithm
UFR	:	Unité de Formation et de Recherche
UJLoG	:	Université Jean LOROUGNON GUEDE
UNA	:	Université NANGUI ABROGOUA
UNESCO	:	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Description statistique des données CHIRPS sur la période 1981-2020.....	9
Tableau II : Statistique des direction moyenne journalière des vents sur la période 2015-2021 dans le bassin versant de la lagune Aghien	10
Tableau III : Statistique des directions moyennes mensuelles des vents dans le bassin versant de la lagune Aghien sur la période 2015-2021	11
Tableau IV : Statistique descriptive des apports fluviaux dans la lagune Aghien.....	13
Tableau V : Comparaison de la formulation des équations de Saint-Venant	23
Tableau VI : Débits des prélèvements prévus à Aghien et à la Mé	76
Tableau VII : Valeur des paramètres choisis pour le maillage.....	77
Tableau VIII : Conditions initiale et aux limites de la calibration et de la validation.....	78
Tableau IX : Paramètres de la vitesse de chute	78
Tableau X : Paramètres caractéristiques des couches du fond de la lagune	79
Tableau XI : Variation des températures dans la lagune Aghien	86
Tableau XII : Flux de matières solides en suspension entrant dans la lagune Aghien.....	92
Tableau XIII : Paramètres granulométriques des sédiments de la lagune Aghien.....	98
Tableau XIV : Classe granulométrique des sédiments du fond lagunaire Aghien	100
Tableau XV : Morphoscopie des sédiments de sable de la lagune Aghien	103
Tableau XVI : Minéraux présents dans les sédiments de la lagune Aghien.....	106
Tableau XVII : Caractéristiques hydrauliques d'une section de lagune Aghien.....	110
Tableau XVIII : Caractéristiques hydrauliques de la Bété.....	112
Tableau XIX : Caractéristiques hydrauliques d'une section de la Mé en marée.....	113
Tableau XX : Caractéristique hydrauliques d'une section de la Mé.....	114
Tableau XXI : Caractéristiques hydrauliques des sections du chenal	115
Tableau XXII : Caractéristiques hydrauliques des sections du chenal amont et aval	117
Tableau XXIII : Paramètres statistiques obtenus lors de la reconstitution	124
Tableau XXIV : Indicateurs statistiques de performance du modèle	126
Tableau XXV : Paramètres statistiques de la simulation.....	129
Tableau XXVI : Paramètres statistiques de la calibration du modèle sur la période humide	134
Tableau XXVII : Paramètres statistiques de la calibration sur la période sèche.....	135
Tableau XXVIII : Paramètres statistiques de la validation sur la période humide	137
Tableau XXIX : Evolution de la concentration et des épaisseurs de dépôt dans la lagune Aghien	142

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la lagune Aghien	7
Figure 2 : Courbe ombrothermique à la station d'IRHO La Mé (1971-2016).....	9
Figure 3 : Cumul pluviométrique moyen annuel sur le bassin versant de la lagune Aghien sur la période 1981-2020 avec les données CHIRPS	10
Figure 4 : Humidité relative à la station d'IRHO La Mé sur la période 1971-2016.....	12
Figure 5 : Hydrométrie des tributaires de la lagune Aghien	12
Figure 6 : Marée dynamique à Abidjan entrance du 03/06/2025	14
Figure 7 : Carte des pentes du bassin versant de la lagune Aghien	14
Figure 8 : Carte de la pédologie du bassin versant de la lagune Aghien	15
Figure 9 : Carte de l'occupation des sols du bassin versant de la lagune Aghien (Année 2020).....	16
Figure 10 : Carte de la géologie du bassin versant de la lagune Aghien	17
Figure 11 : Représentation des variables d'une section d'écoulement.....	19
Figure 12 : Structure d'un maillage structuré pour la méthode des volumes finis	25
Figure 13 : Structure d'un maillage non structuré pour la méthode des volume finis.....	26
Figure 14 : Matériel de déplacement et de prélèvement d'eau sur le plan d'eau.....	36
Figure 15 : Equipements de prélèvement de sédiment.....	37
Figure 16 : Appareils de mesures <i>in situ</i> (Multi-paramètre de type <i>HANNA</i>)	37
Figure 17 : Appareil de sondage bathymétrique	38
Figure 18 : Appareil de sondage topographique (STONEX S3i)	39
Figure 19 : Appareil de jaugeage hydraulique	40
Figure 20 : Appareils d'analyse de MES au laboratoire	41
Figure 21 : Appareil d'analyse des sédiments au laboratoire	42
Figure 22 : Carte des points de prélèvements d'eau dans la lagune Aghien	45
Figure 23 : Prélèvement d'eau	45
Figure 24 : Mesure <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques	46
Figure 25 : Mesure de la masse des matières solide en suspension	47
Figure 26 : Points de prélèvement des sédiments du fond	50
Figure 27 : Carte des points sondés dans la zone à modéliser	56
Figure 28 : Processus de génération des courbes de niveau.....	59
Figure 29 : Processus de création d'un TIN	60
Figure 30 : Processus d'enregistrement des surfaces et volumes élémentaires	61
Figure 31 : Mode opératoire du Workhose Rio Grande.....	63

Figure 32 : Fonctionnement des profileurs acoustiques à effet Doppler	63
Figure 33 : Maillage en volume finis sur des grilles décalées	66
Figure 34 : Volume de contrôle pour la frontière Sud	69
Figure 35 : Frontière irrégulière dans un maillage régulier	71
Figure 36 : Conditions aux limites amont et aval imposées au domaine de calcul.....	77
Figure 37 : Elévation du niveau marin projetée	82
Figure 38 : Variation de la salinité des tributaires fluviaux avant (2021) et après (2024) l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé.....	87
Figure 39 : Variation de la salinité dans la lagune Aghien avant (2021) et après (2024) l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé.....	88
Figure 40 : Variation de la salinité dans la lagune Potou et le chenal avant (2021) et après (2024) l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé	88
Figure 41 : Variation de la salinité dans la lagune Aghien (avril 2024 et 2025)	89
Figure 42 : Variation de la salinité d'avril à mai 2025	90
Figure 43 : Concentration saisonnières des matières en suspension dans la lagune Aghien en fonction du niveau de profondeur.....	92
Figure 44 : Concentration de matières en suspension en fonction des débits d'apports.	94
Figure 45 : Fonction de répartition de la vitesse de chute des sédiments en suspension dans la colonne d'eau de surface.....	95
Figure 46 : Fonction de répartition de la vitesse de chute des sédiments en suspension dans la colonne d'eau à mi fond.....	95
Figure 47 : Fonction de répartition de la vitesse de chute des sédiments en suspension dans la colonne d'eau près du fond	96
Figure 48 : Faciès granulométrique des sédiments de la lagune Aghien	99
Figure 49 : Courbe granulométrique des sédiments de la lagune Aghien.....	102
Figure 50 : Morphoscopie des sédiments de quartz du fond de la lagune Aghien.....	104
Figure 51 : Composition minéralogique des sédiments du fond de la lagune Aghien.....	105
Figure 52 : Carte bathymétrique de la lagune Aghien (juin 2021).....	107
Figure 53 : Représentation en 3D du relief du fond de la lagune Aghien.....	108
Figure 54 : Courbe hauteur-surface de la lagune Aghien en juillet 2021	109
Figure 55 : Courbe hauteur-volume de la lagune Aghien à la date de juillet 2021.....	110
Figure 56 : Profil en travers et variation de vitesses dans la zone de prise d'eau.....	111
Figure 57 : Profil de vecteurs vitesse dans la zone de prise d'eau à la date du 31.08.2021 ..	111
Figure 58 : Caractéristiques hydrauliques de la rivière Bété (21.07.2021).....	112

Figure 59 : Profil en travers et vitesses d'écoulement dans la section de jaugeage	113
Figure 60 : Vecteurs vitesse dans la zone de jaugeage de la Mé en marée basse	113
Figure 61 : Profil en travers et variation de la vitesse des écoulements.....	114
Figure 62 : Vecteurs vitesse dans la zone de jaugeage de la Mé en marée haute	115
Figure 63 : Profil en travers et variation de la vitesse d'écoulement.....	116
Figure 64 : Vecteurs vitesse des écoulements.....	117
Figure 65 : Profil en travers et variation de la vitesse	118
Figure 66 : Vecteurs vitesse des sections de mesure.....	119
Figure 67 : Régression linéaire entre les niveaux d'eau mesurés et reconstitués	124
Figure 68 : Niveaux d'eau reconstitués et mesurés à la station limnimétrique de Potou	125
Figure 69 : Maillage régulier de la lagune Aghien	125
Figure 70 : Niveaux d'eau simulés et observés dans la lagune Aghien pour un pas de temps	127
Figure 71 : Erreur relative de simulation	128
Figure 72 : Champs de vecteur vitesse modélisée dans lagune Aghien.....	128
Figure 73 : Vecteurs champ de vitesse.....	129
Figure 74 : Corrélation entre niveaux d'eau observés et simulés à Aghien	130
Figure 75 : Ecarts entre niveaux d'eau observés et simulés.....	130
Figure 76 : Niveaux d'eau observés et simulés à Aghien.....	131
Figure 77 : Niveaux d'eau en l'absence et condition d'exploitation de la lagune Aghien	131
Figure 78 : Ecarts entre les niveaux d'eau actuels et en condition d'exploitation	131
Figure 79 : Niveaux d'eau de la lagune Aghien avant le projet (2021) et en 2070	132
Figure 80 : Ecarts dus à une baisse des apports des tributaires.....	132
Figure 81 : Maillage de la lagune Aghien	133
Figure 82 : Corrélation entre les niveaux d'eau observés et simulés.....	134
Figure 83 : Ecarts entre les niveaux d'eau observés et simulés.....	134
Figure 84 : Critère graphique de performance du modèle à la calibration.....	135
Figure 85 : Régression linéaire entre les niveaux d'eau observés et simulés	135
Figure 86 : Différence entre les niveaux d'eau observés et simulés.....	136
Figure 87 : Critère graphique de la performance du modèle à la calibration.....	136
Figure 88 : Corrélation entre niveaux d'eau observés et simulés à la validation	137
Figure 89 : Ecarts entre niveaux d'eau observés et simulés	137
Figure 90 : Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés.....	138
Figure 91 : Concentration de matières en suspension dans la lagune du 01 au 30 juin	139

Figure 92 : Evolution du fond de la lagune Aghien et du chenal.....	140
Figure 93 : Concentration de matières en suspension dans la lagune du 01 au 30 juin	141
Figure 94 : Evolution du fond de la lagune Aghien et du chenal.....	142
Figure 95 : Dispersion de la salinité dans la lagune Aghien	146
Figure 96 : Salinité de la lagune Aghien après l'ouverture de l'embouchure de la Comoé...	147
Figure 97 : Diffusion de la salinité après un temps de 1h	148
Figure 98 : Diffusion de la salinité dans les zones Centre et Nord de la lagune Aghien	148
Figure 99 : Modèle de dilution de la salinité.....	149
Figure 100 : Salinité de la lagune en 2070 en période de crue suivant le scénario SSP5-8.5	150
Figure 101 : Evolution du polluant déversé dans la rivière Djibi en période d'étiage	151
Figure 102 : Evolution du polluant déversé dans la rivière Djibi en période de crue.....	153

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Point de mesure de la salinité en 2021, 2024 et 2025	
Annexe 2 : Conception du maillage de la lagune Aghien	
Annexe 3 : Modèle de correction vitesse/pression	
Annexe 4 : Caractéristiques lithologique des sédiments du fond lagunaire Aghien	
Annexe 5 : Pentes du fond de la lagune Aghien	
Annexe 6 : Evolution de la salinité de la confluence de la Djibi à l'embouchure du fleuve Comoé en 2021	
Annexe 7 : Evolution de la salinité de la confluence de la Djibi à l'embouchure du fleuve Comoé en 2024	
Annexe 8 : Evolution de la salinité de la confluence de la Djibi à l'embouchure du fleuve Comoé en 2025	
Annexe 9 : Débit de la Comoé et de la Mé en 2024	
Annexe 10 : Végétaux aquatiques asséchés (avril 2024) par l'augmentation de la salinité suite à l'ouverture de l'embouchure de la Comoé	
Annexe 11 : Aspect des végétaux aquatiques (avril 2024) après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam	
Annexe 12 : Evolution de la salinité du chenal à la zone de pompage dans la lagune Aghien ...	

INTRODUCTION

Pour le commun des mortels, l'eau est une ressource indispensable à la vie. Elle est utilisée pour la production agricole, l'élevage ainsi que les besoins domestiques et industriels (UNESCO, 2021). Pour assurer ce besoin vital, diverses ressources en eau sont utilisées en fonction des réalités de chaque pays (Koukougnon, 2012 ; UNESCO, 2021 et 2022). Les pays ouest-africains s'alimentent essentiellement par l'exploitation de ces ressources en eau douce de surface et souterraine fortement influencées par les précipitations (Koffi *et al.*, 2019 ; Touré *et al.*, 2020 et 2022 ; Kouadio *et al.*, 2022).

Pour les populations de la ville d'Abidjan, capitale économique de la Côte d'Ivoire, l'alimentation en eau potable est assurée par l'exploitation de la nappe du continental terminal (Soro *et al.*, 2004). Malheureusement, cette nappe fait face à une baisse de son volume due à la surexploitation et à une diminution des infiltrations causée par la réduction des précipitations et l'imperméabilisation des sols (Traoré *et al.*, 2014). De plus, les rejets industriels et les installations anarchiques des populations menacent la qualité chimique de cette ressource, poussant les gestionnaires à abandonner des forages d'eau potable notamment dans la commune du Plateau (Soro *et al.*, 2004 ; Soro *et al.*, 2010). A l'opposée, la demande en eau potable ne cesse d'augmenter du fait de la croissance démographique (INS, 2021). Cette situation fait peser, sur les populations de ce pôle économique d'énormes problèmes d'accès à l'eau potable, caractérisés par un déficit estimé à plus de 58 Mm³ par an (Koffi *et al.*, 2018).

Pour combler ce déficit, des travaux de recherche ont été menés en vue de trouver des ressources complémentaires parmi les ressources à proximité de la ville d'Abidjan pour accroître la disponibilité de l'eau potable (Traoré *et al.*, 2012 et 2015). Ainsi, la lagune Aghien, dont les études ont montré que c'est une lagune d'eau douce qui dispose d'un volume d'eau important, renouvelé par ses tributaires continentaux a été choisie par les autorités ivoiriennes pour produire de l'eau potable (Traoré *et al.*, 2012 ; Koffi *et al.*, 2014).

Pour comprendre le fonctionnement de cet écosystème en vue de son exploitation, des travaux sur l'hydromorphologie (BRLi, 2015 ; Koffi, 2017), l'hydrochimie (Yéo, 2015 ; Traoré, 2016 ; Koffi, 2020), la microbiologique (Yao, 2020), l'hydrologie (Koffi, 2021) et l'utilisation des terres de son bassin versant (Diallo *et al.*, 2018) ont été menés. Les études hydrologiques ont toutefois montré une persistance de la diminution des hauteurs pluviométriques dans le bassin versant de cette lagune (Koffi *et al.*, 2019 ; Koffi, 2021). A cela s'ajoute le pompage de 250 000 m³/jour (soit environ 11 400 m³/h) de la rivière côtière Mé, le plus important tributaire continental de cette lagune en marée haute. Par ailleurs, on assiste à une dégradation du couvert

végétal (Diallo *et al.*, 2018 et 2019) entraînant un apport important de sédiments dans la cuvette de la lagune (Koffi, 2021).

Malgré la densité et l'importance de ces travaux, force est de constater l'absence d'études sur l'impact de la dégradation du couvert végétal, des prélèvements d'eau couplés aux effets des changements climatiques sur le fonctionnement hydro-sédimentaire et la dynamique de la salinité de cette lagune. Pourtant, l'impact des élévations futures du niveau des mers sur la salinité de cette lagune reste un paramètre très important à prendre en compte pour son exploitation à long terme. De telles insuffisances limiteraient considérablement la gestion rationnelle et durable de cet écosystème lagunaire. Pour pallier ces insuffisances, il importe d'étudier la dynamique des masses d'eau et des sédiments de cet écosystème lagunaire à travers une modélisation numérique. Les équations de Saint-Venant (1871), suivant différentes méthodologies de résolution, permettent aujourd'hui de traiter ces problèmes. Ces équations adaptées aux zones fluviales, estuariennes et marine de faibles profondeurs sont la base de plusieurs types de code de calcul existants (Shi, 2006 ; Finaud-guyot, 2009 ; DHI, 2021).

Cette étude, qui se veut non seulement un travail de recherche mais aussi un outil d'aide à décision, a donc été initiée pour évaluer l'influence des pressions anthropiques et des changements climatiques sur le fonctionnement de la lagune Aghien. Elle a pour thème : « **Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire d'une lagune sous l'influence des pressions anthropiques et des variations de la marée : cas de la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire)** ». Ces travaux s'inscrivent dans le projet « Aghien », projet qui vise à renforcer l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan à partir de l'exploitation efficiente et durable de la lagune Aghien.

L'objectif général de cette étude est de modéliser la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion de polluants dans la lagune Aghien. De façon spécifiques, il s'agit de (i) Caractériser la distribution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et la morphologie de la lagune Aghien, (ii) Simuler l'influence des pressions anthropiques et naturelles sur la dynamique hydro-sédimentaire de la lagune Aghien, (iii) Simuler l'influence des pressions anthropiques et des variations de la marée sur la dynamique de la salinité dans la lagune Aghien. Pour atteindre les objectifs fixés, le présent travail a été subdivisé en trois grandes parties distinctes.

La première partie traite de la synthèse bibliographique sur l'environnement physique de la zone d'étude, les équations hydrodynamiques et de transport sédimentaire ainsi que sur le modèle commercial de validation. La deuxième partie expose le matériel et les méthodes de collecte, de mesures *in situ*, d'analyse et de traitement des données utilisées pour mener à bien cette étude. La troisième et dernière partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus suivie de leurs implications et de leurs discussions.

Cette étude s'achève par une conclusion suivie de recommandations et perspectives de recherche.

PREMIERE PARTIE :
GENERALITES

CHAPITRE 1 : CADRE PHYSIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA LAGUNE AGHIEN

Le cadre physique de la zone d'étude concerne ses caractéristiques physiques à savoir la situation géographique, le réseau hydrographique, les pentes, les altitudes, la pédologie, la géologie et le climat de son bassin versant.

1.1. Présentation du bassin versant de la lagune Aghien

Situé au Sud-Est de la Côte d'Ivoire, le bassin versant (BV) de la lagune Aghien est à cheval entre le district d'Abidjan et celui des lagunes. Ce BV est limité au Nord par la ville de Azaguié, à l'Ouest par la commune d'Abobo, à l'Est par la rivière Mé et au Sud par la commune de Bingerville entre les longitudes 3°48'0"W et 4°08'0"W et les latitudes 5°23'0"N et 5°37'0"N. Il couvre une superficie de 351 km² soit 35 100 ha (Figure 1). Ce bassin draine les eaux des rivières Bété et Djibi (Goé *et al.*, 2024) dont les BV ont des superficies respectives de 216 km² et 78 km² (Koffi, 2021). Ces deux rivières constituent les principaux affluents de la lagune Aghien en marée basse (Goé *et al.*, 2024). La lagune Aghien, longue d'environ 11 km pour une largeur de près de 2 km par endroit, se situe entre les longitudes 3°48'0"W et 3°56'0"W et les latitudes 5°23'0"N et 5°27'0"N. Cette lagune est reliée à la lagune Potou, située dans sa partie Sud-est, par un chenal naturel dans lequel se jette la rivière Mé pour rejoindre les lagunes Aghien et Potou respectivement en marée haute et en marée basse. Les rivières Djibi et Bété sont les principaux cours d'eau du bassin versant de la lagune Aghien (Figure 1). Elles constituent les tributaires permanents d'origine continentale de cette lagune en marée basse. Cependant, lors de la montée du niveau de l'océan, la houle qui franchi le canal de Vridi se propage jusqu'à se déverser dans la lagune Aghien, propulsant avec elle, les eaux de la rivière côtière Mé qui devient ainsi un tributaire périodique de cette lagune. La rivière Mé joue donc un rôle important dans la dilution de la salinité des eaux de l'Atlantique avant leur déversement dans la lagune Aghien. Les altitudes dans le BV de cette lagune varient de 22 à 163 m. Les altitudes les plus élevées (163 m) s'observent majoritairement dans le voisinage de la commune d'Abobo. Dans la partie Nord-ouest et Ouest du BV, les altitudes atteignent 122 m. Les basses altitudes s'observent principalement au voisinage du plan d'eau lagunaire (Figure 1).

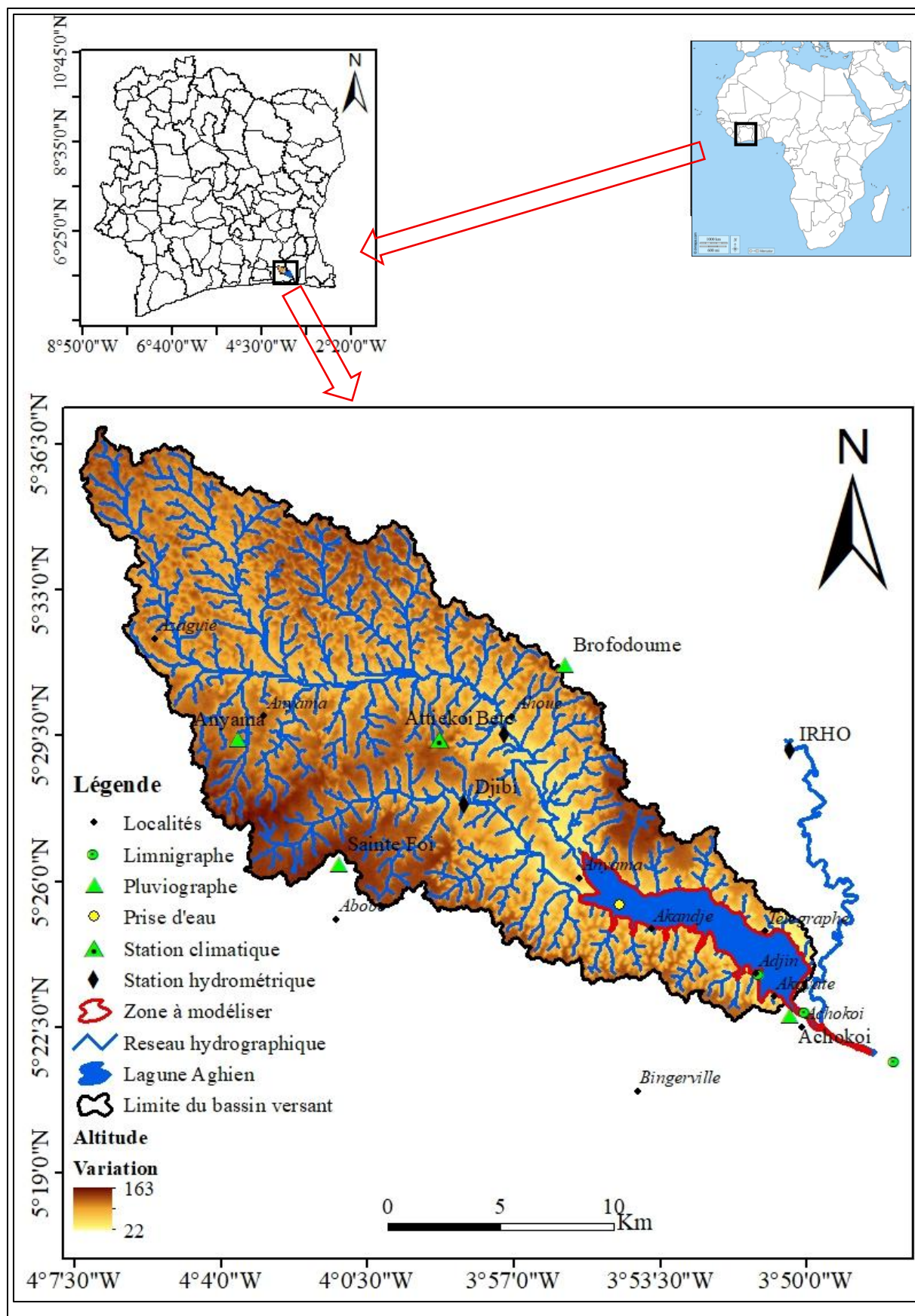


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la lagune Aghien

1.2. Climat du bassin versant de la lagune Aghien

Les températures, les précipitations, l'ensoleillement, l'humidité relative, les vitesses et directions du vent constituent les éléments du climat (Kouassi *et al.*, 2010). La distribution de ces éléments dans la région du Sud-est est réglée par le déplacement saisonnier des masses d'air (harmattan et la mousson). Dans cette étude, les données utilisées pour l'étude générale du climat sont celles enregistrées par les stations installées sur le bassin versant (BV) de la lagune Aghien et la station de IRHO La Mé. Ces données couvrent la période 2015-2021 pour celles des stations de Aghien et 1971-2016 pour la station de IRHO la Mé.

1.2.1. Pluviométrie du bassin versant de la lagune Aghien

Le climat du bassin versant de la lagune Aghien est de type équatorial de transition à l'instar de celui du district d'Abidjan (Oga *et al.*, 2016). La représentation graphique couplée des températures et des précipitations moyennes mensuelles de 1971 à 2016 permet de déceler les saisons sèches et humides (Figure 2). Ainsi, le climat de ce BV est subdivisé en quatre (4) grandes saisons qui marquent le cycle hydrologique (Koffi, 2021) :

- une grande saison des pluies qui s'étend de mars à juillet et centrée sur le mois de juin. Dans cette période les précipitations mensuelles oscillent entre 90 et 365 mm ;
- une petite saison sèche, de courte durée et pas bien marquée, qui couvre la période août-septembre. Dans cette période, les volumes de précipitation atteignent à peine 80 mm le mois ;
- une petite saison des pluies allant d'octobre à novembre et où les précipitations maximales n'atteignent pas 180 mm par mois ;
- une grande saison sèche. Elle part de décembre à février avec les plus faibles précipitations. Les précipitations y dépassent à peine les 25 mm par mois.

Les enregistrements à la station d'IRHO la Mé montrent une pluie moyenne mensuelle interannuelle comprise entre 23,0 mm (janvier) et 364,4 mm (juin) avec une moyenne interannuelle de 1 522,00 mm. Le nombre de jours de pluie dans un mois varie entre 2 jours (janvier) et 20 jours (juin) avec une moyenne annuelle de 137 jours de pluie. La température moyenne mensuelle dans le bassin versant sur la période de 1971 à 2016 oscille entre 24°C (août) et 28°C (mars). Les températures les plus élevées s'observent de février à mai (entre la fin de la saison sèche et le début de la saison des pluies). L'apparition des nuages pendant la saison des pluies, entraîne une chute de la température dont la plus faible est enregistrée au mois d'août.

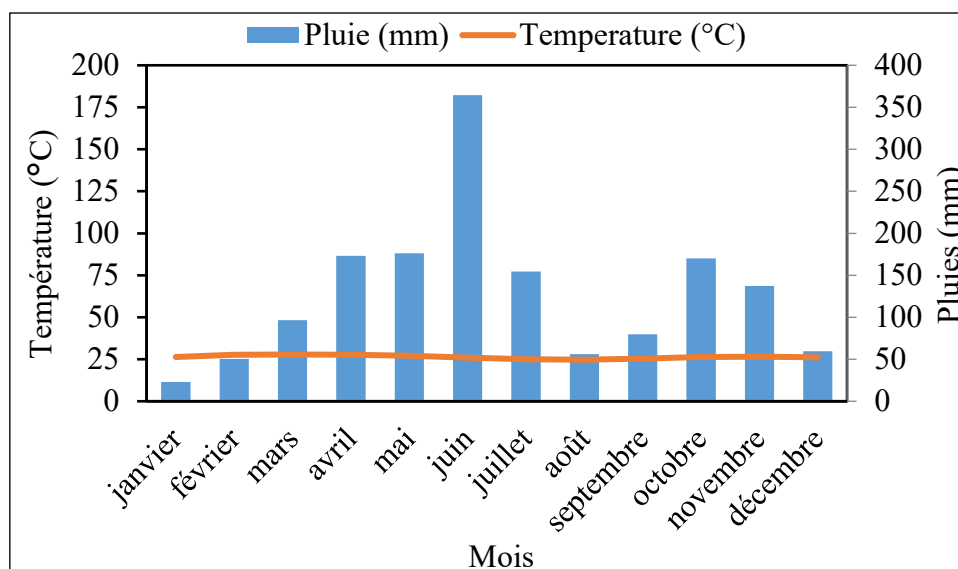


Figure 2 : Courbe ombrothermique à la station d'IRHO La Mé (1971-2016)

Pour une analyse plus spécifique au niveau des BV des rivières Djibi et Bété, les données climatiques CHIRPS de résolution 5 km² couvrant la période 1981-2020 ont été statistiquement analysées (Tableaux I).

Tableau I : Description statistique des données CHIRPS sur la période 1981-2020

Nombre d'année	40 (1981-2020)
Cumul moyen annuel	1 612 mm
Ecart-type	1 85,5 mm
25 ^{ème} centile	1 450 mm
50 ^{ème} centile	1 657 mm
75 ^{ème} centile	1 740 mm

Le cumul moyen des précipitations sur cette période est de 1 612 mm de pluies pour un écart-type de 185,5. Des quartiles des cumuls de la période 1981-2020, il ressort que sur le bassin versant de la lagune Aghien, lors de la dernière décennie (2010-2020), les années 2013 et 2016 ont été sévèrement sèches (avec un cumul inférieur à 1 400 mm de pluie). Les années 2015 et 2018 sont également marquées comme sèches mais avec un cumul supérieur à 1 400 mm. Les années 2010, 2011, 2014, 2017, 2019 et 2020 sont toutes humides avec un cumul supérieur ou égal à 1 700 mm (Figure 3).

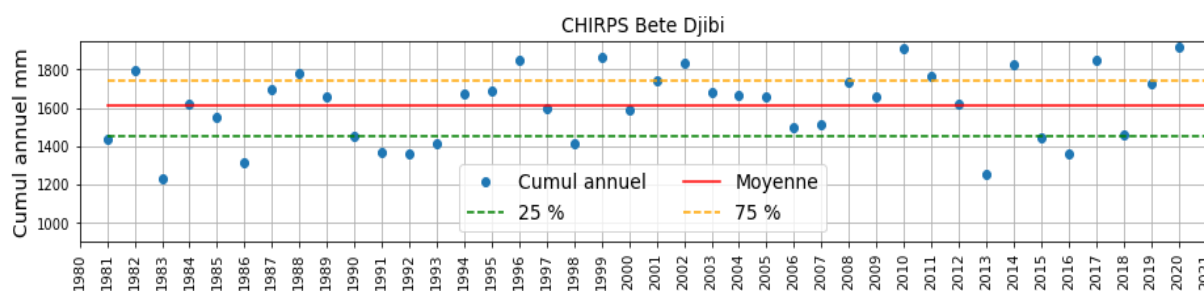


Figure 3 : Cumul pluviométrique moyen annuel sur le bassin versant de la lagune Aghien sur la période 1981-2020 avec les données CHIRPS

1.2.2. Humidité relative, vitesse et direction des vents

1.2.2.1. Vitesse et direction des vents

La position du Front Intertropical (F.I.T) détermine la nature du vent (Hildeberg, 1952). Lorsque la trace au sol du F.I.T est au Nord de la région lagunaire, c'est-à-dire pendant la majeure partie de l'année, soufflent les alizés de l'hémisphère austral ou mousson. Ces vents assez réguliers, de secteur Sud et Sud-ouest, et de vitesse comprise entre 1 et 2,5 m.s⁻¹, diminuent pendant la nuit. Pendant cette période, plus rarement, et surtout en avril, se produisent les tornades (violents orages accompagnés de vents tourbillonnaires qui ne durent que quelques heures). En janvier, lorsque le F.I.T. atteint sa position la plus méridionale, la Côte d'Ivoire est entièrement soumise à l'alizé de l'hémisphère boréal, nommé localement harmattan (vent sec et chargé de poussières) de secteur Nord-est (Eldin, 1971). Il ne souffle au niveau du district d'Abidjan qu'une dizaine de jours par an. Plus fréquemment par contre, entre décembre et mars, il souffle en altitude. Le ciel est alors uniformément couvert et de couleur gris-plomb. Le tableau II montre les statistiques des directions moyennes journalières des vents sur la période 2015-2021 enregistrées par la station climatique de Sainte Foi.

Tableau II : Statistique des direction moyenne journalière des vents sur la période 2015-2021 dans le bassin versant de la lagune Aghien

	Années						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Moyenne	174,18	175,75	170,06	172,24	158,57	164,83	66,80
Médiane	183,10	183,19	171,02	177,43	165,22	164,94	0,00
Écart-type	35,02	36,56	37,02	33,97	42,22	37,22	85,04
Minimum	73,34	39,58	51,55	62,09	0,00	62,41	0,00
Maximum	229,86	237,79	247,26	263,78	254,78	237,63	234,51

Sur la période 2015 à 2021, l'angle formé par la direction du vent et le Nord géographique (Azimut) a varié entre 0 et 270° sur le BV de la lagune Aghien. Les directions dominantes sont

situées entre 100 et 200°. Elles correspondent pour la plupart à des directions Sud-Ouest (celles empruntées par les vents de la mousson). Ces vents soufflent presque toute l'année. Les directions en dessous de 100°, dominantes entre décembre et janvier, correspondent aux directions Nord-Est (empruntées par l'harmattan).

Le tableau III montre la statistique des directions moyennes mensuelles des vents de la lagune Aghien.

Tableau III : Statistique des directions moyennes mensuelles des vents dans le bassin versant de la lagune Aghien sur la période 2015-2021

	Années						
Azimut (°)	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Moyenne	174,52	175,75	169,96	172,29	158,64	164,67	78,65
Médiane	183,48	176,01	161,46	172,58	158,96	162,31	67,14
Écart-type	28,19	21,05	22,13	18,99	26,26	24,93	75,02
Minimum	119,08	142,48	144,07	138,68	96,81	126,98	1,49
Maximum	196,27	203,60	210,04	199,01	193,60	202,49	178,83

Les directions moyennes mensuelles dominantes sur la période 2015-2021 sont entre 150 et 200° (vents de mousson) et très peu en dessous de 100° (vents d'harmattan). Cela voudrait dire que le bassin versant est très peu influencé par l'harmattan comme c'est le cas de la ville d'Abidjan.

1.2.2.2. Humidité relative

L'humidité relative de l'air a été analysée sur la période 2011-2016 à la station de Hiro La Mé. Sa valeur oscille entre 77 et 87 %. Elle part de 77,8 % (en janvier) en évoluant de façon croissante pour atteindre son pic en juin (86,4 %). Après cette ascension, elle chute de façon lente jusqu'en décembre où elle atteint 83,5 % (Figure 4).

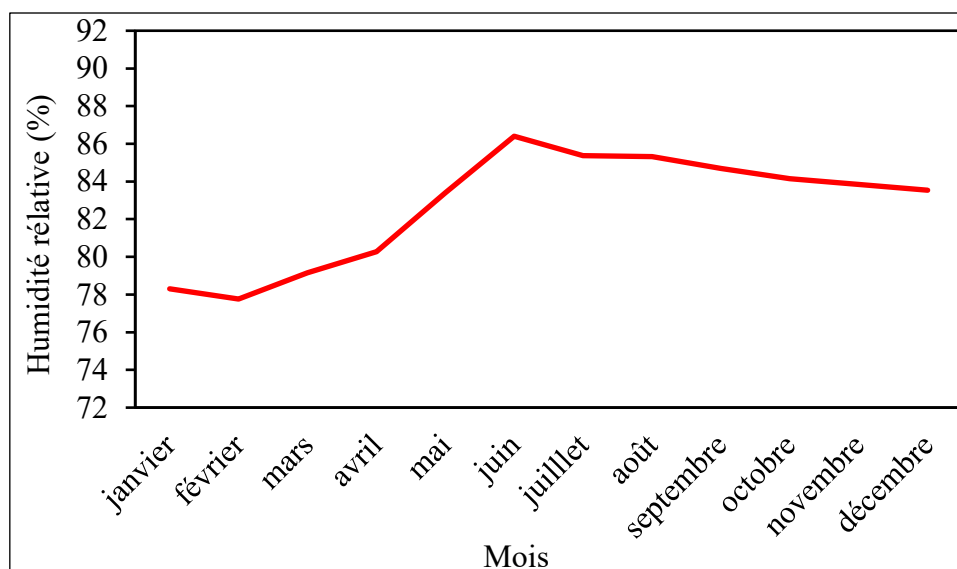


Figure 4 : Humidité relative à la station d'IRHO La Mé sur la période 1971-2016

1.3. Hydrométrie des tributaires de la lagune Aghien

1.3.1. Tributaires fluviaux

Les rivières Djibi et Bété sont les principaux cours d'eau qui alimentent de façon permanente la lagune Aghien (Figure 1). Cependant, lors de la montée du niveau de l'océan, la marée qui franchi le canal de Vridi se propage jusqu'à se déverser dans la lagune Aghien (Goé *et al.*, 2024). Sur son passage, elle emporte avec elle vers la lagune Aghien les eaux de la Mé qui se déverse au niveau du chenal reliant les lagunes Potou et Aghien. La Mé devient ainsi un tributaire périodique de la lagune Aghien qui joue un rôle important dans la dilution de la salinité des remontées marines. Dans l'ensemble, les apports sont importants de juin à fin juillet avec une reprise au début du mois de septembre (Figure 5).

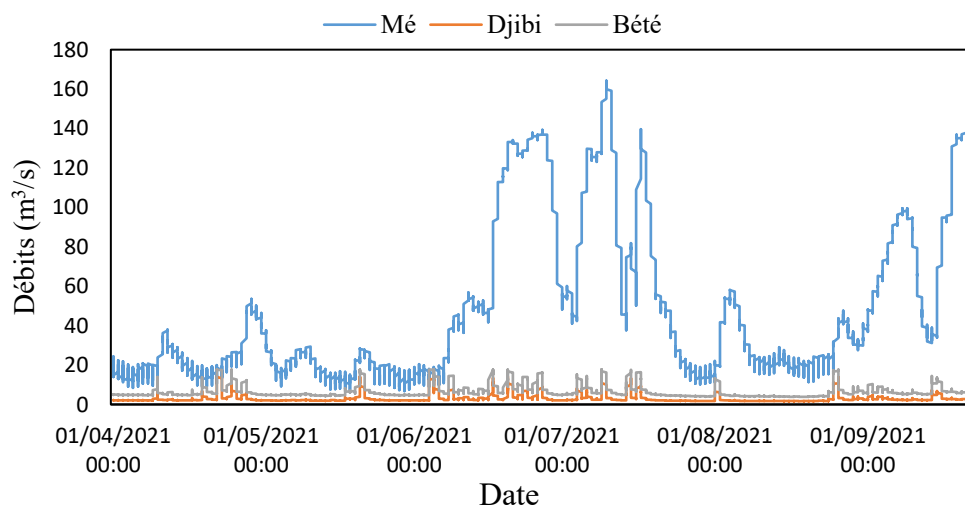


Figure 5 : Hydrométrie des tributaires de la lagune Aghien

La statistique des données de débits des rivières Djibi, Bété et Mé (Tableau IV) donne plus de détails sur la variation des apports de chaque tributaires.

Tableau IV : Statistique descriptive des apports fluviaux dans la lagune Aghien

Paramètres statiques	Mé (m ³ /s)	Djibi (m ³ /s)	Bété (m ³ /s)
Maximum	164,1	14,2	17,6
Minimum	6,8	1,6	3,8
Moyenne	46,9	2,9	6,4
Ecart-type	40,1	1,8	2,9

L'analyse de la statistique descriptive des apports de la Mé montre qu'ils varient de 6,8 m³/s à 164,1 m³/s pour un débit moyen de $46,9 \pm 40,1$ m³/s. Au niveau de la Bété, les débits varient de 3,8 m³/s à 17,6 m³/s pour une moyenne de $6,4 \pm 2,9$ m³/s. La Djibi est le tributaire le plus faible en termes d'apports liquides avec des débits allant de 1,6 m³/s à 14,2 m³/s pour une moyenne de $2,9 \pm 1,8$ m³/s.

1.3.2. Marée dynamique

Par définition, la marée est la variation de la hauteur du niveau des mers et des océans. Elle est causée par la combinaison des forces d'inertie, de l'attraction de la terre et des forces gravitationnelles exercées par les astres (lune et le soleil) sur l'océan (Monde, 2004 ; Tano, 2017 ; Tano *et al.*, 2018 ; Samassy *et al.*, 2023). En fonction de la position de la terre, le cycle du flux (marée montante) et du reflux (marée descendante) peut avoir lieu une fois (marée diurne) ou deux fois par jour (marée semi-diurne). Dans le golfe de Guinée (incluant les côtes ivoiriennes), la marée est de type semi-diurne à inégalité diurne (Figure 6) c'est-à-dire que la différence entre les hauteurs de la basse et pleine mer sont importantes (Samassy, 2019). La lagune Aghien, située à un peu plus de 45 km de l'entrée la plus proche des eaux de l'Atlantique, reçoit les remontées marines en marée haute. Cependant, le marnage (différence de niveau entre la pleine mer et la basse mer) est seulement d'environ 30 cm (BRLi, 2015). Cette variation indique une prépondérance de l'effet des frottements sur le rétrécissement de la marée jusqu'à la lagune Aghien. Ainsi, la lagune Aghien est une lagune Hyposynchrone (Chaalali, 2013).

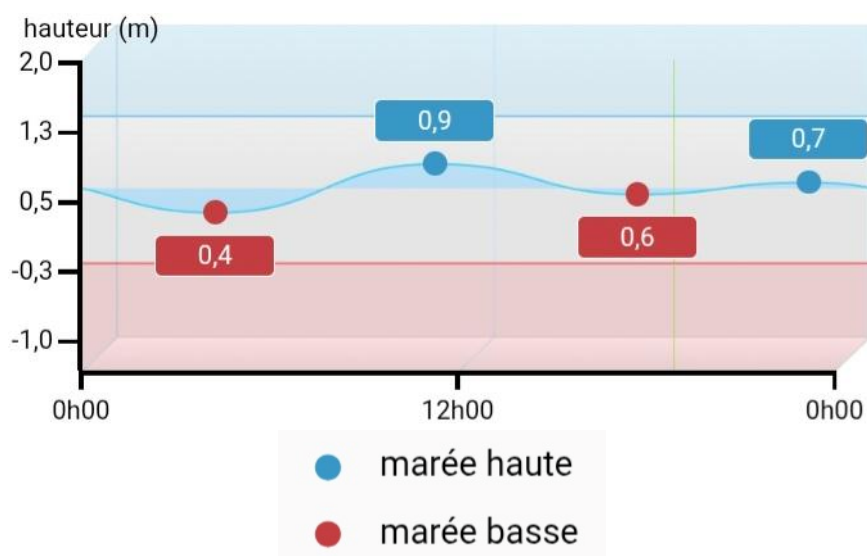


Figure 6 : Marée dynamique à Abidjan entrée du 03/06/2025

Source : <https://mareespeche.com/rc/cote-divoire/abidjan-entree>

1.4. Relief du bassin versant de la lagune Aghien

Les pentes dans le BV de la lagune Aghien sont relativement faibles. Elles varient entre 0 et 43°. Les plus élevées s'observent dans la partie Sud (commune de Bingerville). Dans la partie Nord, elles dépassent 11° (Figure 7). Sur l'ensemble du BV, la pente moyenne est évaluée à 6,8° pour une déviation standard de 5,1°.

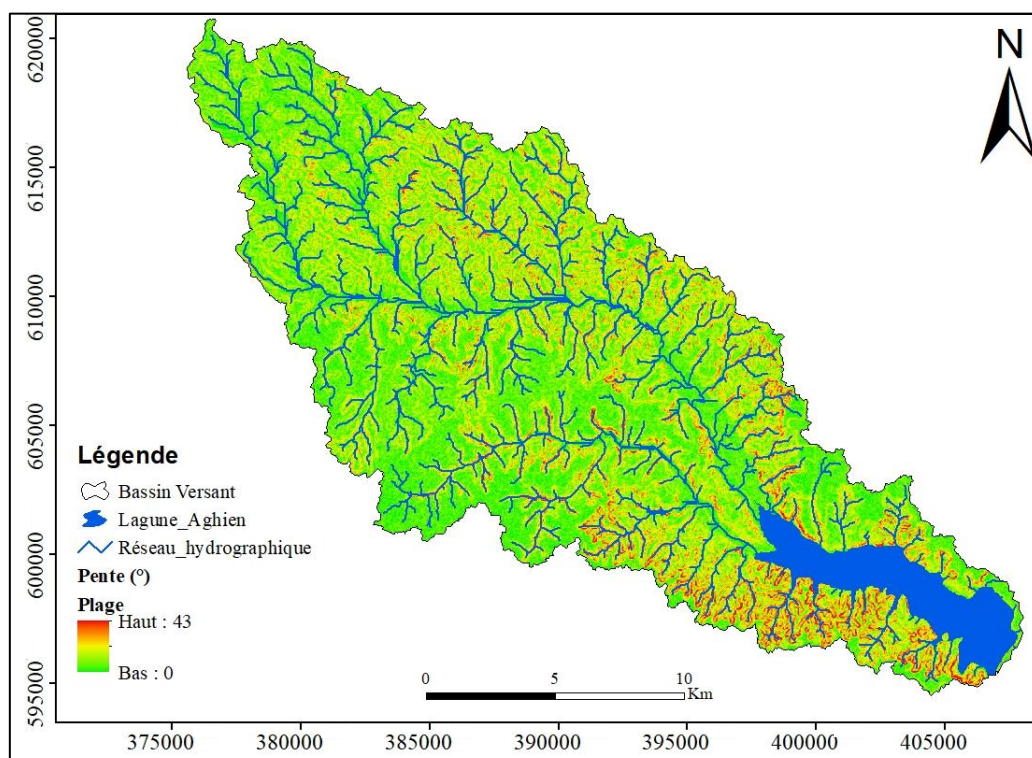


Figure 7 : Carte des pentes du bassin versant de la lagune Aghien

1.5. Pédologie et occupation des sols dans le bassin versant de la lagune Aghien

1.5.1. Pédologie du bassin versant de la lagune Aghien

Plusieurs travaux de recherche permettent la connaissance de la pédologie de la zone Sud-Est de la Côte d'Ivoire (Tagini, 1971 ; Yacé, 1976 ; Vidal, 1987 ; Kouamelan, 1996). Il ressort de ces travaux que le BV de la lagune Aghien est constitué de sols ferralitiques lessivés en bases, précisément de matériaux argilo-sableux et sablo-argileux et de matériaux sableux. Les sols ferralitiques fortement désaturés recouvrent presque toute la surface du bassin versant. Les sols hydromorphes organiques s'observent dans la partie Nord de la lagune Aghien dans la zone du village Ahoué (Figure 8).

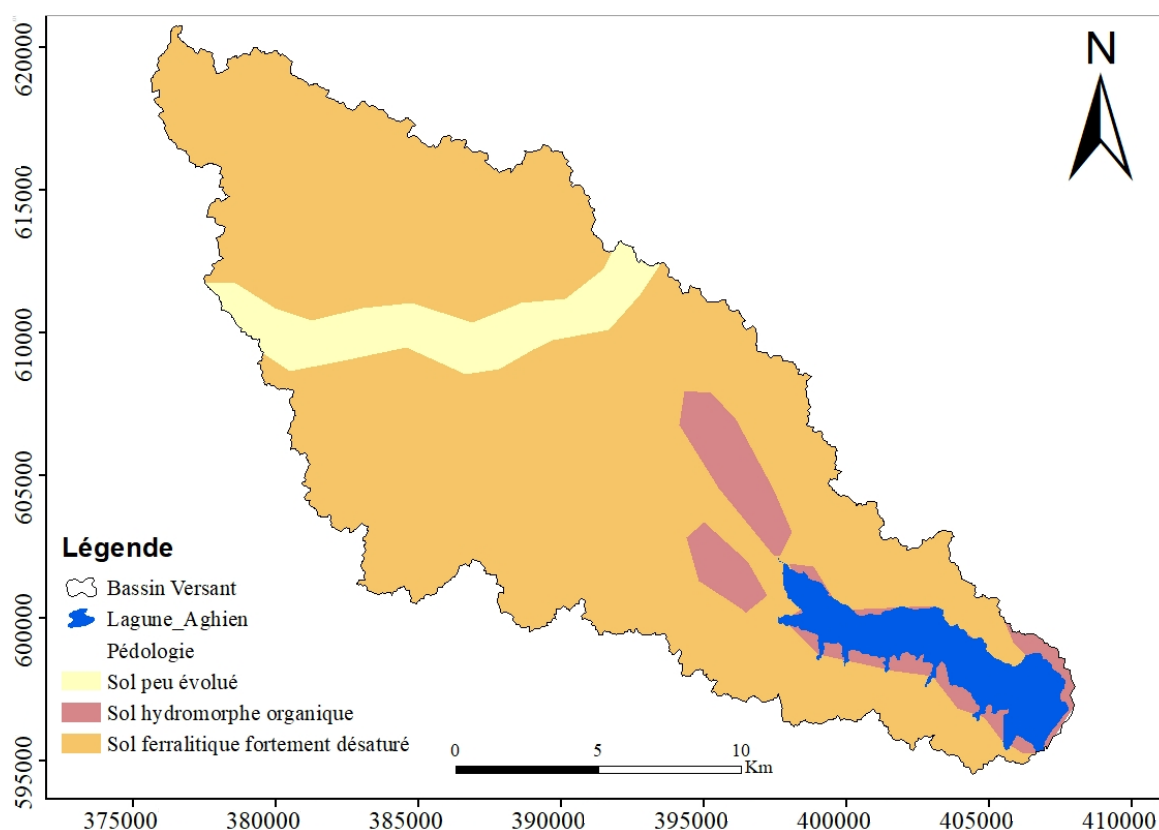


Figure 8 : Carte de la pédologie du bassin versant de la lagune Aghien

1.5.2. Occupation des sols du bassin versant de la lagune Aghien

Trois zones caractérisent la couverture végétale du bassin versant de la lagune Aghien : la forêt, la savane et les habitats et sols nus. Cet ensemble est transformé par les cultures industrielles (palmiers à huile et hévéas) en forêt, culture vivrière et maraîchère en savane et les habitats et sols nus. Selon Diallo *et al.* (2018), de 2000 à 2015 la superficie des sols nus et habitats s'est accrue au détriment de celle des cultures de rentes. Sur cette période, les ilots ont également vu leurs superficies se réduire au profit de celles des cultures et jachères. Pour Koffi (2021), cette

remarque est pertinente sur le bassin versant à cause de la forte proportion de sol nu (synonyme d'activités anthropiques intenses) dans la partie Sud en relation avec les zones de forte densité de population. En 2020, la majeure partie de la proportion des forêts et cultures industrielles se concentre dans la partie Nord de la lagune Aghien (Nord et Nord-Est). Dans la partie Sud et Sud-Ouest du BV, la surface des forêts et cultures industrielles s'est considérablement réduite pour laisser place aux habitats et sols nus. Les zones Nord et Nord-Est renferment des forêts denses du fait de leurs faibles densités de population. Dans la zone Nord-Ouest, par contre, la forêt est quasiment dégradée. Elle est progressivement remplacée par les habitats et les surfaces agricoles (Figure 9). De plus, la mangrove connaît une destruction accélérée au profit des plantations industrielles, villageoises et de l'élevage.

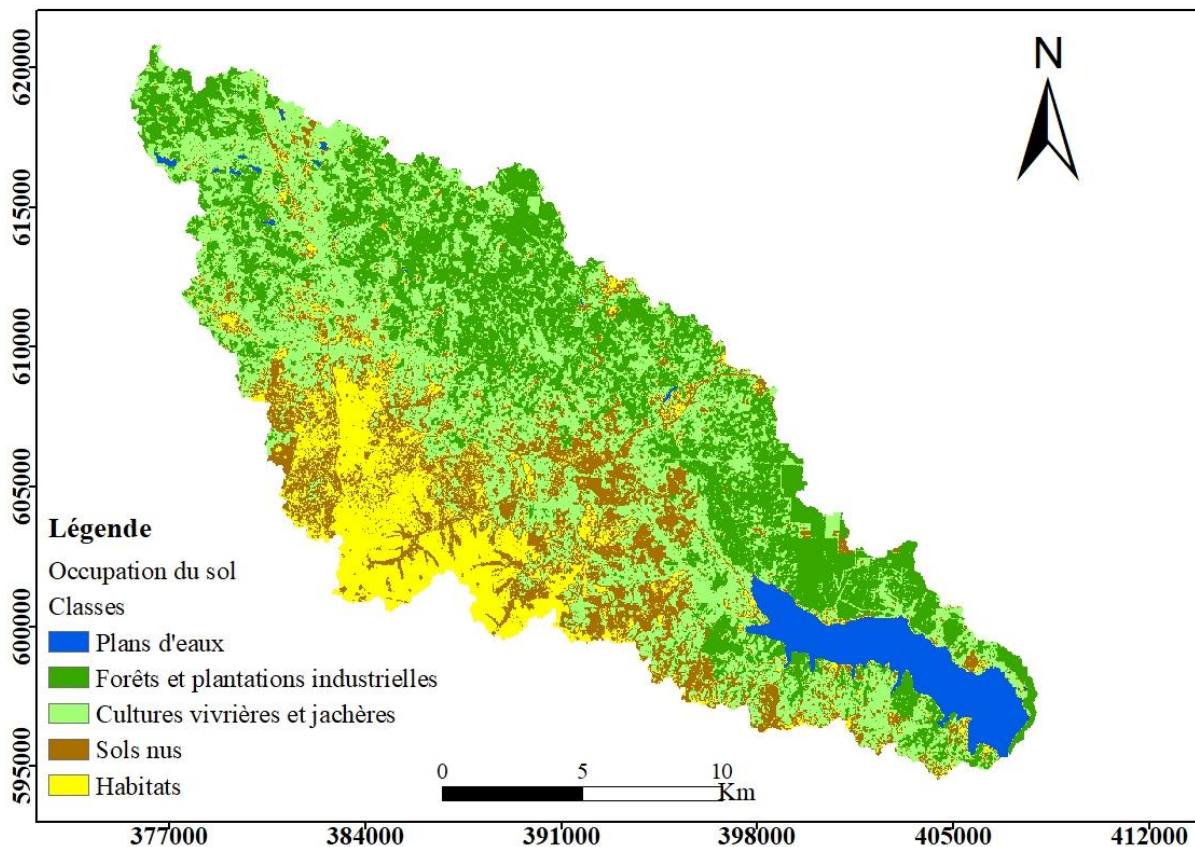


Figure 9 : Carte de l'occupation des sols du bassin versant de la lagune Aghien (Année 2020)

1.6. Géologie du bassin versant de la lagune Aghien

Selon les travaux de Kouamelan (1996), le BV de la lagune Aghien renferme trois (3) ensembles de formations géologiques à savoir (Figure 10) :

- les granitoïdes subalcalins à deux (2) micas ;
- les sédiments sablo-argileux et argilo-sableux ;
- les conglomérats, grès et schistes.

Les sédiments sablo-argileux et argilo-sableux sont les formations géologiques les plus importantes. Ils occupent la partie Sud, Ouest et Est du bassin versant. Les conglomérats, grès et schistes sont également en proportion importante. Localisés au Nord et Nord-Ouest, ils occupent la deuxième place derrière les sédiments sablo-argileux et argilo-sableux. Les granitoïdes alcalins à deux (2) micas se rencontrent uniquement au Nord du bassin dans le district des lagunes et recouvrent une faible proportion du bassin versant.

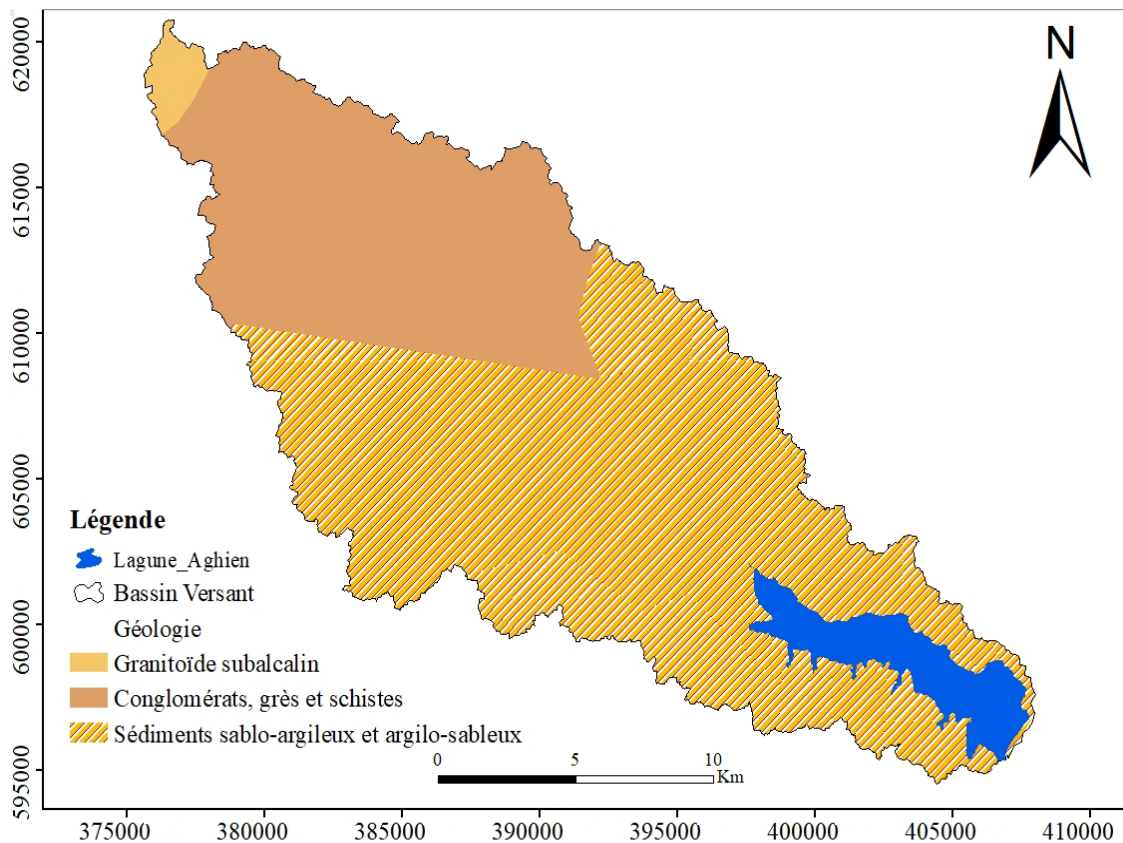


Figure 10 : Carte de la géologie du bassin versant de la lagune Aghien

Conclusion partielle

Le bassin versant de la lagune Aghien, situé au Nord-Est du district d'Abidjan, est caractérisé par un climat de type équatorial de transition avec quatre (4) saisons dont deux (2) saisons sèches et deux (2) saisons des pluies. La pluviométrie moyenne annuelle y est évaluée à 1612 mm avec des vents relativement moins violents dont les vitesses varient de 1 à 2,5 m/s suivant une direction majoritaire de 0 à 100° l'année. Les faibles vitesses des vents rendent l'air de ce bassin versant moins humide dont les valeurs oscillent entre 77 et 87 %. De façon générale, le relief y est très peu accidenté avec des altitudes maximales inférieures à 170 m à l'origine des pentes relativement faibles dont la moyenne est de $6,8 \pm 5,1^\circ$. La pédologie de ce bassin versant est dominée par les sols ferralitiques fortement désaturés qui ont favorisé le développement des

cultures industrielles dans ce bassin. Les formations sédimentaires argilo-sableuses et sablo-argileuses ainsi que les conglomérats, grès et les schistes dominent la géologie de ce bassin versant qui draine les eaux des rivières Djibi et Bété. Ces rivières constituent les tributaires de la lagune Aghien en marée basse auxquelles s'ajoutent celles provenant de la lagune Potou et de la rivière Mé en marée haute.

CHAPITRE 2 : ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE ET LE TRANSPORT SEDIMENTAIRE

2.1. Etat de l'art sur la modélisation hydrodynamique

L'étude mathématique des écoulements à surface libre (Figure 11) a débuté lors de l'essor de l'ensemble des théories mécaniques, avec les travaux de Laplace (1776) et de Lagrange (1781) sur la propagation d'ondes à la surface des canaux. Elles ont permis l'élaboration des équations de Navier-Stokes grâce aux travaux de Navier (1823) et Stokes (1845). Ces équations basées sur le principe de la conservation de la quantité de mouvement résultent en fait de la relation fondamentale de la dynamique des fluides. Dès 1871, Barré de Saint-Venant (Saint-Venant, 1871) réussit à représenter mathématiquement le mouvement unidimensionnel des eaux à surface libre par un système d'équations aux dérivées partielles en intégrant sur la profondeur les équations de Navier-Stokes. Ces équations servent aujourd'hui de base aux modèles mathématiques d'écoulement à surface libre.

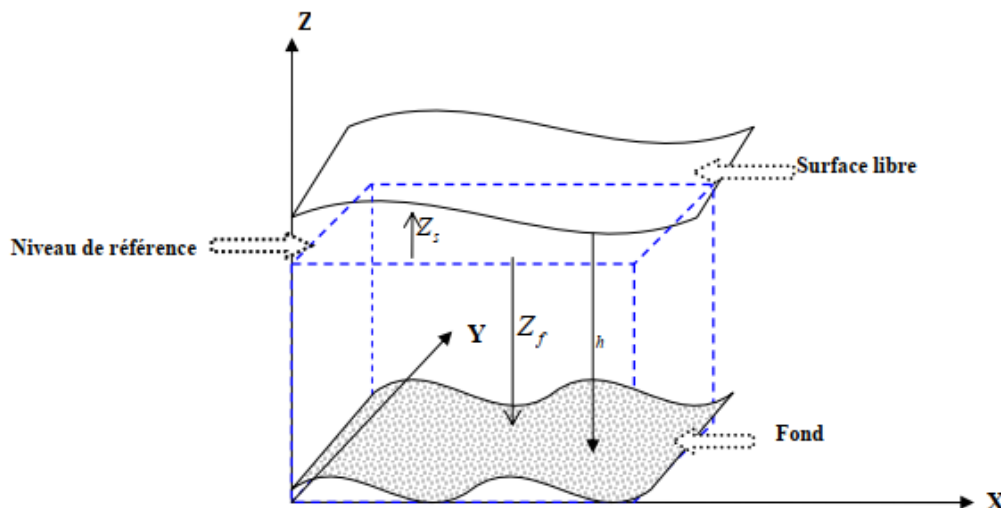


Figure 11 : Représentation des variables d'une section d'écoulement

Source : Shi (2006)

Z_f est la cote du fond, Z_s la cote de la surface libre de l'eau et h la hauteur d'eau

2.1.1. Hypothèses de Saint-Venant

L'intégration sur la verticale des équations de Navier-Stokes permettant d'obtenir les équations de Saint-Venant se base sur les hypothèses de la pression hydrostatique, de l'imperméabilité du fond et de la surface ainsi que sur l'hypothèse de Boussinesq (Saint-Venant, 1871).

2.1.1.1. Hypothèse de la pression hydrostatique

Elle exprime une distribution linéaire et donc hydrostatique de la pression sur la verticale (Equation 1) :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1)$$

Cette hypothèse permet de traduire la pression en termes de hauteur d'immersion à une coordonnée verticale ascendante z quelconque (Equation 2) (Shi, 2006) :

$$p(x, y, z) = \rho g(z_s - z_i) = \rho gh \quad (2)$$

Avec p : la pression, ρ : la masse volumique du liquide, g : la pesanteur, z_i : un niveau d'eau donné et h : la hauteur d'eau.

2.1.1.2. Hypothèse de l'imperméabilité du fond et de la surface

Selon Shi (2006), cela revient à supposer qu'il n'y a pas de transfert de masse à travers le fond et la surface libre et qu'une particule d'eau située sur une de ces deux surfaces y restera au cours du temps (Equation 3).

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + U \frac{\partial Z}{\partial x} + V \frac{\partial Z}{\partial y} - W = 0 \quad (3)$$

Avec, U , V et W les composantes de vitesses dans les directions ox , oy et oz au fond ou à la surface de l'eau. z est la profondeur de l'eau.

2.1.1.3. Hypothèse de Boussinesq

Cette hypothèse permet de négliger les variations de la densité de l'eau ($\Delta\rho$) par rapport à la densité de référence ρ_0 ($\Delta\rho \ll \rho_0$) dans les équations de quantités de mouvements à l'exception de celles rencontrées dans le terme de gravitation ou terme de flottabilité (Shi, 2006). Ainsi, dans un fluide incompressible, la densité de l'eau est donnée par l'équation 4 :

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \simeq \rho_0 \quad (4)$$

Avec ρ la densité de l'eau.

2.1.2. Modèle de Saint-Venant

L'application des hypothèses aux équations de Navier-Stokes moyennées permet d'obtenir l'équation de Saint-Venant (Saint-Venant, 1871) sous la forme générale pour les eaux peu profondes (Equation 5, 6 et 7) :

Equation de continuité :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

Equation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + fhv - \frac{\tau_{fx}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} + \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} \quad (6)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} - fhv - \frac{\tau_{fy}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} \quad (7)$$

Dans ces équations, h est la hauteur de la colonne d'eau, u et v sont les composantes de la vitesse dans les directions X et Y, η est la variation de la surface libre de l'eau, g est l'intensité de la pesanteur, p_A est la pression atmosphérique, ρ_0 est la densité de référence de l'eau, ρ la densité de l'eau étudiée, f est la force de Coriolis, τ_f est la contrainte due à la rugosité du fond, τ_s est la contrainte due au frottement du vent à la surface, T est la contrainte due à la rugosité des parois et à la viscosité turbulente de l'eau.

La contrainte due au frottement à la surface est exprimée selon l'équation (8) (DHI, 2021) :

$$\tau_s = \rho_a C_d \sqrt{u_w^2 + v_w^2} u_w \quad (8)$$

Avec ρ_a est la densité de l'air, u_w et v_w sont les composantes de la vitesse du vent, C_d représente le coefficient de trainé de l'air qui est égal à :

$$\begin{cases} C_a \text{ si } W_{10} < W_a \\ \frac{C_b - C_a}{W_b - W_a} (W_{10} - W_a) \text{ si } W_a < W_{10} < W_b \\ C_b \text{ si } W_b \leq W_{10} \end{cases} \quad (9)$$

Rappelons que $C_a = 1,255 \cdot 10^{-3}$, $C_b = 2,425 \cdot 10^{-3}$, $W_a = 7\text{m/s}$ et $W_b = 25\text{m/s}$ sont des constantes.

La contrainte exercée par le fond sur le fluide est donnée par l'équation (10) (Shi, 2006) :

$$\tau_f = \frac{1}{2} \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} u \quad (10)$$

Où C_f est le coefficient de trainé au fond exprimé par l'équation 11 (Shi, 2006) :

$$\begin{cases} C_f = \frac{2g}{C_h^2} \\ C_h = K_s h^{1/6} \end{cases} \quad (11)$$

Où K_s ($m^{1/3}/s$) est le coefficient de Strickler et C_h est le coefficient de Chézy.

La densité de l'eau dans ces relations est exprimée en fonction de la salinité et de la température (Equation 12) (DHI, 2021) :

$$\rho = \rho_0 + AS + BS^{1,5} + CS^2 \quad (12)$$

Où ρ_0 est la densité de référence qui est modélisée par l'équation (13).

$$\rho_0 = 999,842594 + 6,793952 \cdot 10^{-2}T - 9,095290 \cdot 10^{-3}T^2 + 1,001685 \cdot 10^{-4}T^3 - 1,120083 \cdot 10^{-6}T^4 + 6,536332 \cdot 10^{-9}T^5 \quad (13)$$

Dans l'équation (12), C ($C = 4,9054 \cdot 10^{-4}$) est une constante et les inconnues A et B sont modélisées suivant la loi de Poisson *et al.* (1980) (équations 14 et 15) :

$$A = 8,24501 \cdot 10^{-1} - 4,0639 \cdot 10^{-3}T + 7,5719 \cdot 10^{-5}T^2 - 8,8910 \cdot 10^{-7}T^3 + 6,616 \cdot 10^{-9}T^4 \quad (14)$$

$$B = -5,7728 \cdot 10^{-3} + 9,7437 \cdot 10^{-5}T - 1,3747 \cdot T^2 \quad (15)$$

Les force de frottements latéraux sont modélisées comme suit (Equation 16) :

$$T_{xx} = 2v \frac{\partial u}{\partial x} \quad ; \quad T_{xy} = v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \text{et} \quad T_{yy} = 2v \frac{\partial v}{\partial y} \quad (16)$$

Où : T_{xx} est la friction due à la viscosité, T_{xy} la friction turbulente et T_{yy} l'advection différentielle.

Où v est la viscosité turbulente donnée par l'équation 17 de Elder (1959) :

$$v = \frac{6h}{C_h} \sqrt{g(u^2 + v^2)} \quad (17)$$

En tenant compte des équations précédentes, les équations (5, 6 et 7) deviennent (Equation 18, 19 et 20) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2vh \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{fx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(2vh \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{fy}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (20)$$

Ces équations (18, 19 et 20) peuvent être écrites sous forme compacte suivante (Equation 21) :

$$\frac{\partial h\phi}{\partial t} + \frac{\partial hu_i\phi}{\partial x_i} + \frac{\partial hv_j\phi}{\partial y_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (21)$$

Où ϕ est la quantité transportée ; Γ_ϕ est le coefficient de diffusion et S_ϕ est le terme source. Pour accélérer la convergence de la solution et éviter l'apparition de solutions non physiques, le terme source est donné sous la forme (Equation 22) :

$$S_\phi = S_c + S_p\phi \quad (22)$$

Où $S_p < 0$

Dans ces équations de Saint-Venant, les variables dépendantes sont choisies selon des formulations données dans le tableau V.

Tableau V : Comparaison de la formulation des équations de Saint-Venant

Forme	Formulations	Application	Remarque
Conservative	u, v, h	Ecoulement	Front discontinu
	q_x, q_y, h	hyperbolique, ressaut hydraulique	avec problème des termes source
Non conservative	u, v, Z_S	Ecoulement dans les rivières, les estuaires	Conservation de masse
	q_x, q_y, Z_S	et les zones côtières à fond irrégulier	Meilleure conservation de masse

Source : Shi (2006)

Dans le cas de nos travaux, la formulation « débits-hauteur d'eau » est utilisée suivant un schéma de discrétisation adapté.

2.1.3. Méthodes de discrétisation

Le choix d'une méthode de discrétisation est une étape indispensable dans le développement d'un modèle numérique. Il existe trois méthodes principales de discrétisation des équations aux dérivées partielles (EDPs) à savoir la méthode des différences finies, des éléments finis et des volumes finis. Ces trois méthodes de discrétisation se distinguent les unes des autres par leurs forces et limites (Shi, 2006).

2.1.3.1. Méthode des différences finies (MDF)

Elles consistent à discrétiser, à l'aide d'un maillage de calcul prédéfini, chaque dérivée partielle d'une variable dans l'équation différentielle partielle (EDP). Cette discrétisation se fait grâce au développement en série de Taylor de la valeur de la variable. La méthode permet d'obtenir des relations linéaires entre la valeur de la variable en un nœud donné et ses valeurs aux nœuds voisins du maillage de calcul. La méthode aux différences finies a une grande simplicité de culture et un faible coût de calcul (Shi, 2006).

Malheureusement, cette méthode est limitée à des géométries simples. De plus, la prise en compte des conditions aux limites de type Neumann s'avèrent difficiles. Elles sont mal adaptées aux écoulements en géométries complexes (Shi, 2006).

2.1.3.2. Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode éléments finis consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation de l'énergie en générale) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme par exemple, ses valeurs en certains nœuds du maillage. Cette méthode est préférée aux méthodes des différences finies du fait de sa capacité à permettre la modélisation des problèmes de géométries très complexes (Shi, 2006). Elle constitue la méthode de résolution des équations de Saint-Venant dans bon nombre de modèles tels que TELEMAC (Hervouet, 2000) et SMS (Aizinger & Dawson, 2002). Elle offre à la fois un cadre théorique rigoureux et une grande souplesse pour discrétiser les domaines de calcul avec des géométries complexes (Dawson & Proft, 2002 ; Katsaounis & Makridakis, 2003). Cependant, l'inconvénient avec cette méthode résulte dans la complexité de sa mise en œuvre et un grand coût en temps de calcul et de mémoire (Audusse, 2004).

2.1.3.3. Méthode des volumes finis (MVF)

La MVF, plus récente et largement utilisée, consiste à discrétiser le domaine de l'écoulement en une multitude de volumes (ou cellules) de contrôle, puis à y effectuer des bilans de masse et

de quantité de mouvement (Zhao *et al.*, 1994). Les avantages déterminants des volumes finis par rapport aux autres méthodes selon Zhao *et al.* (1994) et Tan (1992) sont principalement : parce qu'elle intègre sur des volumes élémentaires de forme simple des équations écrites sous forme de lois de conservation. Elle fournit ainsi, de manière naturelle, des approximations discrètes conservatives et est bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides. La MVF permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque (Blazek, 2005). pour les raisons, bien que cette méthode ait été précédée pendant de nombreuses années par les méthodes des différences finies et des éléments finis, elle s'est imposée en tant que méthode de discrétisation (Shi, 2006). Elle peut être appliquée sur un maillage structuré ou non structuré. Pour ces raisons, la méthode des volumes finis est choisie dans le cadre de notre étude.

✓ Maillage structuré

Dans un maillage structuré en volume fini (Figure 12), le volume de contrôle (x_i, y_j) centré en $x_i = i\Delta x$ et $y_j = j\Delta y$ avec Δx , Δy les pas d'espace dans les directions x et y respectivement est délimité par les faces passant par $(i - \frac{1}{2}, j ; i + \frac{1}{2}, j$ et $i, j - \frac{1}{2} ; i, j + \frac{1}{2})$. La variable ϕ au point (x_i, y_j) est notée par une forme bidimensionnelle $\phi(i, j)$. Ses voisins sont $\phi(i, j - 1)$, $\phi(i + 1, j)$, $\phi(i, j + 1)$ et $\phi(i - 1, j)$. En un temps donné t , $\phi(i, j)$ est noté $\phi_{i,j}^t$ et les points avoisinants sont notés à leur tours $\phi_{i,j-1}^t$, $\phi_{i+1,j}^t$, $\phi_{i,j+1}^t$ et $\phi_{i-1,j}^t$.

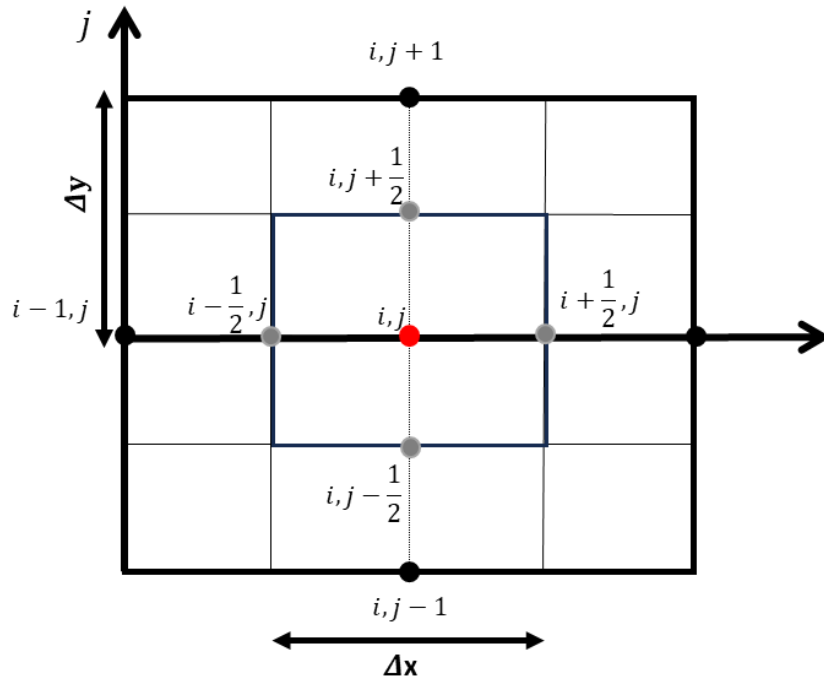


Figure 12 : Structure d'un maillage structuré pour la méthode des volumes finis

✓ Maillage non structuré

Dans un maillage non structuré (Figure 13), la variable ϕ , au centre du $n^{\text{ième}}$ volume de contrôle, est notée $\phi(n)$. On désigne par x_1, x_2 et x_3 la valeur de ϕ aux trois sommets de ce volume de contrôle (x_1, x_2, x_3) numérotés dans le sens trigonométrique. Les valeurs de ϕ au centre de trois volumes de contrôle voisins peuvent être également identifiées comme : $\phi(1)$, $\phi(2)$ et $\phi(3)$. Cette méthode de discrétisation permet une prise en compte parfaite de la géométrie complexe du domaine de calcul et assure la conservation de la masse (une propriété importante dans le calcul des écoulements de fluides) (DHI, 2021).

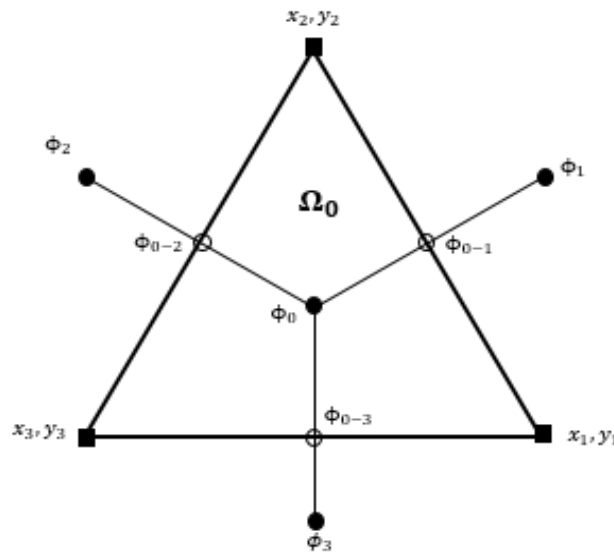


Figure 13 : Structure d'un maillage non structuré pour la méthode des volume finis

Pour la résolution de ces équations de Saint-Venant, différents schémas numériques sont utilisés en fonction des objectifs de la modélisation.

2.1.4. Schéma numérique de résolution

Les schémas numériques d'Euler sont de trois types. Ce sont les schémas d'Euler Explicite, Implicite et Semi-Implicite. Le choix d'un schéma dans une étude se fait selon les objectifs de l'étude.

2.1.4.1. Schéma Explicite

Le Schéma Explicite d'Euler (SE) est un schéma permettant le calcul de la valeur future d'une variable en fonction des valeurs actuelles et passées sans nécessiter la résolution de systèmes d'équations simultanées. Ce schéma est simple et assure une rapidité de calcul par pas de temps (Griffiths & Higham, 2010). Il est facile à mettre en œuvre mais nécessite le respect d'une condition de stabilité, comme le critère de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Cette stabilité est

fortement dépendante du pas de temps de calcul et du maillage spatial (Butcher, 2016 ; Sengers, 2019). Ainsi, l'obtention d'une solution numérique très proche des observations peut être très coûteuse en temps.

2.1.4.2. Schéma Implicite

Le schéma implicite (SI) calcule la valeur future en résolvant un système d'équations simultanées qui inclut les valeurs futures des variables. C'est un schéma inconditionnellement stable, ce qui signifie qu'il est stable même pour des pas de temps relativement grands (Griffiths & Higham, 2010). Le schéma implicite (Exemple : schéma de Crank-Nicolson et de projection) est utilisé pour les problèmes où la stabilité inconditionnelle est nécessaire quel que soit le pas de temps choisit.

2.1.4.3. Schéma Semi-Implicite

Un schéma semi-implicite, selon Sengers (2019), est un schéma qui utilise à la fois des approches explicites et implicites pour la résolution des équations différentielles (Exemple : schéma semi-implicite de Crank-Nicolson et le schéma fractionnaire). Les équations sont d'abord décomposées en termes traités explicitement et implicitement. Le schéma implicite est appliqué sur les termes qui posent des problèmes de stabilité tandis que sur les autres termes sont appliqués un schéma explicite pour réduire la charge de calcul (Griffiths & Higham, 2010). Quant aux termes implicites, ils sont calculés en résolvant un système d'équations qui inclut les valeurs futures des variables. Les résultats des deux étapes sont combinés pour obtenir la solution à chaque pas de temps. Cette approche assure une stabilité accrue en réduisant, de façon concomitante, la complexité et le coût de calcul même pour des grands pas de temps (Sengers, 2019). Ainsi, les schémas semi-implicites permettent de traiter efficacement et de façon flexible les problèmes de dynamique des fluides où un équilibre entre la stabilité numérique et l'efficacité de calcul est nécessaire. Cependant, ce schéma de résolution des équations différentielles reste très complexe à coder et à mettre en œuvre.

2.2. Etat de connaissance sur le transport solide en suspension

La Côte d'Ivoire est confrontée à une baisse progressive du volume de ses plans d'eau. Elle serait liée à la réduction des volumes de précipitations due aux changements climatiques et à la dégradation de l'état de surface des bassins versants (Kouassi *et al.*, 2013 ; Meledje *et al.*, 2014). Après avoir été arrachés, les sédiments issus du lessivage des sols dénudés sont généralement transportés en suspension par les rivières ou fleuves sur une bonne distance avant

leur dépôt (Kouassi, 2007 ; Meledje, 2016). Ce phénomène physique (transport solide et dépôt) peut être étudié grâce à l'équation (23) suivante (DHI, 2021) :

$$\frac{\partial C}{\partial x} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - h k_p C \quad (23)$$

Avec,

C : concentration moyenne des sédiments dans la colonne d'eau (en kg.m^{-3}) ;

D_x et D_y : coefficient de dispersion (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) x et y ;

k_p : facteur de décroissance de la particule transportée.

La description de la dynamique des sédiments par l'analyse numérique dépend des propriétés physiques des sédiments qui restent des paramètres de nature complexe à modéliser.

2.2.1. Paramètres caractéristiques du transport solide

Les processus qui régissent le mouvement d'une particule de sédiment dans l'eau sont nombreux. Ce sont entre autres la vitesse de chute, les taux de dépôt et d'érosion, la nature des couches du fond et leur évolution. Plusieurs travaux de recherche (Krone, 1962 ; Engelund & Fredsoe, 1976 ; Rijn, 1984 ; Teeter, 1986 ; Metha *et al.*, 1989 ; Soulsby *et al.*, 1993 ; Sanchez *et al.*, 2005) ont été menés en vue de leur compréhension.

2.2.1.1. Vitesse de chute

La vitesse de chute est proportionnelle à la taille, à la masse volumique et à la cohésion des agrégats en suspension. Ce paramètre qui joue un rôle prédominant dans la modélisation des processus hydro-sédimentaires n'est malheureusement pas unanimement exprimée dans la littérature scientifique. Des travaux plus récents menés par Sanchez & Delanoë (2000 et 2002) ont montré que la vitesse de chute moyenne mesurée *in situ* est supérieure à la vitesse de chute moyenne mesurée en condition d'eau calme qui à son tour est supérieure à la vitesse de chute médiane. Pour eux, le phénomène de floculation due aux turbulences observées *in situ* est à l'origine de l'élévation de la vitesse de chute des particules. Pour nos travaux, la vitesse de chute (W_s) est considérée comme le produit de la concentration moyennée sur la profondeur à la puissance γ et d'un coefficient empirique k (Burt, 1986 ; Pejrup, 1988 ; Rijn, 1989) (Equation 24) :

$$W_s = k C^\gamma \quad (24)$$

Cette expression est être réécrite par l'équation 24 en faisant intervenir la densité des sédiments :

$$W_s = w_0 \left(\frac{C_{total}}{\rho_{sédiment}} \right)^Y \quad (25)$$

Avec : C_{total} la concentration de matière en suspension, $\rho_{sédiment}$ la densité des sédiments du fond, w_0 un coefficient de vitesse de chute.

2.2.1.2. Taux de dépôt

Le dépôt (ou taux de dépôt S_D) des sédiments dans le lit du plan d'eau est le processus de leur passage de la colonne d'eau vers le fond (DHI, 2021). Ce processus a lieu lorsque la contrainte de cisaillement au fond est inférieure à la contrainte critique de dépôt des sédiments (Krone, 1962). Krone propose la formulation du taux de dépôt en y introduisant la notion de probabilité (P_d) de dépôt (Equation 26) :

$$S_D = W_s \cdot C_b \cdot P_d \quad (26)$$

Avec C_b la concentration des sédiments près du fond exprimée en fonction de la concentration moyenne ($\bar{C}$) des matières en suspension dans la colonne d'eau et β un facteur (Teeter, 1986) (Equation 27) :

$$C_b = \beta \cdot \bar{C} \quad (27)$$

β est le facteur décrivant la diffusion entre les matières solides en suspension près du fond et celle dans la colonne d'eau. Il est exprimé en fonction du nombre de Peclet (P_e) et de la probabilité de dépôt des sédiments (Equation 28) :

$$\beta = 1 + \frac{P_e}{1,25 + 4,75(P_d^{2,5})} \quad (28)$$

Le nombre de Peclet est à son tour modélisé en fonction de la vitesse de chute des sédiments en suspension (Equation 29) :

$$P_e = \frac{6}{kU_f} W_s \quad (29)$$

Avec $K = 0,4$ et $U_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$ respectivement la constante de Von Karman et la vitesse de friction des particules. τ_b représente la contrainte de cisaillement au fond exprimée comme suit (Equation 30) :

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_c V^2 \quad (30)$$

Avec : V la vitesse moyenne d'écoulement et f_c un facteur de frottement au fond exprimé par l'équation 31 :

$$f_c = 2 \left[2,5 \left(\ln \left(\frac{30h}{k} \right) - 1 \right) \right]^{-2} \quad (31)$$

Dans cette équation, h représente la profondeur et k la rugosité du fond.

La probabilité de dépôt est le rapport entre la contrainte de cisaillement au fond et la contrainte critique de dépôt des sédiments (τ_{cd}) (Equation 32) :

$$P_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \quad (32)$$

2.2.1.3. Taux d'érosion

L'érosion du lit est le processus de transfert de particules de sédiments du fond vers la colonne d'eau (DHI, 2020). Elle a lieu sur la couche superficielle du lit (couche meuble), où les sédiments déposés sont faiblement ou pas encore consolidés. Les zones érodées sont surtout celles où la contrainte critique d'érosion est inférieure à la contrainte critique de cisaillement au fond. Le taux d'érosion est exprimé par Parchure & Mehta (1985) comme suit (Equation 33) :

$$S_E = E e^{\alpha \sqrt{\tau_b - \tau_{ce}}} \quad (33)$$

Avec E l'érodibilité du lit, α le coefficient d'érosion, τ_{ce} la contrainte critique d'érosion du fond. Dans le modèle de transport de sédiments qui sera mis en place, les contraintes d'érosion, de dépôt, l'érodibilité et la diffusivité turbulente sont estimées relativement à la littérature.

2.2.1.4. Evolution du lit

Le lit du plan d'eau est subdivisé en plusieurs sous couches de densité différente. La couche la plus profonde, du fait du poids des couches subjacentes exerçant sur elle une pression

considérable, subit un tassement qui la rend plus dense, plus compacte (DHI, 2021). La couche superficielle est la plus meuble. Elle est constituée d'éléments isolés, pas encore consolidés. Ces éléments non ou faiblement consolidés sont susceptibles d'être arrachés et remis en suspension pour être transportés en cas de fortes turbulences. Ce processus de dépôt de sédiments et d'érosion de la couche superficielle du fond est la clé de l'évolution du lit des cours d'eau. Ainsi, le relief du lit à l'instant présent est décrit par la bathymétrie. Son évolution dans le temps reste très liée à la concentration des sédiments, à la vitesse de chutes, au taux de dépôt et d'érosion des sédiments (DHI, 2021). La transformation morphologique du lit entre deux dates est modélisée selon DHI (2021) par (Equation 34) :

$$Bat^{n+1} = Bat^n + netsed^n \quad (34)$$

Avec *Bat* : la bathymétrie en un instant et *netsedⁿ* : l'épaisseur de dépôt de sédiment.

2.3. Choix du modèle de simulation de la dynamique sédimentaire et de la diffusion de polluants

Pour modéliser la dynamique de sédimentation et la diffusion de polluants, l'ingénierie moderne fait appel à des codes de calcul. Ces codes permettent de reproduire le phénomène en 1D, 2D ou 3D. Les codes 1D permettent une modélisation relativement plus simple grâce aux hypothèses formulées en négligeant les écoulements dans la direction transversale à l'axe des écoulements (Shi, 2006). Pour résoudre le caractère contraignant des codes de calculs à 1D, les codes de calcul 2D sont utilisés. De nombreux outils de modélisation bidirectionnelles existent et chacun fait appel à des méthodes de résolutions différentes. Le choix est donc basé sur plusieurs critères dont les plus importants sont la rapidité des calculs, la précision du modèle, les besoins en données d'entrée et la robustesse de la méthode numérique employée (Stelling & Verwey, 2005). Ainsi, pour la simulation de la dynamique sédimentaire et la diffusion d'une pollution, le modèle MIKE en sa version 2D (DHI, 2021) sera utilisé. C'est un modèle largement utilisé dans des travaux d'ingénierie et de recherche en zone fluviale, estuarienne et marine pour les études hydrodynamiques, de sédimentation et/ou de propagation de la marée (Lumborg & Windelin, 2003 ; Kouassi *et al.*, 2013a ; Kouassi *et al.*, 2016). A l'aide de ce modèle, Zeinoddini *et al.* (2013) ont évalué l'effet du couplage vagues-débit sur les variations spatio-temporelles du débit et de la salinité dans un grand système marin hypersalé (lac Urmia en Iran). Salfavi *et al.* (2015) ont utilisé ce modèle pour modéliser la structure spatiale de la salinité dans le même lac de Urmia. Aussi, à partir de ce modèle, Jia *et al.* (2018) ont effectué une simulation de l'effet d'un projet de raffinage de pétrole sur l'environnement aquatique de la

mer Caofeidian (Chine). Ross *et al.* (2015) l'ont aussi utilisé pour évaluer l'influence de l'élévation du niveau de la mer sur la variabilité de la salinité à l'échelle décennale dans un estuaire de plaine côtière. Cela montre la performance de ce modèle dans la modélisation de la dynamique des phénomènes physiques.

2.3.1. Généralité sur le modèle MIKE 21 Flow Model FM

MIKE 21 Flow Model FM est un logiciel de modélisation 2D applicable à la simulation des phénomènes hydrauliques et environnementaux dans les lacs, estuaires, baies, zones côtières et mers où la stratification peut être négligée (DHI, 2021). Il permet la modélisation des écoulements à surface libre en régime transitoire ou permanent en offrant la possibilité de prendre en compte les variations spatiales de la rugosité, des structures faisant obstacle aux écoulements et des ouvrages de franchissement. De plus, un algorithme robuste de mise en eau et hors de l'eau des cellules est intégré pour simuler une propagation correcte de l'onde (DHI, 2021). L'utilisation d'un pas de temps variable permet d'adapter automatiquement le pas de temps de calcul pour stabiliser le modèle ou au contraire accélérer la vitesse de calcul selon les conditions hydrodynamiques afin d'obtenir les résultats par résolution des équations de Saint Venant en volumes finis. Il contient plusieurs modules dont le module hydrodynamique (HD), de transport (T) et de transport de sédiments cohésifs (MT) qui seront utilisés dans cette thèse en fonction de nos objectifs.

2.3.1.1. Module hydrodynamique (HD)

Le module HD fournit la base hydrodynamique pour les calculs effectués dans les modèles d'hydraulique environnementale en simulant les variations du niveau d'eau et les flux en réponse à une variété de fonctions de forçage (DHI, 2021). Les forçages pris en compte dans le module hydrodynamique sont :

- contrainte de cisaillement du fond,
- contrainte de cisaillement dû au vent à la surface libre de l'eau,
- gradients de pression barométrique,
- force de Coriolis,
- dispersion de la quantité de mouvement,
- sources et puits,
- évaporation.

Le module HD est construit sur la résolution des équations de continuité (5) et de quantité de mouvement (6 et 7) dites équations de Saint-Venant. La discrétisation spatiale en forme

conservative de ces équations dans ce modèle utilise la méthode des volumes finis et celle suivant le temps se fait soit suivant un schéma explicite de premier ordre d'Euler ou un schéma explicite de second ordre de Runge-Kutta (DHI, 2021).

2.3.1.2. Module de transport (AD)

Le module de transport est basé sur le phénomène d'advection-diffusion. Il permet de modéliser le transfert d'un polluant soluble ou en suspension dans une masse d'eau. Les résultats dans ce module sont obtenus par la résolution de l'équation de transport (16). La modélisation du parcours d'une matière dissoute ou non dans une masse d'eau avec ce module permet de suivre l'évolution de la concentration de cette substance dans le temps et dans l'espace afin d'évaluer son influence sur une zone bien déterminée (DHI, 2021).

2.3.1.3. Module de transport de sédiments cohésifs

Le choix du modèle de transport et de la sédimentation est conditionné par la nature des sédiments du fond. Dans la lagune Aghien, de nombreuses études (N'Guessan, 2008 ; N'Guessan *et al.*, 2011 ; BRLi, 2015) ont montré que la bande centrale est occupée par la vase et crème de vase. Ces conclusions montrent que les conditions hydrodynamiques qui règnent dans cette lagune sont suffisamment faibles pour entraîner les sédiments grossiers. Ainsi, le module de transport de sédiments cohésif (Mud Transport) est utilisé pour modéliser le transport solide. Cette modélisation repose essentiellement sur le flux de matières solides en suspension (mesuré), la vitesse de chute, les lois d'érosion et de dépôt de ces matières solides.

Conclusion partielle

L'état de l'art sur la modélisation des phénomènes hydrodynamiques a permis de mettre en évidence plusieurs modèles mathématiques utilisés dans la dynamique des masses d'eau, des sédiments et dans la diffusion d'une pollution. Dans ces modèles basés sur les principes de conservation de la masse du fluide et de la quantité de mouvement, la méthode des différences finies, des éléments finis ou des volumes finis est utilisée comme méthode de discrétisation. De ces méthodes, la méthode des volumes finis permet une bonne prise en compte parfaite de la géométrie complexe du domaine de calcul et assure la conservation de la masse. La résolution numérique de ces différents modèles utilise soit la méthode d'Euler explicite, soit Euler implicite ou semi-implicite. La méthode implicite offre une stabilité inconditionnelle dans la résolution. Ainsi, on se propose de concevoir un modèle hydrodynamique de la lagune Aghien en utilisant la méthode des volumes finis comme méthode de discrétisation et la méthode d'Euler implicite comme méthode numérique de résolution.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 3 : MATERIEL

L'étude de la modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et de la diffusion de polluants dans la lagune Aghien a nécessité des données ainsi que des outils utilisés sur le terrain, au laboratoire et pour le traitement final des données.

3.1. Données

La modélisation hydro-sédimentaire en 2D est un exercice dont la précision et la qualité des résultats sont relativement liées non seulement à la qualité mais aussi à la quantité des données d'entrée. Une entrée massive de données réduit les hypothèses de calculs en augmentant la précision des résultats. Ainsi, notre exercice a utilisé diverses données nécessaires à sa précision. Ces données sont d'ordre hydro-climatiques et océanographiques.

3.1.1. Données hydro-climatiques

Les données hydro-climatiques utilisées concernent :

- Les données hydrométriques enregistrées par les stations hydrométriques de IRHO La Mé, Bété pont et Djibi pont à pas de temps horaire. Ces données fournies par l'Université NANGUI ABROGUA couvrent la période 2016-2021. Elles ont été utilisées comme conditions aux limites amont du modèle hydrodynamique ;
- Les données de précipitations, de vitesse et direction du vent enregistrée par les stations climatiques de Sainte Foi CET à pas de temps horaire. Ces données, fournies par l'Université NANGUI ABROGUA, couvrent la période 2016-2021. Elles ont permis de caractériser la zone dans le modèle hydrodynamique ;
- Les données de niveau d'eau à pas de temps horaire dans les lagunes Potou et Aghien ainsi que dans le chenal naturel reliant ces deux lagunes. Ces données enregistrées par les échelles limnimétriques à enregistrement automatique vont de mars 2016 à septembre 2021. Ces ont été fournies par la direction de l'Institut de Recherche et Développement. Elles ont été utilisées comme conditions aux limites aval et de validation des résultats de la modélisation.

3.1.2. Données océanographiques

Les données de projection du niveau marin pour l'horizons 2070 suivant le scénario extrême d'évolution socio-économique SSP5-8.5 ont été utilisées. Ces données ont été visualisées sur le site <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projectiontool> pour les projections à la station de Takoradi (Ghana).

3.2. Outils

Les outils se rapportent ici au matériel utilisé sur le terrain pour les missions de collecte de données et le matériel pour les analyses au laboratoire ainsi que pour le traitement des données.

3.2.1. Outils de terrain

Le matériel de terrain comprend le matériel d'échantillonnage des eaux, des sédiments, de mesure *in situ*, de sondage bathymétrique, de levés topographiques et de jaugeage des paramètres hydrodynamiques.

3.2.1.1. Outils d'échantillonnage des eaux

Pour l'échantillonnage des eaux, un hors-bord (Figure 14a) a été utilisé pour le déplacement sur le plan d'eau afin de rallier les différents points d'échantillonnage. Pendant la navigation, des gilets de sauvetage ont été utilisés pour la sécurité et des flacons étiquetés de capacité 1 L pour contenir les échantillons prélevés (Figure 14c) à l'aide d'une bouteille hydrologique de capacité 2 L (Figure 14b).

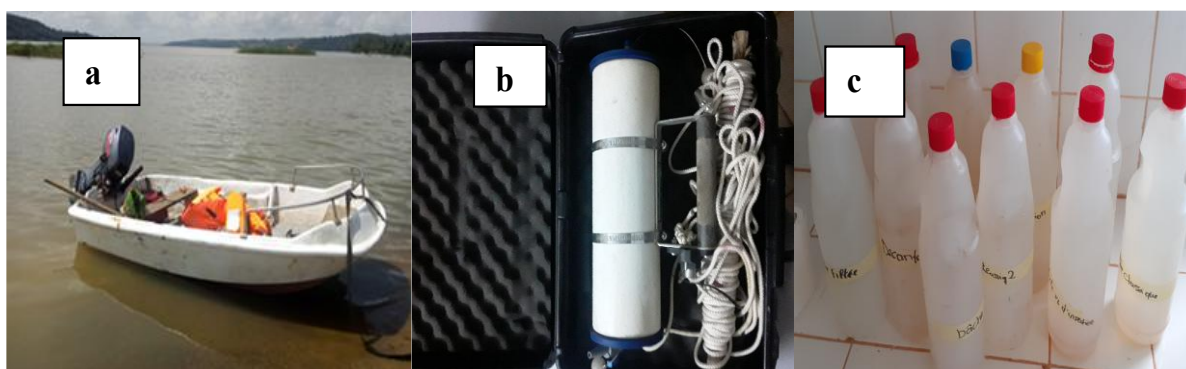


Figure 14 : Matériel de déplacement et de prélèvement d'eau sur le plan d'eau

a) Hors-bord ; b) bouteille hydrologique et c) flacons de 1 L

3.2.1.2. Outils d'échantillonnage des sédiments

Le prélèvement des échantillons de sédiments s'est effectué au moyen d'une benne Van Veen. Les échantillons prélevés sont mis dans des sacs plastiques inertes à l'aide d'une spatule. Chaque sac plastique est numéroté à l'aide d'un ruban adhésif et d'un marqueur indélébile pour éviter que les écrits s'effacent (Figure 15).



Figure 15 : Equipements de prélèvement de sédiment

a) Benne Van Veen ; b) Sacs plastique et spatule

3.2.1.3. Outils de mesure *in situ*

Les mesures *in situ* ont concerné la température et la salinité. Du fait de leur sensibilité aux variations des conditions climatiques et environnementales, ces paramètres sont déterminés dès prélèvement de l'échantillon d'eau. Ainsi, les multi-paramètres *Hanna HI 9829* et *Hanna HI 9835* (Figure 16) ont été utilisés pour les mesures *in situ*. Le *Hanna HI 9829* est un appareil capable de mesurer la salinité dans une gamme de $0,000$ à $70,000 \pm 0,1$ PSU pour une résolution de $0,01$ PSU. Le *Hanna HI 9835* est quant à lui capable de mesurer la salinité dans une plage de $0,00$ à $400,00 \pm 1$ ‰ pour une résolution $0,1$ ‰. Ces appareils mesurent également la température dans une plage de $0,00^{\circ}\text{C}$ et $60,00 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ pour une résolution $0,1^{\circ}\text{C}$ (<http://www.hannainst.com>).



Figure 16 : Appareils de mesures *in situ* (Multi-paramètre de type *HANNA*)

a) ralliement de points ; b) Hanna HI 9829 ; c) Hanna HI 9835

3.2.1.4. Outils de sondage

Pour l'étude des caractéristiques géomorphologiques de la lagune Aghien, des sondages bathymétriques et topographiques ont été nécessaires.

3.2.1.4.1. Outils de sondage bathymétrique

Le sondage bathymétrique de la lagune Aghien a nécessité deux échosondeurs de marque respective LOWRANCE Elite HDS 12 et HUMMINBIRD Hélix 7 (Figure 17). Ils sont constitués de quatre (4) parties à savoir :

- L'unité centrale : reliée aux autres composants et à la batterie reçoit et convertit les signaux analogiques reçus en données numériques ;
- Le transducteur : l'élément principal de l'équipement de détection acoustique convertit l'énergie électrique en énergie acoustique pendant l'émission du signal et inversement ;
- L'antenne de réception GPS. Elle donne de façon continue la latitude, la longitude et la profondeur de chaque point sondé ;
- Un système d'alimentation de l'unité centrale sous une tension de douze volts (12 V).

Si du point de vue fonctionnel ces deux appareils sont identiques il n'en est pas de même pour leur capacité de stockage. En effet, l'échosondeur LOWRANCE a une capacité de stockage de dix mil (10 000) points largement supérieurs à celle du HUMMINBIRD qui ne peut enregistrer au maximum que deux mil sept-cent quarante-six (2 746) points consécutivement avant exportation des données de sa mémoire.



Figure 17 : Appareil de sondage bathymétrique

a) Humminbird Helix 7 ; **b)** Lowrance Elite HDS 12

3.2.1.4.2. Outils de sondage topographique

Les levés topographiques ont été effectués avec un GPS différentiel de type STONEX S3i (Figure 18). Le STONEX S3i est d'une précision horizontale et verticale respective de 2,5 et 5

mm. Il fonctionne avec un système d'alimentation sous une tension de 7,2 volts (7,2 V) et 6 800 mAh. L'étendue de sa fréquence varie entre 410 et 470 méga hertz (410-470 MHz). STONEX Si3 a un poids total de 1,2 kg et peut fonctionner à une distance d'environ sept kilomètres (7 km) de sa base. Cet appareil a été utilisé pour effectuer les mesures aussi bien sur la terre ferme que sur le plan d'eau lagunaire.



Figure 18 : Appareil de sondage topographique (STONEX S3i)

3.2.1.5. Outils de jaugeage des paramètres hydrodynamiques

Pour le jaugeage des sections de la lagune et de ses tributaires, deux appareils de courantométrie à effet Doppler ont été utilisés (Figure 19). Il s'agit de l'ADCP à effet Doppler de type Workhorse Rio Grande et de l'ADCP à effet Doppler de type OTT Qliner 2. Le premier a été utilisé pour les sections les plus profondes et les plus larges (Chenal, Mé et lagune Aghien) et le second pour la section de la rivière Bété du fait de sa profondeur relativement faible. Selon RD Instrument (www.rdinstruments.com/rio.aspx), le Workhorse Rio Grande est composé de trois (3) grandes parties à savoir :

- câble de connectivité IO qui assure la connexion entre l'ADCP et l'ordinateur ;
- tête du capteur intégré de débit avec quatre (4) transducteurs (Beam 1, 2, 3 et 4) ;
- thermistor qui mesure la température de l'eau au moment du jaugeage.

Le transducteur du Workhose fonctionne avec une fréquence de 1,2 MHz. C'est un ADCP adapté pour la mesure des sections larges et dont la profondeur peut aller jusqu'à 30 m. Il donne, pendant les mesures, les profils des vecteurs vitesse des sections d'écoulement jaugées.

Le OTT Qliner 2, quant à lui, est composé de trois (3) éléments majeurs :

- Personal Digital Assistance (PDA)
- capteur intégré de débit à effet Doppler avec quatre (4) transducteurs d'ultrasons ;
- transmetteur Bluetooth intégré.

Les transducteurs du OTT Qliner 2 utilisé ont des fréquences de 1 MHz pouvant effectuer des mesures sur une profondeur totale de 20 m. Cet appareil peut être utilisé pour le jaugeage des cours d'eau d'une profondeur minimale de 1,2 m.

Les deux ADCP (Workhose Rio Grande et OTT Qliner 2) utilisés fonctionnent sous une alimentation de douze volts (12 V).

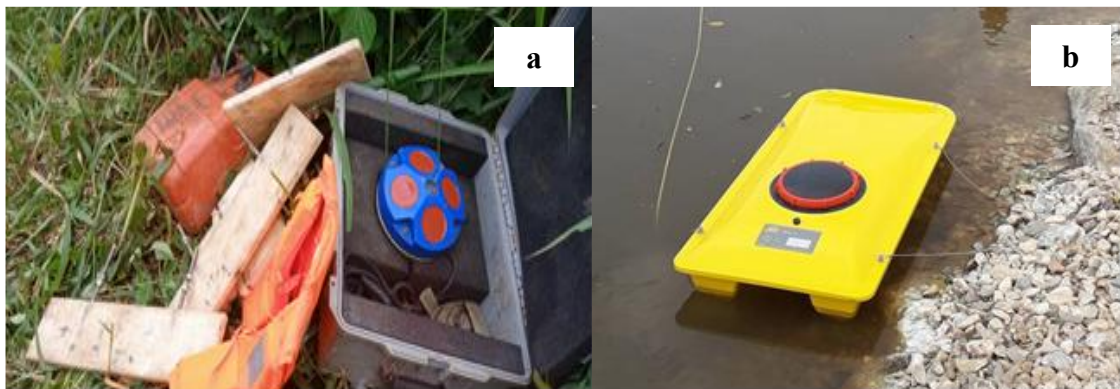


Figure 19 : Appareil de jaugeage hydraulique

a) Workhose Rio Grande ; b) OTT Qliner 2

3.2.2. Outils de laboratoire

Divers outils ont été utilisés au laboratoire. Respectivement pour l'analyse des matières en suspension dans les échantillons d'eau et des sédiments de sable prélevés.

3.2.2.1. Outils de mesures des matières en suspension

La quantité de matières solides en suspension dans un échantillon d'eau prélevé conditionne le taux de sédimentation de la cuvette du plan d'eau lagunaire. Le matériel pour quantifier les matières solides en suspension et évaluer leur vitesse de chute en condition d'eau calme se compose comme suit (Figure 20) :

- tube d'Owen de capacité 2 L pour évaluer les groupes de vitesse de chute (Figure 20d) ;

- une rampe de filtration et des papiers filtres GIF/F de 47 mm de diamètre et 45 μm de porosité pour filtrer les échantillons d'eau prélevés (Figure 20c) ;
- une étuve pour sécher les filtres (Figure 20a) ;
- une balance électronique de précision 10^{-4} g de marque Sartorius pour la pesée des filtres (Figure 20b).

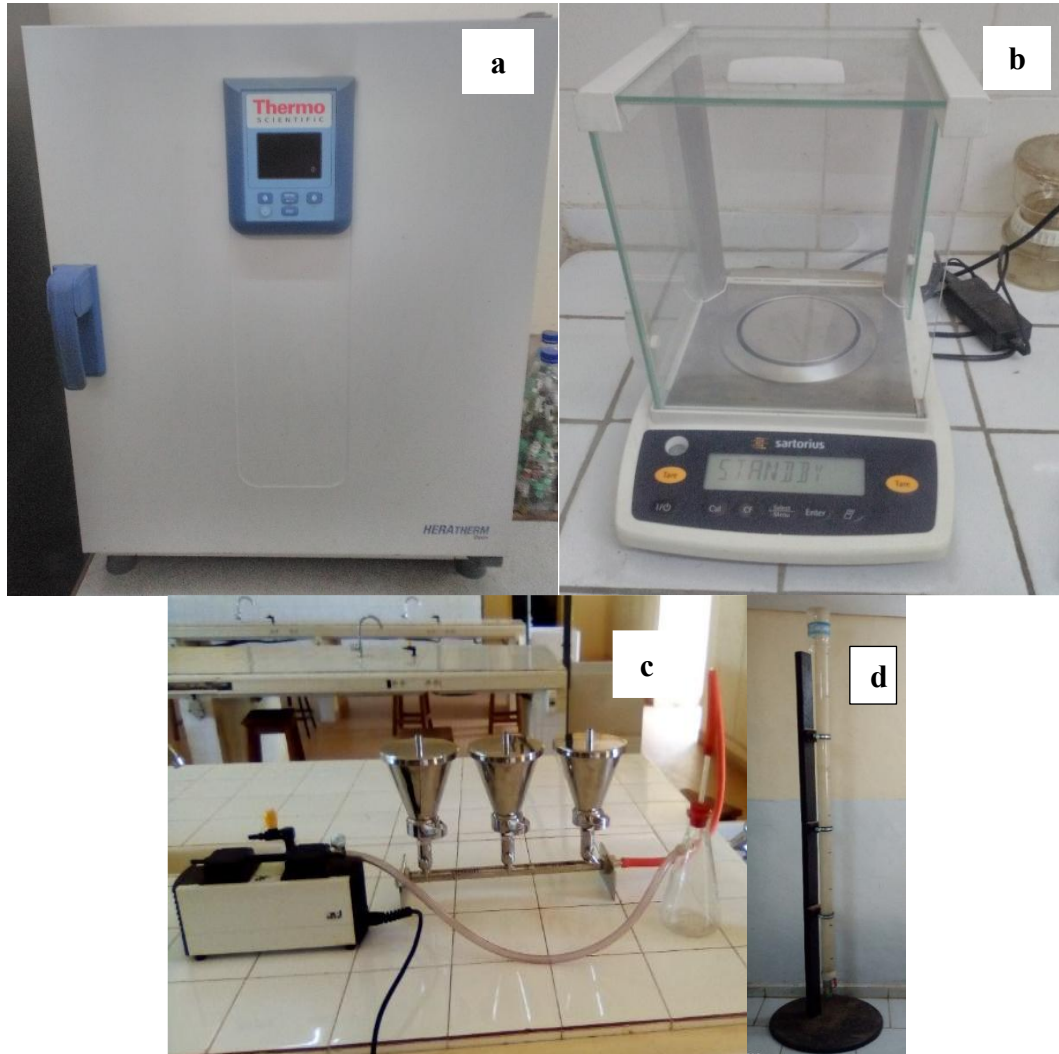


Figure 20 : Appareils d'analyse de MES au laboratoire (UJLoG)

a) Etuve ; b) Balance électronique Sartorius ; c) Banc de filtration ; d) Tube de Owen

3.2.2.2. Outils d'analyse des sédiments

Les sédiments de sables prélevés ont subi différents types d'analyse avec du matériel spécifique à chaque phase. Ce sont entre autres (Figure 21) :

- une étuve pour le séchage des sédiments de sables (Figure 20a) ;
- une colonne de seize (16) tamis de la série AFNOR de maille allant de 0,63 à 5 mm posée sur une tamiseuse vibrante (Figure 21a) ;

- une loupe binoculaire munie d'un écran pour l'analyse morphoscopique et minéralogique des grains de sable (Figure 21b).



Figure 21 : Appareil d'analyse des sédiments au laboratoire (CRE)

a) colonne de tamis montée sur une tamiseuse ; b) Loupe binoculaire munie d'un écran

3.2.3. Outils de traitement de données

Les outils de traitement de données sont ceux utilisés lors de la manipulation des données pour atteindre les différents objectifs spécifiques que nous nous sommes assignés.

3.2.3.1. Logiciels de traitement de données bathymétriques et topographiques

Les logiciels Humminbird PC et GPS Babel ont été utilisés respectivement pour l'extraction des données de sondage bathymétrique réalisé avec l'échosondeur Humminbird Helix 7 et Lowrance Elite HDR TI 12. Ces données extraites ont été traitées statistiquement à l'aide du tableur Excel. Enfin, elles ont été utilisées sous ArcGis 10.4.1 pour la réalisation respective de la carte bathymétrique, de la carte des pentes, l'extraction des volumes et surfaces élémentaires et sous Surfer 20 pour la réalisation de la carte bathymétrique en trois dimensions (3D).

3.2.3.2. Logiciels de traitement de données de jaugeages

Les données de jaugeage des sections ont d'abord été extraites grâce aux logiciels WinRiver pour les jaugeages effectués avec l'ADCP à effet Doppler de type Workhose Rio Grande et Qreview pour le jaugeage effectué avec l'ADCP à effet Doppler de type OTT Qliner 2. Les données extraites à l'aide des logiciels WinRiver 2 et QReview ont par la suite été traitées avec le tableur Excel afin d'en extraire les données jugées aberrantes.

3.2.3.3. Outils de modélisation

Pour la modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune Aghien, le modèle MIKE 21 Flow Model FM a été utilisé. C'est un modèle adapté pour la modélisation des écoulements en zone fluviale, côtière estuarienne et marine grâce à un maillage flexible qui convient aux fonds de morphologie très complexes. Ce modèle est constitué de plusieurs modules permettant chacun la modélisation d'un phénomène physique précis à savoir la dynamique des masses d'eau, des sédiments, des polluants, de la marée etc. (DHI, 2021). MIKE 21 est un outil de modélisation en deux dimensions (2D) qui donne les résultats par la résolution des équations de Saint-Venant au moyen de la méthode des volumes finis. Les modules utilisés dans le cadre de notre étude sont :

- « *Hydrodynamic Module* » (HD) FM sous le logiciel Mike 21. C'est le module qui sert de base à tous les autres modules précités. Il est utilisé pour modéliser le fonctionnement hydrodynamique et la variation de la salinité dans la lagune ;
- « *Transport Module* » (T). Il est utilisé sous le modèle Mike 21 pour modéliser le transfert et la diffusion d'une particule (polluant) soluble ou assimilable à l'eau dans le temps ;
- « *Mud Transport* » (MT). Il permet la modélisation de l'érosion, du transport et du dépôt des sédiments cohésifs. Il est également utilisé pour l'évaluation de la sédimentation du plan d'eau.

L'ensemble de ces modules permet de modéliser la dynamique hydro-sédimentaire, le transfert et la dispersion de la salinité dans la lagune Aghien sous un seul environnement de travail.

Conclusion partielle

Les données et matériel utilisés pour l'atteinte des objectifs de cette étude sont divers. Les données sont essentiellement constituées de données hydro-climatiques et océanographiques utilisées pour la modélisation de la dynamique des masses d'eau, des sédiments et de la salinité ainsi que le transfert de polluant dans la lagune Aghien. Des outils ont été utilisés sur le terrain pour le déplacement sur le plan d'eau, le prélèvement des échantillons d'eau, de sédiments et les mesures *in situ* de la salinité et de la température. Pour les analyses au laboratoire et le traitement des données, des outils spécifiques ont également été utilisés.

CHAPITRE 4 : APPROCHE METHODOLOGIQUE

4.1. Caractérisation de la distribution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et de la morphologie de la lagune Aghien

4.1.1. Mesures des températures et salinités de la lagune Aghien

Pour l'étude des variations spatio-temporelles de la salinité et de la température des eaux de la lagune Aghien et de ses tributaires, des campagnes hebdomadaires d'échantillonnage ont été réalisées. Ces campagnes se sont déroulées de juin 2021 à avril 2022 (avant l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam) de sorte à couvrir l'ensemble des saisons de la zone et en avril 2024 (Après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé). Deux dernières mesures ont également été effectuées en avril et mai 2025 dans le cadre d'un suivi des effets de l'ouverture de l'embouchure de la Comoé. Les mesures de la température et de la salinité ont permis d'évaluer la qualité globale des eaux de la lagune et celles des tributaires.

4.1.1.1. Prélèvement des échantillons d'eau et mesure *in situ*

L'analyse des paramètres a d'abord consisté à prélever l'échantillon d'eau à l'aide d'une bouteille hydrologique avant la mesure *in situ* des paramètres étudiés.

4.1.1.1.1. Prélèvement des échantillons d'eau

Le prélèvement des échantillons d'eau s'est fait au moyen d'une bouteille hydrologique en trente-et-sept (37) points différents (Figure 22) en saison pluvieuse et sèche. Cette densité d'échantillonnage permet de prendre en compte les éventuelles variations temporelles de la température et de la salinité des eaux. Afin de couvrir toute la colonne d'eau, ces prélèvements ont été effectués sur trois niveaux de profondeur différents à savoir :

- à une profondeur de 0,5 m de la surface (surface (S)) ;
- à une profondeur intermédiaire (Mi Fond (M)) ;
- à une profondeur de 0,5 m du fond du plan d'eau (Fond (F)).

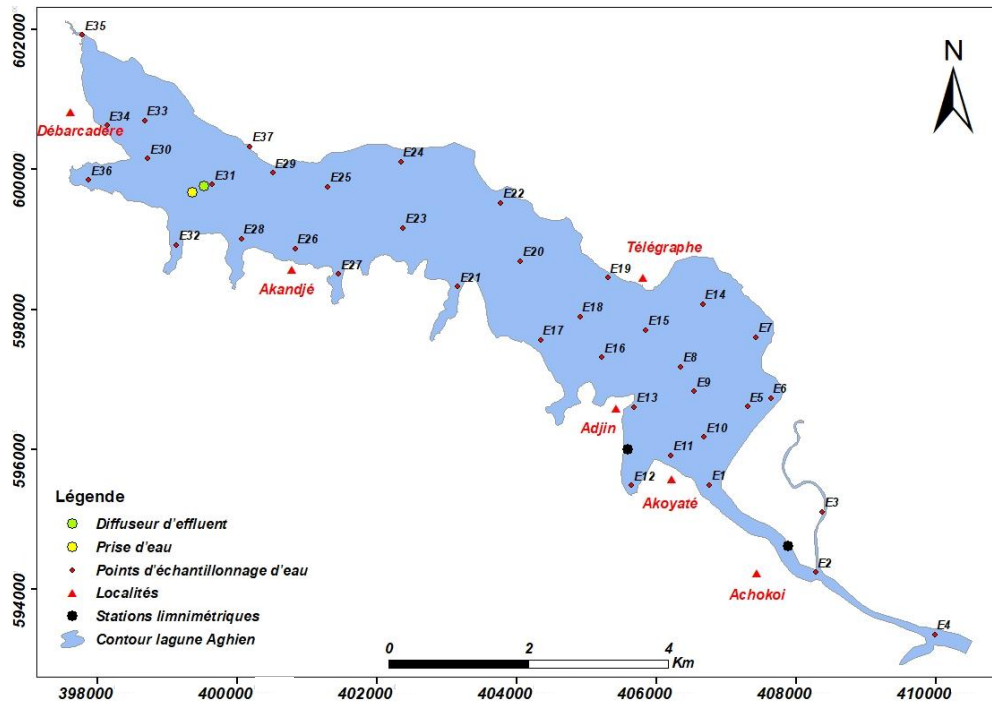


Figure 22 : Carte des points de prélèvements d'eau dans la lagune Aghien

Après chaque prélèvement, l'échantillon est conditionné dans un flacon de 1 L (Figure 23).

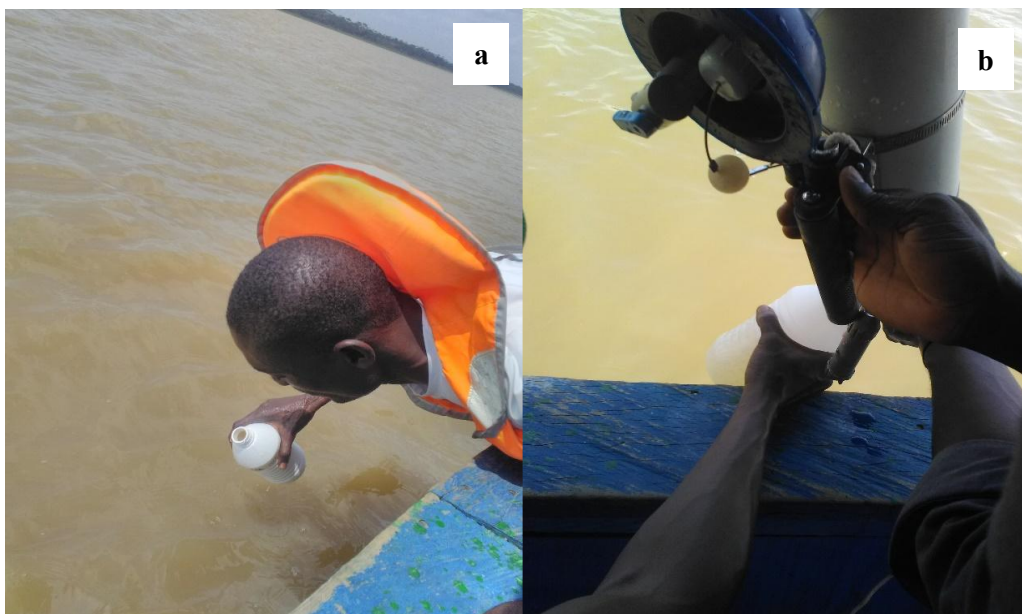


Figure 23 : Prélèvement d'eau

a) à la main ; b) à l'aide de bouteille hydrologique

4.1.1.1.2. Mesure *in situ* de la température et de la salinité

Les mesures de températures et de salinité ont été faites *in situ* avant (d'avril 2021 à avril 2022) à l'aide du multi-paramètre *HANNA HI 9835* et après l'ouverture du fleuve Comoé en avril 2024 et 2025 (Annexe 1) en marée haute à l'aide du multi-paramètre *HANNA HI 9829* munie

d'une sonde préalablement étalonnée (Figure 24). Au contact de l'échantillon d'eau avec cette sonde, la valeur du premier paramètre est automatiquement affichée après une stabilisation de quelques secondes. Après la détermination des paramètres d'un échantillon, la sonde est rincée avec l'eau de l'échantillon suivant. Cette opération permet de débarrasser la sonde des gouttelettes d'eau de l'échantillon déjà mesuré qui pourrait influencer la valeur des paramètres à mesurer.



Figure 24 : Mesure *in situ* des paramètres physico-chimiques

a) mesure en profondeur ; b) mesure en surface

4.1.2. Caractérisation des sédiments de la lagune Aghien

La caractérisation des sédiments au laboratoire concerne les sédiments en suspension dans la colonne d'eau et ceux déposés dans le fond de la lagune Aghien. Pour la caractérisation des sédiments en suspension, elle se fait par l'analyse des échantillons d'eau prélevés. Quant aux sédiments du fond, leur caractérisation passe par une analyse lithologique effectuée *in situ* et des analyses granulométriques, morphoscopiques et minéralogiques au laboratoire.

4.1.2.1. Caractérisation des matières en suspension

La caractérisation des matières en suspension nécessite la filtration des échantillons d'eau prélevés pour déterminer la concentration des éléments solides en suspension afin d'évaluer le flux entrant et la vitesse de chute de ces éléments.

4.1.2.1.1. Quantification des matières en suspension

Au laboratoire, les papiers filtres WHATMAN GF/F circulaires de 47 mm de diamètre et de porosité 0,45 mm ont été séchés à l'étuve à 105°C pendant deux (2) heures puis pesés à l'aide d'une balance de précision *Sartorius* afin de déterminer leur masse (m_{filtre}) sans humidité. Les filtres séchés et pesés ont par la suite été utilisés pour filtrer, sur une rampe de filtration

millipore, les échantillons d'eau prélevés en différents points de la lagune Aghien (Figure 25) pendant les différentes saisons et en fonction de la marée dynamique. Après filtration des échantillons d'eau, les filtres sont soigneusement retirés de la rampe à l'aide d'une pince pour être séchés à nouveau dans les mêmes conditions que précédemment. Une fois séchés, les papiers filtres sont repesés afin de déterminer la masse ($m_{\text{filtre+sédiments}}$) du filtre contenant les matières solides. La différence entre les deux masses (Equation 35) donne la masse ($m_{\text{sédiments}}$ en kg) de matière solide en suspension dans l'échantillon d'eau filtré.

$$m_{\text{sédiments}} = m_{\text{filtre+sédiments}} - m_{\text{filtre}} \quad (35)$$

La masse ramenée au volume d'échantillon d'eau filtré permet d'avoir la concentration de matière solide en suspension (C_{MES}) (Equation 36).

$$C_{\text{MES}}(\text{kg/m}^3) = \frac{m_{\text{sédiments}}(\text{kg})}{V(\text{m}^3)} \quad (36)$$



Figure 25 : Mesure de la masse des matières solide en suspension

a) Papiers filtre contenant les matières solides ; b) Pesée du filtre contenant les matières solides

4.1.2.1.2. Quantification des flux entrant de matières en suspension

Les charges solides annuelles de la lagune Aghien sont obtenues à partir de la moyenne des concentrations des échantillonnages saisonniers. Le débit solide en suspension est déterminé en fonction du débit liquide observé (Q en m^3/s) et de la concentration des matières en suspension (Bouanani, 2004). Il est déterminé selon la formule suivante (Equation 37) :

$$T_{SS} = C_{MES} \cdot Q \cdot K \quad (37)$$

Avec,

T_{SS} : Flux des matières en suspension (t/j) ;

C_{MES} : Concentration des matières en suspension (kg/m³) ;

Q : Débit liquide (m³/s) ;

K : Unité de conversion (0,0864 pour T_{SS} en t/j).

4.1.2.1.3. Vitesse de chute des matières en suspension en condition d'eau calme

Dans le but d'étudier la répartition verticale des matières en suspension (MES) en fonction de leurs vitesses de chute moyennes ($\bar{V}_S$) en condition d'eau calme, des tests ont été effectués en utilisant la méthode du tube d'Owen (Sanchez *et al.*, 2005). Le tube d'Owen est un tube de sédimentation de hauteur $H_{initiale} = 2$ m placé verticalement. Des prélèvements d'un dixième du volume initial (2 L) sont ensuite effectués par le bas du tube à différents instants. Ces prélèvements sont répartis dans le temps de manière à différencier des groupes de vitesse et estimer la quantité de particules sédimentant dans chaque intervalle (2 mn, 4 mn, 8 mn, 15 mn, 30 mn, 60 mn, 120 mn, 240 mn et 480 mn). Enfin, un dernier prélèvement a permis de récupérer le reste du liquide présent dans le tube afin d'estimer la masse solide globale de l'échantillon (Sanchez *et al.*, 2005). Avant le début du test en colonne de décantation, les échantillons sont bien homogénéisés afin d'uniformiser la turbidité dans le tube. Pour chaque niveau de profondeur, les échantillons sont mélangés pour avoir un échantillon représentatif utilisé pour remplir le tube. Après remplissage du tube, le temps du début de l'opération est relevé. Pour récupérer les échantillons correspondant à chaque prélèvement, trente (30) flacons lavés sont soigneusement numérotés (S1... S10, M1... M10 et F1... F10). Ensuite, la masse de chaque prélèvement est mesurée. Avec n ($n = 10$) le nombre de prélèvement dans le tube et n_i le nombre de prélèvement élémentaire, la concentration initiale en fonction de n et des concentrations élémentaires (C_i) des différents prélèvements est déterminée à l'aide de l'équation 38 :

$$C_{initiale} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (38)$$

La valeur de $C_{initiale}$ permet de déterminer la masse totale (M_t) de sédiments en suspension avant le début du test et la proportion ($P(t)_i$) de matière restant en suspension après chaque

prélèvement en fonction de la hauteur initiale (H_{initiale}) du tube suivant respectivement les équations 39 et 40 :

$$M_t(t = 0) = C_{\text{initiale}} * H_{\text{initiale}} \quad (39)$$

$$P(t)_i = \frac{P(t_{i-1}) * C_{\text{initiale}} * H(t_{i-1}) - \frac{C_i * H_{\text{initiale}}}{n}}{M_t(t = 0)} \quad (40)$$

Pour un temps corrigé (t^c) en fonction de la variation de la hauteur du tube (Equation 41), la proportion de matières restant en suspension après un prélèvement est, selon Jones & Jago (1996) (Equation 42) :

$$t^c = \frac{t * H_{\text{initiale}}}{H} \quad (41)$$

$$P = \int_0^{H/t} \left(1 - \frac{Wt}{H_{\text{initiale}}}\right) f(w) dw \quad (42)$$

En multipliant la dérivée de l'équation (42) par le temps corrigé, on obtient successivement les équations 43, 44 et 45 qui permettent d'exprimer la fonction de répartition de la vitesse de chute des matières en suspension (Equation 46).

$$t^c \frac{dP}{dt^c} = t^c \frac{d}{dt^c} \left[\int_0^{H_{\text{initiale}}/t^c} f(w) dw - \int_0^{H_{\text{initiale}}/t^c} \frac{wt^c}{H} f(w) dw \right] \quad (43)$$

$$t^c \frac{d}{dt^c} \int_0^{H_{\text{initiale}}/t^c} f(w) dw = t^c \frac{dP}{dt^c} + t^c \frac{d}{dt^c} \int_0^{H_{\text{initiale}}/t^c} \frac{wt^c}{H} f(w) dw \quad (44)$$

$$\int_0^{H_{\text{initiale}}/t^c} f(w) dw = P + t^c \int_0^{H_{\text{initiale}}/t^c} \frac{w}{H} f(w) dw \quad (45)$$

$$\int_0^{H_{\text{initiale}}/t^c} f(w) dw = P - \frac{dP}{d(\ln t^c)} \quad (46)$$

Après la détermination de la fonction de répartition des vitesses de chute, les courbes P en fonction de t^c et $F(w)$ en fonction de w sont tracées. La courbe de $F(w)$ en fonction w permet de déterminer des valeurs caractéristiques de la vitesse de chute W_N % représentant des valeurs de la vitesse de chute W ayant N % de probabilité de ne pas être dépassées.

4.1.2.2. Sédiments du fond

4.1.2.2.1. Prélèvement des sédiments du fond

Les échantillons de sédiments ont été prélevés au moyen d'une benne Van Veen dans le plan d'eau lagunaire. Avant le contact de la benne avec le lit du plan d'eau, les mâchoires de celle-ci sont maintenues ouvertes par une tige de blocage reliée au câble qui permet la descente de la benne jusqu'au fond. Une fois la benne touche le fond, le câble est détendu, la tige de blocage libère les mâchoires. Lorsque le câble est tiré pour la remontée, les mâchoires étant libres se referment en emprisonnant des sédiments du fond très peu perturbés et lessivés qui sont remontés à la surface. Au total, ce sont quarante-et-neuf (49) échantillons de sédiments répartis sur toute la lagune et son chenal de décharge qui y ont été prélevés (Figure 26). Cependant, l'échantillon S10 a été exclu de l'analyse du fait de sa position jugée relativement hors de l'eau en marée basse.

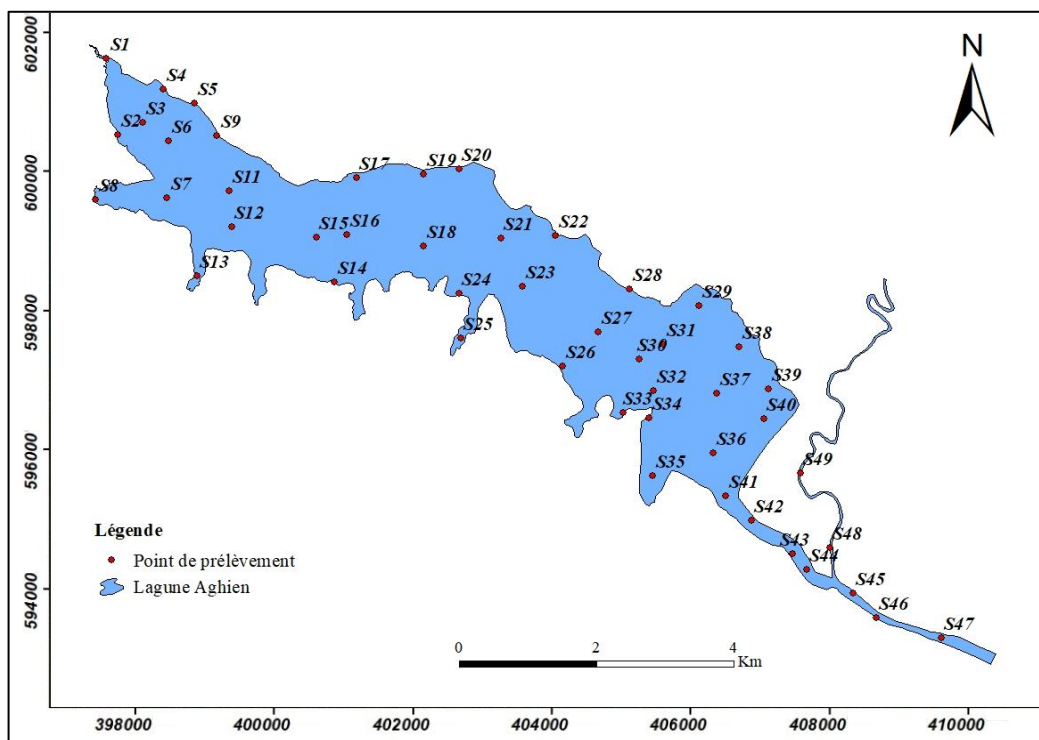


Figure 26 : Points de prélèvement des sédiments du fond

4.1.2.2.2. Analyse lithologique

La description lithologique a consisté à décrire le sédiment brut juste après la remontée à la surface. Cette description s'est faite suivant des critères d'appréciation visuelle et de toucher. De l'observation visuelle, une couleur correspondant au code couleur de l'échelle standard de coloration publiée par « *The Geological Society of America* » est attribuée au sédiment prélevé.

De plus, l'observation visuelle permet de préciser la composition du sédiment (débris végétaux, vase, coquilles, sable...). Le toucher, quant à lui, permet de déterminer, avant analyse granulométrique, la structure du sédiment (meuble, vaseux, sableux, vase sableuse...). Après la description sommaire *in situ*, les sédiments de sables sont conservés dans des sacs plastiques inertes et acheminés au Laboratoire de Géologie Marine, Sédimentologie et Environnement (LGMSE) du Centre de Recherche en Ecologie (CRE) pour des analyses granulométriques, morphoscopiques et minéralogiques.

4.1.2.2.3. Analyse granulométrique des sédiments de sable

L'analyse granulométrique passe d'abord par le traitement des échantillons de sédiments de sable prélevés, ensuite le calcul des paramètres statistiques des grains de sables traités, enfin l'établissement du faciès granulométrique.

✓ Traitement des sédiments de sable

Le traitement des échantillons de sable a consisté, après leur lavage à l'eau et leur passage à l'acide chloridrique afin de les débarrasser de matières organiques et des débris végétaux et coquilleux, à faire une analyse des grains pour déterminer les paramètres statistiques. Ainsi, une quantité de quatre cents grammes (400 g) du sédiment lavé est prélevé et séché à l'étuve à 105 °C pendant 48h. Après séchage, cent grammes (100 g) du sédiment sec est prélevé et passé sur une colonne de seize (16) tamis de la série AFNOR (diamètre allant de 5000 μm à 63 μm) montée sur une tamiseuse vibrante pendant dix minutes (10 min). Les refus de chaque tamis cumulé sont utilisés pour construire une courbe granulométrique à partir de laquelle les paramètres granulométriques sont déterminés.

✓ Paramètres granulométriques des sédiments de sable

La méthode de détermination des différents paramètres utilise les fractiles qui sont les dimensions de particules correspondant à des pourcentages cumulatifs déterminés (Rivière, 1977). Il s'agit des :

- quartiles Φ_{25} , Φ_{50} et Φ_{75} correspondent respectivement à 25 % ; 50 % et 75 % ;
- déciles Φ_{10} et Φ_{90} correspondent respectivement à 10 % et 90 % ;
- percentiles Φ_5 et Φ_{95} correspondent respectivement à 5 % et 95 % ;
- fractiles dits « écarts types » Φ_{16} et Φ_{84} correspondent respectivement à 16 % et 84 %.

Les « fractiles » sont exprimés en unité Phi ($\Phi = -\log_2 d \text{ (mm)}$).

Nous avons ainsi obtenu, après nettoyage, les divers paramètres granulométriques que sont la Moyenne (Mz), l'Indice de tri (It), le Sorting index ou classement (So) et le Skewness ou dissymétrie (Sk).

- **La moyenne**

Elle détermine le grain moyen d'un échantillon de sédiment ce qui donne une idée de l'éventail granulométrique propre à l'échantillon. La moyenne sera définie par la relation de Folk et Ward (1957) *in* Kouassi (2007) (Equation 47) :

$$Mz (\Phi) = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \quad (47)$$

Où Φ représente le diamètre du grain. Ainsi, Φ_{50} est le diamètre des sédiments correspondant à un pourcentage pondéral de 50 %. Le calcul de la moyenne permet de déterminer la nature des sédiments de la façon suivante :

- silts et argiles : $Mz < 63 \mu m$ soit ($Mz < 4 \Phi$) ;
- sables très fins : $63 \mu m < Mz < 125 \mu m$ soit ($4 \Phi < Mz < 3 \Phi$) ;
- sables fins : $125 \mu m < Mz < 250 \mu m$ soit ($3 \Phi < Mz < 2 \Phi$) ;
- sables moyens : $250 \mu m < Mz < 500 \mu m$ soit ($2 \Phi < Mz < 1 \Phi$) ;
- sables grossiers : $500 \mu m < Mz$ soit ($1 \Phi < Mz$).

Le tri des sédiments par le tamis a ensuite été évalué en calculant l'indice de triage.

- **Indice de triage (It ou Ecart-type)**

Il renseigne sur la qualité du tri des sédiments par le tamis. En d'autres termes c'est l'efficacité du tamis qui est évaluée par l'équation (48) suivante :

$$IT = \frac{\Phi_{25}}{\Phi_{75}} \quad (48)$$

Plus ce coefficient est voisin de 1, mieux les particules du sédiment sont bien triées (Aubouin *et al.*, 1979 *in* Amani, 2012).

- **L'indice de classement (ou Sorting Index (So))**

La dispersion des valeurs de la distribution autour de la tendance centrale traduit le bon ou le mauvais classement du sédiment. Elle exprime la constance ou l'irrégularité du niveau énergétique de l'agent de transport (Amani, 2012). Cet indice de classement est déterminé par l'équation (49) :

$$So = \left(\frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} \right) + \left(\frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6,6} \right) \quad (49)$$

Suivant les valeurs de So , nous avons :

- très bien classés : $So < 0,35$;
- bien classés : $0,35 < So < 0,50$;
- moyennement bien classés : $0,50 < So < 0,70$;
- modérément bien classés : $0,70 < So < 1$;
- mal classés : $1 < So < 2$;
- très mal classés : $2 < So < 4$;
- extrêmement mal classés : $4 < So$.

Il a fallu ensuite évaluer la taille prépondérante par le calcul du Skewness après le classement des particules.

• Skewness (dissymétrie ou asymétrie)

Il traduit le degré d'asymétrie de la courbe de distribution par rapport à la médiane et la prépondérance ou non d'éléments grossiers ou fins dans le sédiment. Sa valeur positive traduit une prépondérance d'éléments fins, inversement, un Skewness négatif traduit la prépondérance d'éléments grossiers. Le Skewness est calculé à l'aide de (50) :

$$Sk = \frac{\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} - \frac{\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (50)$$

Les résultats sont interprétés selon la proposition de Folk et Ward (1957 *in* Kouassi, 2007).

- $0 < Sk$ courbes vers les éléments fins ;
- $+ 0,30 < Sk < + 1,00$: très positif. Forte asymétrie vers les petites tailles ;
- $+ 0,10 < Sk < + 0,30$: positif. Asymétrie vers les petites tailles ;
- $- 0,10 < Sk < + 0,10$: symétrie granulométrique de l'échantillon ;
- $- 0,10 < Sk < 0$ courbes vers les éléments grossiers ;
- $- 0,30 < Sk < - 0,10$: négatif. Asymétrie vers les grandes tailles ;
- $- 1,00 < Sk < - 0,30$ très positif. Forte asymétrie vers les grandes tailles.

Après la détermination des paramètres granulométriques, l'interpolation de la moyenne granulométrique de chaque sédiment sous ArcGis 10.4.1 a permis d'établir la carte du faciès granulométrique de la lagune Aghien.

4.1.2.2.4. Faciès sédimentologique

La carte de répartition des sédiments superficiels est établie à partir des données de la moyenne granulométrique (Mz) des différents sédiments prélevés. Sur le terrain, les échantillons prélevés ont été systématiquement géoréférencés à l'aide d'un GPS Garmin, de manière à ce que chaque rupture de faciès soit localisée. Il a également été possible d'insérer l'ensemble de ces informations (Code du sédiment, la moyenne granulométrique, les coordonnées (x, y et z)) dans un Système d'Information Géographique (SIG) notamment sous ArcGis 10.4.1 afin de produire la carte du faciès granulométrique de la lagune Aghien.

4.1.2.2.5. Analyse morphoscopique et minéralogique

La dureté et l'insolubilité du quartz font de lui un élément très résistant. Très fréquent dans les roches sédimentaires détritiques (sables, grès etc.), le quartz est très utilisé lors des études morphoscopiques.

✓ Analyse morphoscopique des grains de quartz

La morphoscopie est une étude qualitative qui renseigne sur la nature de l'agent de transport, l'origine et les axes préférentiels de cheminement des sédiments. Les grains sont observés sous une loupe binoculaire munie d'une caméra. A l'aide de la charte visuelle (Amani, 2012), nous pourrions distinguer des grains à l'aspect :

- émoussé luisant : dont le contour général est à angles émoussés. Le grain apparaît brillant et transparent avec un aspect luisant. Ce grain luisant indique que l'usure est effectuée par un mode de transport aqueux (marin ou fluvial) ;
- rond mat : dont le contour général est émoussé en rond, la surface est dépolie par une constellation de marques de choc. Les grains ne sont pas transparents ou pratiquement pas. Il caractérise un mode de transport éolien (par le vent) ;
- non usé : dont le contour est anguleux, les faces sont planes, lisses et elles font entre elles un angle obtus. Normalement pas de trace d'usure ;
- sub-anguleux irréguliers à peine picotés ou émoussés mats. Les sub-anguleux ont le même aspect que les non-usés mais avec un début d'usure et des angles qui commencent à s'arrondir.

Les grains irréguliers à peine picotés ont leurs surfaces couvertes de picotes fines qui leur donnent un aspect noir non-brillant. Les émoussés-mats ont une surface dépolie et un contour général à angles émoussés (Saaidi, 1991 *in* Amani, 2012 ; Adopo *et al.*, 2008).

✓ Analyse minéralogique

Dans cette étude, la composition minéralogique des échantillons est examinée à la loupe binoculaire munie d'une caméra et d'un écran grâce aux minéraux tests disponibles au laboratoire. Elle porte sur les échantillons ayant une fraction supérieure à 63 μm (0,2 mm, 0,315 mm et 0,4 mm) afin d'identifier les minéraux caractérisant les sédiments. Les proportions suivantes déterminent l'abondance des minéraux dans le sédiment (Amani, 2012) :

- le minéral représente plus de 30 % de l'échantillon : très abondant ;
- le minéral représente 15 à 30 % de l'échantillon : abondant ;
- le minéral représente 5 à 15 % de l'échantillon : présent ;
- le minéral représente moins de 5 % de l'échantillon : trace.

4.1.3. Caractérisation géomorphologique de la lagune Aghien

Pour caractériser la géomorphologie de la lagune Aghien, il a d'abord fallu sonder les profondeurs, les altitudes du fond et des berges, traiter les données, utiliser ces données pour établir les cartes thématiques et tracer les courbes caractéristiques.

4.1.3.1. Sondage bathymétrique et topographique

Dans l'étude du fonctionnement hydrodynamique, la forme du fond et le relief des berges est d'une importance capitale. En effet, la représentation du fond permet de déceler les zones de haut et de bas fond, la pente du fond et d'évaluer l'épaisseur de la colonne d'eau. Ces informations sont cruciales dans la mise en place d'un modèle hydrodynamique et la fiabilité de celui-ci est fortement conditionnée par la qualité des résultats de la bathymétrie et des levés topographiques. L'étude de la morphologie de la lagune Aghien a donc nécessité des levés bathymétriques et topographiques effectués en juillet 2021.

4.1.3.1.1. Sondage bathymétrique

Les levés bathymétriques sont effectués suivant deux radiales principales (Figure 27). De par sa superficie, la bathymétrie de la lagune Aghien a nécessité deux (2) échosondeurs de type Humminbird Hélix 7 et Lowrance Elite HDS TI-12. Au cours du sondage, une impulsion électrique produite par l'émetteur de l'unité centrale est amplifiée et convertie en impulsion acoustique par le transducteur. Ce dernier, en mode émission, propage, dans le milieu, le signal acoustique durant la période correspondant à la durée de l'impulsion. Une fois le signal acoustique parvient au fond, il est renvoyé au transducteur. Le transducteur, en mode récepteur cette fois, transforme donc cette forme d'impulsion en une forme électrique avant de la transmettre à l'unité centrale. Lors du parcours des signaux, une base de temps convertit le

décalage de réception de l'écho en distance (données numériques). Le GPS de l'échosondeur donne, pendant ce temps les coordonnées géographiques et la profondeur de l'eau au point sondé (Diner & Marchand, 1995).

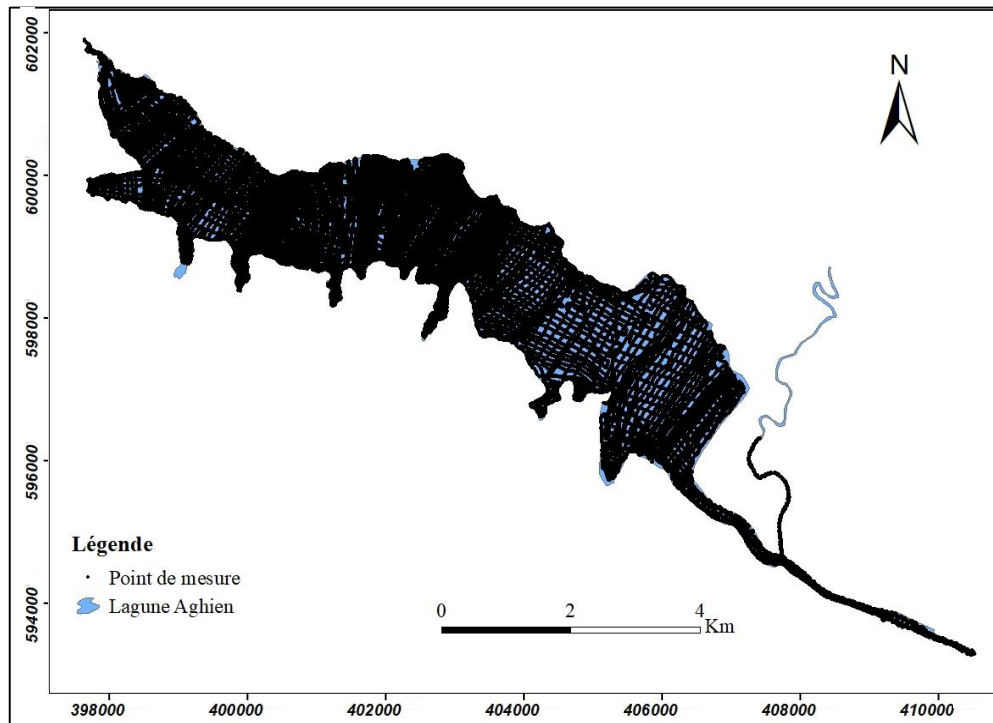


Figure 27 : Carte des points sondés dans la zone à modéliser

4.1.3.1.2. Sondage topographique

Les mesures avec STONEX S3i sont effectuées en mode radio afin de garantir la fiabilité des données. Ce mode d'acquisition de données nécessite quatre (4) étapes :

- installation du trépied à un endroit dont les coordonnées sont connues et installation du récepteur sur celui-ci. Ensuite, le récepteur est mis sous tension avec sélection du mode base ;
- démarrage de la base en entrant les coordonnées NGCI précises de l'emplacement. En effet, la base ne peut fonctionner si les coordonnées entrées sont très différentes des coordonnées de l'emplacement ;
- installation du rover en fixant le support sur le poteau. Par la suite la connexion de la radio est établie suivi de la mise sous tension du récepteur avec sélection du mode ;
- configuration du Rover. Pour le configurer, un clic est fait sur "Appareil" ensuite sur "Mode de travail" pour choisir le mode rover et configurer sa liaison de données, les paramètres de l'antenne et le système satellite.

Pour permettre la conversion des données de profondeur en données d'altitude, lors des levés topographiques, la cote du plan d'eau a été, à chaque fois, relevée pendant toute la durée des sondages bathymétriques.

4.1.3.2. Traitement des données sondées

Le traitement des données bathymétriques et topographiques a consisté à éliminer les données aberrantes et à estimer les données réelles de sonde.

4.1.3.2.1. Elimination des données aberrantes

Pour la bathymétrie, les erreurs d'enregistrement s'observent par l'existence des valeurs aberrantes contenues dans le jeu de données brutes enregistrées. Ces aberrations sont soit occasionnées par une variation brusque du niveau de la lagune due au marnage qui met le transducteur hors de l'eau, soit par une accélération brusque ou lors d'un virage mal abordé. Plusieurs méthodes statistiques permettent l'élimination de ces valeurs aberrantes. Dans notre cas, nous avons appliqué l'équation 51 basées sur la définition d'une région d'acceptation des données.

$$[Q_1 - 1,5.IQR ; Q_3 + 1,5.IQR] \quad (51)$$

Avec,

$IQR = Q_3 - Q_1$: Interquartile Range ou Intervalle Interquartile

Q_1 : le premier quartile de l'échantillon

Q_3 : le troisième quartile de l'échantillon

4.1.3.2.2. Données bathymétriques

Les corrections sont effectuées afin de déterminer la profondeur réelle en chaque point sondé. Ces corrections concernent la profondeur d'immersion du transducteur et la marée dynamique. En chaque point, la sonde réelle est obtenue après avoir ajouté, à la profondeur lue sur l'échosondeur, la profondeur d'immersion du transducteur, plus ou moins le marnage (Kouassi, 2007 ; N'Guessan, 2008 ; Amani, 2012). La sonde réelle est exprimée à travers l'équation 52 :

$$S_r = P_e + P_{it} + m \quad (52)$$

Avec,

S_r : sonde réelle (m),

P_e : profondeur lue sur l'échosondeur (m),

P_{it} : profondeur d'immersion du transducteur (m) et

m : marnage (m)

Après la correction des profondeurs de sonde, le relief du fond lagunaire a été représenté.

4.1.3.2.3. Bathymétrie de la lagune Aghien

Les données corrigées introduites dans le logiciel ArcGIS sous format Excel (x,y,z) ont été digitalisées et interpolées pour réaliser la carte bathymétrique. Les méthodes d'interpolation sont basées sur le principe que les valeurs des points spatialement proches ont des similitudes plus grandes que les points distants. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes d'interpolation, nous avons utilisé la méthode de la Pondération par l'Inverse Distance Weighted (IDW).

Cette méthode étant une distance moyenne pondérée, elle ne peut créer de valeur supérieure à l'entrée la plus élevée ou inférieure à l'entrée la plus faible. Elle ne peut par conséquent pas créer de crêtes ni de vallées si ces extrêmes n'ont pas déjà été échantillonnés (Watson & Philip 1985). Le choix de la méthode IDW repose sur le fait que le sondage bathymétrique a été dense et que les données ne dépassent pas quarante-cinq millions (45 000 000). Selon Watson & Philip (1985), l>IDW donne de meilleurs résultats lorsque l'échantillonnage est suffisamment dense par rapport à la variation locale qui tente d'être simulée. Cette méthode reposant principalement sur l'inverse de la distance élevée à une puissance mathématique permet une concentration sur les points les plus proches. Ainsi, plus une donnée est proche plus elle influence et la surface interpolée sera moins lisse.

4.1.3.2.4. Pentés du fond de la lagune Aghien

Pour évaluer les pentes du fond, les données corrigées ont été appelées sous le logiciel ArcGIS 10.4.1 sous format Excel (x,y,z). Sur ces données, l'outil « Slope » à partir de l'outil « Surface » contenu dans « Spatial Analyst Tools » a été appliqué pour avoir la carte brute des pentes du fond. Pour parfaire la carte, les pentes obtenues ont été réclassifiées à partir de l'outil « Reclassify » contenu dans « Reclass » qui est une fenêtre de « Slope » afin de sortir la carte définitive des pentes.

4.1.3.2.5. Surface et volume de la lagune Aghien

La détermination des surfaces et volumes pour les côtes successives du fond de la lagune Aghien s'est faite par la construction de la courbes $H = f(S)$ et $H=f(V)$. Pour cela, à l'aide du logiciel ArcGis 10.4.1., les surfaces et volumes élémentaires correspondant à différentes côtes ont été générées. Pour ce faire, à partir de la bathymétrie, nous avons créé des courbes de niveau (contour) à partir duquel un TIN a été généré pour l'extraction des surfaces et volumes élémentaires.

- **Création d'un Contour**

La création d'un contour se fait sous « Spatial Analyst Tool » option « Surface ». La bathymétrie est définie comme le « Raster » et l'intervalle entre deux courbes de niveau successives est pris égal à 1 m (Figure 28).

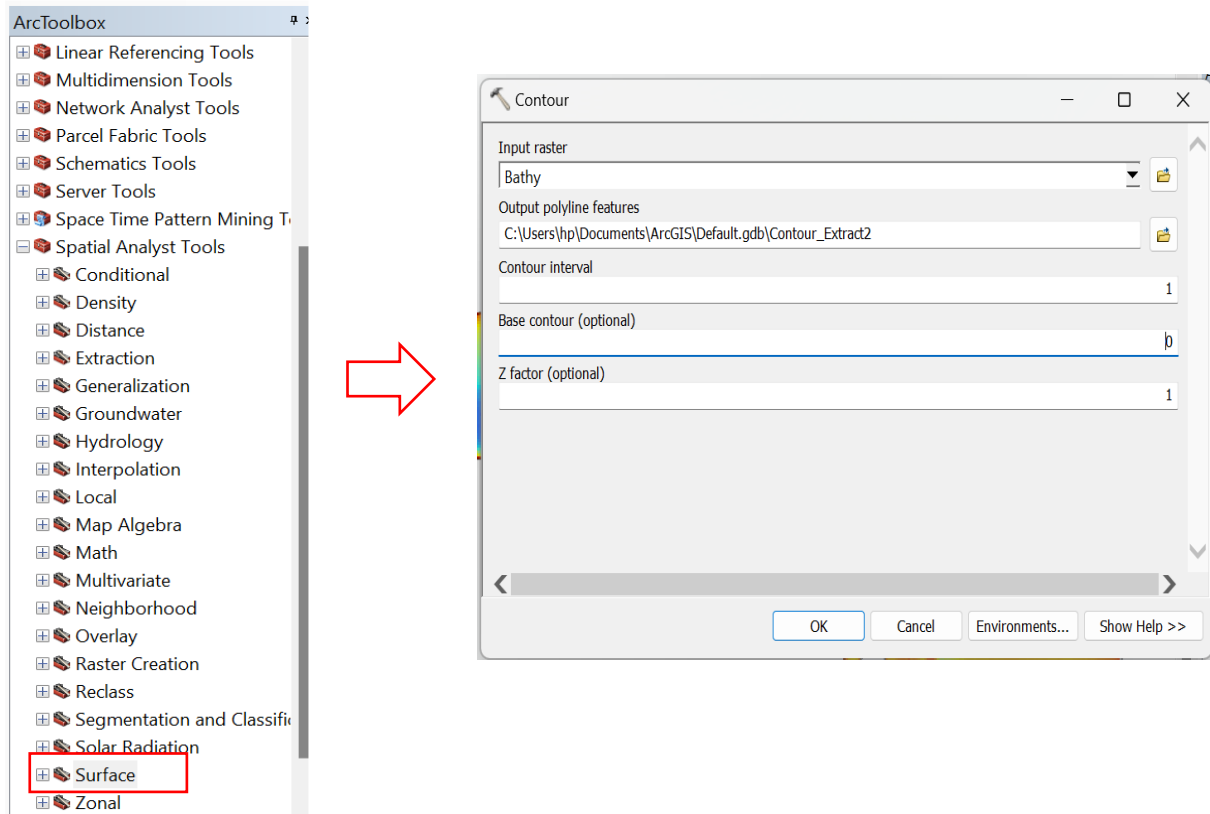


Figure 28 : Processus de génération des courbes de niveau

- **Création d'un TIN**

La création du TIN se fait sous « 3D Analyste Tools » (Figure 29). Dans cet outil, ouvrir « Data Management » puis « TIN » et sélectionner « Create TIN » pour créer le TIN qui sera utilisé pour générer des surfaces et volumes élémentaires.

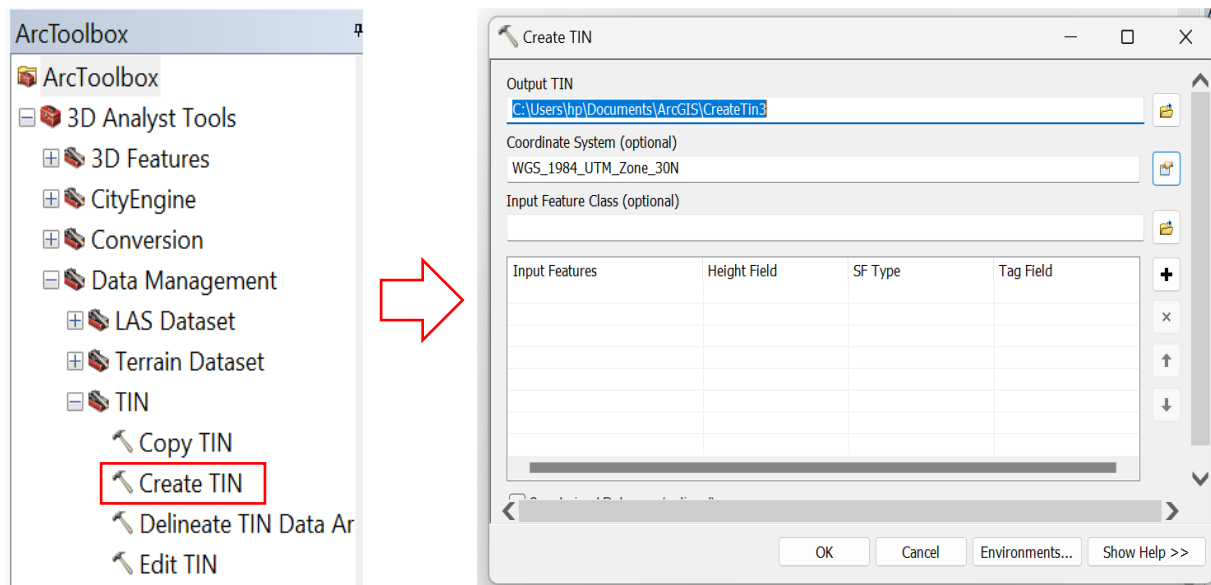


Figure 29 : Processus de création d'un TIN

Dans cette fenêtre, il faut renseigner le système de coordonnées correspondant à votre zone d'étude. Au niveau de « Feature Classe », renseigner le « Contour » créé précédemment.

- **Génération de Surface et Volume élémentaire**

Les surfaces et volumes élémentaires sont générés sous « 3D Analyst Tools ». Dans l'outil « Functional Surface » ouvrir « Surface Volume ». Dans cette dernière fenêtre, dans « Input Surface » insérer le « TIN » créé précédemment (Figure 30). Si le niveau choisi est le niveau supérieur, alors choisir « BELOW » si non, choisir « ABOVE ». Dans « Plane Height » choisir le niveau (Profondeur ou Cote). L'intervalle doit être constant et maintenu jusqu'au fond ou à la surface libre du plan d'eau.

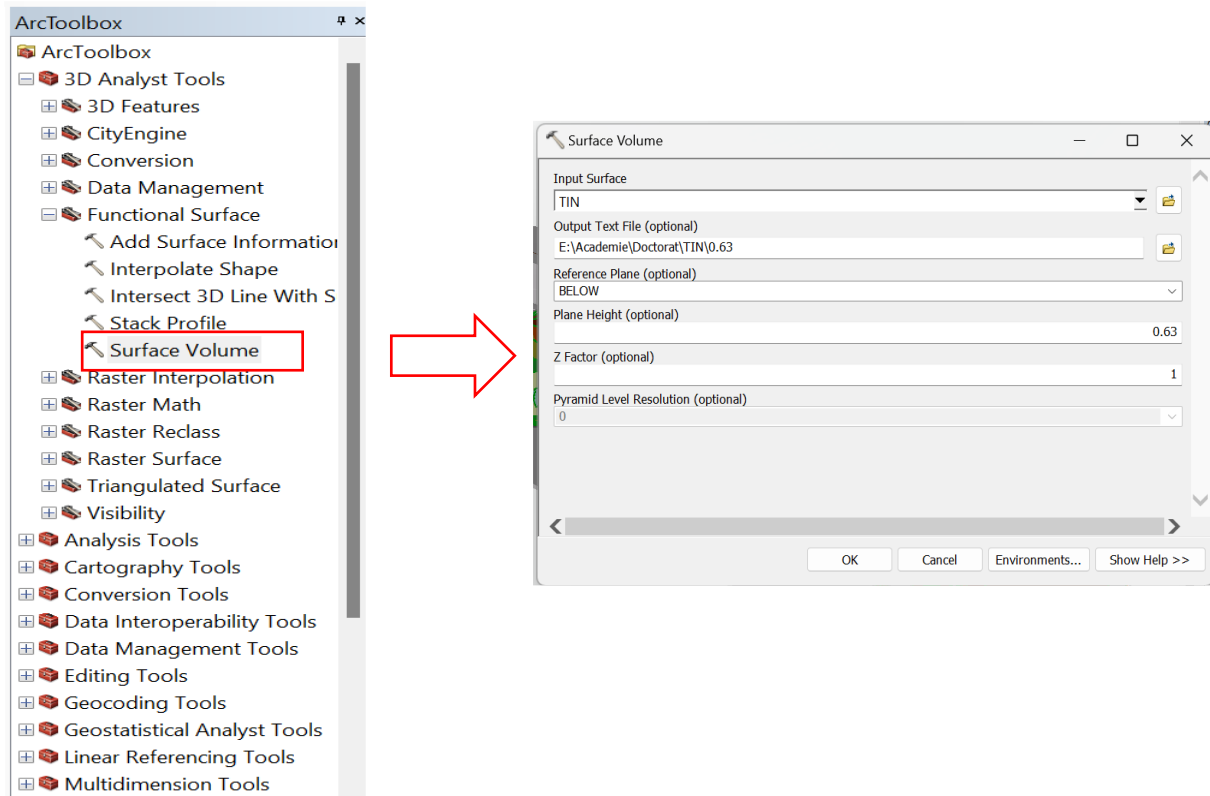


Figure 30 : Processus d'enregistrement des surfaces et volumes élémentaires

Les surfaces et volumes élémentaires générés en fonction du niveau de profondeur sont utilisés pour construire la courbe hauteur-volume et hauteur-surface.

4.1.4. Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de la lagune Aghien et des tributaires

L'étude des paramètres hydrodynamiques des sections des tributaires et de la lagune s'est déroulée le 21 juillet 2021 en marée haute et en marée basse. Pour cela, cinq (05) sections de mesure définies ont été jaugées :

- une section sur la rivière Bété au niveau du pont (route d'Alépé) ;
- deux sections dans le chenal (amont et aval de la confluence de la Mé) ;
- une section sur le fleuve Mé à environ 300 mètres en amont de la confluence ;
- une section sur la lagune Aghien au niveau de la zone de captage.

Ces séries de mesures réalisées au moyen d'un Profileur Acoustique de Courant à effet Doppler (ADCP) ont permis de :

- mesurer les vitesses sur chaque section tout en établissant le profil des vecteurs vitesse ;
- déterminer les profils en travers et les sections mouillées ;
- déterminer la largeur moyenne de chaque section de mesure ;

- déterminer les débits moyens d'écoulement sur chaque section de mesure.

4.1.4.1. Jaugeage des sections

La mesure des caractéristiques hydrauliques et de la courantologie de la lagune Aghien et de ses tributaires a utilisé deux ADCP dont le Workhorse Rio Grande et le OTT Qliner 2.

4.1.4.1.1. Mode d'emploi de l'ADCP Workhorse Rio Grande

Avant toute mesure, le Workhorse Rio Grande a d'abord été monté sur une embarcation en respectant toutes les dispositions de son installation (Figure 31). C'est-à-dire monté sur la coque et plongé à vingt centimètre (20 cm) sous l'eau avec une orientation vers l'avant du hors-bord pour le transducteur 3. Ensuite, une connexion entre lui et le logiciel WinRiver 2 permettant de tester le bon fonctionnement du capteur est établie. Un fichier de configuration est créé pour contenir les mesures effectuées au niveau de chaque transect. La largeur de l'angle mort (portion dont la profondeur ne permet pas d'effectuer les mesures) sur la rive de départ est estimée avant les mesures sur les verticales. A partir de cette rive préalablement choisie, les mesures sont effectuées en se dirigeant lentement (6 km/h) vers la rive opposée avec un pas d'espacement des mesures sur chaque verticale de deux secondes (2 s). A la fin d'un transect, l'angle mort de l'autre rive est estimé. Au cours de chaque traversée, les différents débits (débit total et débits d'extrapolation), la profondeur de la section de mesures sous le capteur, la vitesse et la distance parcourue par le hors-bord sont enregistrées (Mueller & Wagner, 2007). Plusieurs (3 à 7) traversées sont nécessaires afin de choisir celle qui donne des valeurs fiables. Lors du jaugeage, l'ADCP est réglé pour effectuer des mesures dans des cellules de vingt-cinq centimètre (25 cm) d'épaisseur sur toute la colonne d'eau permettant une acquisition des données jusqu'à trente mètres (30 m) de profondeur (RDI, 2007). Pour prendre en compte l'effet de la marée sur les échanges de masse d'eau entre la lagune Aghien et ses tributaires, les mesures ont été faites en marée basse et en marée haute.

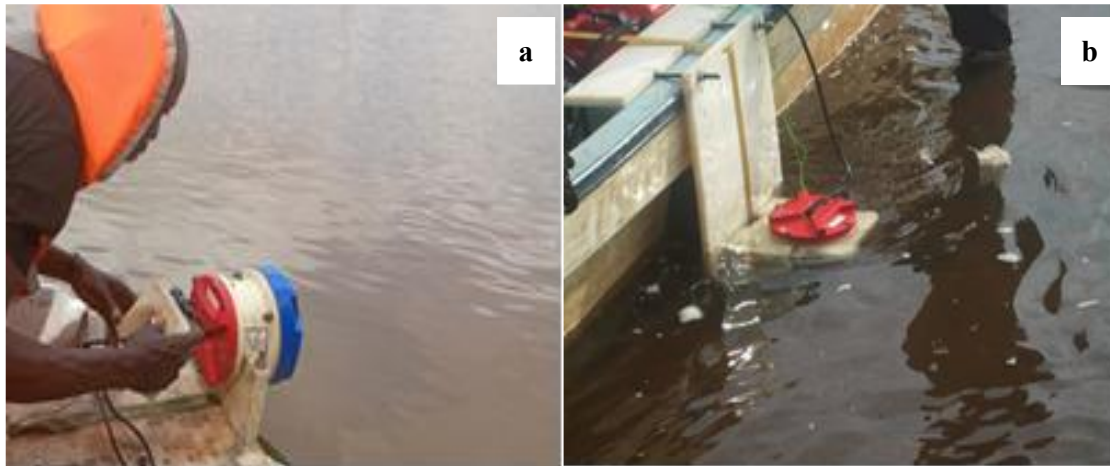


Figure 31 : Mode opératoire du Workhose Rio Grande

a) Montage ; b) Mesure

4.1.4.1.2. Mode d'emploi de l'ADCP OTT Qliner 2

Après l'établissement de la connexion entre le Qliner 2 et le PDA, un site de mesure appelé « Pont Bété » pour contenir les données de mesures a été créé. Ensuite, la distance entre la première verticale de mesure et le point de référence a été estimée et la distance entre deux verticales de mesures fixée à 2 m. Pour effectuer les mesures, le capteur du Qliner 2 est orienté dans le sens inverse des écoulements (Figuérez *et al.*, 2021). Il est tenu au moyen d'un câble dont une extrémité est tenue par un opérateur et l'autre extrémité tenue par un autre opérateur ou munie d'une poulie et fixée au sol.

4.1.4.1.3. Détermination des débits des Profileurs Acoustiques

Pendant les mesures, la colonne d'eau est subdivisée en de petites colonnes d'eau élémentaires de taille uniforme avec une profondeur donnée (Lee *et al.*, 2013) dans lesquelles il effectue des mesures de vitesse et de débits (Figure 32).

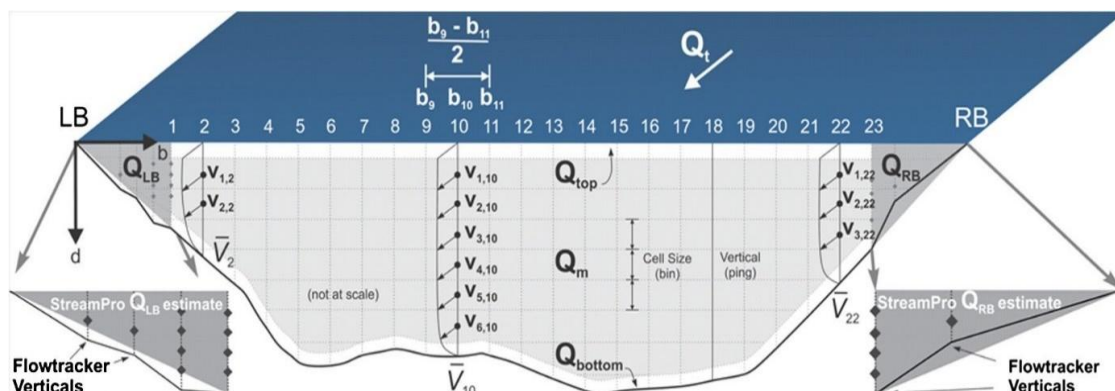


Figure 32 : Fonctionnement des profileurs acoustiques à effet Doppler

Source : Lee *et al.* (2013)

L'ADCP crée par la suite une moyenne des vitesses du courant dans chacune des petites colonnes d'eau de mesures. Ce processus permet d'obtenir la vitesse moyenne dans chacune des colonnes d'eau élémentaire moyennée sur toute la surface et pondérée par rapport au centre de la colonne d'eau élémentaire. Chaque colonne d'eau élémentaire correspond à une profondeur. Ces profondeurs élémentaires mises bout à bout donnent un profil des vitesses du courant sur toute la colonne d'eau. Les équations (53, 54, 55 et 56) permettent d'obtenir les débits estimés (des angles morts), les débits mesurés et le débit total de la section de jaugeage (Le Coz *et al.*, 2012 ; Lee *et al.*, 2013).

$$Q_{RG} = 0,3535 \cdot b_1 \cdot d_1 \cdot \bar{v}_1 \quad (53)$$

$$Q_{RD} = 0,3535 \cdot (b_{RB} - b_{23}) \cdot d_{23} \cdot \bar{v}_{23} \quad (54)$$

$$Q_m = \bar{v}_1 \cdot d_1 \cdot \left(\frac{b_2 - b_1}{2} \right) + \sum_{n=2}^{22} \left(\bar{v}_n \cdot d_n \cdot \left(\frac{b_n - b_{n-1}}{2} \right) \right) + \bar{v}_{23} \cdot d_{23} \cdot \left(\frac{b_{23} - b_{22}}{2} \right) \quad (55)$$

$$Q_t = Q_{RG} + Q_m + Q_{RD} \quad (56)$$

Avec Q_{RG} le débit estimé de la rive gauche, Q_{RD} le débit estimé de la rive droite, Q_m débit moyen mesuré effectivement et Q_t le débit total sur la section parcourue.

4.1.4.2. Traitement des données de jaugeage

Les données issues du jaugeage des sections ont respectivement été extraites avec les logiciels WinRiver 2 pour le Workhorse Rio Grande et QReview pour le OTT Qliner 2. Après extraction, ces données sont débarrassées des valeurs aberrantes par la définition d'un intervalle d'acceptation (Equation 50).

4.2. Simulation de l'influence des pressions anthropiques et naturelles sur la dynamique hydro-sédimentaire de la lagune Aghien

4.2.1. Préparation des données

Tout travail de reproduction de phénomène physique débute par la préparation des données d'observation. La qualité de ces observations (données mesurées) est primordiale dans la mesure où elle conditionne la fiabilité des résultats. Ainsi, il a fallu vérifier la fiabilité des données et combler les données manquantes pour cette étude.

4.2.1.1. Préparation des données de débits

Les données de débits des affluents (Bété, Djibi et Mé) sont utilisées en condition aux limites. Elles ne doivent donc pas comporter de lacunes ou être entachées d'erreur lors de leur utilisation dans le modèle. Ainsi, sur les périodes de données manquantes inférieures à 2 semaines, la dernière valeur mesurée est appliquée sur toute la période. Les données manquantes sur la Bété sont remplacées par le débit mesuré sur la Djibi multiplié par un coefficient de 1,68 conformément à un rapport moyen de proportionnalité entre les deux stations.

4.2.1.2. Préparation des données de niveau d'eau à Aghien et Potou

L'échelle limnométrique située à M'Batto Bouaké (dans la lagune Potou en aval du chenal de connexion avec la lagune Aghien) a été endommagée en 2019 et la référence altimétrique (altitude du 0 de l'échelle) de la mesure n'est pas connue. Pour pouvoir utiliser cette donnée en condition limite aval du modèle, il est nécessaire de reconstituer les données manquantes. La reconstitution des données a été faite à partir du niveau mesuré dans la lagune Aghien. Les mesures des niveaux d'eau disponibles entre 2016 et 2019 à Aghien et M'Batto Bouaké, dans un premier temps, ont été décomposées pour isoler, du reste, le signal de la marée. L'identification des composantes du signal de marée aux deux points a permis de déterminer l'intervalle de temps entre ces deux signaux afin de reconstituer les signaux sur les périodes manquantes entre 2016 et 2019. Puis, les coefficients permettant la transformation de la série temporelle d'Aghien à celle de M'Batto Bouaké ont été calculés (Décalage temporelle du signal de marée et ratio d'amplitude). Ces coefficients ont ensuite été appliqués à toute la période disponible (2016 à 2021) pour reconstituer la série temporelle de M'Batto Bouaké. Le niveau reconstitué a été validé par comparaison à la mesure sur les périodes disponibles.

4.2.2. Modélisation hydrodynamique

La modélisation numérique des écoulements consiste à mailler le domaine et à discrétiser chaque équation (équations de continuité, de quantité de mouvement et de transport) du modèle mathématique suivant la méthode des volumes finis avant leur programmation dans un langage informatique.

4.2.2.1. Discrétisation

4.2.2.1.1. Discrétisation temporelle

La discrétisation en temps sous forme implicite de l'équation compacte (21) sur un pas de temps $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ donne l'équation 57 :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(h\phi)^{n+1} + \frac{\partial}{\partial x}(hu\phi)^{n+1} + \frac{\partial}{\partial y}(hv\phi)^{n+1} \\
= \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^{n+1} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^{n+1} + S_\phi^{n+1}
\end{aligned} \quad (57)$$

Cette formulation implicite en temps garantit la stabilité inconditionnelle quel que soit le pas de temps. Le terme instationnaire pouvant provoquer des limitations liées au pas de temps est approché par un schéma d'Euler d'ordre 1 (Equation 58) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(h\phi)^{n+1} = \frac{(h\phi)^{n+1} - (h\phi)^n}{\Delta t} \quad (58)$$

4.2.2.1.2. Discrétisation spatiale

La discrétisation du domaine physique, communément appelée maillage, s'est faite dans cette étude suivant des éléments de forme structurée sur des grilles décalées (Figure 33). Dans la technique de la grille décalée, une grille est utilisée pour tous les scalaires et une autre pour chaque composante de vitesse. Cela garantit une bonne représentation du champ de pression, en évitant les solutions en "zig-zag" bien connues (Moukalled *et al.*, 2016). Les quantités scalaires sont calculées au centre des cellules centrale (i, j) , la composante de vitesse dans la direction x est calculée au centre des faces Ouest $(i - \frac{1}{2}, j)$ et Est $(i + \frac{1}{2}, j)$; la composante de vitesse dans la direction y est calculée au centre des faces Nord $(i, j + \frac{1}{2})$ et Sud $(i, j - \frac{1}{2})$ (Figure 33). Les valeurs manquantes sont obtenues par interpolation.

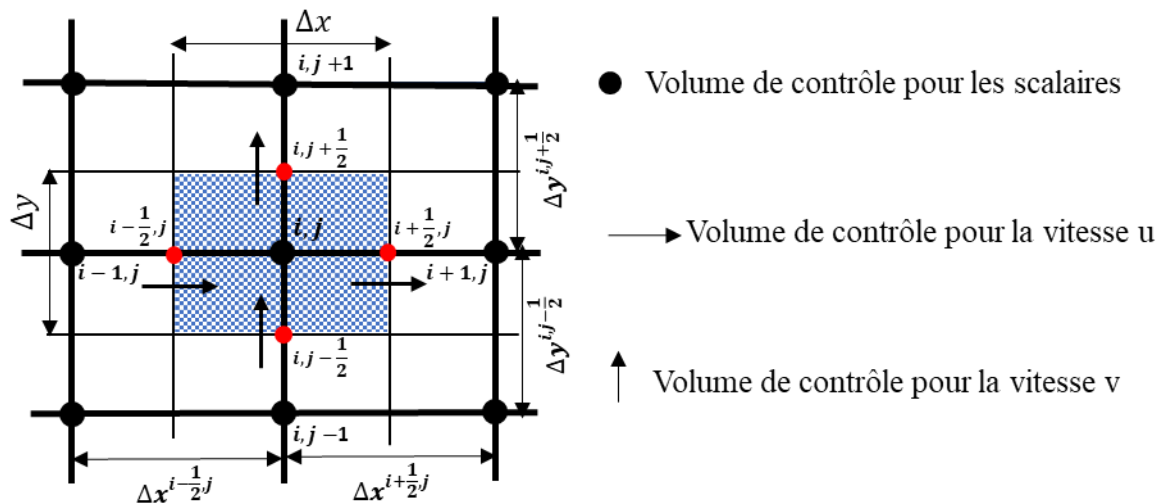


Figure 33 : Maillage en volume finis sur des grilles décalées

L'intégration de l'équation de conservation (Equation 18) donne l'équation 59 suivante :

$$\frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} (h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n) + (hu)_{i+\frac{1}{2},j} \Delta y - (hu)_{i-\frac{1}{2},j} \Delta y + (hv)_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta x - (hv)_{i,j-\frac{1}{2}} \Delta x = 0 \quad (59)$$

Posons (Equation 60) :

$$F_{i-\frac{1}{2},j/i+\frac{1}{2},j} = (hu)_{i-\frac{1}{2},j/i+\frac{1}{2},j} \Delta y \quad ; \quad F_{i,j-\frac{1}{2}/i,j+\frac{1}{2}} = (hv)_{i,j-\frac{1}{2}/i,j+\frac{1}{2}} \Delta x \quad (60)$$

Sur le volume de contrôle, l'intégration sous la forme conservative dans le temps de l'équation de quantité de mouvement donne l'équation (61) :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} (h_{i,j}^{n+1} \phi_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n \phi_{i,j}^n) &+ h_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} \phi_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} \Delta y - \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} \Delta y \\ &- h_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} \phi_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} \Delta y + \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} \Delta y + h_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} \phi_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} \Delta x \\ &- \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} \Delta x - h_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} \phi_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} \Delta x + \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} \Delta x \\ &= S_{\phi,i,j}^{n+1} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (61)$$

Posons (Equation 62) :

$$J_{w,e}^{n+1} = \left(hu\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{w,e}^{n+1} \Delta y \quad ; \quad J_{n,s}^{n+1} = \left(hv\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{n,s}^{n+1} \Delta x \quad (62)$$

En multipliant l'équation 59 par $\phi_{i,j}$ et la soustrayant de l'équation 61 on obtient l'équation de transport pour la variable ϕ (Equation 63) :

$$\begin{aligned} \frac{\phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^n}{\Delta t} h_{i,j}^n \Delta x \Delta y &+ \left(h_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} \phi_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} \Delta y - \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - \left((hu)_{i+\frac{1}{2},j} \Delta y \right) \phi_{i,j}^{n+1} \right) \\ &- \left(h_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} \phi_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} \Delta y - \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} - \left((hu)_{i-\frac{1}{2},j} \Delta y \right) \phi_{i,j}^{n+1} \right) \\ &+ \left(h_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} \phi_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} \Delta x - \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - \left((hv)_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta x \right) \phi_{i,j}^{n+1} \right) \\ &- \left(h_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} \phi_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} \Delta x - \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} - \left((hv)_{i,j-\frac{1}{2}} \Delta x \right) \phi_{i,j}^{n+1} \right) \\ &= (S_{c(i,j)}^{n+1} + S_{p(i,j)}^{n+1} \phi_{i,j}^{n+1}) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (63)$$

Soit (Equation 64) :

$$\begin{aligned}
& \frac{\phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^n}{\Delta t} h_{i,j}^n \Delta x \Delta y + \left(J_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - F_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} \phi_{i,j}^{n+1} \right) - \left(J_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} - F_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} \phi_{i,j}^{n+1} \right) \\
& + \left(J_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - F_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} \phi_{i,j}^{n+1} \right) - \left(J_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} - F_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} \phi_{i,j}^{n+1} \right) \\
& = (S_{c(i,j)}^{n+1} + S_{p(i,j)}^{n+1}) \phi_{i,j}^{n+1} \Delta x \Delta y
\end{aligned} \tag{64}$$

4.2.2.2. Evaluation des flux

Les flux sont constitués de flux diffusifs et de flux convectifs.

✓ Flux diffusifs

Les flux diffusifs sont approximativement exprimés à l'aide d'un schéma centré classique d'ordre 2. La valeur du coefficient de diffusion sur chaque face du volume de contrôle est la moyenne harmonique des valeurs aux nœuds situés de part et d'autre de la face considérée (Patankar, 1980). Le flux diffusif et son coefficient sur la face $(i - \frac{1}{2}, j)$, peuvent être écrits comme suit (Equation 65) :

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}}{\Delta x^{i-\frac{1}{2}}} ; \quad (\Gamma_\phi)_{i-\frac{1}{2},j} = 2 \frac{\Gamma_{\phi_{i,j}} \Gamma_{\phi_{i-1,j}}}{\Gamma_{\phi_{i,j}} + \Gamma_{\phi_{i-1,j}}} \tag{65}$$

✓ Flux convectifs

Les flux convectifs sont évalués à l'aide d'un schéma en amont (UPWIND). Dans le cas où la convection est dominante, il suppose que la valeur de ϕ aux faces du volume est celle du nœud voisin porté par la vitesse. On obtient le flux convectif sur la face $(i - \frac{1}{2}, j)$ (Equation 66) :

$$\text{si } F_{i-\frac{1}{2},j} > 0 \text{ alors } (\phi)_{i-\frac{1}{2},j} = \phi_{i-1,j} \text{ et si } F_{i-\frac{1}{2},j} < 0 \text{ alors } (\phi)_{i-\frac{1}{2},j} = \phi_{i,j} \tag{66}$$

4.2.2.3. Résolution numérique

Le système algébrique qui résulte de la discrétisation peut s'écrire sous la forme (Equation 67) :

$$a_{i,j} \phi_{i,j} = a_{i+\frac{1}{2},j} \phi_{i+1,j} + a_{i-\frac{1}{2},j} \phi_{i-1,j} + a_{i,j-\frac{1}{2}} \phi_{i,j-1} + a_{i,j+\frac{1}{2}} \phi_{i,j+1} + b_{i,j} \tag{67}$$

La résolution de ce système s'effectue, de façon itérative, à l'aide de l'algorithme TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) appliqué à chaque direction. Contrairement aux méthodes directes,

cette méthode ne nécessite pas la construction d'une matrice, ce qui limite considérablement la capacité mémoire requise.

A chaque pas de temps, les variables calculées d'une itération à l'autre peuvent varier de façon brutale, ce qui peut nuire à la convergence de la solution approchée de l'équation (67). La technique de relaxation proposée par Patankar (Patankar, 1980) est introduite pour amortir ces variations brutales en corrigeant la solution obtenue à l'itération interne $\eta + 1$ de la façon suivante (Equation 68) :

$$\phi_{i,j}^{\eta+1,\text{new}} = C_r \phi_{i,j}^{\eta+1,\text{old}} + (1 - C_r) \phi_{i,j}^{\eta} \quad (68)$$

Où C_r est la constante de sous-relaxation ($0 \leq C_r \leq 1$).

4.2.2.4. Conditions aux limites

Le domaine est subdivisé en deux types de frontières à savoir les frontières fermées et ouvertes. Les frontières ouvertes sont d'une part les confluences des tributaires de la lagune (rivières Djibi et Bété et le chenal) et d'autre part la surface libre du plan d'eau. Le fond du plan d'eau et les berges constituent les frontières fermées, c'est-à-dire les échanges de flux sont nuls à ces endroits. Pour les vitesses, une condition limite d'adhérence est-elle appliquée. Les conditions aux limites associées aux équations régissant l'écoulement sont de type Neumann en amont (la valeur du flux est imposée) et/ou de type Dirichlet en aval (la valeur de la hauteur d'eau est imposée). Comme pour les équations de transport, nous optons pour une formulation implicite des conditions aux limites. Pour l'illustrer, prenons l'exemple de la paroi $(i, j - \frac{1}{2})$ (Figure 34).

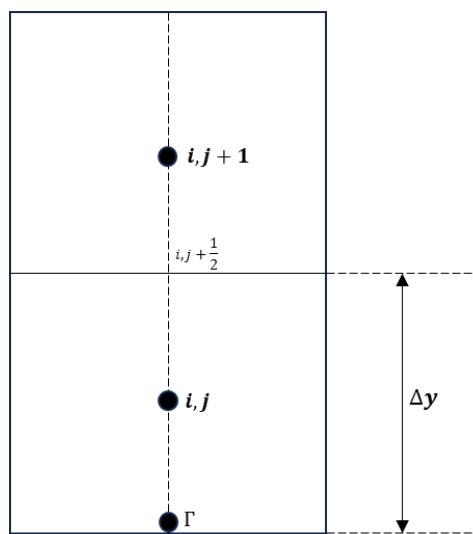


Figure 34 : Volume de contrôle pour la frontière Sud

Un développement de Taylor des variables au voisinage de cette limite (Patankar, 1980) conduit aux équations (69 et 70) :

$$\phi_{i,j} = \phi_{\Gamma} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{\Gamma} \frac{\Delta y}{2} + \left(\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}\right)_{\Gamma} \frac{\Delta y^2}{8} + o(\Delta y^3) \quad (69)$$

$$\phi_{i,j+1} = \phi_{\Gamma} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{\Gamma} \frac{3\Delta y}{2} + \left(\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}\right)_{\Gamma} \frac{9\Delta y^2}{8} + o(\Delta y^3) \quad (70)$$

En combinant ces deux expressions de manière à éliminer les dérivées secondes, on obtient alors (Equation 71) :

$$\phi_{\Gamma} = \frac{9}{8}\phi_{i,j} - \frac{1}{8}\phi_{i,j+1} - \frac{3}{8}\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{\Gamma} \Delta y \quad (71)$$

De sorte que le flux à la limite Sud est calculé à partir de la relation suivante (Equation 72) :

$$J_{\Gamma} = h\nu\phi_{\Gamma} - \Gamma_{\phi} \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{\Gamma} \quad (72)$$

En utilisant l'équation (72) on peut éliminer l'inconnue ϕ_{Γ} si la condition à la limite est de type Neumann, ou l'inconnue $\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{\Gamma}$ si la condition à la limite est de type Dirichlet.

La grille utilisée pour discrétiser nos équations est régulière (Annexe 2), alors que le domaine de calcul a des contours irréguliers (Figure 35). Pour adapter la grille régulière aux contours irréguliers, certains volumes de contrôle de la grille régulière sont rendus inactifs, ou « bloqués », de sorte que les volumes de contrôle actifs restants forment le domaine irrégulier souhaité. Un exemple est présenté à la figure 33, où les zones ombrées indiquent les volumes de contrôle inactifs. Patankar (1980) a noté qu'il est souvent possible d'obtenir des réponses étonnamment bonnes à partir d'une représentation plutôt grossière de la frontière. Dans les volumes de contrôle inactifs, la valeur connue de ϕ est établie. Dans la présente étude, les régions inactives représentent une frontière solide stationnaire. Par conséquent, les composantes de la vitesse dans ces régions sont égales à zéro.

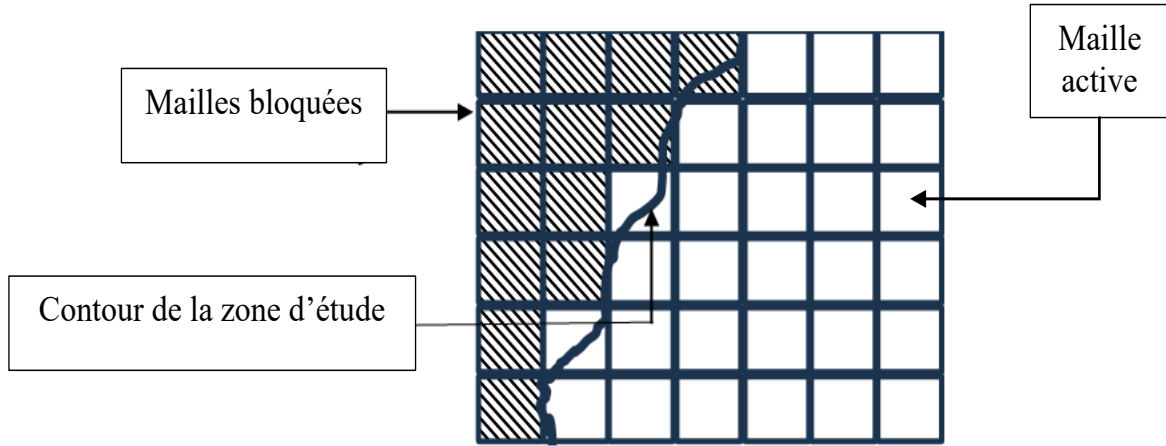


Figure 35 : Frontière irrégulière dans un maillage régulier

4.2.2.5. Technique de couplage vitesse/pression

Les principales difficultés associées à la résolution des équations de la mécanique des fluides sont, d'une part, l'absence d'équation d'évolution de la pression et, d'autre part, la nécessité de satisfaire l'équation de continuité. Ce problème est traité ici en utilisant la méthode dite PISO (Pressure Implicit Splitting of Operators) (Patankar, 1980 ; Chow & Cheung, 1997) (Annexe 3). Le principe de l'algorithme PISO itératif est un algorithme prédicteur/correcteur où la correction s'effectue en deux étapes. Prenant l'exemple de la face $(i + 1, j)$ pour u et de la face $(i, j + 1)$ pour v d'un volume de contrôle scalaire, on suppose un champ de pression estimé P^* , ce qui permet de calculer les vitesses estimées u^* (Equation 73) et v^* (Equation 74) par le système suivant :

$$a_{i+\frac{1}{2},j} u_{i+\frac{1}{2},j}^* = a_{i+\frac{3}{2},j} u_{i+\frac{3}{2},j}^* + a_{i-\frac{1}{2},j} u_{i-\frac{1}{2},j}^* + a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^* + a_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} u_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}^* + b_{i+\frac{1}{2},j} + \Delta y (P_{i,j}^* - P_{i+1,j}^*) \quad (73)$$

$$a_{i,j+\frac{1}{2}} v_{i,j+\frac{1}{2}}^* = a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} v_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^* + a_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} v_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^* + a_{i,j+\frac{3}{2}} v_{i,j+\frac{3}{2}}^* + a_{i,j-\frac{1}{2}} v_{i,j-\frac{1}{2}}^* + b_{i,j+\frac{1}{2}} + \Delta x (P_{i,j}^* - P_{i,j+1}^*) \quad (74)$$

Cette étape est celle de la prédiction. Le premier pas correcteur consiste à améliorer la pression pour que l'équation de continuité soit satisfaite. Pour ce faire, on suppose que les grandeurs correctes résultent de la somme des grandeurs estimées plus d'une correction (Equation 75) :

$$P = P^* + P' \quad u = u^* + u' \quad v = v^* + v' \quad (75)$$

Soustrayant terme à terme les équations de quantité de mouvement pour u et v et celles de u^* et v^* , on obtient alors (Equation 76 et 77) :

$$a_{i+\frac{1}{2},j} u'_{i+\frac{1}{2},j} = a_{i+\frac{3}{2},j} u'_{i+\frac{3}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j} u'_{i-\frac{1}{2},j} + a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} u'_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} u'_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \Delta y (P'_{i,j} - P'_{i+1,j}) \quad (76)$$

$$a_{i,j+\frac{1}{2}} v'_{i,j+\frac{1}{2}} = a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} v'_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} v'_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i,j+\frac{3}{2}} v'_{i,j+\frac{3}{2}} + a_{i,j-\frac{1}{2}} v'_{i,j-\frac{1}{2}} + \Delta x (P'_{i,j} - P'_{i,j+1}) \quad (77)$$

En omettant les termes :

$$a_{i+\frac{3}{2},j} u'_{i+\frac{3}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j} u'_{i-\frac{1}{2},j} + a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} u'_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} u'_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \quad \text{et}$$

$$a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} v'_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} v'_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i,j+\frac{3}{2}} v'_{i,j+\frac{3}{2}} + a_{i,j-\frac{1}{2}} v'_{i,j-\frac{1}{2}} \quad \text{et en posant}$$

$$d_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{\Delta y}{a_{i+\frac{1}{2},j}} \quad \text{et} \quad d_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta x}{a_{i,j+\frac{1}{2}}} \quad \text{on obtient (Equation 78 et 79) :}$$

$$u'_{i+\frac{1}{2},j} = d_{i+\frac{1}{2},j} (P'_{i,j} - P'_{i+1,j}) \quad (78)$$

$$v'_{i,j+\frac{1}{2}} = d_{i,j+\frac{1}{2}} (P'_{i,j} - P'_{i,j+1}) \quad (79)$$

En introduisant les équations 78 et 79 dans l'équation de continuité, on obtient une équation de correction en pression (Equation 80) :

$$a_{i,j} P'_{i,j} = a_{i+\frac{1}{2},j} P'_{i+\frac{1}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j} P'_{i-\frac{1}{2},j} + a_{i,j+\frac{1}{2}} P'_{i,j+\frac{1}{2}} + a_{i,j-\frac{1}{2}} P'_{i,j-\frac{1}{2}} + b \quad (80)$$

Avec,

$$a_{i+\frac{1}{2},j} = h_{i+\frac{1}{2},j} d_{i+\frac{1}{2},j} \Delta y \quad ; \quad a_{i-\frac{1}{2},j} = h_{i-\frac{1}{2},j} d_{i-\frac{1}{2},j} \Delta y \quad ; \quad a_{i,j+\frac{1}{2}} = h_{i,j+\frac{1}{2}} d_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta x \quad ;$$

$$a_{i,j-\frac{1}{2}} = h_{i,j-\frac{1}{2}} d_{i,j-\frac{1}{2}} \Delta x \quad \text{et} \quad a_{i,j} = a_{i+\frac{1}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j} + a_{i,j+\frac{1}{2}} + a_{i,j-\frac{1}{2}}$$

La deuxième étape consiste à introduire une correction supplémentaire de manière à prendre en compte les termes :

$$a_{i+\frac{3}{2},j}u'_{i+\frac{3}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j}u'_{i-\frac{1}{2},j} + a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}u'_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}u'_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \text{ et}$$

$$a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}v'_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}v'_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i,j+\frac{3}{2}}v'_{i,j+\frac{3}{2}} + a_{i,j-\frac{1}{2}}v'_{i,j-\frac{1}{2}}.$$

Posons (Equation 81) :

$$\begin{cases} u_{i+\frac{1}{2},j} = u^*_{i+\frac{1}{2},j} + u'_{i+\frac{1}{2},j} + u''_{i+\frac{1}{2},j} = u^{**}_{i+\frac{1}{2},j} + u''_{i+\frac{1}{2},j} \\ v_{i,j+\frac{1}{2}} = v^*_{i,j+\frac{1}{2}} + v'_{i,j+\frac{1}{2}} + v''_{i,j+\frac{1}{2}} = v^{**}_{i,j+\frac{1}{2}} + v''_{i,j+\frac{1}{2}} \\ P = P^* + P' + P'' \end{cases} \quad (81)$$

Il en résulte les expressions suivantes (Equation 82 et 83) :

$$a_{i+\frac{1}{2},j}u''_{i+\frac{1}{2},j} = a_{i+\frac{3}{2},j}u''_{i+\frac{3}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j}u''_{i-\frac{1}{2},j} + a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}u''_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}u''_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \Delta y(P''_{i,j} - P''_{i+1,j}) \quad (82)$$

$$a_{i,j+\frac{1}{2}}v''_{i,j+\frac{1}{2}} = a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}v''_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}v''_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i,j+\frac{3}{2}}v''_{i,j+\frac{3}{2}} + a_{i,j-\frac{1}{2}}v''_{i,j-\frac{1}{2}} + \Delta x(P''_{i,j} - P''_{i,j+1}) \quad (83)$$

En introduisant l'expression précédentes dans l'équation de continuité, on obtient une équation algébrique pour P'' (Equation 84) :

$$a_{i,j}P''_{i,j} = a_{i+\frac{1}{2},j}P''_{i+\frac{1}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j}P''_{i-\frac{1}{2},j} + a_{i,j+\frac{1}{2}}P''_{i,j+\frac{1}{2}} + a_{i,j-\frac{1}{2}}P''_{i,j-\frac{1}{2}} + b \quad (84)$$

Avec (Equation 85) :

$$\begin{aligned} b = h_{i-\frac{1}{2},j} & \left[\frac{a_{i+\frac{1}{2},j}u'_{i+\frac{1}{2},j} + a_{i-\frac{3}{2},j}u'_{i-\frac{3}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}u'_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}u'_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}}{a_{i-\frac{1}{2},j}} \right] \Delta y \\ & - h_{i+\frac{1}{2},j} \left[\frac{a_{i+\frac{3}{2},j}u'_{i+\frac{3}{2},j} + a_{i-\frac{1}{2},j}u'_{i-\frac{1}{2},j} + a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}u'_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}u'_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}}{a_{i+\frac{1}{2},j}} \right] \Delta y \\ & + h_{i,j-\frac{1}{2}} \left[\frac{a_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}v'_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + a_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}v'_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + a_{i,j+\frac{1}{2}}v'_{i,j+\frac{1}{2}} + a_{i,j-\frac{3}{2}}v'_{i,j-\frac{3}{2}}}{a_{i,j-\frac{1}{2}}} \right] \Delta x \\ & - h_{i,j+\frac{1}{2}} \left[\frac{a_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}v'_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}v'_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + a_{i,j+\frac{3}{2}}v'_{i,j+\frac{3}{2}} + a_{i,j-\frac{1}{2}}v'_{i,j-\frac{1}{2}}}{a_{i,j+\frac{1}{2}}} \right] \Delta x \quad (85) \end{aligned}$$

Les coefficients de l'équation (84) en P'' sont les mêmes que ceux de l'équation (80) en P' , seul le terme b change.

4.2.2.6. Calibration/Validation du modèle

La calibration du modèle consiste à effectuer une première simulation de huit (8) jours avec un pas de temps de deux secondes (2s) en fixant en amont une condition aux limites de type Neumann portant sur les débits des rivières (Djibi et Bété). En aval, une condition aux limites dynamique de type Dirichlet est imposée (Annexe 2). Pour la validation, une simulation de huit (8) jours est également effectuée avec un pas de temps beaucoup plus grand de quatre secondes (4s). Le maillage spatial de la zone d'étude reste identique pendant la calibration et la validation du modèle. L'évaluation de la fiabilité des simulations se fait d'abord par analyse graphique des comparaisons entre niveaux d'eau calculés et observés. Ensuite, le calcul de six (6) indicateurs statistiques (Equation 86, 87, 88, 89, 90 et 91) est appliqué pour valider les résultats de simulation (Alizadeh *et al.*, 2017) :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})(h_{sim,i} - \bar{h}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (h_{sim,i} - \bar{h}_{sim})^2}} * 100 \quad (86)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})(h_{sim,i} - \bar{h}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (h_{sim,i} - \bar{h}_{sim})^2}} \right)^2 * 100 \quad (87)$$

$$\text{Ecart max} = \max \left(\text{abs}(h_{obs,i} - h_{sim,i}) \right) \quad (88)$$

$$\text{biais} = \frac{\sum_{i=1}^N (h_{obs,i} - h_{obs,i})}{N} \quad (89)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_{obs,i} - h_{sim,i})^2}{N}} \quad (90)$$

$$\text{NSE} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_{obs,i} - h_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})^2} \right) * 100 \quad (91)$$

Avec,

Ecart Max : écart maximal entre les valeurs observées et simulées,

Biais : l'erreur entre les observations et la simulation,

RMSE : Erreur quadratique moyenne,

NSE : coefficient de Nash-Sutcliffe,

$h_{obs,i}$: niveau d'eau élémentaire observé,

$h_{sim,i}$: niveau d'eau élémentaire simulé par le modèle,

$\bar{h}_{obs}$: niveau d'eau moyen observé,

N : la taille de l'échantillon.

La validation est jugée satisfaisante pour des coefficients de corrélation et de détermination proche de 100 %, un écart max et un biais proche de 0, un NSE supérieur à 60 % et une RMSE inférieure à 10 (Alizadeh *et al.*, 2017).

4.2.2.7. Simulation hydrodynamique de la lagune Aghien

Pour évaluer la dynamique des masses d'eau dans la lagune Aghien, trois scénarii sont considérés. D'abord, une première simulation est effectuée en considérant l'état actuel (2021) de la lagune sans prélèvement ni influence des changements climatiques. Ensuite, une seconde simulation prenant en compte les pompages dans la rivière Mé et la lagune Aghien est effectuée pour évaluer l'influence de ces activités de pompage sur la dynamique des masses d'eau de cette lagune. Enfin, une troisième et dernière simulation est faite en prenant en compte une baisse 17 % des apports fluviaux (N'Dri *et al.*, 2019) et une élévation de 50 cm des niveaux marins à l'horizon 2070.

4.2.2.7.1. Hydrodynamique en 2021

L'évaluation de la dynamique actuelle des masses d'eau de la lagune Aghien est effectuée du 15 au 30 avril 2021. Simuler le fonctionnement de la lagune sur une période sèche permet d'évaluer l'influence des prélèvements d'eau sur la dynamique des écoulements de cette lagune pendant de faibles apports des tributaires continentaux (Rivières Djibi, Bété et Mé). La simulation est faite en conservant les paramètres hydrodynamiques obtenus lors de la validation du modèle hydrodynamique. Les résultats sont extraits dans la lagune Aghien au niveau de l'échelle limnimétrique.

4.2.2.7.2. Hydrodynamique en 2024

L'évaluation de l'impact des pompages sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune Aghien consiste à prendre en compte, lors de la simulation, les volumes d'eau à prélever dans la lagune Aghien et dans la rivière côtière Mé. Les prélèvements sur la Mé seront intégrés sous la forme d'un retranchement dans les débits actuels disponibles. Pour les prélèvements de la lagune Aghien, ils sont considérés comme un déversement de cette lagune (Tableau VI).

Tableau VI : Débits des prélèvements prévus à Aghien et à la Mé

	Prélèvement ($\text{m}^3.\text{j}^{-1}$)	Temps de fonctionnement (h)	Prélèvement ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
Aghien	7 600	22	1,93
Mé	10 800		2,75

4.2.2.7.3. Hydrodynamique en 2070

Pour une meilleure anticipation des effets des changements climatiques sur l'hydrodynamique de la lagune Aghien, une dernière simulation est faite en intégrant aux conditions de pompages les projections climatiques sur les débits fluviaux et le niveau de l'Atlantique en aval. Concernant les apports fluviaux (Mé, Bété et Djibi), une baisse d'environ 17 % à l'horizon 2070 est intégrée. Cette proportion correspond aux projections faites par N'Dri *et al.* (2019) suivant le scénario climatique RCP8.5 dans le bassin versant de cette lagune. Concernant les élévations du niveau marin, seul le scénario extrême SSP5-8.5 est considéré à l'horizon 2070. Suivant ce scénario, à l'horizon 2070, le niveau marin connaîtrait une élévation de 50 cm selon les projections faites à la station de Takoradi (Ghana) (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>).

Cependant, le modèle Mike 21 Flow Model FM a été utilisé en complément du modèle hydrodynamique conçu pour simuler la dynamique sédimentaire et la diffusion de polluants en raison du temps imparti.

4.2.3. Modélisation de la dynamique sédimentaire dans la lagune Aghien

4.2.3.1. Configuration du modèle Mike 21 Flow Model FM

La conception du module hydrodynamique « HD » dans Mike 21 Flow Modèle consiste à appliquer un maillage sur la bathymétrie, ensuite à fixer les conditions aux limites amont et aval et enfin à calibrer puis valider sur des périodes différentes.

4.2.3.1.1. Maillage du domaine

Le maillage de la zone d'étude consiste à subdiviser le domaine d'étude en des triangles élémentaires. Ce travail a débuté par l'importation de la bathymétrie du domaine d'étude (lagune Aghien) et du contour dans le module « Mesh Generator » inclus dans le package du logiciel « MIKE Zero ». En fonction de la topographie, des singularités et des besoins de précision, un maillage flexible a été adopté. Après la définition des frontières (frontières ouvertes et fermées), la superficie des triangles élémentaires et la valeur minimale des angles ont été définies (Tableau VII). Ensuite, le maillage a été généré et la taille des triangles a par la suite été lissée afin de les rendre le plus uniforme possible. Le maillage de la topographie a été

définie par interpolation des données bathymétriques limitées par les données topographiques réalisées sur les berges.

Tableau VII : Valeur des paramètres choisis pour le maillage

Paramètres	Maille (m ²)	Angle minimal (°)	Nombre d'éléments au plus
Valeurs	100	30	10 000 000

Après le maillage, le modèle a été calibré en important les données de vent, de précipitation, d'évaporation et en définissant les conditions initiales et aux limites du domaine de calcul.

4.2.3.1.2. Conditions initiales et aux limites

En condition initiale, le niveau d'eau dans la lagune est prise égale -1 m (Inférieur au niveau observé le plus bas de la chronique de donnée). Les débits des tributaires (rivières Djibi, Bété et Mé) sont utilisés comme conditions aux limites amont et les niveaux d'eau au niveau de la lagune Potou à M'Batto comme conditions aux limites aval (Figure 36).

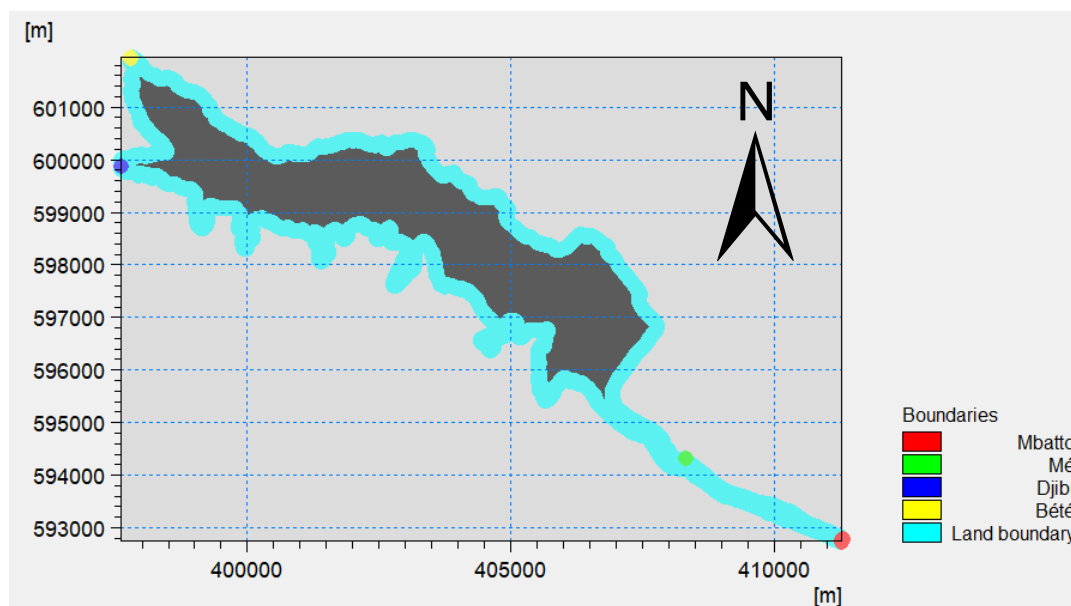


Figure 36 : Conditions aux limites amont et aval imposées au domaine de calcul

4.2.3.1.3. Calibration et validation du modèle

Après maillage et définition des conditions initiales et aux limites, la calibration consiste à faire varier les paramètres de calibration permettant de reproduire fidèlement les observations. Dans cette étude, le paramètre ajusté est le coefficient de Manning-Strickler. Plusieurs simulations de très courte durée (24h) ont été effectuées en faisant varier ce paramètre de 25 à 80 afin de choisir celui qui donne les meilleurs critères graphiques. Le modèle est calibré sur une période sèche (01-05 avril 2021), humide (25-30 juin 2021) et validé uniquement sur une période

humide (01-10 juin 2021). Le point de vérification des résultats est le niveau d'eau à la station limnimétrique de Aghien. La fiabilité des résultats du modèle se fait d'abord par l'analyse graphique de la comparaison entre niveaux d'eau calculés et observés. En plus du critère graphique, le calcul de six (6) indicateurs statistiques (75, 76, 77, 78, 79 et 80) permet d'apprécier la fiabilité des résultats. Les informations sur la calibration et la validation sont consignées dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Conditions initiale et aux limites de la calibration et de la validation

	Périodes	Condition aux limites		Condition initiale
		Amont	Aval	
Cal.	01-05/04/21			
	25-30/06/21	Dirichlet : Débits ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Neumann : Niveau d'eau (m)	Niveau d'eau (m)
Val.	01-10/06/21			

Cal. : Calibration ; Val. : Validation

4.2.3.2. Simulation de la dynamique des sédiments

La modélisation de la dynamique des sédiments à l'aide du module « MT » est basée sur le modèle hydrodynamique préalablement validé. Vu que le déplacement des particules en suspension est assuré par le mouvement des masses d'eau, on suppose que si ce mouvement est bien reproduit par le modèle, alors celui-ci est donc capable de reproduire assez fidèlement les phénomènes hydro-sédimentaires qui s'y déroulent. Par conséquent, la modélisation hydro-sédimentaire a consisté à définir les caractéristiques des sédiments. La vitesse de chute a été modélisée suivant l'équation (15) de Rijn (1989) dont les valeurs des paramètres, consignés dans le tableau IX, sont choisies sur la base des recommandations pour les sédiments cohésifs (la vase). En effet, relativement aux études de N'Guessan (2008), BRLi (2015) et de Koffi (2017), la densité des sédiments a été prise égale à $2\,650\text{ kg/m}^3$ correspondant à la vase, le coefficient de la vitesse de chute fixé à 0,8 et la valeur de la puissance à 1. Le modèle prend en compte l'effet de la floculation et de la concentration sur la vitesse de chute. Ainsi, la floculation débute pour une concentration d'au moins $0,01\text{ kg/m}^3$ et celle-ci entrave la chute des sédiments vers le fond à partir d'une concentration de 10 kg/m^3 (DHI, 2021).

Tableau IX : Paramètres de la vitesse de chute

Paramètres	Coefficient de vitesse de chute W_0	Puissance γ	Densité des sédiments (kg/m^3)
Valeurs	0,8	1	2 650

Le modèle de sédimentation est conçu en prenant une seule couche de fond et une fraction unique de sédiment dans la colonne d'eau. Ainsi pour cette couche du fond, les lois de dépôt suivent une formulation de Teeter (1986), la contrainte critique d'érosion est fixée à $0,15 \text{ N.m}^{-2}$ et le coefficient d'érosion à $0,005 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Lumborg & Windelin, 2003). La densité de la couche, la contrainte critique d'érosion (τ_{ce}) et la rugosité de la couche utilisées pour simuler la dynamique sédimentaire sont consignées dans le tableau X.

Tableau X : Paramètres caractéristiques des couches du fond de la lagune

Couche	Paramètres				
	Epaisseur (mm)	Densité (g/m^3)	τ_{ce} (N/m^2)	E ($\text{g/m}^2/\text{s}$)	Rugosité (m)
1	50	350 000	0,15	0,005	0,001

Les conditions aux limites sont fixées conformément aux mesures faites sur le terrain. Il s'agit de définir la concentration de matières en suspension aux entrées de la lagune. La concentration mesurée au niveau de chaque tributaire est prise comme conditions aux limites avec une concentration nulle en condition initiale. La simulation du transport des sédiments et de la sédimentation est effectuée sur une période humide (juin 2021) pendant laquelle les apports sédimentaires sont les plus importants (Koffi, 2021). Une simulation de 48h permet de comparer les concentrations dans lagune à celles obtenues lors des campagnes de terrain sur la même période en certain points afin de valider le modèle. Ainsi deux simulations sur des périodes plus importantes sont effectuées respectivement pour évaluer la dynamique sédimentaire actuelle et en condition d'exploitation.

4.2.3.2.1. Dynamique sédimentaire en 2021

La simulation en condition actuelle est effectuée sur la base du modèle hydrodynamique correspondant. Cette simulation est effectuée sur une période humide où les apports sédimentaires sont plus importants. Elle permet d'évaluer la concentration des différentes masses d'eau, les zones d'érosion et de dépôt, les masses de sédiments déposées et érodées par m^2 dans toute la lagune. Cette simulation correspond à l'état hydro-sédimentaire de la lagune avant son exploitation et celle de la rivière Mé pour des besoins d'alimentation des populations du district d'Abidjan.

4.2.3.2.2. Dynamique sédimentaire en 2024

En condition d'exploitation, la simulation est effectuée sur la base du modèle hydrodynamique en condition d'exploitation. Les pompages sur la Mé et dans la lagune Aghien sont donc pris

en compte. Ainsi, l'influence des pompages simultanés sur la Mé et dans la lagune Aghien sur la dynamique des sédiments de cette dernière est évaluée.

4.3. Simulation de l'influence des pressions anthropiques et des variations de la marée sur la dynamique de la salinité dans la lagune Aghien

Dans cette partie, la diffusion de deux types de polluants miscibles à l'eau a été simulée. Le premier polluant (dit polluant naturel) dont la dynamique de diffusion est simulée est la salinité. Le second polluant est un polluant hypothétique dont le déversement est considéré ici comme accidentel.

4.3.1. Modélisation de la dynamique de diffusion de la salinité

La dynamique de diffusion de la salinité est évaluée suivant quatre (4) simulations distinctes. La première est faite en considérant les conditions de l'année 2021, lorsque l'embouchure du fleuve Comoé est fermée. La seconde utilise l'état de la salinité de la lagune Aghien en 2024 une année après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam. La troisième simulation est basée sur les mesures faites en avril 2025 en condition aux limites amont et aval. Lors de cette simulation, l'état initial de la lagune est celle de l'année 2024. La quatrième et dernière simulation prend en compte l'évolution du niveau marin suivant le scénario extrême de changement climatique SSP5-8.5 et la baisse des apports fluviaux suivant le scénario RCP8.5. Pour la prédiction de la dynamique de la salinité en 2070, la salinité mesurée en 2024 est utilisée comme condition aux limites pour des raisons de disponibilité et de correspondance des chroniques de données disponibles.

4.3.1.1. Avant l'ouverture de l'embouchure en 2021

Le modèle de la diffusion de la salinité est conçu en 2D sur la base du modèle hydrodynamique, ce qui permet de prendre en compte les gradients de densité. Le modèle est configuré avec une température de l'eau de 25°C (correspondant à la température moyenne mesurée) supposée constante, seule la salinité varie. La salinité moyenne mesurée au niveau de chaque tributaire est prise comme la condition aux limites à ce niveau. Une condition initiale de salinité 0,0 PSU est définie dans toute la lagune pour mieux évaluer l'influence des apports des différents tributaires. La simulation est effectuée sur une période sèche (avril 2021) où les apports des tributaires sont plus faibles du fait de l'absence des précipitations (Koffi *et al.*, 2019) et la salinité au niveau de la Djibi et la lagune Potou plus élevée.

4.3.1.2. Après l'ouverture de l'embouchure en 2024

La seconde simulation qui utilise l'état de la lagune en 2024 après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé permet d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les changements de salinité dans la lagune. Pour cette deuxième simulation, les conditions aux limites sont identiques à celles d'avant l'ouverture. Seules les conditions aux limites aval et la condition initiale sont changées. La condition aux limites aval correspond au taux de sel mesuré après l'ouverture de l'embouchure et l'état initial est le résultat de la première simulation (avant ouverture de l'embouchure).

4.3.1.3. Après l'ouverture de l'embouchure en 2025

La simulation de la dynamique de diffusion de la salinité en 2025 est faite en utilisant l'état de la lagune obtenu lors de la simulation en 2024 comme condition initiale. En condition aux limites amont et aval, les mesures faites en avril 2025 dans les rivières Djibi, Bété et Mé ainsi que dans le chenal, en aval de la confluence de la Mé, sont utilisées. Cette simulation permettra de mieux apprécier la dynamique de diffusion et la distribution spatiale de la salinité dans la lagune Aghien deux années après l'ouverture de l'embouchure de la Comoé.

4.3.1.4. A l'horizon 2070 suivant les scénarii RCP8.5 et SSP5-8.5

Pour l'évaluation de l'effet des variations de la marée sur la salinité de la lagune, les projections à l'horizon 2070 sont prise en compte. Une baisse projetée des apports continentaux par N'Dri *et al.* (2019) suivant le scénario extrême RCP8.5 couplée aux élévations du niveau marin suivant le scénario extrême SSP5-8.5 (GIEC, 2021) sont les scénarii considérés. Aucune modification n'est faite sur la température de l'eau et la salinité des tributaires continentaux, seul le niveau d'eau de la lagune Potou connaît une modification du fait des élévations du niveau marin. La salinité de la lagune Potou définie comme condition aux limites aval est celle mesurée en aval de cette lagune après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé. Les hypothèses d'élévation du niveau marin moyen retenues se basent sur les conclusions du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) publié en 2021. Dans ce rapport, cinq scénarii (SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 et SSP5) d'évolutions socio-économiques mondiales (SSP) ont été définis. Les projections suivant les extrêmes (SSP1-1.9 et SSP5-8.5) sont visibles à la figure 37. Dans cette étude, seules les projections faites suivant le scénario extrême SSP5-8.5 sont retenues pour évaluer l'influence des variations de la marée sur la salinité de la lagune Aghien. Les hauteurs du niveau marin sont celles projetées à la station de Takoradi (Ghana).

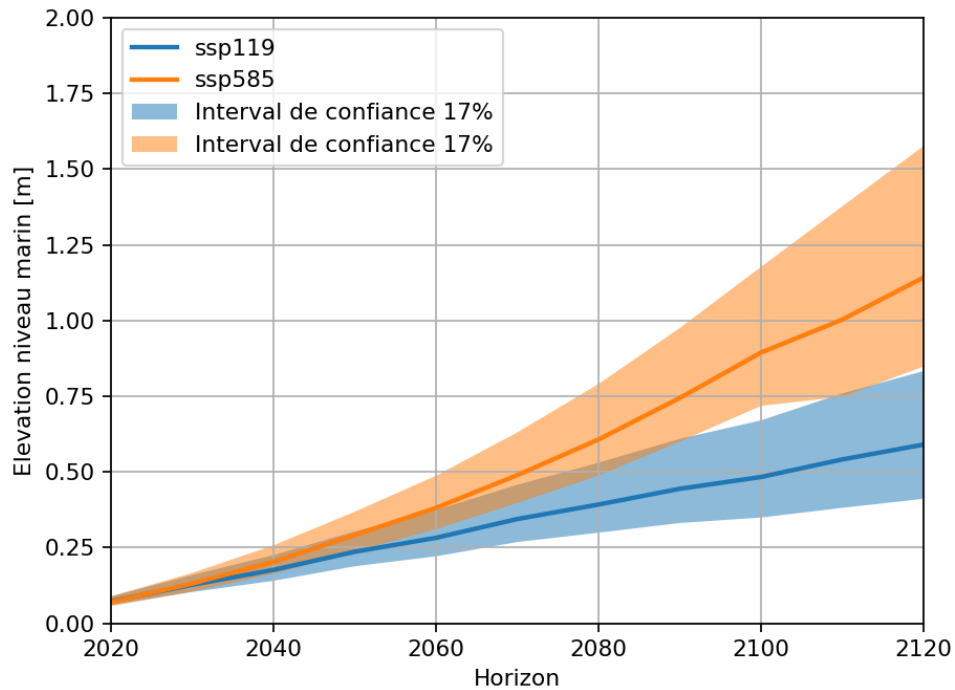


Figure 37 : Elévation du niveau marin projetée

Source : <https://sealevel.nasa.gov/data/tools/ipcc-ar6-projections-licensing-and-acknowledgements>

4.3.1.5. Simulations paramétriques de la diffusion de la salinité

Il s'agit ici d'effectuer une simulation de la dynamique de diffusion de la salinité en considérant les conditions de la période allant d'avril à mai 2025. Elle permettra d'analyser les paramètres suivants :

- le temps de diffusion de la salinité de la limite aval jusqu'à la zone de prise d'eau dans la lagune Aghien,
- le facteur de décroissance de la salinité en allant de la limite aval à la zone de pompage dans la lagune Aghien,
- la concentration de la salinité dans la zone de prise d'eau pour une concentration donnée à la limite inférieure dans le chenal,
- la concentration seuil à la limite aval à partir de laquelle la salinité dans la lagune Aghien ne permettrait pas une exploitation pour des besoins d'alimentation en eau potable des populations.

4.3.2. Simulation prédictive de la dynamique de dispersion d'un polluant hypothétique

Dans le bassin versant de la lagune Aghien se déroulent d'intenses activités agricoles et industrielles qui utilisent de nombreux produits toxiques comme les engrais et pesticides, les dérivés de produits pétroliers, des hydrocarbures aromatiques (Benzène). Le déversement d'une

quantité importante d'un tel produit reste de ce fait probable. Dans cette étude, le polluant hypothétique considéré est un polluant miscible à l'eau.

La simulation prédictive réalisée sur un polluant hypothétique vise à étudier l'impact d'un déversement accidentel d'une substance miscible et polluante dans la lagune Aghien. L'objectif de cette simulation est de comprendre la dynamique de dispersion de cette substance et d'évaluer son étendue dans le temps et l'espace. Cette étude permet ainsi d'estimer les conséquences environnementales d'un tel événement et d'élaborer des stratégies d'intervention pour limiter les effets néfastes sur l'écosystème.

Pour mener cette simulation, certaines hypothèses ont été formulées en fonction des caractéristiques de la substance déversée et des propriétés hydrodynamiques de la lagune Aghien.

▪ **Propriétés de la substance polluante**

La substance est considérée comme miscible dans l'eau, c'est-à-dire qu'elle se mélange facilement et uniformément avec l'eau, sans formation de phases distinctes. La substance est polluante, avec un impact potentiel sur la faune, la flore, l'écosystème de la lagune Aghien et la qualité des ressources en eau de la lagune Aghien. Des caractéristiques physiques telles que le coefficient de diffusion, la densité, la viscosité et la solubilité sont pris en compte pour mieux simuler le comportement de ce type de polluant dans la lagune Aghien.

▪ **Conception du modèle**

La simulation est effectuée en deux dimensions sous Mike 21 Flow Model FM. Elle se base sur les conditions hydrodynamiques de la lagune Aghien qui influenceront la vitesse et la direction de la dispersion de la substance polluante dans cette lagune. Les résultats sont fournis par la résolution des équations de convection-diffusion, qui permettent de simuler le transport du polluant sous l'effet des courants et de la diffusion moléculaire.

Le déversement d'une tonne (1 T) de ce polluant pendant une durée de 10h (soit environ 560-566 kg/m³ selon que nous soyons en période de crue ou d'étiage), dans la rivière Djibi est simulée. Cette simulation permet d'évaluer le temps qu'un tel composé pourrait mettre pour arriver dans la zone des captages et la concentration avec laquelle il y arriverait. Cela permettrait, au cas où un tel accident interviendrait, de mettre en pratique, le plus rapidement possible, les mesures préalablement définies. La dispersion de ce polluant est simulée en ne considérant que les variations horizontales de sa concentration avec un coefficient de dispersion

fixé dans le modèle à $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ (Sine *et al.*, 1977 ; DHI, 2021). La dynamique de propagation d'un tel produit est étudiée en période sèche et humide. En condition initiale, la concentration du produit dans la lagune est $0,0 \text{ kg/m}^3$. En condition aux limites, la concentration à l'entrée de la Bété, la Mé et du chenal est nulle. Seule la confluence de la rivière Djibi est considérée comme point de rejet.

Conclusion partielle

Le présent chapitre a exposé les méthodologies sur lesquelles s'appuie cette étude pour répondre aux différentes questions de recherche.

Ainsi, pour caractériser la distribution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et la morphologie de la lagune Aghien, différentes méthodologies sont utilisées. D'abord, par l'analyse des échantillons d'eau et de sédiments prélevés nous quantifions le flux, la vitesse de chute des matières en suspension en condition d'eau calme et caractérisons le faciès granulométrique de la lagune Aghien. Ensuite, par l'interpolation des données bathymétriques, nous représentons la morphologie du fond de la lagune en 2D et 3D et calculons également la surface et le volume de cette lagune à la date des mesures. Enfin, pour clore ce paragraphe, l'analyse des données de jaugeages effectués à l'aide de Profileur Acoustique à effet Doppler permet de déterminer les paramètres hydrodynamiques des sections de la lagune et de ses tributaires.

Pour simuler l'influence des pressions anthropiques et naturelles sur la dynamique hydro-sédimentaire de la lagune Aghien, nous nous sommes servis des équations de Saint-Venant. Ces équations sont résolues suivant la méthode des volumes finis sur des mailles régulières, pour concevoir un modèle de la dynamique des masses d'eau et des sédiments. Ce modèle numérique est utilisé pour simuler la dynamique hydro-sédimentaire en l'absence et en condition d'exploitation de cette lagune. La comparaison des deux états permet d'évaluer l'influence des pompages sur la dynamique hydro-sédimentaire.

Enfin, pour simuler l'influence des pressions anthropiques et des variations de la marée sur la dynamique de la salinité dans la lagune Aghien, une modélisation en 2D a été effectuée avec le modèle Mike 21 Flow Model FM. La prise en compte de l'ouverture de l'embouchure de Grand-Bassam et des élévations du niveau marin en 2070 dans ce modèle de diffusion, permet d'évaluer la dynamique de la salinité de cette lagune en 2070.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 5 : DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET DE LA MORPHOLOGIE DE LA LAGUNE AGHIEN

5.1. Evolution de la température et de la salinité

La caractérisation de la température, de la salinité et des matières en suspension de la lagune Aghien s'est basée sur la mesure *in situ* et au laboratoire des mesures effectuées de façon hebdomadaire. L'analyse des échantillons prélevés durant les différentes saisons (sèches et pluvieuses) et à différents niveaux de profondeur (S, M et F) de la colonne d'eau a montré une variation de ces paramètres en fonction des saisons et des profondeurs.

5.1.1. Evolution de la température

Le tableau XI présente les variations de température en degré Celsius (°C) des eaux de la lagune Aghien en fonction du niveau de profondeur pendant la période des hautes et basses eaux avant et après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam.

Tableau XI : Variation des températures dans la lagune Aghien

Température (°C)				
Avant l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé				
Périodes	S	M	F	Ecart-type
Hautes eaux	26,8	26,7	26,6	0,11
Basses eaux	33,4	32,7	32,4	0,5
Après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé				
Périodes	S	M	F	Ecart-type
Hautes eaux	26,8	26,7	26,6	0,11
Basses eaux	33,4	32,7	32,4	0,5

S : Surface ; M : Mi-fond ; F : Fond

Entre les mois de mai et novembre, avant et après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé, les températures oscillent entre 26°C et 27°C avec un écart-type de 0,11 sur toute la profondeur. Malgré cette faible variation, les masses d'eau peuvent être différenciées par leur température en fonction du niveau de profondeur. Les eaux sont plus chaudes en surface avec les températures de 26,8°C. Après, viennent les masses d'eau se trouvant à mi profondeur avec des températures de 26,7°C. Les masses d'eau les plus froides se situent près du fond lagunaire pour l'ensemble des points de mesure avec des températures de 26,6°C. En période des hautes eaux donc, les masses d'eau restent relativement tièdes avec des températures inférieures à 27°C. En période des basses eaux, entre décembre et mai, les masses d'eau se réchauffent jusqu'à atteindre les 33°C à certains endroits de la lagune. Pendant cette période, les températures moyennées sur l'ensemble des points de mesure en fonction du niveau de

profondeur variant de 32°C à 33°C. L'écart-type de cette variation est relativement faible, estimé à 0,5. Les masses d'eau en surface restent les plus chaudes avec des températures de 33,4 °C. Ces températures baissent progressivement à mi profondeur (32,7°C) et atteignent une valeur de 32,4°C dans les eaux du fond. Par ailleurs, l'écart entre les températures de la période humide et celle de la période sèche atteint 6°C.

5.1.2. Evolution de la salinité

La salinité de la lagune et de ses tributaires a été mesurée avant (avril 2021) et après (avril 2024) l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam.

Dans les rivières Djibi, Bété et Mé, la salinité n'a pas varié après l'ouverture de l'embouchure. Elles ont affiché une salinité moyenne de 0,2 PSU, 0,1 PSU et 0,0 PSU respectivement dans la Djibi, la Bété et la Mé (Figure 38).

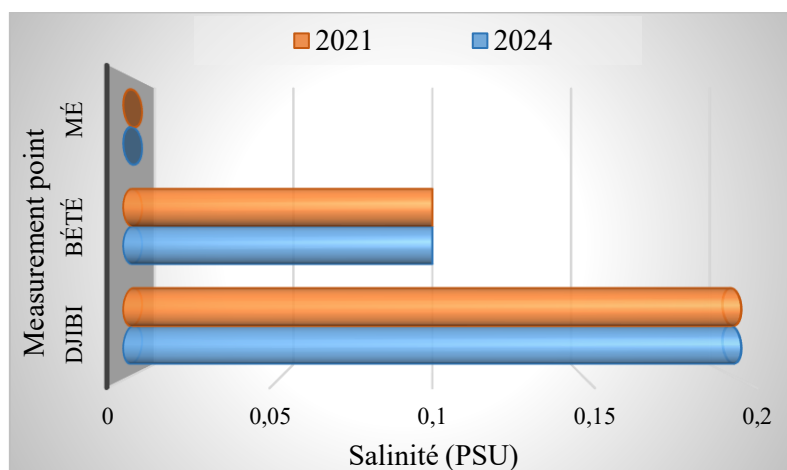


Figure 38 : Variation de la salinité des tributaires fluviaux avant (2021) et après (2024) l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé

Il apparaît que la salinité des affluents fluviaux de la lagune Aghien n'est pas influencée par les variations dynamiques de la marée, notamment l'ouverture de l'estuaire de la Comoé.

Cependant, les mesures effectuées dans la lagune Aghien ont révélé une variation de la salinité moyenne en fonction de l'état de l'embouchure de la rivière Comoé. Lorsque cette embouchure est fermée, de la zone Sud au Centre de la lagune d'Aghien, la salinité est de 0,0 PSU et de 0,2 PSU dans la zone Nord. Dans la zone Nord de cette lagune, la salinité est restée identique (0,2 PSU) à la période précédant l'ouverture de l'estuaire de la Comoé (Figure 39).

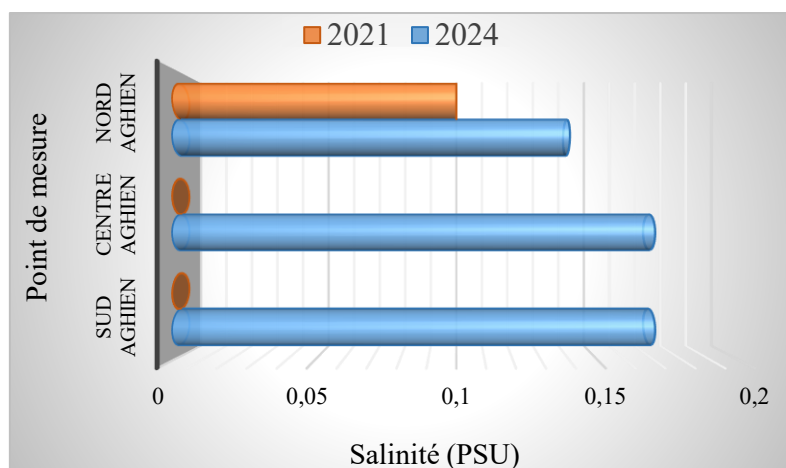


Figure 39 : Variation de la salinité dans la lagune Aghien avant (2021) et après (2024) l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé

L'augmentation de la salinité dans la lagune Aghien après l'ouverture de l'embouchure est beaucoup plus importante du Sud au Centre contrairement à la zone Nord de la lagune.

En aval de la lagune Aghien, la salinité a atteint 0,18 PSU dans le chenal, en amont de la confluence de la Mé. Elle est passée de 0,1 PSU à 0,2 PSU en aval de cette confluence et de 0,1 PSU à 0,22 PSU dans la lagune Potou respectivement avant et après l'ouverture de l'estuaire de la rivière Comoé (Figure 40).

Au niveau de la lagune Potou, la salinité a complètement doublé après l'ouverture de l'embouchure de la Comoé à Grand Bassam.

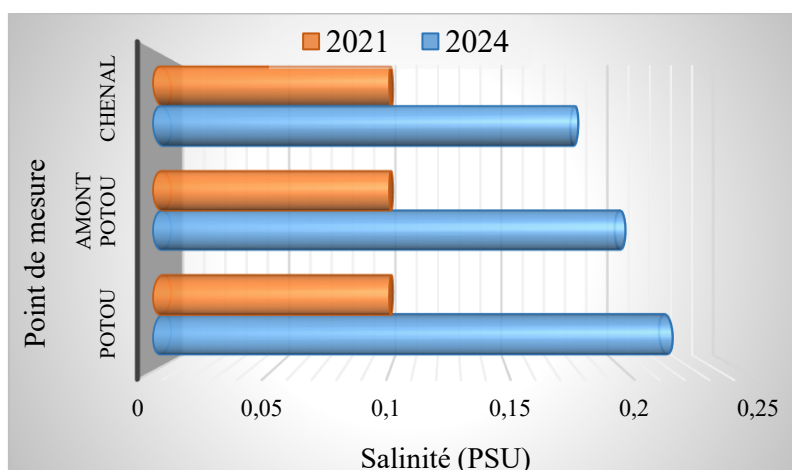


Figure 40 : Variation de la salinité dans la lagune Potou et le chenal avant (2021) et après (2024) l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé

Cette augmentation a été plus significative en avril 2025 avec des pics de salinité jamais enregistrés depuis l'ouverture de l'embouchure de la Comoé (Figure 41).

Au niveau de la lagune Aghien, la salinité a atteint en moyenne $2,8 \pm 0,01$ PSU au Sud et $2,6 \pm 0,02$ PSU au Nord soit une augmentation d'environ 2,5 PSU dans toute la lagune Aghien en avril 2025 comparativement à la même période de l'année 2024 (Figure 41a).

Au Sud de cette lagune, dans le chenal, la salinité moyenne est passée de 0,2 PSU à $5,0 \pm 1,2$ PSU en amont et de 0,2 PSU à $6,2 \pm 1,5$ PSU en aval de la confluence de la Mé en marée haute (Figure 41b).

Au Sud du chenal, dans la lagune Potou, la salinité a atteint $12 \pm 0,83$ PSU à l'entrée Sud, $10 \pm 0,11$ PSU dans la partie Sud et $7,3 \pm 0,24$ PSU dans la zone Nord de cette lagune (Figure 41c).

Au niveau des rivières, tributaires de la lagune Aghien, la salinité n'a pas évolué dans la Djibi et la Bété. Cependant, au niveau de la Mé, à 300 m de sa confluence, la salinité moyenne est passée de 0,0 PSU en avril 2024 à près $3,7 \pm 0,28$ PSU (Figure 41d).

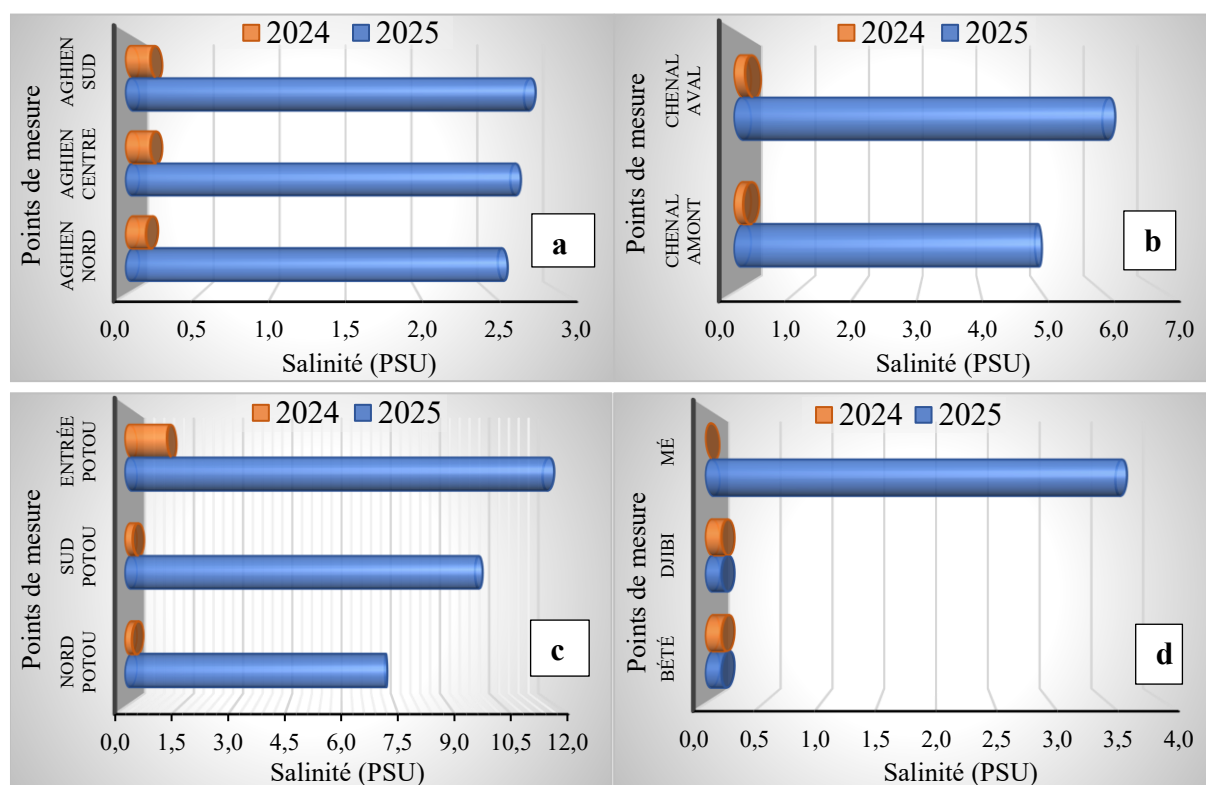


Figure 41 : Variation de la salinité dans la lagune Aghien (avril 2024 et 2025)

La salinité dans la lagune Aghien et dans la zone au Sud de celle-ci a connu un changement brusque en avril 2025. A partir de 2025, les mesures de salinité ont montré une baisse des

concentrations en sel des différents points de mesure par rapport au mois d'avril 2025 (Figure 42).

En dehors de la rivière Mé qui a connu une baisse drastique de la salinité en passant d'avril à mai, la salinité dans les rivières Djibi et Bété est restée inchangée (Figure 42a).

Au niveau de la lagune Aghien, une baisse de la salinité est également observée. Au zone Nord de cette lagune la salinité moyenne est passée de 2,56 PSU en avril à 0,8 PSU en mai. Dans la zone centre, plus profonde, la salinité moyenne est passée de 2,66 PSU à 1,4 PSU en avril à 1,4 PSU en mai. Dans la zone Sud, le même constat est fait. En effet la salinité dans cette zone est passée de 2,8 PSU en avril à 0,9 PSU en mai de la même année 2025 (Figure 42b).

Au niveau du chenal de liaison, la variation a été nettement plus grande. En amont de la confluence de la Mé, la salinité est passée de 4,6 PSU en avril à 0,6 PSU en mai 2025. En aval, le taux de sel marin est passé de 6,0 PSU en avril à 0,5 PSU en mai de la même année (Figure 42c).

Au niveau de la lagune Potou en aval du chenal de connexion, la salinité est passée d'une valeur maximale de 11,9 PSU en avril à 0,6 PSU en mai 2025 (Figure 42d).

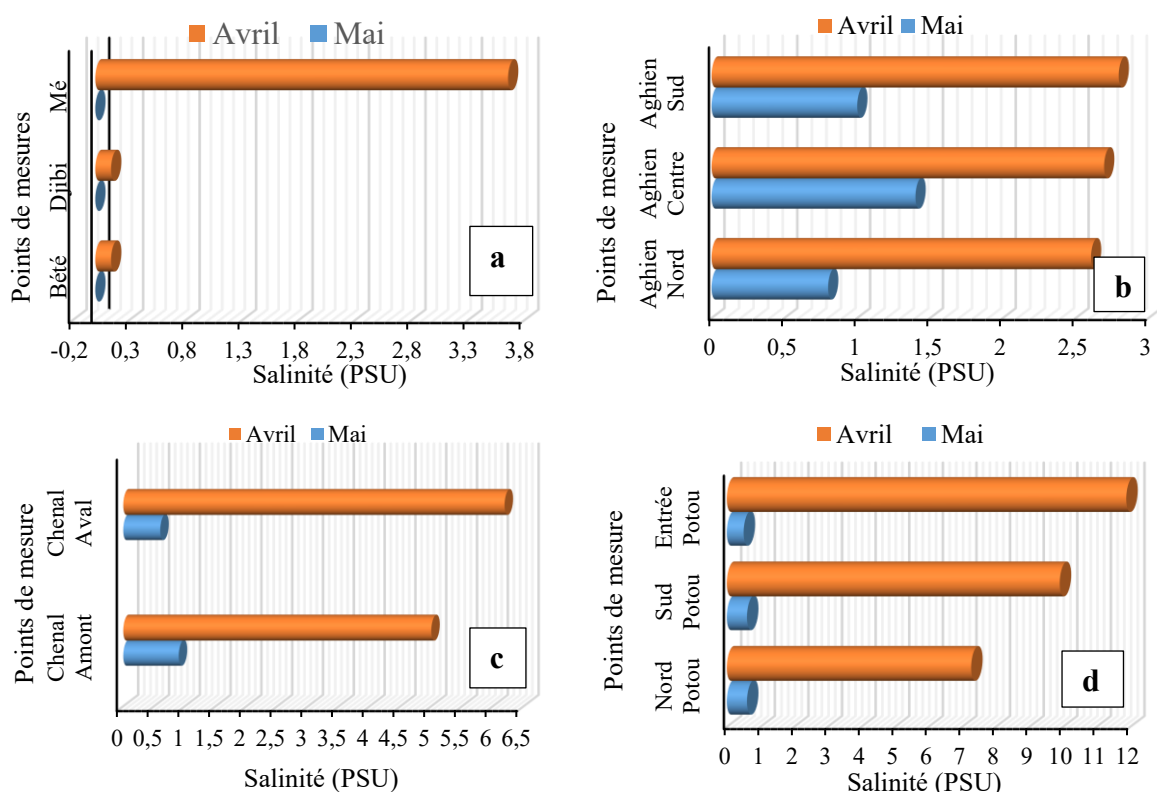


Figure 42 : Variation de la salinité d'avril à mai 2025

5.2. Sédimentologie de la lagune Aghien

Les sédiments de la lagune sont constitués de sédiments en suspension et de sédiments prélevés dans le fond.

5.2.1. Matières en suspension

Les matières solides en suspension dans la lagune Aghien ont fait l'objet d'un suivi particulier qui a permis de les quantifier et d'évaluer leur vitesse de chute en condition d'eau calme.

5.2.1.1. Concentration des matières en suspension

L'analyse des échantillons d'eau prélevés de façon saisonnière dans la lagune Aghien et à différents niveaux de profondeur a permis de caractériser les différentes masses d'eau de la lagune en fonction de leur concentration en matières en suspension (Figure 43). Les concentrations de matières en suspension évoluent avec la profondeur quelle que soit la saison dans le bassin versant.

Les masses d'eau de la lagune Aghien sont plus concentrées en matières en suspension durant la grande saison des pluies et ce, à tous les niveaux de profondeur. Les concentrations moyennées par points de mesure pendant cette saison sont de 39,322 mg/L, 43,932 mg/L et 54,011 mg/L respectivement pour les masses d'eau de surface, de mi profondeur et de profondeur. En petite saison sèche et pluvieuse, les concentrations suivent la même évolution (croissance de la concentration de la surface vers le fond) que celle de la grande saison pluvieuse. Cependant, les concentrations des différentes masses d'eau en petite saison sèche sont supérieures à celles de la petite saison des pluies.

En grande saison sèche, par contre, les concentrations de matières solides en suspension évoluent en sens inverse des profondeurs (plus la masse d'eau est profonde et moins elle est chargée en matière solide en suspension). Les concentrations de MES mesurées pendant cette période sont de 33 mg/L, 23 mg/L et 21,75 mg/L correspondant respectivement aux masses d'eau de surface, mi profondeur et du fond.

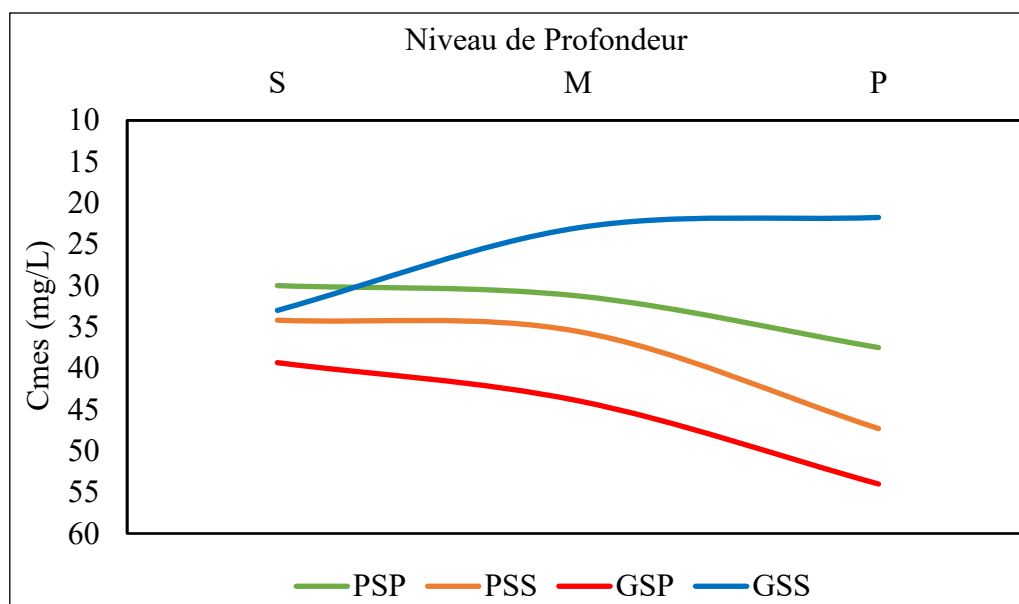


Figure 43 : Concentration saisonnières des matières en suspension dans la lagune Aghien en fonction du niveau de profondeur

5.2.1.2. Flux de matières en suspension des tributaires fluviaux

Le flux de matières solides entrant dans la lagune Aghien en période des basses et hautes eaux pour les tributaires (Djibi, Bété et Mé) a été évalué grâce aux mesures faites entre juin 2021 et avril 2022 (Tableau XII).

Tableau XII : Flux de matières solides en suspension entrant dans la lagune Aghien

	Flux (t/j)			Total (t/j)
	Djibi	Bété	Mé	
Décembre-avril	6,58	9,51	138,15	154,24
Mai-novembre	17,35	13,22	380,71	411,28

En période de basses eaux, la rivière Mé déverse plus de matières en suspension dans la lagune Aghien avec un apport estimé à environ 138,15 t/j. Elle est suivie par la rivière Bété dont les flux de sédiments en suspension par jour sont de plus de 9,51 tonnes. Les matières solides en suspension provenant de la rivière Djibi sont à peu près de 7 t/j. Entre décembre et avril, c'est à peu près un total de 154,24 tonnes par jour de matières solides qui est convoyé dans la lagune Aghien par ses trois tributaires. Cette quantité connaît une nette augmentation à mesure que les débits augmentent. Il est passé d'un total de 154,24 tonnes en période de basses eaux à 411,28 tonnes par jour en période de hautes eaux. De façon spécifique, sur la période de mai à décembre les flux enregistrés sont de 17,35 t/j, 13,22 t/j et 380,71 t/j générés respectivement par la Djibi, la Bété et la Mé. Bien qu'au niveau de la Bété une augmentation du flux par rapport à la période

des basses eaux soit enregistrée, elle reste peu significative contrairement à celles de la Djibi et de la Mé. En effet, entre mai et novembre, le flux de matières solides a presque triplé au niveau de ces deux rivières.

Ainsi, la quantité de sédiments en suspension arrivant dans la lagune Aghien est de 111 304,16 tonnes par an soit 111 304 160 Kg/an de matières en suspension.

5.2.1.3. Modèle débit d'apport-concentration de matière en suspension

L'établissement du modèle s'est basé sur les mesures hebdomadaires et saisonnières de concentration de MES des différents tributaires et des débits d'apport des tributaires (Djibi, Bété et Mé). Pour les trois tributaires de la lagune, les concentrations des apports solides en suspension sont proportionnelles aux débits d'apports, avec des coefficients de proportionnalité respectifs de 11,8 (pour la Mé) et 26 (pour la Djibi et la Bété). Cette proportionnalité suit une fonction exponentielle de coefficient variant d'un tributaire à l'autre (Figure 44). Pour ces tributaires, l'évolution de la concentration de MES suit progressivement celle des débits d'apport. Une augmentation du débit est automatiquement associée à une élévation de la concentration en matières solides en suspension. Cependant, pour les rivières Djibi et Bété, au-delà de 10 m³/s, une élévation très rapide de la concentration est observée montrant qu'à débits égaux, les rivières Djibi et Bété drainent plus de matières solides en suspension que la Mé.

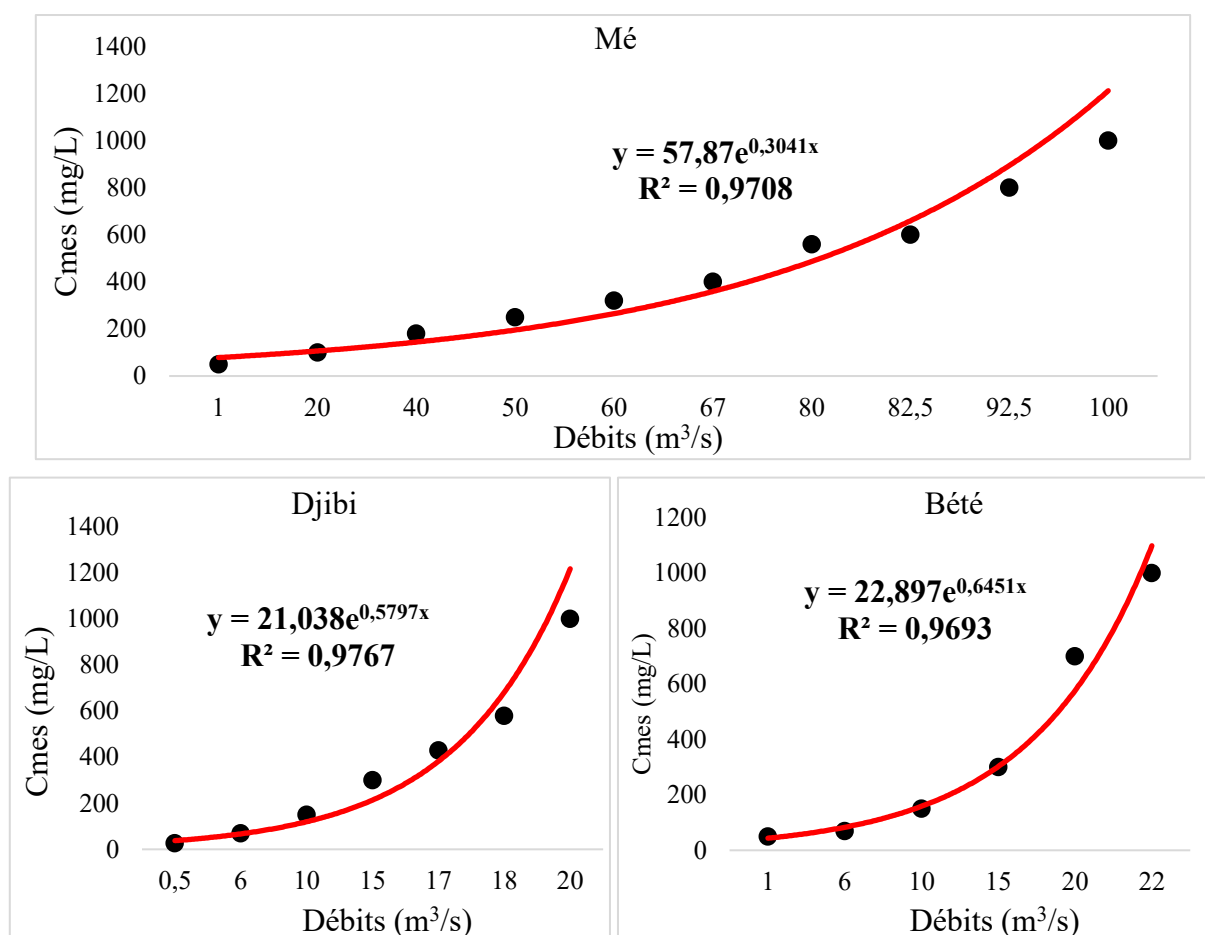


Figure 44 : Concentration de matières en suspension en fonction des débits d'apports.

Les matières en suspension dans les différents tributaires se déposent dans la lagune Aghien en fonction de leur vitesse de chute lorsque les conditions hydrodynamiques le permettent. Une fonction de répartition de cette vitesse de chute a été établie pour les sédiments se trouvant en surface, à mi profondeur et près du fond de la lagune.

5.2.1.4. Vitesse de chute des matières en suspension en condition d'eau calme

Les vitesses de chute ont été estimées en fonction des niveaux de profondeur c'est-à-dire pour les matières en suspension en surface, à mi fond et au fond.

✓ Surface

La courbe de répartition de la vitesse de chute des matières se trouvant en suspension dans la colonne d'eau de surface montre que 50 % de ceux-ci ont une vitesse de chute exprimée selon la loi de Jones égale à 0,11 mm/s. A 90 %, ces sédiments ont une vitesse de chute estimée à 0,8 mm/s. Dans l'ensemble, les sédiments en suspension dans la colonne d'eau de surface de la lagune se déposent, en condition d'eau calme, à une vitesse inférieure à 1 mm/s (Figure 45).

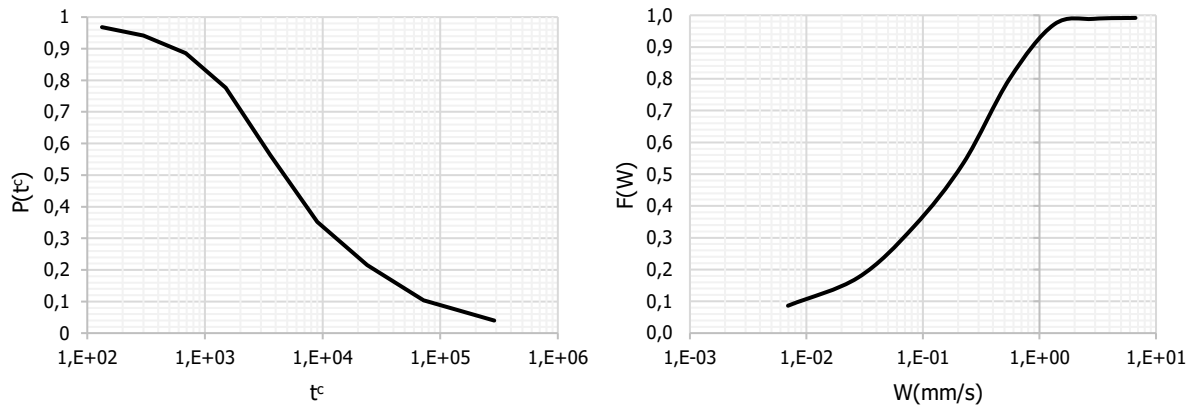


Figure 45 : Fonction de répartition de la vitesse de chute des sédiments en suspension dans la colonne d'eau de surface

Pour les sédiments se trouvant dans la colonne d'eau à mi profondeur, cette vitesse connaît une variation.

✓ Mi fond

La fonction de répartition des sédiments en suspension à mi profondeur dans la lagune en fonction de leur vitesse de chute estimée en condition d'eau calme a montré que 50 % de ces sédiments ont une vitesse de chute estimée à 0,109 mm/s. Cette vitesse est sensiblement identique à celle des sédiments se trouvant en surface pour les mêmes proportions de 50 %. Pour une proportion de 90 %, la vitesse de chute connaît une variation par rapport à celle des sédiments qui se trouvent en surface. Elle est estimée à 1,25 mm/s (Figure 46).

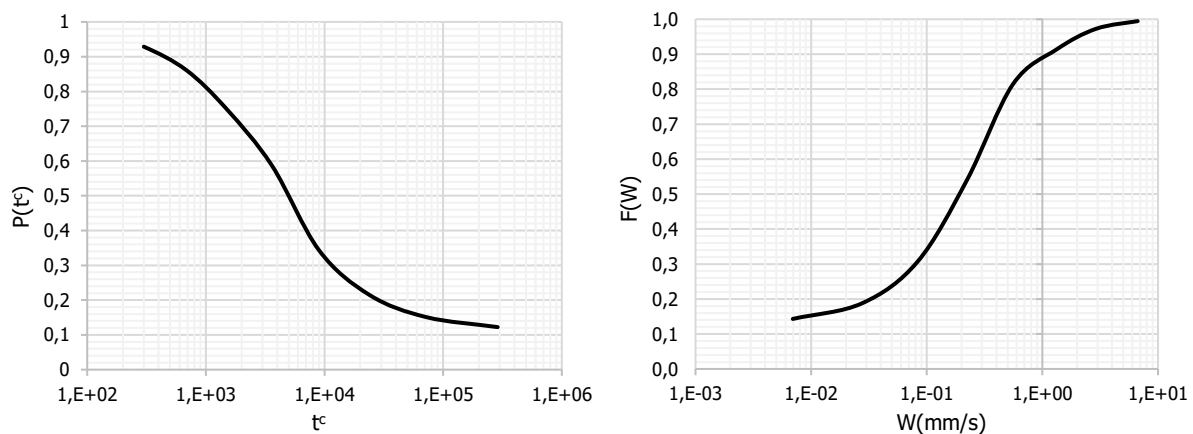


Figure 46 : Fonction de répartition de la vitesse de chute des sédiments en suspension dans la colonne d'eau à mi fond

✓ Fond

Pour les échantillons collectés près du fond, la fonction de répartition a montré une baisse de la vitesse de chute des matières en suspension dans cette colonne par rapport à celles en

suspension dans la colonne d'eau à mi fond. Pour une fonction de répartition de 50 % des sédiments en suspension dans cet endroit, on évalue la vitesse de chute à 0,1 mm/s. Pour une fonction de répartition de 90 %, la vitesse de chute des sédiments près du fond est estimée 0,75 mm/s (Figure 47).

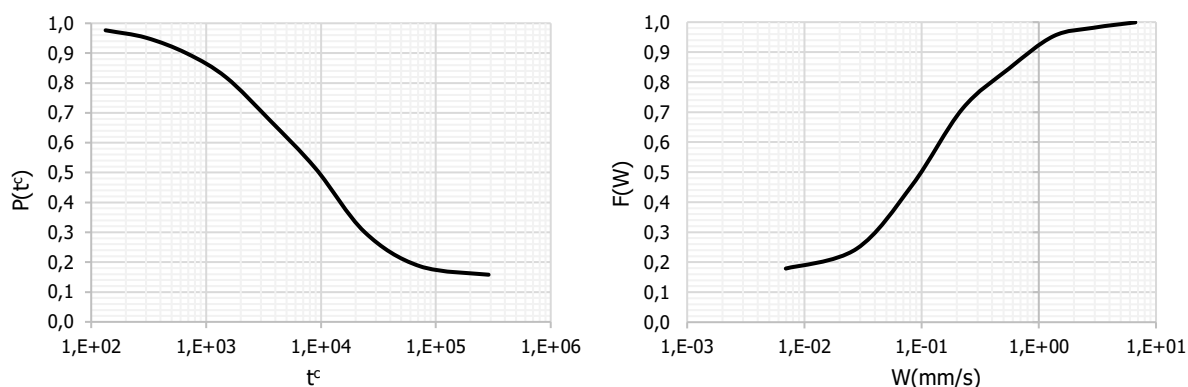


Figure 47 : Fonction de répartition de la vitesse de chute des sédiments en suspension dans la colonne d'eau près du fond

La répartition de la vitesse de chute des différentes matières en suspension dans la lagune Aghien a montré que pour une fonction de répartition de 50 % et 90 % la vitesse à laquelle les sédiments en suspension se déposent en conditions d'eau calme est inférieures à 1 mm/s. L'analyse des sédiments déposés au fond en conditions hydrodynamiques favorables permettra de déterminer leurs caractéristiques morphologiques et minéralogiques.

5.2.2. Sédiments du fond

La caractérisation des sédiments du fond lagunaire s'est faite par une analyse lithologique. Ensuite, une analyse granulométrique de ces sédiments a été effectuée au laboratoire. Enfin, les grains de sable ont subi des analyses morphométriques et minéralogiques.

5.2.2.1. Lithologie

L'analyse lithologique a permis de déterminer la couleur et la composition des sédiments et l'abondance des éléments constitutifs de chacun des quarante-huit (48) sédiments prélevés (Annexe 4).

Ce sont vingt-deux (22) sédiments de sables et vingt-six (26) sédiments de vase et crème de vase qui ont été prélevés dans cette lagune. La description macroscopique des sédiments superficiels a mis en évidence trois faciès sédimentaires. Il s'agit des sables, des vases ou crèmes de vase et des sédiments mixtes ou sables vaseux.

✓ Les sables

Les sables sont de taille moyenne à grossière. Ils se localisent préférentiellement près du rivage de la lagune Aghien, là où les profondeurs n'atteignent pas deux mètres (2 m) et les vitesses de courant quasiment nulles. De coloration brun-jaunâtre sombre à degré variable (10YR 2/1), les sédiments de sables contiennent quelques débris (végétaux et coquilliers).

✓ Les vases ou crème de vase

Les vases constituent l'essentiel des sédiments superficiels du fond de la lagune Aghien. Elles ont un aspect crémeux ou "crème" de vase et de couleur variable, passant du noir olive (5Y2/1) au gris olive (5Y3/2) avec une coloration brun orangé pour certaines. Dans la lagune Aghien, les vases sont plus abondantes que les sables et se rencontrent majoritairement dans la bande centrale du plan d'eau lagunaire, là où les profondeurs sont généralement supérieures à deux mètres (2 m).

✓ Les sédiments mixtes

Les sédiments mixtes sont un mélange de sables et de vase (sable vaseux). Ils sont minoritaires parmi les sédiments prélevés. On les rencontre en pleine lagune autour de la localité de Adjin village dans les profondeurs supérieures à trois mètres (3 m). Après l'appréciation visuelle et au toucher, les sédiments ont subi, au laboratoire, des analyses granulométriques.

5.2.2.2. Granulométrie

L'analyse granulométrique des sédiments de la lagune Aghien a porté sur les sédiments de sables ($\phi > 0,063$ mm). Elle a permis de déterminer les paramètres granulométriques à savoir la moyenne (Mz), la médiane (Md), l'indice de triage (It), le Skewness (dissymétrie ou asymétrie) et l'indice de classement ou sorting index (So) exprimé en unité phi (ϕ) des sédiments de sables prélevés (Tableau XIII).

Tableau XIII : Paramètres granulométriques des sédiments de la lagune Aghien

Echantillons	Moyenne (Mz)	Sorting index (So)	Skewness (Sk)	Indice triage (It)	Médiane (Md)
S2	803,33	0,13	0,28	0	7,275
S4	775	0,14	0,34	0,49	3,96
S5	666,67	0,14	0,49	0,43	5,22
S8	741,67	0,14	0,23	0,15	2,33
S9	750	0,09	0,7	-0,23	2,61
S13	750	0,15	0,31	0,41	4,43
S14	700	0,14	0,23	0	4,37
S17	770	0,14	0,33	0,06	3,8
S19	483,33	0,13	0,61	0,56	0
S20	421,67	-0,09	-0,61	0,09	7,87
S22	710	0,11	0,61	0,46	4
S24	773,33	0,14	0,22	0,05	4,76
S25	613,33	0,1	0,88	-0,26	2,59
S26	803,33	0,17	0,35	0,05	6,61
S28	700	0,14	0,31	0,22	3,73
S29	700	0,1	0,88	0,43	4,8
S32	763,33	0,13	0,34	-0,1	3,92
S33	726,67	0,16	0,22	0,12	3,58
S34	696,67	0,13	0,28	0,39	3,86
S35	763,33	0,13	0,33	0,35	4,39
S38	600	0,15	0,3	0,52	4,55
S48	816,67	0,15	0,24	0,1	4,76

✓ **Moyenne granulométrique (Mz)**

La moyenne granulométrique des sédiments de sable de la lagune Aghien se situe entre 421,67 μm et 816,67 μm de diamètre. L'analyse des moyennes granulométriques a montré que vingt (20) sur les vingt-et-deux (22) sédiments de sables prélevés soit 90,91 % sont de taille grossière ($500 \mu\text{m} < \text{Mz}$) contre deux (2) sur les vingt-et-deux (22) soit 9,09 % des sables sont de taille moyenne ($250 \mu\text{m} < \text{Mz} < 500 \mu\text{m}$).

L'interpolation des moyennes granulométriques des quarante-et-huit sédiments a donné le faciès granulométrique des sédiments (Figure 48). Les sables de moyenne supérieure à 400 μm se retrouvent majoritairement près des berges.

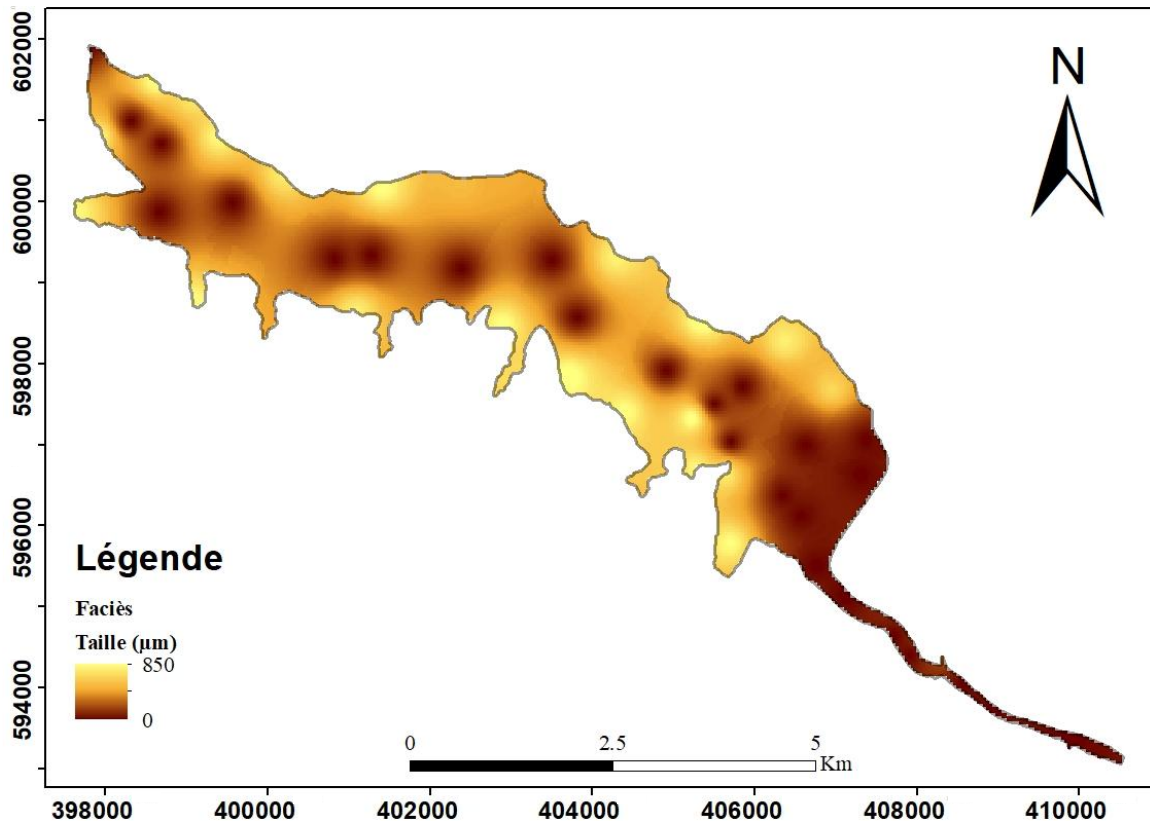


Figure 48 : Faciès granulométrique des sédiments de la lagune Aghien

✓ **Indice de classement ou sorting index (So)**

Les sédiments de sables analysés ont un écart-type inférieur à 1. Le sorting Index varie entre - 0,09 et 0,17 avec une moyenne de 0,12. Ces valeurs inférieures à 0,35 ($So < 0,35$) du Sorting Index montrent que les sables de la lagune Aghien sont très bien classés. Elles témoignent également de la constance ou la régularité de l'énergie de l'agent de transport de ces sables.

✓ **Indice de triage (It)**

L'indice de triage calculé pour l'ensemble des sédiments de sable de la lagune Aghien varie entre 0,26 et 0,56. Ainsi, les sédiments de sable analysés sont très bien triés.

✓ **Skewness ou asymétrie**

Les sables analysés ont, dans la majorité, une forte asymétrie vers les éléments fins. De façon spécifique, les sédiments S32, S19, S26, S22, S35, S9, S29, S28, S13, S38, S17, S25, S4 et S5 ont des valeurs de Skewness variant de 0,30 à 0,88. Ces sédiments ont donc une forte asymétrie vers les éléments fins. Pour les sédiments S33, S24, S8, S2, S14, S48 et S34 qui ont une asymétrie vers les éléments fins, les valeurs du Skewness varient entre 0,22 et 0,28. Le sédiment S13 qui a exceptionnellement une valeur de Skewness négative (-0,61) montre une forte

asymétrie vers les éléments grossiers. La valeur moyenne du Skewness de l'ensemble des sédiments analysés est estimée à 0,36.

✓ Classe granulométrique

Cette analyse a montré que les sédiments de sables de la lagune Aghien présentent cinq (5) classes granulométriques qui varient du grain très grossier au grain très fin (Tableau XIV).

Tableau XIV : Classe granulométrique des sédiments du fond lagunaire Aghien

Ech.	Longitude	Latitude	Pro.	STG (%)	SG (%)	SM (%)	SF (%)	STF (%)
S48	405367	598523	0,5	13,32	24,19	44,01	17,8	0,58
S22	404294	599302	2	4,25	14,6	55,803	24,8	0,36
S28	408262	594708	9	4,1	30,21	48,15	17,47	0
S19	402386	600218	6	9,64	74,2	16,02	0	0
S8	397629	599850	0,5	6,85	46,53	38,55	7,43	0
S20	402895	600290	1	9,48	27,28	38,5	23,69	0,55
S24	402894	598464	0,5	11,79	22,78	40,9	23,44	0,39
S29	406376	598268	2,5	1,48	23,36	53,83	20,73	0,46
S35	405701	595770	0,5	3,18	25,62	39,8	29,67	1,15
S2	397942	600798	1	9,75	36,91	33,09	19,26	0
S38	406951	597674	2,5	0,85	15,44	58,75	23,84	0,27
S9	399393	600782	0,5	15,87	53,9	18,67	11,06	0,15
S15	401088	598635	0,5	7,21	42,89	30,29	18,68	0,23
S13	399094	598725	0,5	1,52	24,17	51,01	22,56	0
S17	401408	600162	2,5	6,62	40,68	38,37	14,04	0
S32	404395	597393	8	15,99	35,08	31,51	16,26	0,26
S4	398612	601473	0,5	1,91	18,96	62,57	16,08	0,16
S25	402916	597801	0,5	15,37	40,12	34,21	9,81	0,12
S34	405507	597490	1,5	2,45	25,86	50,49	20,68	0,26
S5	399062	601259	0,5	1,11	21,48	45,56	29,76	0,828
S26	405229	597307	6	11	28,75	39,4	19,73	0,51
S33	405274	596705	1	4,41	39,71	42,1	13,18	0,16
Moyenne				10,14	31,34	40,07	17,63	0,28

Pro. : Profondeur ; Ech. : Echantillon ; STG : Sable très grossier ; SG : Sable grossier ; SM : Sable moyen ; SF : Sable fin ; STF : Sable très fin

- Les sables très fins (STF) occupent une proportion de 0,28 %. Ils sont quasiment absents (0 %) dans certains sédiments analysés.

- Les sables fins (SF) sont peu abondants avec une proportion de 17,63 %. Exceptionnellement absent dans le sédiment S19, ils se retrouvent dans l'ensemble des sédiments analysés.

- Les sables moyens sont les plus abondants avec une proportion de 40,07 % des sables. Ils représentent à eux seuls plus de 50 % de la composition de certains sédiments de sables (S22, S29, S13, S38, S34 et S4). Cependant, ils sont en faible proportion dans le sédiment S19.

- Les sables grossiers occupent la deuxième place en thème de proportion (31,34 %) après les sables moyens. Ils sont en proportion non négligeable (plus de 20 %) dans l'ensemble des sédiments sauf le sédiment S22 où leur proportion est inférieure à 15 %. Ils sont très abondants dans le sédiment S19 avec une proportion de 74,2 % de sa composition granulométrique.

- Les sables très grossiers avec une proportion de 10,14 % sont peu abondants. Leur proportion dans l'ensemble des échantillons de sédiments analysés reste en dessous de 20 %.

Plus le prélèvement a lieu près des berges, plus les sables grossiers et très grossiers sont en proportion importante.

✓ Courbe granulométrique

Les courbes granulométriques sont de type logarithmique pour l'ensemble des sédiments de sables analysés (Figure 49). Tous les sédiments analysés sont constitués de grains de diamètre inférieur à 5 000 μm . Les grains dont les diamètres sont compris entre 1 250 et 3 500 μm ont une proportion qui oscillent entre 0 et 13 % dans chaque échantillon analysé. Ceux dont le diamètre est compris entre 250 et 1 250 μm sont les plus abondants dans la majorité des échantillons de sable analysés. Leur proportion avoisine 62 % dans certains échantillons. Les grains dont le diamètre est inférieur à 250 μm sont les moins abondants. Leurs proportions restent inférieures à 11 % dans tous les échantillons de sédiments de sable analysés.

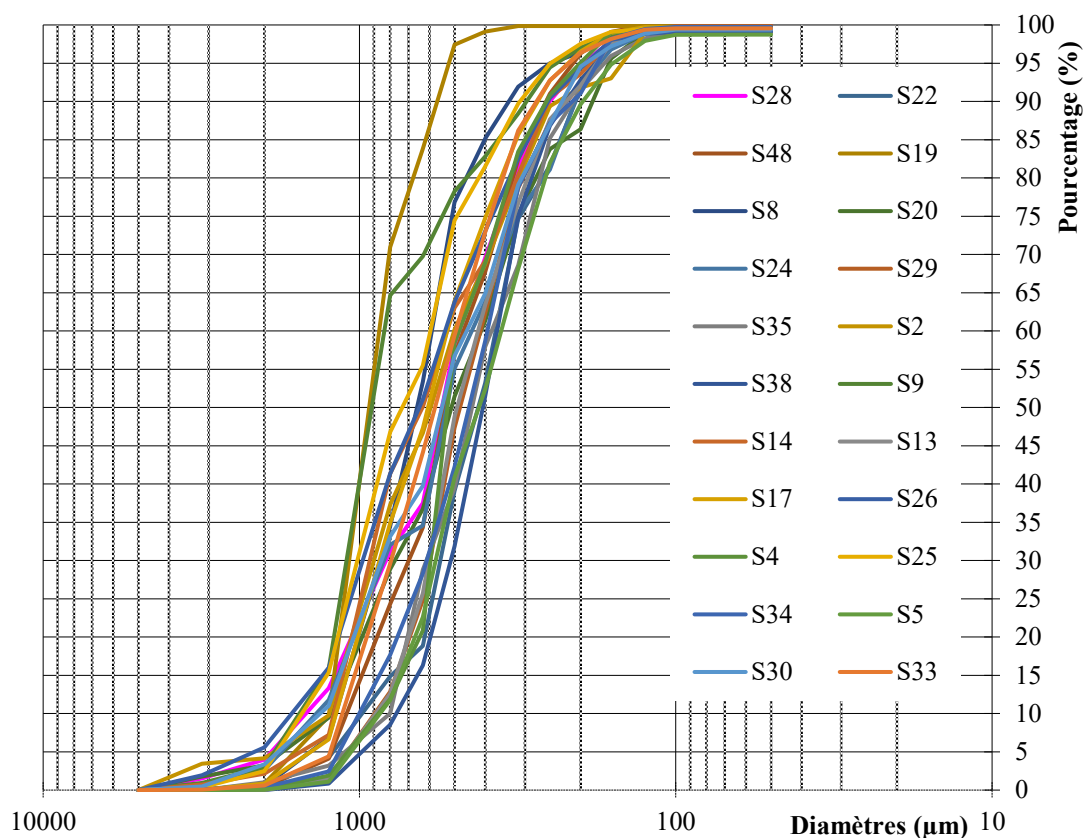


Figure 49 : Courbe granulométrique des sédiments de la lagune Aghien

5.2.2.3. Morphoscopie

L'analyse morphoscopique des sédiments prélevés s'est faite par l'observation à la loupe binoculaire des sables de taille comprise entre 0,315 et 0,5 mm. Cette observation a révélé que les sables de la lagune Aghien sont anguleux, subanguleux, subarrondis, arrondis et très ronds avec un aspect émoussé luisant et un enduit argileux, blanchâtre, grisâtre ou brunâtre (Tableau XV).

Tableau XV : Morphoscopie des sédiments de sable de la lagune Aghien

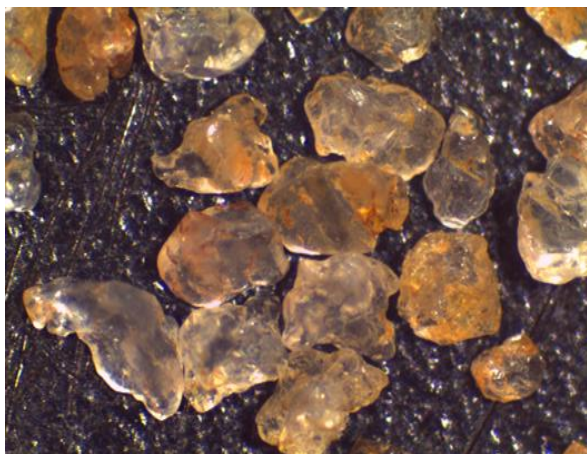
Ech.	Ang.	Subang.	Subarr.	Arr.	T. rond	Aspect
S2	23,08	46,15	15,38	15,38	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S4	11,76	29,41	35,29	17,65	5,88	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S5	20,00	46,67	26,66	6,67	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S8	29,41	47,06	17,65	5,88	0,00	Emoussé luisant avec un enduit grisâtre
S9	17,65	41,18	23,53	11,76	5,88	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S13	27,27	54,55	18,18	0,00	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S14	13,33	26,67	33,33	20,00	6,67	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S17	18,18	36,36	36,36	9,09	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S19	29,41	47,06	17,65	5,88	0,00	Emoussé luisant avec un enduit grisâtre
S20	23,53	41,18	23,53	11,76	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S22	19,05	42,86	19,05	14,29	4,76	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S24	19,05	38,10	28,57	14,29	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S25	20,00	33,33	26,67	13,33	6,67	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S26	21,43	42,86	28,57	7,14	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S28	21,43	42,86	28,57	7,14	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S29	25,00	41,67	25,00	8,33	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S32	20,00	33,33	26,67	13,33	6,67	Emoussé luisant avec un enduit blanchâtre
S33	26,67	46,67	20,00	6,67	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S34	15,38	46,15	23,08	15,38	0,00	Emoussé luisant avec un enduit brunâtre
S35	21,43	35,71	21,43	14,29	7,14	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S38	30,77	38,46	23,08	7,69	0,00	Emoussé luisant avec un enduit argileux
S48	16,67	44,44	22,22	16,67	0,00	Emoussé luisant avec un enduit blanchâtre

Ang. : Anguleux ; Subang. : Subanguleux ; Subarr. : Subarrondis ; Arr. : Arrondis ; T. rond : Très ronds

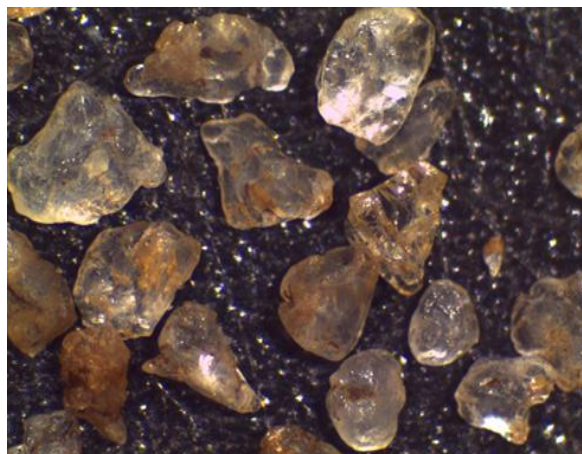
Les minéraux subanguleux sont majoritaires avec une proportion de 40,92 %. Ils sont suivis par les minéraux subarrondis qui cumulent une proportion de 24,50 % de l'ensemble des minéraux.

Les minéraux anguleux sont aussi en proportion importante avec 21,13 %. Par ailleurs, quatre

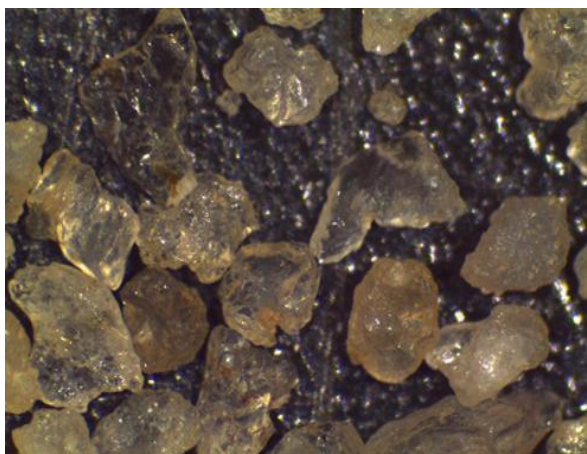
(4) enduits caractérisent les minéraux de la lagune Aghien. Ce sont l'enduit argileux, brunâtre, grisâtre et blanchâtre (Figure 50).



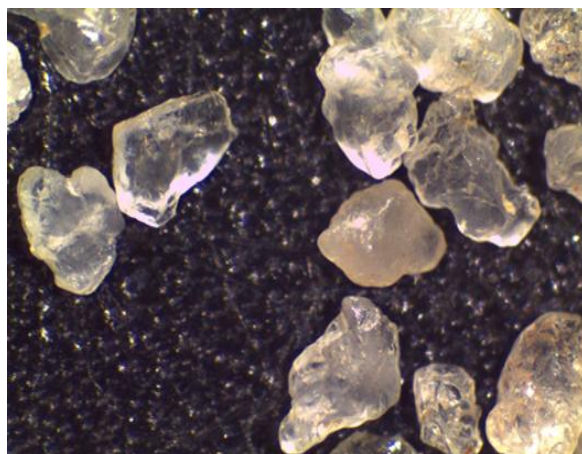
Emoussé luisant avec un enduit argileux



Emoussé luisant avec un enduit brunâtre



Emoussé luisant avec un enduit grisâtre



Emoussé luisant avec un enduit blanchâtre

Figure 50 : Morphoscopie des sédiments de quartz du fond de la lagune Aghien

5.2.2.4. Minéralogie

La détermination de la nature des minéraux présents dans les sédiments de la lagune Aghien a porté sur la fraction grossière (diamètre 0,4 mm, 0,315 mm et 0,2 mm) par l'analyse à la loupe binoculaire. Les sédiments de sables de la lagune Aghien analysés renferment des minéraux de quartz, quartz fumé, de limonite, de l'épidote, de tourmaline, d'ilménite, de grenat et de sphène (Figure 51).

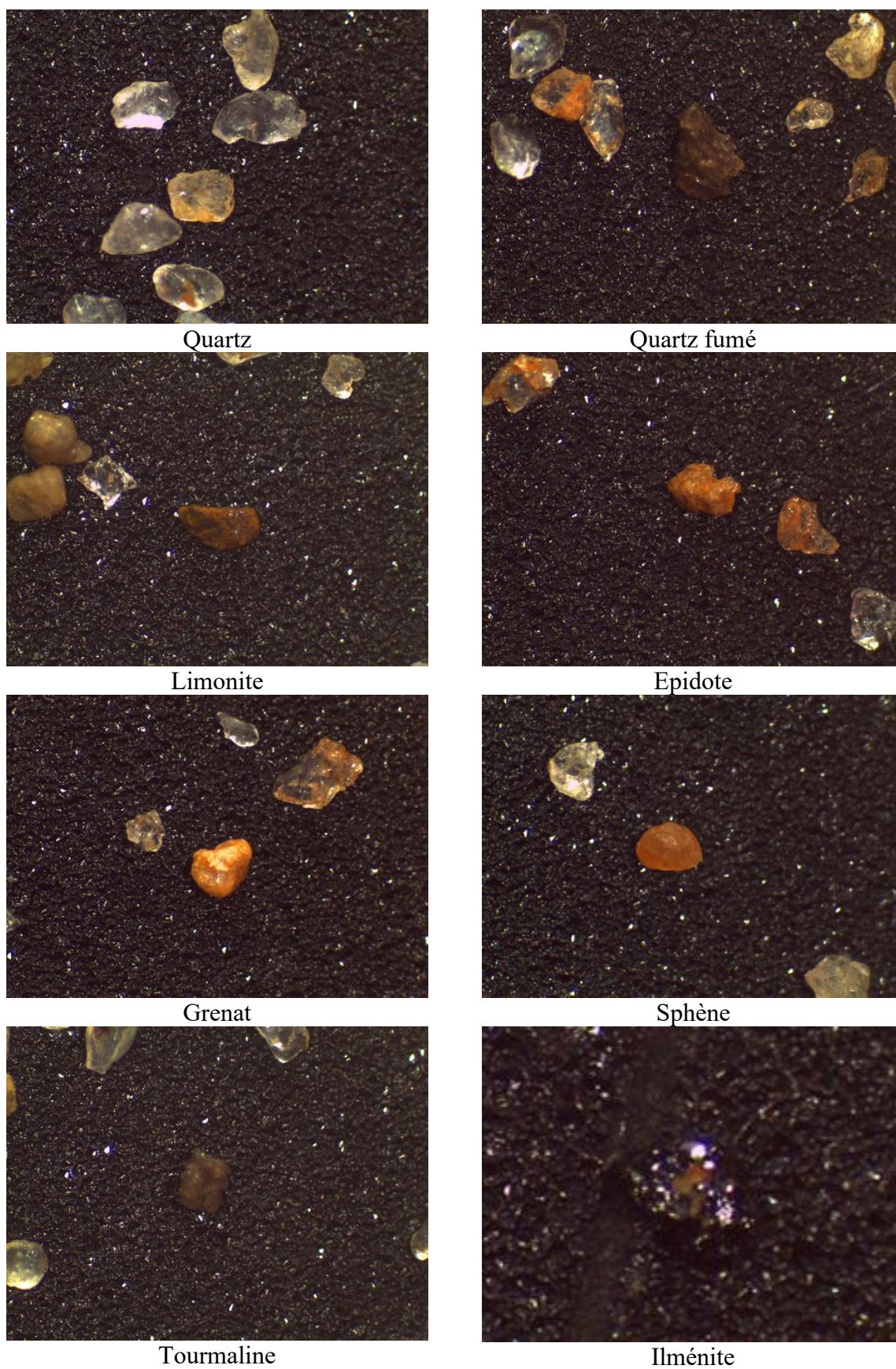


Figure 51 : Composition minéralogique des sédiments du fond de la lagune Aghien

L'absence (-), la présence (+) ou l'abondance (+++) de ces minéraux varie d'un sédiment à l'autre (Tableau XVI).

Tableau XVI : Minéraux présents dans les sédiments de la lagune Aghien

Ech.	Quartz	Quartz fumé	Limonite	Épidote	Tourmaline	Ilménite	Grenat	Sphène
S2	+++	+	+	+	+	+	+	+
S4	+++	+	+	+	+	+	+	+
S5	+++	+	+	+	-	-	+	+
S8	+++	+	+	+	+	-	+	+
S9	+++	+	+	+	-	+	+	+
S13	+++	+	+	+	-	+	+	+
S14	+++	+	+	+	-	-	+	+
S17	+++	+	+	+	-	-	+	+
S19	+++	+	+	+	+	+	+	+
S20	+++	+	+	+	+	+	+	+
S22	+++	+	+	+	-	-	+	+
S24	+++	+	+	+	-	+	+	+
S25	+++	+	+	+	-	-	+	+
S26	+++	+	+	+	-	-	+	+
S28	+++	+	+	+	-	-	+	+
S29	+++	+	+	+	-	-	+	+
S32	+++	+	+	+	-	-	+	+
S33	+++	+	+	+	-	-	+	+
S34	+++	+	+	+	-	+	+	+
S35	+++	+	+	+	-	-	+	+
S38	+++	+	+	+	-	+	+	+
S48	+++	+	+	+	-	+	+	+

Les minéraux de quartz sont très abondants (+++) dans tous les sédiments de sables de la lagune Aghien analysés. Les minéraux de quartz fumé, de limonite, de l'épidote, de grenat et de sphène sont présents mais en faible proportion (+) dans tous les sédiments de la lagune Aghien. Cependant, la tourmaline est seulement présente (+) dans les sédiments S19, S20, S8, S2 et S4. Aucun minéral de l'ilménite n'a été observé dans l'échantillon des sédiments S33, S32, S26, S22, S35, S8, S14, S29, S28, S17, S25 et S5. Sa proportion dans les autres sédiments où elle est présente reste tout de même faible (+).

5.3. Géomorphologie de la lagune Aghien

Dans cette partie, les résultats du sondage bathymétrique de la lagune Aghien sont interprétés. Ces résultats portent sur la morphologie du fond lagunaire à travers la carte bathymétrique. Les

surfaces et volumes élémentaires en fonction du niveau de profondeur y sont également présentés.

5.3.1. Relief du fond

Deux cents quatre-vingt-cinq mille sept cent quatre-vingt-onze (285 791) points ont été sondés pour un total d'un million cent quarante-trois mil cent soixante-quatre (1 143 164) données générées. Le traitement a permis d'en retenir deux cent soixante-quinze mil cent quarante-cinq (275 145) points correspondant à un million cent mil sept cent soixante-et-douze (1 100 772) données soit une élimination de 3,70 % des données jugées aberrantes. Les zones non sondées sont en fait celles colonisées par les végétaux aquatiques inaccessibles.

5.3.1.1. Bathymétrie

L'interpolation par la méthode de Pondération par l'Inverse de la Distance de ces données a permis d'apprécier le relief du fond de la lagune Aghien (Figure 52).

Le chenal présente des profondeurs très variables dont les maximales atteignent dix-sept mètres (17 m) à la confluence de la rivière côtière Mé. Contrairement à la confluence de la Mé où les profondeurs sont élevées, dans la zone de confluence des rivières Djibi et Bété, elles n'excèdent pas quatre mètres (4 m).

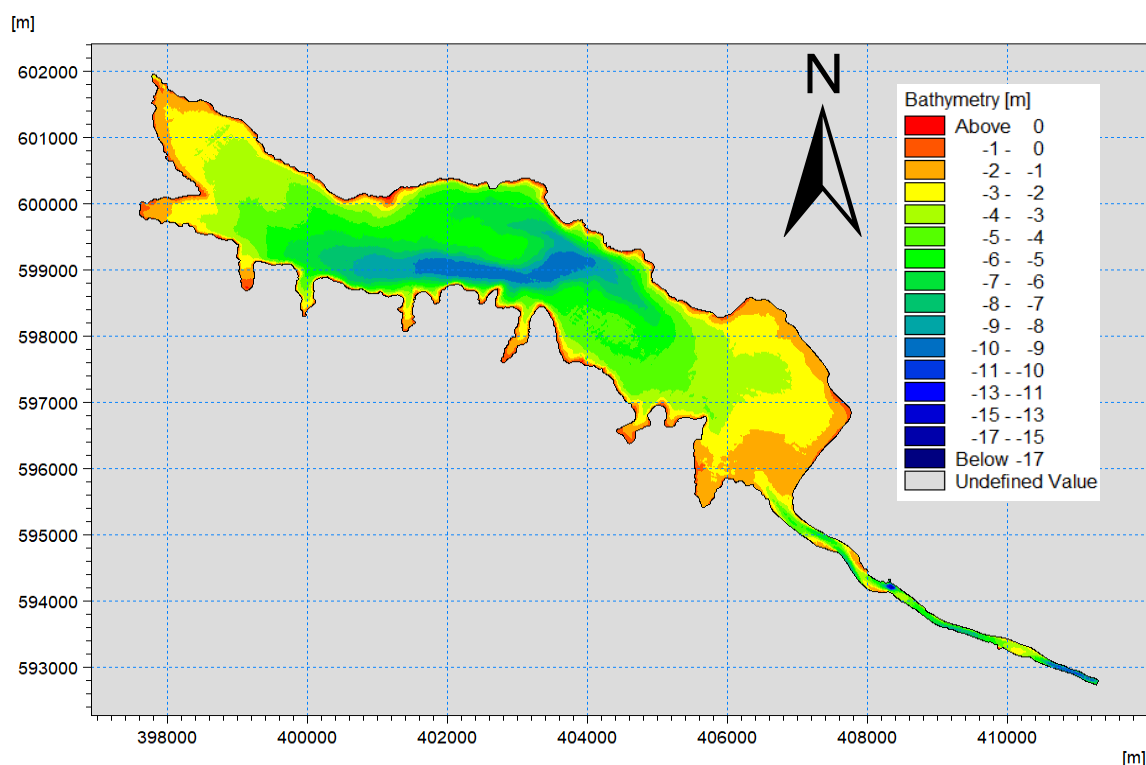


Figure 52 : Carte bathymétrique de la lagune Aghien (juin 2021)

Concernant la lagune Aghien, l'analyse de la carte bathymétrique en trois dimensions (3D) révèle dans l'ensemble deux unités morphologiques variables (Figure 53) :

- Une unité morphologique centrale où les profondeurs varient entre 3,5 et 10,5 m. Elle est composée de deux chenaux dont l'un dit principal et l'autre dit secondaire. Le chenal principal a une profondeur maximale de 10,5 m avec une configuration sigmoïdale. Il est plaqué en grande partie contre la berge sud. Le chenal secondaire est moins profond (entre 5 et 8 m) et plaqué contre la berge Nord. Entre les deux chenaux, on observe des profondeurs comprises entre 3,5 et 5 m assimilables à des zones de haut fond.
- Une unité morphologique périphérique, avec de faibles profondeurs comprises entre 0,0 et 3,5 m, enveloppe l'unité morphologique centrale. Elle est située de part et d'autre de l'unité morphologique centrale.

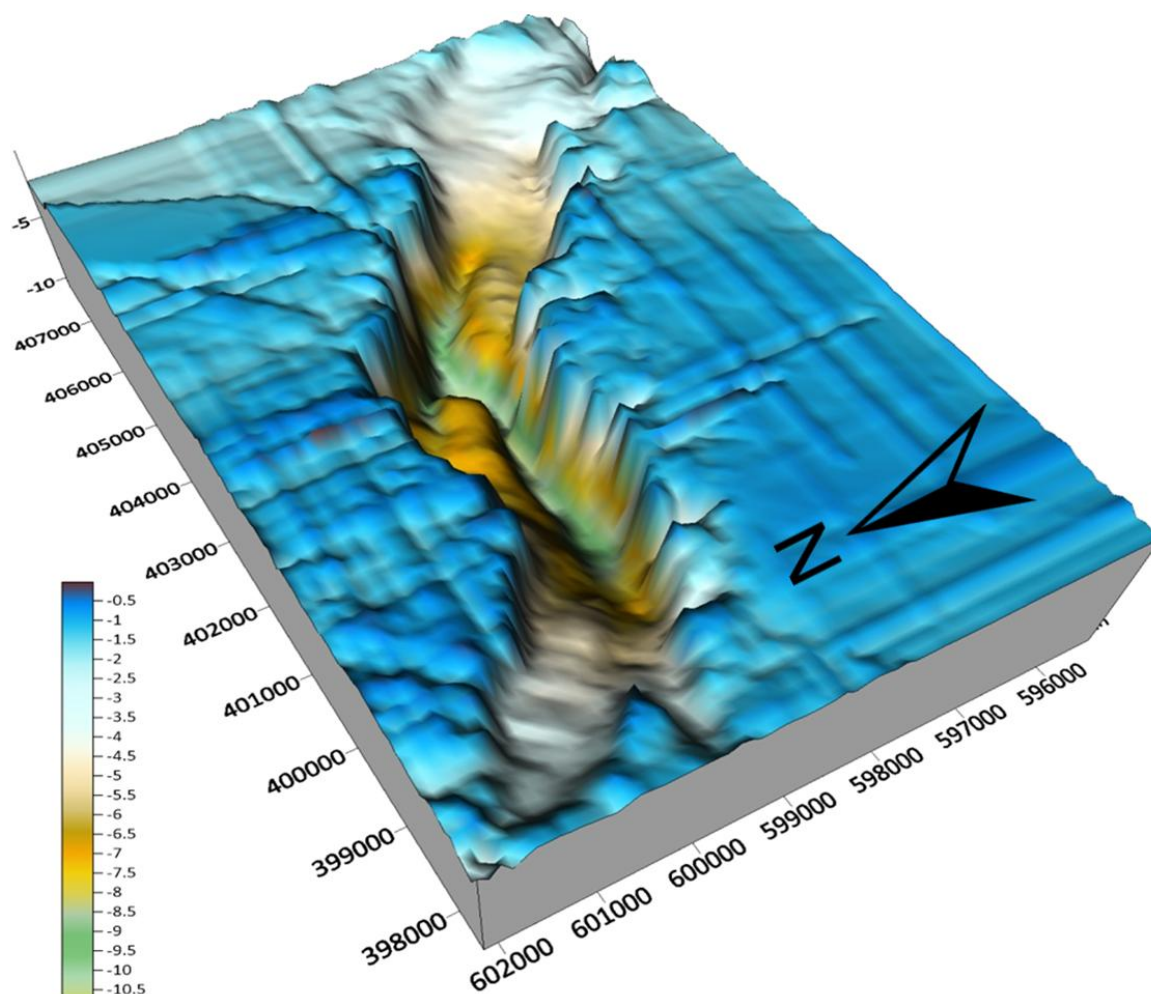


Figure 53 : Représentation en 3D du relief du fond de la lagune Aghien

Le sondage des profondeurs de la lagune Aghien a également permis d'apprécier la surface et le volume de ladite lagune.

De façon générale, le fond de la lagune Aghien est très peu accidenté. C'est un relief relativement plat avec des pentes très faibles variant entre 0 et 8,72 % dont la moyenne est évaluée à 0,77 %. Les pentes les plus élevées se localisent près des rivages, des zones de bas fond et dans le chenal (Annexe 5).

5.3.1.2. Surface et volume

La surface et le volume de la lagune sont des caractéristiques importantes. Ils sont extraits à partir des cotes successives des différents niveaux de profondeur obtenues à l'aide de la bathymétrie.

✓ Surface

La surface de la lagune Aghien représentée en fonction des cotes correspondant à différents niveaux de profondeur décrit une fonction logarithmique. Du fond vers la cote 0,65 m, la surface de la cuvette de la lagune augmente avec les cotes. De -10,5 m à -9,5 m, la surface du plan d'eau connaît une très faible évolution. A partir de la cote de -9,5 m jusqu'à la cote de -2,5 m, l'évolution est rapide. Cependant, un ralentissement de cette croissance est enregistré entre les cotes -3,9 m et 0 m. A partir de 0 m, la surface du plan d'eau cesse d'augmenter en se stabilisant pour se maintenir à 19,8 km² jusqu'à la cote 0,64 m (Figure 54) qui correspond à la cote de la surface libre du plan d'eau à la date des levés (juin-juillet 2021).

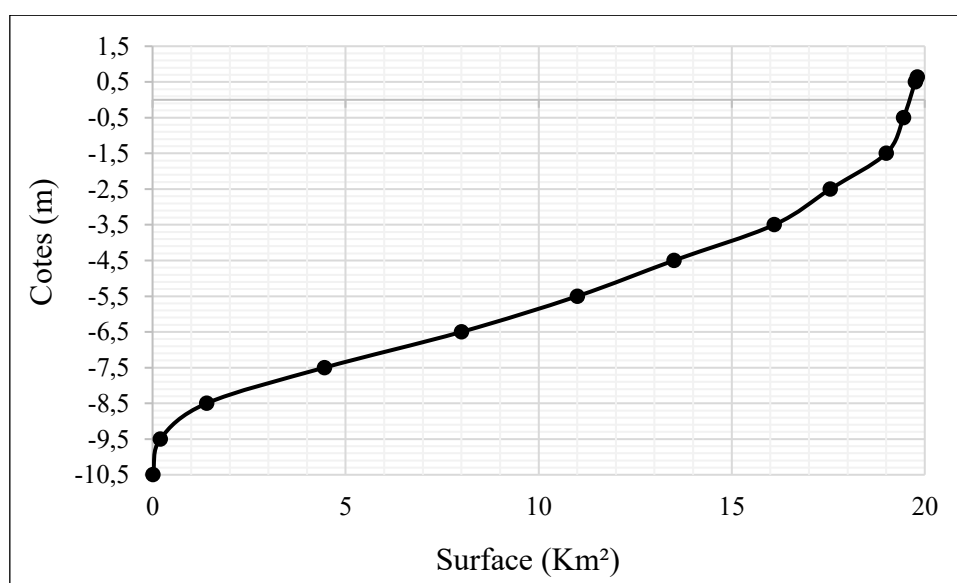


Figure 54 : Courbe hauteur-surface de la lagune Aghien en juillet 2021

✓ Volume

La courbe des volumes générés en fonction des cotes successives décrit une fonction puissance. Le volume de la lagune ne varie pratiquement pas lorsque la cote est inférieure -8,5 m. Cependant, à partir de la cote -8,5 m, le volume évolue au fur et à mesure que les cotes du plan d'eau montent pour atteindre celle de la surface libre de d'eau (0,64 m). Le volume total calculé de la lagune est évalué à $1,24.10^8 \text{ m}^3$ (Figure 55).

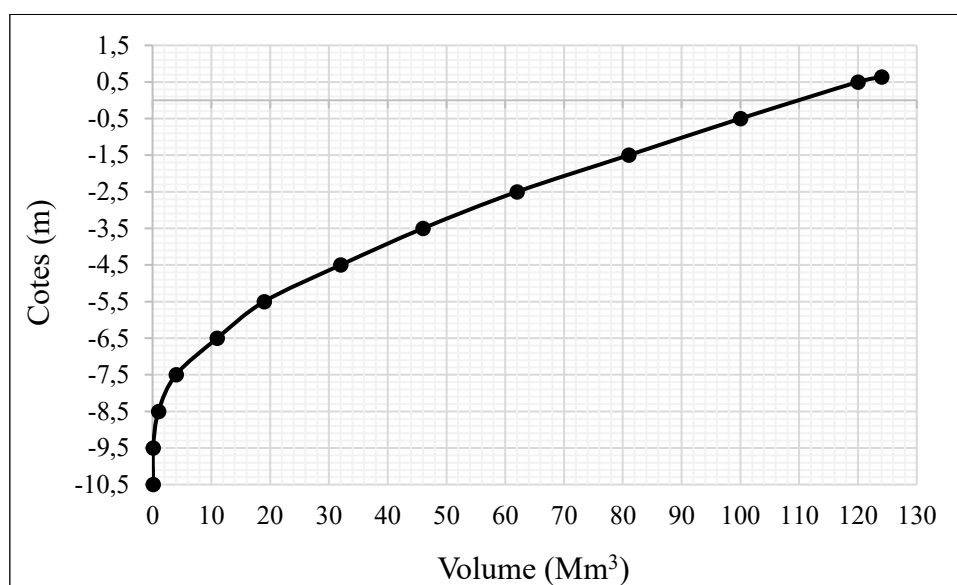


Figure 55 : Courbe hauteur-volume de la lagune Aghien à la date de juillet 2021

5.4. Courantologie de la lagune Aghien et des tributaires

L'étude des caractéristiques hydrauliques de la lagune Aghien et de ses tributaires s'est faite à l'aide de courantomètre ADCP à effet Doppler. Elle a permis de déterminer la moyenne des débits calculés, des vitesses moyennes d'écoulement, des largeurs des sections de mesure et la surface des sections mouillées.

5.4.1. Courantologie de la lagune Aghien

Dans la lagune Aghien, la zone d'intérêt demeure, conformément aux objectifs de l'étude, la zone de prise d'eau et de diffusion des effluents issus de la production d'eau potable. Pour une meilleure connaissance de la zone d'implantation, une campagne de jaugeage a été menée dans cette zone en vue de déterminer le débit et la vitesse du courant (Tableau XVII).

Tableau XVII : Caractéristiques hydrauliques d'une section de lagune Aghien

Site	Date	Qm (m³.s⁻¹)	l (m)	Surface mouillée (m²)	Vitesse du courant (m.s⁻¹)
Prise	31/08/2021	55,031	1 509,86	8 124,83	0,007

Qm : Débit moyen ; l : largeur moyenne

La largeur de la lagune dans la zone de prise d'eau est un peu plus de 1,5 km pour une section mouillée de 8 124,83 m². Les écoulements dans la zone variant entre 0 et 0,402 m.s⁻¹ avec une moyenne évaluée à 0,007 m.s⁻¹. Le débit moyen équivalent est de 55,031 m³.s⁻¹ (Figure 56).

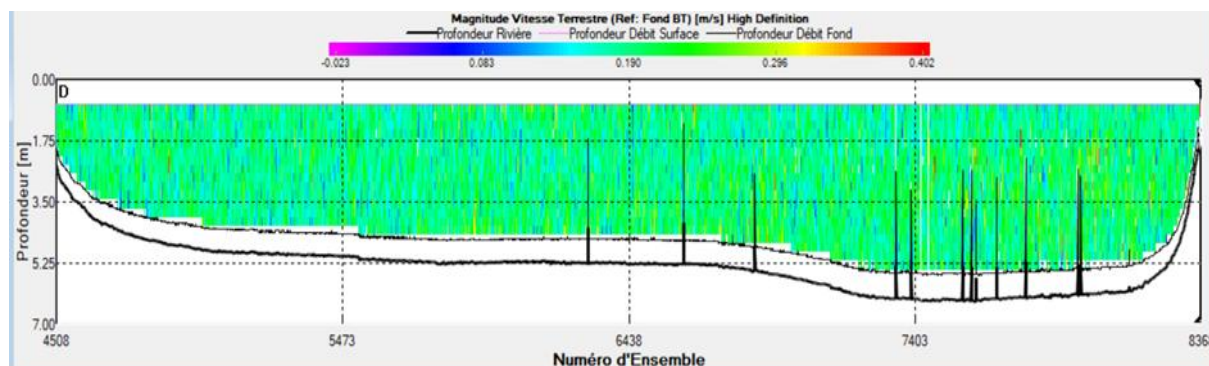


Figure 56 : Profil en travers et variation de vitesses dans la zone de prise d'eau

La zone de prise d'eau est également touchée par la marée dynamique mais avec un courant relativement faible. En marée haute, les écoulements dans la zone ne sont pas uniformes comme le témoigne le sens des vecteurs vitesses (Figure 57).

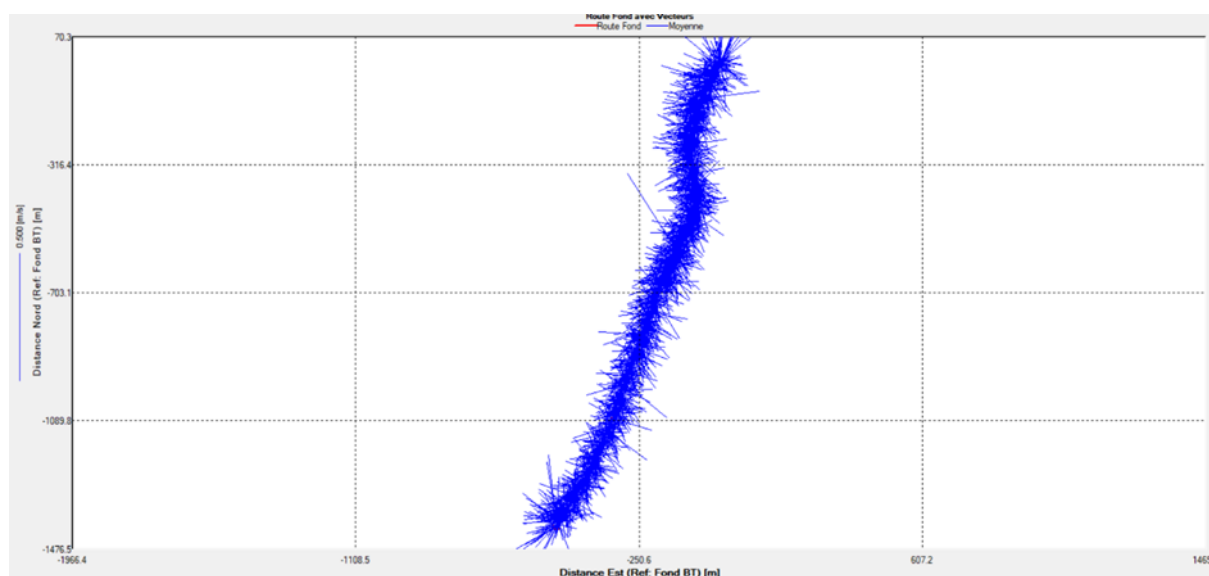


Figure 57 : Profil de vecteurs vitesse dans la zone de prise d'eau à la date du 31.08.2021

5.4.2. Courantologie des tributaires de la lagune Aghien

En raison de sa très faible profondeur sur toute la période de l'étude, la rivière Djibi, l'un des tributaires permanent de la lagune n'a pu être jaugé. Ainsi, la détermination de ses caractéristiques hydrauliques repose donc sur les mesures faites en 2015 lors du projet « Lagune Aghien » mené par l'équipe de l'Université Nangui Abrogoua en collaboration avec l'Institut de Recherche et Développement (IRD).

5.4.2.1. Courantologie de la Bété

Trois transects ont été nécessaires pour évaluer les caractéristiques hydrauliques de la rivière Bété. La moyenne de chaque paramètre mesuré est consignée dans le tableau XVIII.

Tableau XVIII : Caractéristiques hydrauliques de la Bété

Site	Date	l (m)	Surface mouillée (m ²)	Vitesse du courant (m.s ⁻¹)	Qm (m ³ .s ⁻¹)
Bété	21/07/2021	20,50	51,297	0,083	4,258

Ainsi, la largeur moyenne de la rivière Bété dans sa section de mesure est estimée à 20,50 m pour une profondeur moyenne de -2,502 m et la profondeur maximale de -3,90 m. La surface mouillée dans la section de jaugeage donne 51,297 m² et des vitesses d'écoulement qui oscillent entre 0,04 et 0,128 m.s⁻¹ avec une moyenne de 0,083 m.s⁻¹ pour un débit moyen correspondant de $4,258 \pm 0,14$ m³.s⁻¹. Les pentes au niveau des berges varient d'une berge à l'autre. Elles sont plus fortes à la rive droite (Figure 58).

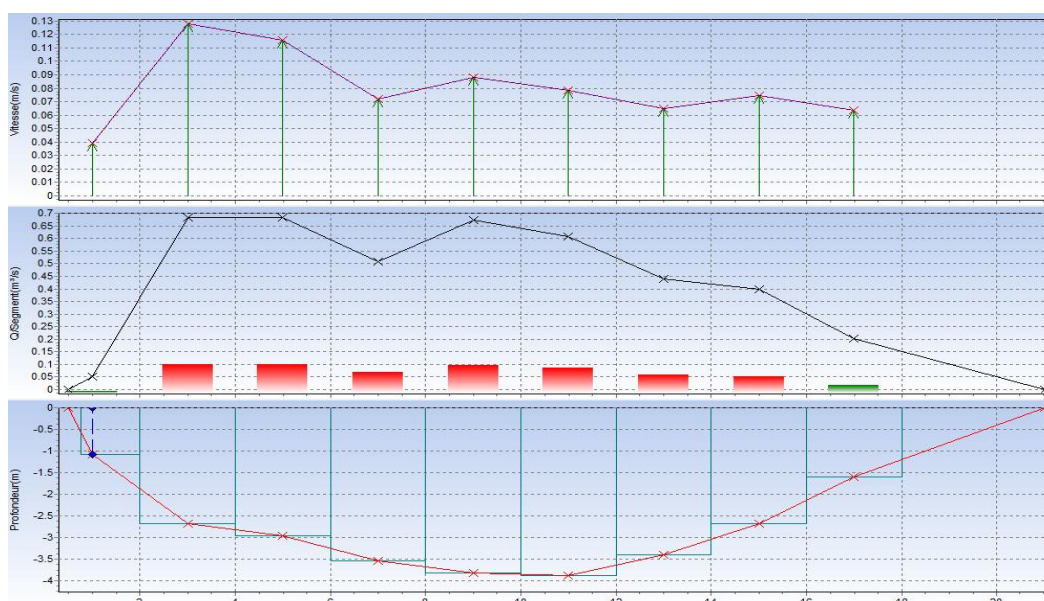


Figure 58 : Caractéristiques hydrauliques de la rivière Bété (21.07.2021)

Ces caractéristiques montrent que les tributaires permanents de la lagune Aghien (Rivières Djibi et Bété) sont en fait de petits cours d'eau qui pourraient s'assécher en condition de fortes pressions (anthropiques ou naturelles) permanentes.

5.4.2.2. Courantologie de la Mé

Le jaugeage de la Mé a permis de déterminer ses caractéristiques hydrauliques en marée basse et en marée haute en effectuant quatre transects dans la section de jaugeage.

✓ **En marée basse**

Les caractéristiques hydrauliques de la section de jaugeage de la rivière Mé à la date du 21/07/2021 en marée basse sont consignées dans le tableau XIX.

Tableau XIX : Caractéristiques hydrauliques d'une section de la Mé en marée

Site	Date	l (m)	Surface mouillée (m ²)	Vitesse du courant (m.s ⁻¹)	Qm (m ³ .s ⁻¹)
La Mé	21/07/2021	37,62	233,7	0,238	55,730

En marée basse, la largeur de la section jaugée est de 37,62 m pour une surface mouillée de 233,7 m². Les vitesses d'écoulements y sont relativement élevées. Les valeurs y varient de 0 à 0,7551 m.s⁻¹ avec une moyenne de 0,238 m.s⁻¹ (Figure 59). Le débit moyen correspondant est de 55,730 m³.s⁻¹ dans cette section.

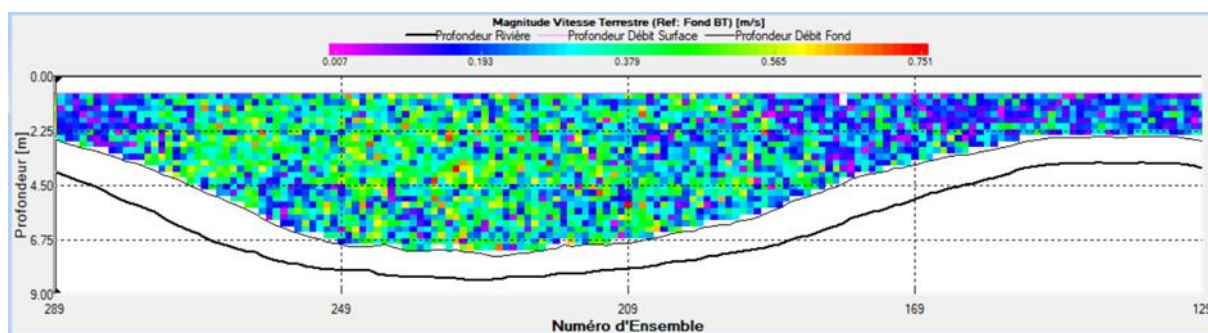


Figure 59 : Profil en travers et vitesses d'écoulement dans la section de jaugeage

Les vecteurs vitesse indiquent un écoulement unidirectionnel dirigé vers le chenal montant ainsi qu'en marée basse les eaux de la rivière Mé alimentent le chenal (Figure 60).

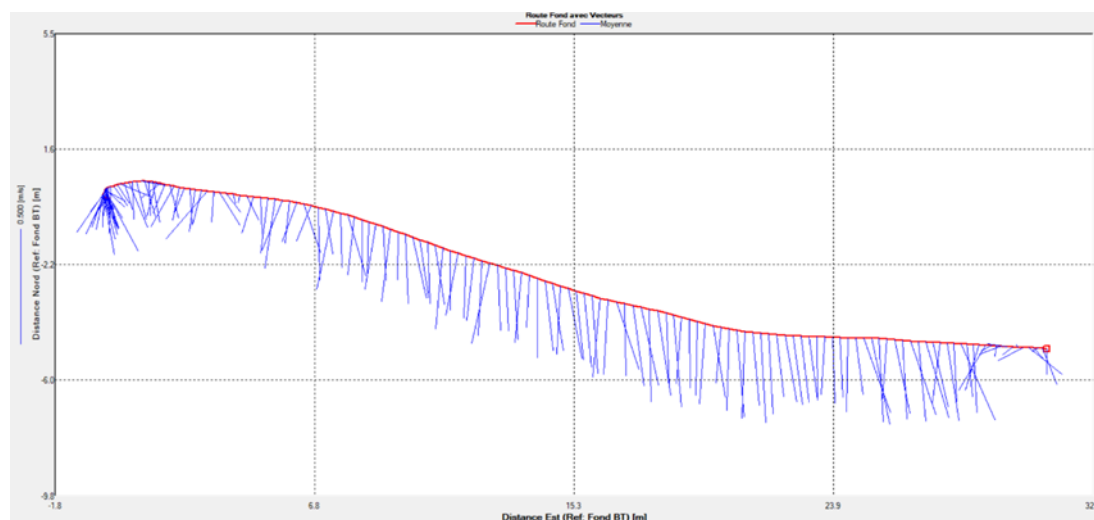


Figure 60 : Vecteurs vitesse dans la zone de jaugeage de la Mé en marée basse

✓ En marée haute

En marée haute, les paramètres mesurés donnent des caractéristiques différentes de celles en marée basse (Tableau XX).

Tableau XX : Caractéristique hydrauliques d'une section de la Mé

Site	Date	l (m)	Surface mouillée (m ²)	Vitesse du courant (m.s ⁻¹)	Qm (m ³ .s ⁻¹)
Mé	21/07/2021	34,25	221,94	0,181	40,206

En marée haute, la rivière côtière Mé, dans la section de jaugeage, a une largeur de 34,25 m et une surface mouillée évaluée à 221,94 m². La vitesse maximale connaît une baisse importante. Les vitesses oscillent désormais entre 0 et 0,771 m.s⁻¹. La vitesse moyenne des écoulements est de 0,181 m.s⁻¹ pour un débit de 40,206 m³.s⁻¹. Bien que la vitesse moyenne des écoulements régresse en passant de la marée basse à la marée haute, le sens des vecteurs vitesse indique un écoulement unidirectionnel tout comme en marée basse dirigé vers le chenal (Figure 61).

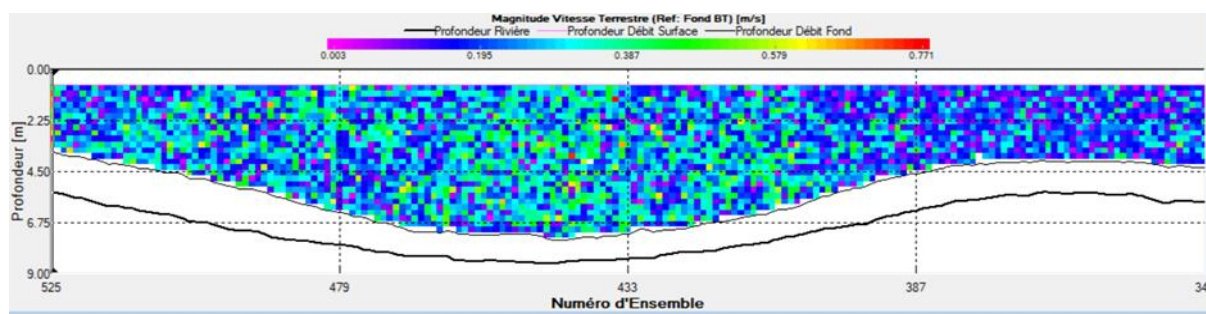


Figure 61 : Profil en travers et variation de la vitesse des écoulements

En marée haute le sens des vecteurs vitesse dans la zone de jaugeage de la rivière montrent que les eaux de cette rivière se déversent continuellement dans le chenal (Figure 62). Aucune intrusion d'eau salée en provenance des remontées marines n'est enregistrée.

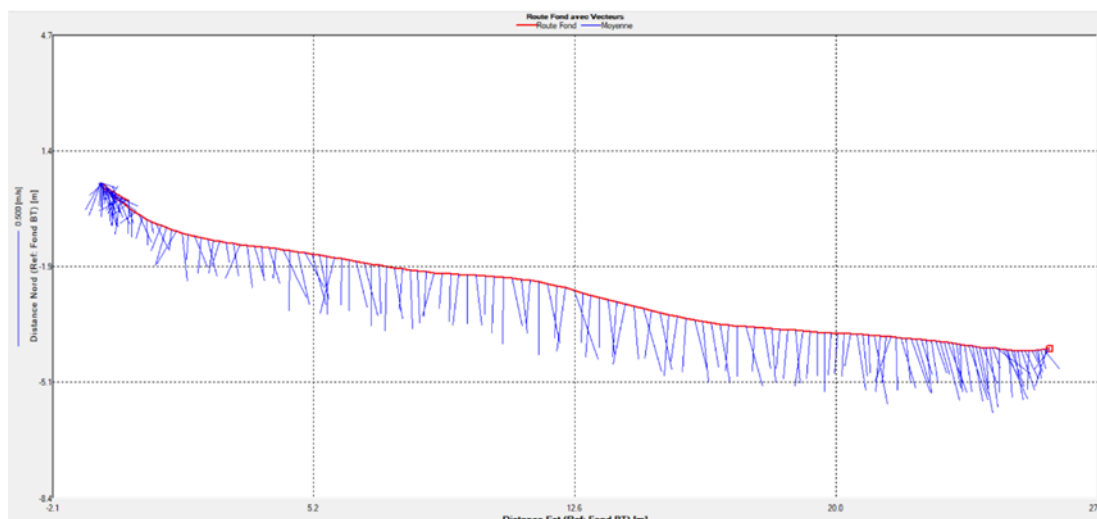


Figure 62 : Vecteurs vitesse dans la zone de jaugeage de la Mé en marée haute

Ainsi, quel que soit le niveau de la marée dynamique dans le chenal, les écoulements de la rivière côtière Mé sont permanemment dirigés vers le chenal justifiant l'absence d'intrusion d'eau provenant de la lagune Potou en marée haute.

5.4.2.3. Courantologie du chenal

Le chenal reliant les lagunes Potou et Aghien a également été jaugé en deux sections distinctes d'une part en marée basse et d'autre part en marée haute et ce en amont et en aval de la confluence de la rivière Mé.

✓ En marée basse

Les mesures faites en marée basse dans le chenal ont permis de caractériser l'hydraulicité des sections de jaugeage à travers les valeurs obtenues consignées dans le tableau XXI.

Tableau XXI : Caractéristiques hydrauliques des sections du chenal

Site	Date	l (m)	Surface mouillée (m ²)	Vitesse du courant (m.s ⁻¹)	Débit moyen (m ³ .s ⁻¹)
Amont	21/07/2021	213,1	894,3	0,247	221,0
Aval		115,4	615,9	0,431	265,1

En marée basse, dans les sections de jaugeage du chenal, la largeur est de 213,1 m et de 115,4 m respectivement en amont et en aval. Les surfaces mouillées correspondantes sont de 894,3 m² en amont et de 615,9 m² en aval. Les vitesses d'écoulement en marée basse sont plus importantes dans la section de jaugeage aval qu'amont. En aval, les vitesses vont de 0 à 1,087 m.s⁻¹ avec une moyenne de 0,431 m.s⁻¹. En amont par contre, elles n'excèdent pas 0,86 m.s⁻¹

(sont de $0,859 \text{ m.s}^{-1}$) avec une moyenne de $0,247 \text{ m.s}^{-1}$ (Figure 63). Les débits moyens associés sont de $221,0 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $265,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ respectivement pour les sections de jaugeage amont et aval.

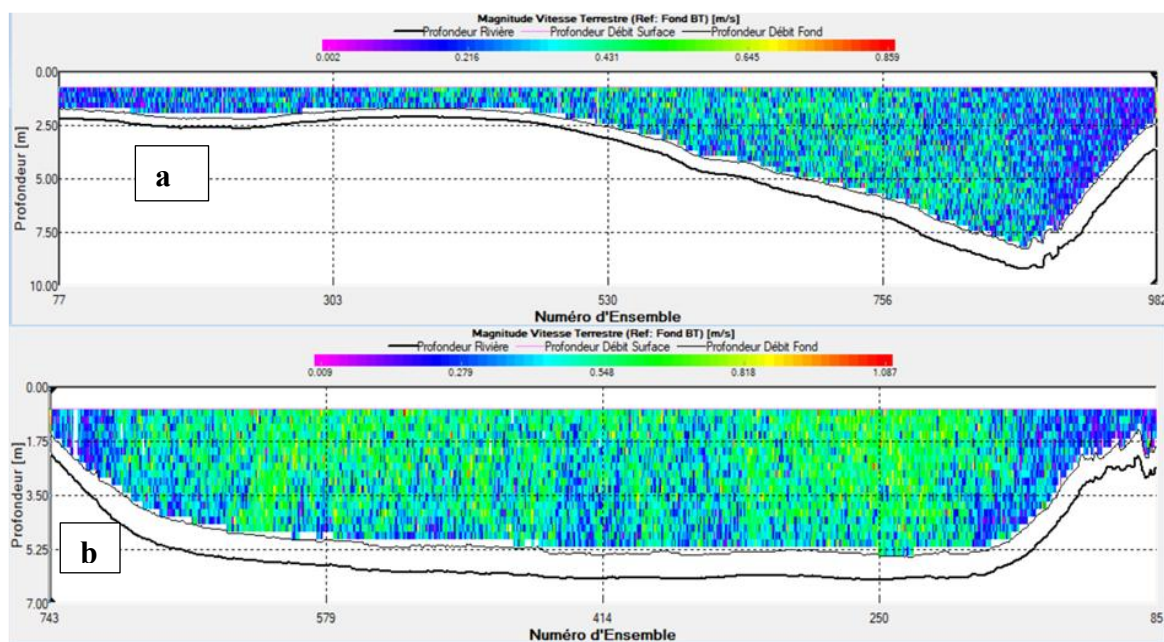


Figure 63 : Profil en travers et variation de la vitesse d'écoulement

a) amont ; **b)** aval

En marée basse (Figure 64), les vecteurs vitesse indiquent un écoulement dirigé uniquement vers la lagune Potou et ce quelle que soit la section de jaugeage (amont ou aval).

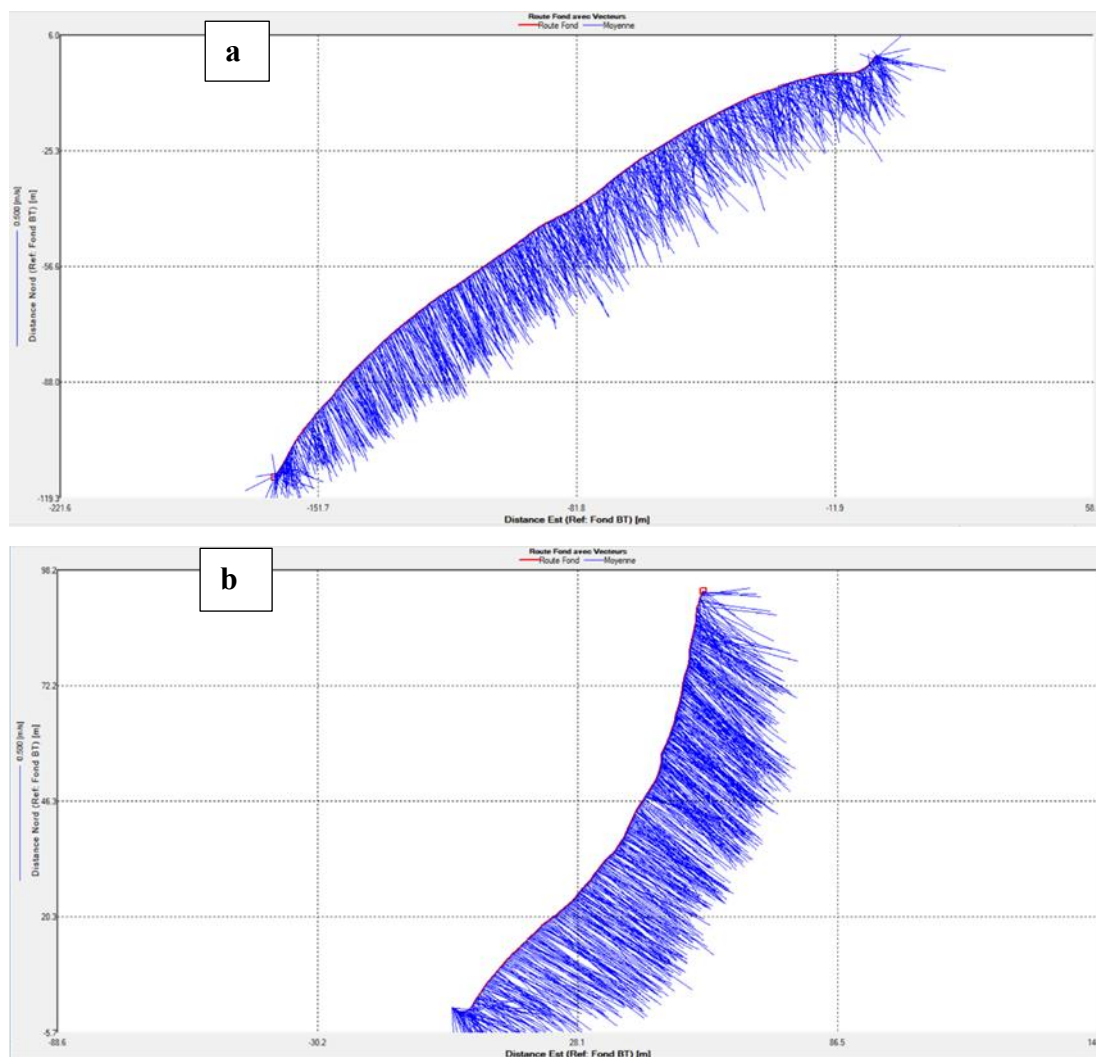


Figure 64 : Vecteurs vitesse des écoulements

a) amont ; b) aval

✓ En marée haute

Les valeurs des paramètres mesurés en marée haute dans le chenal amont et aval sont contenues dans le tableau XXII.

Tableau XXII : Caractéristiques hydrauliques des sections du chenal amont et aval

Site	Date	l (m)	Surface mouillée (m ²)	Vitesse du courant (m.s ⁻¹)	Débit moyen (m ³ .s ⁻¹)
Amont	21/07/2021	204,6	885,9	0,372	303,0
Aval		114,6	625,1	0,396	241,1

En marée haute, la largeur moyenne est de 204,6 m et 114,6 m respectivement dans le chenal amont et aval. Les surfaces mouillées correspondantes sont estimées à 885,9 m² et 625,1 m². Les vitesses atteignent 1,097 m.s⁻¹ dans la section amont du chenal et 1,011 m.s⁻¹ dans la section aval avec des moyennes évaluées à 0,372 m.s⁻¹ et 0,396 m.s⁻¹ respectivement en amont et en

aval (Figure 65). Les débits associés sont de $303,0 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $241,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ correspondant aux sections de jaugeage amont et aval.

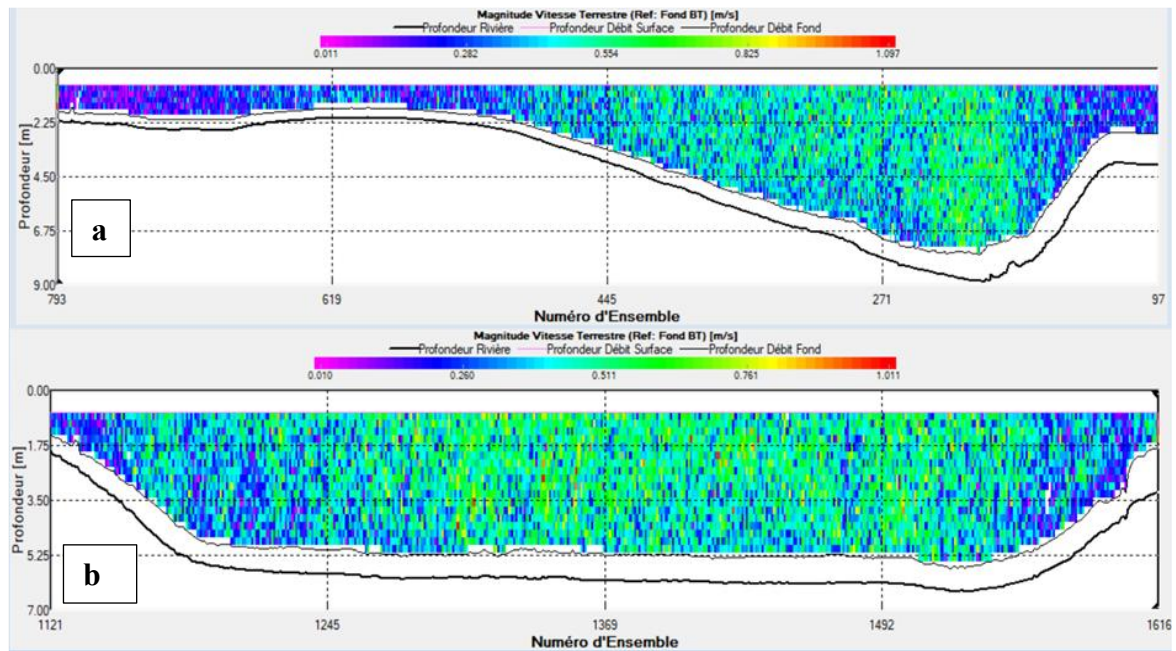


Figure 65 : Profil en travers et variation de la vitesse

a) section amont ; **b)** section aval

En marée haute, les écoulements dans le chenal amont et aval sont dirigés dans le sens Potou-Aghien indiquant une entrée d'eau dans la lagune Aghien en provenance de la Mé et de la lagune Potou (Figure 66).

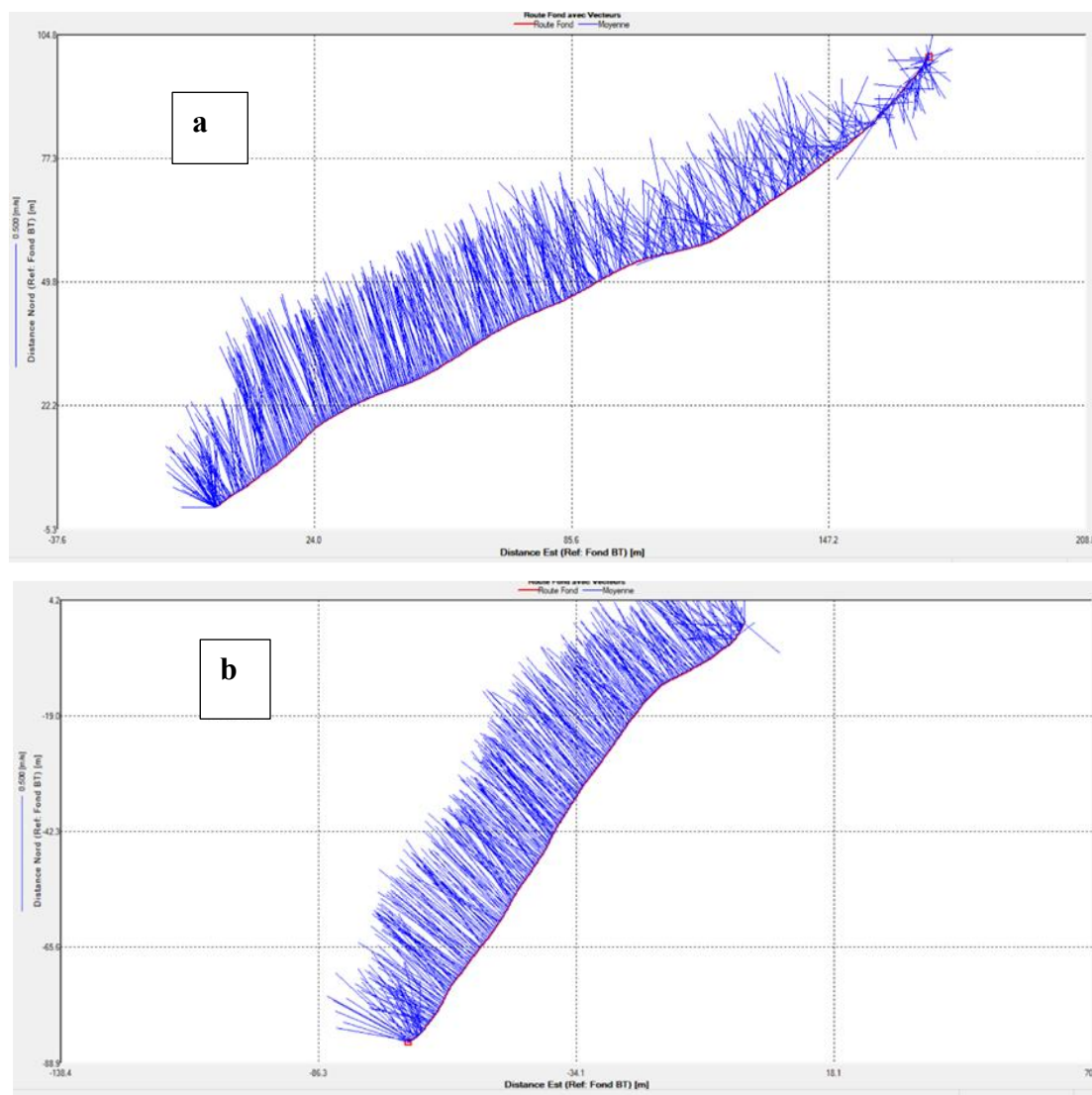


Figure 66 : Vecteurs vitesse des sections de mesure

a) amont ; b) aval

Discussion

La caractérisation de la distribution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et de la morphologie de la lagune aghien s'est basée sur l'étude de l'évolution des températures, de la salinité des masses d'eau, des sédiments en suspension et au fond, de la bathymétrie et de la courantologie de la lagune et de ses tributaires.

Les résultats ont montré que les températures oscillent 26 et 33°C en fonction des saisons et de la position des masses d'eau. En marée haute pendant la période des basses eaux (avril 2021) la salinité moyenne dans les rivières Djibi, Bété et Mé est respectivement de 0,2 PSU, 0,1 PSU et 0 PSU en 2021 et 2024 et de 0,2 PSU, 0,1 PSU et 3,7 PSU en avril 2025. En mai 2025, la salinité dans la rivière est passée à 0,0 PSU et celle dans les rivières Djibi et Bété est restée

inchangée. Ces changements brusques de la salinité intervenus entre les mois d'avril et de mai seraient dus aux apports de la Mé. En effet, avec la reprise des précipitations les apports de la Mé auraient dilué la salinité des intrusions marines dans cette rivière.

Dans la lagune Aghien, la salinité évaluée à 0,0 PSU 2021 est progressivement passée à 0,2 PSU en avril 2024 puis à 2,8 PSU en 2025 pour la même période. Au niveau du chenal, la salinité évaluée à 0,11 PSU dans la partie aval en 2021 est d'abord passée à 0,2 PSU en 2024 avant d'atteindre brusquement 6,2 PSU en avril 2025. Les faibles valeurs de salinité obtenues au niveau de la lagune Aghien avant l'ouverture de l'embouchure de la Comoé sont justifiées par des valeurs relativement faibles (inférieures à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de conductivité électrique obtenues lors des travaux de Traoré *et al.* (2012), Konan *et al.* (2017) et Koffi (2020) dans cette même lagune. Ces faibles valeurs seraient la conséquence de la conjugaison de facteurs hydrologiques et morphologiques. Au niveau hydrologique, les apports d'eau douce abondants provenant des rivières Djibi, Bété et Mé, des ruissellements lors des précipitations ainsi que des échanges entre la lagune et les nappes souterraines pourraient être la base des faibles valeurs de salinité dans la lagune avant l'ouverture de l'embouchure de la Comoé. Au niveau morphologique, l'existence de banc de sable à l'embouchure de la Comoé empêchant la remontée des eaux marines à partir de cette embouchure pourrait expliquer la faiblesse de la salinité dans la lagune Aghien. En outre, la position géographique de la lagune Aghien et la dilution des remontées marines, transitant par le canal de Vridi, par les apports de la Comoé (Monde *et al.*, 2011) et de la Mé (Koffi *et al.*, 2019) seraient à l'origine de son faible taux de salinité. En effet, les lagunes du complexe lagunaire ivoirien, situées à proximité de l'Atlantique au Sud, affichent une salinité moyenne de 3,5 ‰ (Monde *et al.*, 2011 ; Konan *et al.*, 2013). Ainsi, à mesure que l'on s'éloigne de la mer, le taux de sel dans les masses d'eau connaît une diminution (Annexe 6, 7 et 8). Cependant, la forte augmentation de la salinité observée en avril 2025 serait liée à une longue absence des précipitations dans les bassins versants de la lagune Aghien et de la rivière Mé réduisant ainsi les apports d'eau douce permettant la dilution des remontées marines. La comparaison des débits d'avril 2024 et 2025 de la rivière Mé et du fleuve Comoé permet d'attester de la baisse des apports entre avril 2024 et 2025 (Annexe 9). Aussi, cette augmentation serait liée à une baisse importante des apports de la Comoé qui aurait entraîné une diminution de la dilution des apports d'eau marines en aval de la lagune Aghien. Au niveau de la Djibi, le taux élevé de la salinité pourrait être dû aux déversements importants d'eaux résiduelles dans cette rivière. En effet, la rivière Djibi traverse les quartiers populaires de la commune d'Abobo caractérisés par le déversement anarchiques des eaux usées

domestiques dû à une insuffisance d'infrastructure de collectes (Soro *et al.*, 2010 ; Effebe *et al.*, 2017 ; Koffi, 2020).

De l'analyse des échantillons d'eau, il ressort des concentrations faibles de matières en suspension sur l'ensemble de la colonne d'eau de la lagune. Elles restent inférieures à 0,1 g/L quel que soit le niveau de profondeur. Le flux sédimentaire associé est relativement peu élevé. Il est de 155 t/jour et 411 t/jour en basses et hautes eaux respectivement soit environ $0,112.10^6$ t/an. Cependant, les études de Koffi (2021) ont montré que la charge solide transportée durant l'année 2017 par l'ensemble des tributaires est de $3,621.10^6$ tonnes dont la majorité est envoyée en période des hautes eaux. Une quantité largement supérieure à celle que nous obtenons en 2021. Ainsi, malgré la mise à nu des sols de la zone d'étude (Diallo *et al.*, 2018), le flux sédimentaire est en baisse. Cette baisse des apports sédimentaires pourrait être due à une baisse importante des apports liquides des tributaires puisque le principal agent pouvant transporter ces particules arrachées en zone forestière reste l'eau de ruissellement (Kouassi, 2007 ; Meledje, 2016).

L'analyse lithologique des sédiments du fond a montré qu'ils sont constitués de sédiments de sable et sédiments vaseux (sédiment mixte). Les vases et crèmes de vase se rencontrent dans la bande centrale où les profondeurs sont supérieures à 2 m. Près des berges se trouvent les sédiments de sables de taille moyenne à grossière. Cette répartition montre que les conditions hydrodynamiques qui règnent dans la lagune Aghien ne permettent pas la mise en mouvement des particules de sables. De plus, elle montre que les sédiments de sables rencontrés dans la lagune Aghien ne seraient pas transportés par les tributaires de cette lagune mais plutôt par des écoulements latéraux lors des averses de pluies. L'analyse granulométrique a donné par ordre d'importance, les sables moyens (40 %), grossiers (31 %), fins (18 %), très grossiers (10 %) et très fins (1 %). Cependant, dans cette lagune en 2008, les sables fins occupaient la première place du rang avec 42 % suivi des sables moyens (34 %) et sables grossier (18 %) (N'Guessan, 2008). Cette différence pourrait être due à la dégradation de l'état de surface du bassin versant de cette lagune accentuée par la forte urbanisation dans la décennie 2010 (Diallo *et al.*, 2018). Elle occasionnerait des écoulements plus rapides capables d'arracher et transporter des particules plus grossières vers la lagune Aghien. Par ailleurs, l'aspect émoussé luisant et la forme majoritairement subanguleuse de ces sables observés à la loupe témoigneraient de ce mode de transport des sédiments présents dans le fond de la lagune Aghien. Les courbes granulométriques cumulatives semi logarithmiques en formes paraboliques obtenues montrent une hétérogénéité du stock sableux. Elles montrent que les sédiments se sont déposés par excès

de charge. Les sables analysés ont donc été triés au cours de leur transport dans des écoulements à forte énergie avant leur dépôt par décantation aux abords de la lagune où la courantologie est trop faible pour leur remise en suspension.

Les profondeurs dans la lagune Aghien vont de 0 à 10,5 m. Cette lagune a été divisée en trois zones distinctes en fonction des niveaux de profondeurs. Nous avons par ordre décroissant de la profondeur, la zone périphérique avec des profondeurs comprise entre 0 m et 5 m. Ensuite, vient la zone intermédiaire avec des profondeur allant de 5 à 9 m. Enfin, il y a la zone centrale avec des profondeur pouvant atteindre 10,5 m. Une situation qui montre clairement un comblement de cette lagune puisque les profondeurs obtenues en hautes eaux lors de nos travaux (juin-juillet 2021) sont conformes à celles obtenues en basses eaux (avril 2015) par BRLi. Le comblement de ce plan d'eau serait donc dû à la dégradation du couvert végétal de son bassin versant (Diallo *et al.*, 2018) à l'origine d'un apport important de sédiments évalué à environ $3,621.10^6$ tonnes en 2017 (Koffi, 2021).

La courantologie des sections des tributaires a montré que les courants sont relativement faibles à la Bété. La vitesse moyenne des écoulements est de $0,083 \text{ m.s}^{-1}$ pour une largeur de section de 20,5 m et des profondeurs allant de 0 à 3,90 m. Le débit de cette rivière dans la zone jaugée est estimé à $4,3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Les débits moyens mesurés en septembre 2015, 2016 et 2017 à la station hydrométrique sur cette rivière sont respectivement de $1,07 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, $1,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $2,34 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Ainsi, le débit y serait en hausse par rapport aux années précédentes. Les vecteurs vitesse dans la section de la Mé ont montré que les écoulements sont permanemment dirigés vers le chenal ce qui témoigne de l'absence d'intrusion d'eau salée provenant de la lagune Potou en aval. Cependant, en marée haute, une baisse de la vitesse des écoulements est observée. Cette variation de la vitesse serait due à l'onde de la marée qui a tendance à s'opposer aux écoulements de la Mé dans cette section. Dans le chenal, en marée basse, la vitesse moyenne et le débit associé sont plus importants dans la section aval que dans la section amont. Pendant cette période, la vitesse moyenne passe de $0,247 \text{ m.s}^{-1}$ à $0,43 \text{ m.s}^{-1}$ de l'amont vers l'aval et les débits correspondants sont de $221 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $265 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. L'importance de ces paramètres en aval est due au fait qu'en marée basse, les eaux de la Mé et de la lagune Aghien se mélangent pour converger vers la lagune Potou en aval comme le montre le sens des vecteurs vitesse. En marée haute, c'est le phénomène inverse qui se produit. Les eaux provenant de l'Atlantique repoussent les masses d'eau de la Mé vers la lagune Aghien. Il s'ensuit un accroissement de la vitesse moyenne et du débit d'écoulement dans la section amont qui passent à $0,37 \text{ m.s}^{-1}$ et à $303 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ respectivement pour la vitesse moyenne et le débit en marée haute.

Conclusion partielle

Dans ce premier volet de l'étude, notre intérêt a porté sur la caractérisation de la distribution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et de la morphologie de la lagune aghien. Il était question d'évaluer l'influence de l'ouverture de l'embouchure de la Comoé sur la salinité de la lagune Aghien, de quantifier les flux sédimentaires entrant dans cette lagune, de caractériser les sédiments du fond, la morphologie du fond et la courantologie des tributaires de la lagune Aghien. A cet effet, les mesures in situ de salinité ont montré que l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé a provoqué une augmentation de la salinité de 0,18 PSU du Sud au Centre de la lagune Aghien en 2024. Ces augmentations ont cependant atteint en moyenne 2,5 PSU dans toute la lagune Aghien en avril 2025 et 2,56 PSU dans la zone des pompages avant de redescendre à 0,8 PSU dans cette zone en mai de la même année. En se servant des échantillons d'eau prélevés, nous avons évalué la concentration des matières solides en suspension dans les tributaires. Le flux sédimentaire estimé sur la base des débits liquides et des concentrations de MES est de 154 t/j en basses eaux et à 411 t/j en hautes eaux. Le fond de la lagune Aghien est recouvert de vase dans sa bande centrale. Près des berges de cette lagune, on note une présence de sables moyens à grossiers de forme majoritairement subanguleuse à l'aspect émoussé et luisant contenant en forte proportion des minéraux de quartz. La lagune Aghien est relativement peu profonde. A la confluence de la Mé, dans le chenal, les profondeurs atteignent 17 m et elles sont inférieures à 11 m dans la bande centrale de la cuvette de la lagune. La lagune est alimentée par des tributaires permanents et périodiques.

CHAPITRE 6 : INFLUENCE DES PRESSIONS ANTHROPIQUES ET NATURELLES SUR LA DYNAMIQUE HYDRO-SEDIMENTAIRE DE LA LAGUNE AGHIEN

6.1. Données reconstituées

Afin de mener à bien l'exercice de modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune, il a fallu reconstituer le niveau de la lagune Potou sur la période 2021 en calibrant son niveau altimétrique. Les résultats statistiques obtenus entre les données mesurées et reconstituées sont consignés dans le tableau XXIII.

Tableau XXIII : Paramètres statistiques obtenus lors de la reconstitution

Paramètres	r (%)	R ² (%)	Ecart-type	Écarts moyen (m)	Biais (m)	RMSE (m)
Valeurs	95	90	3	$-2,3 \cdot 10^{-3}$	$-2,63 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$

Le coefficient de corrélation obtenu lors de cette reconstitution est de 95 % pour un coefficient de détermination de 90 % et un écart-type de 3. Malgré ces coefficients satisfaisants obtenus, des écarts existent entre les niveaux d'eau mesurés et reconstitués (Figure 67).

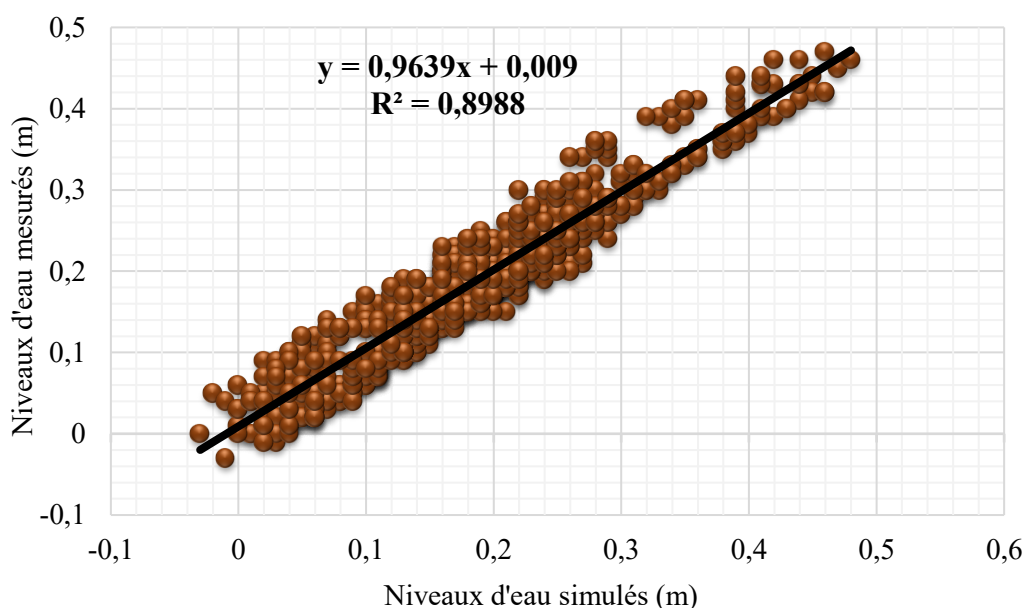


Figure 67 : Régression linéaire entre les niveaux d'eau mesurés et reconstitués

L'erreur quadratique moyenne lors de la reconstitution est évaluée à $3 \cdot 10^{-2}$ m. Cette valeur est largement suffisante pour accepter les données reconstituées. L'écart moyen entre les observations et la reconstitution est de $-2,3 \cdot 10^{-3}$ m pour un biais de $-2,63 \cdot 10^{-2}$ m. Ces écarts sont perceptibles au niveau des pics (Figure 68).

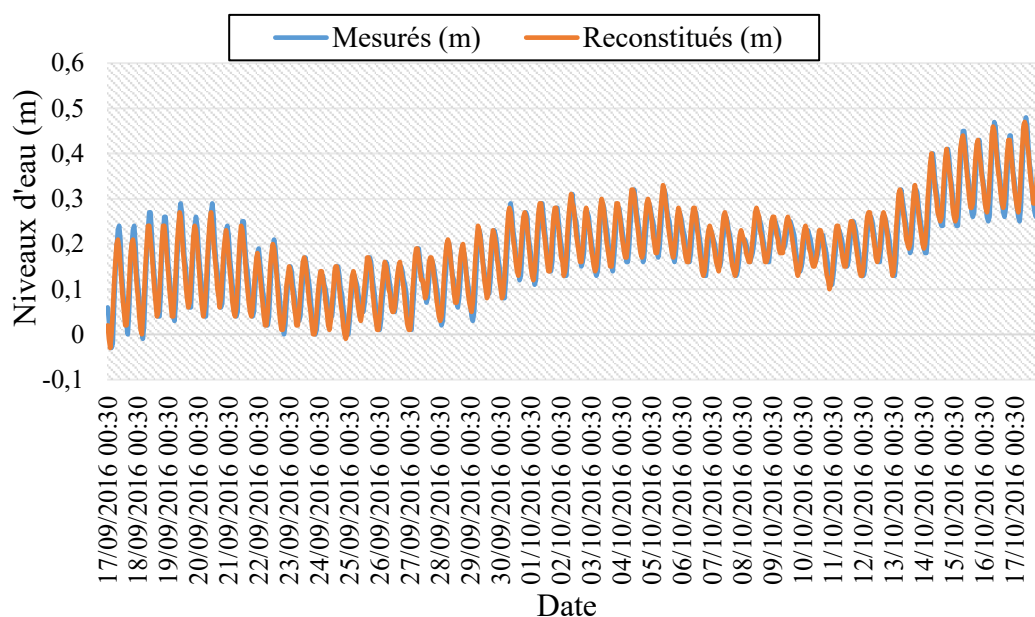


Figure 68 : Niveaux d'eau reconstitués et mesurés à la station limnimétrique de Potou

6.2. Modèle hydrodynamique

6.2.1. Maillage de la lagune

La lagune a été maillée en adoptant une forme régulière de 25,8 X 24,6 correspondant à 200 éléments scalaires en longitude et 150 éléments scalaires en latitude (Figure 69).

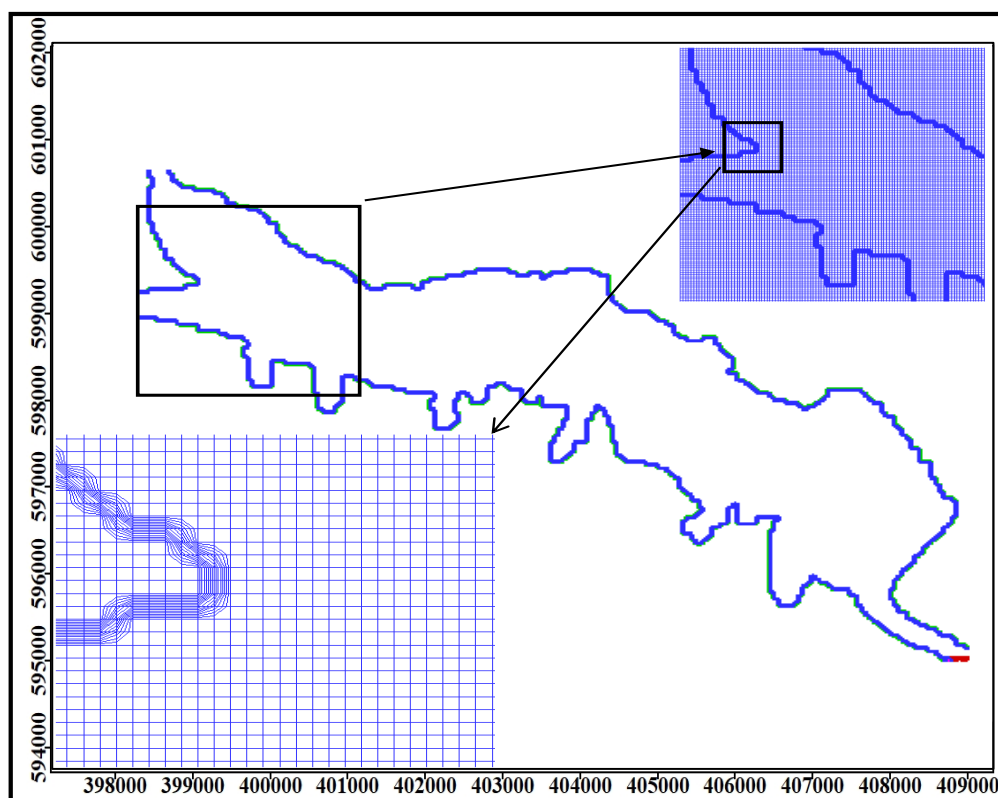


Figure 69 : Maillage régulier de la lagune Aghien

6.2.2. Optimisation du modèle

6.2.2.1. Variation du niveau d'eau

La simulation avec un coefficient de rugosité de Manning de $85 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour des pas de temps de 2 et 4 secondes en prenant un pas d'espacement de $25,8 \times 24,6$ a été effectuée sur une période sèche de six (8) jours allant du 01 au 07 avril 2021. Les paramètres statistiques qui en découlent sont consignés dans le tableau XXIV.

Tableau XXIV : Indicateurs statistiques de performance du modèle

Pas de temps	r (%)	R ² (%)	Ecart max (m)	Biais (m)	NSE (%)	RMSE (m)
2 secondes	95,8	91,8	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$-3,4 \cdot 10^{-2}$	73,70	$4 \cdot 10^{-2}$
4 secondes	93,5	87,5	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	76,22	$3,9 \cdot 10^{-2}$

Avec un pas de temps de 2 secondes, la simulation a donné un coefficient de corrélation de 96 % pour un coefficient de détermination correspondant de 92 % soit seulement 8 % des résultats d'erreur. Le NSE associé est évalué à 73,7 % pour une Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) évaluée à $4 \cdot 10^{-2}$ m. Ces scores statistiques montrent qu'avec un pas de temps de 2 secondes, la performance du modèle est très bonne.

Avec un pas de temps de 4 secondes, les coefficients de corrélation et de détermination sont respectivement évalués à 93,5 % et 87,5 % faisant passer les erreurs de simulation à 12,5 % de la simulation. Le critère NSE et l'Erreur Quadratique Moyenne sont quant à eux estimés respectivement à 76 % et $3,9 \cdot 10^{-2}$ m. Ainsi, malgré un pas de temps très grand, le modèle conçu reste performant.

La difficulté à reproduire fidèlement les observations a créé des écarts entre les niveaux d'eau observés et simulés dont le maximal, pour un pas de 2 secondes, a atteint $9,1 \cdot 10^{-2}$ m pour une moyenne de $4 \cdot 10^{-2} \pm 2,9 \cdot 10^{-2}$ m. Les biais de simulation qui en résultent varient de $-9 \cdot 10^{-2}$ à $1,6 \cdot 10^{-2}$ m pour une moyenne de $-3 \cdot 10^{-2} \pm 0,02$ m montrant que le modèle surestime les observations (Figure 70a). Avec un pas de temps de 4 secondes, l'écart maximal est estimé à $8,75 \cdot 10^{-2}$ m pour un biais variant de 0,0 à $8,5 \cdot 10^{-2}$ m soit une moyenne de $3 \cdot 10^{-2} \pm 2,2 \cdot 10^{-2}$ m. Le modèle, avec un pas de temps de 4 secondes, sous-estime les observations (Figure 70b).

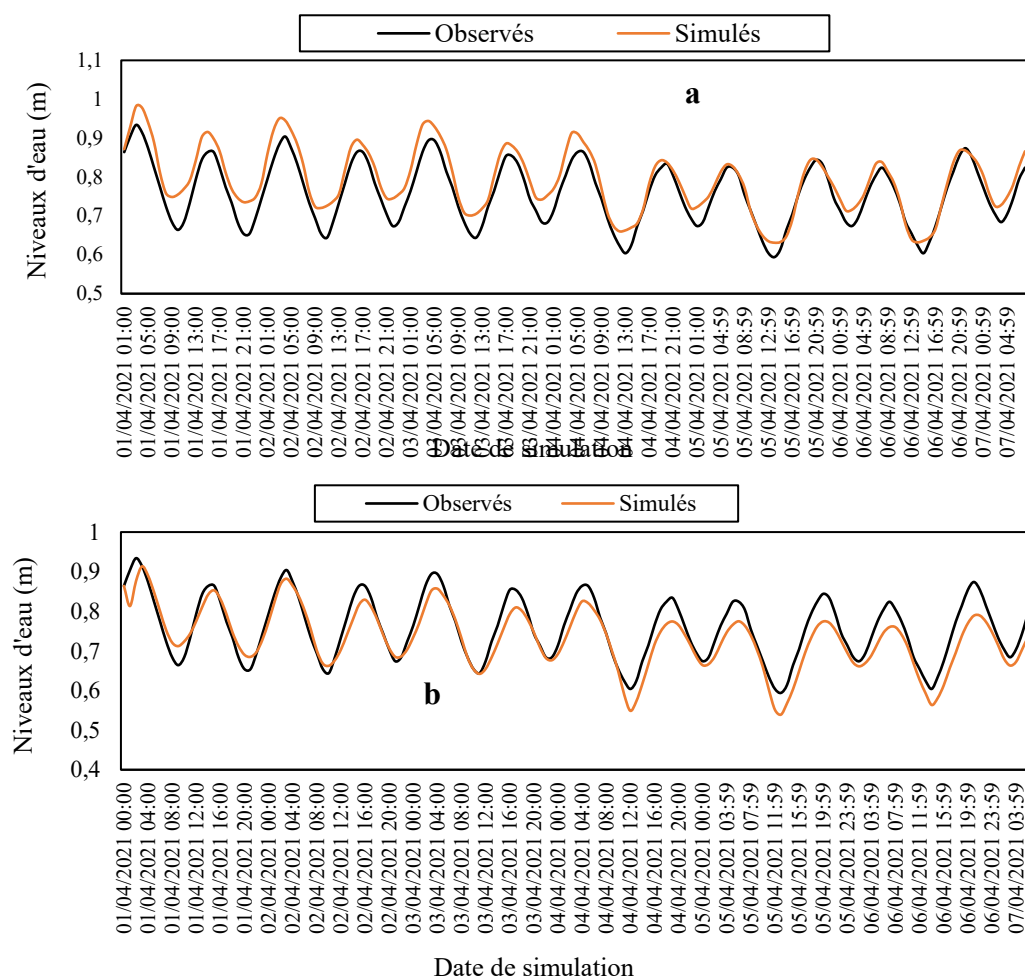


Figure 70 : Niveaux d'eau simulés et observés dans la lagune Aghien pour un pas de temps
a) 2s ; b) 4s

Avec un pas de temps de 2 secondes, les erreurs relatives tendent à baisser en intensité à mesure que la simulation s'étend dans le temps (Figure 71a). Cependant, avec un pas de temps de 4 secondes, les erreurs relatives ont tendance à gagner en intensité à mesure que la simulation s'étend dans le temps (Figure 71b).

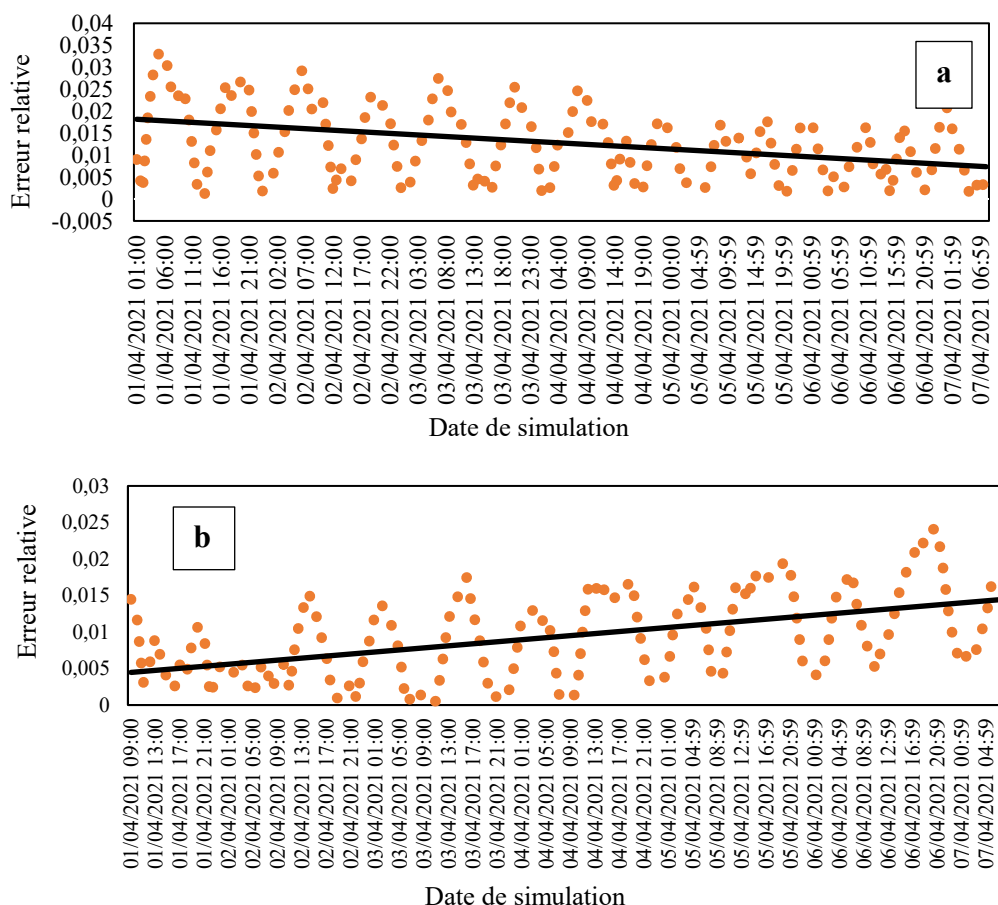


Figure 71 : Erreur relative de simulation

a) pas de temps 2 s ; b) pas de temps 4 s

6.2.2.2. Champs de vitesse

L'observation des champs de vitesse dans la lagune montre des zones de recirculation des masses d'eau due au phénomène de marée dynamique (Figure 72).

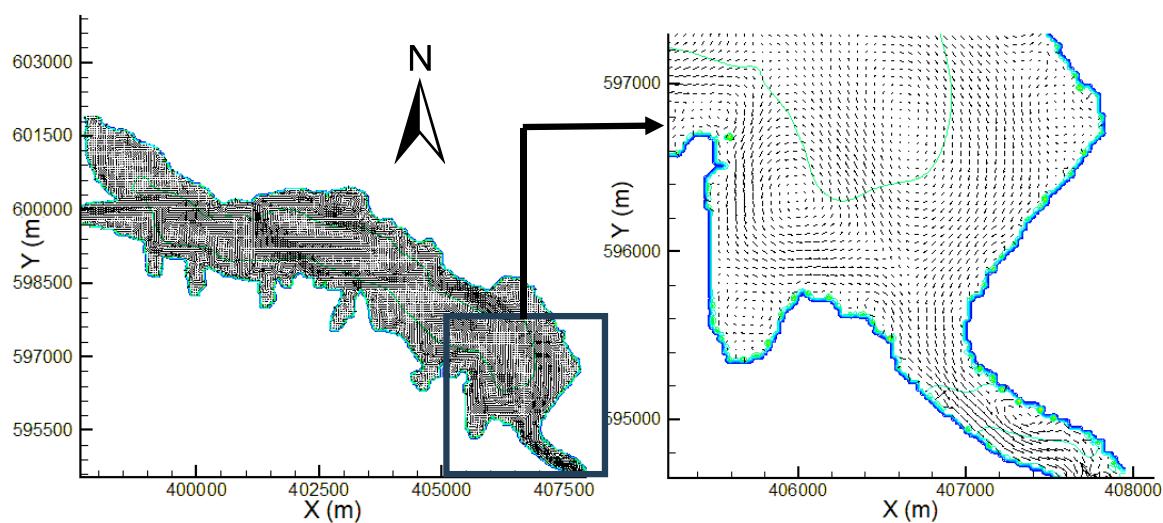


Figure 72 : Champs de vecteur vitesse modélisée dans lagune Aghien

En marée basse, les champs de vitesse indiquent une vidange de la lagune Aghien. Ces champs indiquent que lorsque le niveau de la marée dynamique est bas, les eaux de la lagune s'écoulent en direction de la mer (Figure 73a). En marée haute, c'est le phénomène inverse qui se produit. Les eaux en provenance de la mer propulsent les eaux de la Mé vers la lagune Aghien ce qui crée des champs de vitesse orientés dans la direction de la lagune (Figure 73b).

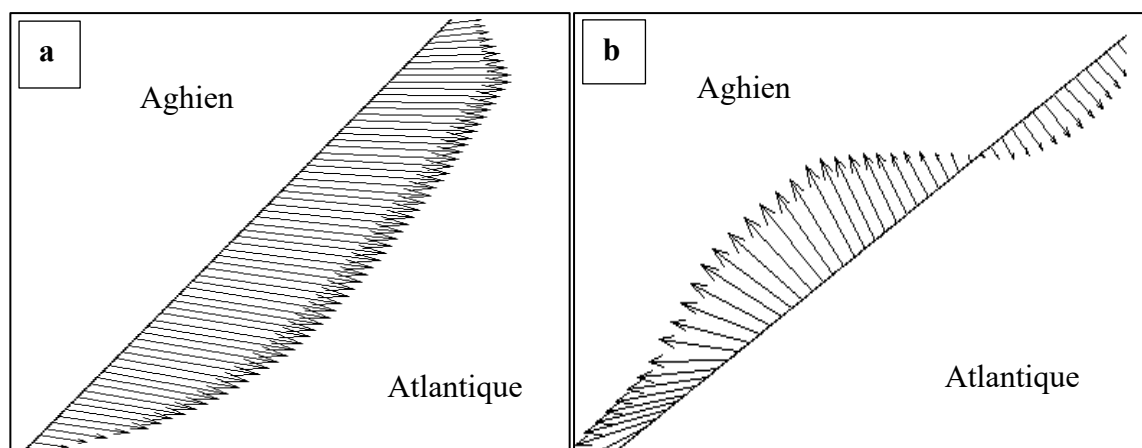


Figure 73 : Vecteurs champ de vitesse

a) marée basse ; b) marée haute

6.2.3. Dynamique de la lagune Aghien en l'absence de pompage

La simulation, en vue de comprendre la variation actuelle des niveaux de l'eau de la lagune, a été effectuée sur la période allant du 15 au 30 avril 2021. Les paramètres statistiques obtenus lors de cet exercice sont consignés dans le tableau XXIV.

Tableau XXV : Paramètres statistiques de la simulation

Critères	r (%)	R ² (%)	NSE (%)	Biais (m)	Ecart max (m)	RMSE (m)
Valeurs	98,22	96,48	88,66	$-1,98.10^{-2}$	$7,02.10^{-2}$	$2,7.10^{-2}$

Lors de cette simulation, le coefficient de corrélation obtenu est estimé 98,22 %. Il correspond à 96,48 % de données observées correctement reproduite par le modèle. Ainsi, seulement 3,52 % de données ont été simulées avec erreur ; les observations et simulations suivent donc parfaitement la droite de régression linéaire (Figure 74).

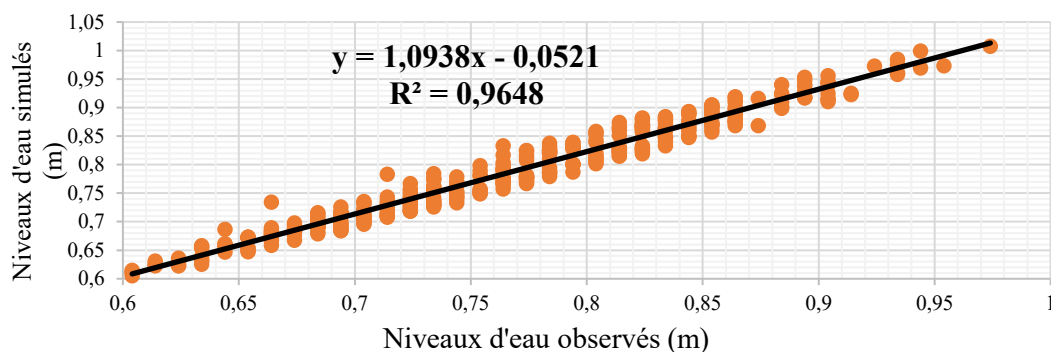


Figure 74 : Corrélation entre niveaux d'eau observés et simulés à Aghien

Les écarts entre les niveaux d'eau simulés et ceux observés oscillent entre 0 et $7,02 \cdot 10^{-2}$ m avec une moyenne de $2,1 \cdot 10^{-2}$ m. Les biais vont de $-7 \cdot 10^{-2}$ à 0,1 m pour une moyenne de $-1,92 \cdot 10^{-2}$ m (Figure 75).

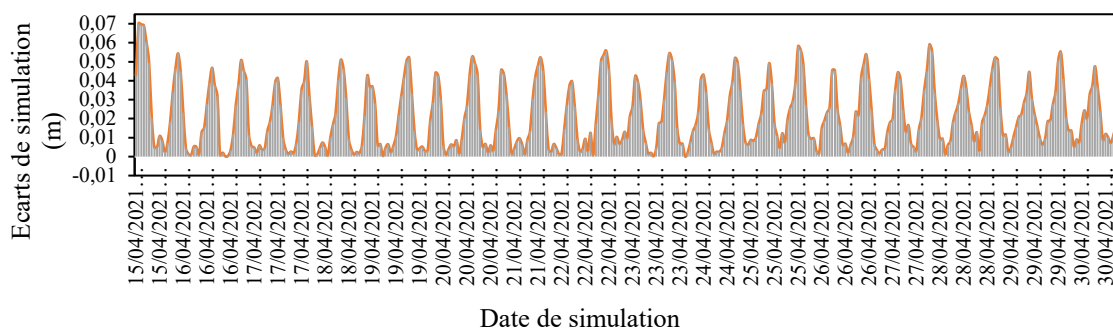


Figure 75 : Ecart entre niveaux d'eau observés et simulés

De façon générale, la différence entre les données observées et celles simulées n'est perceptible qu'au niveau des pics (Figure 76). Une performance du modèle attestée par un coefficient de Nash obtenu de 88,66 % et une RMSE de $2,7 \cdot 10^{-2}$ m. Selon le modèle, sur la période du 15 au 30 avril, le niveau d'eau à la station Aghien varie de 0,61 à 1,00 m pour un niveau d'eau moyen de $0,79 \pm 0,09$ m. Des données qui paraissent légèrement supérieures aux observations faites sur le terrain.

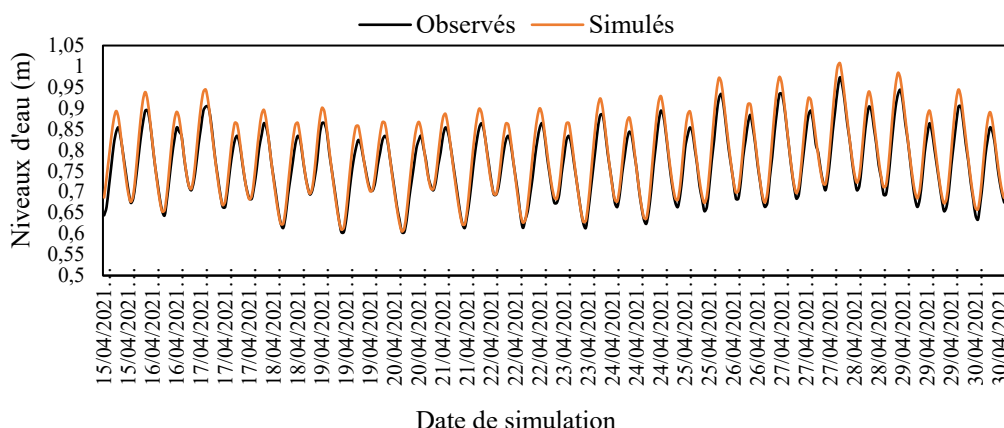


Figure 76 : Niveaux d'eau observés et simulés à Aghien

6.2.4. Dynamique de la lagune Aghien en condition d'exploitation

De l'observation graphique, aucune différence n'existe entre les niveaux d'eau actuels et ceux en période d'exploitation de la lagune (Figure 77). Ainsi, l'exploitation couplée de la rivière Mé et de la lagune Aghien n'a pas d'impact significatif sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune Aghien.

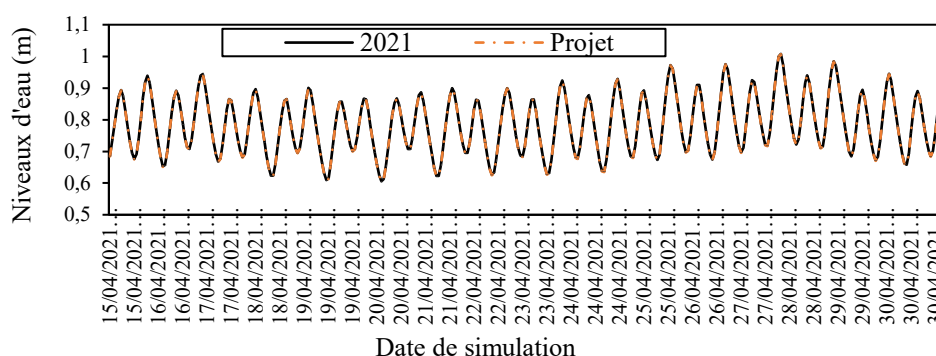


Figure 77 : Niveaux d'eau en l'absence et condition d'exploitation de la lagune Aghien

Bien que l'impact ne soit pas visible graphiquement, la différence entre les niveaux d'eau actuels et en condition d'exploitation de cette lagune révèle des écarts qui se situent entre 0,4 et 2,2 mm avec une baisse moyenne du niveau de l'eau de $1,2 \pm 0,5$ mm (Figure 78).

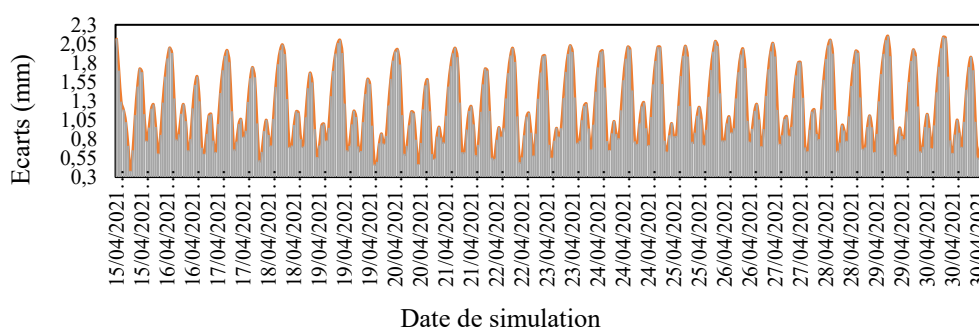


Figure 78 : Ecart entre les niveaux d'eau actuels et en condition d'exploitation

Si le pompage simultané de la rivière côtière Mé et de la lagune Aghien semble ne pas avoir un impact significatif sur le fonctionnement de cette lagune, le couplage de ces pompes aux effets des changements climatiques notamment une baisse d'environ 17 % des tributaires de cette lagune, pourrait amplifier les écarts.

6.2.5. Dynamique de la lagune Aghien à l'horizon 2070

De façon graphique, les écarts entre les niveaux de la lagune Aghien en l'absence de pression (prélèvements et baisses des apports des tributaires) ne sont pas perceptibles (Figure 79). La faiblesse des écarts montre qu'une baisse des apports des tributaires à hauteur de 17 % aurait également peu d'influence sur les niveaux de l'eau de cette lagune.

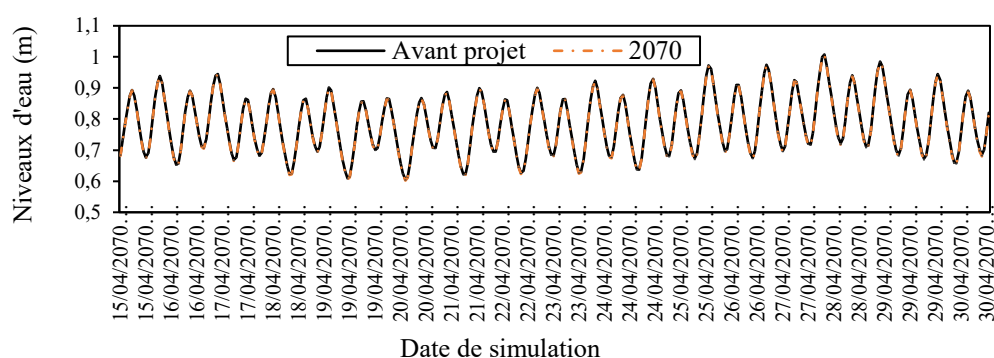


Figure 79 : Niveaux d'eau de la lagune Aghien avant le projet (2021) et en 2070

Bien qu'il ne soit pas perceptible de façon graphique, l'impact de cette baisse due aux changements climatiques sur la dynamique des écoulements de la lagune Aghien à travers une baisse de ses tributaires fluviaux existe. Cette baisse provoquerait, au niveau de la lagune Aghien, des écarts qui se situeraient entre 0,8 mm et 6,7 mm avec une moyenne de $2,8 \pm 1,3$ mm (Figure 80).

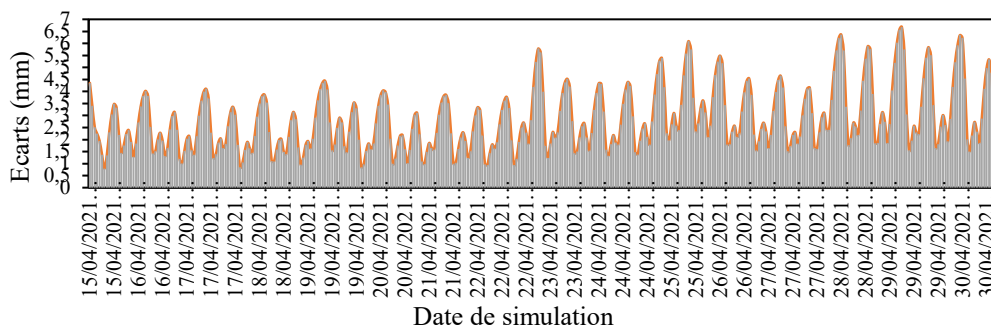


Figure 80 : Ecart dus à une baisse des apports des tributaires

Bien que la lagune soit soumise à un prélèvement de son volume et une hypothétique baisse des apports de ses tributaires, son fonctionnement hydrodynamique semble très peu influencé.

Ainsi, il est important d'évaluer l'influence de ces pressions anthropiques caractérisées par le pompage de cette lagune et de la rivière Mé sur la dynamique des sédiments.

6.3. Modèle de la dynamique sédimentaire

6.3.1. Maille du domaine

La conception du modèle hydrodynamique de la lagune Aghien pour simuler la dynamique sédimentaire a d'abord consisté à mailler le domaine. Des mailles de forme triangulaire non structurée ont été imposées comme approche (Figure 81). Pour 100 m² imposée (maille serrée) comme surface des triangles élémentaires et un angle minimal de 30°, le maillage a généré trois cent vingt-trois mille cent soixante-dix (323 170) triangles. Le nombre total de nœuds équivalents est de cent soixante-quatre mille cinquante-et-un (164 051).

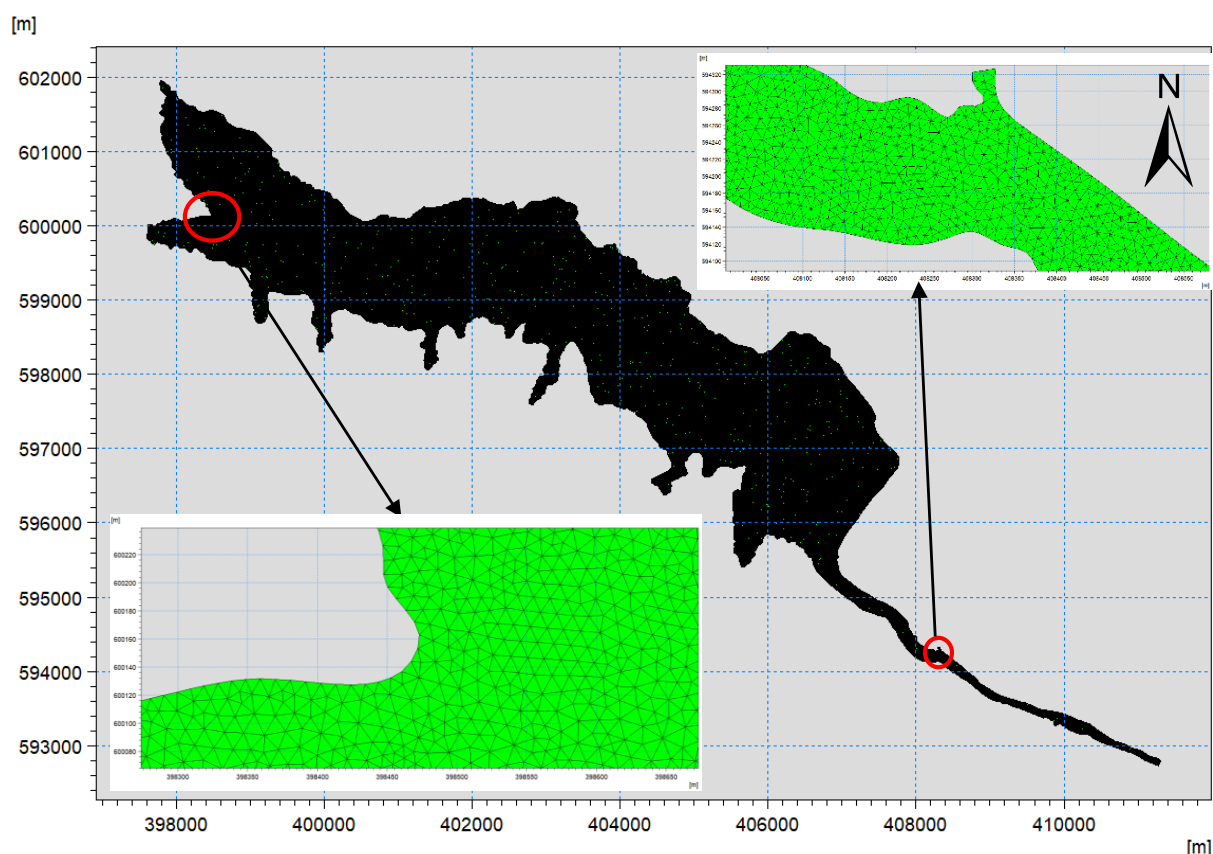


Figure 81 : Maillage de la lagune Aghien

Après le maillage du domaine, un test de sensibilité au coefficient de Manning-Strickler à travers des simulations de 24 h en faisant varier ce coefficient de 35 à 75 a été effectué. Ce test a permis de choisir un coefficient de Manning-Strickler de 60. La calibration du modèle a été effectuée sur des périodes sèche (avril 2021) et humide (juin 2021).

6.3.2. Calibration du modèle Mike 21 Flow Model FM

6.3.2.1. Période humide

La calibration sur la période humide (du 25 au 30 juin 2021) a donné les critères statistiques consignés dans le tableau XXVI.

Tableau XXVI : Paramètres statistiques de la calibration sur la période humide

Critères	r (%)	R ² (%)	NSE (%)	Ecart Max (m)	Biais (m)	RMSE (m)
Valeurs	98,66	97,33	82,60	$7,45 \cdot 10^{-2}$	$-2,88 \cdot 10^{-2}$	$3,23 \cdot 10^{-2}$

Les niveaux d'eau observés et simulés suivent les mêmes tendances. Le modèle reproduit assez fidèlement l'ensemble des données observées. Seulement 2,67 % des observations n'ont pu être parfaitement reproduites (Figure 82). Cette performance est traduite par un coefficient de corrélation de 98,66 % pour un coefficient de détermination de 97,33 %.

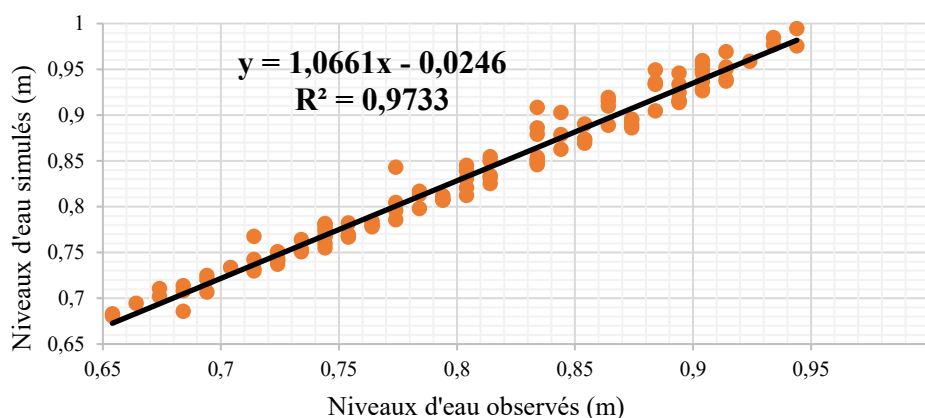


Figure 82 : Corrélation entre les niveaux d'eau observés et simulés

Les écarts entre les données observées et simulées lors de la calibration du modèle sur la période humide se situent entre 0 et $7,45 \cdot 10^{-2}$ m avec une moyenne de $6,3 \cdot 10^{-2}$ m. Les biais, quant à eux se situent entre $-7,45 \cdot 10^{-2}$ et $2 \cdot 10^{-3}$ m avec une moyenne de $-2,88 \cdot 10^{-2}$ m (Figure 83).

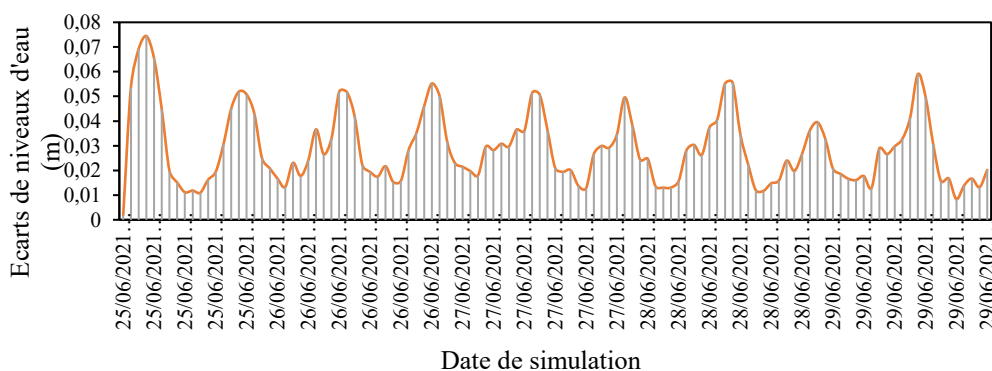


Figure 83 : Ecart entre les niveaux d'eau observés et simulés

A l'analyse de ces biais, il ressort que le modèle surestime, sur cette période, les niveaux d'eau observés. Cette surestimation est davantage ressentie au niveau des pics (Figure 84) donnant un coefficient de Nash et une RMSE respectifs de 82,60 % et $3,23 \cdot 10^{-2}$ m.

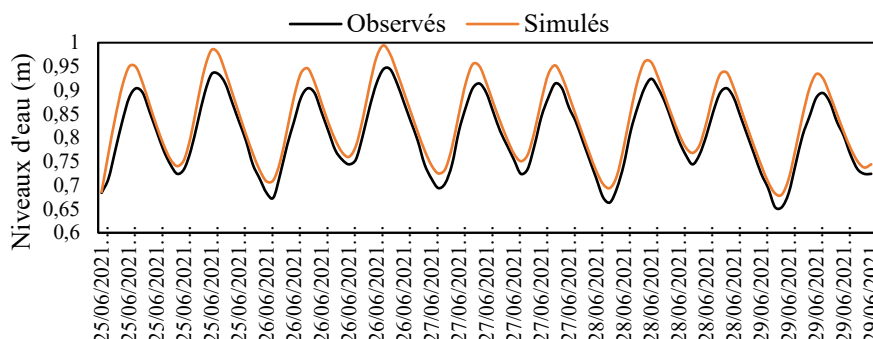


Figure 84 : Critère graphique de performance du modèle à la calibration

6.3.2.2. Période sèche

Les critères statistiques obtenus à l'issue de la calibration du modèle sur la période sèche ont donné des critères statistiques très satisfaisants (Tableau XXVII).

Tableau XXVII : Paramètres statistiques de la calibration sur la période sèche

Critères	r (%)	R ² (%)	NSE (%)	Biais (m)	Ecart max (m)	RMSE (m)
Valeurs	99,27	98,55	95,70	$4 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$

La calibration sur la période sèche a donné un coefficient de corrélation de 99,27 % pour un coefficient de détermination correspondant de 98,55 %. Ce qui démontre une très bonne relation entre les valeurs observées et celles simulées par le modèle hydrodynamique puisque seulement 1,45 % des données observées ont été mal reproduites (Figure 85).

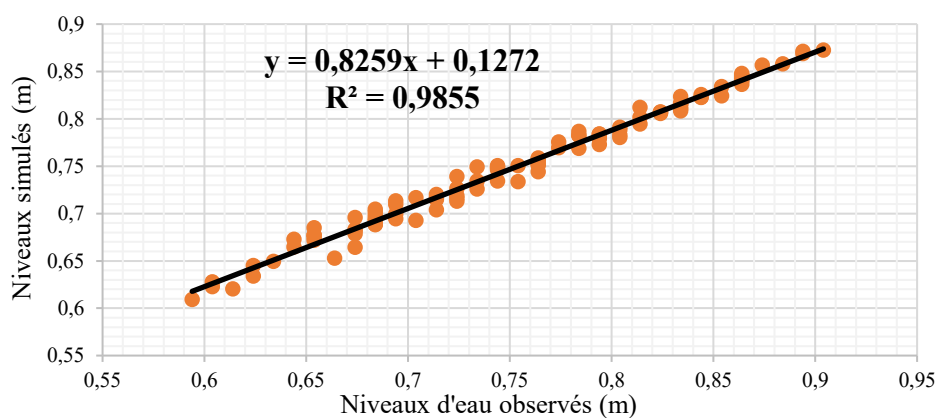


Figure 85 : Régression linéaire entre les niveaux d'eau observés et simulés

Les biais de simulation qui résultent des erreurs de simulation restent très faibles. Ils varient de -3.10^{-2} à $3,1.10^{-2}$ m pour une moyenne de 4.10^{-3} m montrant que le modèle sous-estime, lors de la simulation, les données de niveaux d'eau observés. Ces erreurs de simulation ont engendré des écarts entre les niveaux d'eau observés et simulés allant de 0 à $3,13.10^{-2}$ m avec une moyenne de $1,41.10^{-2}$ m (Figure 86).

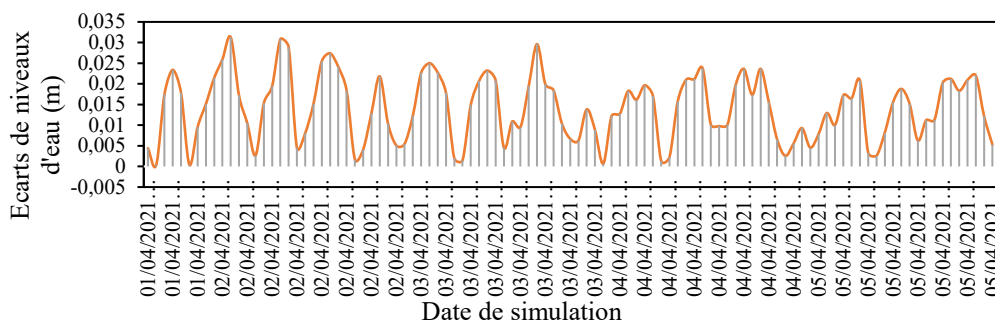


Figure 86 : Différence entre les niveaux d'eau observés et simulés

Les valeurs du coefficient de Nash et de la RMSE sont respectivement de 95,70 % et $1,62.10^{-2}$ m. Ces coefficients témoignent d'une bonne superposition des tracés des niveaux d'eau observés et simulés par le modèle à l'échelle limnimétrique Aghien (Figure 87).

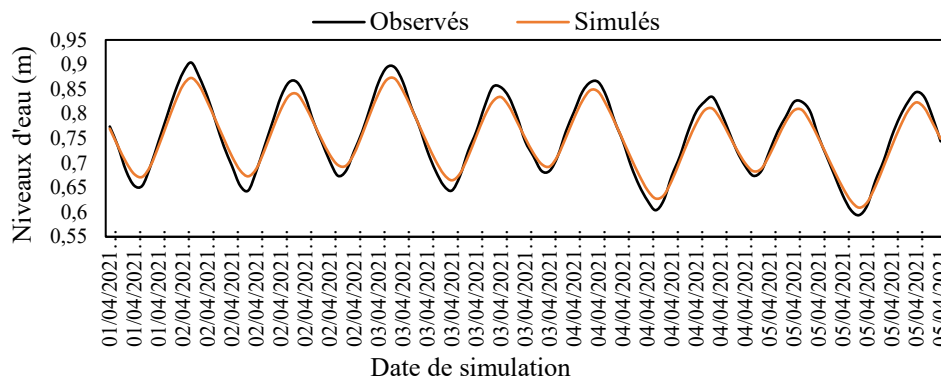


Figure 87 : Critère graphique de la performance du modèle à la calibration

A l'analyse de l'ensemble des critères (graphiques et statistiques) de la calibration du modèle sur la période sèche (avril) et humide (juin), il ressort que le modèle a pu mieux se comporter en reproduisant assez fidèlement les observations sur la période sèche que sur la période humide. Ainsi, le modèle hydrodynamique calibré sur la période sèche est utilisé pour une validation en période humide sur un temps plus important que celui de la calibration.

6.3.3. Validation du modèle hydrodynamique

Le modèle a été validé sur une période humide de dix (10) jours allant du 01 au 10 juin 2021. De la calibration à la validation, les paramètres statistiques se sont dégradés (Tableau XXVIII).

Tableau XXVIII : Paramètres statistiques de la validation sur la période humide

Critères	r (%)	R ² (%)	NSE (%)	Biais (m)	Ecart max (m)	RMSE (m)
Valeurs	98,63	97,28	90,91	$-1,92.10^{-2}$	$5,75.10^{-2}$	$2,6.10^{-2}$

Lors de la validation du modèle, le lien entre les observations et les simulations a donné une corrélation de 98,63 % pour un coefficient de détermination de 97,28 %. Ainsi, seulement 2,72 % des données observées n'ont pas été bien reproduites par le modèle sur cette période comme le montre la droite de régression linéaire (Figure 88).

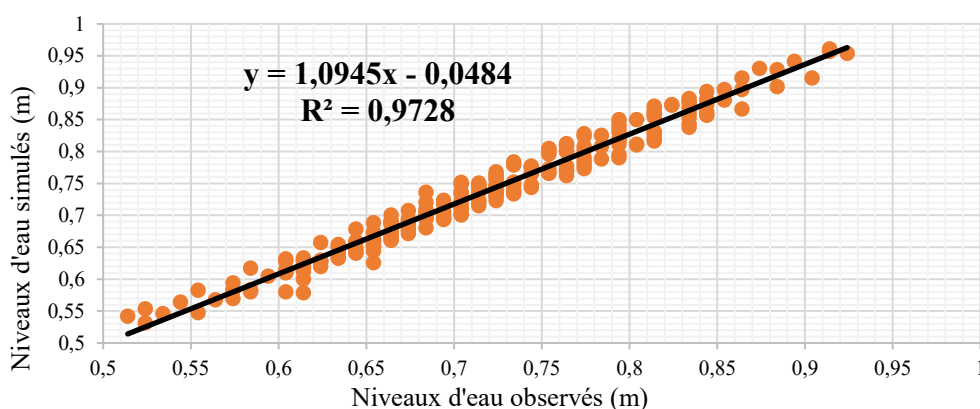


Figure 88 : Corrélation entre niveaux d'eau observés et simulés à la validation

Les biais de simulation qui ressortent de cette validation varient de -6.10^{-2} à 4.10^{-2} m avec une moyenne estimée à $-1,92.10^{-2}$ m. De façon générale, le modèle a surestimé les données observées lors de sa validation sur la période humide. Les écarts entre les niveaux d'eau observés et ceux simulés par le modèle sont perceptibles au niveau des valeurs extrêmes. Ils se situent entre 0 et 6.10^{-2} m pour une valeur maximale estimée à $5,75.10^{-2}$ m et une moyenne d'environ 2 cm (Figure 89).

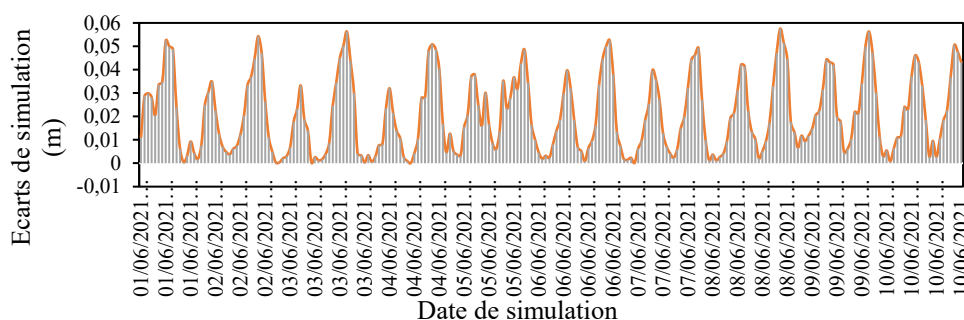


Figure 89 : Ecarts entre niveaux d'eau observés et simulés

Les écarts ainsi que les biais relativement faibles obtenus lors de la validation du modèle en période humide sont aussi traduits par une parfaite superposition des courbes des niveaux d'eau observés et simulés à la validation (Figure 90). Lors de cette simulation, le NASH obtenu entre les observations et les simulations est estimé à 90,91 % contre une RMSE de $2,6 \cdot 10^{-2}$ m.

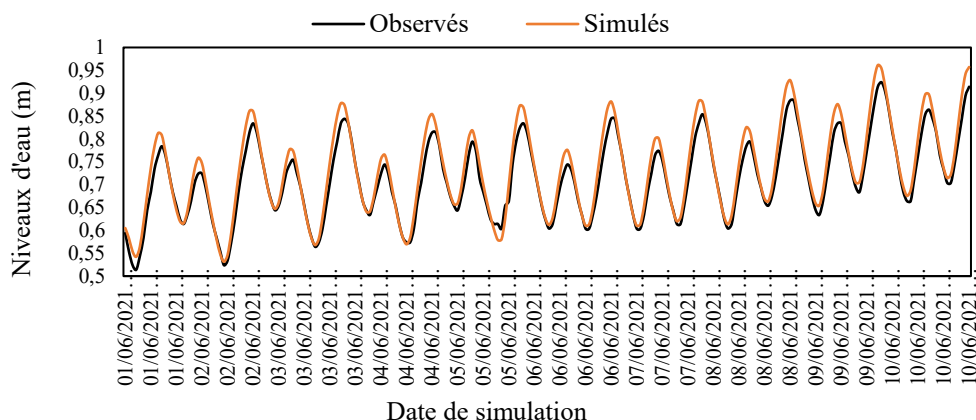


Figure 90 : Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés

Après la validation du modèle hydrodynamique, des simulations sont effectuées pour comprendre la dynamique sédimentaire de la lagune Aghien.

6.3.4. Dynamique sédimentaire en 2021

En condition actuelle (avant les activités de pompage), la simulation a mis en exergue la répartition des matières solides en suspension, les zones d'érosion, de dépôt ainsi que les épaisseurs de sédiments qui se déposeraient en période de crue.

6.3.4.1. Concentration des matières en suspension en 2021

La répartition des matières solides en suspension dans la lagune Aghien en condition actuelle a été simulée pendant 30 jours (Figure 91). Cette simulation a montré qu'à la confluence des rivières Djibi et Bété, les concentrations sont élevées. Elles atteignent $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ à la confluence de la Bété et $7 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ à la confluence de la Djibi. Dans la cuvette de la lagune, les concentrations sont élevées ($8 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$) à l'entrée sud de la lagune et au voisinage de la confluence des rivières Djibi et Bété. Les concentrations les plus faibles ($9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$) sont enregistrées dans la bande centrale de cette lagune. Au niveau du chenal, les concentrations de matières en suspension varient en fonction de la marée dynamique. En marée basse (Figure 91a), la concentration en aval de la confluence de la rivière Mé oscille entre $5 \cdot 10^{-2}$ et $8 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ contre une plage $3 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ en amont de cette confluence. En marée haute (Figure 91b), une inversion des concentrations est observée. La partie amont du chenal

enregistre des concentrations allant de 3.10^{-2} à 8.10^{-2} kg/m³. En aval, le modèle simule des concentrations comprises entre $2,4.10^{-2}$ et $3,5.10^{-2}$ kg/m³.

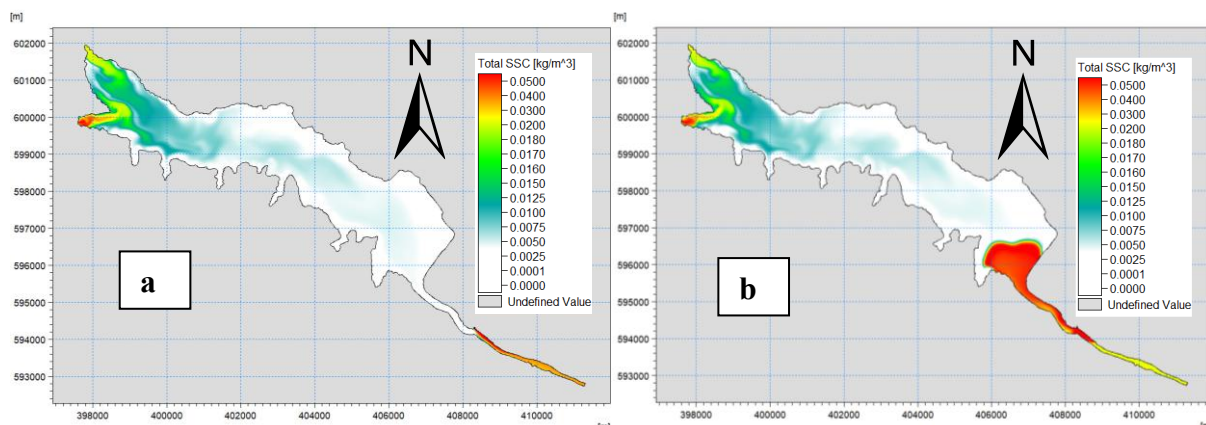


Figure 91 : Concentration de matières en suspension dans la lagune du 01 au 30 juin

a) marée basse ; b) marée haute

6.3.4.2. Dynamique du fond en 2021

Les dépôts ont lieu majoritairement dans la zone sud de la lagune et au voisinage de la confluence de la Djibi et la Bété (Figure 92). Au voisinage de la confluence de la Djibi, les épaisseurs de dépôt oscillent entre $1,0.10^{-3}$ m et $3,5.10^{-2}$ m et entre $1,0.10^{-3}$ m et $1,3.10^{-3}$ m à la confluence de la Bété. Dans la zone Sud, les épaisseurs de sédiments déposés atteignent $2,2.10^{-1}$ m. Dans la bande centrale des dépôts de sédiments dont l'épaisseur n'excède pas $7,0.10^{-3}$ m sont également simulés. A la confluence de la Djibi et la Mé ainsi que dans le chenal et à l'entrée Sud de la lagune Aghien, le modèle simule plutôt une érosion du fond. La plus forte activité érosive ($5,0.10^{-2}$ m) a lieu à la confluence de la rivière Mé, à l'entrée Sud de la lagune Aghien et à la confluence de la Djibi. Dans l'ensemble du chenal, le modèle simule une forte érosion avec des épaisseurs de sédiments arrachés allant de $-4,0.10^{-2}$ à $-5,0.10^{-2}$ m.

Au niveau de la zone de pompage, la simulation montre que les concentrations peuvent atteindre $1,5.10^{-2}$ kg/m³. Les épaisseurs de dépôt dans cette zone approchent $3,0.10^{-2}$ m, ce qui en fait l'une des zones aux taux de dépôt les plus élevés. Sur toute la période de simulation, malgré les forts apports des tributaires, aucune activité d'érosion n'est enregistrée dans cette zone.

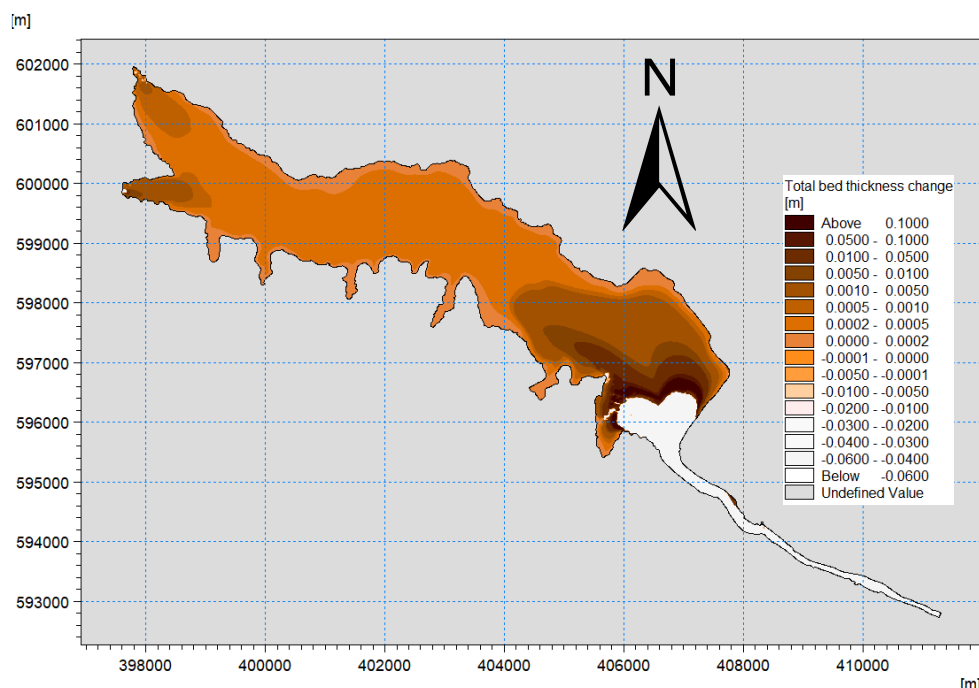


Figure 92 : Evolution du fond de la lagune Aghien et du chenal

6.3.5. Dynamique sédimentaire en 2024

Les activités d'exploitation pourraient perturber la dynamique sédimentaire dans la lagune Aghien.

6.3.5.1. Concentration des matières en suspension en 2024

Malgré les activités de pompage aussi bien dans la Mé que dans la lagune Aghien, la répartition des matières en suspension reste inchangée (Figure 93).

En marée basse (Figure 93a), les concentrations en aval de la confluence de la rivière Mé oscilleraient entre $1,0 \cdot 10^{-2}$ et $7,2 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ contre des concentrations inférieures à $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ dans le chenal en amont de cette confluence. Les concentrations de matières en suspension atteindraient $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ à la confluence de la Djibi contre seulement $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ à la confluence de la Bété. Le Nord-Ouest pourrait enregistrer des concentrations de $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$.

En marée haute (Figure 93b), les concentrations de matières en suspension restent élevées à la confluence des rivières Djibi, Bété et Mé ainsi qu'à l'entrée Sud de la lagune Aghien. Les concentrations pourraient atteindre $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ dans ces zones. Au Sud de la lagune Aghien, à la sortie du chenal, les concentrations pourraient atteindre $8,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$. En aval de la confluence de la Mé, les concentrations n'excéderont pas $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$. Dans la cuvette de la

lagune, les concentrations les plus élevées ($1,5 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$) seraient observées au Nord-Ouest dans la zone de pompage.

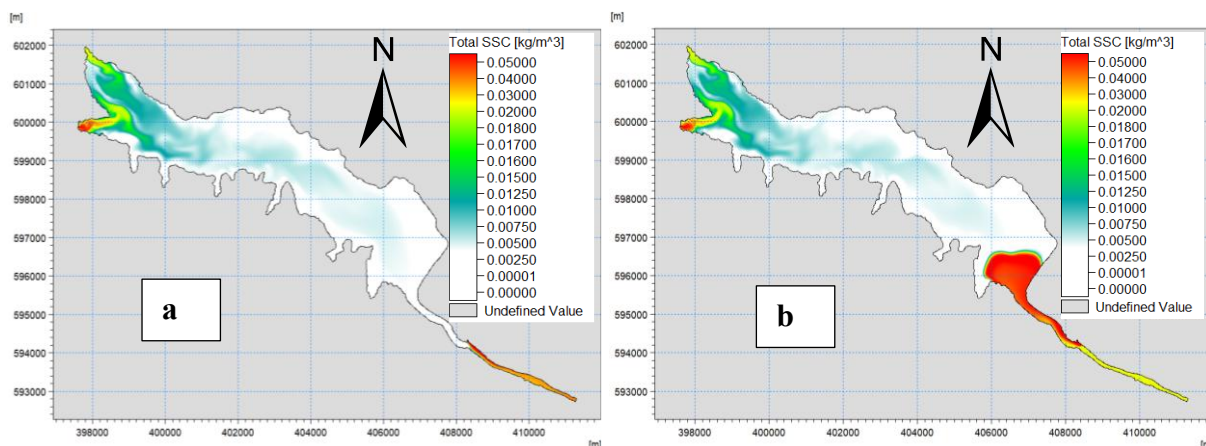


Figure 93 : Concentration de matières en suspension dans la lagune du 01 au 30 juin
a) marée basse ; b) marée haute

6.3.5.2. Dynamique du fond en 2024

Le modèle simule des activités d'érosion à la confluence des rivières Djibi, Bété et Mé ainsi que dans tout le chenal (Figure 94). A l'entrée Sud de la lagune également une forte activité d'érosion est modélisée. Les épaisseurs de sédiments arrachés pourraient atteindre $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ à la confluence de la Bété, $4,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ à la confluence de la Djibi et $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ à la confluence de la Mé. Du chenal à l'entrée Sud de la lagune, les épaisseurs de sédiments érodés varieraient de $4,0 \cdot 10^{-2}$ à $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. Hormis ces zones, dans le reste de la lagune, le modèle simule des dépôts de sédiments. Les dépôts les plus importants ont lieu au Sud de la lagune avec des épaisseurs pouvant atteindre $1,7 \cdot 10^{-1} \text{ m}$. Dans la bande centrale, les épaisseurs de dépôt n'excéderaient pas $5,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Dans la zone Nord-Ouest, les dépôts pourraient avoisiner $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

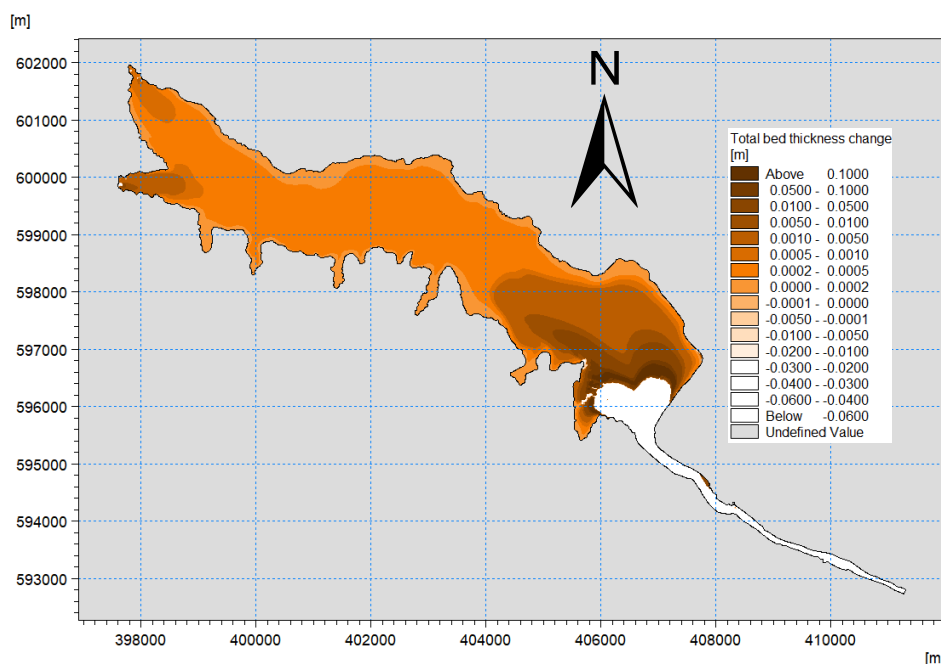


Figure 94 : Evolution du fond de la lagune Aghien et du chenal

6.3.5.3. Dynamique au niveau de la zone de pompage

De façon générale, l'exploitation de la lagune et de la rivière côtière Mé impacte la dynamique des sédiments de la lagune Aghien (Tableau XXIX). Avec les pompages, les concentrations moyennes de matières solides en moyenne dans la zone de pompage passeront de $1,17.10^{-2} \pm 3,5.10^{-3} \text{ kg/m}^3$ avant l'exploitation de la lagune à $1,16.10^{-2} \pm 3,4.10^{-3} \text{ kg/m}^3$ pendant l'exploitation de cette lagune. L'accumulation moyenne de sédiments au fond de cette zone de pompage au m^2 estimée avant exploitation à $104,09 \pm 28,08 \text{ g/m}^2$ y serait de $99,94 \pm 26,77 \text{ g/m}^2$ pendant l'exploitation de cette lagune. Les épaisseurs moyennes de dépôt correspondant passeraient de $0,23 \pm 0,06 \text{ mm}$ à $0,22 \pm 5,9.10^{-2} \text{ mm}$.

Tableau XXIX : Evolution de la concentration et des épaisseurs de dépôt dans la lagune Aghien

	Concentration (kg/m^3)		Dépôt (g/m^2)		Epaisseur de dépôt (mm)	
	Avant	Pendant	Avant	Pendant	Avant	Pendant
Minima	$5,6.10^{-3}$	$5,1.10^{-3}$	60,08	60,07	$1,3.10^{-1}$	$1,3.10^{-1}$
Maxima	2.10^{-2}	$1,9.10^{-2}$	148,57	146,59	$3,3.10^{-1}$	$3,3.10^{-1}$
Moyenne	$1,17.10^{-2}$	$1,16.10^{-2}$	104,09	99,94	$2,3.10^{-1}$	$2,2.10^{-1}$
Ecartype	$3,5.10^{-3}$	$3,4.10^{-3}$	28,06	26,77	6.10^{-2}	$5,9.10^{-2}$

Au niveau de la zone de pompage, l'on enregistrera une baisse des dépôts de sédiments.

Discussion

Cette partie a porté sur la conception d'un modèle du fonctionnement hydrodynamique et sédimentaire de la lagune Aghien. Elle a consisté, d'abord à travers une première modélisation, à comprendre le comportement actuel des masses d'eau de cette lagune et la dynamique des particules solides qui y sont en suspension. Ensuite, une seconde modélisation avec intégration des prélèvements et de la baisse des apports fluviaux liés aux changements climatiques a été effectuée en vue d'évaluer l'influence de ces pressions sur la dynamique hydro-sédimentaire de la lagune.

Le test de sensibilité du modèle hydrodynamique a permis d'adopter $85 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ comme coefficient de rugosité de Strickler. Ce coefficient a donné les meilleurs critères graphiques et statistiques comparativement aux observations sur le terrain. La présence de sables moyens et grossiers par endroits dans le fond de la lagune Aghien pourrait expliquer les meilleurs résultats obtenus avec ce coefficient. Cependant, de la calibration à la validation du modèle hydrodynamique, les coefficients de corrélation et de détermination sont passés respectivement de 95,8 % et 91,8 % à la calibration à 93,5 % et 87,5 % à la validation. Le coefficient de Nash et la RMSE sont passés de 73,7 % et 4.10^{-2} m à la calibration à 76,22 % et $3,9.10^{-2} \text{ m}$ à la validation. Cette quasi constance de ces paramètres en doublant le pas de temps montre que la fiabilité et la stabilité du modèle restent indépendants du pas de temps de calcul. Cet état de fait est justifié par des biais relativement faibles de $-3,4.10^{-2} \text{ m}$ et $2,7.10^{-3} \text{ m}$ obtenus respectivement avec des pas de temps de 2 et 4 secondes. Ainsi, le modèle a été validé avec des écarts entre les observations et les prédictions dont le maximal est de $9,1.10^{-2} \text{ m}$ à la calibration et de $8,5.10^{-2} \text{ m}$ à la validation. Ces écarts peuvent également s'expliquer d'une part par les variations spatiales de la rugosité du fond lagunaire (Wango *et al.*, 2011). En effet, le fond de la lagune Aghien contient des sédiments de sables et de vases de rugosité différente. Donc, le choix d'un coefficient de rugosité uniforme dans tout le domaine à modéliser lors de ce travail pourrait être à l'origine de ces écarts de comparaisons.

La simulation de la dynamique des masses d'eau de la lagune Aghien à l'aide du modèle validé a montré que les pompages simultanés de la lagune Aghien et de la rivière Mé baissent le niveau global des masses d'eau dans la lagune Aghien au plus de 2,2 mm. Cependant, avec la baisse projetée des apports des tributaires, notamment la Djibi, la Bété et la Mé, la baisse pourrait atteindre un peu plus de 6,7 mm. La faible influence des activités de pompage dans la Mé et la lagune Aghien sur la dynamique de cette dernière serait due au fait que les volumes pompés ne représentent qu'une infime partie des apports de ces deux sources d'eau. En effet, le volume

pompé par seconde dans la rivière Mé ne représenterait que 1,8 à 44 % des apports de cette rivière par seconde. De plus, le volume prélevé dans la lagune Aghien ne représenterait à son tour que 6,3 à 36,7 % des apports cumulés de la Djibi et de la Bété par seconde. Par ailleurs, ces prélèvements seraient compensés par les remontées marines ; ce qui justifierait la faible influence de ces activités de pompage sur la dynamique de la lagune Aghien.

Concernant la dynamique sédimentaire dans la lagune, la simulation a mis en exergue les zones de dépôt et d'érosion. Les dépôts de sédiments ont lieu majoritairement à la confluence des rivières Djibi, Bété et Mé et à l'entrée de la lagune Aghien près du chenal. Ils ont donc lieu dans des zones de changement de section. Plus la section devient large, moins le courant est important ce qui permet l'agglutination des particules en suspension pour former des floes (Migniot, 1983) de masses plus importantes. Sous l'action de leurs poids, ces floes se déposent par décantation (Krone, 1962 ; Sanchez & Delanoë, 2000 ; Tattersall *et al.*, 2003). Quant aux activités d'érosion, elles ont particulièrement lieu dans le chenal, à la confluence de la Mé et à l'entrée sud de la lagune Aghien. Dans ces endroits, les épaisseurs d'érosion avoisinent 5.10^{-2} m. Cette forte intensité érosive serait due à la forte vitesse des écoulements dans cette zone. De plus, le changement brusque de la direction des écoulements dû aux remontées des eaux marines pourrait engendrer des turbulences dans le fond qui seraient à l'origine de l'érosion simulée.

Le modèle a montré que les activités de pompage dans la lagune Aghien et la rivière Mé feraient baisser les concentrations de matières en suspension, les masses et épaisseurs de dépôt de sédiments dans la lagune Aghien notamment dans la zone de pompage. La masse de dépôt par m^2 dans la zone de pompage passerait de $104,09 \pm 28,08 \text{ g/m}^2$ à $99,94 \pm 26,77 \text{ g/m}^2$ soit une baisse d'environ $4,15 \text{ g/m}^2$. Cette baisse serait liée à la baisse des apports de la Mé du fait des pompages. En effet, les apports solides sont fonction des apports liquides, plus les débits sont élevés et plus les apports solides sont importants. Ainsi, le prélèvement d'eau dans la rivière Mé réduit les apports de matières en suspension.

Conclusion partielle

Pour pouvoir modéliser le fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune Aghien, les données manquantes au niveau de la lagune Potou en aval ont été reconstituées. Ces données utilisées en condition aux limites aval ont permis de valider le modèle sur la période humide avec un biais de $1,92.10^{-2} \text{ m}$ et une RMSE $2,6.10^{-2} \text{ m}$ comparativement aux niveaux d'eau observés au niveau de la lagune Aghien.

La simulation de la dynamique des masses d'eau de la lagune a révélé que l'exploitation simultanée de cette lagune et de la Mé entrainerait une baisse du niveau de l'eau allant de 0,38 mm à 2,2 mm avec une moyenne de $1,2 \pm 0,5$ mm. Une réduction des apports des tributaires entraîne une baisse du niveau de la lagune Aghien qui se situerait entre 0,8 mm et 6,7 mm, avec une moyenne de $2,8 \pm 1,3$ mm.

Concernant la dispersion des sédiments et l'évolution de la morphologie du fond lagunaire, les simulations ont montré que dans la cuvette de la lagune, les dépôts ont majoritairement lieu au Sud et à la confluence de la rivière Djibi. Les dépôts ont également lieu dans la bande centrale de la lagune et dans la zone de pompage mais en très faible quantité ($< 105 \text{ g/m}^2$). L'influence des activités d'exploitation de la Mé et de la lagune auront pour conséquence une baisse moyenne des dépôts d'environ $4,15 \pm 1,3 \text{ g/m}^2$ au niveau de la zone de prise.

De façon générale, l'influence de l'exploitation de la lagune Aghien et de la rivière Mé couplée à une baisse des apports des tributaires continentaux sur la dynamique hydro-sédimentaire de la lagune Aghien se résumerait à une baisse moyenne d'environ $2,8 \pm 1,3$ mm du niveau d'eau et $4,15 \pm 1,3 \text{ g/m}^2$ des dépôts solides dans la zone de pompage.

CHAPITRE 7 : INFLUENCE DES PRESSIONS ANTHROPIQUES ET DES VARIATIONS DE LA MAREE SUR LA DYNAMIQUE DE LA SALINITE DANS LA LAGUNE AGHIEN

La dynamique de deux types de pollution (naturel (salinité) et anthropique (hypothétique)) a été évaluée à ce niveau.

7.1. Dynamique de diffusion de la salinité

La dynamique de diffusion de la salinité des tributaires de la lagune Aghien est évaluée en période des basses eaux (avril-mai) pendant quinze (15) jours. D'abord, avant l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé en 2021. Ensuite, après l'ouverture de cette embouchure en 2024. Enfin, à l'horizon 2070 suivant les scénarii RCP8.5 et SSP5-8.5.

7.1.1. Dynamique de diffusion en 2021

Les résultats montrent que la salinité de la lagune varie d'une zone à une autre entre 0,0 et 0,2 PSU en période d'étiage avant l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé (Figure 95). Les masses d'eau à fort taux de sel sont celles en provenance de la rivière Djibi (Figure 95a). Dans le chenal, en marée basse, la salinité est approximativement égale à 0,0 PSU en aval de la confluence de la Mé contre 0,02 PSU en amont de cette confluence. Cependant, sous l'influence de la marée dynamique, les taux de sel dans le chenal atteint 0,1 PSU. Pendant ce temps, la salinité reste inférieure 0,1 PSU dans la zone Sud de la lagune jusqu'à la zone de pompage. Au voisinage de la confluence de la Djibi, elle atteint 0,18 PSU (Figure 95b).

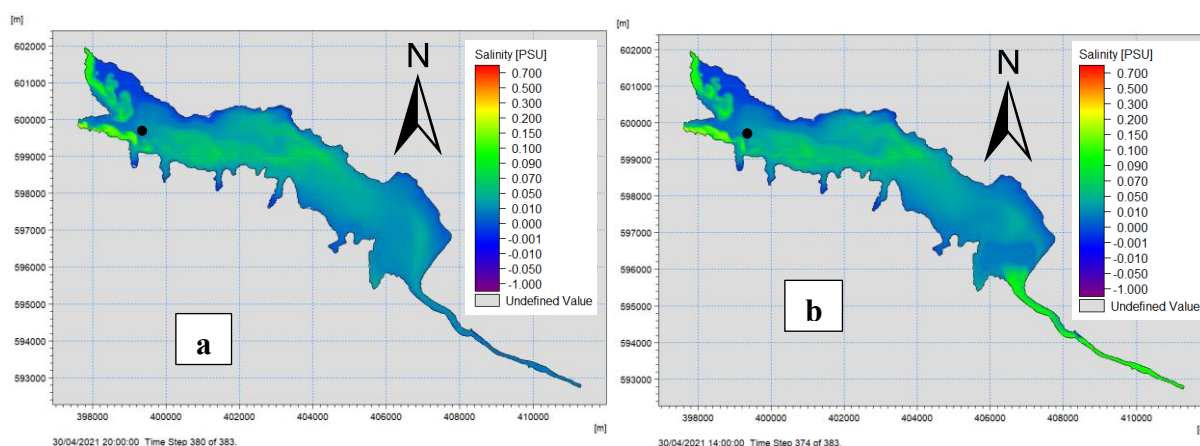


Figure 95 : Dispersion de la salinité dans la lagune Aghien

a) marée basse ; b) marée haute

Lorsque l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam est fermée, la salinité de la lagune Aghien varie globalement de 0,0 à 0,2 PSU en fonction de la position des différentes masses d'eau.

7.1.2. Dynamique de diffusion en 2024

Après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé, la salinité dans la lagune Aghien en période d'étiage connaît un changement remarquable (Figure 96).

En marée basse (figure 96a), la salinité varie au niveau du chenal entre 0,0 PSU et 0,15 PSU. La zone en aval de la confluence de la Mé enregistre les plus faibles taux de sels ($\leq 0,06$ PSU) et celle en amont les plus forts taux ($[0,06 \text{ PSU} ; 0,15 \text{ PSU}]$). Dans la cuvette de la lagune, durant cette période, les masses d'eau présentent sensiblement le même taux de sel (0,15 PSU). Cependant, à la confluence de la Djibi la salinité atteint 0,2 PSU.

En marée haute (Figure 96b), le taux de sel dans le chenal atteint 0,22 PSU en aval de la confluence de la rivière côtière Mé contre 0,20 PSU en amont de cette confluence. A l'entrée Sud de la lagune, une bulle constituée de masses d'eau en provenance de la Mé se forme avec une salinité inférieure à 0,1 PSU. Au-delà de cette zone, la salinité dans la cuvette de la lagune reste identique à celle de la période des basses eaux.

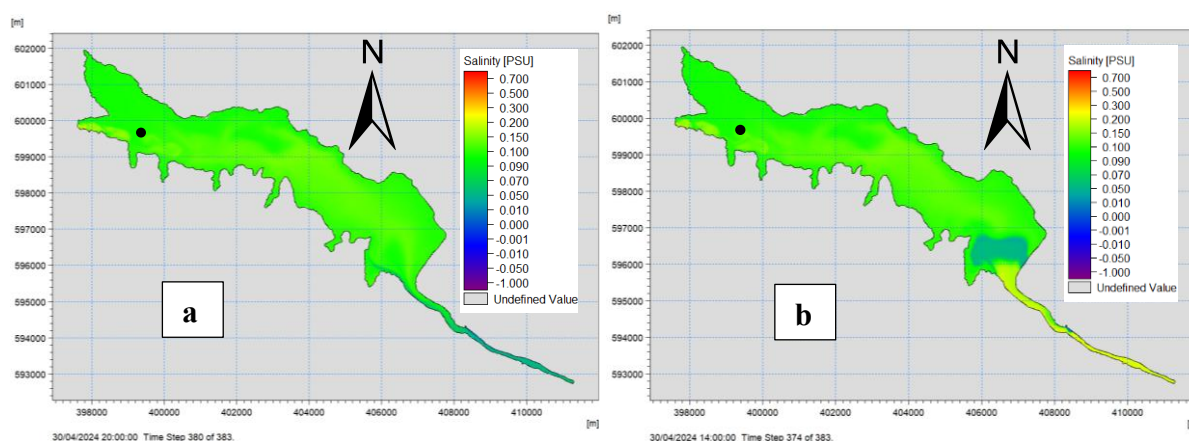


Figure 96 : Salinité de la lagune Aghien après l'ouverture de l'embouchure de la Comoé

a) marée basse ; b) marée haute

7.1.3. Dynamique de diffusion en 2025

En considérant les mesures de salinité faites sur la période allant du 20 avril au 10 mai 2025 en condition aux limites, on constate que la diffusion de la salinité dans la lagune Aghien en provenance de la marée dynamique se fait assez lentement.

Après une heure (1 h) de parcours, les masses d'eau salées, en provenance de la marée dynamique se propage dans tout le chenal qui relie les lagunes Aghien et Potou avec des concentrations en sel marin allant de 9 PSU à 12.6 PSU par endroit (Figure 97).

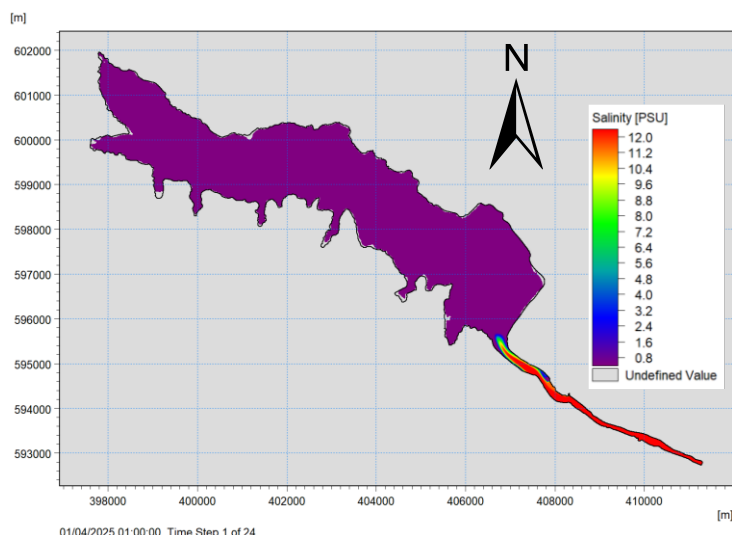


Figure 97 : Diffusion de la salinité après un temps de 1h

Après vingt-quatre heures (24 h) de diffusion, les masses d'eau salées colonisent toute la bande centrale de la lagune Aghien. A ce moment, leur concentration atteint 5 PSU dans cette partie de la lagune. A cet instant précis, la salinité dans les zones périphériques se situe autour de 1 PSU (Figure 98a). Cependant, il faudra un peu plus de 17 jours (soit 426 heures) pour que la salinité atteigne la zone des pompages avec une concentration de seulement 0,5 PSU. Après 21 jours de diffusion, la salinité s'accule dans la zone de pompage atteignant 1,6 PSU et 3,0 PSU dans la zone de bas fond (Figure 98b).

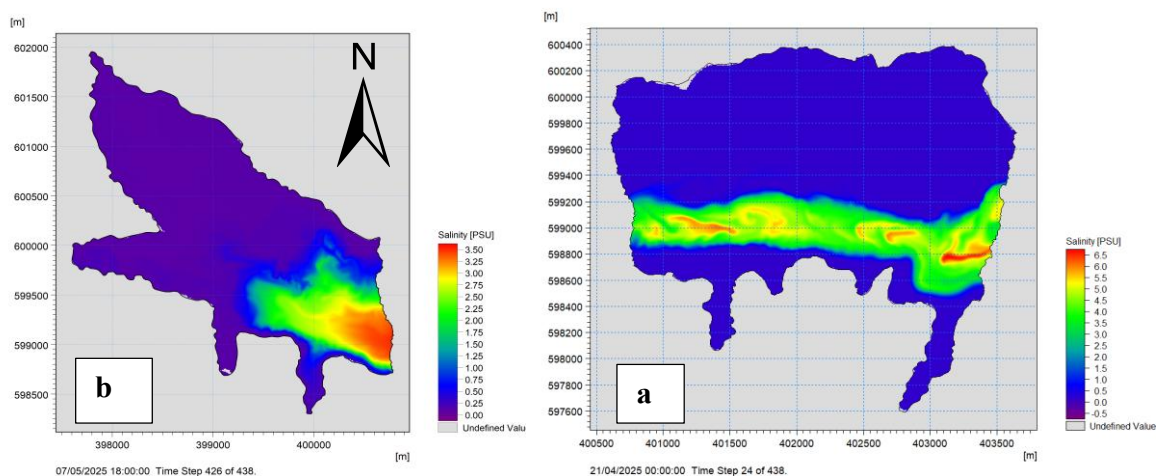


Figure 98 : Diffusion de la salinité dans les zones Centre et Nord de la lagune Aghien

a) zone Centre ; b) zone Nord

L'analyse de la concentration de la salinité en allant de la lagune Potou à la zone des pompages dans la lagune Aghien a permis l'obtention d'un modèle exponentiel pour la prédiction de la salinité dans la zone des pompages à partir des observations plus aval en saison sèche et pluvieuse (Figure 99).

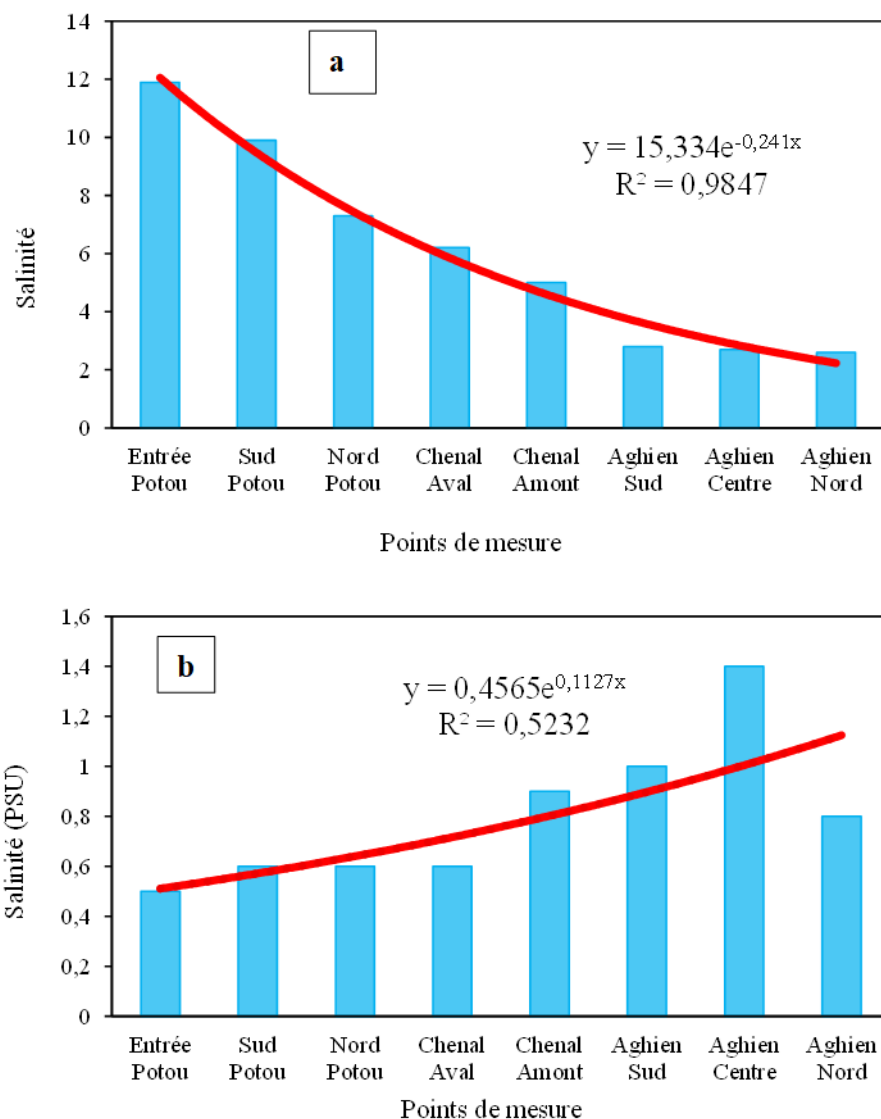


Figure 99 : Modèle de dilution de la salinité

a) saison sèche ; b) saison pluvieuse

A l'horizon 2070 avec la baisse projetée des apports des tributaires et la montée du niveau marin, la salinité de la lagune Aghien pourrait connaître une nette variation.

7.1.4. Dynamique de diffusion en 2070

L'effet, sur la salinité de la lagune Aghien, des variations de la marée dynamique et de la baisse des apports fluviaux due au changement climatique est mis en exergue ici en période des basses

eaux à travers une modélisation de la dynamique de diffusion de la salinité à l'horizon 2070 suivant le scénario SSP5-8.5 basée sur les mesures faites en avril 2024.

En marée basse, dans le chenal, le taux de salinité n'excéderait pas 0,4 PSU et avoisinerait 0,0 PSU à la confluence de la rivière Mé (Figure 100a). De la zone Sud jusqu'à la confluence de la Bété, la salinité pourrait varier de 0,10 à 0,45 PSU. Autour de la pompe, la salinité serait de 0,15 PSU. Les taux de salinité les plus élevés sont enregistrés de l'entrée Sud jusqu'à la bande centrale où les profondeurs dépassent 5 m. En marée haute (Figure 100b) la salinité pourrait atteindre 1,0 PSU en aval de la confluence de la rivière Mé contre 0,8 PSU en amont de cette confluence. Dans la cuvette de la lagune, le taux de salinité serait sensiblement le même qu'en marée basse.

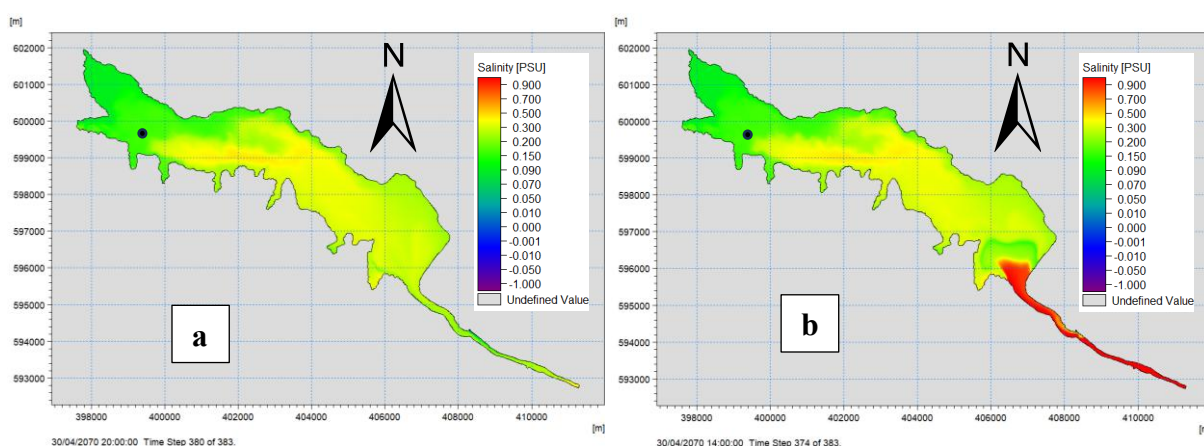


Figure 100 : Salinité de la lagune en 2070 en période de crue suivant le scénario SSP5-8.5

a) marée basse ; b) marée haute

Par la modélisation de la dynamique de diffusion de la salinité en fonction des variations de la marée dynamique, nous avons mis en exergue l'influence de l'ouverture de l'embouchure de la Comoé à Grand Bassam et de l'élévation du niveau marin à l'horizon 2070 sur la salinité de la lagune Aghien en nous référant aux mesures faites en avril 2024.

7.2. Dynamique de diffusion d'un polluant anthropique

Le suivi du parcours et de la concentration d'un polluant hypothétique et miscible à l'eau déversé accidentellement dans la rivière Djibi a permis d'évaluer la dispersion de ce type de polluant dans la lagune Aghien en période d'étiage et de crue.

7.2.1. En période d'étiage

En période d'étiage, vingt-quatre heures (24 h) après son rejet, le polluant recouvre l'ensemble des masses d'eau à proximité de la confluence de la rivière Djibi avec une concentration

beaucoup plus diluée (101a). Dans cette zone, la concentration du polluant n'excède pas 50 kg/m^3 (Figure 101b). Après une durée de 3 jours, le panache de pollution atteint la zone de pompage avec une concentration pouvant atteindre 25 kg/m^3 (Figure 101c). Cinq (5) jours après son rejet, le panache recouvre la quasi-totalité des masses d'eau de la zone de prise d'eau avec une concentration pouvant atteindre 10 kg/m^3 (Figure 101d). En sept (7) jours de trajet, le panache atteint la berge nord de la lagune avec une concentration cependant plus faible ($<10 \text{ kg/m}^3$) que celle qu'on enregistre au cinquième jour (Figure 101e). Au dixième (10^{ième}) jour, le cortège de pollution parvient à la berge nord. A cet instant, sa concentration dans la zone de pompage est inférieure à 3 kg/m^3 contre près de 4 kg/m^3 près de la berge nord (Figure 101f).

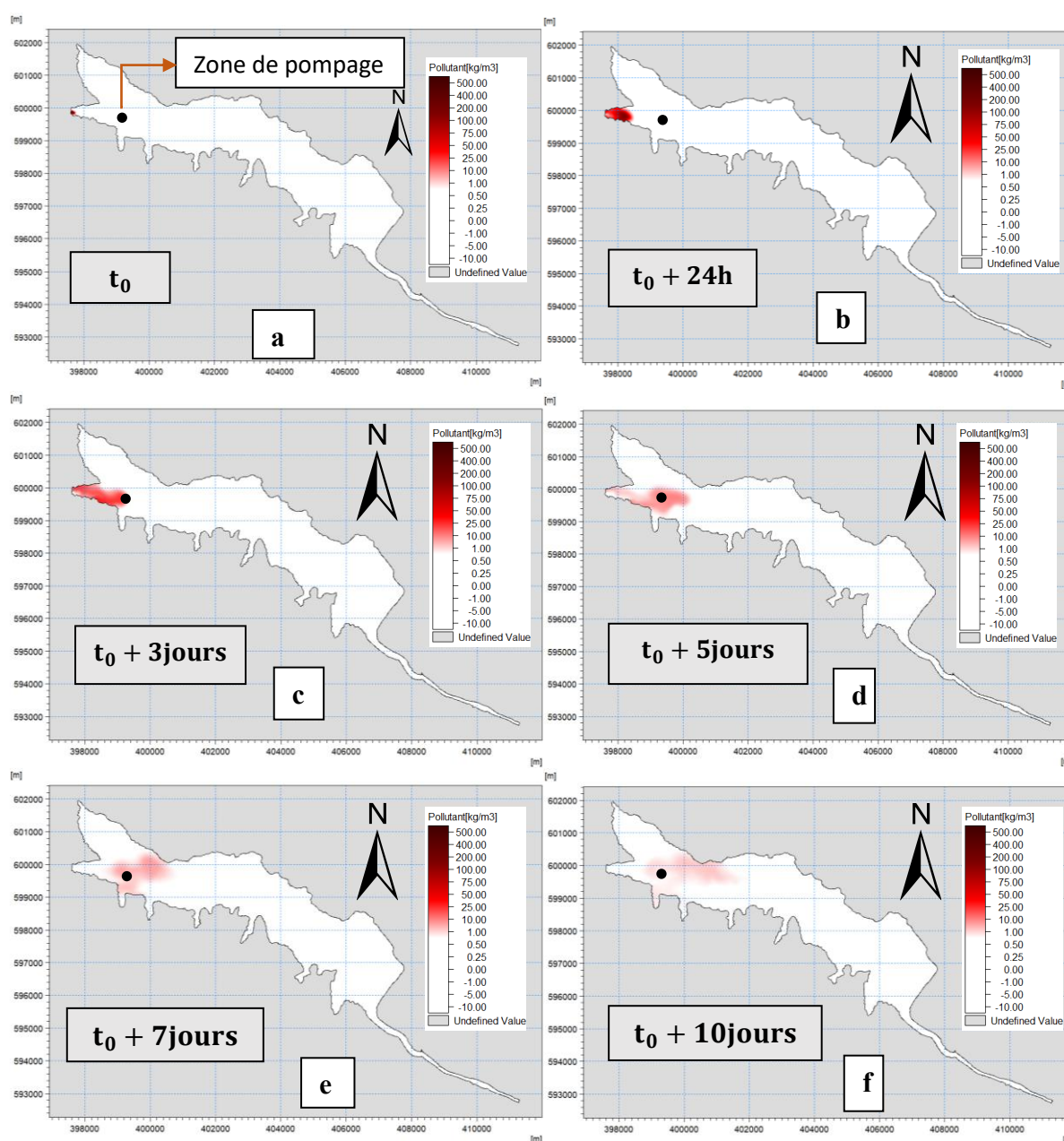


Figure 101 : Evolution du polluant déversé dans la rivière Djibi en période d'étiage

7.2.2. En période de crue

En période de crue, où les précipitations sont intenses et les écoulements plus rapides, la durée du trajet du polluant du point de rejet à la zone des pompages est largement modifiée par rapport à saison sèche (Figure 102). 24 heures après le rejet du polluant, il recouvre toute la confluence de la rivière Djibi avec une concentration pouvant atteindre 150 kg/m^3 (Figure 102b). Après un peu plus de deux jours (55h) de trajet, le polluant parvient à la zone de captage avec une concentration avoisinant 30 kg/m^3 (Figure 102c). Au cinquième (5^{ième}) jour, le polluant se repend dans toute la zone de pompage (Figure 103d). Il se repend dans la partie nord de la lagune au dixième (10^{ième}) jour. Sa concentration au niveau de la zone de pompage à cet instant ne dépasse pas les 1 kg/m^3 (Figure 102e). Quinze (15) jours après le rejet, le panache de pollution arrive dans la bande centrale de la lagune avec une concentration maximale de 1 kg/m^3 . A cette date, au niveau de la zone de pompage, la concentration n'atteint plus $0,4 \text{ kg/m}^3$ (Figure 102f).

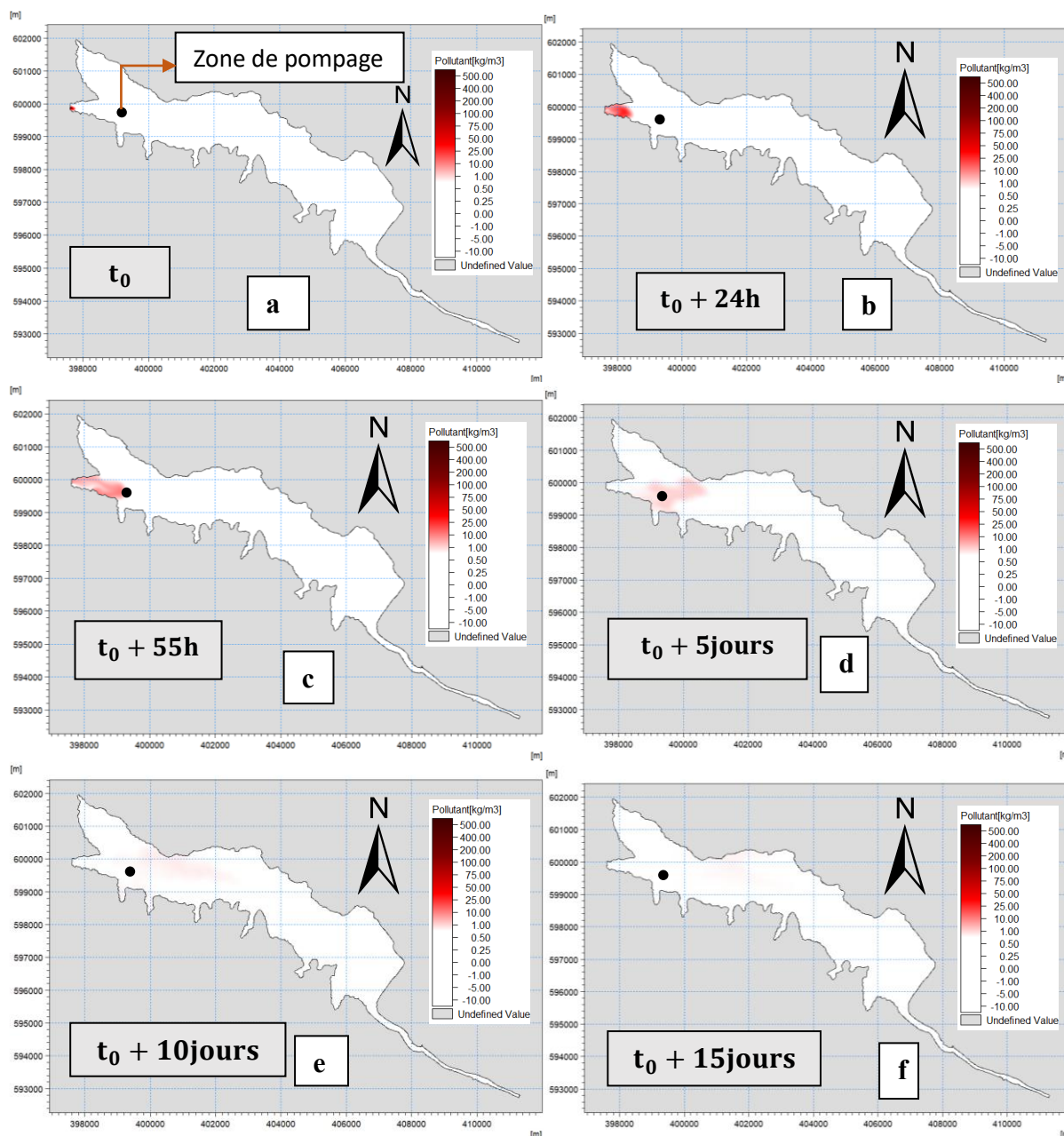


Figure 102 : Evolution du polluant déversé dans la rivière Djibi en période de crue

De façon générale, la durée du trajet du polluant évolue en fonction des apports des tributaires. Il faudrait trois (3) jours (72 heures) en période d'étiage contre seulement 55 heures en période de crue pour parvenir à la zone de pompage. Après un séjour d'environ deux (2) semaines au cours duquel sa concentration descend en dessous de $0,5 \text{ kg/m}^3$ en période de crue, le panache de pollution se reprend dans la bande centrale de la lagune.

Discussion

La simulation de la diffusion de la salinité dans la lagune avant l'ouverture de l'embouchure de la Comoé a montré que dans la zone de prise d'eau, la salinité peut atteindre 0,2 PSU contre

0,16 PSU dans la bande centrale et au Sud de la lagune près du chenal. Dans le chenal en marée haute, la salinité atteint 0,2 PSU en aval de la confluence de la rivière Mé contre seulement 0,1 PSU en amont de cette confluence. Ces résultats obtenus avec le modèle corroborent les mesures faites sur le terrain pendant cette période sèche avant l'ouverture de l'embouchure.

L'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam couplée aux pompages dans la Mé a pour conséquence une élévation de la salinité dans la lagune Aghien. En prenant comme condition aux limites aval de 1 PSU (conformément aux mesures faites avril 2024), en marée basse, la salinité dans le chenal passe de 0,0 PSU avant l'ouverture de l'embouchure à 0,15 PSU après l'ouverture. En marée haute c'est une augmentation de 0,12 PSU qui est enregistrée dans le chenal. Au niveau de la cuvette de la lagune Aghien, l'augmentation de la salinité est d'environ 0,1 PSU. A l'horizon 2070, l'augmentation du niveau marin suivant le scénario SSP5-8.5, en prenant pour référence les mesures faites en avril 2024, ferait passer la salinité dans la lagune de 0,15 PSU en 2024 à 0,45 PSU en 2070. Cependant, cette augmentation de la salinité connaît une décroissance du chenal à la confluence de la rivière Bété. La décroissance de la salinité de l'aval vers l'amont de la lagune serait due à la dilution de ces apports par les eaux de la Mé (0,0 PSU) avant leur déversement dans la lagune Aghien. Ces variations restent cependant faibles comparativement à celle des zones proches de l'embouchure de la Comoé où les végétaux aquatiques ont été asséchés par l'augmentation brutale de la salinité (Annexe 10 et 11). Les variations de la salinité dans la lagune Aghien avant et après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé restent largement différentes de celles observées par Albaret & Ecourtin (1991). En effet, les mesures effectuées par ces auteurs avant (1986) et après (1990) l'ouverture du grau de Grand Bassam ont montré que la salinité est passée respectivement de 0,0 ‰ avant l'ouverture à 1 ‰ après l'ouverture. Cette différence variationnelle de la salinité entre 1991 et 2024 pourrait s'expliquer par un accroissement des volumes d'apport d'eau douce de la Mé et de la Comoé favorisé par l'imperméabilisation des sols due à l'urbanisation et à la dégradation du couvert végétal (Danumah *et al.*, 2016 ; Diallo *et al.*, 2018 ; FAO, 2024). A l'horizon 2070, en prenant pour référence les mesures faites en avril 2024, malgré l'élévation du niveau marin d'environ 50 cm, le modèle simule une augmentation relativement faible de la salinité dans la lagune Aghien. Cette faible variation serait due à la situation géographique de la lagune Aghien relativement éloignée de l'Atlantique et des apports importants de la Comoé. En effet, Ross *et al.* (2015) ont montré, par l'utilisation du modèle de Savenije (1993) et des mesures directes *in situ*, que l'influence de la salinité des remontées marines dans un estuaire diminue au fur à mesure que l'on s'éloigne du point d'entrée de ces remontées. En outre, les

apports en eau douce de la Comoé permettent une dilution des remontées marines ce qui justifierait la réduction de la salinité des eaux en aval de la lagune Potou caractérisée par une végétation restée verte (Annexe 11). Par ailleurs, des études menées à travers le monde ont montré que l'influence de l'élévation du niveau de la mer sur la salinité des estuaires et lagunes est fonction de la position géographique de ces étendues d'eau. Dans la baie de Chesapeake, Hilton *et al.* (2008) ont montré que la sensibilité de la salinité se situe entre 2 et 7 par mètre d'élévation du niveau de la mer. Pour Ross *et al.* (2015), dans l'estuaire de Delaware, cette sensibilité va de 2,5 à 4,4 par mètre d'élévation du niveau marin. De même, grâce à un modèle 3D, Hong & Shen (2012) ont prouvé que la salinité moyenne de la baie de Chesapeake augmenterait de 1,2 à 2,0 pour une élévation du niveau de la mer de 1 m. Pour Rice *et al.* (2012), une hausse du niveau de la mer à hauteur de 1 m augmenterait la salinité de la rivière James de près de 10 %. Cependant, du Sud au Nord de la lagune Aghien, une baisse de la sensibilité des masses d'eau à la salinité des apports marins est constatée.

La dynamique simulée d'un polluant miscible à l'eau montre que le polluant atteint la zone de pompage avec une concentration qui varie en fonction des apports des tributaires. En période d'étiage, le polluant parvient à la zone de pompage avec une concentration maximale de 25 kg/m³ (soit 4,46 % de la concentration initiale) après trois (3) jours de trajet. Cependant, en période de crue, le temps du trajet est réduit à seulement 55h mais la concentration avec laquelle le polluant arrive avoisine les 30 kg/m³ (5,36 %). La rapidité avec laquelle le polluant arrive en zone de pompage en période de crue serait due à la vitesse des écoulements. En période de crue, les précipitations sont intenses, ce qui accroît les apports de la Djibi. L'augmentation des débits a pour conséquence l'accélération des écoulements d'où la réduction du temps de trajet en période de crue. Cependant, en période d'étiage, la diffusion est lente donc le polluant a le temps de se disperser en chemin avant d'atteindre la zone de pompage, ce qui explique la faible concentration à l'arrivée du polluant en période d'étiage.

Conclusion partielle

Dans ce volet de l'étude, il s'est agi de suivre la dynamique de diffusion d'une pollution anthropique et de la salinité sous l'influence des élévations du niveau marin à l'horizon 2070 suivant le scénario extrême de changement climatique SSP5-8.5.

Cet exercice impliquait des mesures directes de la salinité de la lagune avant et après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam. De façon globale, ces mesures ont montré que lorsque l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam est fermée, la salinité moyenne

dans la lagune Aghien est d'environ 0,0 PSU quelle que soit la période. Après l'ouverture de l'embouchure, la salinité moyenne est passée à 0,0 PSU dans la zone de pompage en 2021 à 0,15 PSU en avril 2024, 2,56 PSU en avril 2025 avant d'entamer une descente (0,8 PSU) en mai 2025 après une diffusion de 17 jours.

L'ouverture de l'estuaire de la Comoé à Grand Bassam n'a pas conduit à une modification significative de la salinité des eaux au Nord de la lagune Aghien. Le suivi de l'évolution de la salinité des eaux de la lagune Aghien et du chenal à l'aide d'un modèle 2D a montré une augmentation de la salinité due à l'effet des changements climatiques. Selon les scénarii extrêmes RCP8.5 pour les précipitations et SSP5-8.5 pour l'évolution du niveau marin, la salinité pourrait atteindre 0,9 PSU dans le chenal en aval de la confluence de la Mé et 0,8 PSU en amont de cette confluence si les conditions aux limites aval restent inchangées. Dans la cuvette de la lagune Aghien en marée haute, la salinité moyenne pourrait atteindre 0,4 PSU dans la bande centrale contre seulement 0,16 PSU au voisinage de la pompe conformément aux conditions aux limites aval imposées.

Ainsi, du chenal à la confluence de la rivière Bété, l'influence de l'ouverture de l'estuaire du fleuve Comoé couplée à l'élévation du niveau de l'océan Atlantique s'atténuerait (Annexe 12) permettant l'exploitation de cette lagune à des fins d'alimentation en eau potable à l'horizon 2070 si les conditions en aval restent conformes à celles d'avril 2024.

Le suivi d'une substance polluante et miscible à l'eau déversée accidentellement dans la rivière Djibi a montré qu'en période d'étiage, il faudrait trois (3) jours, soit 72h, au polluant pour parvenir à la zone de pompages contre seulement 55 h en période de crue. Après quinze (15) jours, la pollution se rependrait dans toute la bande centrale de la lagune. A cet instant, dans la zone de pompage, le panache est sous forme de trace avec une concentration inférieure à 0,4 kg/m³ (0,07 % de la concentration initiale).

CONCLUSION

L'objectif principal de nos travaux de recherche était de modéliser la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion de polluants dans la lagune Aghien sous l'influence des pressions anthropiques et des variations de la marée. De façon spécifique, il s'est agi de caractériser la distribution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et de la morphologie de la lagune aghien. Ensuite, de simuler la dynamique des masses d'eau et des sédiments dans la lagune Aghien. Enfin, il s'est aussi agi de simuler la dynamique de diffusion de la salinité dans la lagune sous l'influence des variations de la marée.

Ainsi, le flux sédimentaire dans la lagune est-il évalué à 154 et 411 tonnes par jour respectivement en période d'étiage et en période de crue. L'analyse granulométrique des échantillons de sédiments prélevés au fond a montré que le fond lagunaire Aghien est recouvert de vase dans sa bande centrale avec une présence de sables moyens à grossiers près des berges. Ces sables sont de forme majoritairement subanguleuse à l'aspect émoussé et luisant contenant en forte proportion des minéraux de quartz. Ces sables ont été prélevés à des profondeurs variables allant des berges à 10,5 m dans la lagune. Au niveau du chenal, les profondeurs atteignent 17 m à la confluence de la rivière Mé mais sont inférieures à 17 m ailleurs dans le chenal. La lagune Aghien est alimentée par des tributaires permanents (rivières Djibi et Bété) et périodiques (Rivière Mé et remontées marines). Les volumes d'apports des tributaires périodiques de cette lagune sont les plus importants. A l'issue de l'exercice de modélisation hydro-sédimentaire, il convient de retenir que l'activité d'exploitation aura des conséquences sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune. Le niveau dynamique de la lagune baisserait en moyenne de $1,2 \pm 0,5$ mm sous l'action des pompages. Avec une réduction des apports des tributaires les années à venir (horizon 2070), cette baisse moyenne du niveau dynamique de la lagune Aghien serait de $2,8 \pm 1,3$ mm. Du fait de l'exploitation simultanée de cette lagune et de la rivière Mé, la masse de matières en suspension qui se dépose baisserait en moyenne d'environ $4,15 \pm 1,3$ g/m² au niveau de la zone de pompage. Sous l'influence de l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam et des variations de la marée dynamique suivant les prédictions du scénario extrême SSP5-8.5, la salinité de la lagune connaîtrait des changements significatifs. La salinité dans cette lagune pourrait se situer autour de 2,56 PSU en saison sèche et inférieure à 1 PSU à partir du mois de mai. En prenant pour référence les mesures effectuées en avril 2024, à l'horizon 2070, la salinité moyenne dans la lagune pourrait atteindre connaîtrait une augmentation de 0,3 PSU ou une augmentation de 200%.

La durée du trajet d'un polluant anthropique depuis la confluence de la rivière Djibi jusqu'à la zone de pompage dépend des périodes. En période d'étiage la substance mettra 3 jours pour y

arriver là où il faudra seulement 55 h en période de crue. Au treizième jour de son entrée dans la zone de pompage en période de crue, la concentration n'excède plus $0,4 \text{ kg/m}^3$ (soit seulement 0,07 % de la concentration initiale).

En définitive, de l'analyse des résultats obtenus, il ressort que la lagune Aghien pourrait être exploitée à des fins d'alimentation en eau potable sur la période allant de mai à janvier sans risque d'une salinisation prononcée si les conditions en aval de la lagune Potou restent conformes à celles de l'année 2025.

Recommandations

Le croisement des résultats obtenus à l'issue de cette étude permet de faire des recommandations tant aux riverains qu'aux structures en charge de la surveillance, la gestion et l'exploitation des ressources en eau de la lagune Aghien.

✓ A l'endroit des populations riveraines de la lagune Aghien

- Eviter le déversement d'ordures ménagères et des eaux usées domestiques dans la lagune Aghien ;
- Stocker les déchets dans des sacs poubelle pour éviter leur dépôt direct dans la lagune en cas de pluie ;
- Promouvoir des activités d'assainissement collectif à intervalles réguliers des berges de la lagune Aghien au voisinage des villages environnants.

✓ A l'endroit des autorités maritimes et des Eaux et Forêt

- Appliquer les textes du code de l'eau à tout contrevenant dans le périmètre et dans la lagune Aghien ;
- Planifier la re-végétalisation des rives pour filtrer les polluants avant qu'ils n'atteignent la lagune.

✓ A l'endroit de l'ONEP, de l'ONAD et de la Fluence

- Trouver une source d'eau douce (Champ captant ou digue sur la Bété) afin de diluer la salinité de l'eau pompée dans la lagune Aghien en période d'étiage ;
- Construire des systèmes de gestion des déchets solides et liquides, notamment des stations de traitement des eaux usées ;
- Installer des bacs à ordures accessibles à tous près des zones habitées ;
- Investir dans la restauration écologique de la lagune pour réduire la salinité et rétablir l'équilibre naturel.

Perspectives

Bien qu'ayant traité plusieurs aspects qui ont trait à la lagune Aghien, cette étude ne saurait être exhaustive. Ainsi, elle ouvre la voie à plusieurs perspectives de recherche. Ce faisant, pour parfaire les connaissances sur le fonctionnement de la lagune Aghien face aux activités d'exploitation et aux intempéries climatiques, il serait important de :

- effectuer de nouvelles simulations de la dynamique de la salinité à l'horizon 2070 en prenant comme conditions aux limites les mesures faites en avril 2025 afin d'analyser l'effet d'une augmentation extrême de la salinité en aval de la lagune Aghien ;
- étudier l'impact de l'interaction d'une baisse simultanée des apports des rivières Djibi, Bété, Mé et du fleuve Comoé couplée à l'élévation du niveau marin sur la salinité de la lagune Aghien ;
- évaluer la dynamique de propagation d'autres types de polluants tels que les sels nutritifs, les métaux lourds ; etc. et leur concentration au niveau de la zone de pompage
- réaliser un modèle 3D de la diffusion de salinité dans la lagune Aghien sous l'influence des variations de la marée et des changements climatiques afin de mieux apprécier l'évolution verticale de la salinité dans cette lagune.

REFERENCES

- Adopo K.L., Kouassi K.L., Wognin A.V.I., Monde S. & Aka K. (2008). Caractérisation des sédiments et morphologie de l'embouchure du fleuve Comoé (Grand-Bassam, Côte d'Ivoire). *Revue Paralia*, 1 : 2.1–2.10.
- Aizinger V. & Dawson C. (2002). A discontinuous Galerkin method for two-dimensional flow and transport in shallow water. *Advances in Water Resources*, 25(1) : 67–84.
- Albaret J.J. & Ecoutin J.-M. (1991). Sea-lagoon communication: Impact of a reopening on the ichthyofauna of the Ebrie lagoon (Côte d'Ivoire). *Journal Ivoirien d'Océanographie et de Limnologie*, 1(2) : 99–109.
- Alizadeh M., Javad M., Shahheydari H., Kavianpour M., Shamloo H. & Barati R. (2017). Prediction of longitudinal dispersion coefficient in natural rivers using a cluster-based Bayesian network. *Environmental Earth Sciences* 76 : 1-11.
- Amani E.M. (2012). Essais de modélisation hydrodynamique de la circulation des masses d'eau et de la dispersion saline dans un environnement côtier peu profond : la lagune Digbougé (San-Pedro, Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Felix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 169 p.
- Amani E.M., Wognin A.V., Wango T.E., Monde S. & Aka K. (2013). Analyse en composante hydrologique principale de la lagune Digbougé (San Pedro, Côte d'Ivoire). *BIOTERRE, Revue Internationale des Sciences de la Terre*, Editions Universitaires de Côte d'Ivoire, (Côte d'Ivoire), 42 p.
- Audusse E. (2004). Modélisation hyperbolique et analyse numérique pour les écoulements en eaux peu profondes. Thèse de Doctorat en Mathématiques appliquées, Université Paris VI (Paris, France), 193 p.
- Blazek J. (2005). Computational fluid dynamics, Principles and applications. Second edition, *Elsevier*, 496 p.
- Bouanani A. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW Algérie). Thèse de Doctorat d'Etat en Génie Civil et Hydraulique, Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 250 p.

- BRLi. (2015). Etude de la protection du bassin versant de la lagune Aghien. Phases 1 et 2 – Caractérisation du bassin versant et des risques de pollution, 190 p.
- Burt N., (1986). Field settling velocities of estuary muds. In: Mehta, A.J. (Ed.), *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, 14 : 126–150.
- Butcher J.C. (2016). *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations. John Wiley & Sons*, 507 p.
- Chaalali A. (2013). Évolution à long terme de l'écosystème estuarien de la Gironde. Thèse de Doctorat en Biogéochimie et Écosystèmes, Université de Bordeaux 1 (Bordeaux, France), 261 p.
- Chow W. & Cheung Y. (1997). Compararison of the algorithms PISO and SIMPLER for solving pressure velocity linker equations in simulating compartment fire. *Numerical Heat Transfer*, 131 : 87–112.
- DHI – Danish Hydraulic Institut (2021). Hydrodynamic and transport module. *Scientific documentation*, 59 p.
- Danumah J.H., Odai S.N., Saley B.M., Szarzynski J., Thie M., Kwaku A., Kouame F.K. & Akpa L.Y. (2016). Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (Côte d'Ivoire). *Geoenvironmental Disasters*, 3(10) : 1–13.
- Dawson C.N. & Proft J. (2002). Discontinuous and coupled continuous/discontinuous Galerkin methods for the shallow water equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191(41-42) : 4721–4746.
- Diallo S., Nouffe D.E., Tra B.Z.A., Gone D.L., Koffi E.S. & Koffi K. J.T. (2018). Effects of vegetation cover dynamics on runoff in the Aghien lagoon watershed in Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 14(36) : 312–332.
- Diallo S., Tra B.Z.A., Noufé D., Dao A., Kamagaté B., Effebe K.R., Goné D.L., Ehouman K.S., Koffi J.T., Paturel J.E., Perrin J-L. & Seguis L. (2019). Dynamique de l'occupation du sol du bassin ivoirien de la lagune Aghien. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 26(1) : 203–217.

- Diner N. & Marchand P. (1995). Acoustique et Pêche. *Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer*, 61 p.
- Effebe K.R., Tra B.Z.A., N'Tain Y.J. & Nguetta F. (2017). Analyse et répartition spatiale des principales sources de pollution potentielle de la lagune Aghien, Sud-Est Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 13(6) : 417–434.
- Elder J.W. (1959). The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *Fluid Mechanics*, 5 (4) : 544–560.
- Eldin M. (1971). Le climat. Dans : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoire ORSTOM*, 50 : 73–108.
- Engelund F. & Fredsøe J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7 : 293–306.
- FAO (2024). Une régression alarmante du couvert végétal ivoirien entre 1986 et 2015. <https://www.fao.org/cote-divoire/actualites/detail-events/fr/c/1044829/> consulté le 24 juin 2024.
- Finaud-Guyot P. (2009). Modélisation macroscopique des inondations fluviales et urbaines- Prise en compte des écoulements directionnels et des échanges lit majeur - lit mineur. Thèse de Doctorat en Sciences et Techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, (Montpellier, France), 171 p.
- Figuérez J.A., González J. & Galán Á. (2021). Accurate Open Channel Flowrate Estimation Using 2D RANS Modelization and ADCP Measurements. *Water*, 13(1772) : 1–17.
- GIEC – Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (2021). Résumé à l'intention des décideurs. In: Changement climatique 2021: les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [publié sous la direction de Masson-Delmotte, Zhai V.P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R. & Zhou B]. *Cambridge University Press*, 40 p.

- Goé B.S., Dao A., Akahoua B.D., Koffi J.T. Kamagate B., Kouassi K.L. (2024). Dynamique de diffusion de la salinité dans la lagune Aghien (Abidjan, Côte d’Ivoire) sous l’influence des prélèvements. *Editions Paralia CFL, XVIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, 24-26 Juin 2024, Anglet, France, 737–742.
- Griffiths D.F. & Higham D.J. (2010). Numerical Methods for Ordinary Differential Equations, Initial Value Problems. Tome I. Springer Undergraduate Mathematics Series. *Springer*, Verlag, London (England), 270 p.
- Hervouet J.-M. & Bates P. (2000). The telemac modelling system. Special issue *Hydrol. Process*, 14(13) : 2207–2208.
- Hildeberg I. (1952). Le mécanisme du climat de l'Ouest africain. *L'Information Géographique*, 16(3) : 98–100.
- Hilton T.W., Najjar R.G., Zhong L. & Li M. (2008). Is there a signal of sea-level rise in Chesapeake Bay salinity. *Journal of Geophysical Research*, 113(9) : 1–12.
- Hong B. & Shen J. (2012). Responses of estuarine salinity and transport processes to potential future sea-level rise in the Chesapeake Bay. *Estuarine Coastal Shelf Sciences*, 104(105) : 33–45.
- INS-Institut National de la Statistique (2021). Recensement général de la population et de l'habitat de Côte d'Ivoire. Résultats globaux, 37 p.
- Jia P., Wang Q.G., Lu X.C., Zhang B.B., Li C., Li S., Li S.B. & Yang Y.P. (2018). Application of two-dimensional water quality model in the project of the water diversion in East Lake. *Physics and Chemical Earth*, 103 : 91–100.
- Jones S.E. & Jago C.F. (1996). Determination of settling velocity in the Elbe estuary using QUISSET tubes. *Journal of Sea Research*, 36 : 63–67.
- Katsaounis T. & Makridakis C. (2003). Relaxation models and finite element schemes for the shallow water equations. In: Anonymous Hyperbolic Problems: Theory, Numerics, Applications. *Springer*, pp. 621–631.
- Koffi E.S. (2021). Modélisation hydrologique et estimation des flux au niveau de la lagune (Abidjan/Côte d’Ivoire) dans un contexte d’urbanisation et de variabilité climatique.

- Thèse de Doctorat, Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 212 p.
- Koffi E.S., Dao A., Noufe D.D., Kamagate B., Koffi K.J.T., Diallo S. & Gone D.L. (2018). Bilan des apports liquides des rivières Bété et Djibi a la lagune Aghien (Côte d'Ivoire). *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 6 : 86–99.
- Koffi E.S., Koffi T.K., Perrin J.L., Séguis L., Guilliod M., Goné D.L. & Kamagaté B. (2019). Hydrological and water quality assessment of the Aghien Lagoon hydrosystem (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Hydrological Sciences Journal*, 64(15) : 1893–1908.
- Koffi K.J.-P. (2017). Analyse hydro-géomorphologique de bassin versant et vulnérabilité a la pollution des eaux de surface : cas de la lagune Aghien, Sud de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Hydrologie & SIG, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 232 p.
- Koffi K.J.P., N'Go Y.A., Yeo K.M., Koné D. & Savane I. (2014). Détermination des périmètres de protection de la lagune Aghien par le calcul du temps de transfert de l'eau jusqu' à la lagune. *Larhyss Journal*, 2(19) : 19–35.
- Koffi K.J.T. (2020). Production d'eau potable à partir de la lagune Aghien (Côte d'Ivoire) : qualité de la ressource et essais d'élimination de la matière organique par coagulation-floculation. Thèse de Doctorat en Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 180 p.
- Konan K.S., Kouassi K.L., Kouame K.I., Kouassi A.M. & Gnakri D. (2013). Hydrologie et hydrochimie des eaux dans la zone de construction du chenal du port de pêche de Grand-Lahou, Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(2) : 819–831.
- Konan K.S., Kouakou K.B., Ohou M.-J., Konan K.F. & Dongui K.B. (2017). Variation saisonnière des paramètres abiotiques de la lagune Aghien (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 120 : 12042–12052.
- Kouadio K.J.O., Dibi B., Mangoua M.J., Eblin S.G., Paran F. & Graillot D. (2022). Estimation of Groundwater Recharge in the Lobo Catchment (Central Western Region of Côte d'Ivoire). *Hydrology*, 9(23) : 1–18.

- Kouamé K.J., Ake G.E., Koblan A.K., Dje K.B. & Jourda J.P. (2017). Simulation de l'évolution du rabattement de la nappe de Bonoua (sud-est, Côte d'Ivoire) par modélisation hydrogéologique. *Larhyss Journal*, 32 : 23–46.
- Kouamé K.J., Jourda J.P., Deh S.K., Djemin E.J., Saley M.B., Anani A.T. & Biémi J. (2013). Apport des méthodes mathématiques dans la délimitation des périmètres de protection autour des ouvrages de captage des eaux souterraines d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemistry Science*, 7(5) : 1987–2006.
- Kouamelan A.N. (1996). Géochronologie et géochimie des formations Archéennes et Protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-protérozoïque. Thèse de Doctorat en Géochimie, Université de Rennes 1 (Rennes, France), 277 p.
- Kouassi A., Assamoi P., Bigot S., Diawara A., Schayes G., Yoroba F. & Kouassi B. (2010). Etude du climat ouest-africain à l'aide du modèle atmosphérique régional M.A.R. *Climatologie*, 7 : 39–55.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Koffi Y.B., Djè K.B., Paturel, J.E. & Oulare S. (2010) Analysis of Climate Variability and of Its Influences on Seasonal Rainfall Regimes in West Africa: Case of the N'zi (Bandama) Watershed in Ivory Coast. *European Journal of Geography*, 503 : 35–58.
- Kouassi K.L. (2007). Hydrologie, transport solide et modélisation de la sédimentation dans les lacs des barrages hydroélectriques de Côte d'Ivoire : cas du lac de Taabo. Thèse de Doctorat en Hydro-sédimentologie, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 209 p.
- Kouassi K.L., Kouamé K.I., Konan K.S., Sanchez Angulo M., Demé M. & Mélédje N.H. (2013). Two-Dimensional Numerical Simulation of the Hydro-Sedimentary Phenomena in Lake Taabo, Côte d'Ivoire. *Water Resources Management*, 27(12) : 4379–4394.
- Kouassi K.L., Démé M., Konan K.S., Yahiri B.P., Koné D., Sanchez M. & AKA K. (2016). Modélisation du fonctionnement hydrodynamique de l'embouchure du fleuve Bandama, Grand-Lahou, Côte d'Ivoire. *XIV^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, 29 juin au 1er juillet 2016, Toulon, France, pp. 219–228.

- Koukougnon W.G. (2012). Milieu urbain et accès à l'eau potable : cas de Daloa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, UFR des Sciences de l'Homme et de la Société, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 364 p.
- Krone R.B. (1962). Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes; Final Report. Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, 110 p.
- Lagrange J.L. (1781). Mémoire sur la théorie du mouvement des fluides. Mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres de Berlin, Berlin (Allemagne), *Eds. Gallica*, 4 : 695–748.
- Laplace P.-S. (1776). Recherches sur l'intégration des équations différentielles aux différences finies et sur leur usage dans la théorie des hasards. Mémoires de l'Académie royale des sciences de Paris, Paris (France), *Eds. Gallica*, 7 : 69–197.
- Le Coz J., Camenen, B., Peyrard X. & Dramais G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method. *Flow Measure Instrument*, 26 : 18–29.
- Lee K., Ho H, Muste M. & Wu C. (2013). Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with StreamPro ADCP. *Journal of Hydrology*, 509 : 101–114.
- MigniotLumborg U. & Windelin A. (2003). Hydrography and cohesive sediment modelling: application to the Romo Dyb tidal area. *Journal of Marine Systems*, 38(3-4) : 287–300.
- Mehta A.J., Hayter E.J., Parker W.R., Krone R.B. & Teeter A.M. (1989). Cohesive Sediment Transport I : Process Description. *Journal of Hydraulic*, 115(8) : 1076–1093.
- Meledje N.H. (2016). Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux des sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1. Thèse unique de Doctorat en Hydrosédimentologie-SIG, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 189 p.
- Meledje N.H., Kouassi K.L., N'go Y.A., Kouassi K.M., Savane I. & Aka K. (2014). Caractérisation des apports sédimentaires et morphologie du lac du barrage hydroélectrique d'Ayame 1 (Sud-Est Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(3) : 1290–1307.

- Migniot C. (1983). Les matières en suspension dans les estuaires. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 28 : 61–75.
- Monde S. (2004). Etude et modélisation hydrodynamique de la circulation des masses d'eau dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Océanographie, Université Abidjan, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 324 p.
- Monde S., Coulibaly A.S., Wango T.-E. & Aka K. (2011). Hydrodynamique de l'estuaire de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Revue Paralia*, 4 : 1.1–1.14.
- Moukalled F., Mangani L. & Darwish M. (2016). The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. *Springer International Publishing Switzerland, Switzerland*, 791 p.
- Mueller D.S. & Wagner C.R. (2007). Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12) : 1329–1336.
- Navier C.L.M.H. (1823). Mémoire sur les lois du Mouvement des Fluides. Mémoire de l'Académie Royale des Sciences. Paris, 6 : 389–416.
- N'Dri W.K.C., Pistre S., Jourda J.P. & Kouamé K.J. (2019). Estimation of the Impact of Climate Change on Water Resources Using a Deterministic Distributed Hydrological Model in Côte d'Ivoire: Case of the Aghien Lagoon. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(7) : 74–91.
- N'Guessan Y.A. (2008). Analyse morphologique, sédimentologique et environnement de dépôt des sédiments superficiels des lagunes Adjin et Potou (Zone littorale de la Côte d'Ivoire), Thèse unique de Doctorat, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 171 p.
- N'guessan Y.A., Wognin V., Coulibaly A., Monde S., Wango T.E. & Aka K. (2011). Analyse granulométrique et environnement de dépôts des sables superficiels de la lagune Adjin (Côte d'Ivoire). *Revue Paralia*, 4 : 6.1–6.14.
- Oga Y.M.S., Adja M., Yapi A., Kpan J., Baka D., Yao K. & Biemi J. (2016). Projection de la variabilité climatique à l'horizon 2050 dans la zone côtière au Sud-est de La Côte d'Ivoire (d'Abidjan à Aboisso). *Larhyss Journal*, 13(1) : 67–81.

- Parchure T.M. & Mehta A.J. (1985). Erosion of soft cohesive sediment deposits. *Journal of Hydraulic Engineering*, 11(10) : 1308–1326.
- Patankar S. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow, New York: McGraw-Hill, 214 p.
- Pejrup, M. (1988). Flocculated suspended sediment in a micro-tidal environment. *Sedimentary Geology*, 57 : 249–256.
- Rice K.C., Hong B. & Shen J. (2012). Assessment of salinity intrusion in the James and Chickahominy Rivers as a result of simulated sea-level rise in Chesapeake Bay, East Coast, USA. *Journal of Environment Management*, 111 : 61–69.
- Rijn L.C. (1984). Sediment Transport, Part II Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10) : 1613–1641.
- Rijn L.C. (1989). Transport of cohesive materials. *Delft Hydraulics H*, 461 : 12.1–12.27.
- Rivière A. (1977). Méthodes granulométriques : techniques et interprétations. *Edition Masson*, Paris (France), 170 p.
- Ross A.C., Najjar G.R., Li M., Mann E.M., Ford E.S. & Katz B. (2015). Sea-level rise and other influences on decadal-scale salinity variability in a coastal plain estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 157 : 79–92.
- Saint-Venant A.J.C.B. (1871). Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, 73 : 147–157.
- Samassy, R. (2019) Semi-Secular Tide Gauge Measurements at the Port of Abidjan (Ivory Coast): Methods, Sea Level Evolutionary Trend and Coastal Vulnerabilities. Thèse de Doctorat en Océanographie, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 229 p.
- Samassy R.Y., Kokoa C.M.R.A., Tano A.R., Monde S., Sangaré S., Kouadio A. (2023). Evolutive Trend of Water Level in the Ebrie Lagoon by Reconstitution of the Tide Gauge Time Series in Front of the Abidjan Coastline (Côte d'Ivoire). *Journal of Water Resource and Protection*, 15 : 526–538.

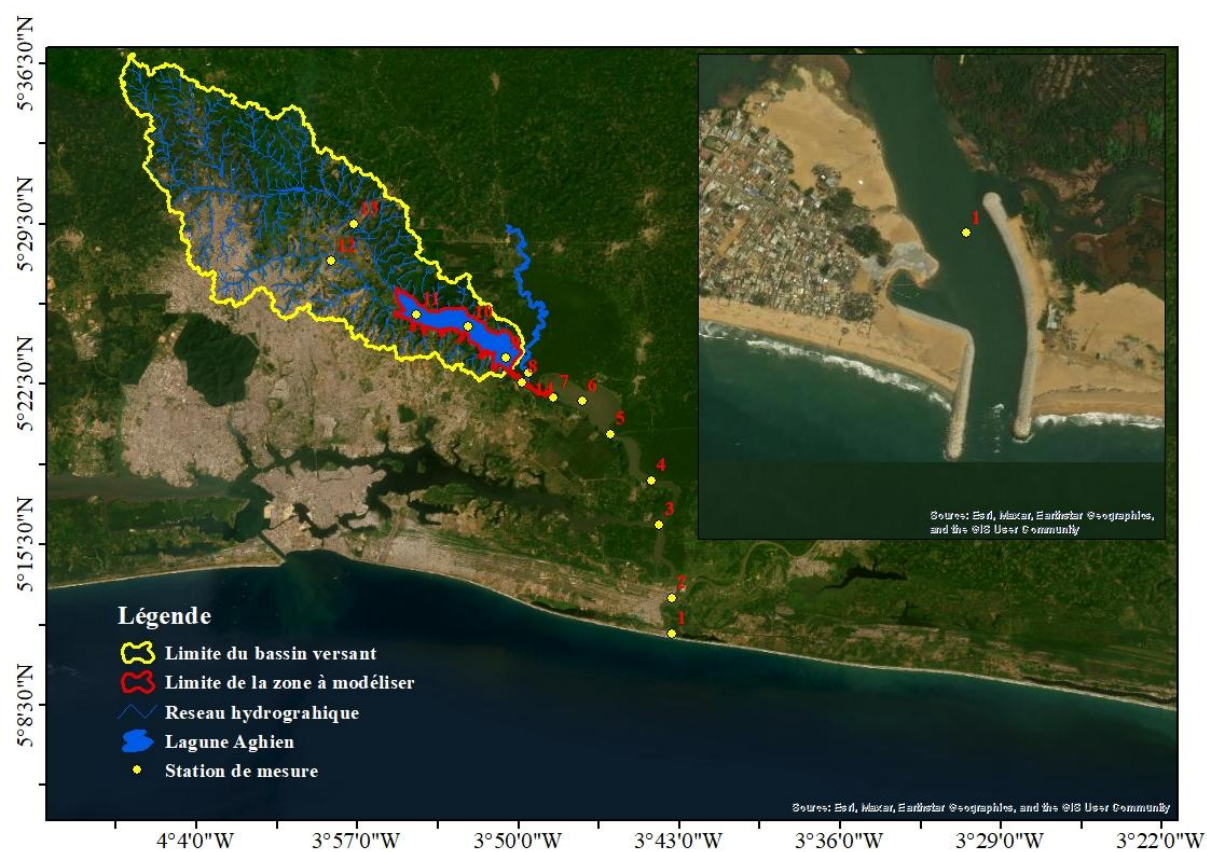
- Sanchez A.M. & Delanoë Y. (2000). Evaluation des paramètres hydrosédimentaires par des mesures en site estuarien et en laboratoire. *VI^{èmes} Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier*, 17–19 Mai 2000, Caen, France, 16 p.
- Sanchez A.M. & Delanoë Y. (2002). Mesure de la vitesse de chute des sédiments en laboratoire et in situ. *VII^{èmes} Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier*, 15–17 Mai 2002, Anglet, France, 9 p.
- Sanchez M., Grimigni P. & Delanoë Y. (2005). Dynamique des sédiments fins de l'estuaire de la Loire sous l'action de la pesanteur. *Revue Européenne de Génie Civil*, 9(7-8) : 1025–1045.
- Salfavi S., Shamsai A., Saghafian B. & Bateni S.M. (2015). Modeling Spatial Pattern of Salinity using MIKE21 and Principal Component Analysis Technique in Urmia Lake. *Current World Environment*, 10(2) : 626–633.
- Savenije H.H. (1993). Predictive model for salt intrusion in estuaries. *Journal of Hydrology*, 148 : 203–218.
- Sengers A. (2019). Schémas semi-implicites et de diffusion-redistanciation pour la dynamique des globules rouges. Thèse de Doctorat en Mathématique appliquée, Université Grenoble Alpes (Grenoble, France), 192 p.
- Shi Y.E. (2006). Résolution numérique des équations de Saint-Venant par la technique de projection en utilisant une méthode des volumes finis dans un maillage non structuré. Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre, Université de Caen (Caen, France), 245 p.
- Sine L., Corlier F. & Gaspar S. (1977). Détermination expérimentale du coefficient de dispersion longitudinale dans une rivière à l'aide d'un traceur radioactif. In: *La mécanique des fluides et l'environnement. Prévision et maîtrise de la qualité de l'eau et de l'air. Compte rendu des quatorzièmes journées de l'hydraulique*. Paris, 7-9 septembre 1976. Tome 1, pp. 1–3.
- Soro N., Lasm T., Kouadio B.H., Soro G. & Ahoussi K.E. (2004). Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan. *Sud Sciences et Technologies*, 14 : 30–40.

- Soro N., Ouattara L., Dongo K., Kouadio E.K., Ahoussi E.K., Soro G., Oga M.S., Savane I. & Biemi J. (2010). Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biology and Chemical Sciences*, 4(6) : 2203–2219.
- Soulsby R.L, Hamm L., Klopman G., Myrhaug D., Simons R.R. & Thomas G.P. (1993). Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, 21 : 41–69.
- Stelling G.S. & Verwey A. (2005). Numerical flood simulation. In : Encyclopedia of Hydrological Sciences. *John Wiley & Sons*, 2 : 257–270.
- Stokes G. (1845). Transactions of Cambridge Philosophical Society. Paris, 7 : 287–305.
- Tagini B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. SODEMI Abidjan, 302 p.
- Tan W.Y. (1992). Mathematical Theory and Numerical Solution for a Two-dimensional System of Shallow Water Equations. *Shallow Water Hydrodynamics*, 55 : 1–434.
- Tano A.R. (2017) Etude de la vulnérabilité de la zone côtière de la Côte d'Ivoire à partir de paramètres environnementaux et anthropiques. Thèse de Doctorat en Océanographie, Université Félix Houphouët Boigny, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 151 p.
- Tano R., Aman A., Toualy E., Kouadio Y., François-Xavier B. & Addo K. (2018) Développement d'un indice intégré de vulnérabilité côtière pour la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest. *Journal of Environmental Protection*, 9 : 1171–1184.
- Tattersall G.R., Elliott A.J. & Lynn N.M. (2003). Suspended sediment concentrations in the Tamar estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(4) : 679–688.
- Teeter A.M. (1986). Vertical Transport in Fine-Grained Suspension and Nearly-Deposited Sediment. *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Springer Verlag*, 14 : 126–149.
- Traoré A. (2016). Impacts des changements climatiques et du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol sur les ressources en eau de l'environnement lagunaire d'Aghien et de Potou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR des Sciences de la Terre

- et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 248 p.
- Traoré A., Ahoussi K.E., Aka N., Traore A. & Soro N. (2015). Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of pure and Applied Bioscience*, 3(4) : 312–322.
- Traoré A., Soro G., Ahoussi K.E., Bamba B.S., Soro N. & Biemi J. (2014). Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale : la lagune Aghien (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *Afrique Science*, 10(3) : 73–88.
- Traoré A., Soro G., Kouadio E.K., Bamba B.S., Oga M.S., Soro N. & Biemi J. (2012). Evaluation des paramètres physiques, chimiques et bactériologiques des eaux d'une lagune tropicale en période d'étiage : la lagune Aghien (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biology and Chemical Sciences*, 6(6) : 7048–7058.
- Touré F.F., Konan-Waidhet A.B., Yao A.B., Diarra A. & Koua T.J.J. (2022). Spatial Analysis of access to drinking water for the populations of the Lobo watershed in Nibéhibé (Central-western Côte d'Ivoire). *European Journal of Applied Sciences*, 10(3) : 352–366.
- Touré F.F., Konan-Waidhet A.B., Diarra A., Yao A.B., Koua T.J.J. & Koita M. (2020). Spatial analysis of the mode of management and conflicts of use of water resources in the watershed of the Lobo Wangoriver in Nibehibe (Central-western Côte d'Ivoire). *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 24(7) : 25–38.
- UNESCO (2021). La valeur de l'eau. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 226 p.
- UNESCO (2022). Eaux souterraines, Rendre visible l'invisible. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 12 p.
- Vidal M. (1987). Les déformations éburnéennes de l'unité birimienne de la Comoé (Côte d'Ivoire). *Journal of African Earth Sciences*, 6 : 141–152.

- Wango T.E., Moussa M., Adopo K.L. & Monde S. (2011). Calage du modèle hydrodynamique à 2D du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire. *Geoscience Economie Tropicale*, 35 : 23–32.
- Watson D.F. & Philip G.M. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing*, 2 : 315–327.
- Yacé I. (1976). Le volcanisme éburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fétékro en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan (Abidjan, Côte d'Ivoire), 373 p.
- Yao D.A.R. (2020). Etude des cyanobactéries de la lagune aghien et de leur potentialité à produire des métabolites secondaires. Thèse de Doctorat en Biologie Fonctionnelle et Moléculaire, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 149 p.
- Yéo K.M. (2015). Dynamique spatiale et temporelle des caractéristiques chimiques des eaux et des sédiments, et statut trophique du système lagunaire périurbain Adjin-Potou (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Hydrochimie, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 171 p.
- Yéo K.M., Goné D.L., Kamagaté B., Douagui G.A. & Dembélé A. (2015). Seasonal and spatial variations in water physicochemical quality of Coastal Potou Lagoon (Côte d'Ivoire, Western Africa). *Journal of Water Ressources and Protection*, 7 : 741–748.
- Zhao D.H., Shen H.W., Tabious G.Q., Lai J.S. & Tan W.Y. (1994). Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 120(7) : 864–883.
- Zeinoddini M., Bakhtiari A. & Ehteshami M. (2013). Wave–flow coupling effects on spatiotemporal variations of flow and salinity in a large hypersaline marine system: Lake Urmia, Iran. *Limnology*, 14 : 77–95.

ANNEXES



Annexe 1 : Point de mesure de la salinité en 2021, 2024 et 2025

```

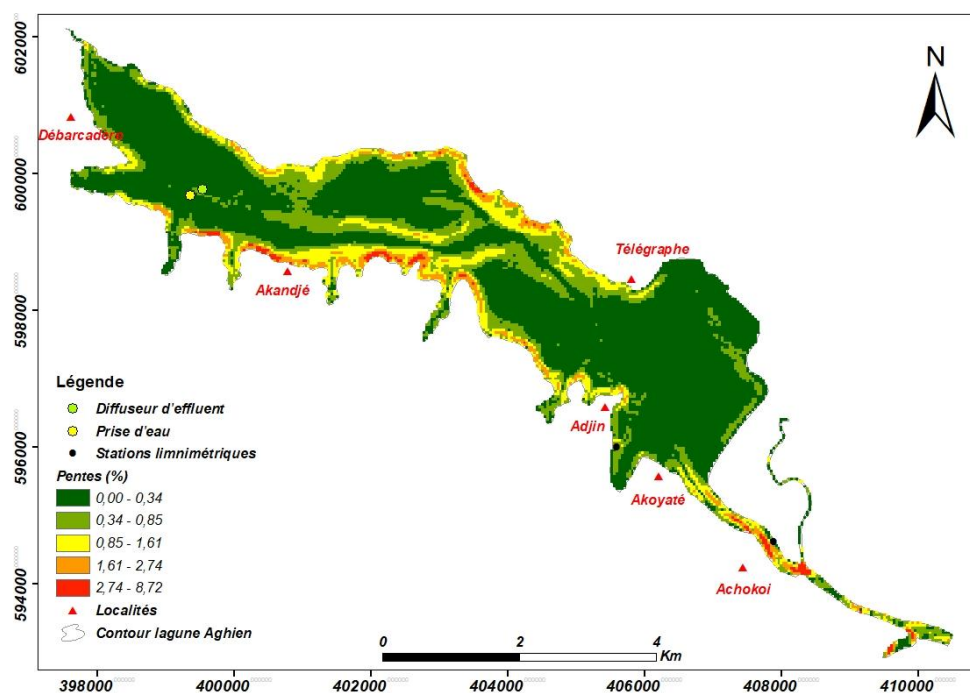
*-----BLOC 5: CONDITIONS AUX LIMITES-----
*
* POSITION ZONE D'OUVERTURE
* CL PARTIE FLUIDE: CLUX,CLUZ,CLH,CLCM
*
* NEU,NEU,NEU,NEU (FRONTIERE LIBRE)
* DIR,DIR,DIR,DIR (INJECTION, VENT LATERAL,..)
*
* CL PARTIE SOLIDE: CLUX,CLUZ,CLH,CLCM
*
* DIR,DIR,NEU,NEU
*
* OUEST: YPOS1, YPOS2
*
* 1
*
* 599757.000, 600058.000 ,Djibi
UX UY H CM
0.0100,0.00, 0.30100, 0.00100
DIR,DIR,NEU,NEU,NEU
DIR,DIR,NEU,NEU,NEU
* EST: YPOS1, YPOS2
*
* 0
*
* 594557.000, 594705.000 ,Mé
UX UY H CM
0.3600,0.4500, 4.500, 0.00100
NEU,NEU,DIR,NEU,DIR
DIR,DIR,NEU,NEU,NEU
* SUD: XPOS1, XPOS2 0.4800,-0.3300,2.8500/-0.6400,0.3700,5.6500
*
* 1
*
* 407668.00, 407952.00 ,Potou ; UYSUD=
UX UY H CM 0.4800, -0.3300, 2.85
0.3600,0.4500, 4.500, 0.00100
NEU,NEU,DIR,NEU,DIR
DIR,DIR,NEU,NEU,NEU
* NORD: XPOS1, XPOS2
*
* 1
*
* 397743.00, 397943.00 ,BÉTÉ
UX UY H CM
0.208300,-0.208300, 4.00, 0.00600
DIR,DIR,NEU,NEU,NEU
DIR,DIR,NEU,NEU,NEU
*
*-----BLOC 6: DEFINITION DU MAILLAGE SPATIAL-----
*
* POUR CHAQUE LIMITE (SUD, OUEST, ET BACK), ON DEFINIT:
*
* NZONE:NB DE ZONES
*
* NVZONE:NB DE VOLUMES PAR ZONE
*
* RATIO: RAPPORT DE PROGRESSION ENTRE DEUX VOLUMES SUCCESSIFS.
*
* X,Y,Z:POSITION DES NOEUDS LIMITANT CHAQUE ZONE
*
* OUEST
*
* 1
*
* 150
*
* 1.00
*
* 594532.5200,601907.5200
*
* SUD
*
* 1
*
* 200
*
* 1.00
*
* 397626.700,407951.700
*

```

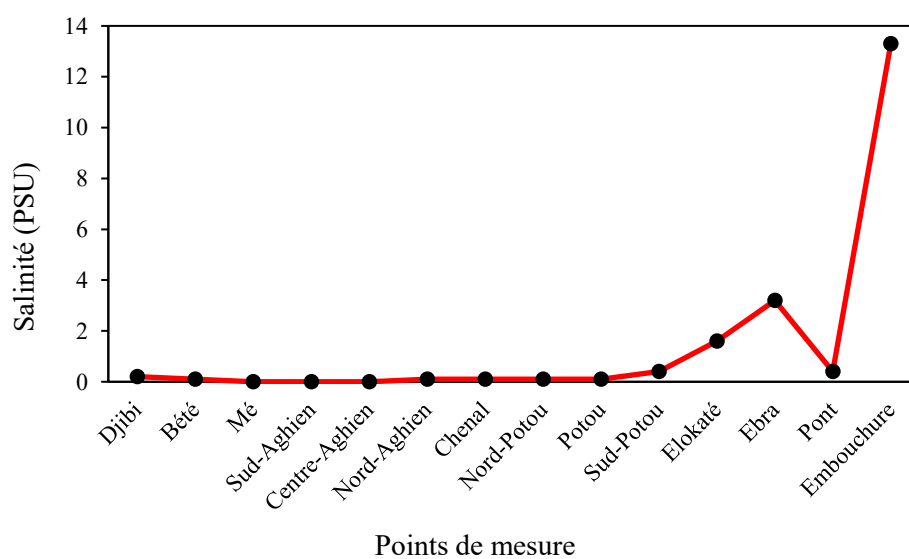
Annexe 2 : Conception du maillage de la lagune Aghien

S15	400825	599282	9	Crème de vase		Gris olive
S16	401274	599323	9	Crème de vase	5Y 3/2	Gris olive
S17	401408	600162	0,5	Sable grossier	10YR 2/1	Brunâtre
S18	402385	599160	10	Crème de vase	5Y 3/2	Gris olive
S19	402386	600218	0,5	Sable grossier	10YR 2/1	Brunâtre
S20	402895	600290	0,5	Sable grossier	10YR 2/1	Brunâtre
S21	403503	599268	6	Vase	5Y 2/1	Noire olive
S22	404294	599302	0,5	Sable grossier	10YR 2/1	Brunâtre
S23	403814	598561	6	Crème de vase		Brun orangé
S24	402894	598464	0,5	Sable grossier		Brunâtre
S25	402916	597801	0,5	Sable grossier	10YR 2/1	Brunâtre
S26	404395	597393	0,5	Sable grossier		Brunâtre
S27	404915	597896	5	Crème de vase		Brun orangé
S28	405367	598523	0,5	Sable grossier	10YR 2/1	Brunâtre
S29	406376	598268	1	Sable grossier	2N	Grisâtre
S30	405507	597490	5	Crème de vase		Brun orangé
S31	405857	597704	5	Crème de vase		Brun orangé
S32	405710	597023	4	Sable vaseux		Blanchâtre
S33	405274	596705	0,5	Sable grossier	10YR 2/1	Brunâtre
S34	405648	596623	0,5	Sable grossier		Brunâtre
S35	405701	595770	1,5	Sable grossier	2N	Grisâtre
S36	406576	596104	3	Crème de vase	5Y 2/1	Noire olive
S37	406630	596979	4	Crème de vase		Noire olive
S38	406951	597674	1	Sable grossier	2N	Grisâtre
S39	407378	597045	2	Vase		Noirâtre
S40	407309	596605	2	Vase		Noirâtre
S41	406760	595482	5	Crème de vase	5Y 3/2	Gris olive
S42	407124	595114	7	Crème de vase		Gris olive
S43	407729	594620	5	Mélange de Vase et débris végétaux		Noir
S44	407925	594394	9	Crème de vase	5Y 3/2	Gris olive
S45	408596	594044	4	Mélange de Vase et débris végétaux		Noir
S46	408930	593685	4	Mélange de Vase et débris végétaux		Noir
S47	409877	593384	6	Crème de vase	5Y 3/2	Gris olive
S48	408262	594708	9	Mélange de Sable grossier et de débris végétaux		Grisâtre
S49	407839	595814	6	Mélange de Vase, débris végétaux et coquille		Noirâtre

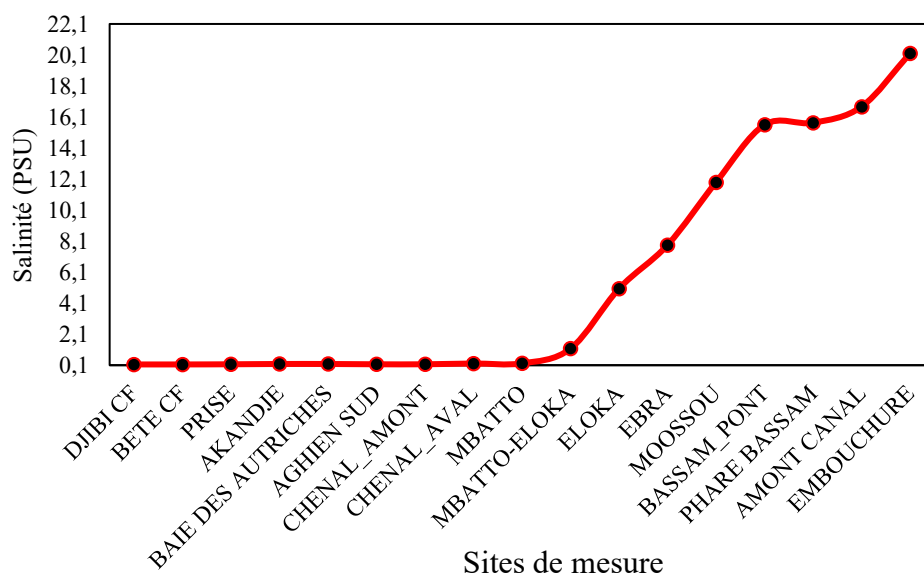
ID : Identifiant ; Long. : Longitude ; Lat. : Latitude ; Pro. : Profondeur de prélèvement



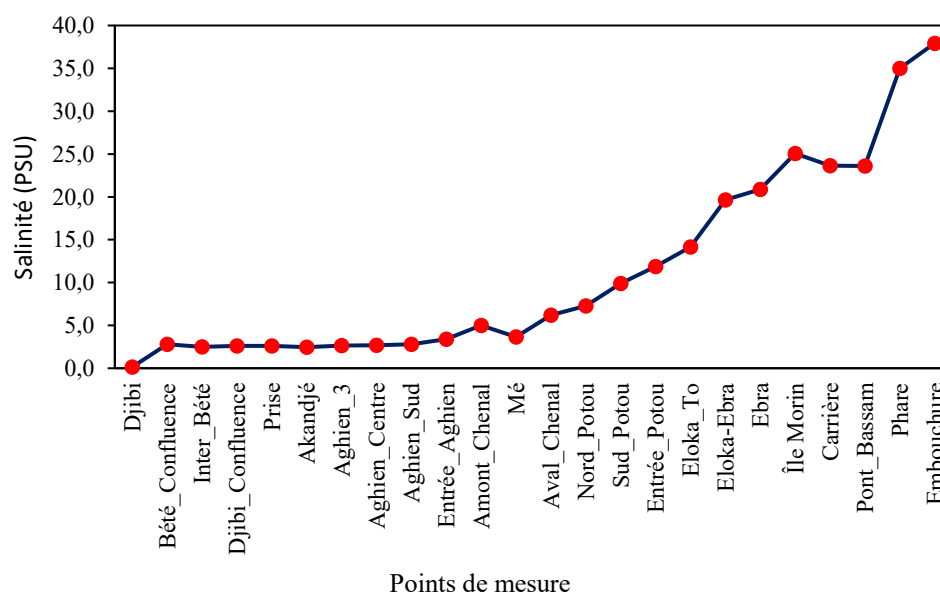
Annexe 5 : Pentes du fond de la lagune Aghien



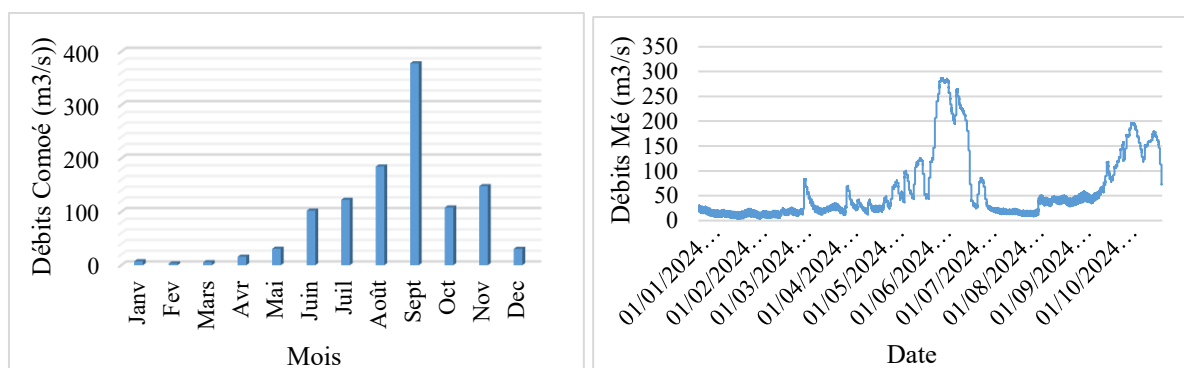
Annexe 6 : Evolution de la salinité de la confluence de la Djibi à l'embouchure du fleuve Comoé en 2021



Annexe 7 : Evolution de la salinité de la confluence de la Djibi à l'embouchure du fleuve
Comoé en 2024



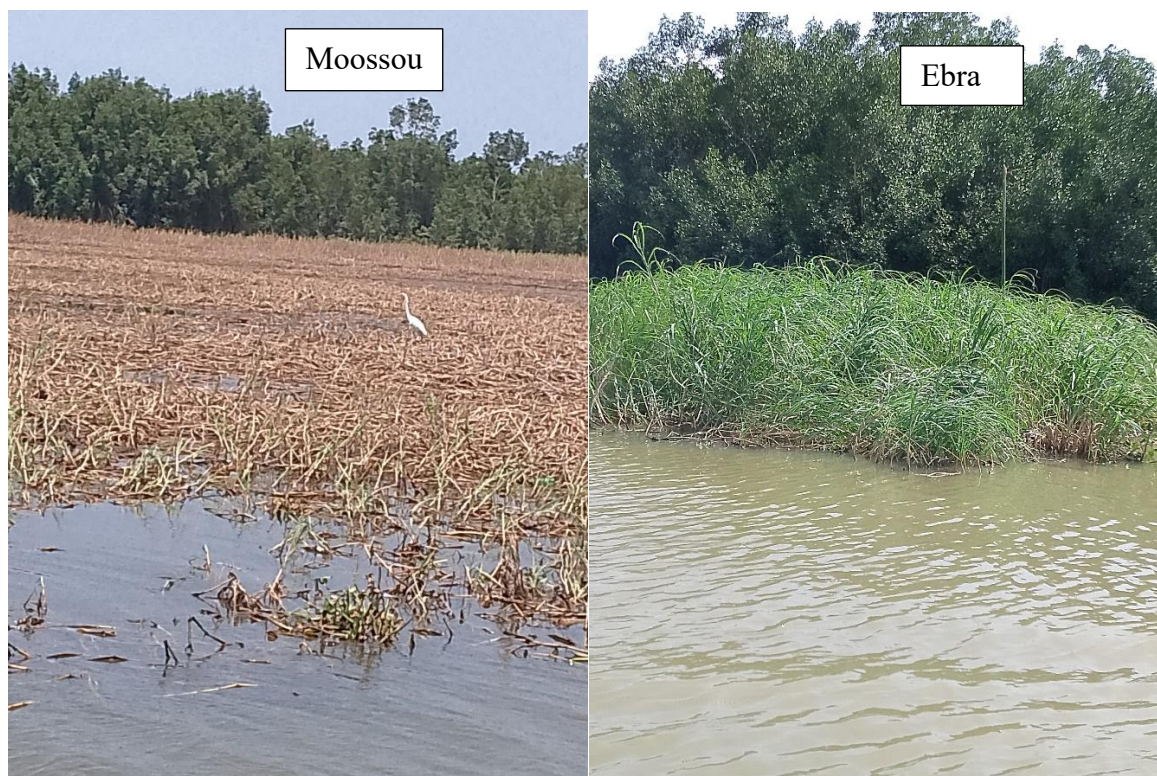
Annexe 8 : Evolution de la salinité de la confluence de la Djibi à l'embouchure du fleuve
Comoé en 2025



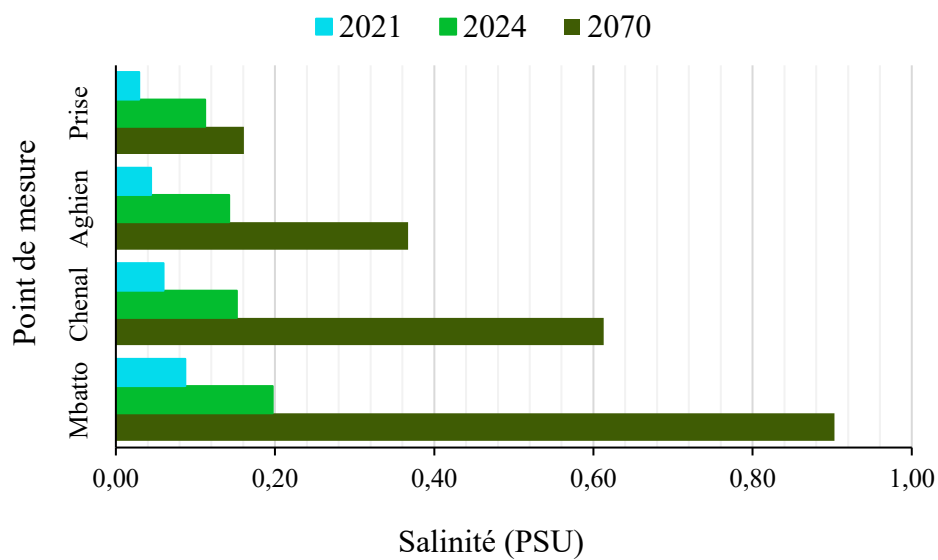
Annexe 9 : Débit de la Comoé et de la Mé en 2024



Annexe 10 : Végétaux aquatiques asséchés (avril 2024) par l'augmentation de la salinité suite à l'ouverture de l'embouchure de la Comoé



Annexe 11 : Aspect des végétaux aquatiques (avril 2024) après l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand Bassam



Annexe 12 : Evolution de la salinité du chenal à la zone de pompage dans la lagune Aghien

PUBLICATIONS

ARTICLES

- Goé B.S.,** Dao A., Akahoua B.D., Koffi J.T., Koffi E.S., Ouédé G.B., Brou L.A., Kamagate B., Kouassi K.L. (2025). Dynamics in salinity diffusion influenced by anthropogenic pressures and climate change: a case study of the Aghien lagoon (Abidjan, Côte d'Ivoire). *International Journal of River Basin Management*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/15715124.2025.2477791>
- Goé B.S.,** Dao A., Akahoua B.D., Koffi J.T. Kamagate B., Kouassi K.L. (2024). Dynamique de diffusion de la salinité dans la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire) sous l'influence des prélèvements. *Editions Paralia CFL*, 18(75) : 737–742. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2024.075>
- Goé B.S.,** Dao A., Brou L.A., Akahoua B.D., Ouédé G.B., Koffi B., Kamagate B., Kouassi K.L. (2024). Impact des pressions anthropiques et des changements climatiques sur la dynamique de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Editions Paralia CFL*, 18(36) : 341–350. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2024.036>
- Goé B.S.A.,** Brou L.A., Koffi E.S., Akahoua B.D., Dao H., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2023). Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 69(1) : 129–142. <https://issr-journals.org/xplore/ijisr/0069/001/IJISR-23-211-02.pdf>

COMMUNICATIONS

Goé B.S., Brou A.D., Dao A., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2024). Conception d'un outil de modélisation hydrodynamique et de transfert de polluant : Application des équations de Saint Venant en schéma implicite. *Colloque international sur la place des initiatives locales dans le développement durable des États – 2024 (PILDDE-2024)*, 23 – 26 Octobre 2024, San-Pédro, Côte d'Ivoire.

Goé B.S., Brou D.A., Brou L.A., Dao A. Koffi K.J.T., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2024). Dynamique de diffusion des sels dans la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire) sous l'influence des pressions anthropiques et des changements climatiques. *24^{èmes} Journées Scientifiques Annuelles de la SOACHIM* ; 12 – 16 Août 2024, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

Goé B.S., Brou D.A., Brou L.A., Dao A. Koffi K.J.T., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2024). Conception d'un outil de modélisation hydrodynamique et de transfert de polluant : Application des équations de Saint Venant en schéma implicite. *24^{èmes} Journées Scientifiques Annuelles de la SOACHIM* ; 12 – 16 Août 2024, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

Goé B.S., Dao A., Akahoua B.D., Koffi J.T. Kamagate B. & Kouassi K.L. (2024). Dynamique de diffusion de la salinité dans la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire) sous l'influence des prélèvements. *XVIII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, 24 – 26 juin 2024, Anglet, France.

Goé B.S., Dao A., Brou L.A., Akahoua B.D., Ouédé G.B., Koffi B., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2024). Impact des pressions anthropiques et des changements climatiques sur la dynamique de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *XVIII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, 24 – 26 juin 2024, Anglet, France.

Goé B.S.A., Brou D.A., Brou L.A., Dao A., Koffi K.J.T., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2023). Salinity Dynamics of Aghien Lagoon under Anthropogenic Influence and Climate Change. *4th IAHR Young Professionals Congress*, 22-24 Novembre 2023, Spain | Online.

Goé B.S., Brou D.A., Brou L.A., Dao A. Koffi K.J.T., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2023). Vulnérabilité des ressources hydriques face à la salinité : cas de la lagune Aghien

(Abidjan, Côte d'Ivoire). *Colloque international interdisciplinaire sur les crises sécuritaires en Afrique*, 14 – 17 novembre 2023, Korhogo, Côte d'Ivoire.

Goé B.S., Brou D.A., Brou L.A., Dao A. Koffi K.J.T., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2023). Vulnérabilité des ressources hydriques face à la salinité : cas de la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire). *23^{èmes} Journées Scientifiques Annuelles de la SOACHIM* ; 07 – 11 Août 2023, Conakry, Guinée.

Goé B.S., Brou L.A., Koffi E.S., Dao A., Kamagate B. & Kouassi K.L. (2022). Caractérisation de la morphologie et des flux sédimentaires dans une lagune utilisée pour l'alimentation en eau potable : cas de la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Journées des Sciences de l'Environnement et du Développement Durable (JSEDD 2022)*, 30 Novembre – 1er Décembre 2022, Daloa, Côte d'Ivoire.



Dynamics in salinity diffusion influenced by anthropogenic pressures and climate change: a case study of the Aghien lagoon (Abidjan, Côte d'Ivoire)

Bi Sehi Goe, Amidou Dao, Akahoua David Brou, Jean Thierry Koffi, Ehouman Serges Koffi, Gla Blaise Ouede, Loukou Alexis Brou, Bamory Kamagate & Kouakou Lazare Kouassi

To cite this article: Bi Sehi Goe, Amidou Dao, Akahoua David Brou, Jean Thierry Koffi, Ehouman Serges Koffi, Gla Blaise Ouede, Loukou Alexis Brou, Bamory Kamagate & Kouakou Lazare Kouassi (24 Mar 2025): Dynamics in salinity diffusion influenced by anthropogenic pressures and climate change: a case study of the Aghien lagoon (Abidjan, Côte d'Ivoire), International Journal of River Basin Management, DOI: [10.1080/15715124.2025.2477791](https://doi.org/10.1080/15715124.2025.2477791)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/15715124.2025.2477791>

 View supplementary material 

 Published online: 24 Mar 2025.

 Submit your article to this journal 

 View related articles 

 View Crossmark data 



Dynamics in salinity diffusion influenced by anthropogenic pressures and climate change: a case study of the Aghien lagoon (Abidjan, Côte d'Ivoire)

Bi Sehi Goe^a, Amidou Dao^b, Akahoua David Brou^a, Jean Thierry Koffi^b, Ehouman Serges Koffi^b, Gla Blaise Ouede^a, Loukou Alexis Brou^a, Bamory Kamagate^b and Kouakou Lazare Kouassi^a

^aLaboratory of Environmental Sciences and Technologies, Jean Lorougnon Guédé University, Daloa, Côte d'Ivoire; ^bGeosciences and Environment Laboratory, Nangui Abrogoua University, Abidjan 02, Côte d'Ivoire

ABSTRACT

By 2070, the Aghien Lagoon, which is influenced by both riverine and marine inputs, is expected to experience the cumulative effects of anthropogenic activities particularly the opening of the Comoe river estuary and climate change. However, the medium-term impact of these pressures on the lagoon's salinity dynamics has never been assessed. This study aims to evaluate the influence of these factors on the salinity dynamics of the Aghien lagoon up to 2070. To this end, discharge and water level data were collected. Depth and salinity measurements of the tributaries and the lagoon were conducted before and after the opening of the estuary. The collected data were then used to validate a hydrodynamic and salinity diffusion model. Simulations indicated that a sea level rise under the SSP5-8.5 scenario would result in a salinity increase of approximately 0.3 PSU, representing a 200% rise. However, this increase appears to have no effect on the salinity of the northern part of the lagoon, where water abstraction activities would take place. Consequently, the Aghien Lagoon could potentially be used for drinking water production by 2070. Nevertheless, a more comprehensive understanding of vertical salinity variation within the lagoon necessitates three-dimensional modelling.

ARTICLE HISTORY

Received 30 September 2024
Accepted 6 March 2025

ASSOCIATE EDITOR

Wajid Ijaz

KEYWORDS

Salinity dynamics;
anthropogenic pressures;
sea-level rise; Aghien lagoon;
Côte d'Ivoire

1. Introduction

Lagoons are dynamic transitional environments that receive water from both the sea and rivers (Levin *et al.* 2001, Barbier *et al.* 2011). This dynamic allows seawater to be diluted by fresh river water, making lagoons a refuge for many aquatic species. The lagoons thus support activities such as fishing and aquaculture, which are vital to local communities. Despite their many benefits, these ecosystems remain vulnerable to climate change (Cunillera-Montcusí *et al.* 2022).

According to the United Nations, the oceans have absorbed 90% of the heat generated by greenhouse gases, leading to warming waters, ice melt, and rising sea levels (<https://www.un.org/fr/climatechange/science/climate-issues/ocean-impacts>). Between 1902 and 2015, for instance, the global mean sea level rose by 16 cm (IPCC 2018). In recent decades, this rise has accelerated significantly due to the increased melting of glaciers in polar regions (Fettweis *et al.* 2013, Hofer *et al.* 2019, Gallagher *et al.* 2020, Hofer *et al.* 2020, Hanna *et al.* 2021, Mostue *et al.* 2023, Shahi *et al.* 2023). According to the World Meteorological Organisation (WMO 2022), the average annual sea level rise between 2013 and 2021 reached 4.5 mm in 2021. The South Atlantic region is particularly affected by this rapid increase (Oppenheimer *et al.* 2019). In the medium term, under the SSP5-8.5 scenario, mean sea level is projected to rise by approximately 50 cm by 2070 (<https://sealevel.nasa.gov/data/tools/ipcc-ar6-projections-licensing-and-acknowledgements>). Such an increase is likely to enhance marine inflows into lagoons, disrupting their ecological and hydrodynamic balance

(Cunillera-Montcusí *et al.* 2022, Jeppesen *et al.* 2023b). In response to this threat, research efforts have focused on predicting significant wave heights (Wang *et al.* 2022, Adnan *et al.* 2023, Ji *et al.* 2023, Hou *et al.* 2024) and understanding the impact of rising sea levels on lagoon salinity dynamics (Ross *et al.* 2015). Studies by Hilton *et al.* (2008) and Hong and Shen (2012), conducted in Chesapeake Bay and the James river, respectively, indicate that the influence of sea level rise on lagoon salinity depends on the distance between the lagoon and the sea. The further a lagoon is from the sea, the less its salinity is affected by rising sea levels. In Delaware Bay, Ross *et al.* (2015) demonstrated that a 1 m rise in sea level leads to an increase in salinity ranging from 2.5 to 4.4 PSU.

Climate change is also disrupting the global water cycle (Griffiths *et al.* 2003, Bocheva *et al.* 2009, Sugahara *et al.* 2009, Soro *et al.* 2017). In West Africa, numerous studies have reported a decline in rainfall accompanied by increased evaporation from water bodies. In Senegal, for instance, Mbaye *et al.* (2015) observed an overall reduction in river discharge in the Upper Senegal watershed under extreme climate scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), driven by decreased precipitation and heightened evaporation. Similarly, in the watersheds of Côte d'Ivoire, the impact of climate change on rainfall patterns and river flow has been well documented. Soro *et al.* (2017) reported a decline in rainfall of up to 47% between December and April in the Bandama river watershed under the RCP8.5 scenario. According to Coulibaly *et al.* (2018), these climatic changes are expected to result in reduced flows in the Sassandra river watershed in the coming decades. As highlighted by

Ross *et al.* (2015), such reductions in riverine inputs are likely to influence the salinity dynamics of lagoons, potentially altering their ecological balance.

Due to its geographical location and near-zero salinity (Goé *et al.* 2024b), the Aghien Lagoon was selected as a potential source of drinking water for the population of Abidjan. To support this project, studies have been conducted to assess the physico-chemical, bacteriological, and microbiological quality of the lagoon. Traoré *et al.* (2013) initially demonstrated that the waters of this lagoon contain locally high concentrations of faecal coliforms, total coliforms, and faecal streptococci. Subsequently, Koffi *et al.* (2019) reported that the use of agricultural inputs within the Aghien Lagoon catchment area has led to an increase in chlorophyll *a* concentrations, which, according to Moridi (2019), is an indicator of water pollution. The lagoon's waters also exhibit high pH levels and are oversaturated with oxygen (Koffi *et al.* 2019). Furthermore, Coulibaly *et al.* (2014) identified cyanobacteria with the genetic potential to produce toxins, including anatoxins (neurotoxins) and microcystins (hepatotoxins), in the Aghien lagoon. Nevertheless, the contaminants identified in these studies can be effectively removed through a comprehensive water treatment system (Poitelon *et al.* 2011). Thus, the primary factor that could hinder the implementation of this project is salinity, which may increase in the coming years due to anthropogenic pressures and climate change (Jeppesen *et al.* 2023a).

Analysis of hydrological sequences in the Aghien Lagoon catchment has revealed a projected decrease in river inflow of up to 17% by 2070 under the RCP8.5 scenario (N'Dri *et al.* 2019). This reduction is compounded by the extraction of 250,000 m³/day from the Me river the main tributary to the lagoon at high tide (Goé *et al.* 2024a) as well as the opening of the Comoe river estuary. Although Goé *et al.* (2024b) demonstrated that water abstraction from the Me river does not directly increase salinity in the Aghien Lagoon, the combined effects of this extraction and climate change could lead to a gradual rise in salinity concentrations over the medium term. However, no study has yet investigated the dynamics of salinity variations in this lagoon under these pressures. The objective of this study is therefore to assess the evolution of salinity in the Aghien Lagoon under the combined influence of anthropogenic pressures and climate change, using numerical modelling.

Numerical modelling has been shown to be an effective tool for predicting water quality in several papers (Zeinoddini *et al.* 2013, Shourian *et al.* 2016, Zandagba *et al.* 2021). Zeinoddini *et al.* (2013) investigated the effect of wave-flow coupling on the spatio-temporal variation of salinity in Lake Urmia (Iran) using the coupled Mike 21/3 FM model. Salfavi *et al.* (2015) also investigated the spatial structure of salinity in the same Lake Urmia using the 2D hydrodynamic Mike 21 flow model FM. More recently, Zandagba *et al.* (2021) simulated the transport and dispersion of salinity in Lake Nokoue (Benin) in two dimensions using a hydrodynamic model. In our study, we use the Mike 21 Flow Model FM to assess the impact of anthropogenic pressures and climate change on salinity dynamics in the Aghien lagoon in 2070.

2. Materials and methods

2.1. Presentation of the study area

The study area comprises the basin of the Aghien lagoon, approximately 11 km long and the natural channel that connects this lagoon to the Potou lagoon downstream (Figure 1). This area lies in south-eastern Côte d'Ivoire between longitudes 3°48'30"W and 3°55'30"W and latitudes 5°21'30"N and 5°27'00"N. The Aghien lagoon is permanently fed by inflows from the Djibi and Bete rivers, to which are added the waters of the Me river and the dynamic tidal wave at high tide (Goé *et al.* 2024a). The climate in this area is equatorial, with two rainy seasons and two dry seasons. The main rainy season runs from May to July, and the short rainy season from October to November. The short dry season starts in August and ends in September, while the long dry season runs from December to April (Koffi *et al.* 2019). The surface area of the water body that is the subject of this study is estimated at 21 km².

2.2. Data used in simulations

This study required data on precipitation, wind speeds and directions, as well as hydrometric and water level data. These data, which were used to design the hydrodynamic model, were collected from April to September 2021. They were provided by the management of the Institute for Research and Development (IRD) at Nangui Abrogoua University. Sea level rises under the extreme climate change scenario SSP5-8.5, visualised at <https://sealevel.nasa.gov/data/tools/ipcc-ar6-projections-licensing-and-acknowledgements>, at the Takoradi station (Ghana) were used to simulate salinity diffusion up to 2070. The statistical analysis of flow data for the Djibi, Bete and Me rivers is shown in Table 1. Flows in the tributaries of this lagoon are high between June and August and increase again in early September (Koffi *et al.* 2019).

2.3. In situ measurement of water compartment salinity

Salinity measurements were carried out in April 2021 and 2024, before and after the opening of the mouth of the Comoe river at Grand Bassam. Measurements were taken at 14 points divided into 4 compartments (Table 2). At each point, measurements were taken using a HANNA multi-parameter at three depth levels (surface (S), middle (M) and bottom (F)). After each sampling, the previously calibrated multi-parameter probe is immersed in the water sample for in situ salinity measurement.

2.4. Collection and analysis of sediment samples

For this study, 48 sediment samples were collected using a Van Veen grab sampler. The geographical coordinates of the sampling points were recorded, and the sand samples were transported to the laboratory. In the laboratory, after washing and hydrochloric acid etching of the sand sediments, 400g of each sample is taken and oven-dried at 105° C for 48 h. After drying, 100 g of each dried sample is passed, for 10 min, over a column of 16 sieves (ranging in size from 63 to 5000 µm) mounted on a vibrating sieve shaker.

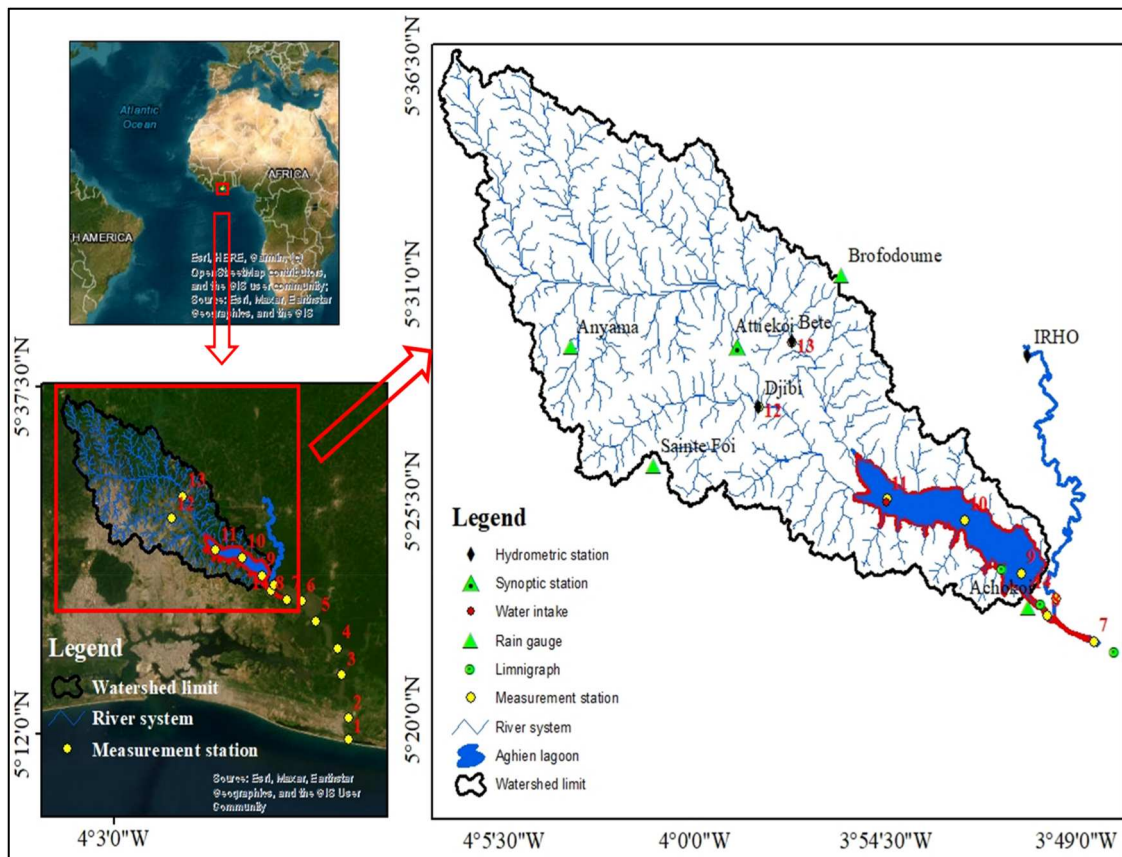


Figure 1. Location of study area.

The cumulative rejects from each sieve are used to construct the particle size curve, from which the mean particle size (Mz) is determined (Rivière 1977).

$$Mz(\Phi) = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \quad (1)$$

where Φ_{16} , Φ_{50} and Φ_{84} correspond respectively to the diameters of 16%, 50% and 84% of the cumulative percentages. The average particle size of each sample was interpolated in ArcGIS 10.4.1 to represent the lagoon's particle size facies. Knowledge of the granulometric facies facilitates selection of the roughness coefficient for calibration of the hydrodynamic model.

2.5. Sounding and bathymetric data processing

Bathymetric surveys, which involve measuring depths by determining the difference between the free surface of the water and the bottom, are carried out using a Humminbird Helix 7 echo sounder. The echo sounder data obtained are used to produce a 2D bathymetric map of the area, and a 3D bathymetric map of the Aghien lagoon, also for meshing the area to be modelled.

Table 1. Statistical analysis of rivers flows data.

Statistics parameters	Me	Djibi	Bete
Maximum	164.1	14.2	17.6
Minimum	6.8	1.6	3.8
Mean	46.9	2.9	6.4
Standard deviation	40.1	1.8	2.9

2.6. Modelling salinity diffusion

The dynamics of salinity diffusion are simulated using the Mike 21 Flow Model FM. The Mike 21 Flow Model FM software is a 2D modelling tool applicable to the simulation of hydraulic and environmental phenomena in lakes, estuaries, bays, coastal areas and seas where stratification can be neglected (DHI 2021). It can be used to model transient or steady state free surface flows, with the ability to account for spatial variations in roughness, flow obstructions and crossing structures. What's more, a robust in-water and out-of-water cell algorithm simulates correct wave propagation (DHI 2021). The use of a variable time step allows the calculation time step to be automatically adjusted to stabilise the model or, on the contrary, to accelerate the calculation speed according to the hydrodynamic conditions in order to obtain results by solving the Saint-Venant equations in finite volumes. To this end, the hydrodynamic module 'Mike 21 HD' is first validated by solving Equations (2)–(4) using the unstructured mesh finite volume method (DHI 2021):

Table 2. Measurement compartment.

Compartments	I (Estuarine domain)	II (Transition domain)	III (Study area)	IV (Fluvial domain)
Measurement points	(1) Comoe estuary (2) Bassam bridge (3) Ebra (4) Elokate	(1) Down. ^a Potou (2) Potou (3) Up. ^b Potou	(1) Channel (2) South of Aghien (3) Center of Aghien (4) North of Aghien	(1) Djibi (2) Bete (3) Me

^aDownstream.

^bUpstream.

Equation of continuity:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Equation of momentum:

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = & -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + fhv \\ & - \frac{\tau_{fx}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} + \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = & -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} - fhv \\ & - \frac{\tau_{fy}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

In these equations, h is the height of the water column, u and v are the velocity components in the X and Y directions, η is the elevation of the free water surface, g is the force of gravity, p_A is the atmospheric pressure, ρ_0 is the reference density of water, ρ the density of the water studied, f is the Coriolis force, τ_f is the stress due to bottom roughness, τ_s is the stress due to wind friction on the surface and T stress due to sidewall roughness. For more details on the modelling of source terms, please refer to the scientific guide of the Mike 21 hydrodynamics and transport module (DHI 2021).

2.6.1. Parameterisation of the hydrodynamic model

Parameterisation involves meshing the study area, setting boundary and initial conditions, assigning hydrodynamic parameters, calibrating and validating the hydrodynamic model over dry and wet periods (Figure 2). Calibration and validation over different periods ensures that the model can faithfully reproduce field observations. For this purpose,

upstream boundary conditions were applied to the tributaries (Djibi, Bete and Me rivers). At the downstream boundary, a dynamic condition was used for water levels in the Potou lagoon. A level of -1 m was defined as the initial condition in order to better assess the filling of the lagoon. The performance of the model was assessed by analysing the correlation and determination coefficients, using the coefficient of determination (r^2) and the root mean square error (RMSE) (Alizadeh *et al.* 2017).

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^N (h_{\text{obs},i} - h_{\text{sim},i})}{N} \quad (5)$$

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (h_{\text{obs},i} - \bar{h}_{\text{obs}})(h_{\text{sim},i} - \bar{h}_{\text{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_{\text{obs},i} - \bar{h}_{\text{obs}})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (h_{\text{sim},i} - \bar{h}_{\text{sim}})^2}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_{\text{obs},i} - h_{\text{sim},i})^2}{N}} \quad (7)$$

In these equations, $h_{\text{obs},i}$ is the elementary water level observed, $h_{\text{sim},i}$ the elementary water level simulated by the model and N is the number of observations.

The hydrodynamic model is considered satisfactory if the coefficient of determination is greater than or equal to 60% (0.6), the bias is close to 0.0 and the RMSE is less than 10 (Ritter and Muñoz-Carpena 2013, Moriasi *et al.* 2015, Alizadeh *et al.* 2017).

2.6.2. Salinity diffusion dynamics simulation

Once the hydrodynamic model has been validated, salinity transfer and diffusion are simulated by solving the transport

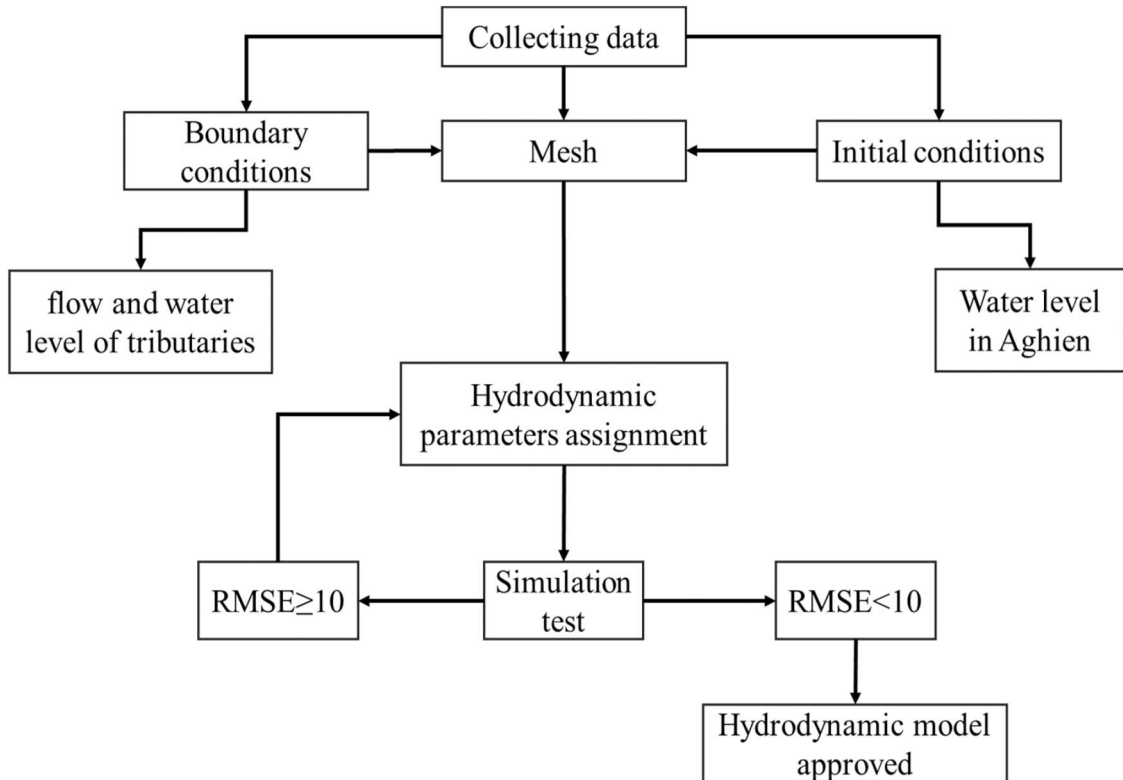


Figure 2. Hydrodynamic model validation process.

equation (7):

$$\frac{\partial hS}{\partial t} + \frac{\partial huS}{\partial x} + \frac{\partial hvS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_C \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_C \frac{\partial S}{\partial y} \right) - hk_p S \quad (8)$$

where S is depth-averaged salinity, D_C is the diffusion coefficient and k_p a degrowth factor.

During the simulations, the MIKE 21 Flow Model FM is configured to maintain a constant water temperature (25°C), with only the salinity varying. Three 15-day simulations, during which salinity is taken as PSU, are carried out for this exercise:

- The first simulation reproduces the observations made in the field before the opening of the Comoe river estuary, a test to verify the model's effectiveness. During this simulation, the salinity measured in the field during the corresponding period is imposed at the upstream and downstream boundaries. An initial salinity condition of 0.0 PSU is imposed on the model to better assess the influence of saltwater intrusion from tributaries into the lagoon.
- The second simulation, taking into account the effect of the opening of the Comoe river estuary at Grand Bassam, identifies the spatial effect of this opening on the salinity of all the water in Aghien Lagoon. In this simulation, the initial state of the lagoon is that modelled in the first simulation. The upstream boundary conditions for salinity are maintained; only the downstream boundary condition is modified. It is taken as the mean salinity measured at Potou lagoon in April 2024 after the opening of this estuary.
- The final simulation, which takes account of rising sea levels and falling river tributary inflows, highlights the effects of climate change on the salinity of this lagoon in the medium term (2070). During this simulation, the upstream boundary conditions for salinity are kept

consistent with those of the second simulation, and the downstream boundary condition is modified. The flows and water levels defined as boundary conditions are modified. River flows are lowered by 17% according to the projections of N'Dri *et al.* (2019), and water levels are adjusted according to the extreme climate change scenario SSP5-8.5.

3. Results

3.1. Salinity of the lagoon and tributaries

The rivers tributaries (compartment IV) have average salinities of 0.0, 0.1 and 0.2 PSU, corresponding to the salinity of the Me, Bete and Djibi rivers respectively. These salinity values remained unchanged after the opening of the Comoe river estuary (Figure 3(a)). It appears that the salinity of the tributaries of the Aghien lagoon is not influenced by dynamic tidal variations, in particular the opening of the Comoe river estuary.

However, measurements in compartment III (study area) showed a variation in mean salinity depending on the state of the Comoe river. When the estuary is closed, the salinity is 0.0 PSU in the southern zone of the lagoon and 0.2 PSU in the northern zone. When the estuary is open, the salinity reaches 0.18 PSU in the upstream channel and 0.17 PSU from the south to the centre of the lagoon. In the northern zone of the lagoon, the salinity remained identical (0.2 PSU) to the period before the opening of the mouth (Figure 3(b)). The opening of the Comoe estuary at Grand Bassam led to an increase in salinity in the upstream channel and in the Aghien lagoon.

In the transitional compartment (compartment II), salinity increased from 0.1 to 0.2 PSU upstream of the Potou lagoon, from 0.1 to 0.22 PSU within this lagoon and from 0.4 to 1.17 PSU downstream of it, respectively before and after the opening of the Comoe estuary (Figure 3(c)). Since the opening of the Comoe river estuary, this compartment has undergone significant salinity changes.

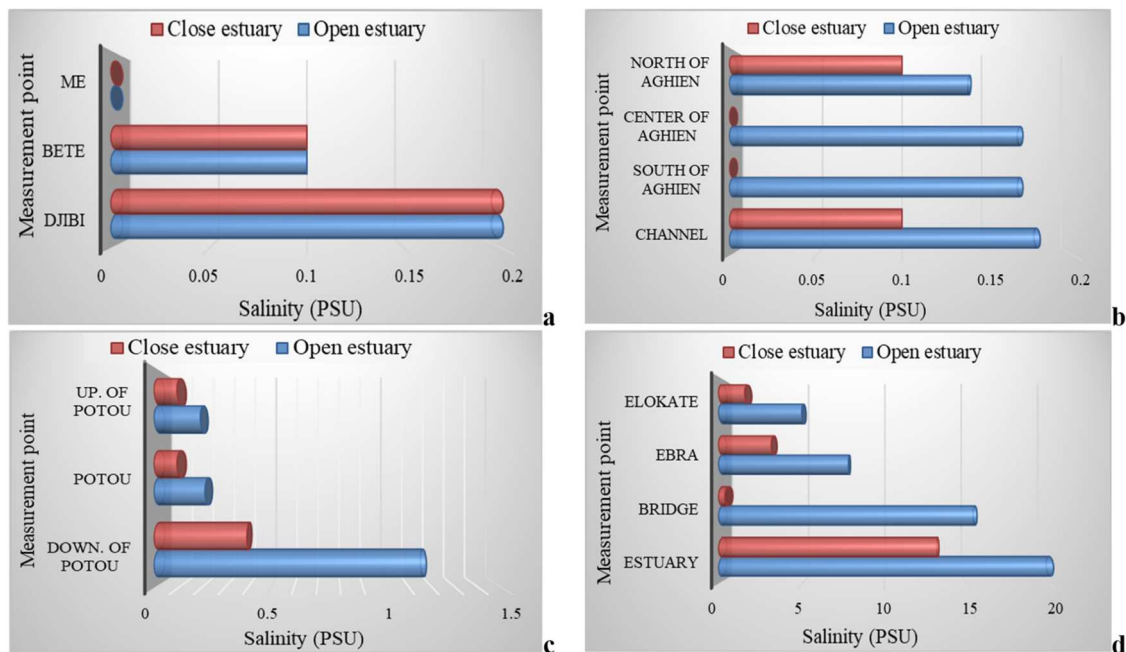


Figure 3. Salinity variation in (a) compartment IV, (b) compartment III, (c) compartment II and (d) compartment I.

The compartment I has the highest salinity. Salinity increased from 13.5 to 20.21 PSU at the Comoe estuary, from 0.4 to 15.6 PSU at the Bassam bridge, from 3.2 to 7.85 PSU at Ebra and from 1.6 to 5.04 PSU at Elokate, respectively before and after the opening of the estuary (Figure 3(d)).

3.2. Granulometry of the Aghien lagoon and channel sediments

All sand sediments analysed show a diverse grain size distribution, with all particles having a diameter of less than 1000 μm and mean sizes ranging from 400 to 850 μm .

The proportion of grains with diameters between 1250 and 3500 μm varies from 0% to 13% in each sand sample. Particles with diameters between 250 and 1250 μm are the most abundant in the majority of samples, accounting for more than 40%. Particles smaller than 250 μm are the least abundant, with proportions below 11% in all samples.

Graphing these proportions as a function of their corresponding diameters produces curves with a logarithmic trend (Figure 4).

The spatial distribution shows that mud and muddy sediments occupy the central band of Aghien lagoon, while sandy sediments are mainly found near the shoreline (Figure 5).

This distribution of sediments in the lagoon and channel bottom will make it easy to select the Manning's coefficient.

3.3. Bathymetry map

The connection channel between the Aghien and Potou Lagoons exhibits highly variable depths, with maximum depths reaching 17 m at the confluence of the Me river (Figure 6). In contrast, the confluence of the Djibi and Bete rivers has depths not exceeding 4 m.

The 3D representation of the Aghien lagoon basin (Figure 7) shows depths ranging from 0.0 to 10.5 m. It also shows the presence of two channels: a main channel along the southern shore and a secondary channel along the northern shore. Analysis of the three-dimensional (3D) bathymetric map of Aghien lagoon reveals two variable morphological units:

- A central morphological unit whose depths vary between 3.5 and 10.5 m. It consists of two channels, one known as the main channel and the other as the secondary channel. The main channel has a maximum depth of 10.5 m with a sigmoidal configuration. Most of it is on the south bank. The secondary channel is shallower (between 5 and 8 m) and lies against the north bank. Between the two channels there are depths between 3.5 and 5 m, which can be compared to shallow areas.
- A peripheral morphological unit with shallow depths between 0.0 and 3.5 m surrounds the central morphological unit. It is located on both sides of the central morphological unit.

3.4. Salinity diffusion dynamics

3.4.1. Calibration and validation of the hydrodynamic model

The model was calibrated with a coefficient of determination of 98.6%, meaning that only 1.4% of the observations were poorly reproduced (Figure 8(a)). During validation, the proportion of poorly reproduced observations increased to 2.7% (Figure 8(b)).

The root mean square errors (RMSE) obtained during calibration and validation were 0.016 and 0.026 m respectively, with an estimated bias of 0.004 m during calibration and -0.019 m during validation.

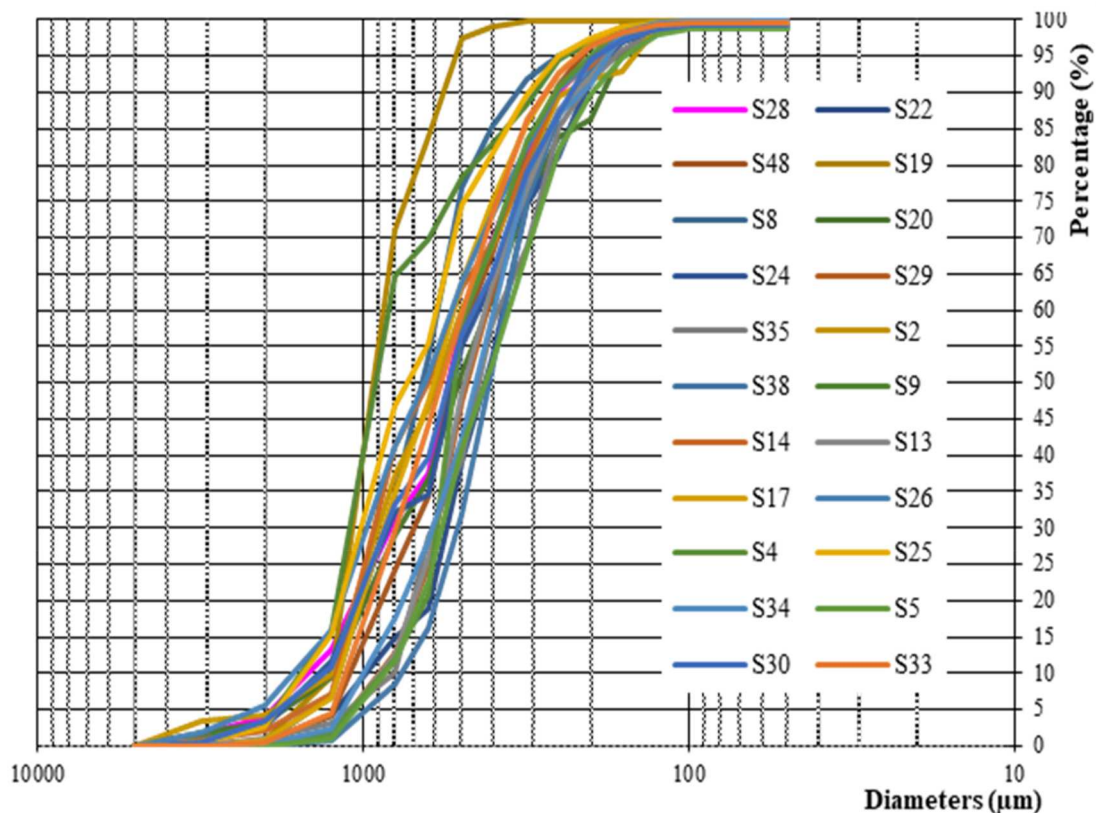


Figure 4. Sieve size distribution.

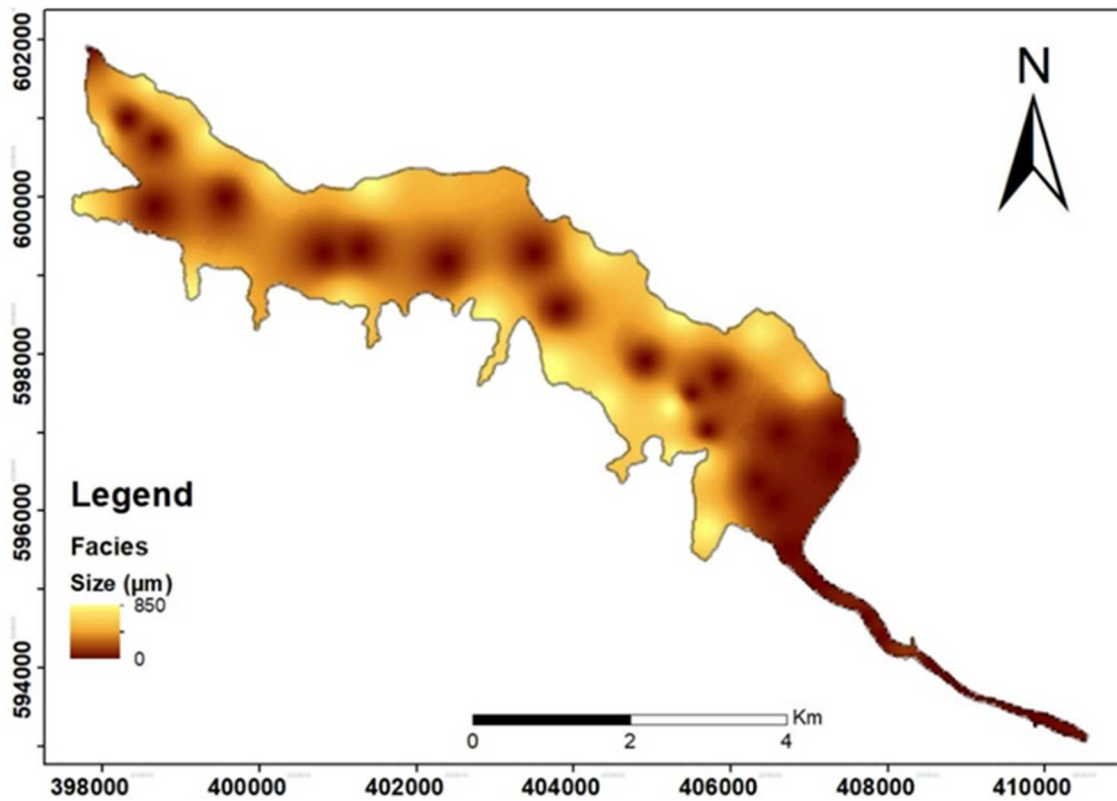


Figure 5. Sediment facies.

Overall, the model struggles to reproduce extreme values, showing an underestimation during the dry period in calibration and an overestimation during the wet period in validation (Figure 8).

The flow velocity fields accurately reproduce the dynamic tidal phenomenon (Figure 9). When the tide level is low, the flows are directed downstream towards the Potou Lagoon (Figure 9(a)). When the tide level is high, the Me river

water masses are driven by marine inflows towards the Aghien Lagoon (Figure 9(b)).

3.4.2. Salinity dynamics before to Comoe river estuary opening

Before the opening of the Comoe river estuary (2021), the salinity of the lagoon ranged from 0.0 PSU to 0.2 PSU

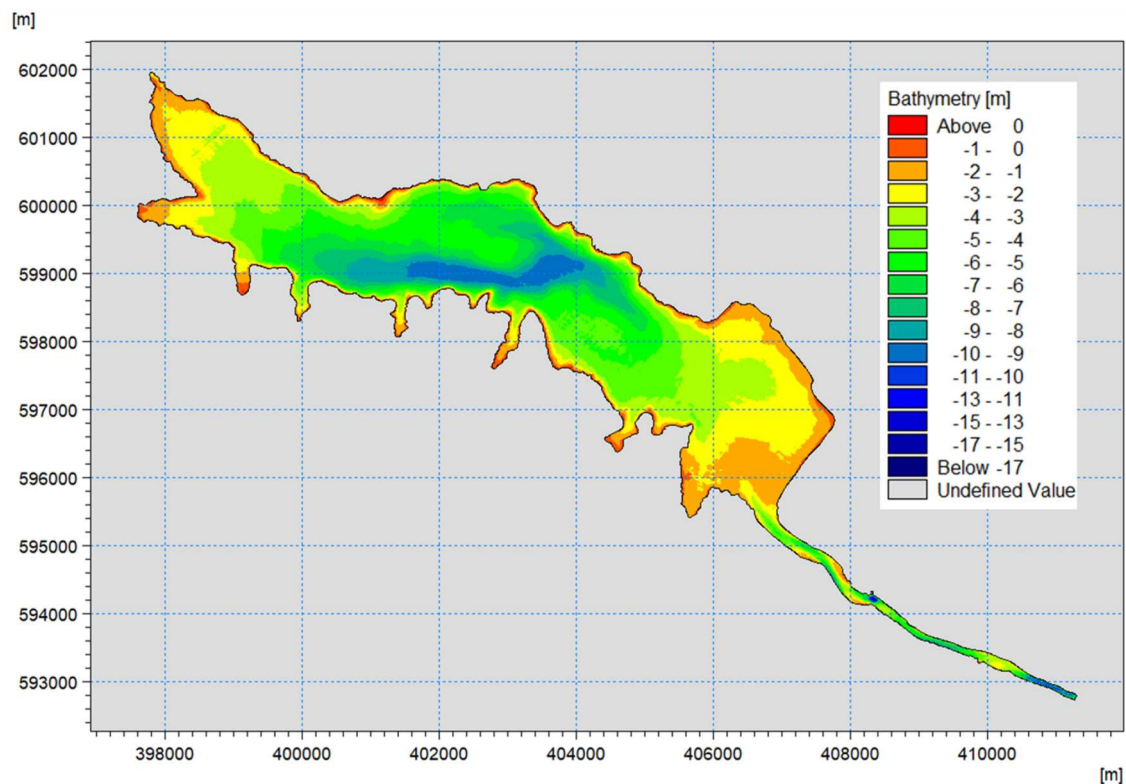


Figure 6. Bathymetric map of the study area.

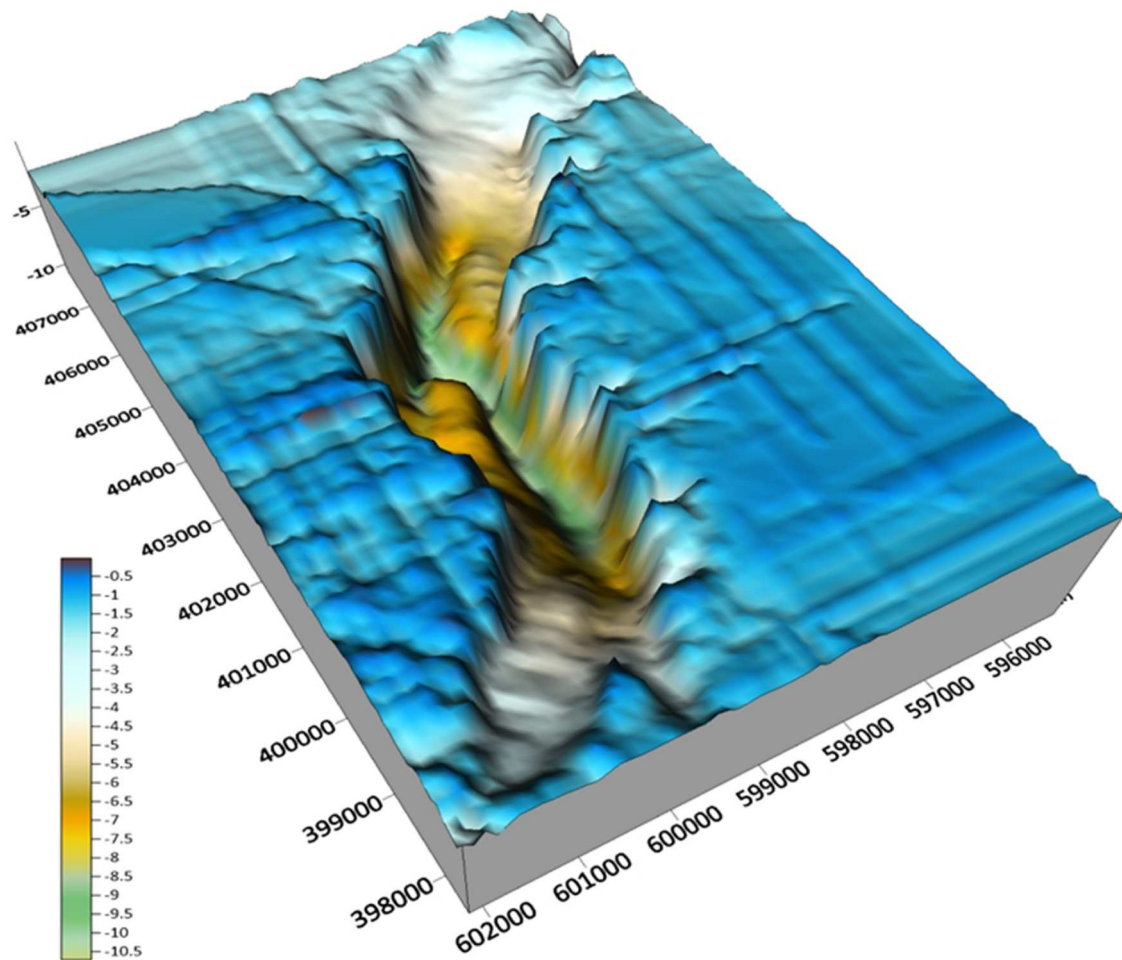


Figure 7. 3D representation of the bottom of the Aghien lagoon.

from south to north during the low water period. The high salinity water came from the Djibi River (Figure 10).

At low tide (Figure 10(a)), the salinity in the channel was about 0.0 PSU. From the southern part of the lagoon to the pumping zone, the salinity remained below 0.07 PSU. Under the influence of dynamic tides, the salinity in the channel reached 0.1 PSU, while it remained below 0.07 PSU from the southern part of the lagoon to the pumping zone (Figure 10(b)).

Near the confluence of the Djibi and Bete rivers, salinity appeared to be unaffected by tidal variations, reaching 0.2 PSU at the Djibi confluence and 0.1 PSU at the Bete confluence (Figure 10).

The model manages to reproduce fairly accurately the variations in salinity in the Aghien lagoon before to the opening of the Comoe river estuary at Grand Bassam.

3.4.3. Salinity dynamics after the opening of the Comoe estuary

After the opening of the Comoe river estuary, the salinity of the Aghien lagoon changed significantly (Figure 11).

At low tide (Figure 11(a)), the salinity in the channel ranged between 0.0 and 0.15 PSU. The downstream area of the Me river confluence recorded the lowest salinity values (≤ 0.06 PSU), while the upstream area showed the highest values, reaching 0.15 PSU after two weeks of simulations.

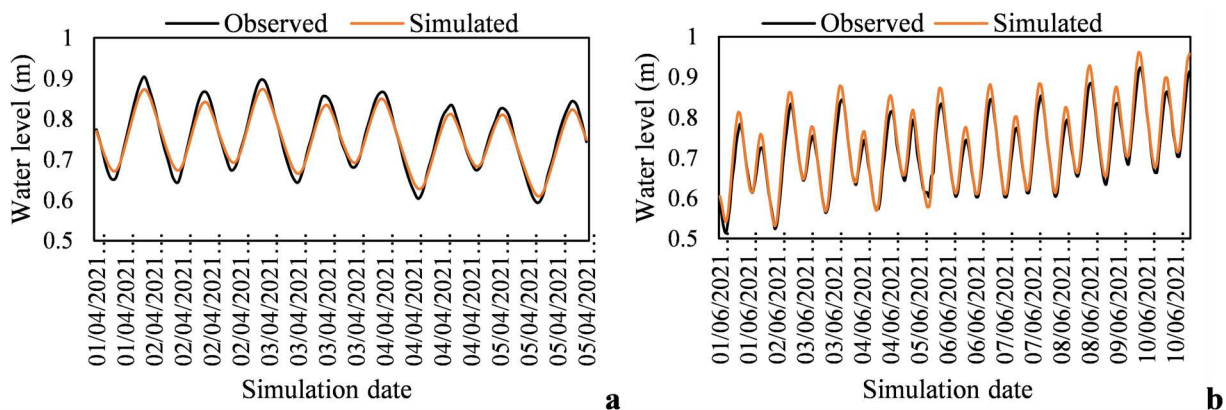


Figure 8. Performance of the model at calibration (a) and validation (b).

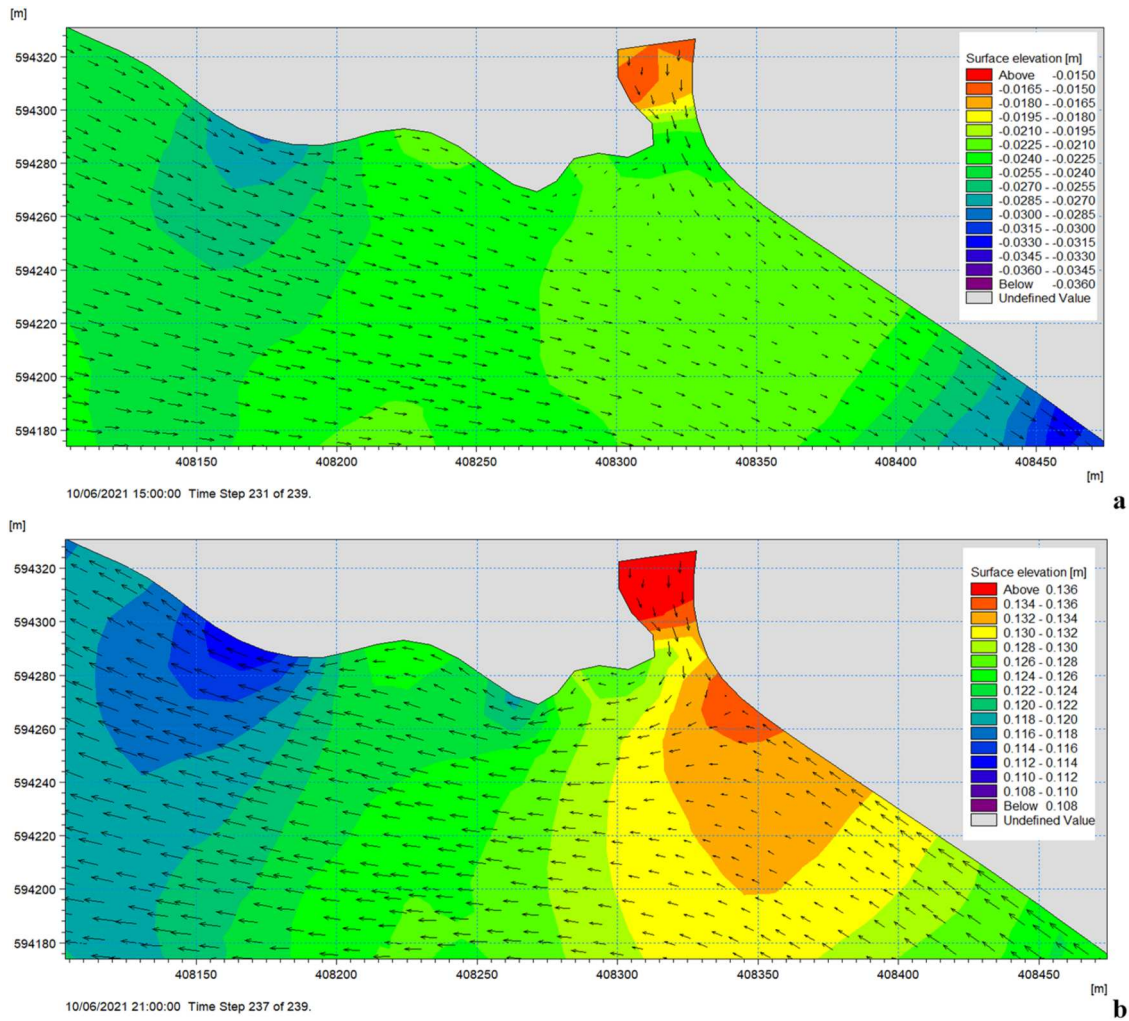


Figure 9. Flow velocity fields at low tide (a) and high tide (b).

Within the lagoon basin, the water masses exhibited uniform salinity levels of 0.15 PSU. However, at the Djibi and Bete confluence, the salinity remained unchanged at 0.2 PSU at Djibi and 0.1 PSU at Bete.

At high tide (Figure 11(b)) Salinity in the channel increased to 0.22 PSU downstream of the Me confluence, compared to 0.20 PSU upstream. At the southern entrance of the Aghien lagoon, a bubble of water from the Me river formed with salinity levels below 0.05 PSU. Beyond this zone, the salinity in the lagoon basin remained unchanged compared to low tide conditions.

At the opening of the Comoe river estuary, the highest salinity recorded throughout the Aghien Lagoon was at the Djibi confluence, reaching 0.2 PSU.

3.4.4. Salinity dynamics to 2070

The impact of climate change on the salinity of the Aghien lagoon is illustrated by a model projection for 2070, following the SSP5-8.5 scenario (Figure 12).

At low tide (Figure 12(a)), the salinity in the channel would not exceed 0.4 PSU and would be close to 0.0 PSU at the confluence with the Me river. From the southern

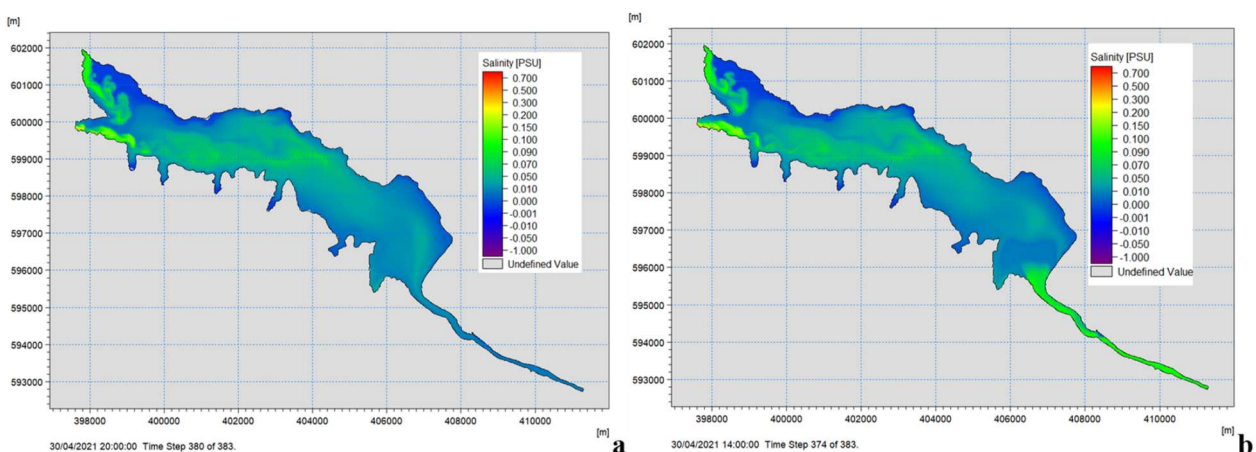


Figure 10. Salinity dynamics at low tide (a) and high tide (b).

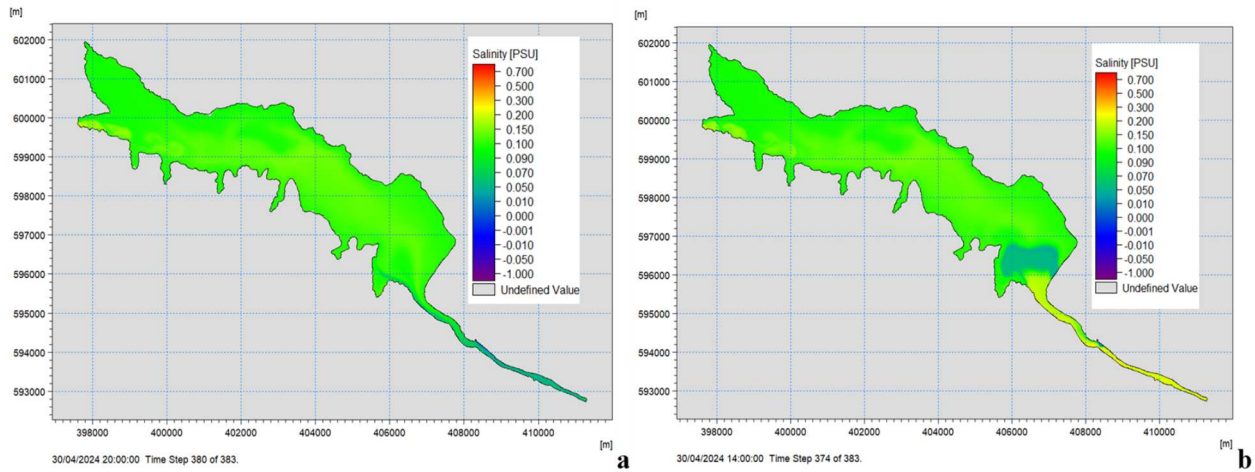


Figure 11. Salinity dynamics at low tide (a) and high tide (b).

zone to the central band of the lagoon, salinity could range from 0.10 to 0.45 PSU. Around the pumping station, the salinity would be around 0.15 PSU.

At high tide (Figure 12(b)), salinity could reach 1.0 PSU downstream of the Me river confluence, compared to 0.8 PSU upstream in the channel. In the Aghien lagoon, salinity levels would remain similar to low tide conditions.

4. Discussion

The salinity measurements taken at high tide during the dry season of 2021 are, on average, estimated at 0.0, 0.1, and 0.2 PSU, respectively, in the Me, Bete, and Djibi lagoons. From the downstream channel to the confluence of the Djibi, salinity ranges between 0.1 and 0.2 PSU at high tide. Except for the Aghien lagoon, the other lagoons of the Ivorian lagoon complex, located near and connected to the Atlantic, display salinities that can reach up to 3.5‰ (Monde *et al.* 2011, Konan *et al.* 2013). The low salinity is likely due to its geographical position and the significant freshwater input from its tributaries (Koffi *et al.* 2019). Indeed, the Aghien lagoon is fed by two permanent rivers, and additionally by the Me river at high tide, with flow rates reaching up to 160 m³/s during flood periods (Koffi *et al.* 2019). Therefore, the distance of the Aghien lagoon from the sea, along with the freshwater inputs from its tributaries, contributes

to the dilution of the salinity of marine inputs. The high salinity in the Djibi is likely due to the significant discharge of wastewater. Specifically, the Djibi river flows through the low-income neighbourhoods of Abobo, which are characterised by inadequate wastewater collection infrastructure, leading to the direct discharge of wastewater into the riverbed (Soro *et al.* 2010, Efebi *et al.* 2017).

The lithology of the Aghien lagoon consists of muddy and sandy sediments. The muddy sediments are located in the central band where depths exceed 2 m. The medium to coarse sand sediments are found near the shores, where the current is almost negligible. The distribution of sandy sediments suggests they originate from the erosion of the lagoon's banks. Indeed, the Aghien lagoon resembles a basin with relatively steep slopes (Eba *et al.* 2016). As a result, during heavy rainfall, runoff is rapid, facilitating the transport of eroded sand particles. Upon reaching the Aghien lagoon, these particles settle due to the reduction in flow energy (Sanchez and Levacher 2007), which occurs as the slopes suddenly decrease. Finer sediments or silts, on the other hand, remain in suspension until they reach deeper areas, where the hydrodynamics are more conducive to flocculation. In these areas, these fine sediments agglomerate through the flocculation process, increasing in mass and subsequently settling through sedimentation due to their weight (Sanchez *et al.* 2005).

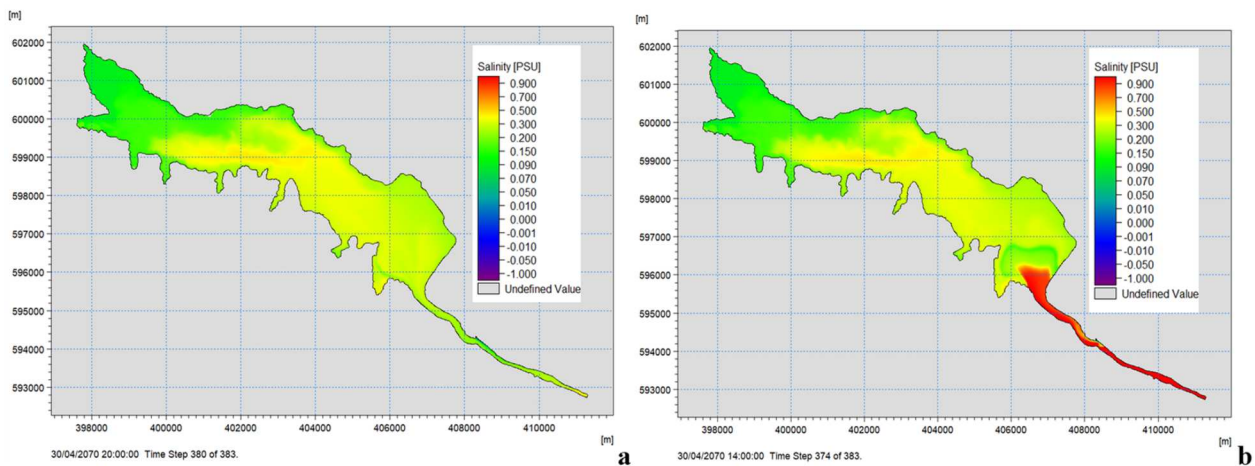


Figure 12. Salinity dynamics at low tide (a) and high tide (b).

The Aghien lagoon is shallow, with depths ranging from 0 to 10.5 m. In the channel, depths reach 17 m at the confluence with the Me river and 8 m elsewhere. The presence of shallow bottoms at the confluence with the Me river could be attributed to the action of strong turbulence generated by opposing currents. Indeed, at this point in the channel, the freshwater inputs from the Me river meet the water from the Potou lagoon downstream or the Aghien lagoon upstream, depending on the dynamic tidal level (Koffi *et al.* 2019). This interaction between water flowing in opposite directions generates vortical phenomena, which are likely responsible for the erosion of the bottom in this area.

The hydrodynamic model was parameterised using a Strickler roughness coefficient of $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. The suitability of this Strickler coefficient is justified by the presence of medium to coarse sand sediments near the shores and in shallower areas of the Aghien lagoon. The model was validated with discrepancies between observed and simulated water levels during both low and high flow periods. These discrepancies may be linked to groundwater movement. According to Ouattara *et al.* (2020), groundwater can either contribute to or be replenished by surface water, depending on whether the groundwater level is above or below the surface water level. The underestimation of observed levels during low flow periods by the model can be explained by the fact that during this period, due to reduced river inputs to the lagoon, its level is lower than that of the groundwater. As a result, the groundwater would recharge the Aghien lagoon during the low flow period. These contributions from the groundwater, which were not included in the modelling, would raise the lagoon's water level, thus causing discrepancies between the observed and simulated water levels during the low flow period (April–May). During high flow periods, the reverse phenomenon occurs. As river inputs are higher during this period, the lagoon's water level would be above that of the groundwater, causing a discharge from the lagoon into the groundwater. This discharge, which was not considered in the model, would account for the discrepancies observed between the observed and simulated water levels during the June–July period, when heavy rainfall occurs in the region (Koffi *et al.* 2019). Furthermore, during the wet season, the flow measured at the IRHO hydrometric station decreases as it approaches its confluence due to overflow losses. These overflow losses, not accounted for when defining the boundary conditions, would explain the larger discrepancies observed during high flow simulations.

The opening of the Comoe river estuary at Grand Bassam results in an increase in the salinity of the channel and the Aghien lagoon, rising from a salinity of 0.1 PSU to a maximum of 0.22 PSU. Indeed, at high tide, the salty waters from the Atlantic undergo an initial dilution by the inputs from the Comoe river before reaching the channel, where they are further diluted by the inputs from the Me river. However, when the Comoe river estuary is open, marine water upwellings passing through the Vridi Canal reach the channel directly without dilution, leading to an increase in salinity in both the channel and the Aghien lagoon. The rise in salinity in the Aghien lagoon following the opening of the Comoe river estuary is thus attributed to a greater influx of seawater into the lagoon.

Simulations have shown that the salinity of the lagoon and the channel are sensitive to sea level rise and the decrease in river inputs by 2070. However, the increase caused by these

factors, coupled with the reduction in freshwater inputs, would not exceed 0.30 PSU. The distance of these waters from the area of marine upwellings could explain the limited variation in salinity. Indeed, Ross *et al.* (2015) demonstrated, using the Savenije model (1993) and direct in situ measurements, that the influence of salinity from marine upwellings in an estuary decreases as one moves further from the sea. Furthermore, the relatively small increase in salinity in the Aghien lagoon could also be explained by the fact that the elevation caused by climate change in the medium term (2070) may not be sufficient to trigger a reduction in the salinity dilution factor in this lagoon. The Aghien lagoon, located more than 31 km from the Comoe river estuary and about 65 km from the Vridi Canal, would experience weak impacts from sea level rise combined with reduced river inputs in 2070, due to the distance the tidal influence would have to travel. In fact, Hilton *et al.* (2008), Hong and Shen (2012), and Ross *et al.* (2015) have shown that the farther a water is from the sea, the less it is influenced by sea level rise.

5. Conclusion

Based on a numerical study, we assessed the impact of tidal variations and climate change on the salinity of the Aghien lagoon. The salinity variations of this lagoon and its tributaries, both before and after the opening of the Comoe river estuary, were examined. Prior to this study, the sediments and bottom morphology were characterised to better configure the hydrodynamic model. The diffusion of salinity in the Aghien lagoon for the year 2070, considering extreme climate change scenarios, was also investigated.

To this end, in situ salinity measurements taken in April 2021 and 2024 showed that, at the level of the river tributaries, the Djibi river is the one that enriches the lagoon with a significant amount of saline water (0.2 PSU). For the Bete and Me rivers, the average salinity remains relatively very low (0.1 and 0.0 PSU, respectively). Regardless of the tidal level, the salinity of these rivers does not experience variation. In the Aghien lagoon and the channel, however, salinity varies according to the dynamic tide. It can reach an average of 0.2 PSU at the confluence of the Djibi river into the lagoon.

Based on the analysis of sediment samples collected from the bottom, it appears that the Aghien lagoon's seabed is covered by muddy sediments in its central band, with medium to coarse sand present near the shores, with average particle sizes ranging from 400 to 850 μm . The bathymetry reveals that the sediments collected from the Aghien lagoon were at depths ranging from 0.0 to 10.5 m. In the channel, they were collected at depths reaching up to 17 m at the confluence of the Me river. Outside this area, the depths in the remaining part of the channel are less than 17.0 m.

Overall, after the opening of the Comoe river estuary, the average salinity reached 0.18 PSU in the southern zone and 0.14 PSU in the central band of the Aghien lagoon at high tide. Monitoring the evolution of the salinity in the Aghien lagoon and the channel using a 2D model revealed an increase in salinity due to the effects of climate change. According to the extreme RCP8.5 and SSP5-8.5 scenarios, in the Aghien lagoon, at high tide, the average salinity could reach 0.45 PSU (a relative increase of 200% in salinity) in the central band. The opening of the Comoe river estuary

at Grand Bassam and the rise in sea level under the extreme SSP5-8.5 scenario would not lead to a significant change in the salinity of the waters in the northern zone of the Aghien lagoon. Therefore, the amount of seawater reaching the northern zone of the Aghien lagoon is very low compared to the river inputs from the Djibi and Bete rivers, even during low flow periods.

This study demonstrates that the water in the northern zone of the Aghien Lagoon could remain suitable for treatment and use in domestic or industrial applications despite the medium-term effects of climate change. Additionally, our findings indicate that farmers could continue to use water bodies in the northern part of the lagoon for irrigation until 2070. Finally, the results of this study provide valuable insights for identifying habitats of salinity-sensitive species, thereby aiding in the prioritisation of their conservation.

However, the two-dimensional modelling of salinity diffusion dynamics in this study does not account for vertical variations in salinity within the Aghien Lagoon. In the medium term, a three-dimensional modelling approach would therefore be necessary to gain a more comprehensive understanding of these variations.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Note on contributors

Bi Sehi Goé is a PhD student in hydrosedimentology at Jean Lorougnon Guédé University (Daloa, Côte d'Ivoire). He is working on modelling the dynamics of water and sediments in the Aghien lagoon, as well as the dynamics of salinity diffusion under the influence of anthropogenic pressures and climate change. He has published several scientific articles, including Impact des pressions anthropiques et des changements climatiques sur la dynamique de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) (Goé et al. 2024) and Dynamique de diffusion de la salinité dans la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire) sous l'influence des prélèvements (Goé et al. 2024).

Amidou Dao is an Associate Professor of Environmental Science and Management, Nangui Abrogoua University (Abidjan, Côte d'Ivoire). He is a specialist in Hydrological sciences (water resources and risk management) and the lead Practical Work of Hydrology-Hydrogeology in the Geosciences and Environment Laboratory. He has published several scientific articles, including Modeling of the land use dynamics of small watersheds in the Abidjan district (Ivory Coast) and an Assessment of its Impacts on Their Water Retention Capacity in the Context of Flood Risk (Yéo et al. 2025).

Akahoua David Brou obtained his PhD in applied mathematics, fluid mechanics option, from the Félix Houphouët Boigny University of Abidjan (Côte d'Ivoire) in February 2013. Since 2013, he has been a teacher-researcher at the Jean Lorougnon Guédé University (Daloa, Côte d'Ivoire) in the Laboratory of Environmental Science and Technology. He is a specialist in numerical methods in fluid mechanics and deputy director of the research project 'Implementation of decision support tools in the planning and control of environmental phenomena related to fluid dynamics'. He has published several scientific articles, including: Numerical Study of the Effect of the Ignition Procedure on the Front of a Surface Fire from a 3D Numerical Model (Brou et al. 2023), Numerical Study of the Effectiveness of a Firebreak in a Savanna Area and the Sizing Rules by an Optimised Fire Propagation Model (Brou et al. 2022).

Jean Thierry Koffi obtained his PhD in geosciences, hydrochemistry option, at the Nangui Abrogoua University (Abidjan, Côte d'Ivoire) in 2020. Since 2022, he has been a teacher-researcher at the University of Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire) in the Geosciences and Environment Laboratory. He is a specialist in water quality assessment and raw water treatment. His latest publications include Evaluation du

niveau de contamination des eaux souterraines par les éléments traces métalliques dans le département de Zouan-Hounien (Ouest de la Côte d'Ivoire) (Djadé et al. 2020).

Ehouman Serges Koffi obtained his PhD in geosciences, Hydrology option, at the Nangui Abrogoua University (Abidjan, Côte d'Ivoire) in 2021. Since 2022, he has been a teacher-researcher at the University of Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire) in the Geosciences and Environment Laboratory. He is a specialist in hydrology. His latest publications include Dynamics of Water Erosion in the Aghien Lagoon Catchment (Koffi et al. 2024) and Hydrological and Water Quality Assessment of the Aghien Lagoon Hydrosystem (Abidjan, Côte d'Ivoire) (Koffi et al. 2019).

Gla Blaise Ouédé holds a PhD in hydrology and agroclimatology. His research activities are conducted within the Environmental Science and Technology Laboratory. He was a consultant on the environmental and social impact studies for the ENDEVOUR and PERSEUS MINING mines, and took part in the Guéyo drinking water supply project. His latest publications including : Evaluation à long terme de l'impact de la dynamique de l'occupation des sols sur les écoulements dans le bassin versant du Haut Bandama (Nord Côte d'Ivoire) (Ouédé et al. 2023).

Loukou Alexis Brou obtained his PhD in geosciences, Hydrology option, at the Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire) in 2020. Since 2020, he has been a teacher-researcher at the Jean Lorougnon Guédé University (Abidjan, Côte d'Ivoire) in the Geosciences and Environment Laboratory. He is specialist in hydrology. His latest publications including : Assessment of the sedimentation and trapping efficiency in dam reservoirs by applying the settling basin framework (Koffi et al. 2023).

Bamory Kamagaté obtained his PhD in water sciences in the continental environment at University of Montpellier 2 (France). He is Full Professor at Nangui Abrogoua University (Abidjan, Côte d'Ivoire). He is specialist in Geochemistry, Hydrology and Hydrogeology. He has published several scientific articles, including : Dynamics of Surface Conditions and Hydrological Functioning: The Case of the Ivorian River Basin Aghien Lagoon with the SWAT Model (Daifourou et al. 2024).

Kouakou Lazare Kouassi obtained his PhD in Hydrosedimentology at Nangui Abrogoua University (Abidjan, Côte d'Ivoire). He is Full Professor at Jean Lorougnon Guédé University (Daloa, Côte d'Ivoire) in the Laboratory of Environmental Science and Technology. He is specialist in Sedimentology, Hydraulics and Flood Modelling. He is Director of the Environment Training and Research Unit. He has published several scientific articles, including : Identification of hydrogeological and geoelectrical parameters influencing the productivity of boreholes in the commune of Daloa (Central-Western of Côte d'Ivoire) (Koua et al. 2024) and Two-Dimensional Numerical Simulation of the Hydro-Sedimentary Phenomena in Lake Taabo, Côte d'Ivoire (Kouassi et al. 2013).

ORCID

Bi Sehi Goe  <http://orcid.org/0000-0002-8962-0243>

References

- Adnan, R.M., et al., 2023. Short-term probabilistic prediction of significant wave height using Bayesian model averaging: case study of Chabahar Port, Iran. *Ocean Engineering*, 272, 113887. doi:10.1016/j.oceaneng.2023.113887.
- Alizadeh, M.J., et al., 2017. Prediction of longitudinal dispersion coefficient in natural rivers using a cluster-based Bayesian network. *Environmental Earth Sciences*, 76, 86. doi:10.1007/s12665-016-6379-6.
- Barbier, E.B., et al., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81 (2), 169–193. doi:10.1890/101510.1.
- Bocheva, L., Simeonova, M.P., and Gospodinova, I., 2009. Variability and trends of extreme precipitation events over Bulgaria (1961–2005). *Atmospheric Research*, 93 (1-3), 490–497. doi:10.1016/j.atmosres.2008.10.025.
- Coulbaly, K.J., et al., 2014. Detection of potentially toxic microcystis and cyanobacteria by molecular method in Côte d'Ivoire. *The Experiment*, 26 (1), 1775–1787. Available from: <https://www.academia.edu/72333799/>.

- Coulibaly, N., et al., 2018. The impact of climate change on water resource availability in a trans-boundary basin in West Africa: the case of Sassandra. *hydrology*, 5 (1), 12. doi:10.3390/hydrology5010012.
- Cunillera-Montcusí, D., et al., 2022. Freshwater salinisation: a research agenda for a saltier world. *Trends in Ecology & Evolution*, 37, 440–453. doi:10.1016/j.tree.2021.12.005.
- DHI-Danish Hydraulic Institut, 2021. *Hydrodynamic and transport module*. Scientific documentation, 59. Available from: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/MIKE_21.htm.
- Eba, A.E.L., et al., 2016. Évaluation de la vulnérabilité à la pollution d'une eau de surface destinée à l'adduction d'eau potable d'une métropole. Cas de la lagune Agheïn à Abidjan, (Sud de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12 (36), 306–326. doi:10.19044/esj.2016.v12n36p306.
- Effebi, K.R., et al., 2017. Analyse et répartition spatiale des principales sources de pollution potentielle de la lagune Aghien, Sud-Est Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, 13 (6), 417–434. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/351691033>.
- Fettweis, X., et al., 2013. Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, 7, 469–489. doi:10.5194/tc-7-469-2013
- Gallagher, M.R., et al., 2020. Warm temperature extremes across Greenland connected to clouds. *Geophysical Research Letters*, 47 (9), e2019GL086059. doi:10.1029/2019GL086059.
- Goé, B.S., et al., 2024a. Impact des pressions anthropiques et des changements climatiques sur la dynamique de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *XVIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, Anglet, 24–26 June 2024. Editions Paralia CFL, 341–350. doi:10.5150jngcgc.2024.036.
- Goé, B.S., et al., 2024b. Dynamique de diffusion de la salinité dans la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire) sous l'influence des prélèvements. *XVIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, Anglet, 24–26 June 2024. Editions Paralia CFL, 737–742. doi:10.5150jngcgc.2024.075.
- Griffiths, G.M., Salinger, M.J., and Leleu, I., 2003. Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific convergence zone. *International Journal of Climatology*, 23, 847–869. doi:10.1002/joc.923.
- Hanna, E., et al., 2021. Greenland surface air temperature changes from 1981 to 2019 and implications for ice-sheet melt and mass-balance change. *International Journal of Climatology*, 41 (1), E1336–E1352. doi:10.1002/joc.6771.
- Hilton, T.W., et al., 2008. Is there a signal of sea-level rise in Chesapeake Bay salinity?. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113 (9), 1–12. doi:10.1029/2007JC004247.
- Hofer, S., et al., 2019. Cloud microphysics and circulation anomalies control differences in future Greenland melt. *Nature Climate Change*, 9, 523–528. doi:10.1038/s41558-019-0507-8.
- Hofer, S., et al., 2020. Greater Greenland Ice Sheet contribution to global sea level rise in CMIP6. *Nature Communications*, 11 (6289), 1–11. doi:10.1038/s41467-020-20011-8.
- Hong, B. and Shen, J., 2012. Responses of estuarine salinity and transport processes to potential future sea-level rise in the Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 104–105, 33–45. doi:10.1016/j.ecss.2012.03.014.
- Hou, B., et al., 2024. Predicting significant wave height in the South China Sea using the SAC-ConvLSTM model. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1424714. doi:10.3389/fmars.2024.1424714.
- IPCC, 2018. Summary for policymakers. In: V. Masson-Delmotte, et al., eds. *Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge: Cambridge University Press, 3–24. doi:10.1017/9781009157940.001.
- Jeppesen, E., et al., 2023b. Effects of induced changes in salinity on inland and coastal water ecosystems: editor summary. *Hydrobiologia*, 850, 4343–4349. doi:10.1007/s10750-023-05352-x.
- Jeppesen, E., Beklioglu, M., and Zadereev, E., 2023a. The effects of global climate change on water level and salinity: causes and effects. *Water*, 15, 2853. doi:10.3390/w15152853.
- Ji, Q., et al., 2023. Short-term prediction of the significant wave height and average wave period based on the variational mode decomposition-temporal convolutional network-long short-term memory (VMD-TCN-LSTM) algorithm. *Ocean Science*, 19, 1561–1578. doi:10.5194/os-19-1561-2023.
- Koffi, E.S., et al., 2019. Hydrological and water quality assessment of the Aghien Lagoon hydrosystem (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Hydrological Sciences Journal*, 64 (15), 1893–1908. doi:10.1080/02626667.2019.1672875.
- Konan, K.S., et al., 2013. Hydrologie et hydrochimie des eaux dans la zone de construction du chenal du port de pêche de Grand-Lahou, Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7 (2), 819–831. doi:10.4314/ijbcs.v7i2.37.
- Levin, L.A., et al., 2001. The function of marine critical transition zones and the importance of sediment biodiversity. *Ecosystems*, 4, 430–451. doi:10.1007/s10021-001-0021-4.
- Mbaye, M.L., et al., 2015. Assessment of climate change impact on water resources in the Upper Senegal Basin (West Africa). *American Journal of Climate Change*, 4, 77–93. doi:10.4236/ajcc.2015.41008.
- Monde, S., et al., 2011. Hydrodynamique de l'estuaire de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Revue Paralia*, 4, 1.1–1.14. doi:10.5150/revue-paralia.2011.001.
- Moriasi, D.N., et al., 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58 (6), 1763–1785. doi:10.13031/trans.58.10715.
- Moridi, A., 2019. Dealing with reservoir eutrophication in a trans-boundary river. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 2951–2960. doi:10.1007/s13762-018-1775-y.
- Mostue, I.A., et al., 2023. Cloud and ice-albedo feedbacks drive greater Greenland ice sheet sensitivity to warming in CMIP6 than in CMIP5. *The Cryosphere Discuss*, 14 (1), 475–488. doi:10.5194/tc-2023-24.
- N'Dri, W.K.C., et al., 2019. Estimation of the impact of climate change on water resources using a deterministic distributed hydrological model in Côte d'Ivoire: case of the Aghien Lagoon. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 07, 74–91. doi:10.4236/gep.2019.77007.
- Oppenheimer, M., et al., 2019. Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. In: H.-O. Pörtner, et al., eds. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge: Cambridge University Press, 321–445. doi:10.1017/9781009157964.006.
- Ouattara, G.S., et al., 2020. Study of groundwater-river interactions using hydrochemical tracers in fissured rock: case of the lobo watershed at Nibéhibé (Central-West, Côte d'Ivoire). *International Journal of Environment and Climate Change*, 10 (12), 55–66. doi:10.9734/ijec/2020/v10i1230284.
- Poitelon, J.-B., et al., 2011. Le réseau de distribution d'eau potable: un écosystème complexe lié à des enjeux de santé publique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 24 (4), 383–418. doi:10.7202/1007627ar.
- Ritter, A. and Muñoz-Carpena, R., 2013. Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33–45. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.004.
- Rivière, A., 1977. *Méthodes granulométriques: techniques et interprétations*. Paris: Edition Masson, 149 p.
- Ross, A.C., et al., 2015. Sea-level rise and other influences on decadal-scale salinity variability in a coastal plain estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 157, 79–92. doi:10.1016/j.ecss.2015.01.022.
- Salfavi, S., et al., 2015. Modeling spatial pattern of salinity using MIKE21 and principal component analysis technique in Urmia Lake. *Current World Environment*, 10 (2), 626–633. doi:10.12944/CWE.10.2.28.
- Sanchez, M., Grimigni, M., and Delanoé, Y., 2005. Steady-state vertical distribution of cohesive sediments in a flow. *Comptes Rendus. Géoscience*, 337 (3), 357–365. doi:10.1016/j.crte.2004.10.020.
- Sanchez, M. and Levacher, D., 2007. The influence of particle size of the dispersed mineral fraction on the settlement of marine and estuarine muds. *Geo-Marine Letters*, 27 (5), 303–313. doi:10.1007/s00367-007-0053-7.
- Savenije, H.H.G., 1993. Predictive model for salt intrusion in estuaries. *Journal of Hydrology*, 148, 203–218. doi:10.1016/0022-1694(93)90260-G.
- Shahi, S., et al., 2023. The importance of regional sea-ice variability for the coastal climate and near-surface temperature gradients in Northeast Greenland. *Weather and Climate Dynamics*, 4 (3), 747–771. doi:10.5194/wcd-4-747-2023.

- Shourian, M., Moridi, A., and Kaveh, M., 2016. Modeling of eutrophication and strategies for improvement of water quality in reservoirs. *Water Science and Technology*, 74 (6), 1376–1385. doi:10.2166/wst.2016.322.
- Soro, N., et al., 2010. Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire: sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4 (6), 2203–2219. doi:10.4314/IJBICS.V4I6.64952.
- Soro, G.E., et al., 2017. Climate change and its impacts on water resources in the bandama basin, Côte d'Ivoire. *Hydrology*, 4, 18. doi:10.3390/hydrology4010018.
- Sugahara, S., Porfírio da Rocha, R., and Silveira, R., 2009. Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil. *International Journal of Climatology*, 29 (9), 1339–1349. doi:10.1002/joc.1760.
- Traoré, A., et al., 2013. Evaluation des paramètres physiques, chimiques et bactériologiques des eaux d'une lagune tropicale en période d'étiage: la lagune Aghien (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 (6), 7048–7058. doi:10.4314/ijbcs.v6i6.40.
- Wang, X., et al., 2022. Estimating sea level, wind direction, significant wave height, and wave peak period using a geodetic GNSS receiver. *Remote Sensing of Environment*, 279, 113135. doi:10.1016/j.rse.2022.113135.
- WMO-World Meteorological Organisation, 2022. *State of the global climate 2021*. WMO-No., 1290, 57 p. Available from: <https://library.wmo.int/idurl/4/56300>.
- Zandagba, J.B.E., et al., 2021. Modeling of spacio-temporal evolution of salt dispersion on Nokoue Lake. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 384, 93–98. doi:10.5194/piahs-384-93-2021.
- Zeinoddini, M., Bakhtiari, A., and Ehteshami, M., 2013. Wave-flow coupling effects on spatiotemporal variations of flow and salinity in a large hypersaline marine system: Lake Urmia, Iran. *Limnology*, 14, 77–95. doi:10.1007/s10201-012-0389-1.

Impact des pressions anthropiques et des changements climatiques sur la dynamique de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)

Bi Sehi GOE ¹, Amidou DAO ², Loukou Alexis BROU ¹, Brou David AKAHOUA ¹,
Gla Blaise OUEDE ¹, Bérenger KOFFI ¹, Bamory KAMAGATE ³,
Kouakou Lazare KOUASSI ¹

1. Département des Sciences de la Terre, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150
Daloa, Côte d'Ivoire.

goebi16@gmail.com

2. Laboratoire des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua,
Abidjan 02 BP 801, Côte d'Ivoire.

3. Ecole Normale Supérieure, Abidjan, BP 10 Abidjan 08, Côte d'Ivoire.

Résumé :

La lagune Aghien est pressentie pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan. Ainsi, une modélisation est nécessaire pour simuler l'impact de cette exploitation couplée aux effets des changements climatiques sur le fonctionnement de cet écosystème lagunaire. Nos travaux visent donc à simuler le fonctionnement hydrodynamique de la lagune Aghien afin d'évaluer l'influence des pressions. La méthodologie a consisté à valider le modèle puis à simuler le fonctionnement hydrodynamique de cette lagune avant et pendant l'exploitation en prenant en compte les hypothèses de changements climatiques dans le bassin versant à l'horizon 2070. Avec un coefficient de rugosité de $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, les observations sont certes surestimées par le modèle avec un biais de -1,92 cm et un écart maximal de 5,75 cm mais le NSE et la RMSE sont très satisfaisants avec des valeurs respectives de 90,91% pour le NSE et 2,6 cm pour la RMSE. La simulation de la dynamique des masses d'eau a révélé que l'exploitation entraînerait une baisse du niveau de l'eau allant de 0,38 mm à 2,15 mm avec une moyenne de $1,21 \pm 0,46 \text{ mm}$. Avec une réduction des apports des tributaires dû au changement climatique, cette baisse se situerait entre 0,79 mm et 6,68 mm pour une moyenne de $2,81 \pm 1,30 \text{ mm}$. Ainsi, malgré les pressions sur cette lagune, son fonctionnement hydrodynamique ne serait que très peu impacté.

Mots-clés : Hydrodynamique, Pompages, Changement climatique, Lagune Aghien, Abidjan, Côte d'Ivoire.

1. Introduction

Pour le commun des mortels, l'eau est une ressource indispensable à la vie. Elle est utilisée pour la production agricole, l'élevage et les besoins domestiques et industriels

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

(UNESCO, 2021). Pour l'alimentation en eau potable des populations, diverses ressources en eau sont utilisées en fonction des réalités de chaque pays (UNESCO, 2021 et 2022). Les pays ouest-africains qui bénéficient d'importantes ressources en eau douce de surface et souterraines s'alimentent uniquement par l'exploitation de ces ressources fortement influencées par les précipitations (KOFFI *et al.*, 2019). Pour les populations de la ville d'Abidjan, capitale économique de la Côte d'Ivoire, l'alimentation en eau potable est assurée par l'exploitation de la nappe du continental terminal (SORO *et al.*, 2010). Cette nappe est un aquifère constitué de deux couches principales, respectivement formées de sables grossiers de 90 m d'épaisseur et de sables fins à moyen de 80 m d'épaisseur (KOUASSI *et al.*, 2014). Avec une recharge estimée à 324 mm an⁻¹ en 2006, les transmissivités et perméabilités calculées de la nappe du continental terminal, varient respectivement de $2,77.10^{-2}$ à $3,37.10^{-1}$ m² s⁻¹ et de $1,1.10^{-3}$ à $1,2.10^{-2}$ m s⁻¹ (KOUASSI *et al.*, 2014). Malheureusement, cette nappe du continental terminal fait face à une baisse de son volume due à la surexploitation et à une diminution des infiltrations causée par la réduction des précipitations et la dégradation du couvert végétal (TRAORE *et al.*, 2014). De plus, les rejets industriels et les installations anarchiques des populations menacent la qualité chimique de cette ressource poussant les gestionnaires à abandonner des forages d'eau potable (SORO *et al.*, 2010). À l'opposée, la demande en eau potable ne cesse d'augmenter du fait de la croissance démographique. Cette situation fait peser, sur les populations de ce pôle économique, d'énormes problèmes d'accès à l'eau potable caractérisés par un déficit estimé à plus de 58 Mm³ par an (KOFFI *et al.*, 2018). Pour combler ce déficit, la lagune Aghien, de par sa position géographique et le volume important de ses tributaires continentaux assurant le renouvellement de ses eaux a été choisie (KOFFI *et al.*, 2014). Cependant, l'analyse des données hydro-climatiques plus récentes a mis en évidence, une persistance, dans le bassin versant de cette lagune (KOFFI *et al.*, 2019), de la diminution des hauteurs pluviométriques survenue à la fin des années 1970 (AMOUSSOU *et al.*, 2012 ; KOFFI *et al.*, 2023) dans la zone ouest-africaine. À cela s'ajoute le pompage prévu de 250 000 m³/jour (soit environ 11 400 m³/h) de la rivière côtière Mé, plus important tributaire continental de cette lagune en marée haute. Ces pressions pourraient entraîner une modification de la dynamique des masses d'eau de cette lagune. Ainsi, pour une exploitation efficiente et durable de cet écosystème lagunaire, une modélisation hydrodynamique permettrait d'évaluer l'impact de ces pressions sur la dynamique des masses d'eau de cette lagune.

2. Matériel et méthodes

2.1 Zone d'étude

La zone d'étude est constituée de la cuvette de la lagune Aghien, longue d'environ 11 km et du chenal naturel qui relie cette lagune à la lagune Potou en aval. Elle se situe au sud-est de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 3°48'30''W et 3°55'30''W et les latitudes

5°21'30''N et 5°27'00''N (Figure 1). La lagune Aghien est alimentée de façon permanente par les apports des rivières Djibi et Bété auxquels s'ajoutent les eaux de la rivière Mé et l'onde de la marée dynamique en marée haute (KOFFI *et al.*, 2019).

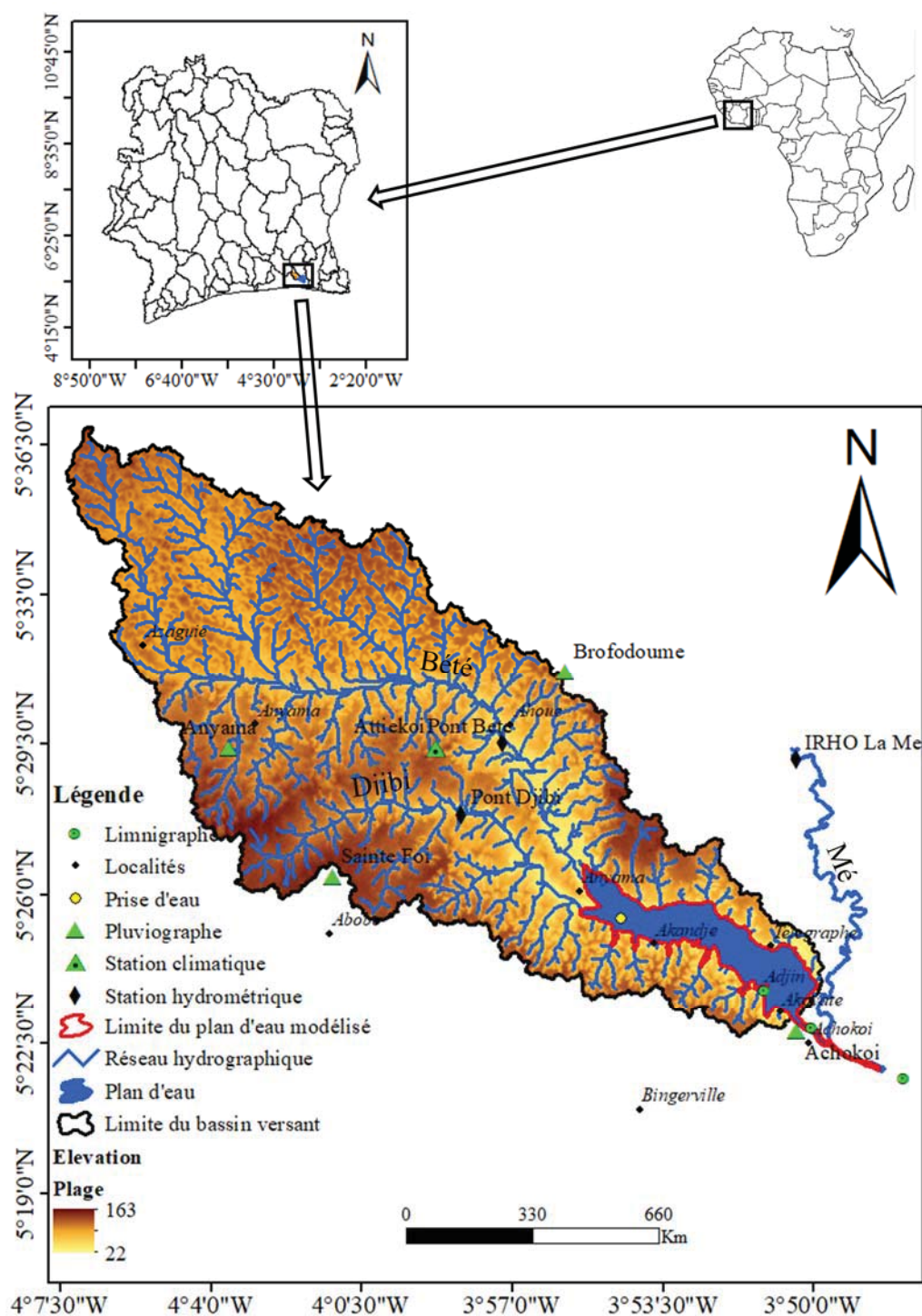


Figure 1. Zone d'étude.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

2.2 Méthodes

2.2.1 Acquisition des données

Plusieurs données ont été utilisées pour la réalisation de cet exercice. Il s'agit d'abord des données hydrométriques enregistrées par les stations hydrométriques de IRHO La Mé, Bété pont et Djibi pont fournies par l'Université Nanguy Abrogoua. Les données de précipitations, de vitesse et direction du vent ont aussi été utilisées. Ces données sont enregistrées par les stations climatiques de HIRO La Mé et de Sainte Foi CET ainsi que les stations pluviométriques de la Djibi et de la Bété. Elles ont été fournies par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) de Côte d'Ivoire. Enfin, les données de niveau d'eau dans les lagunes Potou et Aghien et le chenal naturel reliant ces deux lagunes ont également fait l'objet d'utilisation. Ces derniers enregistrés par les limnigraphes ont été fournis par la direction de l'Institut de Recherche et Développement (IRD) de l'Université Nanguy Abrogoua. Toutes ces données utilisées couvrent la période avril-septembre 2021. Pour la représentation de la morphologie du fond de la lagune, un sondage bathymétrique a été effectué à l'aide d'un échosondeur de type Humminbird Helit 7, suivant un maillage densifié.

2.2.2 Modélisation hydrodynamique

Pour cet exercice, le module hydrodynamique HD du modèle Mike 21 Flow Model FM qui résout les équations de Saint-Venant par la méthode des volumes finis sur des mailles structurées (DHI, 2021) est utilisé. Un maillage triangulaire de 100 m² a été adopté. Le paramétrage a consisté à calibrer et valider le modèle hydrodynamique sur des périodes différentes (sèche et humide) afin de s'assurer de sa capacité à reproduire assez fidèlement les observations faites sur le terrain. Pour cela, conditions aux limites amont ont porté sur les débits des rivières Djibi, Bété et Mé alors la condition aux limites aval a porté sur les niveaux d'eau à Potou. Un niveau d'eau de -1 m est défini comme condition initiale afin de mieux apprécier le remplissage de la lagune. La prise en compte des effets de changement est traduite par une baisse de 17% des apports des tributaires fluviaux de la lagune Aghien à l'horizon 2070 (N'DRI *et al.*, 2019). La qualité du paramétrage est vérifiée par les coefficients de corrélation et de détermination, le biais, le NSE (Nash Sutcliffe Efficiency) et la RMSE (Root Mean Square Error).

3. Résultats

3.1 Bathymétrie

Le chenal de connexion entre les lagunes Aghien et Potou présente des profondeurs très variables dont les maximales atteignent 17 m à la confluence de la rivière Mé (Figure 2).

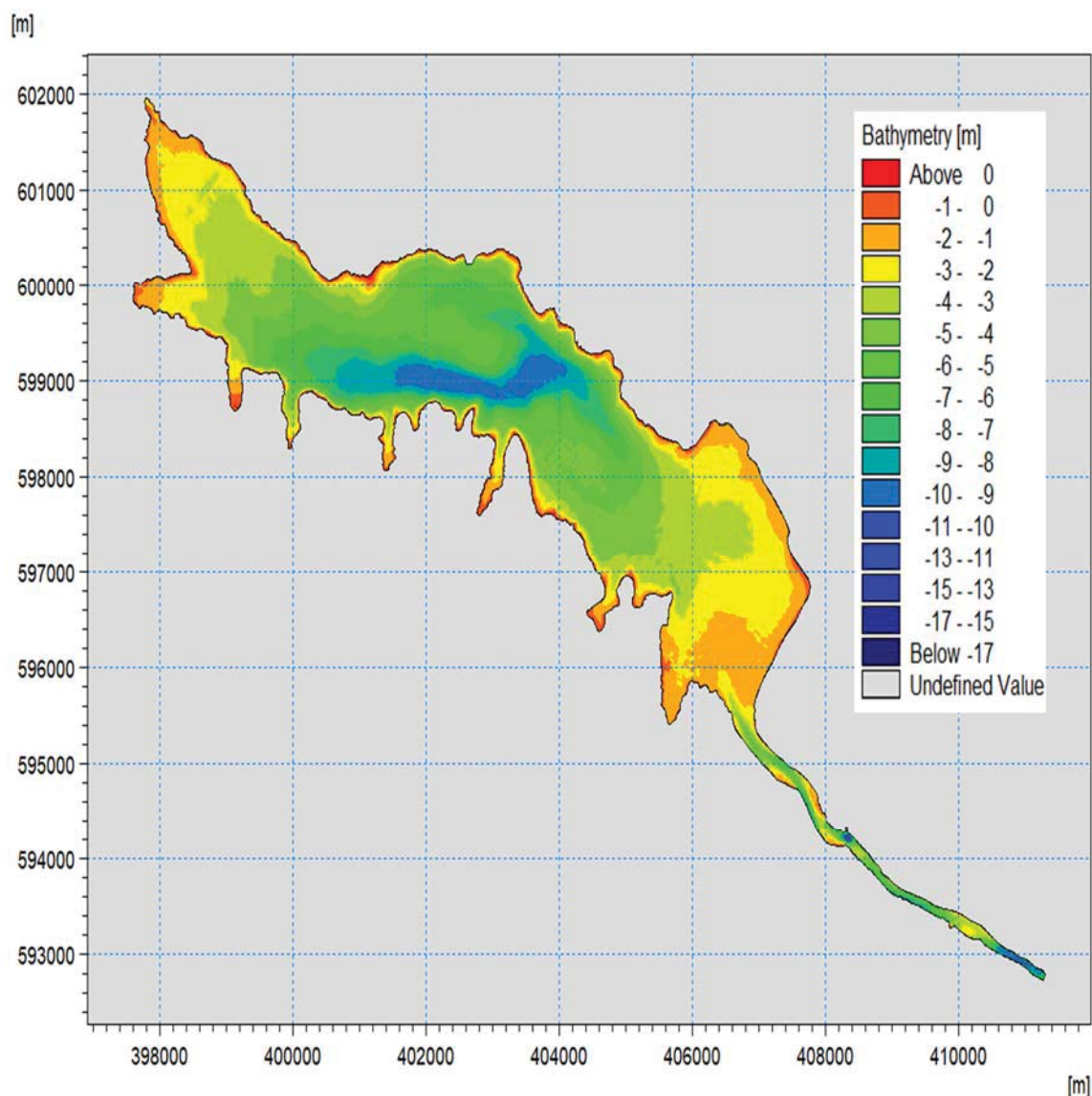


Figure 2. Bathymétrie de la lagune Aghien et du chenal.

Au niveau de la confluence de la Djibi et Bété, les profondeurs n'excèdent pas 4 m. dans la cuvette de la lagune Aghien, les profondeurs vont de 0,0 à -10,5 m.

3.2 Paramétrage

Le modèle a été calibré avec des coefficients de corrélation de détermination respectifs de 99,3% et de 98,6% soit seulement 1,4% de données mal reproduites par le modèle (Figure 3a). A la validation la proportion des observations mal reproduites atteint 2,7% (Figure 3b). Les erreurs quadratiques moyennes obtenues lors de la calibration et de la validation sont respectivement de 1,62 cm et 2,6 cm pour des biais estimés à 0,4 cm lors de la calibration et à -1,9 cm au cours de la validation (Figure 3).

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

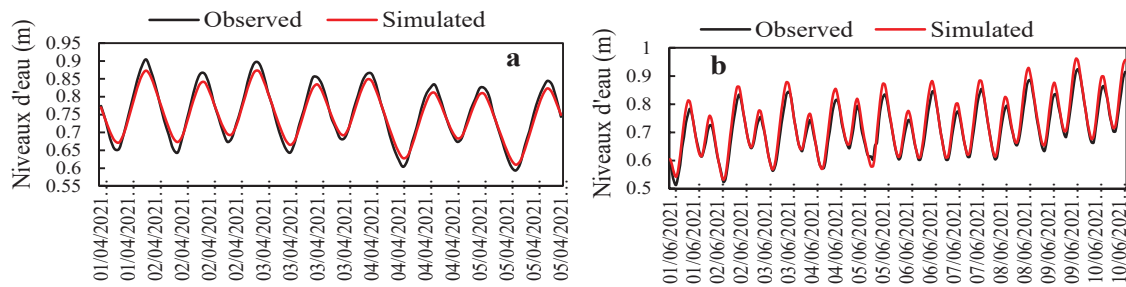


Figure 3. Critère graphique de performance : a) Calibration ; b) la Validation.

3.3 Impact des pressions sur la dynamique des masses d'eau

Les pressions considérées sont les pompages et les effets des changements climatiques sur les apports des tributaires continentaux de la lagune Aghien.

3.3.1 Impact des pompages

De l'observation graphique, aucune différence n'existe entre les niveaux d'eau avant et pendant l'exploitation de la lagune (Figure 4). Ainsi, l'exploitation couplée de la rivière côtière Mé et de la lagune Aghien n'a pas d'impact significatif sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune Aghien.

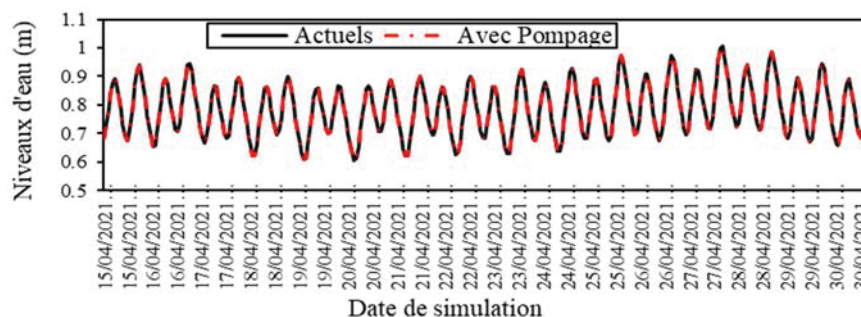


Figure 4. Niveaux avant et pendant l'exploitation de la lagune Aghien.

Bien que l'impact ne soit pas visible graphiquement, les écarts entre les niveaux d'eau avant et pendant l'exploitation se situent entre 0,38 mm et 2,15 mm. L'exploitation entrainerait une baisse moyenne du niveau de l'eau de $1,21 \pm 0,46$ mm (Figure 5).

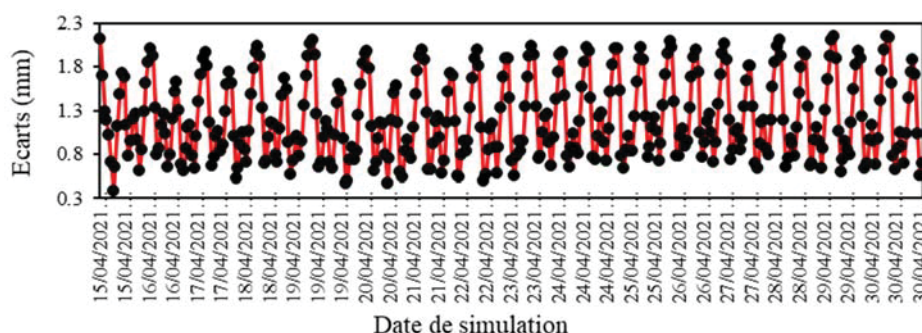


Figure 5. Ecart entre les niveaux avant et pendant l'exploitation de la lagune Aghien.

3.3.2 Impact des changements climatiques

La représentation graphique des niveaux d'eau donne une superposition des niveaux d'eau sans et avec baisse des apports des tributaires (Figure 6). Ainsi, l'impact de la baisse des apports serait peu perceptible sur la lagune Aghien.

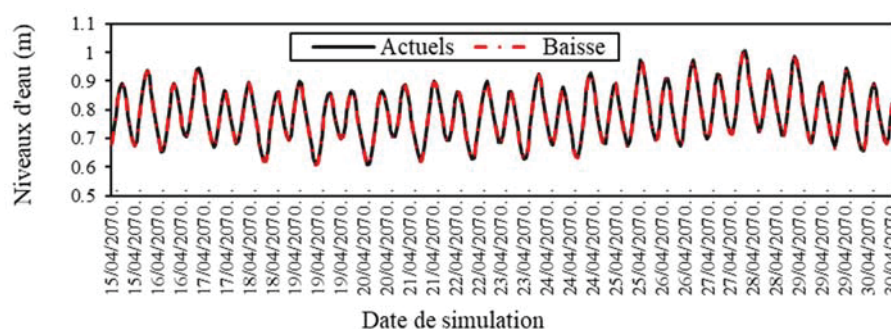


Figure 6. Niveau d'eau avec et sans baisse des apports des tributaires.

Cependant, bien que l'impact des changements climatiques sur la dynamique des écoulements de la lagune Aghien ne soit visible graphiquement, des écarts existent et se situent entre 0,79 mm et 6,68 mm avec une moyenne de $2,81 \pm 1,30$ mm (Figure 7).

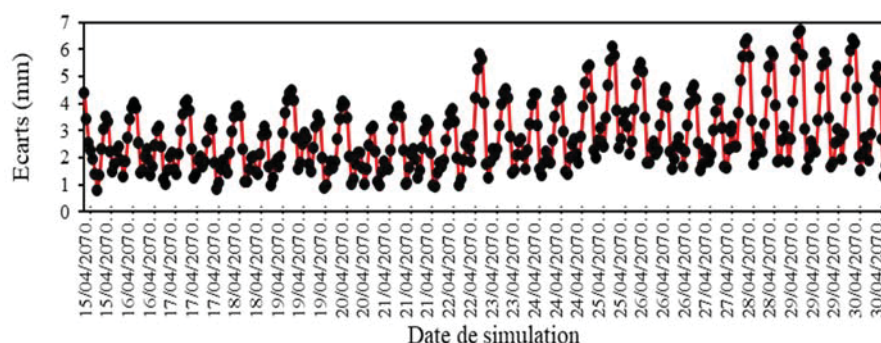


Figure 7. Ecart dus aux effets des changements climatiques.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

4. Discussion

La lagune Aghien est peu profonde, sa profondeur variant de 0 à 10,5 m a été divisée par BRLi (2015) en deux zones morphologiques à savoir une zone centrale avec des profondeurs allant de 5 à 10.5 m et une zone périphérique peu profonde (< 5m). Dans le chenal, les profondeurs atteignent 17 m à la confluence de la Mé et 8 m ailleurs. La présence de fonds bas à la confluence pourrait être due à l'action d'une forte turbulence engendrée par les courants opposés. En effet, à cet endroit, les apports de la Mé rencontrent les masses d'eau en provenance de la lagune Potou en aval ou Aghien en amont (GOE *et al.*, 2023). Ce contact des deux masses d'eau de directions différentes engendre une turbulence provoquerait l'érosion des fonds et la remise en suspension des particules arrachées.

Le paramétrage du modèle hydrodynamique a été effectué avec un coefficient de rugosité de Strickler de $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Ce coefficient est proche de $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ utilisé par KOUASSI *et al.* (2013) pour la validation du modèle hydrodynamique du lac Taabo dont le fond est recouvert de vases. En période d'étiage, les observations sont sous-estimées et surestimées en période de crue ce qui serait due la recharge ou la décharge des nappes souterraines. Selon OUATTARA *et al.* (2020), les nappes souterraines alimentent les retenues selon que leur niveau soit en dessous ou au-dessus du niveau piézométrique de celles-ci. Ainsi, la non prise en compte de ces apports ou pertes pourrait expliquer les écarts. Ces écarts peuvent également s'expliquer par les variations spatiales de la rugosité du fond lagunaire (WANGO *et al.*, 2011). En effet, le fond de la zone modélisée contient des sédiments de sable et de vases de rugosité différente. Le choix d'un coefficient de rugosité uniforme dans tout le domaine pourrait donc être à l'origine des écarts entre les niveaux d'observés et simulés.

La simulation de la dynamique des masses d'eau a montré que les pompages feraient baisser le niveau global de la lagune d'au plus 2,15 mm. Cependant, avec la baisse des apports des tributaires, l'écart pourrait atteindre 6,68 mm. La faible influence des activités de pompage et de la baisse des apports fluviaux sur la dynamique de la lagune Aghien serait d'une part due au fait que les volumes pompés ne représentent qu'une infime partie des apports de ces deux sources d'eau. En effet, les pompages dans la rivière Mé et la lagune Aghien ne représenterait que 1,8 à 44% de Mé et 6,3 à 36,7% des apports cumulés de la Djibi et de la Bété par seconde qui sont compensés par les remontées marines.

5. Conclusions

La simulation de la dynamique des masses d'eau de la lagune a révélé que l'exploitation entrainerait une baisse du niveau de l'eau allant de 0,38 mm à 2,15 mm avec une moyenne de $1,21 \pm 0,46 \text{ mm}$. Associée à une réduction des apports des tributaires à l'horizon 2070, la baisse pourrait varier de 0,79 mm à 6,68 mm avec une moyenne de $2,81 \pm 1,30 \text{ mm}$. Ainsi, Bien que la lagune soit soumise à ces pressions, son fonctionnement hydrodynamique serait très peu influencé.

6. Références bibliographiques

- AMOUSSOU E., CAMBERLIN P., MAHÉ G. (2012). *Impact of climatic variability and the Nangbeto Dam on the hydrology of the Mono-Couffo system (West Africa)*, Hydrological Sciences Journal, 57(4), pp. 805–817. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.643799>
- BRLi. (2015). *Etude de la protection du bassin versant de la lagune Aghien. Phases 1 et 2–Caractérisation du bassin versant et des risques de pollution*, 190 p.
- DHI-DANISH HYDRAULIC INSTITUT (2021). *Hydrodynamic and transport module*. Scientific documentation, 59 p.
- GOE B.S., BROU L. A., KOFFI E.S., AKAHOUA B.D., DAO H., KAMAGATE B., KOUASSI K.L. (2023). *Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d’Ivoire)*. International Journal of Innovation and Scientific Research, 69(1), pp. 129–142. <https://issr-journals.org/xplore/ijisr/0069/001/IJISR-23-211-02.pdf>
- KOFFI B., BROU L.A., KOUADIO K.J.O., EBODE V.B., N’GUESSAN K.J-Y., YANGOULIBA G.I., KONATE Y., DIBI B., KOUAKOU L.K. (2023). *Impact of climate and land use/land cover change on Lobo reservoir inflow, West-Central of Cote d’Ivoire*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 47(24), pp. 2–24. <http://10.1016/j.ejrh.2023.101417>
- KOFFI E.S., DAO A., NOUFE D.D., KAMAGATE B., KOFFI K.J.T., DIALLO S., GONE D.L. (2018). *Bilan des apports liquides des rivières Bété et Djibi a la lagune Aghien (Côte d’Ivoire)*. American Journal of Innovative Research and Applied Sciences, 6(1), pp. 86–99. <https://american-jiras.com/Serge-ManuscriptRef.1-ajira170118.pdf>
- KOFFI E.S., KOFFI T.K., PERRIN J.L., SÉGUI S., GUILLIOD M., GONÉ D.L., KAMAGATÉ B., (2019). *Hydrological and water quality assessment of the Aghien Lagoon hydrosystem (Abidjan, Côte d’Ivoire)*. Hydrological. Sciences Journal, 64(15), pp. 1893–1908. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1672875>
- KOFFI K J.P., N’GO Y.A., YEO K.M., KONÉ D., SAVANE I. (2014). *Détermination des périmètres de protection de la lagune Aghien par le calcul du temps de transfert de l’eau jusqu’ à la lagune*, Larhyss Journal, 2(19), pp. 19–35. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/55130>
- KOUASSI K.A., KOUASSI W.F., MANGOUEA O.M.J., SAVANE I. (2014). *Modèle conceptuel de l’aquifère du Continental Terminal d’Abidjan*. Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions Proceedings of FRIEND-Water 2014, Montpellier, France, October 2014 (IAHS Publ. 363, 2014), pp. 256-262. <https://iahs.info/uploads/dms/16600.47-256-262-363-53-Paper-152-Auguste-KOUASSI.pdf>
- KOUASSI K.L., KOUAMÉ K.I., KONAN K.S., SANCHEZ ANGULO M., DEMÉ M., MÉLÈDJE N.H. (2013). *Two-dimensional numerical simulation of the hydro-sedimentary phenomena in Lake Taabo, Côte d’Ivoire*. Water Resources Management, 27(12), pp. 4379–4394. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-013-0417-x>
- N’DRI W.K.C., PISTRE S., JOURDA J.P., KOUAME K.J. (2019). *Estimation of the Impact of Climate Change on Water Resources Using a Deterministic Distributed*

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Hydrological Model in Côte d'Ivoire : Case of the Aghien Lagoon. Journal of Geoscience and Environment Protection, 7(7), pp. 74–91. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.77007>

OUATTARA G.S., DIBI B., KONAN-WAIDHET A.B., MANGOUA J.M.O., KAMAGATE B. (2020). *Study of groundwater-river interactions using hydrochemical tracers in fissured rock: Case of the Lobo watershed at Nibéhibé (Central-West, Côte d'Ivoire).* International Journal of Environment and Climate Change, 10(12), pp. 55-66. doi: 10.9734/ijecc/2020/v10i1230284

SORO N., OUATTARA L., DONGO K., KOUADIO E.K., AHOUSSE E.K., SORO G., OGA M.S., SAVANE I., BIEMI J. (2010). *Déchets municipaux dans le district d'Abidjan en Côte d'Ivoire: sources potentielles de pollution des eaux souterraines,* International Journal of Biology and Chemical Sciences, 4(6), pp. 2203–2219. doi:10.4314/ijbcs.v4i6.64952

TRAORE A., SORO G., AHOUSSE K.E., BAMBA B.S., SORO N., BIEMI J. (2014). *Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale: la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire),* Afrique Science, 10(3), pp. 73–88.

UNESCO (2021). *La valeur de l'eau.* Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 226 p.

UNESCO (2022). *Eaux souterraines, Rendre visible l'invisible.* Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 12 p.

WANGO T.E., MOUSSA M., ADOPO K.L., MONDE S. (2011). *Calage du modèle hydrodynamique à 2D du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire.* Geoscience Economie Tropicale, 35, pp. 23–32.

Dynamique de diffusion de la salinité dans la lagune Aghien (Abidjan, Côte d'Ivoire) sous l'influence des prélèvements

**Bi Sehi GOE ¹, Amidou DAO ², Brou AKAHOUA ¹, Jean Thierry KOFFI ²,
Bamory KAMAGATE ³, Kouakou Lazare KOUASSI ¹**

1. Département des Sciences de la Terre, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.
goebi16@gmail.com
2. Laboratoire des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan 02 BP 801, Côte d'Ivoire.
3. Ecole Normale Supérieure d'Abidjan, BP 10 Abidjan 08, Côte d'Ivoire.

Résumé :

Les lagunes sont des milieux de transition très dynamiques soumis à des influences à la fois fluviales et marines. Malgré cette dynamique, la lagune Aghien a été sélectionnée comme source d'approvisionnement en eau potable des populations de la ville d'Abidjan. Cette étude a donc été initiée pour évaluer l'influence des activités de pompages sur la dynamique de diffusion des sels dans la lagune Aghien. Une modélisation a été effectuée à l'aide du modèle Mike 21 Flow Model FM en prenant comme conditions aux limites la salinité mesurée au niveau de chaque tributaire tout en imposant une salinité initiale de 0,0‰ dans toute la lagune. La simulation a montré qu'en l'absence des activités de pompages, la salinité de la lagune Aghien oscille entre 0,1‰ et 0,3‰, la maximale étant observée dans la zone devant abriter l'instrument de pompage dans la lagune Aghien. Durant les activités de pompages, la lagune afficherait toujours le même taux de sel par endroit. Ainsi, les activités de pompages simultanés de la rivière Mé et de la lagune Aghien n'entraîneraient pas une modification de la salinité de la lagune Aghien. Par conséquent, cette lagune peut être exploitée à des fins d'alimentation en eau potable sans risque d'augmentation de son taux de sel. Cependant, il serait important d'étudier l'impact des effets des changements climatiques sur la dynamique de diffusion des sels dans cette lagune à moyen terme.

Mots-clés :

Dynamique de la salinité, Pressions Anthropiques, MIKE 21 FM, Lagune Aghien, Côte d'Ivoire.

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

1. Introduction

Les lagunes sont des milieux de transition soumis à des influences marines et fluviales (BARBIER *et al.*, 2011). La lagune Aghien, choisie pour produire de l'eau potable à destination des populations d'Abidjan, malgré sa position géographique relativement éloignée de l'Atlantique, reste sous l'influence des variations de la marée dynamique (GOE *et al.*, 2023). Cependant, grâce à la dilution de ces remontées marines par les apports des tributaires fluviaux de cette lagune, ses masses d'eau s'apparentent aux eaux douces puisque leur salinité ne dépasse généralement pas 0,2‰ (TRAORE *et al.*, 2012). Malheureusement, l'influence de la marée dynamique pourrait connaître une évolution significative dans un contexte de pompage de la rivière Mé et de la lagune Aghien elle-même (KOFFI *et al.*, 2018). Pour une exploitation efficiente et une gestion durable de cet écosystème lagunaire, il importe d'étudier l'impact de ces pompages sur la dynamique de diffusion des sels dans cette lagune à travers une modélisation numérique.

2. Matériel et méthodes

2.1 Zone d'étude

La zone d'étude est constituée de la lagune Aghien et du chenal naturel qui la relie à la lagune Potou en aval (Figure 1). Cette zone se situe au sud-est de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 3°48'30''W et 3°55'30''W et les latitudes 5°21'30''N et 5°27'00''N. Le bassin versant de la lagune Aghien est situé entre les longitudes 3°48'0''W et 4°08'0''W et les latitudes 5°23'0''N et 5°37'0''N. Avec une superficie de 351 km², ce bassin draine les eaux des rivières Djibi et Bété qui sont les tributaires permanents de cette lagune auxquels s'ajoutent les eaux de la rivière Mé et l'onde de la marée dynamique en marée haute (GOE *et al.*, 2023). Le plan d'eau à modéliser couvre une superficie d'environ 21 km² (Figure 1).

2.2 Méthodes

2.2.1 Acquisition des données

Les mesures de salinité ont été effectuées en avril 2021 à l'aide d'un multi paramètre de type HANNA en dix (10) points sur 3 niveaux de profondeur (surface (S), mi-fond (M) et au fond (F)). Après chaque prélèvement, la sonde du multi paramètre, préalablement étalonnée, est plongée dans l'échantillon d'eau pour la mesure *in situ* de la salinité.

2.2.2 Modélisation de la dynamique des sels

Après validation du modèle hydrodynamique, Pour la modélisation de la diffusion des sels, le modèle MIKE 21 Flow Model FM (DHI, 2021) a été configuré pour résoudre les équations de transport de la salinité en maintenant la température de l'eau constante (25°C).

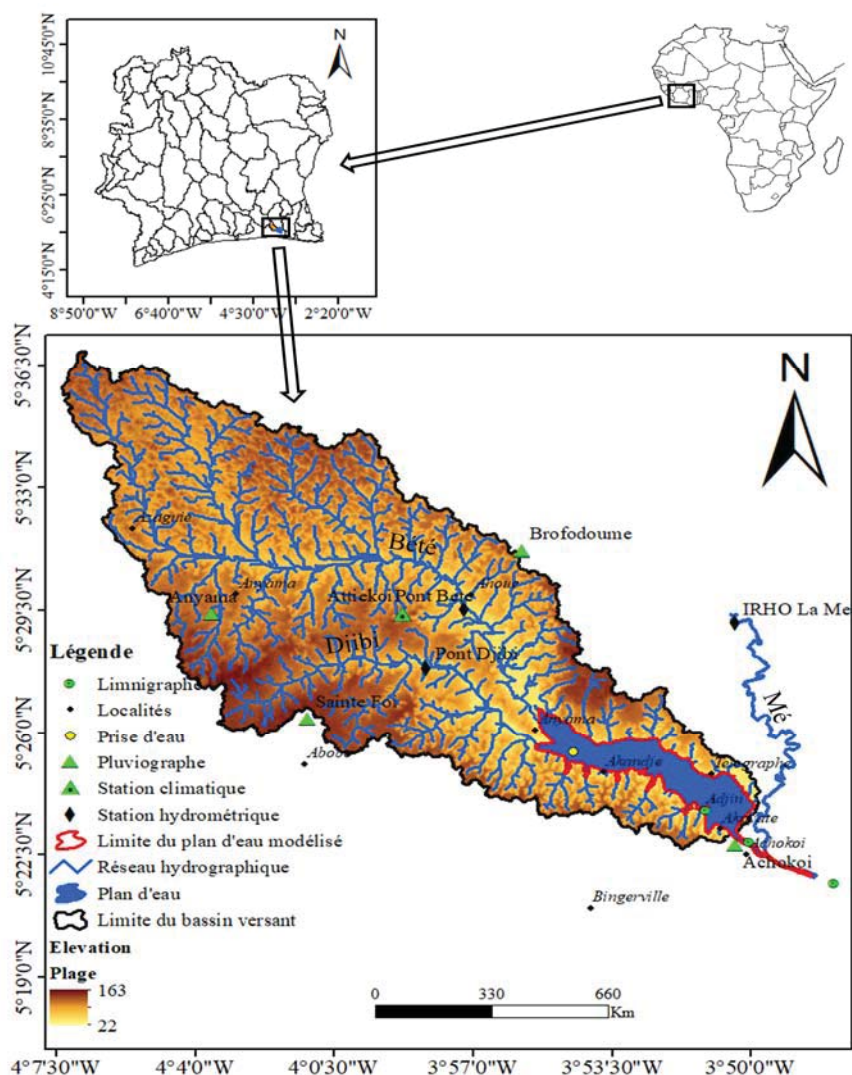


Figure 1. Zone d'étude.

Deux (2) simulations de quinze (15) jours sont effectuées pour apprécier l'impact des activités de pompages sur la dynamique de diffusion des sels dans la lagune Aghien :

- La première simulation permet de reproduire les observations faites sur le terrain, un test pour vérifier l'efficacité du modèle. En condition aux limites amont et aval, la salinité définie pour chaque tributaire est celle mesurée sur le terrain pendant la période correspondante (avril 2021). Une condition initiale de salinité 0,0‰ est imposée afin de mieux évaluer l'influence de l'intrusion des masses d'eau salées des tributaires dans la lagune Aghien.
- La seconde simulation, prenant en compte les volumes d'eau pompées dans la Mé et dans la lagune Aghien, permet d'identifier l'effet de ces activités de pompage sur la salinité de la lagune Aghien. Lors de cette simulation, l'état initial de la lagune est celui

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

modélisé lors de la première simulation, seuls les débits de la Mé sont réduits de 3 m³/s et le débit de pompage dans la lagune Aghien de 2 m³/s est également pris en compte.

3. Résultats

3.1 Salinité de la lagune Aghien

En avril 2021 (période d'étiage), la salinité moyenne dans la lagune Aghien est estimée à 0,2‰ et celle dans le chenal en aval à 0,3‰ en marée haute. Sur la Djibi et la Bété ces mesures ont donné respectivement une salinité moyenne de 0,3‰ et 0,2‰ (Tableau 1). La rivière Mé est une rivière à salinité nulle (0,0‰).

Tableau 1. Salinité mesurée in situ pendant la campagne d'avril 2022.

		<i>Mé</i>		<i>Chenal</i>		<i>Aghien</i>	
<i>Djibi</i> <i>Bété</i>		<i>Marée</i>					
		<i>Basse</i>	<i>Haute</i>	<i>Basse</i>	<i>Haute</i>	<i>Basse</i>	<i>Haute</i>
S							0,2
M	0,3	0,2	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2
F							0,3

Note : S, Surface ; M, Mi-fond ; F, Fond.

3.2 Diffusion des sels avant pompages

En condition actuelle (absence de pompage), après avoir mis 55 heures pour se stabiliser, la salinité de la lagune Aghien simulée par le modèle varie d'une zone à une autre en fonction de la marée dynamique entre 0,0‰ et 0,2‰ (Figure 2) en fonction de la marée dynamique. En marée basse, les masses d'eau à fort taux de sel (0,3‰) se situent à proximité de la confluence de la rivière Djibi (Figure 2a). En marée haute, la salinité en aval de la confluence de la rivière Mé atteint également 0,3‰ contre un maximum de 0,12‰ en marée basse dans la même zone (Figure 2a et 2b). Dans la cuvette de la lagune, la salinité n'excède pas 0,2‰ quel que soit le niveau de la marée.

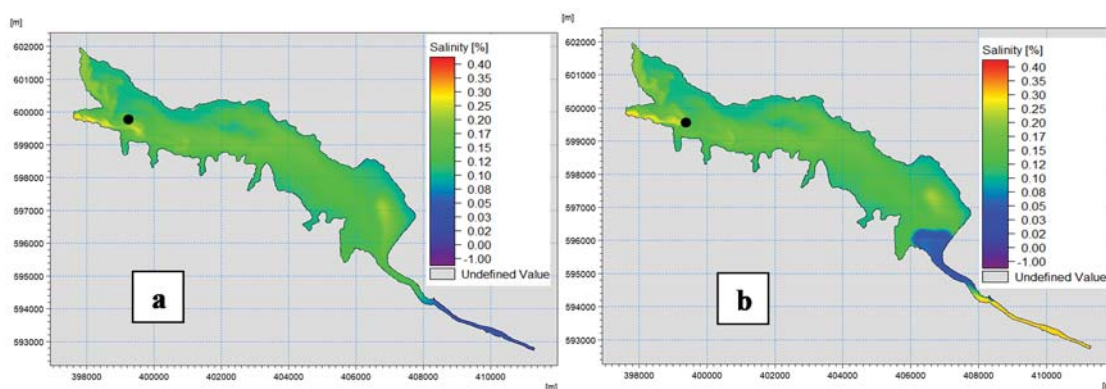


Figure 2. Diffusion des sels dans la lagune Aghien avant les pompages en : a) Marée basse ; b) Marée haute.

3.3 Diffusion des sels pendant pompage

La dynamique de diffusion de la salinité des tributaires dans la lagune Aghien pendant les activités de pompage a été évalué pendant 15 jours sur la période sèche (avril) de l'année 2021 où les apports fluviaux sont en baisse. En période d'étiage, le modèle simule une salinité comprise entre 0,02 % et 0,3 % dans toute la lagune. La Djibi reste pourvoyeuse des taux de sels les plus élevés. La salinité dans la lagune malgré les pompages n'est pas différente de celle avant ces activités (Figure 3). Dans le chenal, les taux de sels restent fortement dépendants de la marée dynamique. En marée basse la salinité en aval de la confluence de la rivière Mé est proche de 0,0% et en aval, elle avoisine 0,2% (Figure 3a). En marée haute, la partie aval du chenal enregistre un taux de sel estimé à 0,3% contre 0,0% en amont (Figure 3b).

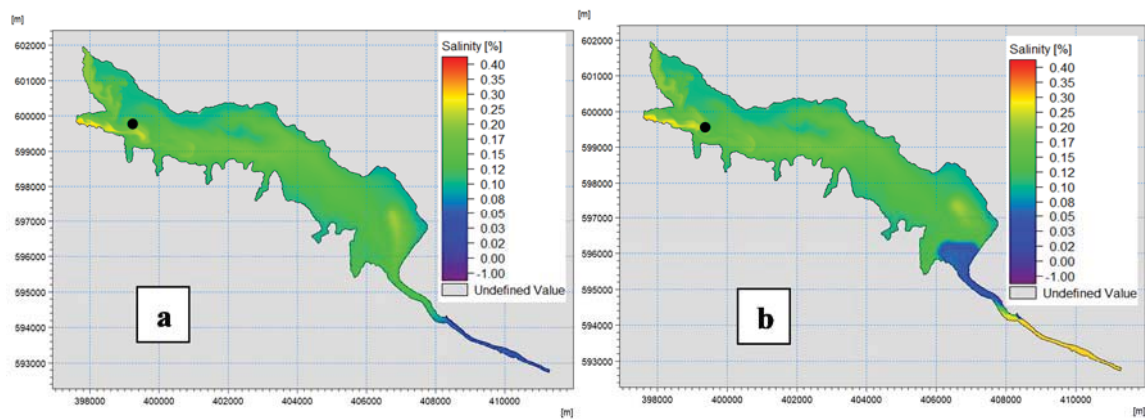


Figure 3. Dynamique des sels dans la lagune Aghien pendant son exploitation en : a) Marée basse ; b) Marée haute.

4. Discussion

Les mesures de salinité effectuées pendant la saison sèche (avril 2021) sont, en moyenne, estimées à 0,2% dans la lagune Aghien et à 0,3% au niveau de la lagune Potou en aval. Dans les rivières Djibi, Bété et Mé, la salinité moyenne est respectivement de 0,3%, 0,2% et 0%. La position géographique et les apports fluviaux importants des tributaires notamment la Mé (KOFFI *et al.*, 2019 ; GOE *et al.*, 2023), seraient à la base du faible taux de sel dans la lagune Aghien. Au niveau de la Djibi, la forte salinité obtenue serait due à un apport important en eau résiduaire dans cette rivière (SORO *et al.*, 2010). La simulation de l'influence des pressions anthropiques caractérisées par les pompages a montré que l'exploitation de la rivière Mé et de la lagune Aghien n'entraient pas une augmentation de la salinité dans la lagune. L'absence d'une influence significative des prélèvements sur la salinité des eaux de cette lagune montre que les volumes pompés ne représentent qu'une quantité négligeable des apports fluviaux comme montré par KOFFI (2021).

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

5. Conclusions

A l'issue de cette étude, il convient de retenir qu'en période d'étiage, la salinité de la lagune Aghien peut atteindre 0,3‰ dans la zone des pompages et 0,2‰ dans le sud en marée haute malgré les apports de la Mé. Le modèle numérique de la diffusion des sels a montré que les activités de pompage de la Mé et de la lagune Aghien en période d'étiage n'impacteraient pas la salinité de la lagune Aghien malgré les apports importants en eau marine.

6. Références bibliographiques

- BARBIER E.B., HACKER S.D., KENNEDY C., KOCH E.W., STIER A.C., SILLIMAN B.R. (2011). *The value of estuarine and coastal ecosystem services*. Ecological monographs, 81(2), pp. 169–193. <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>
- DHI-DANISH HYDRAULIC INSTITUT (2021). Hydrodynamic and transport module. Scientific documentation, 59 p.
- GOE B.S.A., BROU L.A., KOFFI E.S., AKAHOUA B.D., DAO H., KAMAGATE B., KOUASSI K.L. (2023). *Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)*. International Journal of Innovation and Scientific Research, 69(1), pp. 129–142. <https://issr-journals.org/xplore/ijisr/0069/001/IJISR-23-211-02.pdf>
- KOFFI E.S. (2021). *Modélisation hydrologique et estimation des flux au niveau de la lagune (Abidjan/Côte d'Ivoire) dans un contexte d'urbanisation et de variabilité climatique*. Thèse Unique, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 212 p.
- KOFFI E.S., DAO A., NOUFE D.D., KAMAGATE B., KOFFI K.J.T., DIALLO S., GONE D.L. (2018). *Bilan des apports liquides des rivières Bété et Djibi a la lagune Aghien (Côte d'Ivoire)*. American Journal of Innovative Research and Applied Sciences, ISSN 2429-5396, pp. 86–99. <https://american-jiras.com/Serge-ManuscriptRef.1-ajira170118.pdf>
- KOFFI E.S., KOFFI T.K., PERRIN J.L., SÉGUIS L., GUILLIOD M., GONÉ D.L. & KAMAGATÉ B., (2019). *Hydrological and water quality assessment of the Aghien Lagoon hydrosystem (Abidjan, Côte d'Ivoire)*. Hydrological Sciences Journal, 64(15), pp. 1893–1908. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1672875>
- TRAORÉ A., SORO G., KOUADIO E.K., BAMBA B.S., OGA M.S., SORO N., BIEMI J. (2012). *Evaluation des paramètres physiques, chimiques et bactériologiques des eaux d'une lagune tropicale en période d'étiage: la lagune Aghien (Côte d'Ivoire)*. International Journal of Biology and Chemical Sciences, 6(6), pp. 7048-7058. doi:10.4314/ijbcs.v6i6.40
- SORO N., OUATTARA L., DONGO K., KOUADIO E.K., AHOUSSE E.K., SORO G., OGA M.S., SAVANE I., BIEMI J. (2010). *Déchets municipaux dans le district d'Abidjan en Côte d'Ivoire: sources potentielles de pollution des eaux souterraines*. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 4(6), pp. 2203–2219. doi:10.4314/ijbcs.v4i6.64952

Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)

[Characterization of the hydrodynamic parameters of the Aghien lagoon (south-eastern Côte d'Ivoire)]

Goe Bi Sehi Antoine¹, Brou Loukou Alexis¹, Koffi Ehouman Serges², Akahoua Brou David¹, Dao Hamidou², Kamagate Bamory², and Kouassi Kouakou Lazare¹

¹Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa BP 150, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan 02 BP 801, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The Aghien lagoon is expected to provide drinking water for the population of Abidjan. Hydrodynamic modelling is therefore required to assess the impact of this operation, coupled with the impact of climate change, on the functioning of this lagoon ecosystem. The aim of our work is to determine the hydrodynamic parameters required for this exercise. The methodology consisted of surveying sections of the lagoon and its un-surveyed tributaries using a Work Horse Rio Grande Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). The results show that the effect of upwelling is clearly evident in sections 1 and 3 of the channel, with velocity vectors directed towards the Aghien lagoon. The mean velocity is around 0.42 m/s at low tide, compared to 0.385 m/s at high tide in section 03. The greatest variation in mean flow velocity was observed in section 02, with values increasing from 0.23 m/s at low tide to 0.18 m/s at high tide. However, the effect of upwelling attenuated the mean flow rates from 57.77 m³/s to 40.29 m³/s in section 2 (Mé section) and from 265.15 m³/s to 237.22 m³/s in section 3 (downstream channel). The flow in the northern part of the lagoon is low (0.007 m/s) and the velocity vectors point in opposite directions.

KEYWORDS: Currents, Aghien Lagoon, Canal, La Mé, Abidjan, Côte d'Ivoire.

RESUME: La lagune Aghien, est pressentie pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan. Ainsi, une modélisation hydrodynamique est nécessaire pour évaluer l'impact de cette exploitation couplée aux effets des changements climatiques sur le fonctionnement de cet écosystème lagunaire. Nos travaux visent donc à déterminer les paramètres hydrodynamiques indispensable à la réalisation de cet exercice. La méthodologie a consisté à jauger, à l'aide d'un profileur acoustique de courant à effet Doppler (ADCP) de type Work Horse Rio Grande, des sections de cette lagune et de ses tributaires non jaugés. Les résultats indiquent que l'effet de la remontée des écoulements est bien perceptible au niveau des sections 1 et 3 du chenal avec des vecteurs-vitesse orientés vers la lagune Aghien. La vitesse moyenne est de l'ordre de 0,42 m/s en marée basse contre 0,385 m/s en marée haute au niveau de la section 3. La plus forte variation de vitesse moyenne d'écoulement a été observée à la section 2 avec des valeurs passant de 0,23 m/s en marée basse à 0,18 m/s en marée haute. Cependant, l'effet de la remontée a bien atténué les débits d'écoulement moyens respectivement de 57,77 m³/s à 40,29 m³/s dans la section 2 (section de la Mé) et de 265,15 m³/s à 237,22 m³/s dans la section 3 (chenal aval). Les écoulements dans la zone nord de cette lagune sont faibles (0,007 m/s) avec une orientation en sens opposés des vecteurs vitesse.

MOTS-CLEFS: Courantologie, lagune Aghien, chenal, la Mé, Abidjan, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Pour le commun des mortels, l'eau est une ressource indispensable à la vie. Elle est utilisée pour la production agricole, l'élevage et les besoins domestiques et industriels [1]. Pour l'alimentation en eau potable des populations, diverses ressources en eau sont utilisées en fonction des réalités de chaque pays [2], [1], [3], [4]. Les pays ouest-africains qui bénéficient d'importantes ressources en eau douce de surface et souterraines s'alimentent uniquement par l'exploitation de ces ressources fortement influencées par les précipitations [5], [6], [7], [8], [4].

Pour les populations de la ville d'Abidjan, capitale économique de la Côte d'Ivoire, l'alimentation en eau potable est assurée par l'exploitation de la nappe du continental terminal [9], [10]. Malheureusement, cette nappe fait face à une baisse de son volume due à la surexploitation et à une diminution des infiltrations causée par la réduction des précipitations et la dégradation du couvert végétal [11]. De plus, les rejets industriels et les installations anarchiques des populations menacent la qualité chimique de cette ressource poussant les gestionnaires à abandonner des forages d'eau potable [10], [12]). A l'opposée, la demande en eau potable ne cesse d'augmenter du fait de la croissance démographique [13]. Cette situation fait peser, sur les populations de ce pôle économique, d'énormes problèmes d'accès à l'eau potable caractérisés par un déficit estimé à plus de 58 Mm³ par an [14].

Pour combler ce déficit, des travaux de recherche ont été menés en vue de trouver des ressources complémentaires parmi les ressources à proximité de la ville d'Abidjan pour accroître les capacités en eau potable des populations [15], [16]. Ainsi, la lagune Aghien, de par sa position géographique et le volume important de ses tributaires continentaux assurant le renouvellement de ses eaux [15], a été choisie [17].

Malheureusement, l'analyse des données hydro-climatiques plus récentes a mis en évidence, une persistance, dans le bassin versant de cette lagune [6], [18]), de la diminution des hauteurs pluviométriques survenue à la fin des années 1970 [19], [5], [20], [21], [22] dans la zone ouest-africaine. Dans le bassin versant de la lagune Aghien, cette baisse s'accompagne d'une dégradation du couvert végétal [23] entraînant un apport important de sédiments à la base de la réduction du volume de la cuvette de cette lagune [24], [18]. A cela s'ajoute le pompage prévu de 250 000 m³/jour (soit environ 11 400 m³/h) de la rivière côtière Mé, plus important tributaire continental de cette lagune en marée haute qui pourrait entraîner une modification du fonctionnement hydrodynamique de cette lagune. Ainsi, le projet « Aghien » a été initié en vue d'évaluer l'impact concilié de la baisse des apports fluviaux et des pompages sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune Aghien à travers une modélisation. Elle passe par la détermination des paramètres hydrodynamiques utilisés comme données d'entrée du modèle.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est située au sud-est de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 3°49'00" W et 3°55'30" W et les latitudes 5°21'30" N et 5°26'30" N. Elle est constituée de la lagune Aghien, du chenal naturel reliant les lagunes Aghien et Potou et d'une portion de 200 m de la rivière Mé au voisinage de sa confluence. Son climat est de type équatorial de transition à l'instar de celui du district d'Abidjan reparté sur quatre (4) grandes saisons dont deux (2) saisons pluvieuses et deux (2) saisons sèches [25]. Les précipitations annuelles dans cette zone, centrée sur le mois de juin, ont une moyenne estimée à 1522 mm. Quatre (4) sections de mesure identifiées de 1 à 4 comme indiquée sur la figure 1 ci-dessous ont été jaugées.

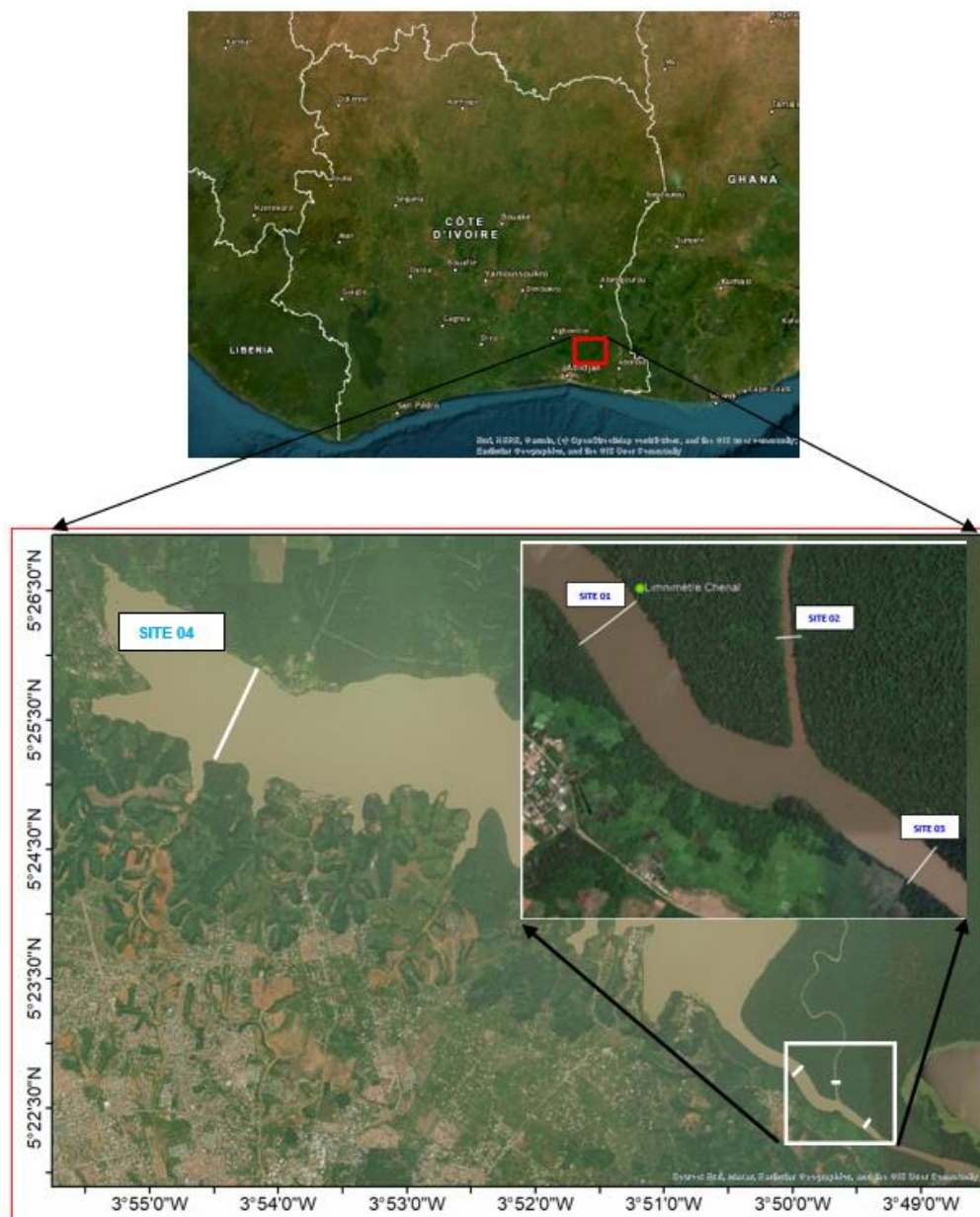


Fig. 1. Site de jaugeage des sections

La position géographique des sites de mesure est résumée dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Coordonnées géographiques des sections jaugées

Sites	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4
X (UTM)	3°49'59"W	3°49'40"W	3°49'29"W	3°54'29"W
Y (UTM)	5°22'44"N	5°22'42"N	5°22'21"N	5°25'12"N

2.2 MATÉRIEL

Pour réaliser cette étude, un profileur acoustique de courant à effet Doppler (ADCP) de type Work Horse Rio Grande à bande large de fréquence 1 200 kHz a été utilisé pour mesurer les vitesses dans la zone d'étude [26]. L'ADCP est monté sur la coque du bateau avec une orientation du transducteur 3 vers l'avant d'une inclinaison de 20° par rapport à la verticale [27].

L'ordinateur muni du logiciel WinRiver II est ensuite connecté à l'ADCP et un fichier de configuration pour contenir les mesures effectuées est créé.

L'appareil envoie et reçoit un signal acoustique à une fréquence de 1 200 kHz. Il permet ainsi l'acquisition des données jusqu'à une profondeur de 30 m avec une erreur de mesure de la vitesse de 0,1 cm/s. Les données incluent la vitesse du courant en 3 dimensions ainsi que l'intensité de l'écho, à partir des 4 projecteurs acoustiques.

2.3 MÉTHODOLOGIE

2.3.1 ENREGISTREMENT DU COURANT

Les mesures ont été réalisées sur les 2 cycles de marée (marée basse et marée haute). Pour chaque section, au moins quatre (04) traversées sont nécessaires dans le but de retenir les traversées donnant les meilleurs résultats [28]. Après le montage et le paramétrage de l'ADCP, il est plongé à 20 cm sous la surface de l'eau et réglé pour faire des mesures dans des cellules de 25 cm d'épaisseur sur toute la colonne d'eau [29]. Enfin, les traversées débutent en s'éloignant lentement (à une vitesse de 6 km/h) de la rive préalablement choisie vers la rive opposée. On traverse plusieurs fois la section (minimum 4 transects) ce qui permet d'obtenir plusieurs valeurs d'un même paramètre que l'on peut ensuite moyenner [28]. Avant et après chaque traversée, la distance entre l'embarcation et la rive (de très faible profondeur où la navigation n'est pas possible) est estimée.

2.3.2 VALIDATION

Les transects validés sont ceux dont les dépouillements ont permis d'obtenir la meilleure dispersion autour de la moyenne: $\text{Ecart-type}/|\text{moyenne}| \leq 5\%$ qui représentent le seuil admis [30]. Il convient ici d'analyser les écarts des valeurs obtenues de chaque paramètre mesuré par rapport à la moyenne.

3 RÉSULTATS

A l'issue des traitements énoncés ci-dessus, les résultats obtenus se présentent comme indiqués ci-dessous. Il s'agit d'un résumé des moyennes de débits calculés, des vitesses d'écoulement, des largeurs des sections de mesure et des sections mouillées au cours des deux cycles de marées.

3.1 MARÉE BASSE

3.1.1 SITE 1 (CHENAL AMONT) ET 3 (CHENAL AVAL)

Les mesures faites en marée basse dans le chenal ont permis de caractériser l'hydraulique du chenal à travers les valeurs obtenues consignées dans le tableau 2.

En marée basse, dans les sections de jaugeage du chenal, la largeur est de 204,76 m et de 114,02 m respectivement en amont et en aval pour des profondeurs moyennes correspondantes de 4,3 m et 5,55 m. Les surfaces mouillées sont de 881,1 m² en amont et de 630,64 m² en aval. Les vitesses moyennes d'écoulement sont plus importantes dans la section en aval qu'en amont. En aval, la vitesse moyenne est estimée à 0,42 m/s contre 0,25 m/s dans la section amont du chenal. Les débits moyens associés sont de 220,71 m³/s et 265,15 m³/s respectivement pour les sections amont et aval.

Tableau 2. *Caractéristiques hydrauliques des sections amont et aval du chenal*

Site	Largeur (m)	Profondeur Moyenne (m)	Surface Mouillée (m ²)	Vitesse moyenne (m/s)	Débits (m ³ /s)
1 (Chenal amont)	204,76	4,3	881,1	0,25	220,71
3 (Chenal aval)	114,02	5,55	630,64	0,42	265,15

Les vitesses d'écoulement sont nettement plus importantes en aval qu'en amont en marée basse. Elles vont de 0 à 1,087 m/s dans la section aval contre une variation de 0 à 0,859 m/s dans la section amont (Figure 2).

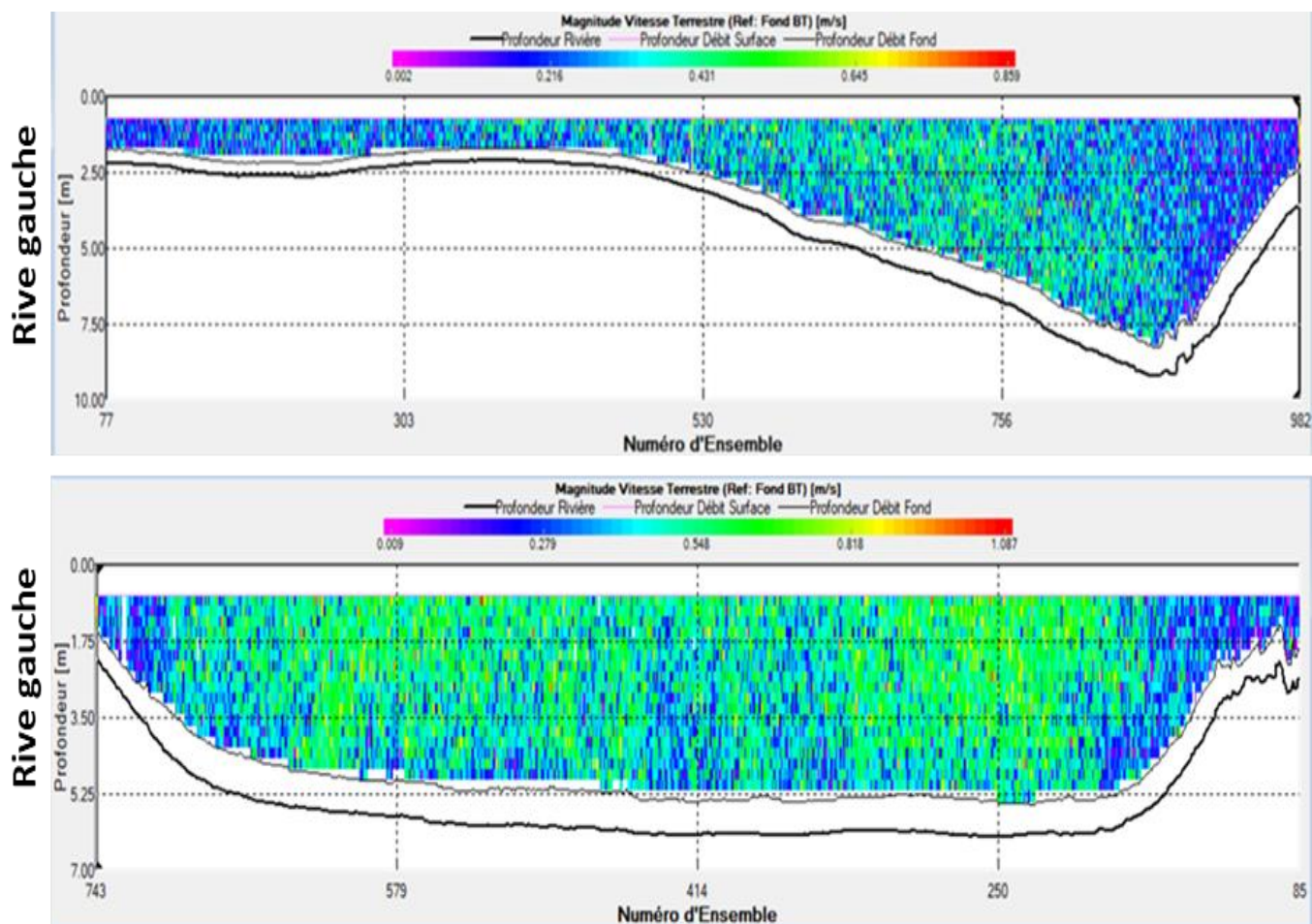


Fig. 2. Profil en travers des sections du chenal: a) section amont; b) section aval

Lorsque la marée est basse, le profil des vecteurs vitesse indiquent un écoulement dirigé uniquement vers la lagune Potou en aval et ce quelle que soit la section (amont ou aval) (Figure 3). La densité des vecteurs vitesse dans la section aval du chenal justifie de l'importance des écoulements dans cette section par rapport à la section amont.

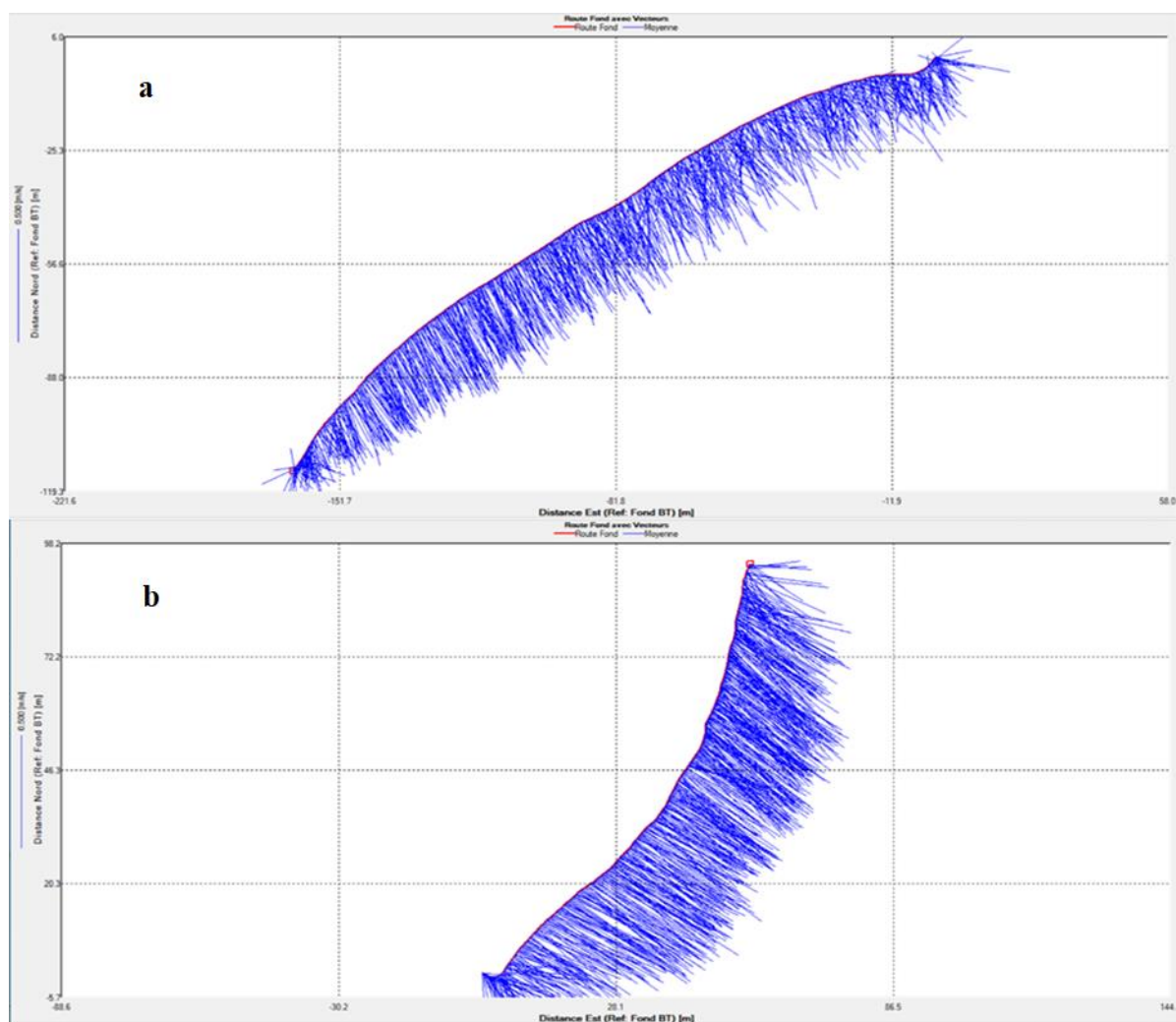


Fig. 3. Profil des vecteurs vitesse des sections du chenal: a) section amont; b) section aval

3.1.2 SITE 2 (RIVIÈRE MÉ)

En marée basse la largeur de la section jaugée de la rivière Mé est de 39,6 m pour une profondeur moyenne de 6,28 m avec une surface mouillée de 248,94 m². La vitesse moyenne des écoulements est estimée à 0,23 m/s dans cette section pour un débit moyen de 57,770 m³/s (Tableau 3).

Tableau 3. Paramètres hydrodynamiques de la section de la Mé au voisinage de sa confluence

Site	Largeur (m)	Profondeur Moyenne (m)	Surface mouillée (m ²)	Vitesse moyenne (m/s)	Débits Moyen (m ³ /s)
2 (la Mé)	39,6	6,28	248,94	0,23	57,770

Le jaugeage en marée basse de cette section de la rivière Mé a montré que les vitesses d'écoulements varient de 0 à 0,751 m/s. Cependant, les vitesses d'écoulement se situent majoritairement dans la fourchette 0,193 m/s et 0,565 m/s (Figure 4).

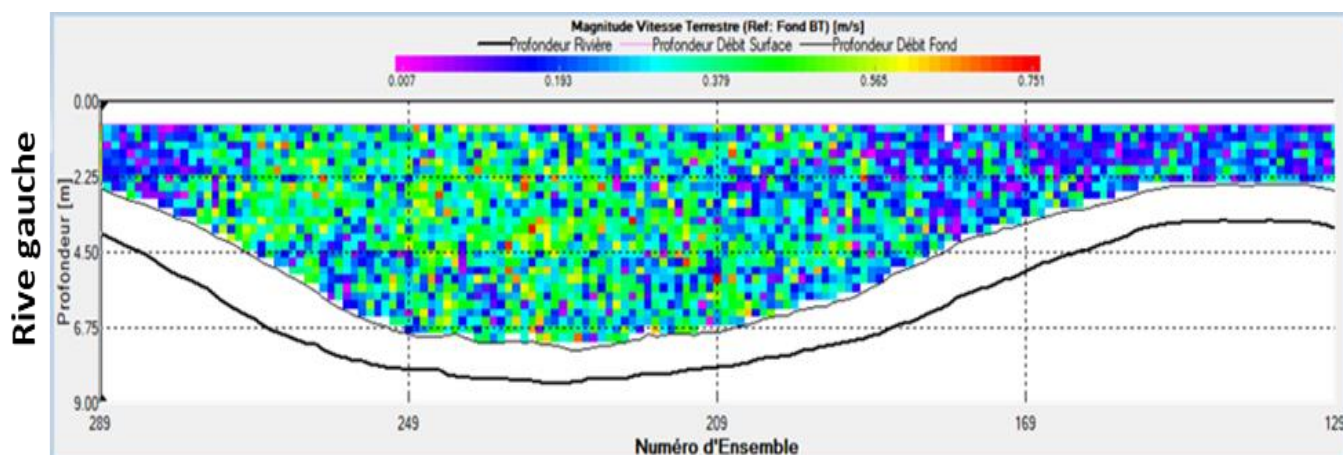


Fig. 4. Profil en travers de la section de la Mé au voisinage de sa confluence

Les vecteurs vitesse indiquent des écoulements unidirectionnels dirigés vers le chenal (Figure 5).

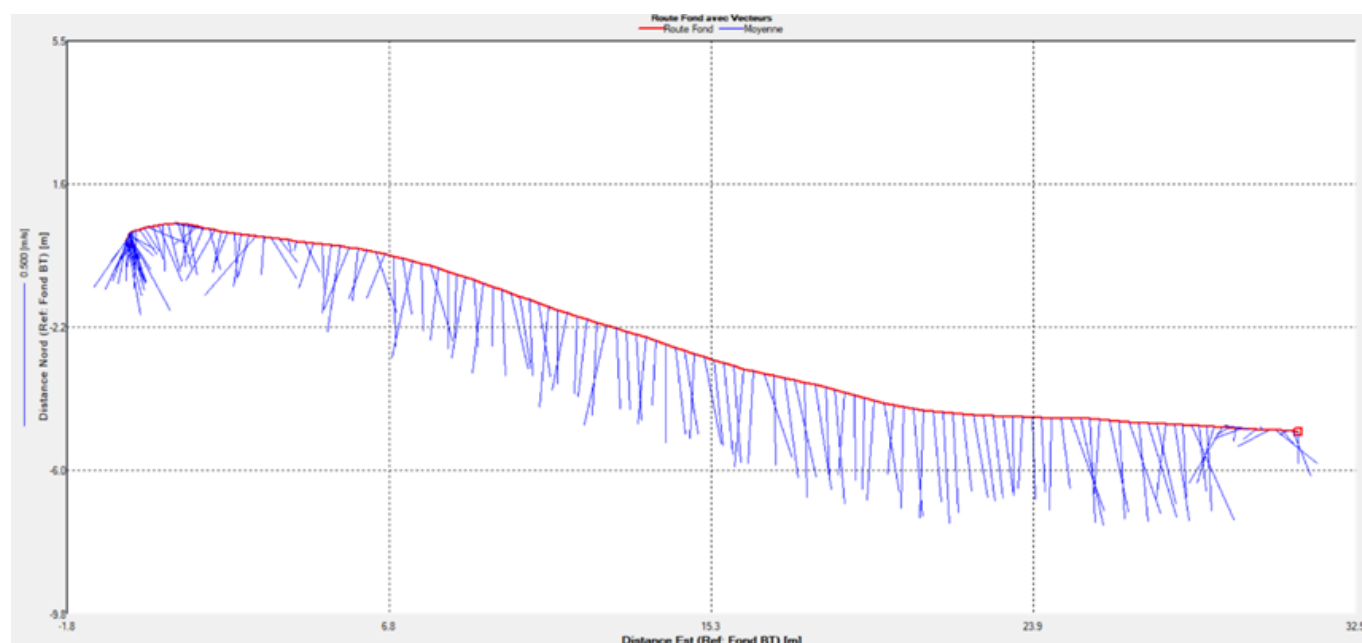


Fig. 5. Profil des vecteurs vitesse d'une section de la Mé au voisinage de sa confluence

3.2 MARÉE HAUTE

3.2.1 SITE 1 (CHENAL AMONT) ET 3 (CHENAL AVAL)

La vitesse moyenne des écoulements, la section mouillée, la profondeur moyenne et le débit moyen pendant le jaugeage en marée haute dans le chenal amont et aval sont contenues dans le tableau 4.

La largeur moyenne est de 201,34 m et 112,77 m respectivement dans le chenal amont et aval pour des profondeurs moyennes de 4,43 m et 5,46 m. Les surfaces mouillées correspondantes sont estimées à 893,45 m² et 615,77 m². Les vitesses moyennes sont évaluées à 0,315 m/s et 0,385 m/s respectivement en amont et en aval. Les débits associés sont de 303,9 m³/s et 237,22 m³/s correspondant aux sections de jaugeage amont et aval.

Tableau 4. Caractéristiques hydrodynamiques dans des sections du chenal (section amont et section aval)

Site	Largeur (m)	Profondeur Moyenne (m)	Surface Mouillée (m ²)	Vitesse moyenne (m/s)	Débits moyen (m ³ /s)
1 (Chenal amont)	201,34	4,43	893,45	0,315	303,9
3 (Chenal aval)	112,77	5,46	615,77	0,385	237,22

Les vitesses d'écoulements varient de 0 m/s à 1,097 m/s dans la section amont du chenal et de 0 m/s à 1,011 m/s dans la section aval. En amont, les écoulements les plus rapides ont lieu près de la rive droite (Figure 6a) alors que dans la section aval, de forme presque trapézoïdale, ils ont lieu au centre du lit (Figure 6b).

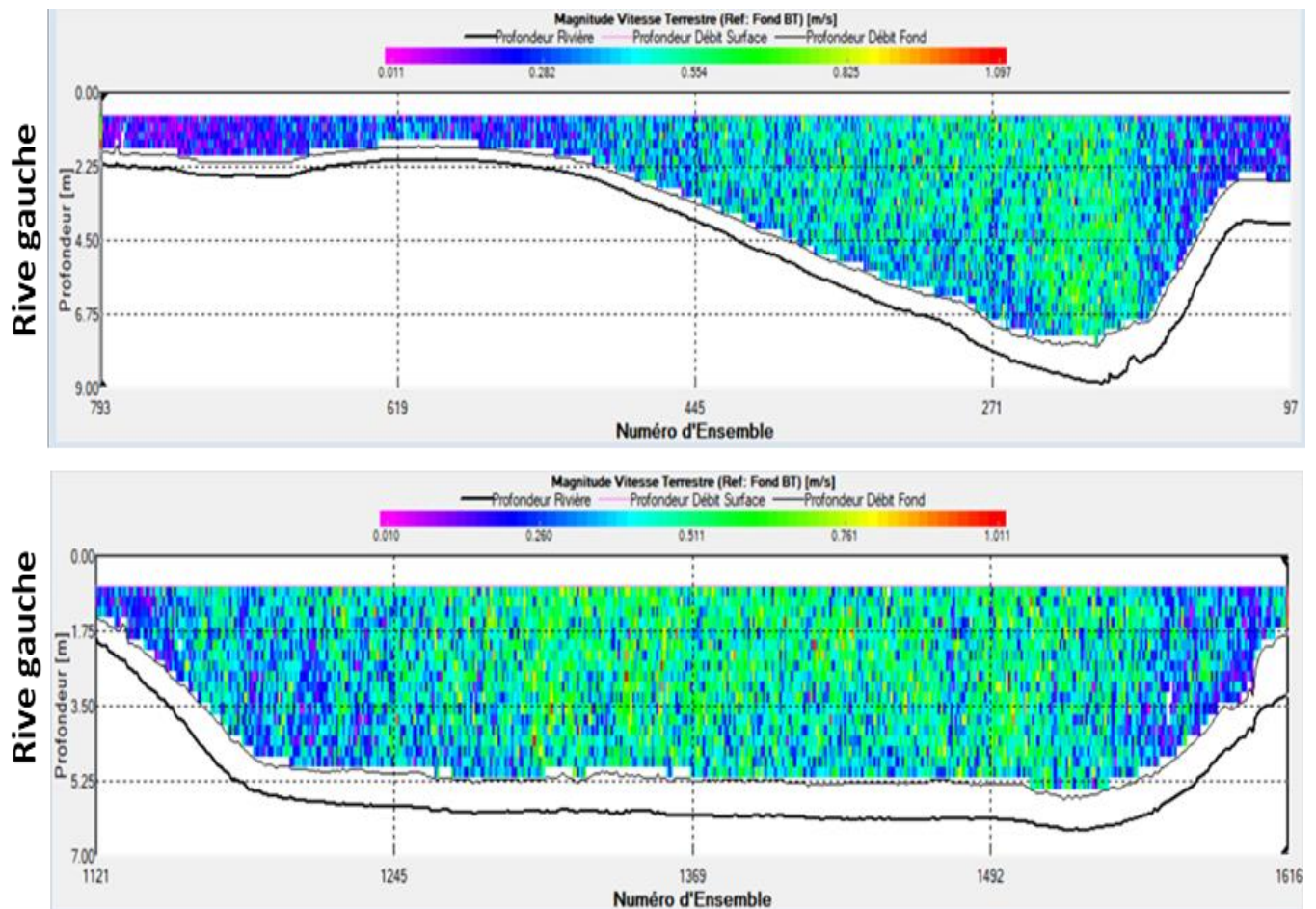


Fig. 6. Profil en travers et variation de la vitesse: a) section amont; b) section aval

En marée haute, les écoulements dans le chenal sont dirigés vers la lagune Aghien indiquant une entrée d'eau, dans cette lagune, en provenance de la Mé et de la lagune Potou. De plus, on constate que les vecteurs vitesse sont plus dense en amont et en aval respectivement en marée haute et en marée basse (Figure 7).

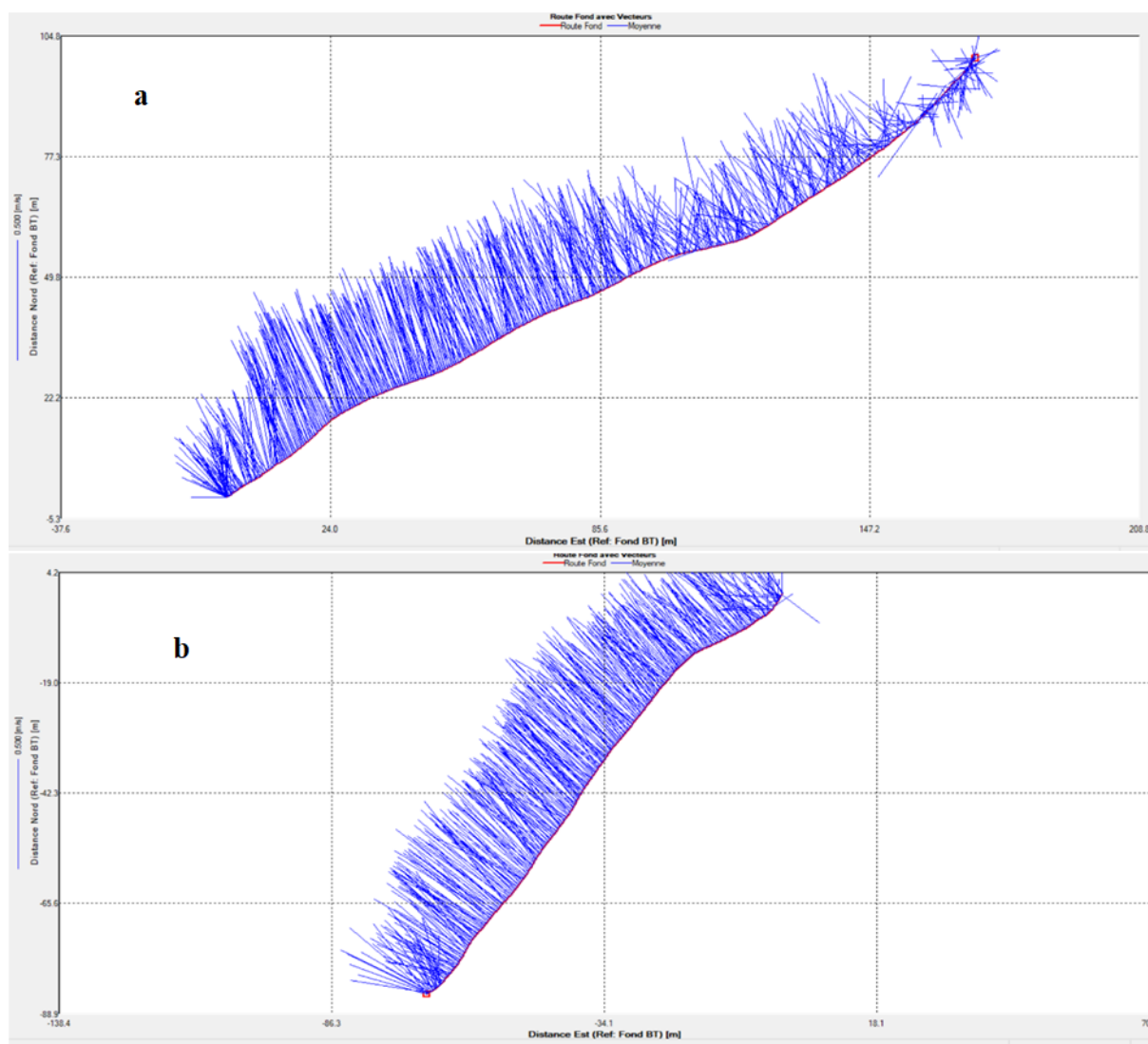


Fig. 7. Vecteurs vitesse des sections de mesure: a) amont; b) aval

3.2.2 SITE 2 (LA MÉ)

La rivière Mé, dans la section de jaugeage, a une largeur de 42,5 m pour une profondeur moyenne de 7,4 m en marée haute. La surface mouillée de la section en marée haute est évaluée à 298 m² pour une vitesse moyenne des écoulements de 0,18 m/s et un débit de 40,29 m³/s (Tableau 5).

Tableau 5. Paramètres hydrodynamiques de la Mé au voisinage de sa confluence

Site	Largeur moyenne (m)	Profondeur moyenne (m)	Surface mouillée (m ²)	Vitesse Moyenne (m/s)	Débats moyen (m ³ /s)
2 (la Mé)	42,5	7,4	298	0,18	40,29

Dans la section jaugée de la Mé, les vitesses d'écoulement oscillent entre 0 m/s et 0,771 m/s. Les plus fortes valeurs de la vitesse d'écoulement sont majoritairement enregistrées dans la bande centrale du lit de la section où les profondeurs sont les plus importantes (Figure 8).

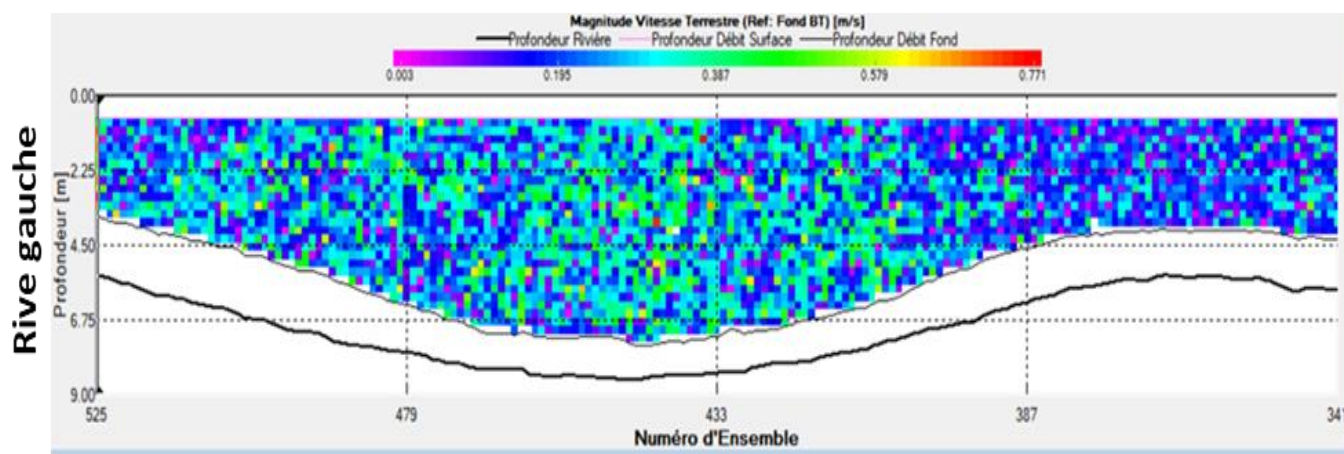


Fig. 8. Profil en travers de la section de Mé au voisinage de sa confluence

Bien que la vitesse moyenne des écoulements régresse en passant de la marée basse à la marée haute, le sens des vecteurs vitesse indique un écoulement unidirectionnel tout comme en marée basse dirigé vers le chenal (Figure 9). Ainsi, quel que soit le niveau de la marée dynamique, les eaux de la rivière Mé alimentent toujours le chenal reliant les lagunes Aghien et Potou respectivement en amont et aval de la confluence de cette rivière.

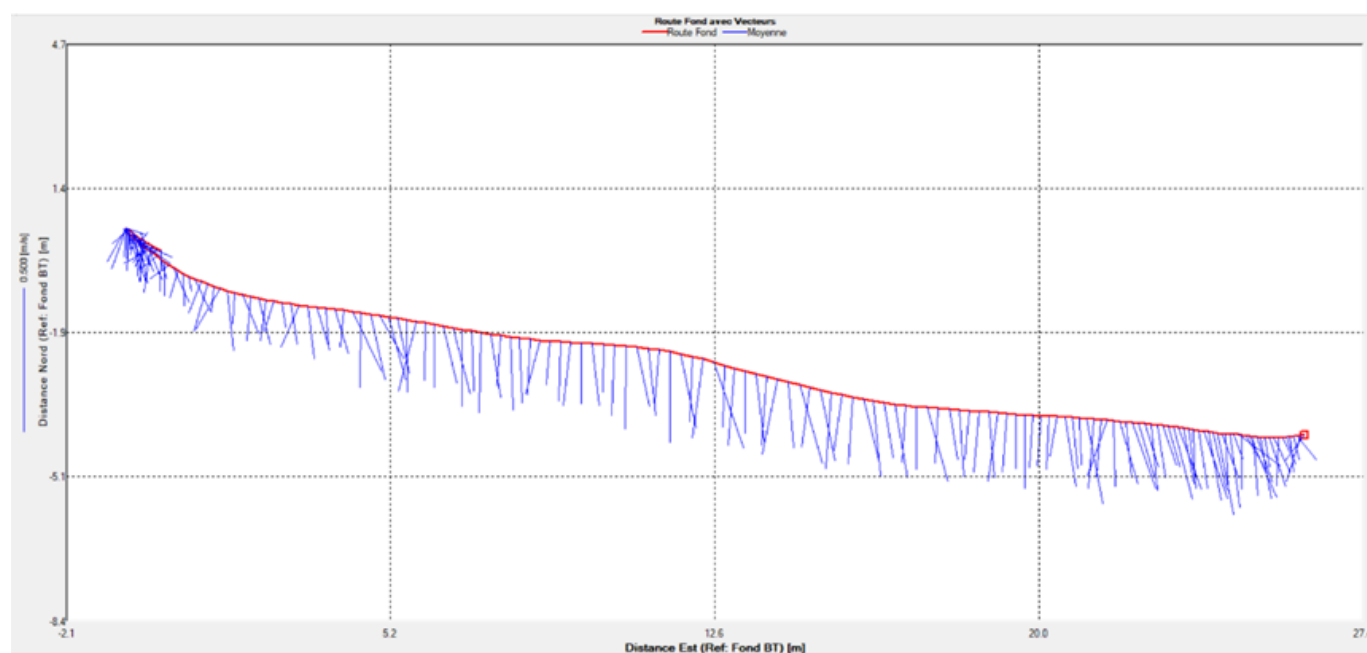


Fig. 9. Profil des vecteurs vitesse d'une section de la Mé au voisinage de sa confluence

3.2.3 SITE 4 (ZONE DE PRISE D'EAU)

Dans la lagune Aghien, la zone d'intérêt demeure, conformément aux objectifs de l'étude, la zone de prise d'eau. Pour une meilleure connaissance de la zone d'implantation, une campagne de jaugeage a été menée dans cette zone en vue de déterminer le débit et la vitesse (Tableau 6).

La largeur de la lagune dans la zone de prise d'eau est un peu plus de 1,5 km pour une profondeur moyenne de 5,77 m. La surface mouillée de cette section est de 8124,83 m². Le courant est très faible dans la zone avec une vitesse moyenne des écoulements évaluée à 0,007 m/s pour un débit d'écoulement moyen estimée à 55,031 m³/s.

Tableau 6. Paramètres hydrodynamiques du site 4 (Zone de prise d'eau) revoir la numérotation des tableaux

Site	Largeur (m)	Profondeur moyenne (m)	Surface mouillée (m²)	Vitesse moyenne (m/s)	Débit moyen (m³/s)
Prise d'eau	1509,86	5,73	8124,83	0,007	55,031

Les vitesses d'écoulement sont uniformes sur toute la section jaugée. Elles varient de 0 à 0.296 m/s (Figure 10).

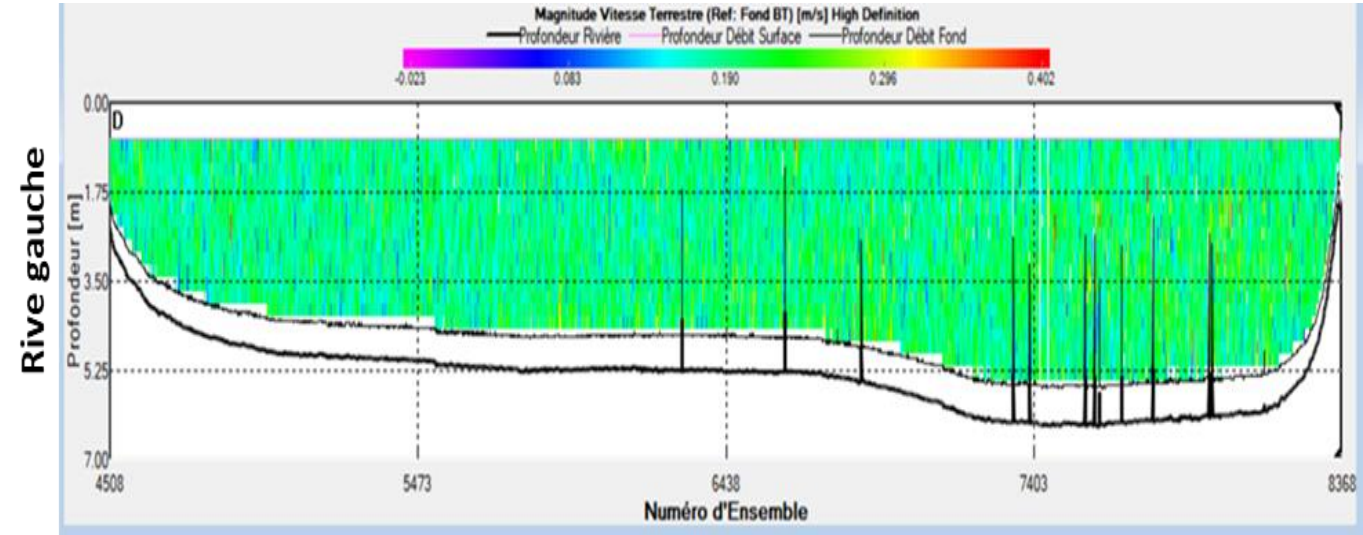


Fig. 10. Profil en travers de la section de la zone de prise d'eau

Cette zone est touchée par la marée dynamique mais avec un courant relativement faible. En marée haute, les écoulements ne sont pas unidirectionnels dans la zone du fait de l'interaction entre les écoulements des apports continentaux (de la Djibi et de la Bété) et la marée dynamique comme le témoigne le sens des vecteurs vitesses (Figure 11).

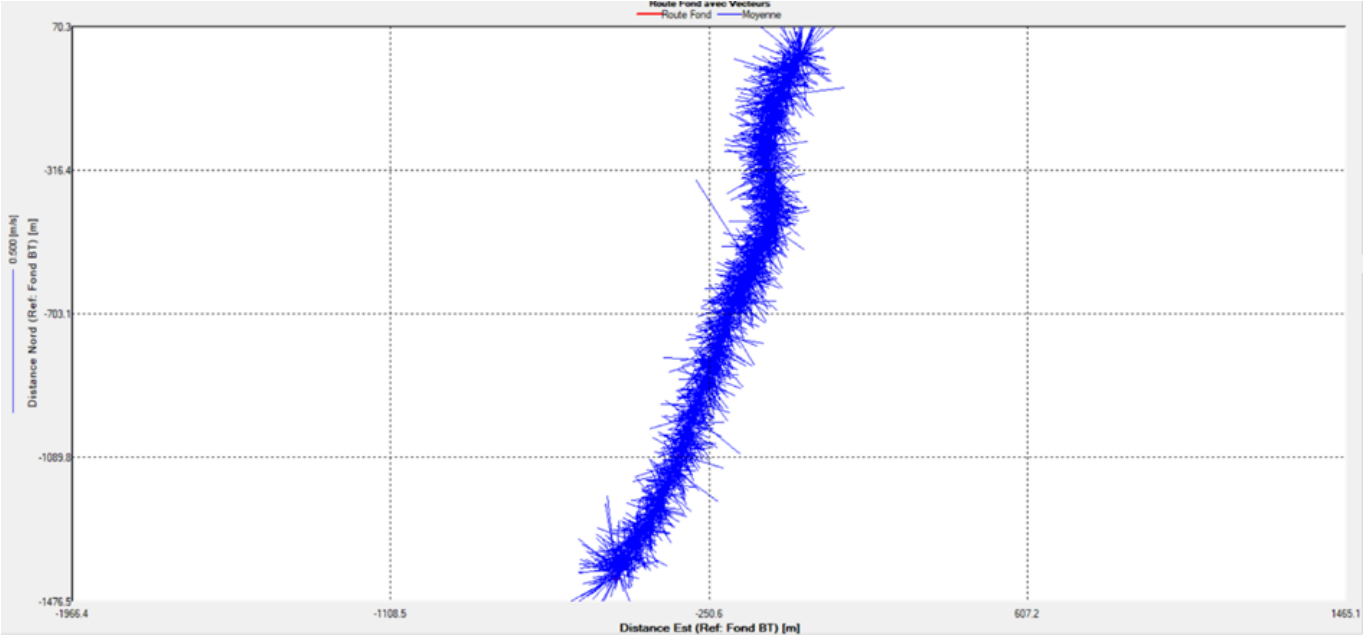


Fig. 11. Profil des vecteurs vitesses de la section de la prise d'eau

Fig. 12.

4 DISCUSSION

Dans cette étude il était question de caractériser les paramètres hydrodynamiques des sections du chenal reliant les lagunes Aghien et Potou d'une part et d'autres les sections de la rivière Mé et de zone de prise d'eau dans la lagune Aghien. A cet effet, des jaugeages effectués au moyen de l'ADCP de type Work Hose Rio Grande ont permis de connaître les différents paramètres hydrodynamiques d'intérêt.

Au niveau de la section de la rivière côtière Mé, les vecteurs vitesse dans la section de la Mé ont montré que les écoulements sont permanemment dirigés vers le chenal ce qui témoigne de l'absence d'intrusion d'eau provenant de la marée dynamique. Cependant, une baisse de la vitesse des écoulements a été observée en marée haute. En effet, la vitesse moyenne des écoulements est passée de 0,23 m/s en marée basse à 0,18 m/s en marée haute. Cette variation de la vitesse des écoulements serait due à l'onde de la marée qui a tendance à s'opposer aux écoulements de la Mé dans cette section. Ainsi, la section jaugeée se situerait au-delà de la zone de ressentie de la marée dynamique [31].

Dans le chenal, en marée basse, la vitesse moyenne et le débit associé sont plus important dans la section aval que dans la section amont. Pendant cette période, la vitesse moyenne passe de 0,25 m/s à 0,42 m/s de l'amont vers l'aval et les débits correspondants sont de 220,71 m³/s et 265,15 m³/s. L'importance de ces paramètres hydrodynamiques en aval serait due au fait qu'en marée basse les eaux de la Mé et de la lagune Aghien se mélangent pour converger vers la lagune Potou en aval [18] comme le montre le sens des vecteurs vitesse. En marée haute, c'est le phénomène inverse qui se produit. Les eaux provenant de l'Atlantique repoussent les masses d'eau de la Mé vers la lagune Aghien. Il s'ensuit un accroissement de la vitesse moyenne et du débit d'écoulement dans la section amont [6] qui passent à 0,315 m/s et à 303,9 m³/s respectivement pour la vitesse moyenne et le débit moyen correspondant.

L'analyse des vecteurs vitesse indique que la zone de prise d'eau est sous l'influence des écoulements des tributaires permanent (Djibi et Bété) et des eaux de la remontée marine avec de très faibles vitesses d'écoulements (0,007 m/s). Ainsi, l'orientation des vecteurs vitesse montre que les eaux de la Djibi et de la Bété s'écouleraient vers le chenal et celles de la remontée marine dans le sens opposé.

5 CONCLUSION

Cette étude avait donc pour objectif de déterminer la courantologie du chenal, de la Mé et de la lagune Aghien. Au cours de cette étude de mesures des paramètres hydrodynamiques, quatre (4) sections préalablement identifiées ont été jaugeées à l'aide du profileur acoustique de courant à effet Doppler (ADCP) de type Work Horse Rio Grande.

Au regard des résultats obtenus, on note qu'en marée haute il y a une forte remontée des eaux dans le chenal au niveau de la section 1 de mesure avec un débit moyen allant jusqu'à 303,9 m³/s due à l'effet de la marée contre 220,71 m³/s en marée basse. Cependant, dans les sections 2 et 3, l'effet de la remontée a bien atténué les débits d'écoulement moyens respectivement de 55,730 m³/s à 40,29 m³/s dans la section 2 et de 265,15 m³/s à 237,22 m³/s dans la section 3.

Les vitesses moyennes varient en fonction du niveau de la marée. Les vitesses moyennes en marée basse sont évaluées à 0,25 m/s, 0,23 m/s et 0,42 m/s respectivement dans la section 1, 2 et 3 contre 0,315 m/s, 0,18 m/s et 0,385 m/s en marée haute.

Les surfaces mouillées des sections jaugeées sont estimées, en marée basse, à 881,1 m², 248,94 m² et 630,64 m² respectivement pour la section 1 (chenal amont), section 2 (la Mé) et la section 3 (chenal aval). Ses valeurs connaissent une variation en marée haute. En marée haute, elles sont évaluées à 893,45 m², 298 m² et 615,77 m² respectivement pour la section 1, section 2 et la section 3.

REFERENCES

- [1] UNESCO, La valeur de l'eau. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021, 226 p, 2021.
- [2] W.G. Koukougnon, Milieu urbain et accès à l'eau potable: cas de Daloa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 364 p, 2012.
- [3] UNESCO, Eaux souterraines, Rendre visible l'invisible. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2022, 12 p, 2022.

- [4] F.F. Toure, A.B. Konan-Waidhet, A.B. Yao, A. Diarra et T.J.J. Koua, «Spatial Analysis of Access to Drinking Water for the Populations of the Lobo Watershed in Nibéhibé (Central-Western Côte d'Ivoire)», *European Journal of Applied Sciences*, Vol. 10, no. 3, pp. 352-366, 2022.
- [5] A. Bodian, H. Dacosta et A. Dezetter, «Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique», *Géographie Physique et Environnement*, Vol. 5, no. 2011, pp. 107-124, 2011. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.1958>.
- [6] E.S. Koffi, T.K. Koffi, J.L. Perrin, L. Séguis, M. Guilliod, D.L. Goné, et B. Kamagaté, «Hydrological and water quality assessment of the Aghien Lagoon hydrosystem (Abidjan, Côte d'Ivoire) ». *Hydrological. Sciences Journal* Vol. 64, no. 15, pp. 1893–1908, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1672875>.
- [7] K.J.O. Kouadio, B. Dibi, M.J. Mangoua, S.G. Eblin, F. Paran et D. Graillot, «Estimation of Groundwater Recharge in the Lobo Catchment (Central Western Region of Côte d'Ivoire)», *Hydrology*, Vol. 9 no. 23, pp. 1-18, 2022.
- [8] F.F. Toure, A.B. Konan-Waidhet, A. Diarra, A.B. Yao, T.J.J. Koua et M. Koita, «Spatial Analysis of the Mode of Management and Conflicts of Use of Water Resources in the Watershed of the Lobo River in Nibehibe (Central-Western Côte d'Ivoire) ». *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, Vol. 24, no. 7, pp. 25-38, 2020.
- [9] SOGREAH Ingénierie, Etude de la gestion et de la protection de la nappe assurant l'alimentation en eau potable d'Abidjan; Etude sur modèle mathématique; Rapports de phase 1 et 2. République de Côte d'Ivoire. Ministère des Infrastructures Economiques. Direction et Contrôle des Grands Travaux (DCGTx actuel BNEDT), 1996.
- [10] N. Soro, T. Lasm, B.H. Kouadio, G. Soro et K.E. Ahoussi, «Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan», *Sud Sciences et Technologies*, no. 14, pp. 30-40, 2004.
- [11] A. Traoré, G. Soro, K.E. Ahoussi, B.S. Bamba, N. Soro et J. Biemi, «Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale: la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)», *Afrique Science*, Vol. 10 no. 3, pp. 73-88, 2014.
- [12] N. Soro, L. Ouattara, K. Dongo, E.K. Kouadio, E.K. Ahoussi, G. Soro, M.S. Oga, I. Savane, et J. Biemi, «Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire: sources potentielles de pollution des eaux souterraines», *International Journal of Biology and Chemical Sciences*, Vol. 4 no. 6, pp. 2203-2219, 2010.
- [13] INS-Institut National de la Statistique, Recensement général de la population et de l'habitat de Côte d'Ivoire. Résultats globaux, 37 p, 2021.
- [14] E.S. Koffi, A. Dao, D.D. Noufe, B. Kamagate, K.J.T. Koffi, S. Diallo et D.L. Gone, «Bilan des apports liquides des rivières Bété et Djibi a la lagune Aghien (Côte d'Ivoire). *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, ISSN 2429-5396, pp. 86-99, 2018.
- [15] A. Traoré, G. Soro, E.K. Kouadio, B.S. Bamba, M.S. Oga, N. Soro et J. Biemi, «Evaluation des paramètres physiques, chimiques et bactériologiques des eaux d'une lagune tropicale en période d'étiage: la lagune Aghien (Côte d'Ivoire)», *International Journal of Biology and Chemical Sciences*, Vol., 6, no. 6, pp. 7048-7058, 2012.
- [16] A. Traoré, K.E. Ahoussi, N. Aka, A. Traore et N. Soro, «Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)», *International Journal of pure and Applied Bioscience*, Vol. 3 no. 4, pp. 312-322, 2015.
- [17] K.J.P. Koffi, Y.A. N'Go, K.M. Yeo, D. Koné et I. Savane, «Détermination des périmètres de protection de la lagune Aghien par le calcul du temps de transfert de l'eau jusqu' à la lagune», *Larhyss Journal* Vol. 2, no. 19, 19–35pp, 2014.
- [18] E.S. Koffi, Modélisation hydrologique et estimation des flux au niveau de la lagune (Abidjan/Côte d'Ivoire) dans un contexte d'urbanisation et de variabilité climatique, Thèse Unique, Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), 212 p, 2021.
- [19] S. Ardoin, H. Lubès-Niel, E. Servat, A. Dezetter, J.F. Boyer, «Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990», *IAHS Publication*, vol. 278, pp. 223-228, 2003.
- [20] K.E. Kouakou, B.T.A. Goula et I. Savane, «Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide: Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire - Burkina Faso)», *European Journal of Scientific Research*, Vol.16, no. 1, pp. 31-43, 2011.
- [21] E. Amoussou, P. Camberlin et G. Mahé, «Impact of climatic variability and the Nangbeto Dam on the hydrology of the Mono-Couffo system (West Africa)», *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57, no. 4, pp. 805-817, 2012.
- [22] A. Faty, A. Kane et A.L. Ndiaye, «Influence de la manifestation climatique sur les régimes pluviométriques saisonniers dans le haut bassin versant du Sénégal», *Journal of water science*, Vol. 30, no. 2, 10 p, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.7202/1042915>.
- [23] S. Diallo, D.E. Nouffe, B.Z.A. Tra, D.L. Gone, E.S. Koffi et K. J.T. Koffi, «Effects of vegetation cover dynamics on runoff in the Aghien lagoon watershed in Côte d'Ivoire», *European Scientific Journal*, Vol. 14, no. 36, ISSN: 1857 – 7881, 2018.

- [24] Y.A. N'Guessan, Analyse morphologique, sédimentologique et environnement de dépôt des sédiments superficiels des lagunes Adjin et Potou (Zone littorale de la Côte d'Ivoire), Thèse Unique, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 171 p, 2008.
- [25] K.S. Konan, K.B. Kouakou, M-J. Ohou, K.F. Konan et K.B. Dongui, «Variation saisonnière des paramètres abiotiques de la lagune Aghien (Côte d'Ivoire)», *Journal of Applied Biosciences* 120: ISSN 1997-5902, pp. 12042-12052, 2017. <https://dx.doi.org/10.4314/jab.v120i1.7>.
- [26] RDI Teledyne Rio Grande ADCP. www.rdiinstruments.com/rio.aspx, (2007), (accédé le 27 Avril 2023).
- [27] D.S. Mueller et C.R. Wagner, Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat, US Geological Survey Techniques and Methods 3A-22, US Geological Survey, Reston, VA, USA, 2009.
- [28] M. Muste, K. Yu et M. Spasojevic (2004). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements, *Flow Measurement Instrumentation*, 15 p, 1–16.
- [29] S.K. Ukarande, «River Flow Measurement In: Irrigation Engineering and Hydraulic Structures, *Springer*, Cham, ISBN 978-3-031-33552-5, pp. 304-316, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33552-5_15.
- [30] D.S. Mueller & C.R. Wagner, «Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport», *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, no. 12, ISSN 0733-9429/2007/12, pp. 1329–1336, 2007.
- [31] B. Lecoquierre, «L'estuaire de la Seine: Espace et territoire» *Presses universitaires de Rouen et du Havre*, 192 p, 1998. Doi: <http://10.4000/books.purh.7101>.

RESUME

De récentes études ont mis en exergue un déficit d'eau potable dans le district d'Abidjan. Pour combler ce déficit, plusieurs ressources sont en voie d'exploitation notamment la lagune Aghien. Malheureusement, l'impact des pompages couplés à l'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé et aux effets des changements climatiques sur le fonctionnement de cette lagune n'est pas connu. C'est dans le but d'y remédier que cette étude a été initiée avec pour but de modéliser la dynamique hydro-sédimentaire et de diffusion d'une pollution sous l'influence des pressions anthropiques et des variations de la marée. Se servant des échantillons d'eau prélevés et des débits des tributaires, les flux sédimentaires ont été évalués à 154 t/j en basses eaux et à 411 t/j en hautes eaux. L'analyse des échantillons de sédiments ressort un fond lagunaire recouvert de vase dans sa bande centrale avec présence, près des berges, de sables moyens à grossiers de forme majoritairement subanguleuse à l'aspect émousé et luisant contenant en forte proportion des minéraux de quartz. Ces sédiments sont prélevés à des profondeurs pouvant atteindre 17 m à la confluence de la Mé et inférieures à 11 m dans la cuvette de la lagune Aghien. Cette lagune est alimentée par des tributaires permanents et aussi périodiques qui sont les plus importants en termes de volume débité. La résolution des équations de Saint Venant par la méthode des volumes finis en maillage régulier en adoptant un schéma implicite d'ordre 3 a permis la mise en place d'un modèle hydrodynamique. La simulation de la dynamique des masses d'eau avec ce modèle a montré que les pompages entraîneraient une baisse moyenne de $1,2 \pm 0,5$ mm du niveau d'eau. A l'horizon 2070, cette baisse moyenne serait de $2,8 \pm 1,3$ mm. Quant à la dynamique sédimentaire modélisée à l'aide du modèle *Mike 21 Flow Model FM*, elle a montré que dans la bande centrale de la lagune et dans la zone des pompages, les quantités déposées sont relativement faibles (< 105 g/m²). Ces activités provoqueront une baisse moyenne des dépôts d'environ $4,15 \pm 1,3$ g/m² au niveau de la zone des pompages dans la lagune Aghien. L'ouverture de l'embouchure du fleuve Comoé a fait passer la salinité moyenne de 0,0 PSU à 2,5 PSU en marée haute dans la lagune en saison sèche. A l'horizon 2070, le taux de sel modélisé sous *Mike 21 Flow Model FM* suivant les scénarii RCP8.5 et SSP5-8.5, pourrait connaître une augmentation moyenne de 0,3 PSU dans la cuvette de la lagune Aghien. Il ressort des résultats analysés que sur la période allant de mai à janvier à moyen termes, l'impact avéré des pressions ne compromettrait pas l'exploitation de la lagune Aghien à des fins d'alimentation en eau potable.

Mots-Clés : Dynamique hydro-sédimentaire ; Dynamique de Diffusion de la Salinité ; Equations de Saint-Venant ; Méthode des Volumes Finis ; Schéma Implicite.

ABSTRACT

Recent studies have highlighted a shortage of drinking water in the Abidjan district. To make up the shortfall, several resources are being exploited, notably the Aghien lagoon. Unfortunately, the impact of pumping coupled with the opening of the mouth of the Comoé river and the effects of climate change on the functioning of this lagoon is not known. The aim of this study was to model the hydro-sedimentary dynamics and diffusion of pollution under the influence of anthropogenic pressures and tidal variations. Using water samples and tributary flows, sediment flows were estimated at 154 t/day at low water and 411 t/day at high water. Analysis of the sediment samples revealed a lagoon floor covered with silt in the central band, with medium to coarse sand near the banks, mostly sub-angular in shape, with a blunt, shiny appearance and a high proportion of quartz minerals. These sediments are taken from depths of up to 17 m at the confluence of the Me and less than 11 m in the Aghien lagoon. This lagoon is fed by permanent and periodic tributaries, which are the most important in terms of volume discharged. A hydrodynamic model was developed by solving the shallow water equations using the finite volume method in a regular mesh, adopting an implicit scheme of order 3. Simulation of the dynamics of the water masses using this model showed that pumping would cause an average drop of 1.2 ± 0.5 mm in the water level. By 2070, the average drop would be 2.8 ± 1.3 mm. Sediment dynamics modelled using the *Mike 21 Flow Model FM* showed that in the central strip of the lagoon and in the pumping zone, the quantities deposited are relatively low (< 105 g/m²). These activities will cause an average decrease in deposition of around 4.15 ± 1.3 g/m² in the pumping zone in the Aghien lagoon. The opening of the Comoe river estuary as increased the average salinity from 0.0 PSU to 2.5 PSU at high tide in the lagoon during the dry season. By 2070, the salinity level modelled using the *Mike 21 Flow Model FM* according to the RCP8.5 and SSP5-8.5 scenarios could see an average increase of 0.3 PSU in the Aghien lagoon basin. The results analysed show that, over the medium term from May to January, the proven impact of the pressures would not compromise the use of the Aghien lagoon for drinking water supply purposes.

Key-words: Hydro-sedimentary dynamics; Salinity diffusion dynamics; Saint Venant equations; Finite volume method; Implicit scheme.