

République de Côte d'Ivoire

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Université de Cocody
N° d'ordre : 179



UFR des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières

Laboratoire de Géologie Marine et de Sédimentologie

THÈSE

Présentée à l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières
de l'Université de Cocody

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE COCODY

Spécialité : Géologie Marine (océanologie)

par

WANGO Ted-Edgard

THÈME

**MODÉLISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE, DE LA DISPERSION
DU SEL ET DE L'EAU DOUCE DANS LE COMPLEXE LAGUNAIRE
DE LA CÔTE D'IVOIRE (GRAND-LAHOU, EBRIÉ ET ABY)**

Soutenue publiquement le 21/02/2009 devant le jury composé de :

M. BIEMI Jean	Professeur, Université de Cocody	Président
M. MONDE Sylvain	Maître de Conférences, Université de Cocody	Directeur de thèse
M. MOUSSA Mahmoud	Professeur, ENIT (Tunis-Tunisie)	Rapporteur
M AKA Kouamé	Professeur, Université de Cocody	Examineur
M. SOMBO B. Célestin	Maître de Conférences, Université de Cocody	Examineur



THÈSE

Année 2008-2009

présentée à

N° d'ordre : 179

L'UFR DES SCIENCES DE LA TERRE ET DES RESSOURCES MINIERES

DE

L'UNIVERSITE DE COCODY

Pour obtenir le grade de

Docteur

Spécialité : Océanologie

par

WANGO Ted-Edgard

**MODÉLISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE, DE LA DISPERSION
DU SEL ET DE L'EAU DOUCE DANS LE COMPLEXE LAGUNAIRE
DE LA CÔTE D'IVOIRE (GRAND-LAHOUE, EBRIÉ ET ABY)**

Soutenue publiquement le 21/02/2009 devant le jury composé de :

M. BIEMI Jean	Professeur, Université de Cocody	Président
M. MONDE Sylvain	Maître de Conférences, Université de Cocody	Directeur de thèse
M. MOUSSA Mahmoud	Professeur, ENIT (Tunis-Tunisie)	Rapporteur
M AKA Kouamé	Professeur, Université de Cocody	Examineur
M. SOMBO B. Célestin	Maître de Conférences, Université de Cocody	Examineur

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier très chaleureusement le Professeur AKA Kouamé alors ex Doyen de l'UFR-STRM (Sciences de la Terre et des Ressources Minières) de m'avoir confié au Professeur MONDE pour diriger ce travail. Merci Professeur pour avoir corrigé minutieusement ce manuscrit et également pour vous être toujours préoccupé de l'état d'avancement de cette thèse.

Je remercie le Professeur MONDE, mon Directeur de thèse pour avoir cru en ce travail malgré l'annulation du Projet CORUS. En développant pour la première fois un modèle numérique pour le système lagunaire Ebrié au sein du laboratoire de Géologie Marine et de Sédimentologie (GEOMARSE), M. MONDE a ouvert des pistes prometteuses pour la recherche dans ce domaine. De plus, il m'a fait bénéficier de ses contacts en Tunisie, où j'ai effectué un stage dans le cadre de ce travail. Pour toutes ces raisons, qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je voudrais ensuite remercier le Professeur Mahmoud MOUSSA à qui m'a fait découvrir non seulement le concept de la modélisation hydrodynamique des milieux aquatiques, mais aussi le modèle numérique SMS. Pour me sortir du borbier informatique lors de la simulation numérique du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire, je l'ai vu s'ingénier afin de modifier le code de calcul du logiciel SMS. Grâce à lui également, j'ai pu participer au programme POGO-NF (*Partnership for Observation of the Global Oceans*) organisé par la *Nippon Foundation (NP)* et l'Institut National des Sciences et Technologie de la Mer de Tunis (INSTM). "Choukrane" Professeur.

J'ai bénéficié d'un stage de trois mois au sein du Laboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement (LMHE) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), grâce à l'accord et à l'appui du Professeur BARGAOUI, Directrice du dit laboratoire. Merci Madame pour votre gentillesse et votre accueil. Je n'oublie pas l'ensemble des chercheurs du Laboratoire.

Un grand merci au Professeur BIEMI Jean, Doyen de l'UFR-STRM pour sa promptitude à répondre à l'ensemble de mes questions administratives et aussi pour avoir accepté de présider le jury lors de la soutenance. Je tiens aussi à remercier, M. SOMBO B. Célestin, Maître de Conférences, qui a accepté d'instruire ce travail.

Merci aux enseignants et chercheurs de l'UFR-STRM qui, de près ou de loin ont participé à ma vie de thésard, pour les discussions scientifiques (avis et conseils sur ce travail). Je cite : les Professeurs KABLAN Pothin, AFFIAN Kouadio, DIGBEHI Zely, Soro NAGNIN, BOFFOUE Olivier, et les Docteurs DJRO Chérubin, AGHUI N'guessan, WOGNIN Valérie, COULIBALY AOUA, LASM Théophile, COULIBALY Yacouba, KOUAME Fernand, ETTIEN Djétchi, DJAGOUA Eric, SALEY Bachir, N'GUESSAN Alexis, KOUAMELAN Alain et OGA Marie-Solange.

Merci à feu le Professeur ASSA Ayemou et au chef du village d'Aby pour l'accueil et l'hébergement durant les trois jours de campagnes bathymétriques et hydrologiques dans le système lagunaire Aby. Merci à tous ceux qui ont mis la main à la pâte du lever au coucher du soleil lors de ces campagnes.

Merci au Docteur CLAON Stéphane de l'UFR-SPB (Sciences Pharmaceutiques et Biologiques) pour toutes les informations sur le système lagunaire Aby.

Un immense merci au Port Autonome d'Abidjan (PAA) et à la PETROCI qui ont mis à ma disposition les cartes bathymétriques des trois principaux systèmes lagunaires. Je remercie particulièrement TAÏ Noël et BEUGRE Daniel pour leur collaboration.

Un autre grand merci aux thésards de GEOMARSE : Mamadou, Colette, Mireille, Laurent, avec qui j'ai partagé et je partagerai sans doute encore le "Quatrième Etage" du Bâtiment de Recherche. A mon ami Nicolas le Rochelais pour les discussions scientifiques via le net, je dis également merci. Je n'oublie pas les collègues Tunisiens.

Je remercie également mes amis : Francis, Eloi, Modeste, Dieudonné, Jacques, Thomas, Manassé, Clotaire, Roslin, Dr KONE Amara, qui me demandaient régulièrement «alors cette thèse ?» sans avoir compris sur quoi je bossais. J'ai une pensée pieuse pour celui qui fut mon meilleur ami MOTO Paul dit "Pablo" et qui est parti très tôt de ce monde.

Merci au Professeur TEA Gokou, Président de l'Université de Cocody pour ses conseils et ses encouragements. Merci à mon oncle TEA DAKAUD Casmir, Directeur du Système d'Information au Port Autonome d'Abidjan qui m'a aidé à imprimer cette thèse. Merci aussi à Monsieur et Madame KOUAME pour leur gentillesse et sollicitude.

Mon merci le plus fort et le plus ému à ceux qui me sont les plus proches et que j'aime : mon père WANGO YASSI Pierre et ma mère TEA DAKAUD Constance, mon jeune frère Philippe et mes sœurs, Denise, Barbara et Lydie. Enfin une caresse à Lulu !!!

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE COMPLEXE LAGUNAIRE DE CÔTE D'IVOIRE	5
1. Contexte géologique et structural de la Côte d'Ivoire	6
1.1. Socle	7
1.2. Bassin sédimentaire	7
1.2.1. Stratigraphie du bassin sédimentaire	8
1.2.2. Tectonique du bassin sédimentaire	8
1.3. Plateau continental.....	9
1.3.1. Morphologie et bathymétrie.....	9
1.3.2. Couverture sédimentaire.....	11
2. Contexte climatique.....	11
3. Caractéristiques morphologiques des systèmes lagunaires ivoiriens	14
3.1. Présentation du système Grand-Lahou	14
3.2. Présentation du système Ebrié	16
3.3. Présentation du système Aby	18
4. Origine et classification des lagunes	21
4.1. Définition des lagunes	21
4.2. Classification et typologie lagunaire	21
4.2.1. Classification de Postma (1969).....	21
4.2.2. Classification de Hayes (1975)	23
4.2.3. Classification de Lankford (1977).....	23
4.2.4. Classification de Nicholset Allen (1981)	25
5. Cadre hydrologique.....	26
5.1. Hydrologie continentale	26
5.1.1. Hydrologie du système Grand-Lahou	27
5.1.2. Hydrologie du système Ebrié	27
5.1.3. Hydrologie du système Aby	27

5.2. Hydrologie marine	28
5.2.1. Marée	28
5.2.2. Courants marins généraux	29
5.2.3. Houle	30
5.2.4. Upwellings	30
5.3. Bilan hydrique	31
5.4. Hydrologie lagunaire.....	31
5.5. Physico-chimie des eaux	32
5.5.1. Physico-chimie des eaux du système Grand-Lahou	32
5.5.2. Physico-chimie des eaux du système Ebrié.....	33
5.5.3. Physico-chimie des eaux du système Aby	33
6. Pression anthropique sur le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire	34
6.1. Pollution du système Grand-Lahou.....	34
6.2. Pollution du système Ebrié	35
6.3. Pollution du système Aby	38
CHAPITRE 2 : MATERIELS & METHODE	39
1. Classification des modèles hydrodynamiques.....	40
1.1. Modèles à une dimension (1D)	40
1.2. Modèles à deux dimensions (2D).....	40
1.3. Modèles à trois dimensions (3D)	42
2. Choix du type de modèle	42
3. Equations de base des modèles à deux dimensions	42
4. Outil de modélisation numérique : <i>SMS</i>	44
4.1. Module <i>GFGEN</i>	44
4.2. Module <i>RMA2</i>	44
4.3. Module <i>RMA4</i>	46
4.4. Module <i>SED2D</i>	46
5. Construction du modèle hydrodynamique	46
5.1. Importation de la bathymétrie dans <i>SMS</i>	46
5.2. Discrétisation de l'espace : maillage des lagunes	52
5.3. Conditions initiales du modèle.....	58

5.4. Conditions aux limites du modèle.....	58
5.4.1. Condition à la limite amont : les débits fluviaux	58
5.4.2. Condition à la limite aval : la marée	59
5.4.3. Condition à la limite supérieure : le vent	59
6. Calage du modèle hydrodynamique	60
6.1. Test de sensibilité du modèle au coefficient de Manning (n)	60
6.2. Test de sensibilité du modèle au coefficient de dispersion (E).....	61
7. Simulations numériques	61
7.1. Simulation de l'hydrodynamique	61
7.2. Simulation de la dispersion de la salinité et de l'eau douce.....	62
CHAPITRE 3 : RESULTATS, INTERPRETATION & DISCUSSION	64
1. Calage du modèle hydrodynamique du complexe lagunaire	65
1.1. Calage du modèle hydrodynamique à l'embouchure de Grand-Lahou	65
1.1.1. Calage par comparaison des vitesses de courants	65
1.1.2. Détermination du coefficient de Manning (n).....	67
1.1.3. Détermination du coefficient de dispersion (E)	68
1.2. Calage du modèle hydrodynamique dans le bassin central du système Ebrié	69
1.2.1. Mesures des hauteurs d'eau disponibles	69
1.2.2. Détermination du coefficient de Manning (n).....	70
1.2.3. Détermination du coefficient de dispersion (E)	71
1.3. Calage du modèle hydrodynamique dans le chenal central d'Assinie	72
1.3.1. Calage par analyse des courants de chenaux	72
1.3.2. Détermination du coefficient de Manning (n).....	74
1.3.3. Détermination du coefficient de dispersion (E)	74
2. Simulations hydrodynamiques du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire	75
2.1. Fonctionnement hydrodynamique du système Grand-Lahou	76
2.1.1. Fonctionnement en période d'étiage	76
2.1.1.1.Champs de courants en étiage	76
2.1.1.2.Variation du niveau de la surface d'eau en étiage	80
2.1.1.3.Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en étiage.....	82
2.1.2. Fonctionnement en période de cure	83

2.1.2.1.	Champs de courants en crue	83
2.1.2.2.	Variation du niveau de la surface d'eau en crue	87
2.1.2.3.	Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en crue	89
2.2.	Fonctionnement hydrodynamique du système Ebrié	90
2.2.1.	Champs de courants en étiage et en crue.....	90
2.2.2.	Variation du niveau de la surface d'eau en étiage et en crue	95
2.2.3.	Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en étiage et en crue ...	99
2.3.	Fonctionnement hydrodynamique du système Aby	101
2.3.1.	Fonctionnement en période d'étiage	101
2.3.1.1.	Champs de courants en étiage	101
2.3.1.2.	Variation du niveau de la surface d'eau en étiage	105
2.3.1.3.	Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en étiage.....	107
2.3.2.	Fonctionnement en période de crue	108
2.3.2.1.	Champs de courants en crue	108
2.3.2.2.	Variation du niveau de la surface d'eau en crue	112
2.3.2.3.	Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en crue	114
2.4.	Fonctionnement hydrodynamique du canal d'Assagny	115
2.4.1.	Fonctionnement en période d'étiage	115
2.4.1.1.	Champs de courants en étiage	115
2.4.1.2.	Variation du niveau de la surface d'eau en étiage	117
2.4.1.3.	Relation entre vitesse et niveau d'eau en étiage.....	117
2.4.2.	Fonctionnement en période de crue	119
2.4.2.1.	Champs de courants en crue	119
2.4.2.2.	Variation du niveau de la surface d'eau en crue	121
2.4.2.3.	Relation entre vitesse et niveau d'eau en crue	121
2.5.	Fonctionnement hydrodynamique du canal d'Assinie	123
2.5.1.	Fonctionnement en période d'étiage	123
2.5.1.1.	Champs de courants en étiage	123
2.5.1.2.	Variation du niveau de la surface d'eau en étiage	125
2.5.1.3.	Relation entre vitesse et niveau d'eau en étiage.....	125
2.5.2.	Fonctionnement en période de crue	127
2.5.2.1.	Champs de courants en crue	127

2.5.2.2.Variation du niveau de la surface d'eau en crue	129
2.5.2.3.Relation entre vitesse et niveau d'eau en crue	129
3. Modélisation de la dispersion sel-eau douce	131
3.1. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le système Grand-Lahou	131
3.1.1. Evolution diurne des salinités	131
3.1.1.1.Evolution en période d'étéage	131
3.1.1.2.Evolution en période de crue	132
3.1.2. Evolution mensuelle des salinités	133
3.2. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le canal d'Assagny	136
3.2.1. Evolution diurne des salinités	136
3.2.2. Evolution mensuelle des salinités	136
3.3. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le système Ebrié	138
3.3.1. Evolution diurne des salinités	138
3.3.1.1. Evolution en période d'étéage	138
3.3.1.2.Evolution en période de crue	138
3.3.2. Evolution mensuelle des salinités	139
3.4. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le canal d'Assinie	142
3.4.1. Evolution diurne des salinités	142
3.4.2. Evolution mensuelle des salinités	143
3.5. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le système Aby	144
3.5.1. Evolution diurne des salinités	144
3.5.1.1.Evolution en période d'étéage	144
3.5.1.2.Evolution en période de crue	145
3.5.2. Evolution mensuelle salinités	145
3.6. Discussion	148
CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES	151
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	155
ANNEXES	166

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

Figure 1 : complexe lagunaire de Côte d'Ivoire 3

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE COMPLEXE LAGUNAIRE DE CÔTE D'IVOIRE

Figure 2 : Carte géologique de la Côte d'Ivoire 6

Figure 3 : Carte géologique et structurale du complexe lagunaire ivoirien 7

Figure 4 : Coupe longitudinale schématique du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire 9

Figure 5 : Carte bathymétrique du plateau continental de Côte d'Ivoire 10

Figure 6 : Régime des vents sur le littoral ivoirien..... 13

Figure 7 : Système lagunaire Grand-Lahou et ses lagunes annexes 15

Figure 8 : Système lagunaire Ebrié 17

Figure 9 : Système lagunaire Aby et ses lagunes annexes 19

Figure 10 : Migrations de la passe d'Assinie..... 20

Figure 11 : Différents types de lagune de Postma..... 22

Figure 12 : Types morphologiques principaux des systèmes lagunaires..... 24

Figure 13 : Classification des lagunes de Nichols et Allen 25

Figure 14 : Bilan hydrique des entrées/sorties d'eau pour la lagune Ebrié..... 31

Figure 15 : Variabilité spatio-temporelle de la salinité en lagune Ebrié 33

Figure 16 : La lagune Ebrié à Abidjan et les principaux points de rejets 37

CHAPITRE 2 : MATERIELS & METHODE

Figure 17: Schéma de fonctionnement du logiciel SMS 45

Figure 18 : Cartographie des fonds lagunaires du système Grand-Lahou 48

Figure 19 : Cartographie des fonds lagunaires du système Ebrié 49

Figure 20 : Cartographie des fonds lagunaires du système Aby 50

Figure 21 : Cartographie des fonds du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire..... 51

Figure 22 : Maillage du système lagunaire Grand-Lahou 53

Figure 23 : Maillage du système lagunaire Ebrié..... 54

Figure 24 : Maillage du système lagunaire Aby 55

Figure 25 : Maillage du canal d'Assagny..... 56

Figure 26 : Maillage du canal d'Assinie 57

Figure 27 : Marée moyenne imposée aux frontières maritimes du modèle	59
Figure 28 : Relation entre les heures de marée et l'évolution des champs de courants	62

CHAPITRE 3 : RESULTATS, INTERPRETATIONS & DISCUSSION

Figure 29 : Stations de mesure des vitesses de courants et points d'observation du niveau de la surface d'eau dans le système Grand-Lahou	66
Figure 30 : Localisation de l'OBS et des points d'observation du niveau de la surface d'eau dans le système Ebrié	69
Figure 31 : Variation temporelle du niveau de la surface d'eau mesurée par l'OBS	70
Figure 32 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés	71
Figure 33 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés	72
Figure 34 : Stations de mesure des vitesses de courants et points d'observation du niveau de la surface d'eau dans le système Aby	73
Figure 35a : Champs de courants à Grand-Lahou en étiage et à pm, pm+2, pm+3	77
Figure 35b : Champs de courants à Grand-Lahou en étiage et à bm, bm+2, bm+3	78
Figure 36 : Champs de courants dans le système Grand-Lahou en étiage et à pm	79
Figure 37 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Grand-Lahou en étiage....	80
Figure 38 : Niveau de la surface d'eau à l'embouchure de Grand-Lahou en étiage	81
Figure 39 : Evolution temporelle des débits à Grand-Lahou en période d'étiage	82
Figure 40 : Evolution temporelle des volumes à Grand-Lahou en période d'étiage.....	82
Figure 41a : Champs de courants à Grand-Lahou en crue et à pm, pm+1, pm+2.....	84
Figure 41b : Champs de courants à Grand-Lahou en crue et à bm, bm+3, bm+4	85
Figure 42 : Champs de courants dans le système Grand-Lahou en crue et à pm.....	86
Figure 43 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Grand-Lahou en crue	87
Figure 44 : Niveau de la surface d'eau à l'embouchure de Grand-Lahou en crue.....	88
Figure 45 : Evolution temporelle des débits à Grand-Lahou en période de crue.....	89
Figure 46 : Evolution temporelle des volumes à Grand-Lahou en période de crue.....	89
Figure 47a : Champs de courants dans le système Ebrié en étiage et à pm, pm+2, pm+3.....	91
Figure 47b : Champs de courants dans le système Ebrié en étiage et à bm, bm+2, bm+3	92
Figure 48a : Champs de courants dans le système Ebrié en crue et à pm, pm+1, pm+2	93
Figure 48b : Champs de courants dans le système Ebrié en crue et à bm, bm+2, bm+3	94
Figure 49 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Ebrié en étiage	96
Figure 50 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Ebrié en crue	96
Figure 51 : Niveau de la surface d'eau dans le système Ebrié en étiage.....	97

Figure 52 : Niveau de la surface d'eau dans le système Ebrié en crue	98
Figure 53 : Evolution temporelle des débits au canal de Vridi en étiage et en crue	99
Figure 54 : Evolution temporelle des volumes au canal de Vridi en étiage et en crue	100
Figure 55a : Champs de courants à Assinie Mafia en étiage et à pm, pm+2, pm+3	102
Figure 55b : Champs de courants à Assinie Mafia en étiage et à bm, bm+2, bm+3	103
Figure 56 : Champs de courants dans le système Aby en étiage et à pm	104
Figure 57 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Aby en étiage	105
Figure 58 : Niveau de la surface d'eau dans les chenaux d'Assinie en étiage	106
Figure 59 : Evolution temporelle des débits à Assinie en période d'étiage	107
Figure 60 : Evolution temporelle des volumes à Assinie en période d'étiage	107
Figure 61a : Champs de courants à Assinie Mafia en crue et à pm, pm+2, pm+3	109
Figure 61b : Champs de courants à Assinie Mafia en crue et à bm, bm+3, bm+4	110
Figure 62 : Champs de courants dans le système Aby en crue et à pm	111
Figure 63 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Aby en crue	112
Figure 64 : Niveau de la surface d'eau dans les chenaux d'Assinie en crue	113
Figure 65 : Evolution temporelle des débits à Assinie en période de crue	114
Figure 66 : Evolution temporelle des volumes à Assinie en période de crue	114
Figure 67a : Champs de courants dans le canal d'Assagny en étiage et à pm, pm+3	115
Figure 67b : Champs de courants dans le canal d'Assagny en étiage et à pm+4, bm, bm+4	116
Figure 68 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le canal d'Assagny en étiage	117
Figure 69 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Noumouzou en étiage	118
Figure 70 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Amessandon en étiage	118
Figure 71a : Champs de courants dans le canal d'Assagny en crue et à Pm, Pm+5	119
Figure 71b : Champs de courants dans le canal d'Assagny en crue et à bm, bm+1, bm+2	120
Figure 72 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le canal d'Assagny en crue	121
Figure 73 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Noumouzou en crue	122
Figure 74 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Amessandon en crue	122
Figure 75a : Champs de courants dans le canal d'Assinie en étiage et à pm, pm+2	123
Figure 75b : Champs de courants dans le canal d'Assinie en étiage et à pm+3, bm, bm+3	124
Figure 76 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le canal d'Assinie en étiage	125
Figure 77 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Moamé en étiage	126
Figure 78 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Asséoufoué en étiage	126
Figure 79a : Champs de courants dans le canal d'Assinie en crue et à pm, pm+2	127

Figure 79b : Champs de courants dans le canal d'Assinie en crue et à pm+3, bm, bm+3.....	128
Figure 80 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le canal d'Assinie en crue	129
Figure 81 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Moamé en crue	130
Figure 82 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Asséoufoué en crue	130
Figure 83 : Evolution diurne des salinités à l'embouchure de Grand-Lahou en étiage	132
Figure 84 : Evolution diurne des salinités à l'embouchure de Grand-Lahou en crue	133
Figure 85a : Evolution mensuelle des salinités dans le système Grand-Lahou à pm	134
Figure 85b : Evolution mensuelle des salinités dans le système Grand-Lahou à bm	135
Figure 86 : Evolution diurne (pm) des salinités dans le canal d'Assagny	136
Figure 87 : Evolution mensuelle (pm) des salinités dans le canal d'Assagny	137
Figure 88 : Evolution diurne des salinités dans le système Ebrié en étiage.....	138
Figure 89 : Evolution diurne des salinités dans le système Ebrié en crue	139
Figure 90a : Evolution mensuelle des salinités dans le système Ebrié à pm	140
Figure 90b : Evolution mensuelle des salinités dans le système Ebrié à bm	141
Figure 91 : Evolution diurne (pm) des salinités dans le canal d'Assinie	142
Figure 92 : Evolution mensuelle (pm) des salinités dans le canal d'Assinie	143
Figure 93 : Evolution diurne des salinités dans le système Aby en étiage.....	144
Figure 94 : Evolution diurne des salinités dans le système Ebrié en crue	145
Figure 95a : Evolution mensuelle des salinités dans le système Aby à pm	146
Figure 95b : Evolution mensuelle des salinités dans le système Aby à bm	147
Figure 96 : Evolution mensuelle des salinités dans le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire	150

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE COMPLEXE LAGUNAIRE DE CÔTE D'IVOIRE

Tableau I : Caractéristiques climatiques du littoral ivoirien	12
Tableau II : Principaux fleuves du complexe lagunaire	26
Tableau III : Caractéristiques des houles sur le littoral ivoirien	30
Tableau IV : Teneur en hydrocarbure et en métaux des baies d'Abidjan	36

CHAPITRE 2 : MATERIELS & METHODE

Tableau V : Nombre d'éléments et de nœuds des systèmes lagunaires et des canaux	52
Tableau VI : Débits (m^3/s) imposés aux frontières fluviales du modèle	58

CHAPITRE 3 : RESULTATS, INTERPRETATION & DISCUSSION

Tableau VII : Vitesses résiduelles des courants mesurés en surface.....	65
Tableau VIII : Evolution des vitesses simulées et mesurées ($E=20 m^2/s$) à Grand-Lahou	67
Tableau IX : Evolution des vitesses simulées et mesurées ($n=0,05 m^{-1/3}.s$) à Grand-Lahou ...	68
Tableau X : Vitesses des courants de surface dans le chenal d'Assinie	72
Tableau XI : Vitesses simulées et mesurées ($E=5 m^2/s$) dans le chenal central d'Assinie	74
Tableau XII : Vitesses simulées et mesurées ($n=0,04 m^{-1/3}.s$) dans le chenal central d'Assinie	75
Tableau XIII : Débits (en m^3/s) calculés en étiage et en crue à Vridi	99
Tableau XIV : Volumes simulés et temps de renouvellement des eaux du système Ebrié....	100

LISTE DES PHOTOS

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE COMPLEXE LAGUNAIRE DE CÔTE D'IVOIRE

Photo 1 : Boîtes de Caodalm super 50 saisies sur des pêcheurs	35
Photo 2 : Végétaux flottants dans le port d'Abidjan	36

CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODE

Photo 3 : L'échosondeur Lowrance Global MapTM 1600	47
--	----

LISTE DES ABREVIATIONS

bm : Basse Mer

clc : complexe lagunaire de Côte d'Ivoire

dco : Demande Chimique en Oxygène

fit : Front Intertropical

gfgn : *Geometry File Generation*

obs : *Optical Backscatter Sensor*

pm : Pleine Mer

rma2 : *Resource Management Associates two*

rma4 : *Resource Management Associates four*

rms : *Root Mean Square Error*

shom : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine Française

sms : *Surface-Water Modeling System*

sodepalm : Société pour le Développement du Palmier à Huile

psu : Practical Salinity Unit

RESUME

Le logiciel SMS est un modèle numérique à deux dimensions intégré sur la verticale. Il a été utilisé pour modéliser pour la première fois la totalité du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire sous la combinaison d'une marée moyenne et de débits fluviaux. Le calage du modèle a donné des coefficients de Manning de l'ordre 0,05, 0,03 et 0,04 $\text{m}^{-1/3}.\text{s}$ respectivement pour les systèmes lagunaires Grand-Lahou, Ebrié et Aby. Les résultats des simulations indiquent que la marée et les débits fluviaux contribuent à la création des courants de circulation et des échanges avec la mer. Les courants de marée sont symétriques en étiage et dissymétriques en crue. Avec un marnage en mer de 0,64 m, le prisme tidal pour l'ensemble du complexe lagunaire est de 166.10^6 m^3 en étiage et de 140.10^6 m^3 en crue. Le temps moyen de séjours des eaux est de 26,2 jours en étiage et de 34,2 jours en crue. Le modèle de qualité des eaux a montré une augmentation des salinités dans le complexe lagunaire durant la période de faible débit fluvial et une dessalure en période de crue.

Mots-clés : SMS, modèle, simulation, Manning, marée, étiage, crue, prisme tidal, temps de renouvellement des eaux

ABSTRACT

SMS is a two-dimensional depth-average numerical model has been used to modelling for the first time the totality of the complex lagoon of Côte d'Ivoire under an average tide and flows river. The calibration of the model gave Manning coefficients of about 0.05, 0.03 and $0.04 \text{ m}^{-1/3}.\text{s}$ respectively for the Grand-Lahou, Ebrié and Aby lagoon system. The results of simulations indicate that the tide and the flows river contribute to the creation of the currents of circulation and the exchanges with the sea. The tide currents are symmetrical in low water and dissymmetrical in rising. With a tidal range at sea of 0.64 m, the tidal prism for the whole of the lagoon complex is 166.10^6 m^3 in low water and 140.10^6 m^3 in rising. The residence time of waters is 26.2 days in low water level and 34.2 days in rising. The quality model of the waters shows an increase in salinities in the lagoon complex during period of low water and a decrease salinity in period of rising.

Key words: SMS, model, simulation, Manning, tide, low water, rising, tidal prism, renewal time waters

INTRODUCTION GENERALE

Les milieux lagunaires en Côte d'Ivoire se rencontrent le long de la moitié orientale du littoral sur près de 300 km, entre les longitudes 2°52' et 5°25' Ouest et les latitudes 5°08' et 5°22' Nord (**Figure 1**). Ils s'organisent en trois principaux systèmes lagunaires : le système Grand-Lahou, le système Ebrié et le système Aby. Ces trois systèmes lagunaires sont reliés entre eux par deux canaux artificiels. Le canal d'Assagny relie les systèmes Grand-Lahou et Ebrié. Quant au canal d'Assinie, il joint le système Ebrié au système Aby. On appellera tout cet ensemble, le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire (clc).

Comme la plupart des régions littorales, le clc est le siège d'activités naturelles et/ou anthropiques diverses et variées, qu'il nous appartient de tenter de préserver. Parmi les processus physiques en cours dans cet environnement, notons les écoulements internes, l'amplification et le déphasage des marées, les flux liquides entre lagune et milieu marin, la formation de zones de contact entre eau salée et eau douce. A ces effets naturels de perturbation, s'ajoutent les actions anthropiques, sources de pollutions. Citons à titre d'exemple, les ordures ménagères, les rejets d'eau usée domestique, etc. La qualité des eaux et le devenir des polluants minéraux représentent donc des enjeux importants pour évaluer les risques écologiques et sanitaires dans la région.

Préserver les aptitudes naturelles de ce milieu, tout en assurant une meilleure gestion et exploitation de cet environnement lagunaire requiert une bonne connaissance des processus physiques qui s'y déroulent. Dans ce domaine, la modélisation peut aider à cette quête du savoir. Rappelons à ce propos que la modélisation de l'hydrodynamique du système lagunaire Ebrié a été déjà réalisée (Ramany, 1979 ; Mondé, 2004). Cependant, ce travail constitue une première tentative de modélisation de la totalité du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire couplé. En effet, les trois systèmes lagunaires (Grand-Lahou, Ebrié et Aby) sont communicants par des canaux artificiels (Assagny et Assinie). Ainsi, toute modélisation de chaque système lagunaire isolé serait incomplète, puisqu'elle ignorerait tous les échanges entre les systèmes lagunaires à travers les canaux artificiels.

Puisque les lagunes ivoiriennes sont peu profondes (environ 3 à 4,8 m de profondeur moyenne) par rapport aux dimensions horizontales (50 à 150 km) d'une part et que la dynamique du milieu est essentiellement contrôlé par la marée et les débits fluviaux d'autre part, un modèle intégré sur la verticale a été développé. L'outil de modélisation choisi est le modèle numérique *SMS* (ou *Surface-Water Modeling System*).

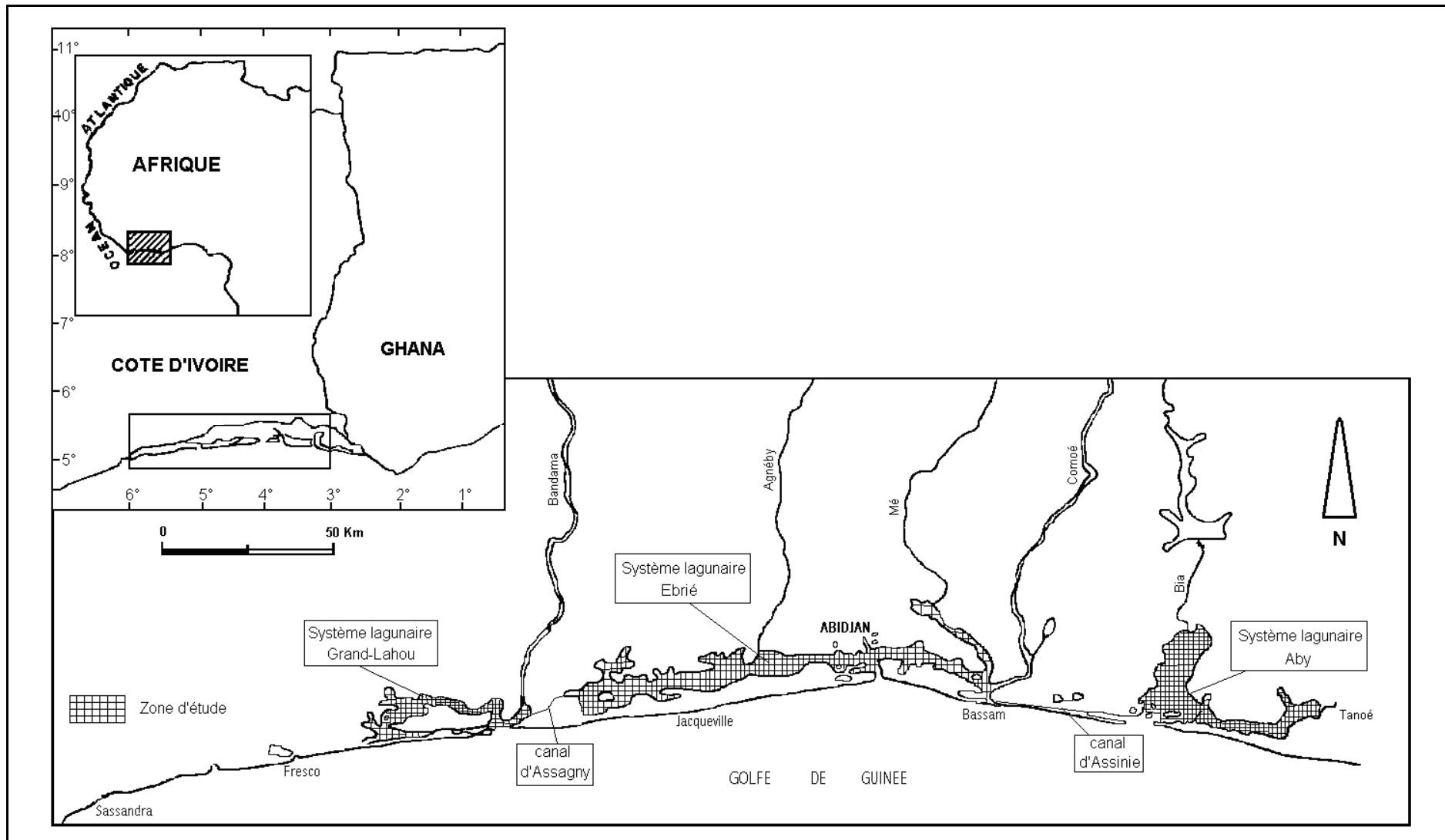


Figure 1 : complexe lagunaire de Côte d'Ivoire

L'objectif principal est donc de développer un modèle hydrodynamique 2D de tout le clc intégrant les trois systèmes lagunaires et les deux canaux artificiels. Comme objectifs spécifiques, les simulations numériques réalisées dans notre travail visent à décrire :

- les écoulements internes pour localiser les zones de stagnation d'eau éventuelles ;
- l'amplification et le déphasage de la marée lors de sa propagation dans le complexe lagunaire par l'analyse de la variation du niveau de la surface d'eau ;
- les échanges avec le milieu marin pour estimer le temps moyen de renouvellement des eaux ;
- la dispersion de la salinité et de l'eau douce.

En conformité avec les objectifs fixés, l'organisation du mémoire se fera en trois chapitres :

- le premier chapitre traitera de l'environnement morphologique, climatique, géologique, hydrologique et de la pression anthropique ;
- le deuxième chapitre sera consacré à l'outil de modélisation numérique *SMS* et à la construction du modèle hydrodynamique ;
- le troisième chapitre fera l'objet de la présentation des résultats de calage du modèle et des simulations du fonctionnement du clc.

Le mémoire se terminera par des conclusions générales suivies par quelques perspectives de ce travail que nous proposons avant la bibliographie.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LE COMPLEXE LAGUNAIRE DE CÔTE D'IVOIRE

Il convient à partir de publications déjà existantes sur les milieux lagunaires ivoiriens de dégager les principales caractéristiques géologiques, climatologiques, géomorphologiques, hydrologiques et environnementales de ces lagunes.

1. Contexte géologique et structural de la Côte d’Ivoire

La Côte d’Ivoire est caractérisée par deux ensembles géologiques d’importance inégale (Figure 2) :

- le socle précambrien qui occupe 97,5% du territoire ;
- le bassin sédimentaire secondaire-tertiaire (2,5%) caractérisé par des systèmes lagunaires.

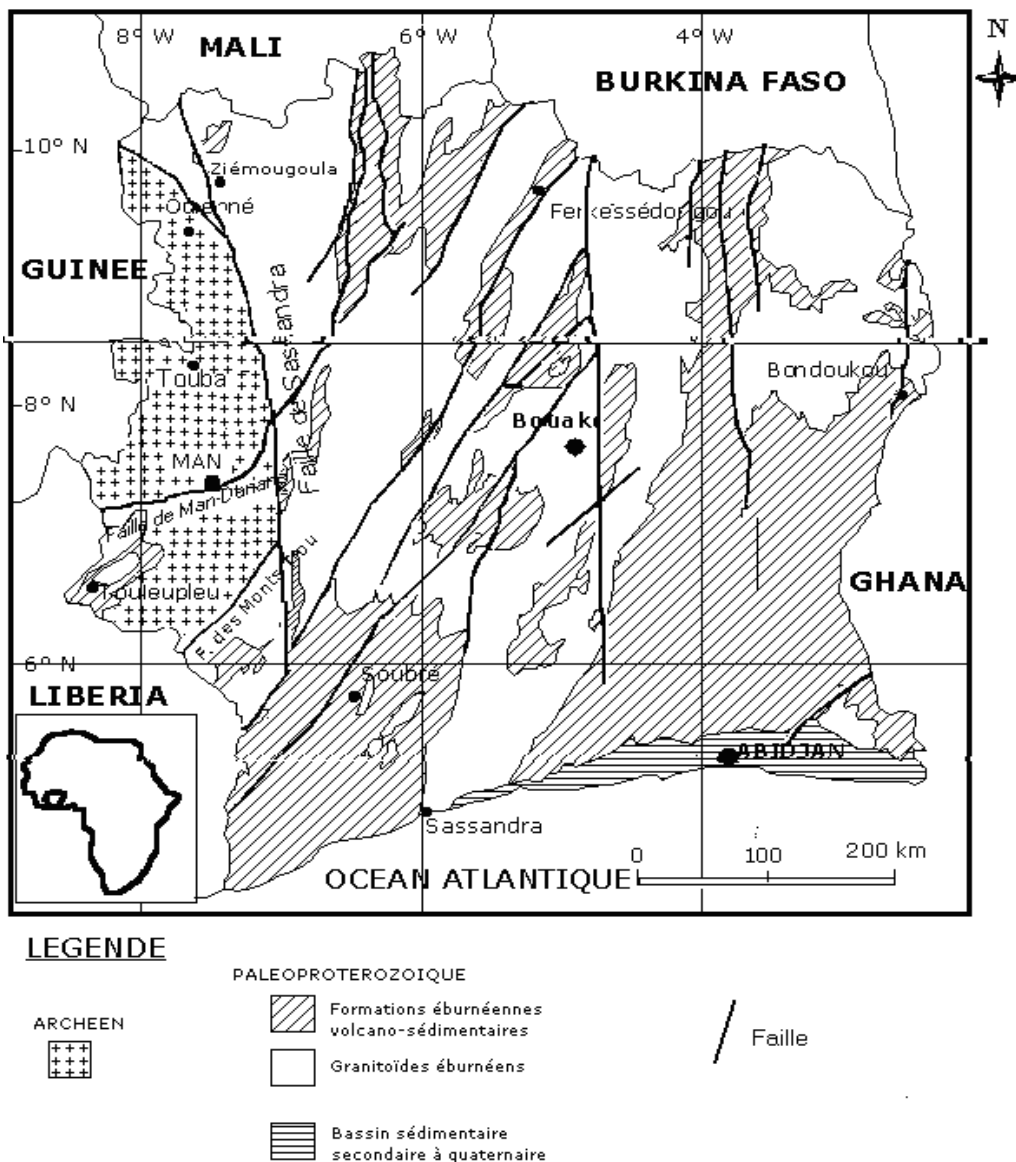


Figure 2 : Carte géologique de la Côte d’Ivoire (Tagini, 1971, carte modifiée par Kouamelan, 1996)

1.1.Socle

Le socle d'âge précambrien est constitué en majorité de granites, de roches métamorphiques et de roches basiques. Il est presque toujours recouvert d'altérites ou d'alluvions dans les lits majeurs des cours d'eau. Localement, il atteint la mer dans l'Ouest. Le socle se subdivise en deux domaines :

- le domaine Kénéma-Man mis en place par l'orogénèse libérienne ; avec des répliques de formations léoniennes ;
- le domaine Baoulé-Mossi élaboré par l'orogénèse éburnéenne.

Les deux domaines sont séparés par la faille de Sassandra (Bessoles, 1977 ; Camil, 1984 ; Lemoine, 1988).

1.2.Bassin sédimentaire

Le bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire, situé en bordure de l'océan Atlantique est le plus occidental des bassins côtiers du golfe de Guinée. Sa superficie totale est estimée à 30000 km². Il est subdivisé en deux parties :

- une partie immergée d'une superficie de 22000 km² ;
- une partie émergée en forme de croissant qui a une superficie d'environ 8000 km² et une largeur maximale de 35 km (**Figure 3**).

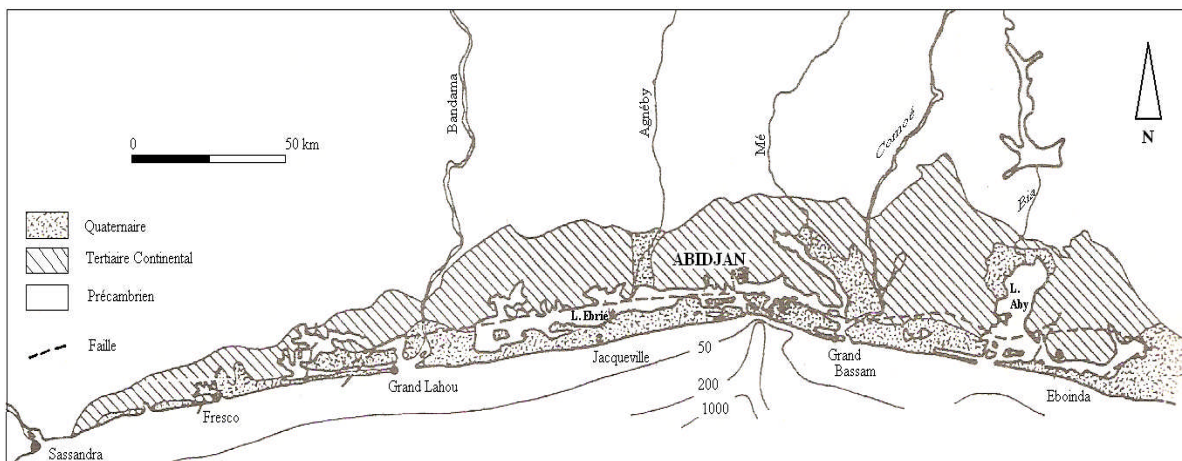


Figure 3 : Cadre géologique et structural du complexe lagunaire ivoirien (Tastet, 1979)

Le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire sépare ce bassin en deux domaines distincts (Spengler et Delteil, 1966) :

- sur la rive nord des lagunes, les formations tertiaires du « Continental Terminal » formées de sables argileux qui recouvrent le socle précambrien sur une épaisseur de 170 mètres environ ;

- au Sud du clc, s'étendent les formations quaternaires du littoral. Il s'agit des bas-plateaux sablo-argileux (10-12 m), azoïques, continentaux, d'âge antéholocène ; des cordons sableux littoraux marins holocènes (2-6 m d'épaisseur) et enfin, les dépressions fluvio-lagunaires, sablo-vaseuses (Tastet, 1979).

1.2.1. Stratigraphie du bassin sédimentaire

La stratigraphie du bassin sédimentaire débute par le dépôt d'une épaisse formation de sables, de grès, de conglomérats et d'argiles versicolores d'origine continentale d'âge jurassique supérieur ou crétacé inférieur. Au sommet de la série, s'étendent les formations quaternaires de la plaine littorale constituées à la base par une formation lagunaire à argiles noires intercalées de sables et de tourbes datées à plus de 42 000 ans BP et attribuable à un Quaternaire "moyen" (Fredoux, 1977 ; Tastet, 1979). Après cette période, des formations de sables argileux anté-holocènes sont visibles. Elles ont été mises en place au cours du dernier épisode régressif qui a vu la mer se retirer jusqu'à -110 m vers 18 000 ans BP (Assemien et *al.*, 1970, Martin, 1973 ; Le Ribault et Tastet, 1979). La série se termine par des vases et des sables fluvio-lagunaires d'âge holocène. Toutes les séries sont pauvres en macrofaunes, ainsi les limites d'étages sont essentiellement basées sur l'étude des foraminifères et des ostracodes mais aussi des spores et des grains de pollen.

1.2.2. Tectonique du bassin sédimentaire

La tectonique du bassin a été décrite par les travaux de Spengler et Delteil (1966), Tastet (1979) et Sombo (2002).

Le bassin sédimentaire est traversé d'Ouest en Est par "l'accident majeur des lagunes" (ou « faille des lagunes »). Cet accident majeur est une faille normale de distension importante dont l'origine est liée à l'ouverture de l'Atlantique. La faille des lagunes s'étend de Grand-Lahou à l'Ouest jusqu'au Ghana à l'Est. Elle a un pendage subvertical avec un plongement Sud et un rejet qui peut atteindre 3500 mètres au niveau d'Abidjan (Arens et *al* 1970 ; BLAREZ, 1985 ; Aka, 1991). Cette faille impose la disposition Ouest-Est générale des systèmes lagunaires Grand-Lahou et Ebrié. Quant à la disposition Nord-Sud du système lagunaire Aby, elle est en discordance avec cette disposition générale Ouest-Est des lagunes ivoiriennes. Cette orientation serait liée à la tectonique. En effet, le système des failles présenterait en cet endroit un embranchement Nord-Sud qui détermine avec les failles méridiennes une structure en marche d'escalier (Rougerie, 1951b ; Tastet, 1979). C'est dans ces marches apparemment effondrées que se localisent les systèmes lagunaires Grand-Lahou,

Ebrié et Aby (Tastet, 1979). La faille des lagunes qui présente un pendage Sud, recoupe obliquement les directions tectoniques du socle (**Figure 4**). En mer jusqu'à l'isobathe 5000 m, le bassin anté-tertiaire est traversé par le prolongement de la fracture "Romanche" qui est en partie parallèle à l'accident littoral (Arens *et al.*, 1971). Droz *et al.* (1985) ont montré également que cette faille est le prolongement de la fracture océanique Saint-Paul, transverse de la ride médio-atlantique.

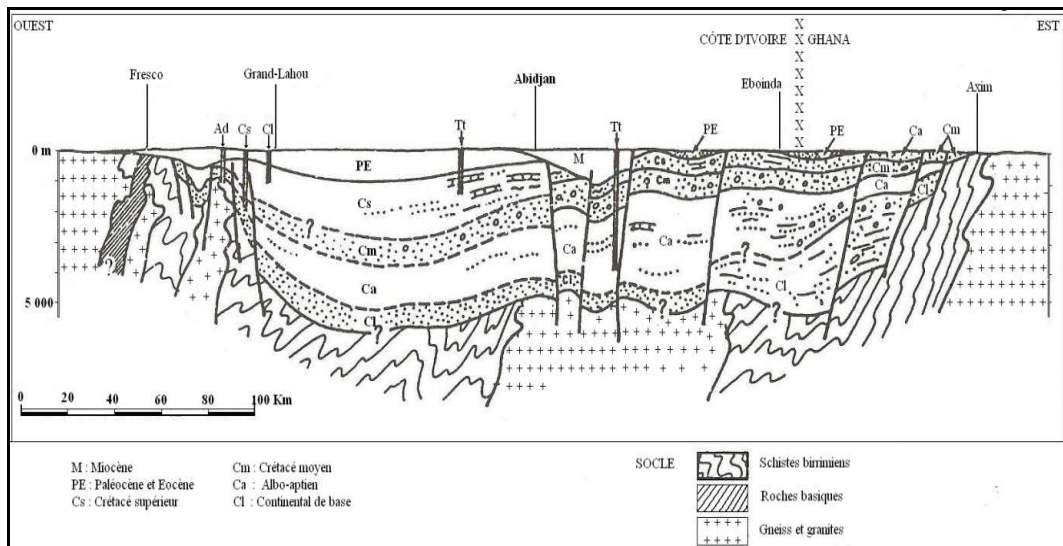


Figure 4 : Coupe longitudinale schématique du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire (Spengler et Delteil, 1966 *in* Tastet, 1979)

1.3. Plateau continental

La morphologie générale et la sédimentologie du plateau continental ivoirien ont été décrites par Martin (1973 et 1977), Aka (1991), Mondé (1997) et Sombo (2002).

1.3.1. Morphologie et bathymétrie

La plate-forme continentale ivoirienne est située dans sa partie occidentale au Nord du prolongement de la fracture Saint-Paul, sur de la croûte continentale peu profonde tandis qu'à l'Est, elle est tout entière dans la zone à croûte amincie. Le plateau continental est uniformément étroit. Son rebord se trouve aux isobathes -100 et -120 m. On note la présence de deux dépressions : une au large de Tabou profond de 2 m et située à l'isobathe -70 m (**Figure 5**). La seconde dépression possède un creux de 6 m et est située à l'isobathe -100 m au large d'Abidjan (Ouest du Trou-Sans-Fond). Ces dépressions qui ont une étendue de 20 km et une direction structurale N70° se comblent difficilement à cause des courants sous-marins.

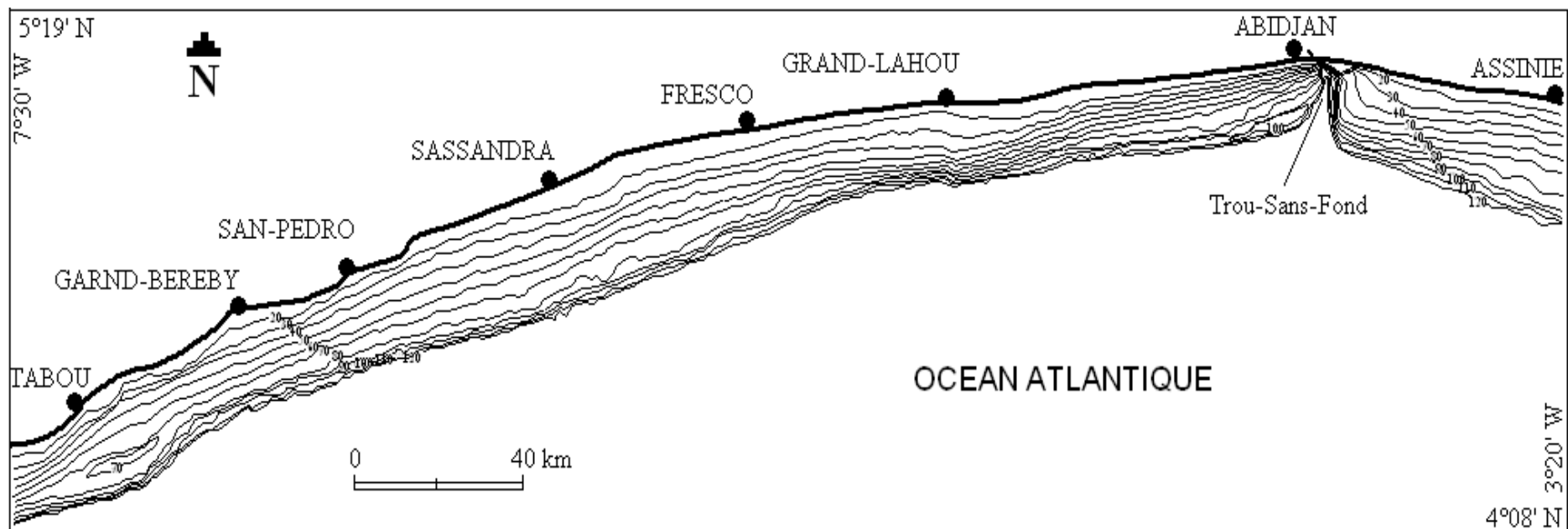


Figure 5 : Carte bathymétrique du plateau continental de Côte d'Ivoire (Mondé, 1997)

Une autre particularité du plateau continental ivoirien est la présence du Trou-Sans-Fond qui est un important canyon sous marin dont l'isobathe -120 m n'est qu'à 2,5 km de la côte. Il atteint 1,1 à 24 km au niveau du talus. Les chenaux profonds de la lagune Ebrié à Abidjan, convergent de façon remarquable vers la tête de ce canyon sous-marin (Tastet, 1979). Le Trou-Sans-Fond date du Miocène et serait due à un surcreusement par des agents subaquatiques, guidés par la tectonique locale dans le prolongement d'une ancienne vallée fluviale (Martin, 1974).

1.3.2. Couverture sédimentaire

La couverture sédimentaire du plateau continental est formée de sables moyens à très fins et plus localement de sables grossiers. Les sédiments vaseux occupent la majeure partie du plateau continental. Cette couverture vaseuse devient plus importante à Grand-Lahou, à Abidjan et à Assinie (Mondé, 1997). En effet, la vase serait vraisemblablement issue des sédiments fins de ces lagunes. En de nombreux endroits du plateau continental, on trouve des bancs rocheux discontinus et parallèles à la façade maritime. Ce sont des grès de plage constitués de sables, de ciment calcaire et de débris coquilliers formés par les variations du niveau marin et les fluctuations climatiques.

2. Contexte climatique

Le climat est de type équatorial de transition sur le littoral ivoirien. On distingue quatre saisons principales :

- la grande saison sèche (décembre à février) est caractérisée par de faibles précipitations (60 mm en moyenne par mois avec un minimum en janvier). Une période de transition s'installe avant la grande saison des pluies de mars à mai ;
- lors de la grande saison des pluies de mai à juillet, les précipitations atteignent 1100 mm en 2 mois en moyenne, le maximum des pluies se situant au mois de juin ;
- la petite saison sèche entre juillet et septembre. Les pluies redeviennent rares. L'insolation et l'évaporation sont minimales ;
- la petite saison des pluies avec les précipitations qui augmentent à nouveau. Elles sont maximales d'octobre à novembre (160 mm par mois).

La succession de ces saisons est causée par le déplacement en latitude du Front Intertropical (FIT) qui est le lieu d'une confluence entre deux masses d'air : d'une part la « mousson » d'origine océanique et de secteur Sud-Ouest, et d'autre part « l'harmattan », sec,

de secteur Nord-Est et d'origine continentale. Ces variations saisonnières du FIT sont dues à l'effet des pressions engendrées par les grands anticyclones régionaux (Eldin, 1971).

Les principaux paramètres climatiques (température atmosphérique, humidité, précipitations, insolation et vent) du littoral ivoirien sont présentés dans le **tableau I**. La moyenne annuelle de la température est de 24°C avec un maximum de la moyenne mensuelle de 24 °C en avril et un minimum de 24,5°C en août. L'humidité relative est constante sur toute l'année avec une moyenne annuelle de 50% et un maximum annuel de 85%.

Tableau I : Caractéristiques climatiques du littoral ivoirien (Ceda, 1997)

Paramètres climatiques	Moyenne annuelle	Maximum annuel
Température (°C)	24	33
Humidité (%)	50	80
Précipitation (mm/m ²)	1500	2300
Insolation (h/mois)	151	230
Vitesse des vents (m/s)	1,38	1,67

Les vents sur le littoral ivoirien sont de deux types :

- des vents de secteur Sud-Ouest (**Figure 6**) ; qui correspondent à l'Alizé australe dévié lors de son passage à l'équateur. Ils atteignent un maximum d'intensité de février à avril et d'août à octobre (Durand et Chantraine, 1982) ;
- les vents de secteur Nord-Est (harmattan ou Alizé boréal) sont observés au cours des mois de janvier à février. L'harmattan qui souffle du Nord-Est n'atteint la côte que quelques jours par an, de la fin décembre à début janvier (Le Lœuff et Marchal, 1993).

Les deux types de vent soufflent obliquement à l'axe général du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire. En raison des effets de différences thermiques entre l'océan et le continent, ces vents sont essentiellement diurnes maximums entre 12h et 16h (Guiral, 1992).

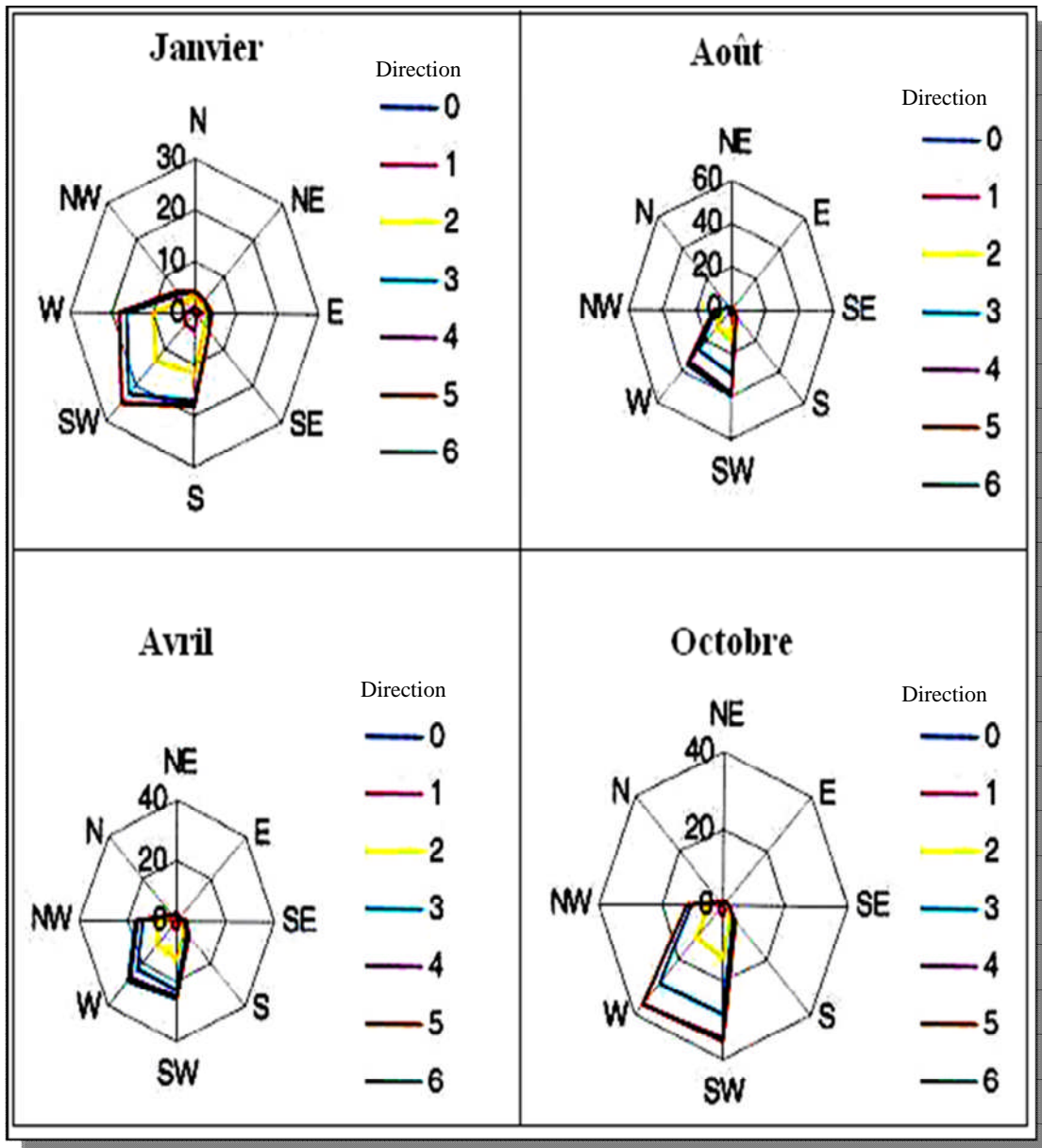


Figure 6 : Régime des vents sur le littoral ivoirien (Anonyme, 2001)

3. Caractéristiques morphologiques des systèmes lagunaires ivoiriens

Le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire appartient au grand ensemble des lagunes de l'Afrique tropicale humide du golfe de Guinée. Il constitue un ensemble représentatif d'environnements lagunaires actuels.

3.1. Présentation du Système Grand-Lahou

Le système lagunaire Grand-Lahou est situé d'une part entre 4°55' et 5°25 de longitudes Ouest et d'autre part entre 5°05' et 5°15 de latitudes Nord (**Figure 7**). Il s'étend sur 50 km de long, alors que sa largeur n'excède pas 14 km. Pour un volume moyen de $5,70.10^8 \text{ m}^3$ et une superficie de 190 km^2 , la profondeur moyenne est de l'ordre de 3 m (Laë, 1982). Quatre sous-ensembles lagunaires composent ce système lagunaire :

- la lagune Tadio, est la plus vaste des quatre sous-ensembles lagunaires avec une superficie de 90 km^2 . Sa profondeur moyenne est faible, 1,5 m ;
- la lagune Tiagba a une superficie de 57 km^2 et une profondeur moyenne d'environ 3 m. Elle constitue la zone estuarienne du système lagunaire. On y trouve par endroits des profondeurs pouvant atteindre 8 m (Abé *et al.*, 1993 ; Wognin, 2004). Le Bandama qui est le plus grand fleuve de Côte d'Ivoire (97500 km^2), débouche à l'extrémité orientale de la lagune Tiagba qui est en contact direct avec la mer par le grau de Grand-Lahou ;
- la lagune Makey avec une profondeur maximale de 2 m, a une superficie d'environ 28 km^2 . Elle est limitée à l'Ouest par la lagune Tadio et au Sud par la lagune Tiagba. Le fleuve Boubo débouche à l'Ouest de cette lagune ;
- la lagune Nyouzoumou d'une superficie de 15 km^2 constitue une bande parallèle au cordon littoral. Les profondeurs n'excèdent pas 3 m. Elle communique à l'Ouest avec la lagune Tadio et à l'Est, la lagune Nyouzoumou est en contact avec la lagune Tiagba grâce au canal de Groguida, percé par la SODEPALM (Société pour Le Développement du Palmier à Huile). Grâce à ce canal, l'influence marine y est devenue plus importante (Hie-Darre, 1984).

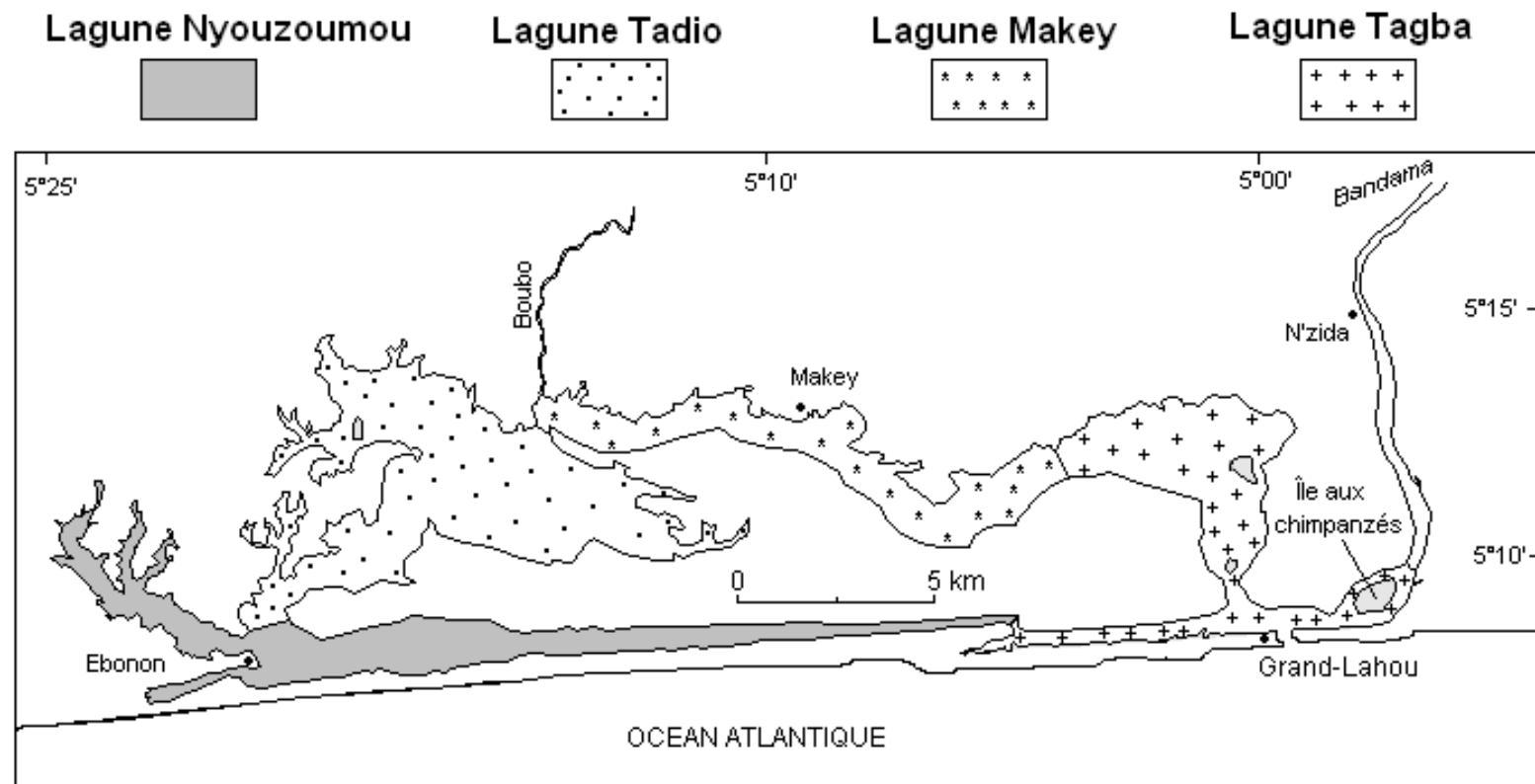


Figure 7 : Système lagunaire Grand-Lahou et ses lagunes annexes

3.2.Présentation du Système Ebrié

C'est le plus vaste du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire avec une superficie de 566 km². Avec une largeur inférieure à 7 km, le système Ebrié s'étend sur 140 km d'Ouest en Est le long du golfe de Guinée entre 3°40' et 4°50' longitude Ouest et entre 5° et 5°20' latitude Nord. Son volume total est de 2,7.10⁹ m³ pour une profondeur moyenne de 4,8 m. Il présente plusieurs unités morphologiques (Tastet, 1979 ; Affian, 2003 ; Mondé, 2004) :

- un chenal de 5 à 10 m de profondeur, situé à l'Ouest de l'Agnéby et qui débouche dans le canal d'Assagny. Il est plus raide au Nord (au pied de la falaise du Continental Terminal) qu'au Sud ;
- au droit de l'Agnéby et jusqu'à Songon-Kassemblé, la lagune est peu profonde, ses fonds n'atteignent pas 5 m ;
- à Abidjan, la lagune est creusée de plusieurs chenaux de profondeurs supérieures à 20 m qui convergent vers la tête du Trou-Sans-Fond situé au droit du canal de Vridi. La zone estuarienne de la lagune Ebrié se localise à Abidjan. Elle se compose d'un bassin central (ou baie d'Abidjan), d'un chenal central Ouest et d'un chenal central Est à l'extrémité duquel, débouche le fleuve Comoé qui contribue à lui seul 75% des apports d'eaux douces en lagune Ebrié (Durand et Guiral, 1994). La marée dynamique pénètre en lagune par le canal de Vridi ;
- de Bingerville à Grand-Bassam, la profondeur du chenal varie de 4 à 8 m. Ce chenal se divise en deux chenaux de part et d'autre de l'île Vitré. L'un débouche au Sud dans la lagune Ouladine et reçoit le fleuve Comoé. L'autre chenal remonte au Nord et débouche dans les lagunes Potou-Adjin. Les fonds n'excèdent pas 2,7 m dans Potou, alors qu'ils peuvent atteindre 11 m dans Adjin (N'guessan, 2008).

La zone estuarienne du système Ebrié à Abidjan possède de nombreuses baies (**Figure 8**). Elle est limitée par la baie d'Adiopodoumé à l'Ouest et par la baie de Bingerville à l'Est. Sont considérées comme baies dans la lagune Ebrié, toutes les échancrures dont la longueur est plus importante que la largeur de l'entrée de la baie (Varlet, 1978). Ces baies représentent près du cinquième de la surface de la lagune Ebrié sans les lagunes Aghien et Potou, soit 100 km² sur 523 km². Elles sont plus fréquentes sur la rive Nord (baies de Cocody, Banco, Bingerville, Adiopodoumé, etc.) que la rive Sud (baies de Biétry, Koumassi, Abou-Abou). Les différentes baies observées au sein du système Ebrié ont des environnements différents qui font qu'elles connaissent des niveaux de pollution différents (Affian, 2003).

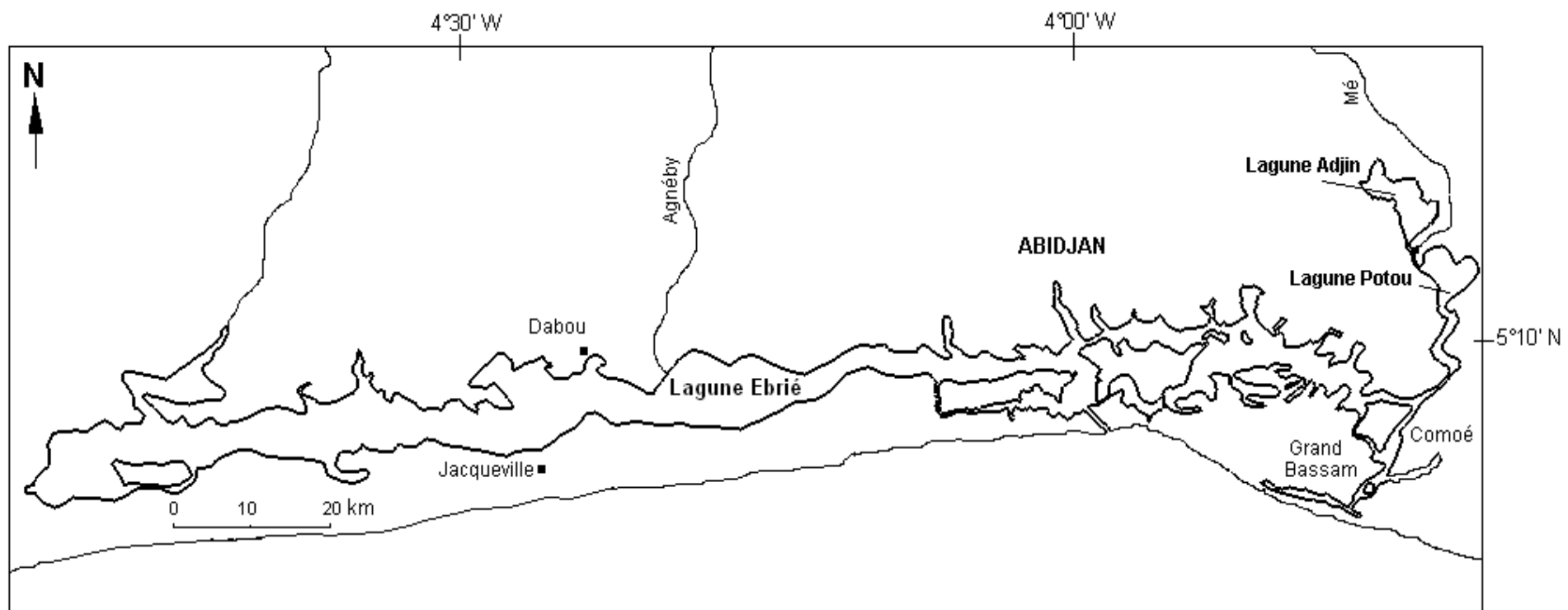


Figure 8 : Système lagunaire Ebrïé

3.3.Présentation du système Aby

Le système lagunaire Aby, présente une morphologie différente de celles des deux autres systèmes. Il a une superficie de 424 km² et présente deux axes orthogonaux. Un axe de 56 km d'Est en Ouest et un axe de 25 km du Sud au Nord. La profondeur moyenne du système lagunaire est de 3,8 m pour un volume moyen de 1,6.10⁹ m³. Il se subdivise en 4 grands sous-ensembles lagunaires (**Figure 9**) :

- la lagune Aby-Nord, partie élargie (17 km au maximum) et relativement profonde. Elle reçoit le fleuve Bia. Sa superficie est de 164 km² avec une profondeur moyenne de 4,4 m ;
- la lagune Aby-Sud a une superficie de 140 km². Elle est proche de la zone estuarienne. Sa profondeur moyenne est de 4,7 m et sa largeur maximale atteint une vingtaine de km ;
- la lagune Tendo plus étroite, forme une bande étirée d'une vingtaine de km de long pour 5 à 10 km de large. Sa superficie est de 74 km². La profondeur moyenne est de 2,6 m. C'est dans sa partie orientale que débouche le fleuve Tanoé ;
- la lagune Ehy se présente sous une forme rectangulaire, de 10,5 km de long et de 4,5 km de largeur, soit une superficie de 46 km². La lagune Ehy très homogène est constituée, dans sa presque totalité, par des hauts fonds dont la profondeur moyenne est égale à 1,5 m.

Ces subdivisions reposent sur des critères physico-chimiques et biologiques pour les deux premières lagunes (Aby-Nord et Aby-Sud), auxquels, il faut ajouter des critères morphologiques et bathymétriques pour les sous-lagunes Tendo et Ehy (Chantraine, 1980).

Le contact entre le système Aby et la mer se fait par le chenal central d'Assinie, d'où partent les chenaux secondaires qui séparent les nombreuses îles formant une zone deltaïque (Chantraine, 1980). La surface totale de ces îles est estimée à 24,1 km². La carte bathymétrique des chenaux de cette zone deltaïque réalisée en 1991 par Abé et *al.*, (1996) indique que les profondeurs maximales n'excèdent pas 6 m. Leurs observations indiquent une migration de la passe vers l'Est. L'état initial d'ouverture de la passe qui était de 308 m (en avril 1989), est passé à 280 m environ en août de la même année d'après ces auteurs. En effet, l'ouverture sur la mer du système Aby est permanente depuis au moins 1942 (Charles-Dominique, 1993). Les différentes positions de la passe d'Assinie depuis 1658 (**Figure 10**) sont dues aux ouvertures artificielles du cordon dunaire pour l'évacuation des surcôtes d'eau consécutives aux fortes précipitations (Bouet, 1949 ; Rougerie, 1951a ; Jobet, 1701).

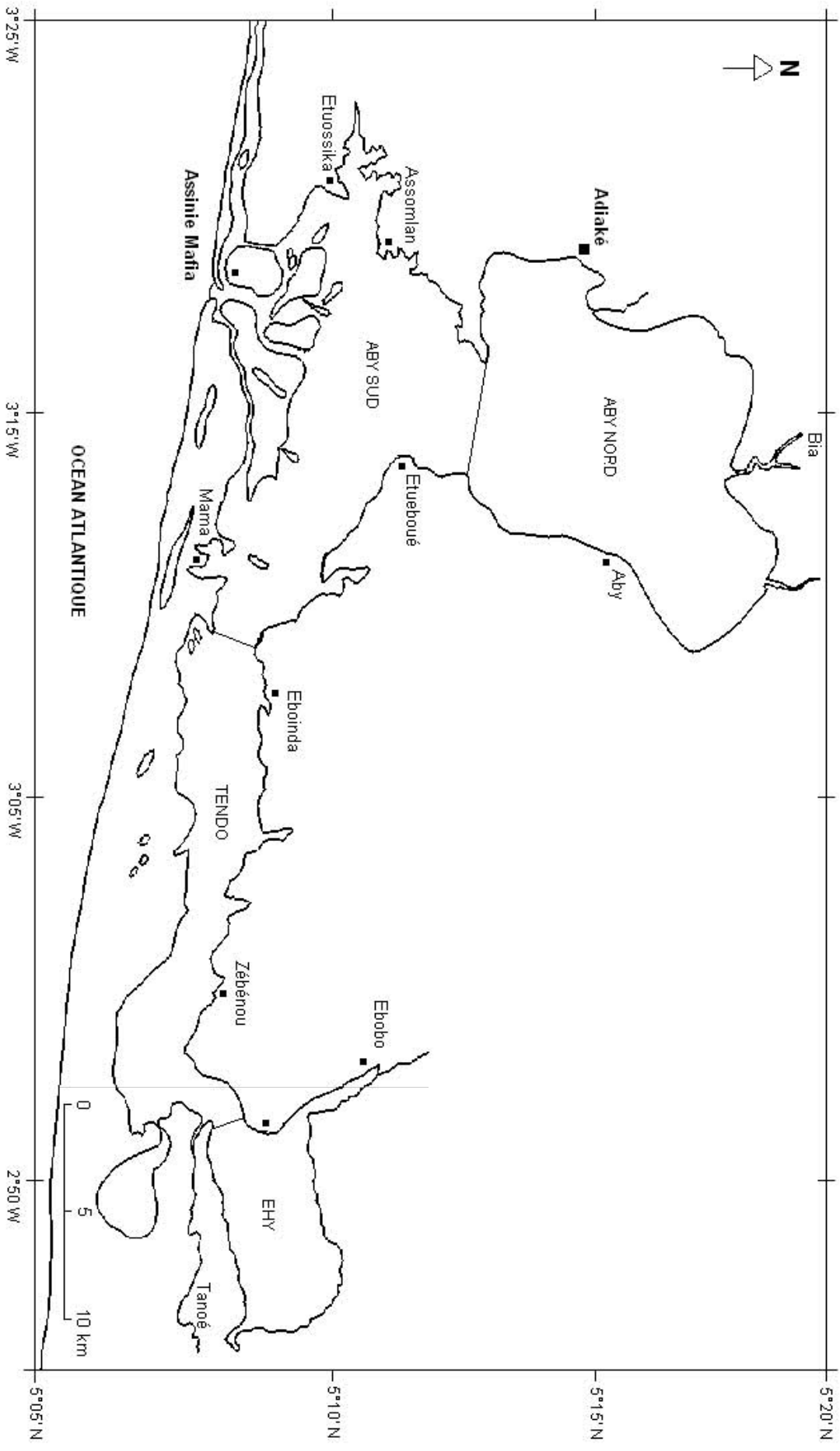


Figure 9 : Système lagunaire Aby et ses lagunes annexes

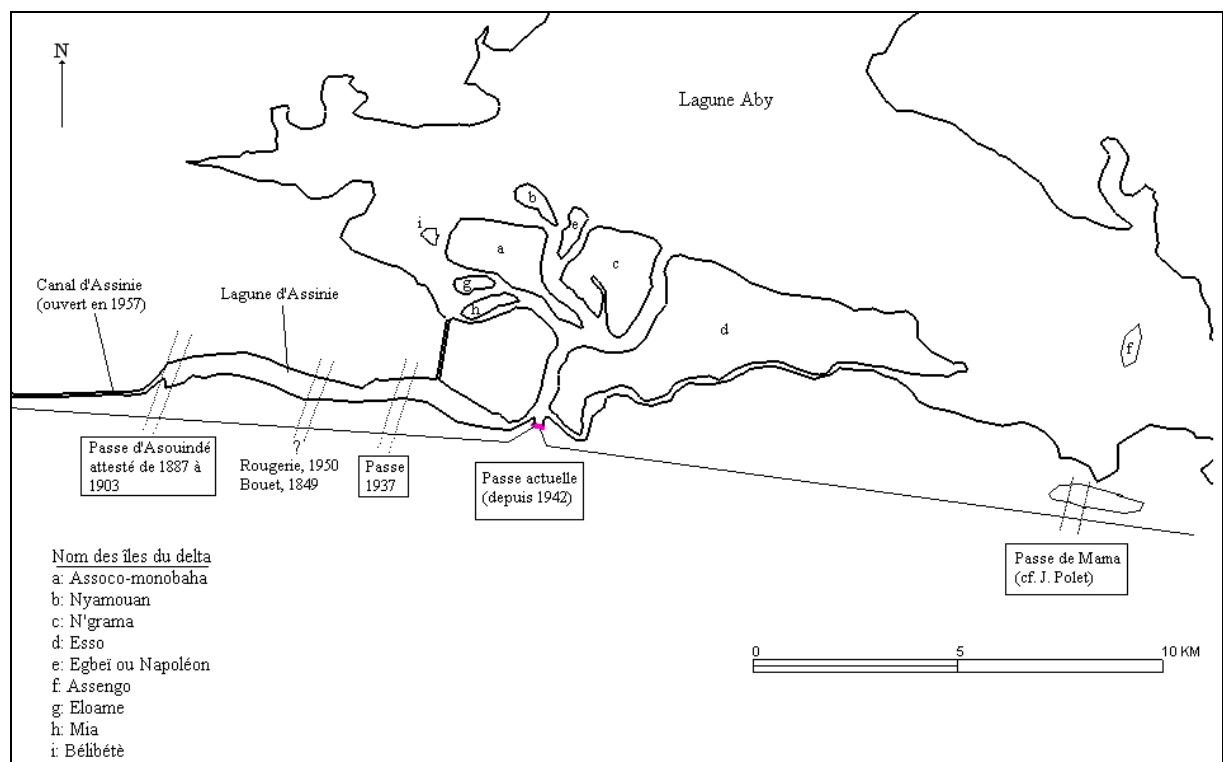


Figure 10 : Migrations de la passe d'Assinie (Charles-Dominique, 1993). Les positions authentifiées sont encadrées.

4. Origine et classification des lagunes

4.1. Définition des lagunes

Une lagune côtière est une zone côtière en dépression au-dessous du niveau des basses mers, ayant une communication éphémère ou permanente avec la mer, mais protégée de celle-ci par un type quelconque de barrière (Lankford, 1977).

Selon Tastet et Guiral (1994), les lagunes de Côte d'Ivoire correspondent à des dépressions littorales d'origine fluviale creusées lors de la dernière glaciation et séparées du golfe de Guinée par une barrière sédimentaire constituée de cordons sableux. Cette dernière glaciation a induit un abaissement de la mer à -110 m du niveau actuel de la mer, provoquant la découverte d'une grande partie des plates-formes continentales et le creusement des vallées côtières. Ces dépressions ont été ensuite envahies par la remontée marine qui a suivi. La stabilité relative du niveau marin par rapport au zéro actuel serait à l'origine de la formation de barrières (d'origine sédimentaire, organique ou tectonique) qui vont séparer les dépressions ennoyées de la mer ouverte, créant ainsi de nombreux systèmes lagunaires côtiers.

4.2. Classification et typologie lagunaire

La classification des lagunes de façon générale a été abordée par plusieurs auteurs (Postma, 1969 ; Hayes, 1975 ; Lankford, 1977 ; Nichols et Allen, 1981 *in* Affian, 2003).

4.2.1. Classification de Postma (1969)

Sa classification est basée sur la qualité et le caractère des échanges des masses d'eau entre la lagune et le milieu marin. Il définit trois types principaux de lagune que sont, le type estuarien, le type neutre et le type anti-estuarien (**Figure 11**) :

- dans le type estuarien, les eaux lagunaires ont une salinité inférieure à la salinité de l'eau de mer (35 psu) à cause des apports fluviaux. L'eau de la lagune est évacuée en mer dans les niveaux de surface, alors que l'eau de mer pénètre en lagune en profondeur : c'est la circulation estuarienne. Le mélange des eaux est assuré par les courants de marée ;
- dans le type neutre, la salinité de l'eau de la lagune est égale à celle de l'eau de mer. Le mouvement de l'eau est exclusivement assuré par la marée et il n'y a pas de stratification ;
- le type anti-estuarien où la salinité (>35 psu) de la lagune est plus élevée que l'eau de la mer à cause de l'évaporation intense des eaux de surface. L'évacuation des eaux lagunaires se fait par les couches de fond, tandis que l'eau marine pénètre par les couches de surface.

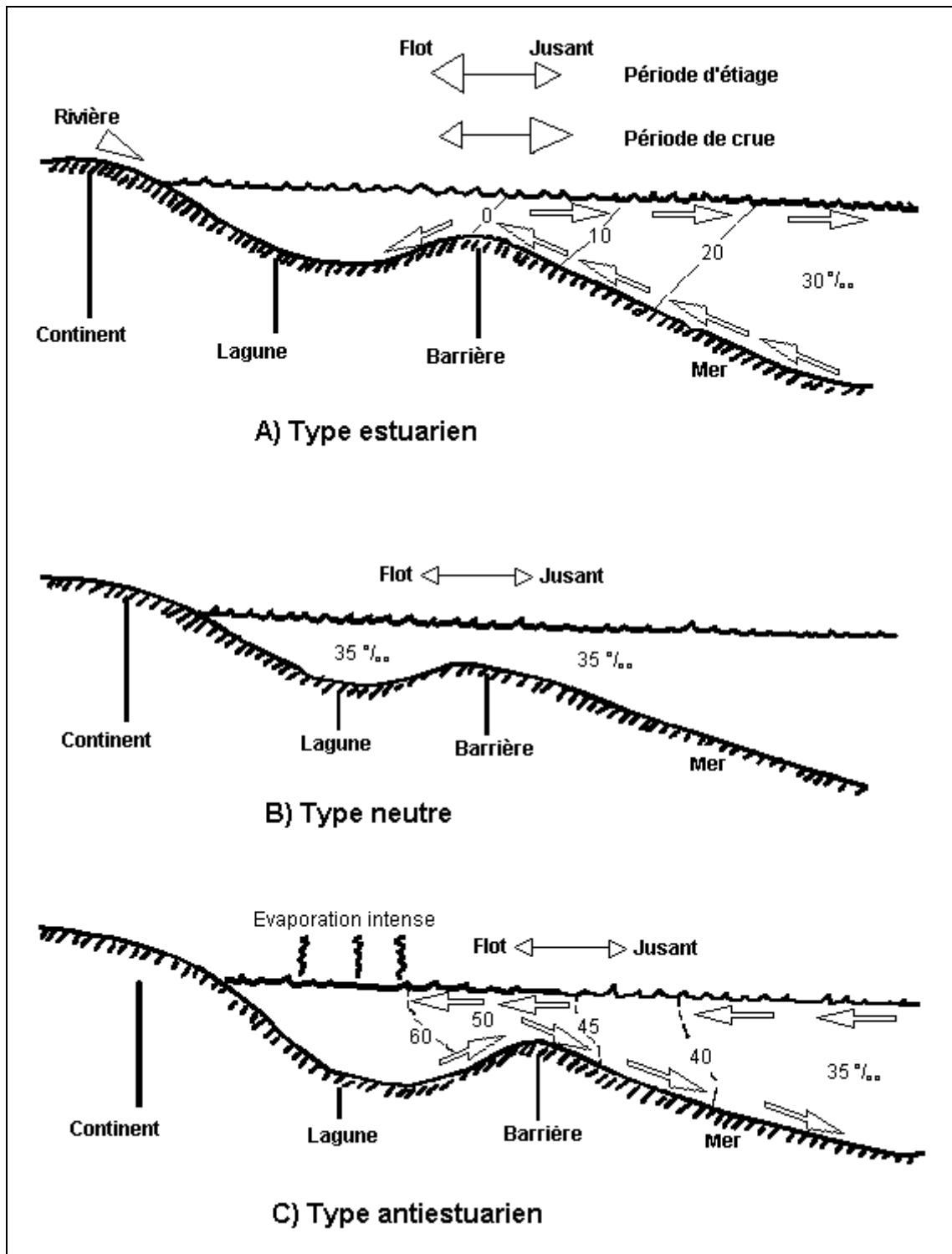


Figure 11 : Différents types de lagune (Postma, 1969 in Affian, 2003, modifié)

La salinité des eaux des lagunes ivoiriennes est variable dans l'espace et dans le temps. De façon générale, les secteurs proches des passes (lagune Tiagba dans le système lagunaire Grand-Lahou, zone d'Abidjan dans le système lagunaire Ebrié, la zone deltaïque dans le système lagunaire Aby) sont caractérisés par une circulation de type estuarien. Ils appartiennent au type estuarien. Plus on s'éloigne des passes, les lagunes fonctionnent comme des lacs d'eaux douces (embouchures des fleuves) ou comme des milieux confinés (baies d'Adiaké, Biétry, Cocody, etc.).

4.2.2. Classification de Hayes (1975)

Hayes (1975) propose une classification des lagunes basée sur le marnage, soit la différence entre les hauteurs des pleines mers et des basses mers. Il distingue trois types :

- le type micro-tidal où le marnage est faible (<2 m). Il est caractérisé par des phénomènes de « *washover* », des passes (souvent comblées) et des deltas de marée d'importance mineure et des faciès intertidaux développés. Les systèmes lagunaires Grand-Lahou, Ebrié et Aby, présentent un marnage inférieur à 2 m. Ils s'apparentent donc aux lagunes de type micro-tidal de la classification de Hayes (1975) ;
- dans le type méso-tidal, le marnage est compris entre 2 et 4 m. Les lagunes de ce type sont caractérisées par une barrière courte, de larges passes et des deltas de marées importants ;
- le type macro-tidal caractérise les lagunes où, le marnage est supérieur à 4 m. Peu de systèmes lagunaires peuvent atteindre un tel marnage.

4.2.3. Classification de Lankford (1977)

Cette classification des systèmes lagunaires est basée sur des critères morphologiques ou sur l'origine de la barrière sédimentaire. Il distingue cinq types (**Figure 12**) :

- le type 1 se caractérise par une dépression fluviale, des apports fluviatiles faibles et une barrière construite par la dérive littorale (sédimentation côtière) ;
- le type 2 correspond à une dépression fluviale comblée ou plaine marine avec apports fluviatiles importants. La barrière est construite par le fleuve ou par reprise littorale des apports du fleuve (sédimentation fluviale ou deltaïque) ;
- le type 3 est matérialisé par une absence de dépression fluviale et de barrière sédimentaire (bancs, crêtes pré-littorales, tombolos). Il s'agit d'une sédimentation marine ;
- le type 4 : dépressions à l'abri de barrières de constructions organiques généralement récifales (sédimentation organique) ;
- le type 5 : dépressions et barrières d'origine structurale.

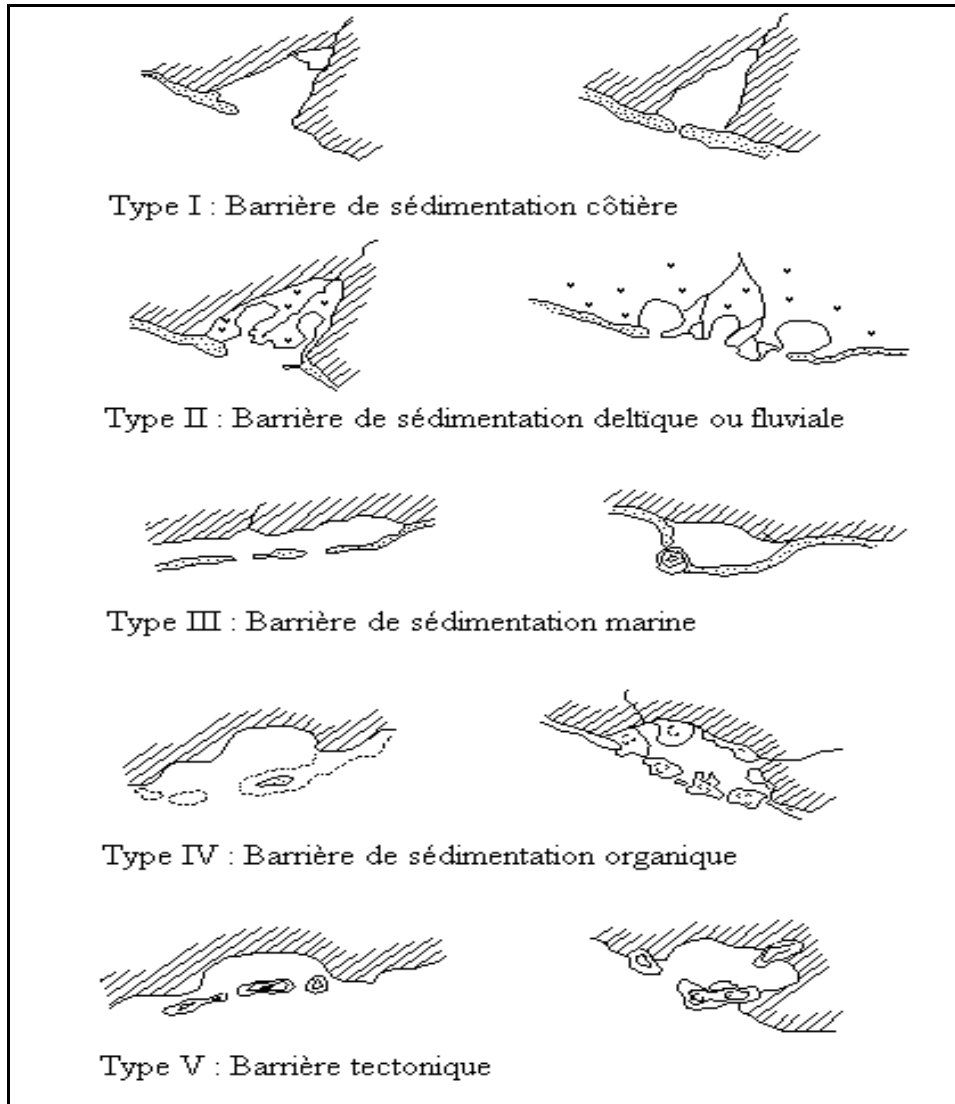


Figure 12 : Types morphologiques principaux des systèmes lagunaires (Lankford, 1977)

A partir de ces critères, on peut classer les lagunes ivoiriennes dans le type 3 car elles ont été séparées de la mer par un cordon littoral sédimentaire mis en place par la dérive littorale au cours des derniers 5000 ans (Assemien et *al.*, 1970).

4.2.4. Classification de Nichols et Allen (1981)

La classification de ces auteurs est basée sur les processus dominants dans les lagunes, à savoir la marée, les apports fluviaux, les vagues et les types de communication entre les lagunes et la mer (**Figure 13**). On distingue :

- le type A correspondant aux lagunes estuariennes dans lesquelles les courants fluviaux et les courants côtiers jouent un rôle prépondérant ;
- les lagunes ouvertes (type B) dans lesquelles la marée a un marnage suffisant pour que le flot et le jusant assurent un auto-dragage des passes qui échappent à l'obturation ;
- les lagunes semi fermées (type C) avec des passes étroites et peu de deltas de marée témoignant d'un rapport de forces inverses entre l'action des crues, vagues et courants côtiers. Au niveau des sédiments, il y a du sable à l'exutoire et de l'argile dans le bassin lagunaire. Les apports de la dérive littorale tendent à colmater les passes qui se maintiennent difficilement. Les lagunes ivoiriennes (Grand-Lahou, Ebrié et Aby) peuvent être classées dans ce type de lagunes ;
- les lagunes fermées de type D caractérisées par l'absence de courants de marée, d'où un faible marnage et par des effets de chasse d'origine fluviale.





	 A Lagune estuarienne	 B Lagune "ouverte"	 C Lagune partiellement fermée	 D Lagune fermée
	- marées et apports d'eau douces dominants	- marées et vagues actives	- vagues et courants littoral dominant.	- vagues et vent dominant.
Caractères	FORT ←	← Marées et apports d'eau douces		→ FAIBLE
	FAIBLE ←	← Vagues		→ FORT
	OUVERTE ←	← Communication		→ FERMEE
Morphologie	- Barrière courte - Chenaux profonds et zonz intertidale	- Barrière allongée - Large passes - Delta de marées (flot et jusant) développés	- Barrière allongés - Passe étroite - Delta externe (jusant) réduit	- Barrière continues
Processus dominants	- Courant de marées et apports fluviaux	- Courant de marée	- Vagues "Washover" et courant côtier	- "Washer", vent - Production organique - Précipitation chimique
Type de sédiment		- Sable larin (océan) - Vases (lagune)	- Sable marin (passes-océan) - Vases (lagune)	- Vague locustes organique - Evaporites
Echange Ocean-Lagune	- Elevé	- Intermédiaire	- Faible	- Pas d'échange (percolation à travers la barrière)

Figure 13 : Classification des lagunes (Nichols et Allen, 1981)

5. Cadre hydrologique

Les lagunes sont des systèmes environnementaux en position intermédiaire entre les systèmes hydrologiques fluviaux et marins. Ce sont des lieux de transit, de convergence et de mélange de flux variables d'eau, de matières et d'énergie, provenant soit du continent, soit de la mer ou soit du milieu lagunaire lui-même. Le régime hydrologique du clc est donc le résultat de l'interaction entre les apports d'eau douce et les apports d'eau océanique.

5.1. Hydrologie continentale

Les principales sources d'eau douce du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire (clc) sont en dehors des précipitations, les fleuves et les rivières de la rive Nord du complexe lagunaire. Sept fleuves d'importance inégale se jettent dans le clc : le Bandama et le Boubo dans le système Grand-Lahou ; l'Agnéby, la Mé et le Comoé pour le système Ebrié et enfin le Bia et le Tanoé pour le système Aby. Le **tableau II** présente les principales caractéristiques des fleuves intéressants le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire. Ces fleuves appartiennent à deux types de régimes hydrologiques (Girard et *al.*, 1971) :

- le régime équatorial de transition pour les fleuves côtiers : Agnéby, Mé, Bia, Tanoé plus le Boubo. Ce régime est caractérisé par deux crues annuelles qui reflètent la répartition saisonnière des pluies dans le Sud du pays. La première crue, généralement la plus forte, se situe en juin-juillet et la seconde, en octobre-novembre ;
- le régime tropical de transition correspond à des précipitations sur la partie septentrionale de la Côte d'Ivoire. Il comporte généralement une crue unique entre août et octobre, et une longue période d'étiage de janvier à mai. Le Bandama et le Comoé appartiennent à ce régime.

Tableau II : Principaux fleuves du complexe lagunaire (Durand et Skubich, 1980)

Régime	Cours d'eau	Bassin versant (km ²)	Volume moyenne (10 ⁹ m ³)	Débit moyen (m ³ /s)		
				Annuel	Maximum	époque
Equatorial de transition	Agnéby	8900	0,7	22	87	Juillet
	Mé	4300	1,1	36	115	Juin
	Bia	10000	2,1	65	155	Juillet
	Tanoé	16000	4,4	140	342	Juillet
Tropical de transition	Bandama	97500	13,0	413	1448	Octobre
	Comoé	78000	9,6	305	1157	septembre

5.1.1. Hydrologie du système Grand-Lahou

Le Bandama et le Boubo sont les deux fleuves qui débouchent dans le système Grand-Lahou : le Bandama (1050 km de long) se jette à son extrémité orientale et l'importance de son débit permet au grau de Grand-Lahou de rester ouvert toute l'année et à la marée d'y pénétrer en saison sèche. Les crues présentent un débit moyen de 400 m³/s et se situent en septembre. Par contre, les étiages se situent entre janvier et février avec un débit moyen de 60 m³/s (Monnet, 1972) ; le Boubo est un fleuve côtier. Il s'écoule entièrement en zone forestière et est alimenté par les eaux de pluie de la région. Son exutoire se situe à l'Ouest du système en la lagune Tadio.

5.1.2. Hydrologie du système Ebrié

La lagune Ebrié est alimentée en eau douce par trois principaux fleuves. Il s'agit :

- du Comoé qui débouche à l'extrémité orientale du système Ebrié. Il contribue à lui seul à 75% des apports fluviaux (Durand et Guiral, 1994). Les débits du Comoé sont passés de 331 m³/s durant les années de fortes pluviosités (1960-1970) à 110 m³/s pendant la période profondément marquée par la sécheresse de 1981 à 1986 (Guiral, 1992) ;
- de l'Agnéby dont l'exutoire se situe à l'Ouest du système Ebrié ;
- de la Mé qui se jette dans le canal reliant les lagunes Adjin et Potou.

Les apports solides annuels au système Ebrié, entre 1950 et 1985, peuvent se chiffrer à 0,42. 10⁶ tonnes (Tastet et Guiral, 1974).

5.1.3. Hydrologie du système Aby

Le système Aby reçoit deux principaux fleuves côtiers (Chantraine, 1980 et Charles-Dominique, 1993) :

- le fleuve Tanoé se jette à l'Est de la lagune Tendo après avoir drainé un bassin versant de 16000 km². Son débit moyen est de 142 m³/s. Le bilan annuel d'eau douce apporté par la Tanoé est de 4,5.10⁹ m³ soit 63% des apports totaux ;
- la Bia débouche au Nord du système Aby. Son débit moyen est de 65 m³/s. Ce fleuve constitue 29% des apports d'eau douce de la lagune.

En plus de ces deux fleuves, plusieurs petites rivières se jettent également dans la lagune Aby, dont la plus importante est l'Eholié (40 km). L'analyse du bilan annuel d'eau douce révèle que, la plus grosse part des apports (92%) est fournie par les deux fleuves (Tanoé et Bia). Toutefois au cours des mois de janvier et février (caractérisés par une

évaporation très intense), 64 à 69% des apports bruts s'évaporent. Les pluies, diminuées de l'évaporation, ne représentent que 6% des apports et les petites rivières à peine 2%.

5.2. Hydrologie marine

Les processus hydrodynamiques associés à la présence des côtes sont de deux ordres (Koutitonsky, 2007) :

- les courants de marée et les grands courants océaniques ;
- les vents qui produisent des courants de dérive parallèles (houle) et des zones de remontées d'eau profondes (ou *upwelling*).

5.2.1. Marée

La marée au large de la côte ivoirienne est de type semi-diurne avec une inégalité diurne. Elle présente toujours deux pleines mers et deux basses mers par jour. Les hauteurs des pleines mers ou basses mers consécutives sont différentes en raison de la présence de l'onde diurne (une basse mer et une haute mer par jour). Les grandes marées consécutives sont séparées par une durée de 14 jours environ. Le marnage au large d'Abidjan est faible. Il est compris entre 0,4 m en mortes eaux et 1,3 m en vives eaux (Lemasson et *al.*, 1973). Cette marée impose un rythme semi-diurne à un certain nombre de paramètres (sens et vitesse des courants, température et salinité). A ces variations semi-diurnes se superposent des variations semi-synodiques (alternance vive-eau/morte-eau), de périodicité voisine de 14 jours et ayant pour origine l'amplitude des marées (Tastet, 1974, 1979 ; Gallardo, 1978 ; Varlet, 1978).

L'influence des marées est sensible sur l'ensemble des lagunes, cependant son influence est très amortie dès qu'on s'éloigne des estuaires (Durand et Chantraine, 1982). Les amortissements de la marée sont fonction de l'importance des apports d'eau douce et s'échelonnent selon les saisons Guiral (1992). L'onde de marée pénètre dans les systèmes lagunaires en passant par le grau de Grand-Lahou pour le système Grand-Lahou, le canal artificiel de Vridi (la passe de Grand-Bassam étant fermée) pour le système Ebrié et la passe d'Assinie pour le système Aby.

La propagation de la marée dans le système Grand-Lahou est fonction de la saison. Pendant les périodes d'étiage, la limite d'action de la marée se situe à environ 70 km de l'embouchure. En crue par contre, cette limite est reportée vers l'aval à environ 17 km de l'embouchure (Monnet, 1972). Le marnage à l'embouchure est de 0,16 m (Abé et *al.*, 1993).

Depuis 1950, le système Ebrié est en contact permanent avec la mer par le canal artificiel de Vridi. Ce canal est orienté SE-NW, large de 370 m, long de 2,7 km et profond d'une vingtaine de mètres. L'ouverture de ce canal a eu pour conséquence à partir de 1980, la fermeture du grau de Grand-Bassam qui constituait l'exutoire naturel du fleuve Comoé (Mondé, 2004). L'onde de marée en lagune se comporte différemment dans les chenaux Est et Ouest de la lagune Ebrié (Varlet, 1958). Pour un marnage de 100 cm, le retard est d'environ 4h au confluent du fleuve Comoé et le marnage un peu plus de 20 cm. En revanche à l'Ouest, pour la même distance, le retard n'est que de 2h et le marnage de 8 cm. Le volume d'eau marine qui transite par le canal de Vridi, lorsque le grau de Grand-Bassam est fermé, serait de l'ordre 38 km^3 , ce qui est 6,8 fois supérieur aux apports continentaux (Varlet, 1978 et Dufour, 1984). Ces entrées d'eaux marines représentent 14 fois le volume de la lagune Ebrié soit $2,7 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ (Varlet, 1978). Le volume océanique qui transite par la lagune varie donc en fonction des saisons. Le volume d'eau marine entrant est maximal au cours des périodes d'étiage et minimal au cours des périodes des crues des fleuves.

L'onde de marée qui pénètre dans le système Aby est amortie par les îles barrières. Un marnage de 30 cm a été observé dans la passe d'Assinie (Abé et *al.*, en 1996). Pendant les périodes d'étiage (de novembre à février), la passe est à son maximum d'obstruction. Les courants de flot prédominant sur les courants de jusant apportent une quantité importante de sédiments marins qui colonisent toute la zone de la passe, concourant ainsi à la formation de haut-fond à la confluence des bras des lagunes.

5.2.2. Courants marins généraux

Ils sont responsables des mouvements sédimentaires sur le littoral ivoirien qui se fait d'Ouest en Est.

Les courants océaniques sont au nombre de deux sur le plateau continental de Côte d'Ivoire (Plutchart, 1966 ; Le Floch, 1970 ; Lemasson et Rebert, 1973) :

- le courant de Guinée se dirige dans le sens Ouest-Est dans les couches superficielles de 20 à 50 m avec des vitesses de 0,3 à 1,1 m/s. C'est un courant baroclinique dû à une différence de niveau de la mer de part et d'autre du Cap des Palmes ;
- le sous-courant qui varie de 0,3 à 0,7 m/s est orienté d'Est en Ouest et se localise dans les couches d'eau de -15 à -80 m.

5.2.3. Houle

La houle apparaît comme un mouvement ondulatoire que subit la surface de la mer sous l'influence initiale du vent, elle se traduit par ce qu'on appelle les vagues (Lenotre, 1984 *in* Yacé, 1993). Les caractéristiques de la houle (**Tableau III**) sont constantes sur le littoral ivoirien (Tastet, 1979). Elles sont engendrées depuis les grandes dépressions australes (50° et 60°) de latitudes Sud et dont le front forme un angle de 24° avec l'angle de la côte. Les houles sont de secteur Sud et Sud-Ouest avec une amplitude moyenne de 1,3 m. Les houles longues de longueur d'onde supérieure à 11 s quoique moins fréquentes (8%), sont celles qui ont le plus d'effet sur la répartition des sédiments côtiers.

Tableau III : Caractéristiques des houles sur le littoral ivoirien (Varlet, 1958)

Période (s)	Amplitude (m)	Profondeur de déferlement (m)	Direction des orthogonales	Direction des orthogonales au large	Période de l'année où la houle est dominante
12	2	5	203°N	203°N	Mai-juin représente toute l'année
10	1,5	4	198°N	203°N	40 à 50% des houles
8	1	3	193°N	201°N	Novembre à janvier
10,5 à 11,9	0,7	3	167°N à 170°N	220°N	

5.2.4. Upwellings

Les mouvements verticaux consistant à des remontées d'eau froide devant les côtes sont appelés *upwellings*. Il se produit deux *upwellings* devant les côtes ivoiriennes (Morlière, 1970) : le premier, en janvier, correspond à la petite saison froide pendant laquelle les eaux marines côtières sont froides (24°-25°C) et salées (plus de 35 psu). Le second *upwelling* qui se produit de juillet à octobre, est plus marqué. La salinité des eaux marines reste proche de 35 psu avec une température inférieure à 23°C. Entre ces deux saisons froides s'intercalent une grande saison chaude de février à mai et une petite saison chaude de novembre à décembre. Les eaux chaudes (27-28°C) et dessalées guinéennes viennent recouvrir celles de l'*upwelling*.

5.3. Bilan hydrique

Une estimation des apports et des pertes de diverses natures a été tentée dans le complexe lagunaire ivoirien :

- le rapport entre le volume total apporté par le Bandama (avant 1967) et celui du système Grand-Lahou est inférieur à 20 (Durand et Skubich, 1982) ;
- Varlet (1978) a estimé par des méthodes indirectes le volume total des sorties à $50.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ et celui des entrées à $38.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ entre 1951-1952 (**Figure 14**). Les principaux fleuves (Agnéby, Mé, Comoé) et les petits bassins riverains apportent un volume moyen de $11,75.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$. Les précipitations représentent 2100 mm/an en moyenne, soit un volume de $1,2.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ (Durand et Skubich, 1980). L'évaporation moyenne est de 127 mm par mois, ce qui correspond à un volume de $0,7.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$;
- pour le système Aby, les apports en eau douce sont comparables à ceux de la lagune Ebrié et représentent 3 à 4 fois le volume du système (Durand et Skubich, 1980). En revanche, les échanges avec la mer sont assez limités étant donné la relative exigüité de la passe d'Assinie mais aussi de la présence de nombreuses îles qui ralentissent la propagation de l'onde de marée.

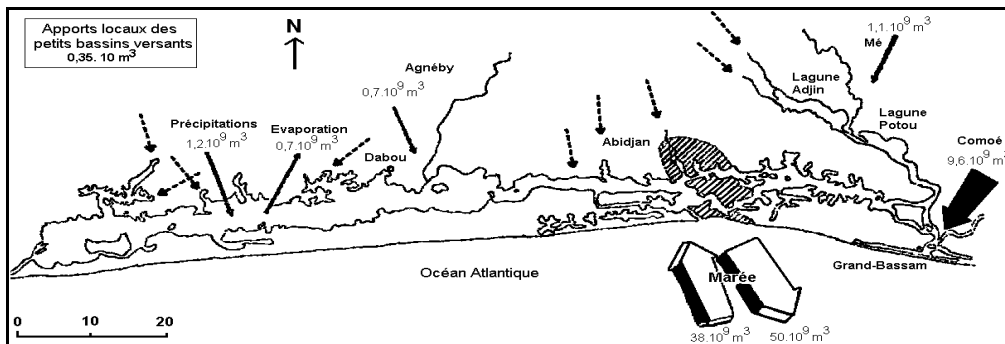


Figure 14 : Bilan hydrique des entrées/sorties d'eau pour la lagune Ebrié (Varlet, 1978)

5.4. Hydrologie lagunaire

L'hydroclimat du clc est lié à différents régimes (Morlière, 1970) :

- au climat continental qui fait alterner deux saisons des pluies centrées sur juin et octobre, avec deux saisons sèches entre décembre et février d'une part et d'autre part entre juillet et septembre ;
- à l'arrivée sous régime sahélien des eaux du Bandama et du Comoé d'une part et d'autre part à l'arrivée des eaux du Boubo, de l'Agnéby, de la Mé, de la Bia et du Tanoé au moment de la saison des pluies ;

- aux saisons marines caractérisées par des remontées verticales d'eau froide appelées *upwellings* devant les côtes.

Ainsi, il se dégage trois saisons lagunaires principales (Durand et Skubich, 1980) :

- une saison sèche de janvier à avril où l'influence marine est maximale. Les apports continentaux sont négligeables et l'évaporation est à son maximum. Les températures et les salinités atteignent leur niveau le plus élevé ;

- une saison des pluies de mai à août : c'est la saison des plus fortes précipitations et des apports des rivières forestières, mais aussi le début de *l'upwelling*. Les températures et les salinités atteignent leurs valeurs minimales ;

- une saison des crues de septembre à décembre où les lagunes sont sous influence des eaux des fleuves drainant le Nord de la Côte d'Ivoire. C'est le cas du Bandama pour la lagune de Grand-Lahou et du Comoé pour la lagune Ebrié. Les salinités sont faibles, mais la température remonte à partir d'octobre.

La troisième saison lagunaire n'existe pas dans le système Aby, puisqu'il n'y a pas de fleuves appartenant au régime tropical de transition qui s'y jettent. On observe plutôt une saison de transition marquée par la petite saison des pluies et par la deuxième crue des fleuves forestiers qui paraît particulièrement importante dans le cas du fleuve Tanoé et presque du même ordre que la crue principale qui se produit en juillet.

5.5. Physico-chimie des eaux

5.5.1. Physico-chimie des eaux du système Grand-Lahou

La salinité et la température des eaux dans l'estuaire du Bandama est fonction de la saison (Wognin, 2004) :

- dans le chenal fluvial du Bandama, la marée de salinité pénètre jusqu'à 30 km à l'intérieur du chenal en étiage, alors qu'en crue, le front de salinité descend à 15 km de la passe de Grand-Lahou. Elle peut atteindre 18 psu en étiage et devenir nulle en période des crues ;

- la salinité des eaux de surface dans le chenal Nord menant à la lagune Tadio oscille entre 5 et 10 psu. En période des crues, la salinité baisse puisque ce secteur de la lagune est sous influence des fleuves Bandama et Boubo ;

- dans le chenal Ouest (la lagune Nyouzoumou), on observe de fortes variations de salinité depuis le creusement du canal de Groguida. La salinité en surface peut atteindre au maximum 25 psu en étiage et 15 psu en période de crue.

Les températures des eaux de surface sont plus basses en période de crue (28°C) qu'en étiage (31,16°C).

5.5.2. Physico-chimie des eaux du système Ebrié

Les salinités les plus élevées (27 psu) se situent dans la région d'Abidjan, dans la zone 3 (**Figure 15**). Elle s'amortit vers les régions continentales de part et d'autre du canal de Vridi. Les variations saisonnières sont très accentuées et identiques pour l'ensemble de la zone estuarienne, passant de moins de 2 psu en saison des crues et des précipitations, à plus de 25 psu en saison sèche et d'étiage du Comoé (Pagès et *al.*, 1979).

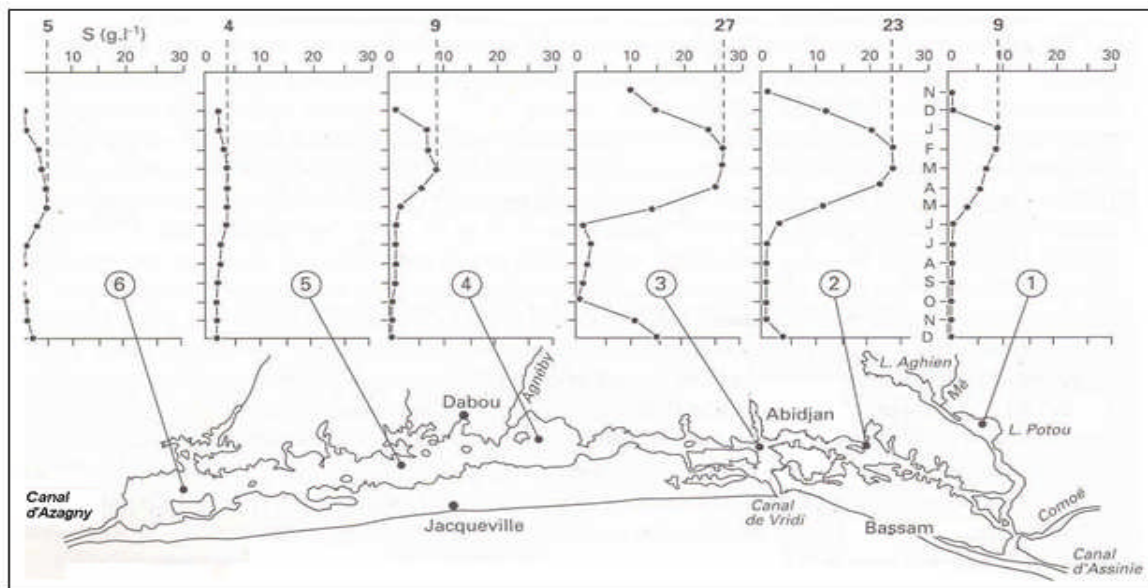


Figure 15 : Variabilité spatio-temporelle de la salinité en lagune Ebrié (Pagès et *al.* 1979)

Les températures extrêmes relevées en lagune Ebrié par Dufour (1982) sont 25 et 35°C. De faibles gradients horizontaux (entre 3° et 4°C) et verticaux (qui peuvent exceptionnellement dépasser 6°C en saison des crues) en région estuarienne ont été également observés (Varlet, 1978 ; Pagès et *al.*, 1979).

5.5.3. Physico-chimie des eaux du système Aby

Les paramètres physico-chimiques sont influencés par la bathymétrie et par les apports d'eau douce de la Bia et de la Tanoé (Metongo, 1985) :

- en saison des pluies et des crues, la salinité de surface est faible (entre 1 et 3 psu) ;
- en période de saison chaude et sèche, la salinité des eaux de surface atteint son niveau le plus élevé. La valeur moyenne est de 8 psu dans la zone proche d'Assinie et de 5 psu partout ailleurs.

La salinité et la température des eaux de surface dans les systèmes lagunaires présentent des variations spatio-temporelles qui sont fonction des apports d'eau douce et des modalités de leur mélange avec les eaux océaniques. Mais, d'autres facteurs comme les actions anthropiques peuvent modifier ces paramètres physico-chimiques et partant le fonctionnement du milieu lagunaire.

6. Pression anthropique sur le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire

La plupart des zones de forêts qui environnent le clc sont exploitées par une agriculture villageoise et parfois par des exploitations agricoles industrielles qui utilisent des engrais chimiques. Ces plantations (palmier à huile ou de cocoteraies) sont drainées par des tributaires des lagunes qui apportent ainsi une charge de produits polluants. A l'opposé des zones rurales, on assiste dans les zones urbaines à toutes sortes de rejets : rejets chimiques industriels, rejets d'égouts urbains, de pesticides et sels nutritifs lessivés, des rejets des aménagements portuaires et de dragage, et bien d'autres encore à venir.

6.1. Pollution du système Grand-Lahou

La pêche et l'agriculture sont les principales activités qui se déroulent autour du système lagunaire de Grand-Lahou. A la faveur de l'intense lessivage des sols pendant la période des pluies, une fraction importante d'intrants agricoles peut aboutir en lagune. En outre, des interpellations et des informations récurrentes font état de la pêche avec de l'endosulfan (Bleu, 2005). En effet, des boîtes de Caodalm super 50 (pesticide dont la matière active est l'endosulfan) ont été saisies sur des pêcheurs à Grand-Lahou (**Photo 1**). L'endosulfan est de la famille chimique des organo-chlorés¹. Cette substance a été développée dans le milieu des années 1950 et se présente sous forme de cristaux bruns, stables à la lumière et insolubles dans l'eau. Elle est très toxique pour les organismes aquatiques. Des traces d'endosulfan de plus de 0,1 ppm (norme) ont été signalées dans les sédiments du système Grand-Lahou (Bleu, 2005) :

- dans les lagunes Tadio et Makey, la concentration moyenne de l'endosulfan est 4,6748 ppm. Les berges de ces deux lagunes sont occupées par des plantations de palmier à huile drainées par les tributaires des fleuves Boubo et Gô ;
- en lagune Tiagba, l'endosulfan a une concentration moyenne de 1,8881 ppm. Cette lagune est en contact direct avec la mer et reçoit les eaux du Bandama dont le bassin versant fait l'objet d'exploitations agricoles de palmiers à huile ;

- la lagune Nyouzoumou qui ne reçoit aucun apport fluvial présente une concentration moyenne faible (1,1306 ppm) d'endosulfan par rapport aux trois autres lagunes.

La présence de l'endosulfan a été également mise en évidence chez la carpe blanche (*Tilapia guinéensis*) qui est une espèce prisée par la population locale. Chez l'homme, on signale une trentaine d'intoxication alimentaire due à l'endosulfan à l'hôpital de Grand-Lahou.



Photo 1 : Boîtes de Caodalm super 50 saisies sur des pêcheurs (Bleu, 2005)

6.2. Pollution du système Ebrié

A l'opposé du système Grand-Lahou, le système Ebrié montre des signes de pollution évidente. La majorité des eaux usées domestiques et industrielles sont rejetées dans la lagune sans traitement préalable. Les conséquences de cette pollution sont nombreuses : odeurs nauséabondes, prolifération de mouches, de moustiques et de jacinthes d'eau douce, hypoxie ou anoxie du milieu ; etc.

Les types de pollution localement identifiés dans la lagune ont des origines diverses (Pagès et *al.*, 1980) :

- pollutions organiques, liée aux effluents domestiques et agro-industriels, présentant une forte charge organique. Ces apports sont riches en azote et phosphate (Martin, 1979 ; Lemasson et Pagès, 1982 ; Affian, 2003). Ils causent d'intenses phénomènes d'eutrophisation et d'anoxie (**Photo 2**), surtout dans les régions à faible hydrodynamisme ;
- pollution chimique, liée aux effluents industriels (soude, acides, huiles minérales, pigments des industries textiles, métaux lourds, ateliers métallurgiques, glycérine des savonneries, arsenic des tanneries, etc.). Les teneurs en métaux lourds dans le système Ebrié sont présentées dans le **tableau IV**.



Photo 2 : Végétaux flottants dans le port d'Abidjan (Mondé, 2004)

Tableau IV : Teneur (mg/kg) en hydrocarbure et en métaux des baies d'Abidjan (Affian, 2003)

Baies	Hydrocarbure	Cd	Cu	Fe	Zn	Mn
Abou-Abou	20-100	100-170	0-20	0-100	0-200	0-600
Biétry	100-400	100-290	80	200-340	200-400	153-250
Koumassi	20-100	290	40-80	100-340	100-400	0-153

Les entreprises de l'agglomération abidjanaise rejetaient quotidiennement 12000 m³ d'eaux résiduelles industrielles en 1980, apportant ainsi en lagune 23 t de matières oxydables, soit 39 t de Demande Chimique en Oxygène (DCO) et 15 t de Demande Biologique en Oxygène (DBO) selon Broche et Peschet (1983). Les emplacements des points de rejets domestiques et industriels aboutissant en lagune sont présentés dans la **figure 16**.

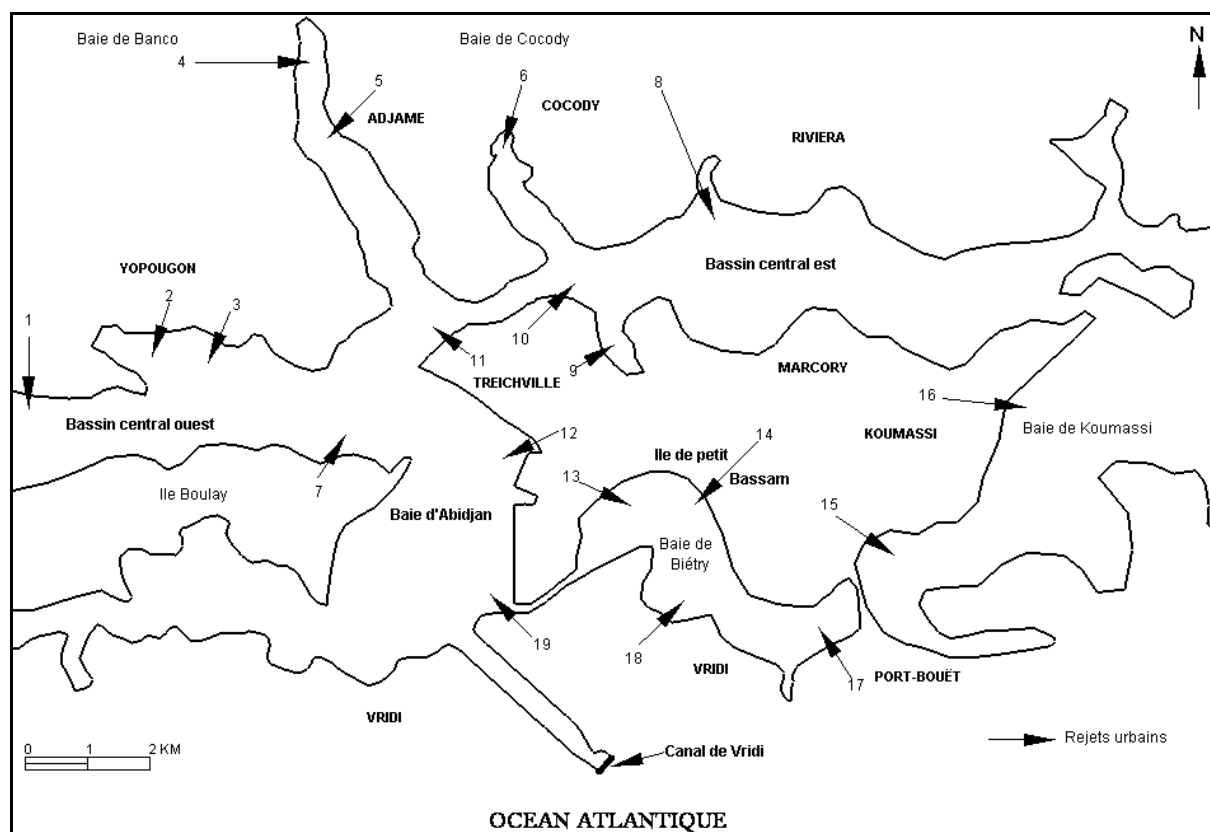


Figure 16 : La lagune Ebrié à Abidjan et les principaux points de rejets (Pagès et *al.*, 1980)

Rejets	Nature
1 :	Rejets urbains de Yopougon et industriels d'Uniwx
2 :	Rejets urbains du quartier Séminaire
3 :	Rejets urbains de Yopougon-Santé
4 :	Rivière du Banco polluée par les eaux usées savonneuses et les détergents des laveurs du Banco
5 :	Rejets urbains d'Adjamé
6 :	Rejets urbains d'Indénié
7 :	Rejets urbains de l'île Boulay
8 :	Rejets urbains de la baie de la Rivière
9 :	Rejets urbains du réseau de Treichville
10 :	Pont de Gaulle - Rejets de matières de vidange
11 :	Pont Houphouët-Boigny - Rejets à dominance industrielle
12 :	Rejets sur le port de pêche à dominance industrielle
13 :	Rejets industriels (Blohorn)
14 :	Rejets à dominance industrielle de l'île de petit Bassam
15 :	Rejets urbains et industriels de Koumassi
16 :	Rejets de matières de vidange et de fosses septiques de Koumassi
17 :	Rejets à dominance industrielle, derrière l'abattoir de Port-Bouët
18 :	Rejets industriels (Société Ivoirienne de Raffinage et Palmindustrie) de Vridi
19 :	Rejets industriels (Rhône-Poulenc, Shell-Chimie) de Vridi

6.3. Pollution du système Aby

Le fleuve Tanoé qui se jette dans le système Aby draine la région Ashanti, province aurifère du Ghana. Il sert de vecteur de pollution depuis ces zones minières jusqu'à son débouché en lagune. En effet, l'exploitation des mines d'or que ce soit dans les alluvions, dans des gisements de surface ou de profondeur, à l'échelle individuelle comme à celle des grandes compagnies, est associée à l'amalgamation par le mercure. Malgré les méthodes de récupération du mercure par distillation ou par cyanuration, on admet que la production d'or conduit en moyenne à 1,3 kg de mercure émis dans l'environnement pour 1 kg d'or extrait (Malm, 1998 *in* Claon, 1999).

La présence de polluants minéraux dans le système Aby a été mise en évidence dans l'eau, les sédiments et la biomasse (Claon, 1999) :

- dans l'eau, les teneurs en mercure total sont faibles (quelques dixièmes de $\mu\text{g/l}$). On note une légère augmentation au niveau du goulet d'Eboinda (3 $\mu\text{g/l}$). Le même phénomène se rencontre avec le sélénium. Quant aux concentrations en arsenic, elles sont de l'ordre de 5 μpsu ;
- dans les sédiments, il y a une forte augmentation du mercure (rapport de 1 à 10) entre le fleuve Tanoé et le goulet d'Eboinda ;
- dans la biomasse, le mercure est présent chez *Pistia stratiotes* (plante flottante), mais les teneurs restent inférieures au mg/kg. L'arsenic et le sélénium peuvent atteindre respectivement 7 et 4 mg/kg. Pour les poissons, le machoiron (g. *Chrysichthys*) présente les plus fortes concentrations en Hg avec une moyenne de 0,2 mg/kg et des valeurs maximales de 0,4 mg/kg, tout comme le sélénium (avec 0,6 mg/kg). L'arsenic apparaît en quantité inférieure à celle du sélénium (entre 0,002 et 0,18 mg/kg).

Conclusion

Le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire fonctionne en position intermédiaire entre les systèmes hydrologiques fluviaux et marins. La marée et les apports fluviaux y créent des conditions hydrodynamiques variables. En outre, les mêmes processus hydrodynamiques qui assurent l'apport de matières nutritives et entretiennent la production biologique assurent aussi l'apport de polluants. Il est donc important de bien comprendre ces processus hydrodynamiques. Les modèles mathématiques numériques peuvent être des outils précieux d'aide à la compréhension scientifique, mais également un support à la décision et à la gestion (Bacher et al., 2000 *in* Struski, 2005).

CHAPITRE 2

MATERIEL & METHODES

L'approche par modélisation de systèmes aquatiques implique, le choix des variables d'état et des échelles d'espace et de temps de la modélisation d'une part et d'autre part le choix d'une méthode de résolution numérique pour la mise au point de l'outil de simulation.

1. Classification des modèles hydrodynamiques

Un modèle mathématique est un ensemble d'équations qui décrivent l'évolution spatio-temporelle de quelques paramètres (hydrodynamiques ou autres) caractérisant le fonctionnement interne des milieux aquatiques. Il s'agit donc d'une représentation virtuelle de la zone modélisée. L'ensemble du domaine géographique étudié est défini par un grand nombre de points (plusieurs centaines, voire plusieurs milliers). A chacun de ces points est associé un ensemble d'équations caractérisant les différents paramètres (vitesses, pression, hauteur d'eau, frottement sur le fond, frottement dû au vent, concentration, etc.) dans l'espace et dans le temps. Ces équations complexes n'ayant pas de solutions analytiques, sont résolues par des méthodes dites numériques telles que la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis (Moussa, 2002). Selon le degré de complexité du milieu à étudier, on distingue trois types de modèles : les modèles unidimensionnels (1D), les modèles bidimensionnels (2D) et les modèles tridimensionnels (3D).

1.1. Modèles à une dimension (1D)

Les modèles unidimensionnels sont des modèles intégrés sur la section transversale du milieu. Ils utilisent les équations à une dimension dans l'espace (l'axe x , qui coïncide avec l'axe principal de l'écoulement). En général, ces modèles sont adaptés aux écoulements en rivières, aux lagunes allongées et peu profondes et dans lesquelles la direction de l'écoulement est unidirectionnelle. Ils sont fonctionnels pour de nombreux secteurs industriels ou environnementaux où l'on rencontre des problèmes d'écoulements parallèles ou quasi-parallèles, le plus souvent en régime permanent. Les avantages de ce type de modèles sont la simplicité de mise en œuvre et la rapidité de calcul. Ces modèles peuvent être couplés avec les modèles écologiques pour des simulations à grandes échelles de temps (quelques mois, un cycle annuel, voir quelques années).

1.2. Modèles à deux dimensions (2D)

Les modèles bidimensionnels sont des modèles basés sur la résolution d'équations à deux dimensions (dans le plan horizontal (x, y)) intégrées sur la hauteur d'eau. Ils permettent de simuler l'hétérogénéité horizontale des variables hydrodynamiques. Ces modèles sont largement utilisés pour la modélisation hydrodynamique des milieux peu profonds et des

zones côtières non stratifiées. Le milieu est discrétisé sous forme de très petites zones (mailles ou éléments) supposées homogènes. Ce type de modèle a été utilisé pour l'étude du système lagunaire Ebrié. On peut citer les travaux de Ramany (1979) et de Mondé (2004).

Ramany (1979) a étudié le fonctionnement hydrodynamique et la salinité du système Ebrié à l'aide d'un modèle bidimensionnel horizontal aux différences finies. Les simulations effectuées l'ont conduit à adopter une valeur du coefficient de Strickler égal à $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Son modèle a permis de simuler divers scénarios relatifs à des modifications de structure sur le système Ebrié :

- la construction de la digue d'Azito, ouvrage prévu pour l'extension du Port Autonome et destiné à relier l'île Boulay à la rive Nord du système Ebrié ;
- l'ouverture de la digue de l'aéroport qui constitue un obstacle à la communication des eaux entre la baie de Biétry et la baie de Koumassi très polluée.

Les simulations ont montré que la construction de la digue d'Azito n'est pas préjudiciable aux conditions que doit respecter le courant de chasse pour préserver de l'ensablement le canal de Vridi. En contrepartie, les modifications observées à Azito sont assez importantes. La digue de l'aéroport, quant à elle, a entraînée une augmentation des vitesses de courant sous le pont de Biétry. Ce résultat a été confirmé par les mesures faites par Guiral et Lanusse (1984).

Mondé (2004) a développé un modèle bi-dimensionnelle horizontal capable de reproduire la circulation des masses d'eau et de polluants minéraux dans le système Ebrié en période d'étiage et de crue. L'outil de modélisation choisi est le modèle numérique TELEMAC 2D. La marée réelle est introduite au canal de Vridi et des débits d'étiage ou de crue sont injectés aux trois frontières fluviales du modèle. Une bonne adéquation est obtenue entre hauteurs d'eau mesurées et simulées avec un coefficient de Strickler égal à $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Les simulations montrent que le transfert des masses d'eau entre la plate-forme continentale et la lagune dure 10h (5h pour chaque type de transfert) avec 2h d'instabilité en étiage et en crue dans le modèle à un exutoire. Dans le modèle à deux exutoires (canal de Vridi et grau de Grand-Bassam), le jusant dure 12h à Grand-Bassam, et 5h à Vridi en période de crue. Quant au flot, il est négligeable à Bassam, mais dure 5h à Vridi. Les transferts de masse d'eau sont synchronisés au canal de Vridi et à l'exutoire du Comoé à Bassam. Des rejets de polluants dans le canal et dans la baie de Biétry ont été également simulés durant 21 jours.

1.3. Modèles à trois dimensions (3D)

Les modèles tridimensionnels sont surtout adaptés aux milieux hydriques stratifiés (lacs ou lagunes de grandes dimensions et profondes, zones marines profondes). En outre, on les utilise pour le suivi de l'évolution des phénomènes tels que la stratification en densité, la stabilité du système considéré et sa variation saisonnière. Cependant, ces modèles nécessitent un temps de calcul très long et une capacité de calcul très importante pour la simulation des milieux naturels. Le milieu est discrétisé sous forme de grosses boîtes (ou zones supposées homogènes) empilées. Ils permettent la connaissance des champs de courant dans l'ensemble du milieu, suivant les 3 directions de l'espace.

2. Choix du type de modèle

Chaque modèle (1D, 2D ou 3D) est adapté pour simuler le fonctionnement hydrodynamique de systèmes aquatiques particuliers. En effet, pour chaque milieu étudié, il faudrait choisir, et justifier, le modèle adapté. Le choix du type de modèle à utiliser repose non seulement sur les différentes caractéristiques du milieu aquatique (dimensions, profondeur, stratification, etc.) mais aussi sur les moyens disponibles (logiciel disponible, capacité des ordinateurs, temps nécessaire, etc.). Compte tenu, d'une part de la faible profondeur des systèmes lagunaires de Grand-Lahou (3 m en moyenne), Ebrié (4,8 m en moyenne) et Aby (3,8 m en moyenne) et d'autre part, de la non stratification de ces lagunes sauf dans les zones proches des passes, un modèle bidimensionnel, horizontal, intégré sur la hauteur a été choisi pour l'étude du fonctionnement hydrodynamique du clc. En outre, ce genre de modèle permet de déterminer la répartition spatiale de la vitesse suivant les deux directions du plan horizontal et de calculer la variation du niveau de la surface d'eau.

3. Les équations de base des modèles à deux dimensions

Les équations des modèles hydrodynamiques à deux dimensions dans le plan horizontal découlent de la moyenne sur la verticale des équations locales de bilan de masses et de quantité de mouvement de Navier-Stokes. Dans ces équations, l'hypothèse d'une répartition hydrostatique de la pression est adoptée. Dans un repère orthogonal (O, x, y), les équations de base des modèles 2D, intégrées sur la hauteur h, sont les suivantes (SMS, 2003) :

- l'équation de continuité : (2.1)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = m_0$$

- l'équation de bilan de quantité de mouvement suivant Ox : (2.2)

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - h \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial Z_f}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g u n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \xi \frac{\rho_a}{\rho} V_a^2 \cos \phi - 2h\omega v \sin \phi = 0$$

- l'équation de bilan de quantité de mouvement suivant Oy : (2.3)

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - h \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial Z_f}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g v n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \xi \frac{\rho_a}{\rho} V_a^2 \sin \phi + 2h\omega u \sin \phi = 0$$

- l'équation de conservation et de transport du traceur : (2.4)

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

Où h : hauteur d'eau (m), u et v : composantes horizontales de la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau (m/s), t : le temps (s), ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³), ρ_a : masse volumique de l'air (kg/m³), m₀ : flux massique (m/s) à l'interface (évaporation, pluviométrie), g : accélération de la pesanteur (m/s²), Z_f : côte au fond (m), n : coefficient de rugosité du fond de Manning (m^{-1/3}.s), ξ : coefficient de cisaillement du vent ; V_a : vitesse du vent (m/s), φ : direction du vent par rapport à l'axe OX, ω : vitesse de rotation angulaire (rd), φ : latitude du milieu, C : concentration en polluant moyennée sur la hauteur d'eau (kg/m³), D : coefficient de dispersion du polluant (m²/s), K : taux de disparition du polluant dans le milieu (s⁻¹).

Ces équations, dont les inconnues sont h , u , v et C , n'admettent pas de solutions analytiques. Elles sont donc résolues numériquement pour aboutir à un modèle numérique. Les coefficients n , ζ , D et E_{ij} (ou E) sont déterminées par calage du modèle en s'appuyant sur des mesures de terrain.

4. Outil de modélisation numérique : *SMS*

Le logiciel *SMS* est un modèle numérique qui utilise la méthode des éléments finis pour la résolution des équations (2.1) à (2.4) de la page 43. Il est adapté aux milieux peu profonds et non stratifiés. Il intègre des modules pré-processeurs pour le maillage et des modules post-processeurs pour l'analyse des résultats. La structure générale du logiciel *SMS* est schématisée sur la **figure 17**. Les modules utilisés dans cette étude sont encadrés par des traits épais (*GFGEN*, *RMA2* et *RMA4*). Des exemples de fichiers des paramètres de simulation des modules *GFGEN*, *RMA2* et *RMA4* sont présentés en **annexe A**.

4.1. Module *GFGEN*

Le module *GFGEN* (ou *Geometry File Generation*) a pour rôle de générer le maillage (en éléments finis) du domaine en définissant les nœuds (numéros et coordonnées) et les éléments (numéros et les nœuds correspondants). Il crée un fichier de données binaires qui contient toutes les informations qui concernent le maillage et la géométrie dans un format convenable pour permettre son utilisation par les autres modules de simulation (*RMA2* ou *RMA4*). En outre, il identifie les erreurs potentielles dans le maillage définit et re-numérote le maillage en omettant les nœuds et/ou les éléments non utilisés.

4.2. Module *RMA2*

Le module *RMA2* (ou *Resource Management Associates*) est un modèle hydrodynamique numérique bidimensionnel (sur le plan horizontal définit par O , x , y). Il résout numériquement les équations de bilan de masses et de quantité de mouvement intégrées sur la hauteur d'eau. Il s'agit des équations (2.1), (2.2) et (2.3). Ces équations, où les inconnues sont u , v et h , sont résolues numériquement par la méthode des éléments finis. Ce module est conçu pour traiter les problèmes d'écoulements où les accélérations verticales sont négligeables (milieux peu profonds) et où les vecteurs vitesses sont unidirectionnels sur toute la hauteur de la colonne d'eau à tout instant (pas de stratification dynamique).

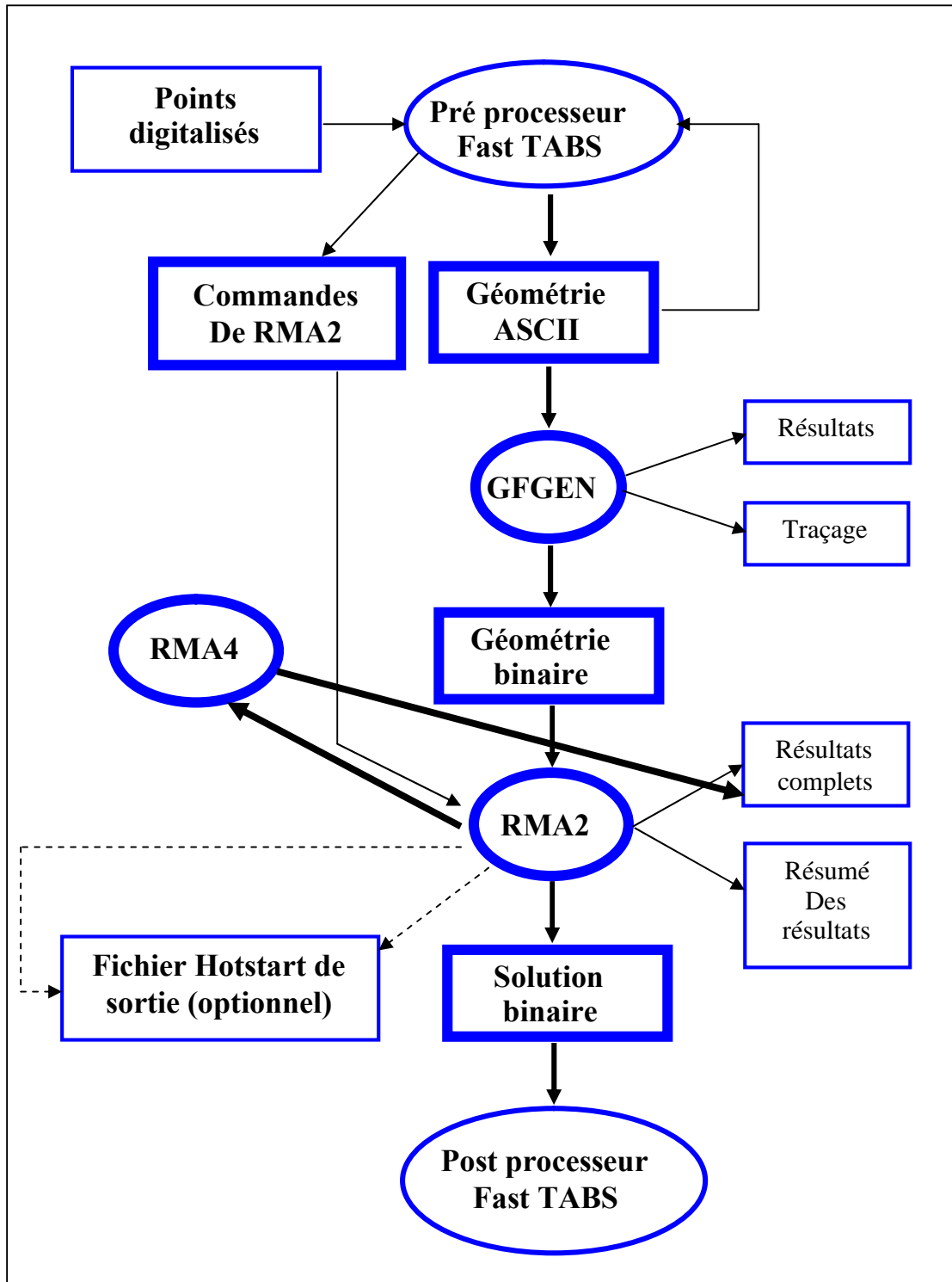


Figure 17: Schéma de fonctionnement du logiciel SMS (SMS, 2003, modifié)

4.3.Module *RMA4*

Le module *RMA4* est le module de simulation de la dispersion de polluants. Il résout l'équation de transport (2.4) d'un constituant quelconque couplée au modèle hydrodynamique. Pour le calcul des valeurs numériques des concentrations (moyennées sur la hauteur d'eau) en chaque nœud du maillage, le module *RMA4* utilise les résultats du modèle hydrodynamique (résultats de *RMA2*) ; car, il se sert des vitesses calculées par ce dernier au niveau des nœuds et des éléments du maillage pour simuler la dispersion du polluant dans le milieu considéré. Le module *RMA4* ne simule pas le taux de disparition du traceur dans le temps (Moussa, 2002). De plus, les gradients verticaux ne sont pas pris en compte, les vitesses étant intégrées sur la verticale dans un modèle 2DH. Le modèle peut nous renseigner sur les zones d'accumulation éventuelle de polluants, les zones de turbidité maximale comme les zones frontales entre les eaux relativement douces et salées, le rôle des forçages hydrodynamiques sur le transport des particules dissoutes, etc.

4.4.Module *SED-2D*

C'est le module de transport sédimentaire 2D du système de modélisation SMS. Il reproduit le transport de particules en suspension pour différentes échelles spatio-temporelles en intégrant à chaque pas de temps du calcul les variations bathymétriques dues au dépôt ou à l'érosion engendrée par les champs de courants. Le module *SED-2D* ne sera pas utilisé dans ce travail.

5. Construction du modèle hydrodynamique

La construction du modèle hydrodynamique consiste à introduire la géométrie du milieu (ou le relevé topographique des fonds), à discrétiser l'espace (maillage des lagunes), à définir les conditions initiales et les conditions aux limites (les frontières fermées, les différents rejets, les lieux d'échange, les communications avec la mer, etc.).

5.1.Importation de la bathymétrie dans SMS

Les données bathymétriques utilisées pour la construction du modèle hydrodynamique du clc sont inégalement réparties dans l'espace et dans le temps :

- les données bathymétriques du système Grand-Lahou proviennent du Port Autonome d'Abidjan (PAA, 1973), de Abé et *al.*, (1993) et de Wognin (2004) ;
- les données bathymétriques du système Ebrié sont issues des sondes réalisées par le PAA (Port Autonome d'Abidjan) de 1998 à 2000 et qui couvrent le bassin central et les baies

d'Abidjan. Les autres secteurs de la lagune (le chenal central Ouest et le chenal central Est) sont couverts par les données bathymétriques de Tastet (1974) ;

- pour le système Aby, deux cartes bathymétriques partielles sont disponibles. L'une donne le détail des parties Aby-Sud, Tendo et Ehy réalisées par la PETROCI (Société d'Opérations Pétrolières de Côte d'Ivoire) en 1982. La seconde réalisée par le PAA (Port Autonome d'Abidjan) en 1989, couvre les chenaux de la passe d'Assinie et la lagune Aby-Sud. Seule manquait la bathymétrie de la partie Aby-Nord du système lagunaire. Cette partie a été levée en septembre 2004 avec un échosondeur LOWRANCE, de type LMS-160-Global Map™ 1600 (**Photo 3**) disponible au CRE (Centre de Recherche en Ecologie) ;

- ces trois systèmes lagunaires sont reliés par les canaux d'Assagny et d'Assinie dont les profondeurs sont issues de sondes réalisées par le PAA en 1973.

L'introduction de la géométrie à l'échelle réelle et de la topographie du milieu s'est faite en important un fichier texte de bathymétrie sous format (x, y, z) des lagunes et des canaux. Le logiciel *WinDIG* a été utilisé pour digitaliser les minutes de sondes préalablement scannées sous format *bitmap*. Ce fichier *bitmap* est importé dans *WinDIG* où il sera géoréférencé ; puis manuellement les données seront numérisées. Pour chaque point de sonde, le logiciel donne les coordonnées x et y auxquels on ajoute la profondeur z. Au terme des travaux, on obtient un fichier texte de bathymétrie sous format xyz. Les **figures 18, 19, 20 et 21**, représentent les cartes de distribution des profondeurs des différents plans d'eau.

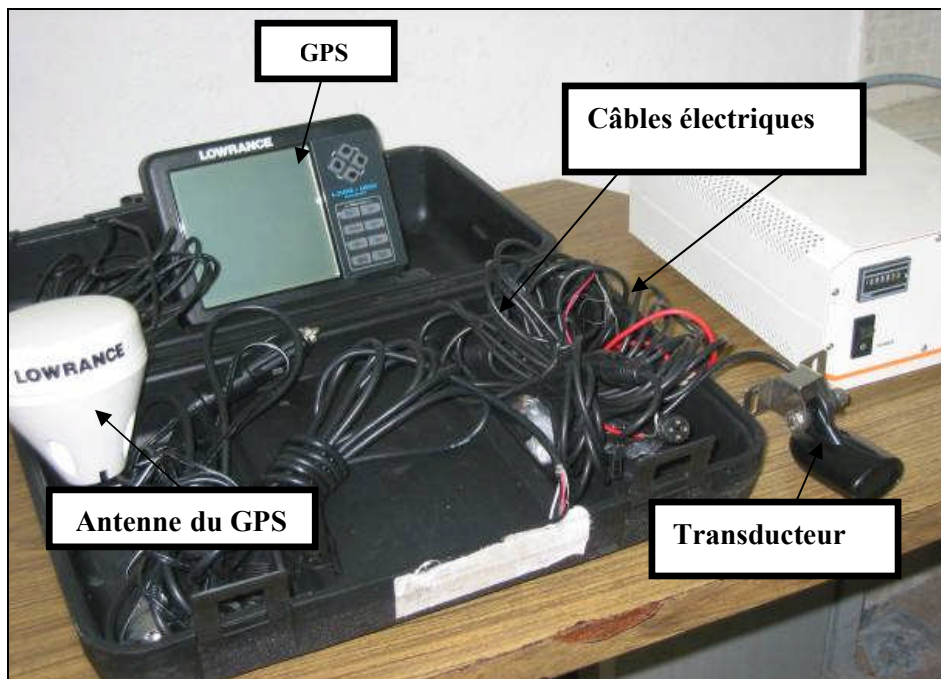


Photo 3 : L'échosondeur Lowrance Global Map™ 1600

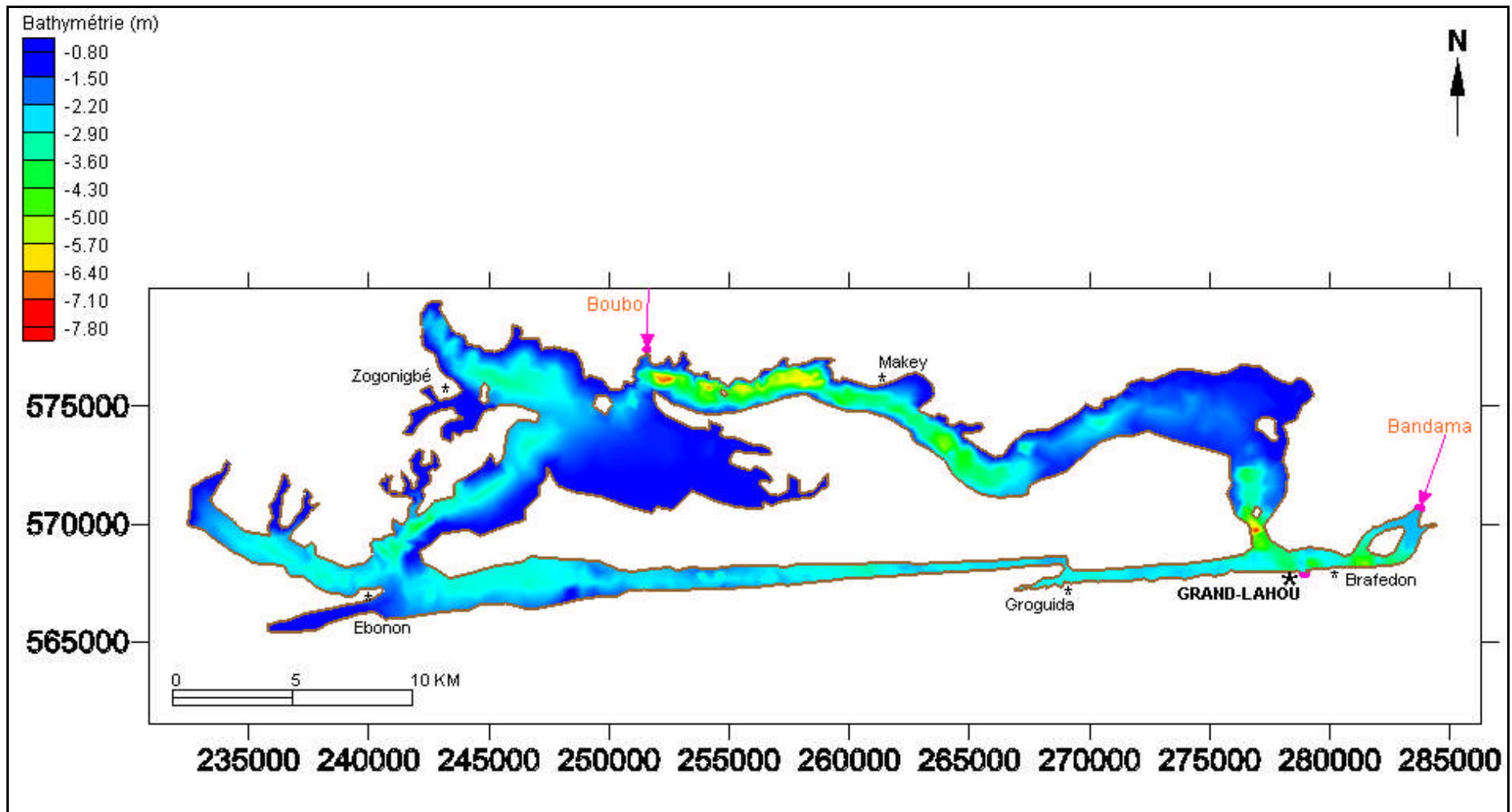


Figure 18 : Cartographie des fonds lagunaires du système Grand-Lahou

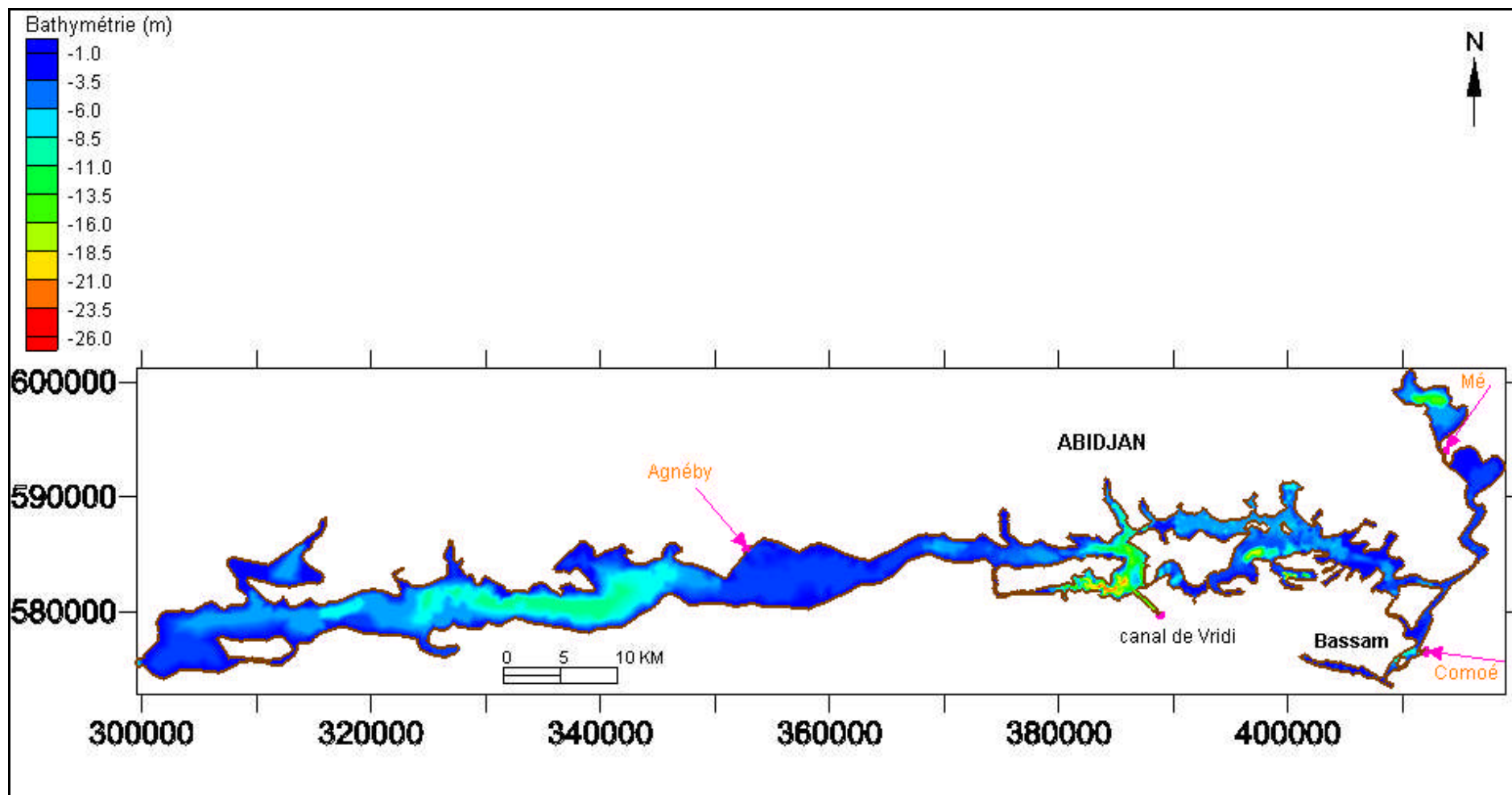


Figure 19 : Cartographie des fonds lagunaires du système Ebrié

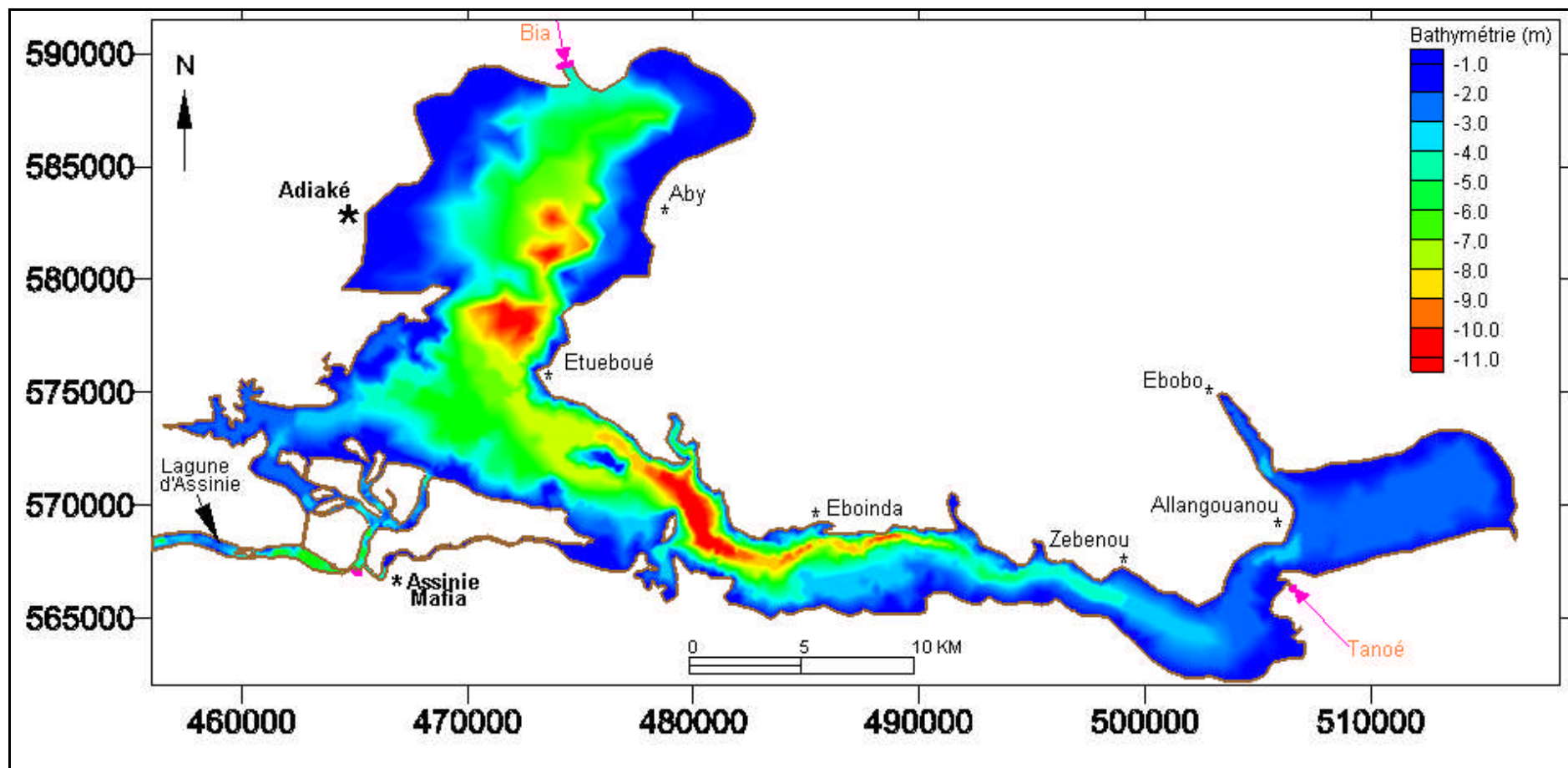


Figure 20 : Cartographie des fonds lagunaires du système Aby

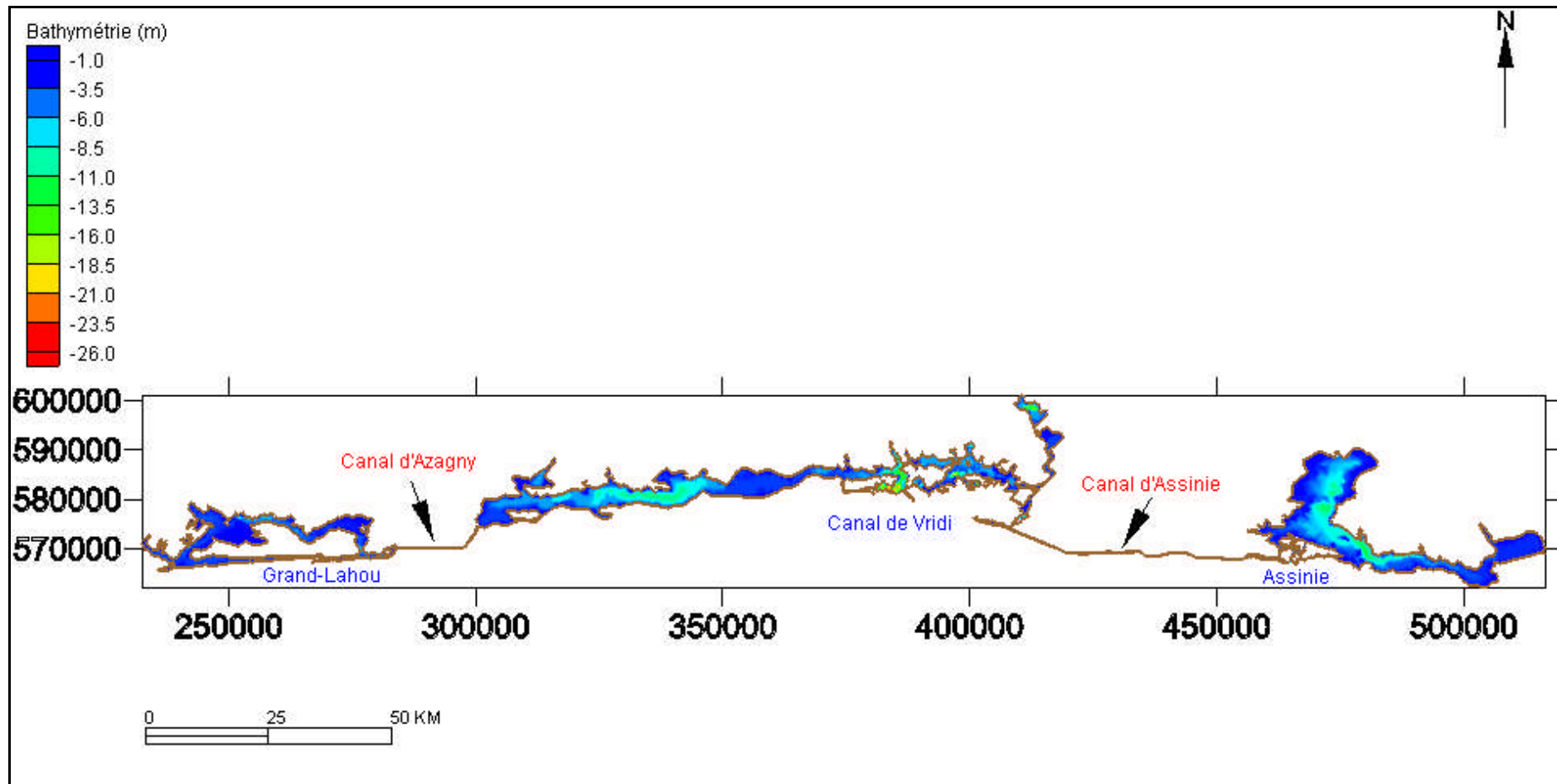


Figure 21 : Cartographie des fonds du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire

5.2. Discrétisation de l'espace : maillage des lagunes

La construction du modèle débute par l'introduction de la géométrie des plans d'eau. Les points bathymétriques (x, y, z) obtenus après digitalisations de cartes bathymétriques sont fournis au module *GFGEN* du logiciel *SMS* pour le maillage. Le plan d'eau lagunaire a été discrétisé en éléments triangulaires à trois nœuds. La taille des mailles a été choisie en fonction des critères morphologiques (bathymétrie et largeur des chenaux) et hydrologiques (passes et débouchés des fleuves en lagune).

Le maillage est affiné dans les embouchures et canaux étroits (50 mètres de côté) et au niveau des exutoires des fleuves (100 mètres de côté). Dans les zones lagunaires supposées "mortes" du point de vue hydrodynamique, la longueur des éléments atteint 500 mètres. Le **tableau V** présente le nombre d'éléments et de nœuds obtenu pour chaque système lagunaire et canal formant le complexe lagunaire. Le nombre de nœuds et d'éléments est fonction de la superficie à discrétiser :

- le système lagunaire Grand-Lahou qui est le plus petit (190 km²) de l'ensemble comporte 7286 nœuds et 3244 éléments ;
- le système lagunaire Ebrié avec une superficie de 566 km² présente 19200 nœuds et 8525 éléments ;
- le système lagunaire Aby d'une superficie de 424 km² présente 15582 nœuds et 7202 éléments.

Tableau V : Nombre d'éléments et de nœuds des systèmes lagunaires et des canaux

	Nombre d'éléments	Nombre de nœuds
Système Grand-Lahou	3244	7286
Système Ebrié	8525	19200
Système Aby	7202	15582
Canal d'Assagny et d'Assinie	581	1203

Les **figures 22, 23, et 24** représentent respectivement le maillage et les frontières ouvertes des systèmes lagunaires Grand-Lahou, Ebrié et Aby. En reliant ces systèmes lagunaires par les canaux d'Assagny et d'Assinie, on obtient le maillage du cdc discrétisé en 19552 éléments et 43271 nœuds. Les **figures 25 et 26**, représentent respectivement le maillage des canaux d'Assagny et d'Assinie. Le détail du maillage des zones estuariennes des systèmes lagunaires est présenté en **annexe B**.

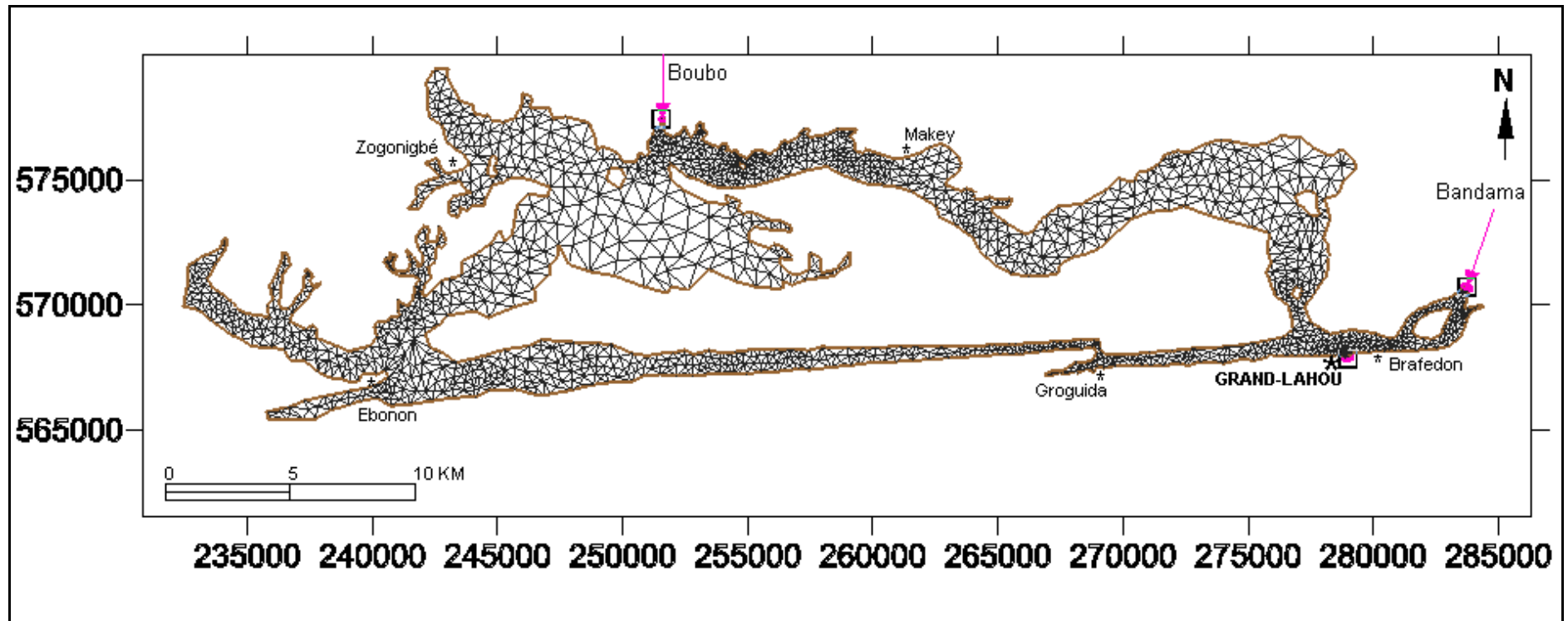


Figure 22 : Maillage du système lagunaire Grand-Lahou

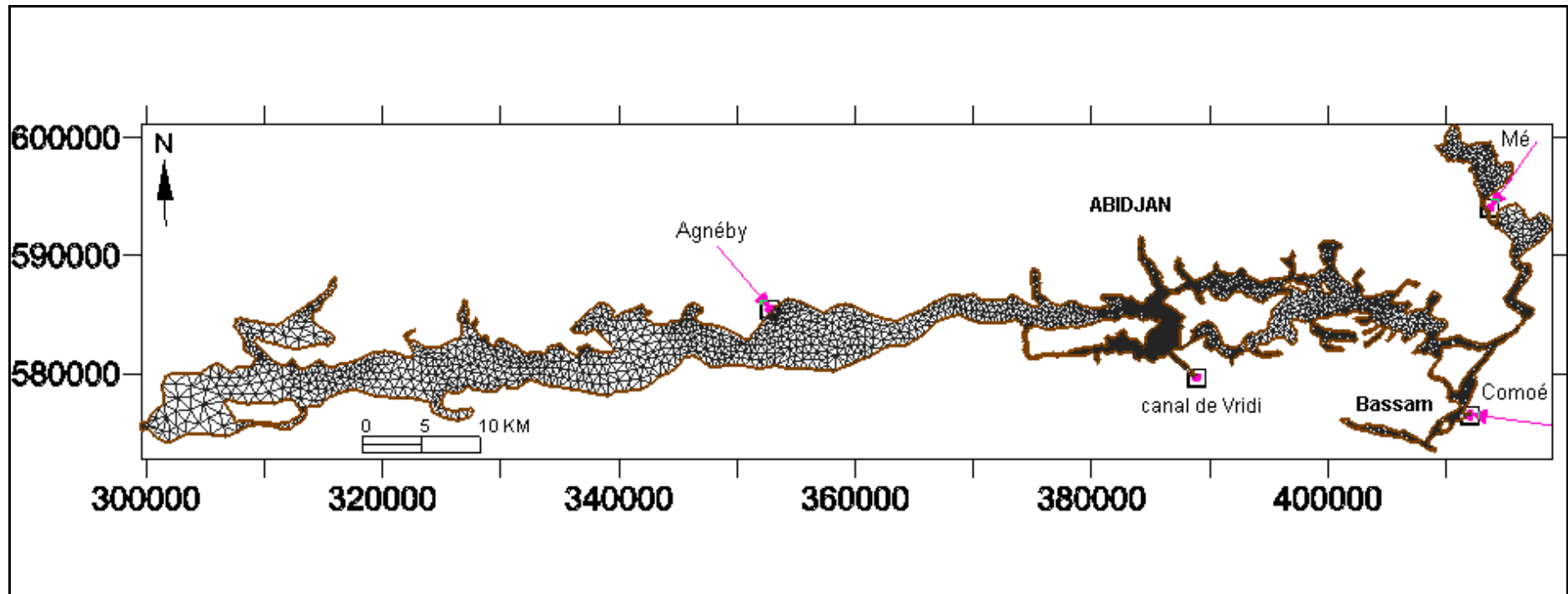


Figure 23 : Maillage du système lagunaire Ebré

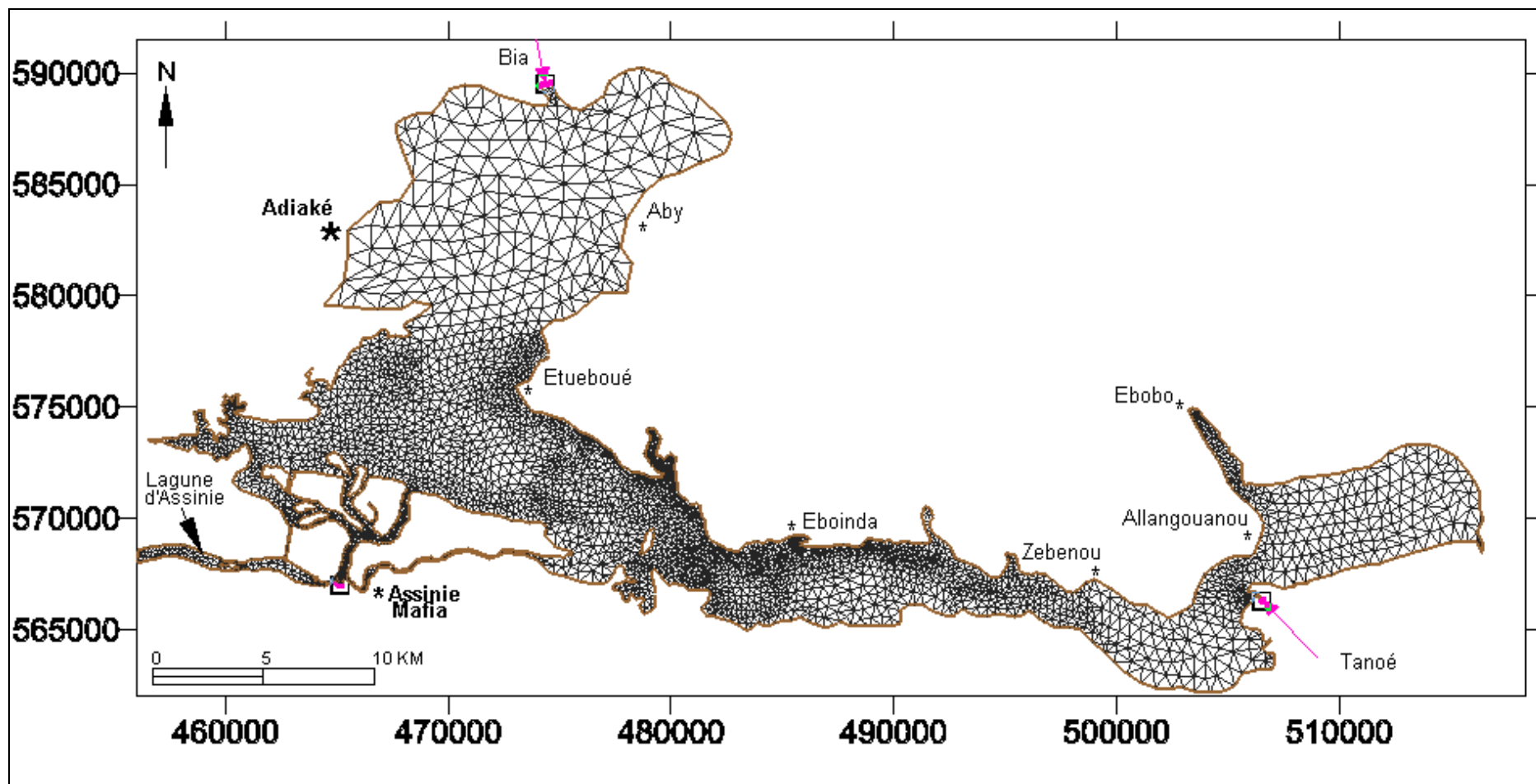


Figure 24 : Maillage du système lagunaire Aby

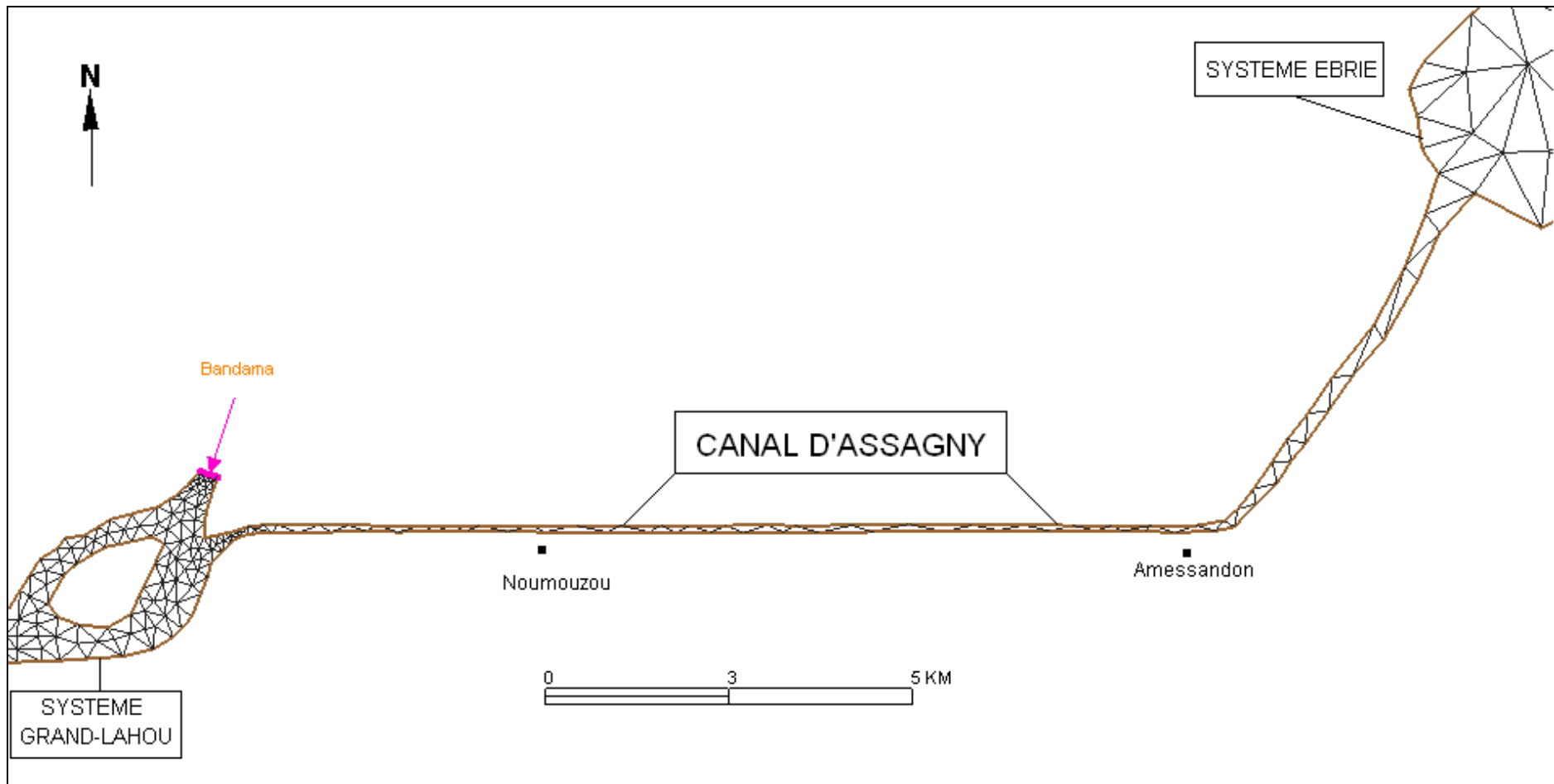


Figure 25 : Maillage du canal d'Assagny

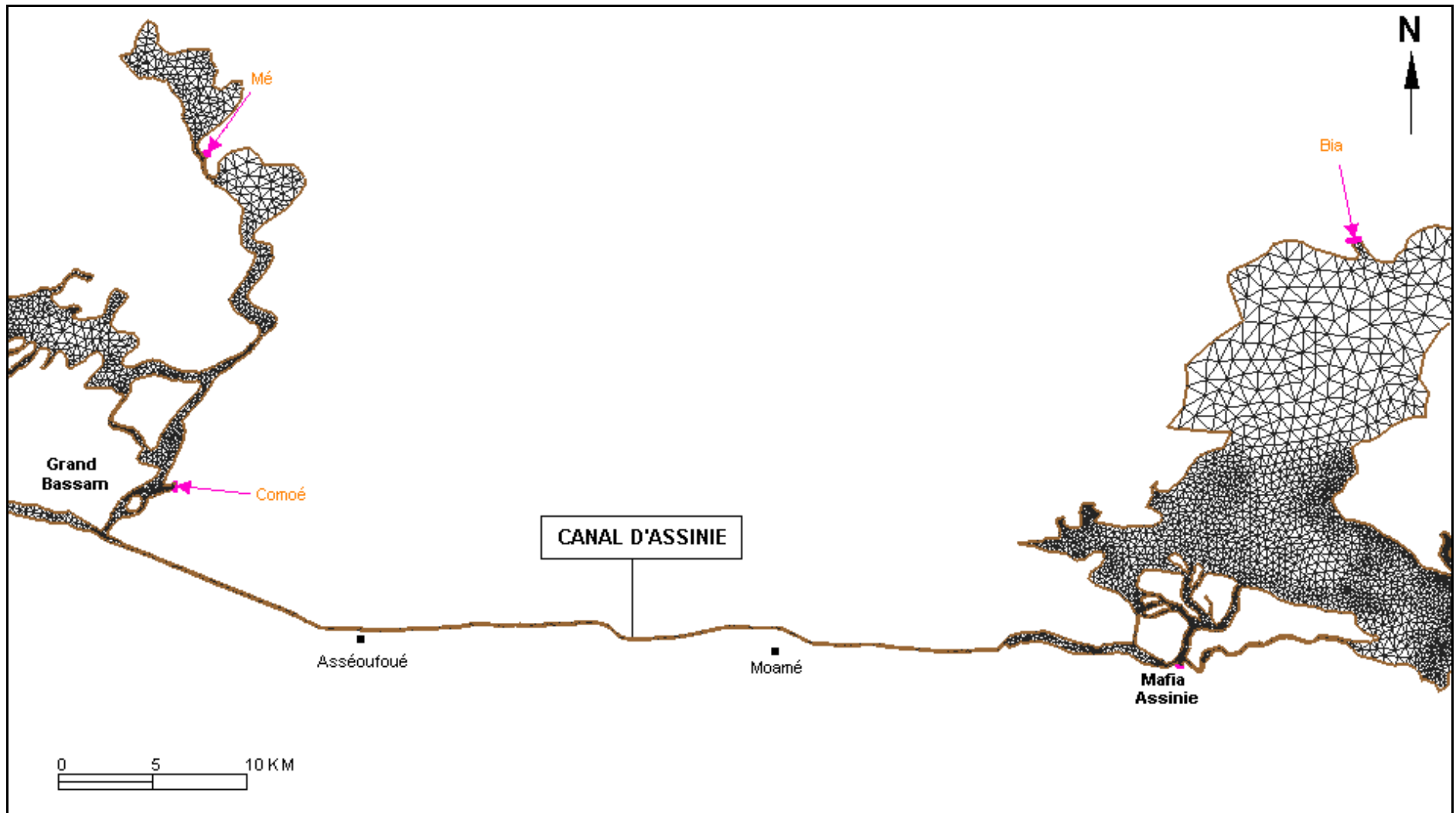


Figure 26 : Maillage du canal d'Assinie

5.3. Conditions initiales du modèle

Les conditions initiales définissent l'état du modèle au début de la simulation. L'état initial du modèle est tel que toutes les variables hydrodynamiques (hauteurs d'eau, courants horizontaux) sont mises à zéro partout dans le domaine. Ainsi à l'état initial, le système est supposé uniformément immobile (sans mouvement) et au niveau zéro.

5.4. Conditions aux limites du modèle

Il existe dans le logiciel *SMS* trois types de conditions aux limites du modèle :

- une condition à la limite amont : les débits des fleuves ;
- une condition à la limite aval : la marée ;
- une condition à la limite supérieure : le vent.

5.4.1. Condition à la limite amont : les débits fluviaux

Une condition de débits imposés aux exutoires des fleuves a été utilisée afin de reproduire les apports des cours d'eau en période d'étiage ou en période de crue dans les systèmes lagunaires. Le modèle possède sept limites fluviales principales. Les débits injectés à ces limites proviennent de plusieurs sources (**Tableau VI**) :

- les débits des fleuves Boubo, Bandama, Bia et Tanoé proviennent de la Direction de l'Hydrologie Humaine du Ministère des Infrastructures Economiques ;
- les débits des fleuves Agnéby, Mé et Comoé du Port Autonome d'Abidjan et Mondé (2004).

Tableau VI : Débits (m^3/s) imposés aux frontières fluviales du modèle

Systèmes lagunaires	Fleuves	Débit (m^3/s)	
		Période d'étiage	Période de crue
Grand-Lahou	Boubo	0,64	34,16
	Bandama	60	400
Ebrié	Agnéby	12,5	50
	Mé	12,5	50
	Comoé	5	550
Aby	Bia	1,68	59,7
	Tanoé	13,4	142

5.4.2. Condition à la limite aval : la marée

Le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire possède trois limites océaniques, le grau de Grand-Bassam étant fermé. Ce sont d'Ouest en Est :

- la passe de Grand-Lahou ;
- le canal artificiel de Vridi ;
- la passe d'Assinie.

La condition de niveau d'eau imposée à ces limites marines est celle de la variation temporelle du niveau d'eau par rapport au niveau moyen de la mer ou marée. Les données marégraphiques proviennent du SHOM (ou Service Hydrographique et Océanographique de la Marine Française) disponible en libre accès sur Internet (www.shom.fr).

Dans cette étude, nous avons utilisé une marée moyenne semi-diurne, d'une période de 12h25, avec un niveau moyen de 0,98 m et un marnage de 0,64 m (**Figure 27**). Le niveau de la marée a varié au maximum entre 1,27 et 0,63 m.

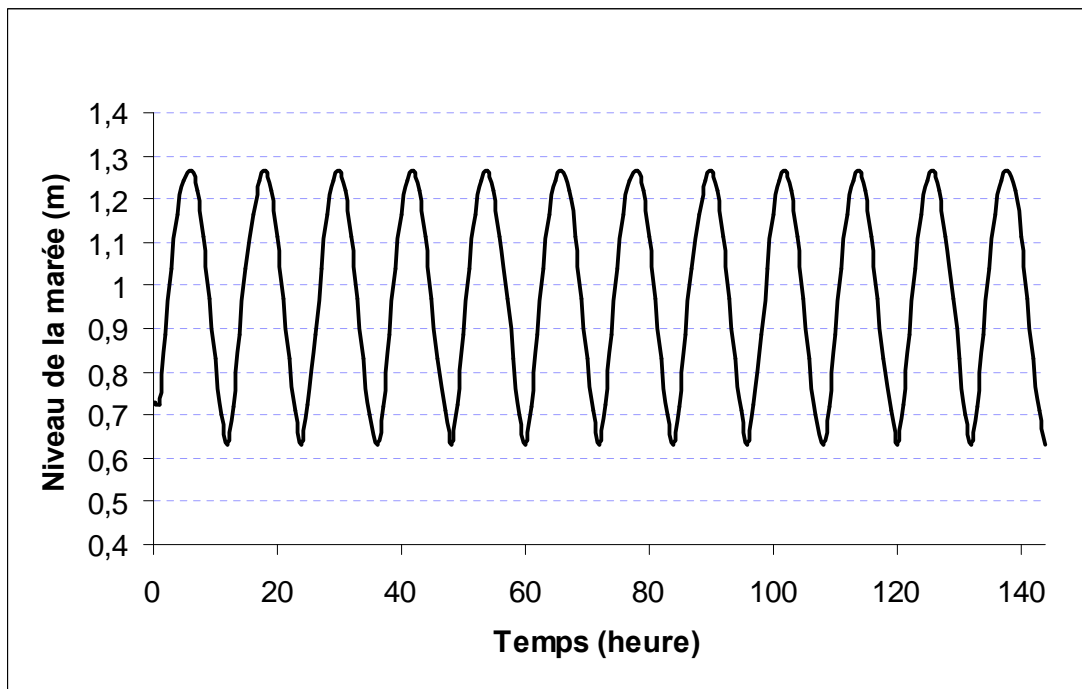


Figure 27 : Marée moyenne imposée aux frontières maritimes du modèle

5.4.3. Condition à la limite supérieure du modèle : le vent

Le logiciel *SMS* propose plusieurs formules différentes de calcul du cisaillement généré par le vent. La formule usuelle est la suivante :

$$T_s = \zeta \rho_a V_a^{\text{exp}}$$

Où :

- T_s : cisaillement du vent (g/cmsec^2) ;
- V_a : vitesse du vent (cm/sec) à 10 mètres au-dessus de la surface d'eau ;
- ρ_a : densité de l'air ($0,001226 \text{ g/cm}^3$) ;
- ζ : coefficient de cisaillement dû au vent ;
- exp : un exposant empirique.

Le coefficient d'influence du vent n'a pas été pris en compte, car le vent est non significatif (moins de 2 km/h) dans la zone d'étude (Ceda, 1997). En outre, le clc étant situé à proximité de l'équateur ($5^\circ 20'$ de latitude Nord), la force de Coriolis a été négligée, car son effet est très limité ($f=2.\omega.\sin\phi=1,27.10^{-5} \text{ s}^{-1}$) à l'équateur (Pouvreau, 2002). De plus, il est étiré d'Ouest en Est parallèlement à l'équateur.

Ces conditions initiales et aux limites seront utilisées lors du calage du modèle ainsi que pour les simulations du fonctionnement hydrodynamique du complexe lagunaire.

6. Calage du modèle hydrodynamique

Le calibrage d'un modèle est typiquement accompli par comparaison qualitative de courtes séries chronologiques de niveau d'eau ou de vitesses produites par le modèle numérique avec des données de terrain pour le même endroit et la même période (Cheng et *al.*, 1991 in Fernandes et *al.*, 1998). Dans le logiciel SMS, le calage consiste à la détermination du coefficient de rugosité du fond de Manning (n) et du coefficient de dispersion (E). La détermination de ces paramètres se fait par ajustement (ou test de sensibilité) jusqu'à l'obtention avec le modèle des données expérimentales de terrain (Fernandes et *al.*, 2001).

6.1. Test de sensibilité du modèle au coefficient de Manning (n)

Le frottement au fond est un paramètre important pour la propagation de la marée dans les lagunes. Le coefficient de rugosité du fond de Manning, (ou coefficient de Chézy, $C_h \approx 1/n$, ou encore le coefficient de Strickler, $K \approx 1/n$) décrit l'état du fond. Plus il est grand plus le milieu est rugueux et s'oppose ainsi plus à l'écoulement. Le test de sensibilité des résultats du modèle par rapport à la rugosité, exprimée par ce coefficient, a pour objectif de choisir et fixer la valeur du coefficient de Manning qui convient pour les simulations. Les valeurs de ce coefficient varient entre 0,02 et 0,1 $\text{m}^{-1/3}.\text{s}$ pour les milieux naturels (sms, 2003). Dans le test, l'état de rugosité du fond est supposé uniforme dans le système. Plusieurs valeurs de n ont été testées, mais seules sont retenues les valeurs de n pour lesquelles le modèle a convergé.

6.2. Test de sensibilité du modèle au coefficient de dispersion (E)

Le coefficient de dispersion (E) permet de contrôler la stabilité du schéma numérique de résolution mais surtout de décrire la perte d'énergie associée à la turbulence. Pour un milieu lagunaire à faible profondeur, le coefficient de dispersion E, varie de 1 à 50 m²/s. Plusieurs cas de dispersion ont été simulés et seules les valeurs de E pour lesquelles le modèle a convergé ont été retenues. Dans tout le système, la dispersion est supposée isotrope selon les deux directions de l'écoulement (soit $E = E_{xx} = E_{yy} = E_{xy} = E_{yx}$).

7. Simulations numériques

Après le choix des valeurs des paramètres de calage (n et E) du modèle, notre travail s'est orienté vers la simulation. Deux types de simulations ont été effectués pour différentes conditions de débits (étiage ou crue) des fleuves et de marée :

- une simulation du fonctionnement hydrodynamique ;
- une simulation de la dispersion du sel et de l'eau douce.

7.1. Simulation de l'hydrodynamique

Les paramètres de simulation utilisés pour le calage des modèles ainsi que pour le fonctionnement hydrodynamique sont :

- temps (ou durée) de la simulation : t=144 heures ;
- pas de temps : $\Delta t=900$ secondes ;
- précision des calculs itératifs : $\epsilon=0,001$ m ;
- nombre maximum d'itérations à chaque pas de temps : NMAX=20.

La simulation a duré 144 heures (soit 6 jours) afin d'aboutir à un régime permanent en raison de la grande inertie du système et de l'état initial. Les résultats des simulations gardés sont ceux obtenus entre 120h et 144h. Ils se résument en termes de :

- champs de courants. Ils sont obtenus à partir de la somme vectorielle des vitesses U et V, elles mêmes conséquences de l'effet conjugué des débits fluviaux, mais surtout de la marée. L'analyse des champs de courants dans les zones estuariennes du clc se fera sur un cycle de marée pm/bm/pm (**Figure 28**) ;
- variations du niveau de la surface d'eau. Des points seront choisis en fonction de la morphologie de chaque système lagunaire pour l'étude du retard et du déphasage de l'onde de marée lors de sa propagation en lagune. Une représentation en plan à pm et à bm permettra de visualiser la distribution spatiale du niveau de la surface d'eau ;

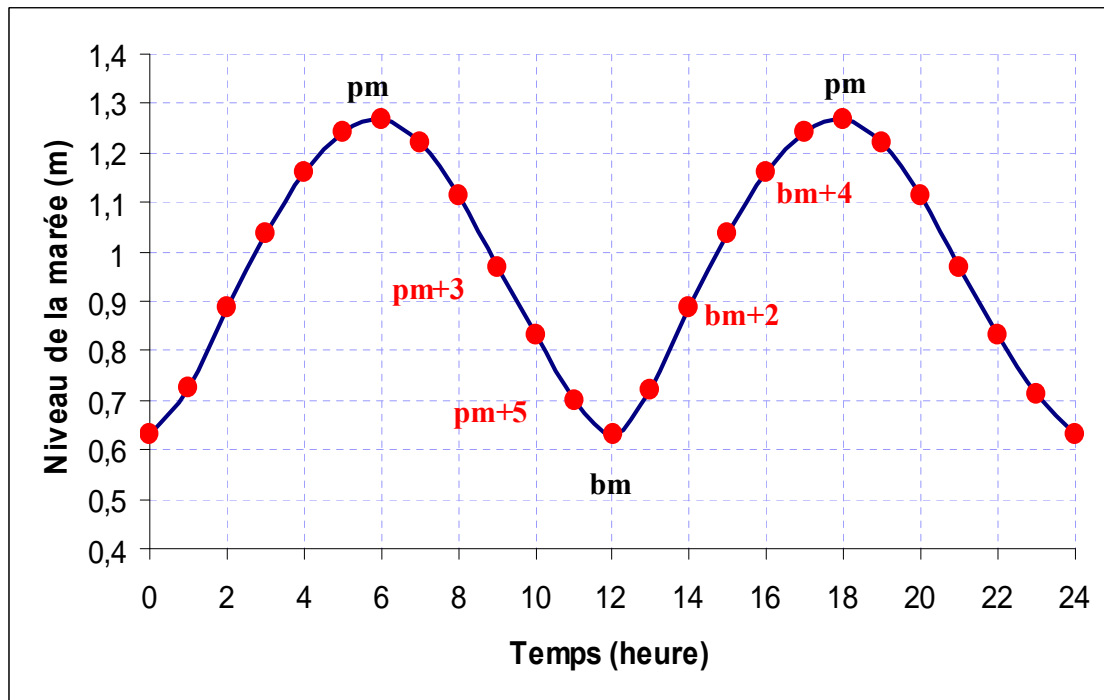


Figure 28 : Relation entre les heures de marée et l'évolution des champs de courants

- bilan de masses. Il s'agit de la variation des débits et des volumes échangés entre le milieu lagunaire et le milieu marin à l'échelle de la journée. Notons que le logiciel *SMS* calcule le débit et le volume d'eau en faisant la différence entre ce qui entre et ce qui sort. Par convention, les débits entrants sont comptés positifs (+) et les débits sortants négatifs (-) ;
- temps de renouvellement des eaux qui est le rapport du volume d'eau moyen de la lagune par le volume total sortant par jour du système (Jouini, 2003). C'est le temps nécessaire au remplacement des eaux de la lagune par des eaux en provenance de l'extérieur, dans notre cas, du golfe de Guinée et des sept fleuves (Boubo, Bandama, Agnéby, Mé, Comoé, Bia et Tanoé) débouchant dans le clc (Ranasinghe et Pattiaratchi, 1998 ; Koutitonsky et *al.*, 2004a).

7.2.Simulation de la dispersion du sel et l'eau douce

La propagation des eaux salées marines et des eaux douces des fleuves dans le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire peut être suivie en examinant l'évolution temporelle des concentrations.

Le traceur utilisé est la salinité qui constitue un excellent marqueur des masses d'eau douce. Il représente une grandeur physique passive ou inerte qui ne modifie pas l'écoulement et qui sert ainsi à des études de transport de contaminant : c'est une variable conservative.

Le traceur débité par les fleuves a une concentration en sel de 2 psu. Il s'agit d'eau douce. Au niveau des frontières ouvertes océaniques (Embouchure de Grand-Lahou, canal de Vridi et grau d'Assinie), le traceur a une concentration en sel de 35 psu, il s'agit d'eau salée. La concentration initiale (20 psu) est une salinité homogène sur tout le domaine. Le rejet des traceurs se fait en continu. Une hausse de la concentration en sel dans le clc indiquera une augmentation de la proportion des eaux du golfe de Guinée dans le complexe lagunaire tandis qu'une diminution montrera une augmentation de la proportion des eaux fluviales dans le clc.

Les paramètres de simulation du transport du sel ou de l'eau douce sont :

- la durée de la simulation : 720 heures (ou 1 mois) ;
- pas de temps : $\Delta t=3600$ s ;
- le coefficient de dispersion, D du traceur qui varie dans le logiciel *SMS* entre 0 et $10 \text{ m}^2/\text{s}$. Il a été fixé à $1 \text{ m}^2/\text{s}$ car il n'a pas d'influence notable sur le transport des traceurs.

Les résultats des simulations sont des représentations spatio-temporelles (diurne ou mensuelle) en plan de la concentration du traceur.

Conclusion

La profondeur moyenne du complexe lagunaire de la Côte d'Ivoire est faible (environ 4 m) par rapport aux dimensions horizontales (environ 300 km). Nous avons donc opté pour un modèle bidimensionnel intégré sur la verticale. Ce type de modèle hydrodynamique suppose une certaine homogénéité des variables sur la verticale. Le modèle numérique choisi pour la résolution des équations est le logiciel *SMS* (version 8.1). C'est un modèle 2D, qui utilise la méthode des éléments finis pour la résolution des équations hydrodynamiques et de transport. Il contient des modules pré-processeur (GFGEN), pour le maillage (construction des modèles), et des modules post-processeur (RMA2 et RMA4), pour le calage, les simulations et l'analyse des résultats.

CHAPITRE 3
RESULTATS, INTERPRETATION
& DISCUSSION

L'objet de ce chapitre est de présenter d'une part, les paramètres de calage du modèle hydrodynamique et d'autre part, les résultats des simulations du fonctionnement hydrodynamique et de la dispersion du sel et de l'eau douce.

1. Calage du modèle hydrodynamique du complexe lagunaire

Pour déterminer les paramètres de calage du modèle hydrodynamique du clc, nous avons procédé au calage de chaque système lagunaire composant le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire.

1.1. Calage du modèle hydrodynamique à l'embouchure de Grand-Lahou

1.1.1. Calage par comparaison des vitesses de courants

La marée imposée est celle du mardi 10 juillet 1993 (station de Grand-Lahou extrait du logiciel WxTide32 à accès libre sur Internet). La pleine mer a eu une amplitude de 1,2 m et la basse mer une amplitude de 0,3 m, soit un marnage de 0,90 m.

Les débits imposés aux limites fluviales du modèle sont :

- 73,3 m³/s pour le fleuve Bandama ;
- 16,1 m³/s pour le fleuve Boubo.

Il s'agit de débits moyens journaliers provenant du service de l'Hydrologie Humaine du Ministère des Infrastructures Economiques.

Les vitesses de courants utilisées pour le calage du modèle sont celles de Abé et *al.*, (1993). Les enregistrements ont été réalisés le 10 juillet 1993 au moyen d'un courantomètre de type Valeport BF008. Ce sont des mesures de courants de surface (**Tableau VII**).

Tableau VII : Vitesses résiduelles des courants mesurés en surface (Abé et *al.*, 1993)

Stations hydrologiques	Grand-Lahou	Embouchure Ouest	Bandama Nord
Vitesse (m/s)	0,061	0,374	0,045

La localisation géographique des stations de mesure de courants est présentée sur la **figure 29** :

- la station Grand-Lahou située à 300 m à l'Ouest de la passe de Grand-Lahou ;
- la station "Embouchure-Ouest" localisée dans l'axe du grau ;
- la station "Bandama-Nord" se situe à 2 km à l'Est de la passe.

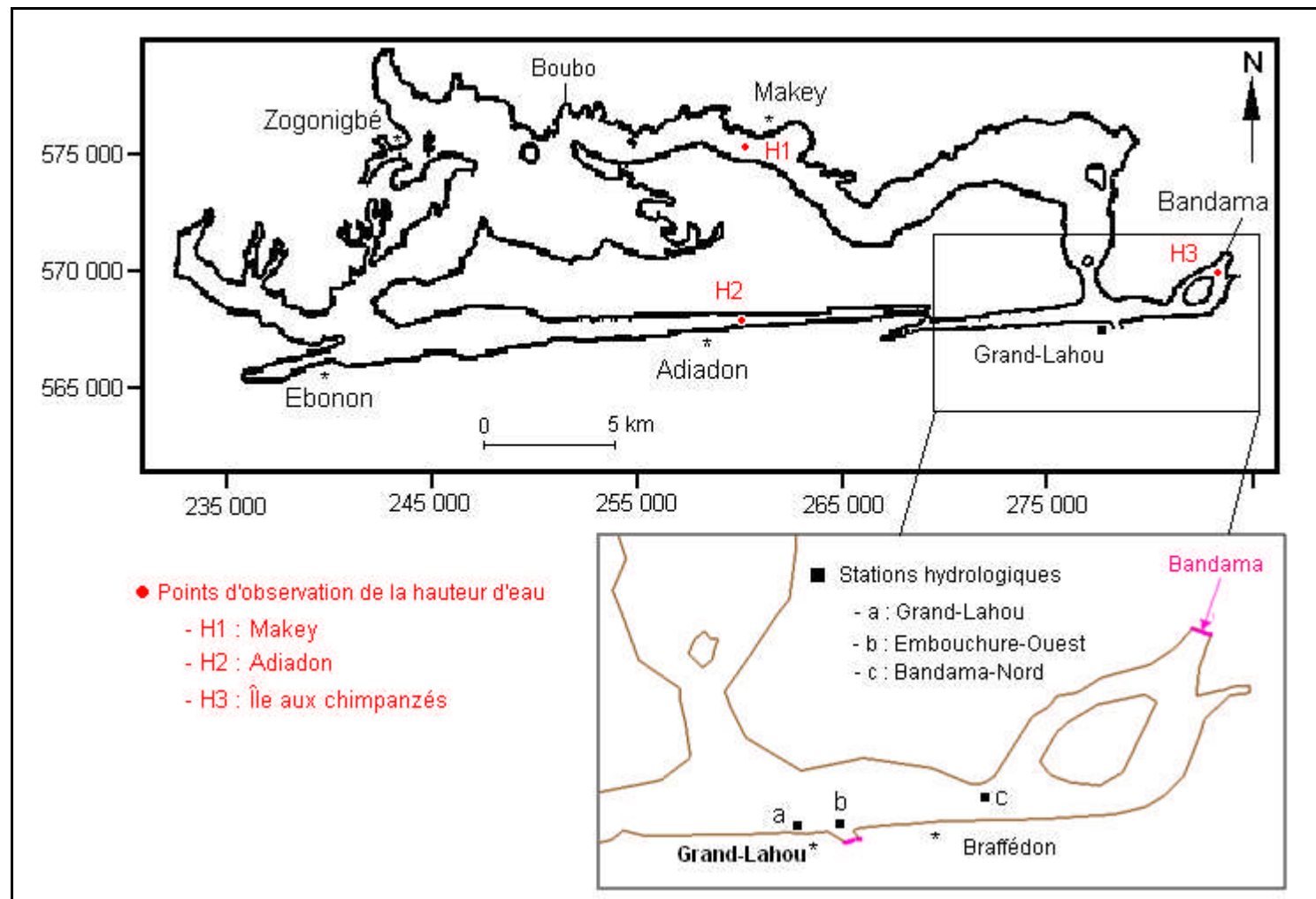


Figure 29 : Stations de mesure des vitesses de courants et points d'observation du niveau de la surface d'eau dans le système Grand-Lahou

1.1.2. Détermination du coefficient de Manning (n)

Pour un coefficient de dispersion E fixé à 20 m²/s, le modèle hydrodynamique a été lancé en faisant varier le coefficient de Manning (n). Les valeurs de n testées sont : 0,05 ; 0,06 et 0,075 m^{-1/3}.s. Les vitesses de courants simulées par le modèle sont comparées aux vitesses maximales de courants mesurées (**Tableau VIII**).

Tableau VIII : Evolution des vitesses maximales simulées et mesurées (E=20 m²/s) à Grand-Lahou

Stations	Mesures (m/s)	Modèle (m/s)		
		n=0,05 m ^{-1/3} .s	n=0,06 m ^{-1/3} .s	n=0,07 m ^{-1/3} .s
Grand-Lahou	0,061	0,179	0,149	0,130
Embouchure-Ouest	0,374	0,379	0,326	0,285
Bandama-Nord	0,045	0,037	0,037	0,037

La comparaison entre les vitesses maximales simulées et les vitesses de courants mesurées à chaque station montre :

- au niveau de la station de Grand-Lahou, l'écart entre le modèle et les mesures de terrain croît avec n. Cet écart est de 0,118 m/s pour n égal à 0,05 m^{-1/3}.s, de 0,088 m/s pour n fixé à 0,06 m^{-1/3}.s et de 0,069 m/s lorsque n est imposé à 0,07 m^{-1/3}.s. Le modèle surestime fortement les vitesses de courants en ce point ;
- pour la station de l'embouchure-Ouest, la vitesse simulée est 0,379 m/s soit un écart de l'ordre du millimètre (0,005 m/s) quand n est fixé à 0,05 m^{-1/3}.s. L'écart augmente quand n augmente. Il passe à 0,048 m/s avec n égal à 0,06 m^{-1/3}.s et à 0,089 m/s lorsque n égal à 0,07 m^{-1/3}.s ;
- à la station Bandama-Nord, la vitesse simulée par le modèle reste constante (0,037 m/s) pour les trois cas de rugosité testés. La différence entre le modèle et les observations de terrain est faible, de l'ordre de 0,008 m/s. Cette station Bandama est sous influence directe du fleuve Bandama qui débite un flux d'eau constant. C'est ce qui explique que les vitesses de courants soient constantes à cette station.

A l'analyse, il ressort que le coefficient de rugosité de Manning (n) qui permet d'approcher sensiblement les mesures de terrain est 0,05 m^{-1/3}.s (ou C_h≈20 m^{1/2}/s).

1.1.3. Détermination du coefficient de dispersion (E)

A partir du coefficient de rugosité (n) fixé précédemment à $0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, simulons un cas de dispersion, E égal à $30 \text{ m}^2/\text{s}$. Les vitesses calculées par le modèle aux différentes stations sont consignées dans le **tableau IX**.

Tableau IX : Evolution des vitesses simulées et mesurées ($n=0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$) à Grand-Lahou

Stations	Mesures (m/s)	Modèle (m/s)	
		E=20	E=30
Grand-Lahou	0,061	0,179	0,172
Embouchure-Ouest	0,374	0,379	0,374
Bandama-Nord	0,045	0,037	0,037

La comparaison des vitesses calculées par le modèle et de celles observées donne les résultats suivants :

- station Grand-Lahou : les vitesses simulées pour chaque valeur de E sont toujours plus élevées que la vitesse mesurée (0,061 m/s). Les vitesses et le coefficient de dispersion évoluent inversement ;
- station Embouchure-Ouest : la vitesse simulée par le modèle est égale à la vitesse mesurée (0,374 m/s) pour un coefficient de dispersion $E=30 \text{ m}^2/\text{s}$;
- station Bandama-Nord : la vitesse de courant n'a pas variée (0,037 m/s). Le modèle sous-estime de 0,008 m/s la vitesse de courant mesurée.

Le modèle donne une bonne représentation des vitesses de courants mesurées aux stations Embouchure-Ouest et Bandama-Nord. En effet, la vitesse simulée à l'Embouchure-Ouest est identique à celle mesurée (0,037 m/s). Au niveau de la station Bandama-Nord, la différence entre modèle et mesure est de l'ordre du millimètre (0,008 m/s).

Au terme de ces tests de sensibilité du modèle hydrodynamique du système lagunaire de Grand-Lahou au coefficient de Manning et au coefficient de dispersion, les paramètres de calage retenus sont :

- n égal à $0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ($C_h \approx 20 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) ;
- E égal à $30 \text{ m}^2/\text{s}$.

1.2. Calage du modèle hydrodynamique dans le bassin central du système Ebrié

1.2.1. Mesures des hauteurs d'eau disponibles

Les données collectées pour le calage sont des hauteurs d'eau mesurées en février par un capteur appelé *OBS-3A* (ou *Optical Backscatter Sensor*). Le capteur subit une pression qui est la somme de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique. En supposant que la pression atmosphérique est constante, les variations de pressions mesurées sont alors liées aux variations de pressions hydrostatiques (Mondé, 2004). On en déduit le marnage au point de mesure de l'*OBS-3A* (**Figure 30**).

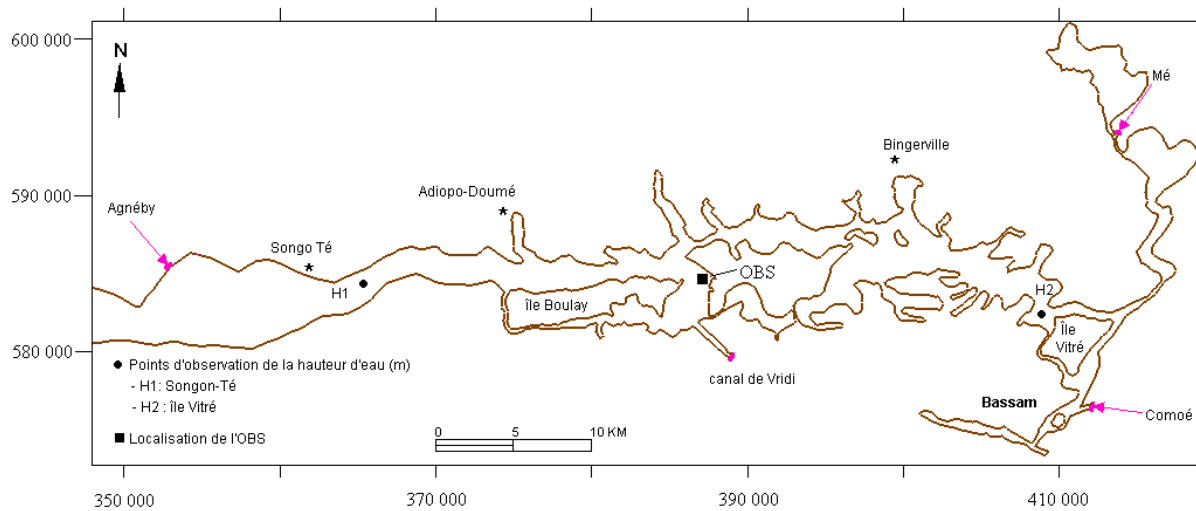


Figure 30 : Localisation de l'*OBS-3A* et des points d'observation du niveau de la surface d'eau dans le système Ebrié

La variation de niveau de la surface d'eau mesurée par l'*OBS-3A* couvre le cycle pleine mer/basse mer de la marée (**Figure 31**). Elle montre deux pleines mers et deux basses mers par jour. Les hauteurs d'eau présentent de fortes irrégularités dues à la présence de l'onde diurne. La première haute mer, sous influence des ondes diurnes a un marnage de 0,58 m supérieur à la pleine mer suivante (0,39 m).

La variation du niveau de la surface d'eau mesurée peut être décomposée en quatre (4) périodes :

- de 0h à 3h30, on observe un flux (ou flot) qui correspond à une montée du niveau due à l'arrivée de la marée. Le niveau maximum (1,24 m) est atteint à 3h30 ;
- de 3h30 à 10h15, c'est le reflux (ou jusant). La surface d'eau redescend jusqu'à son plus bas niveau (0,66 m) à 10h15 ;

- un deuxième flux intervient entre 10h30 et 16h15 au cours duquel, on constate la montée progressive du niveau des eaux dans la lagune jusqu'à un niveau maximal (1,19 m) à 16h15 ;
- à partir de 16h30, le niveau baisse à nouveau pour atteindre 0,81 m aux environs de 22h15.

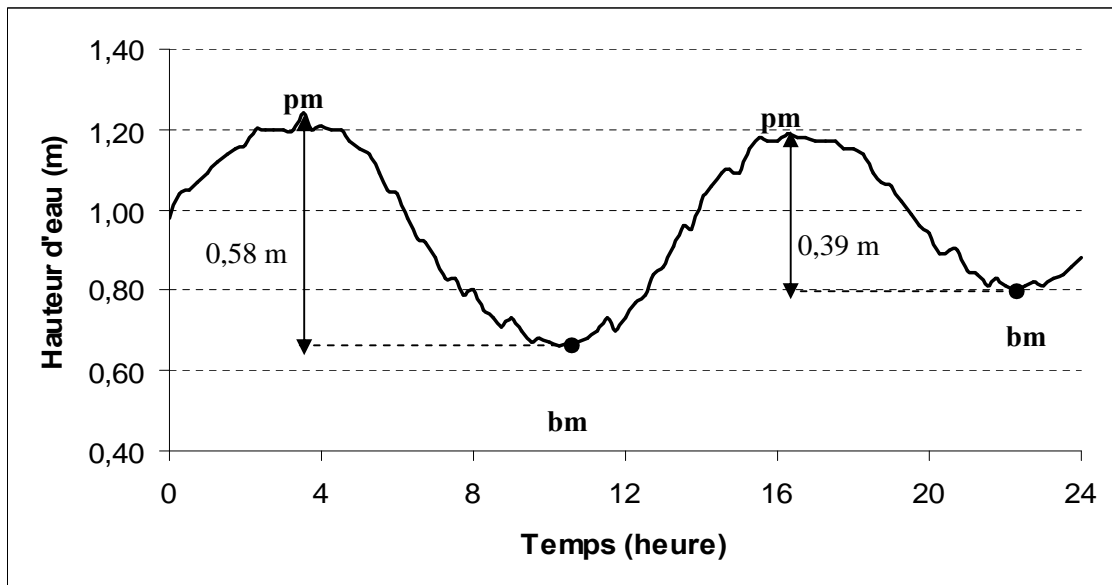


Figure 31 : Variation temporelle du niveau de la surface d'eau mesurée par l'OBS-3A

L'analyse de la variation du niveau de la surface d'eau révèle le caractère semi-diurne et l'inégalité diurne de l'onde de marée. Le niveau atteint à la seconde pleine mer (1,19 m) est inférieur à celui de la pleine mer précédente (1,24 m). On observe le processus contraire pour les basses mers. Le niveau de la première basse mer se situe à 0,66 m et celui de la seconde basse mer à 0,81 m.

1.2.2. Détermination du coefficient de Manning (n)

Deux cas de rugosité ($n=0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ et $n=0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$) ont été simulés avec un coefficient de dispersion égal à $10 \text{ m}^2/\text{s}$. Le niveau de la surface d'eau simulé par le modèle pour les deux cas de rugosité ($0,03$ et $0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$) est représenté sur la **figure 32**.

Pour le choix du coefficient de rugosité n , nous avons utilisé la méthode de corrélation qui permettra de comparer les hauteurs d'eau prédites et les hauteurs d'eau mesurées et l'erreur *RMS* (ou *Root Mean Squared Error*) qui va mesurer le degré d'erreur entre les niveaux d'eau simulés et les niveaux d'eau mesurés. Cette erreur est calculée par la formule

suivante :
$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_c - h_o)_i^2}$$
 où n est l'effectif de la série, h la hauteur d'eau calculée

par le modèle et h_o la hauteur d'eau observée.

Le modèle sous-estime les hauteurs des pleines mers et surestime celles des basses mers. On note une bonne corrélation ($r=0,99$) entre les deux séries aussi bien pour n égal à $0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ que pour n égale à $0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$. Cependant pour n égal à $0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, l'erreur *RMS* est égale à $0,001 \text{ m}$ alors que pour n fixé à $0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, elle est de $0,002 \text{ m}$. De plus, le marnage calculé est $0,51 \text{ m}$ pour n égal $0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ contre un marnage de $0,48 \text{ m}$ pour n égal à $0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$. Le marnage mesuré par l'*OBS-3A* étant égal à $0,58 \text{ m}$.

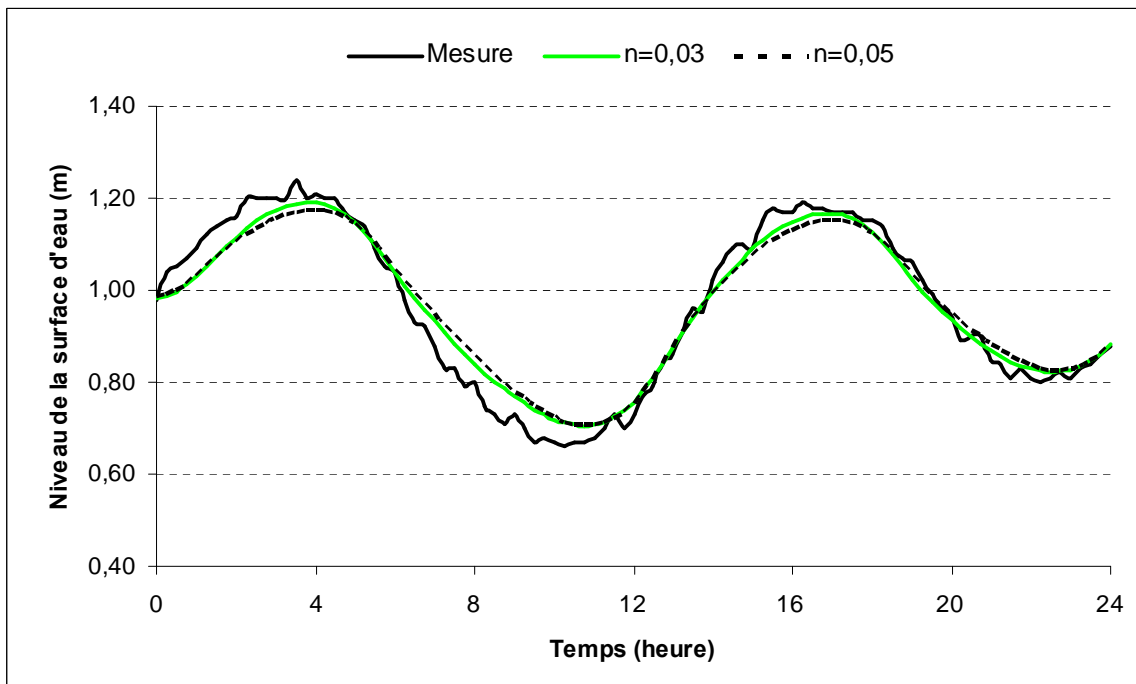


Figure 32 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés (avec $E=10 \text{ m}^2/\text{s}$)

Ainsi, le coefficient de rugosité de Manning (n) choisi est $0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ (ou $C_h \approx 33 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$). Il est sensiblement différent du coefficient de Strickler ($K=45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) utilisé par Ramany (1979) et Mondé (2004).

1.2.3. Détermination du coefficient de dispersion (E)

Après le choix du coefficient de rugosité ($n=0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$), nous avons simulé un cas de dispersion élevé, soit $E=50 \text{ m}^2/\text{s}$ tout en gardant n égal à $0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$. La **figure 33** présente les hauteurs d'eau simulées par le modèle avec E égal à $50 \text{ m}^2/\text{s}$ et à $10 \text{ m}^2/\text{s}$. La corrélation entre les prédictions et les mesures reste toujours forte ($r=0,99$). Cependant, l'erreur *RMS* devient plus importante ($0,003 \text{ m}$) avec E égal $50 \text{ m}^2/\text{s}$. En outre, le marnage est passé de $0,51 \text{ m}$ avec $E=10 \text{ m}^2/\text{s}$ à $0,41 \text{ m}$ avec $E=50 \text{ m}^2/\text{s}$. Le coefficient de dispersion E fixé à l'issue de ce test est donc $10 \text{ m}^2/\text{s}$.

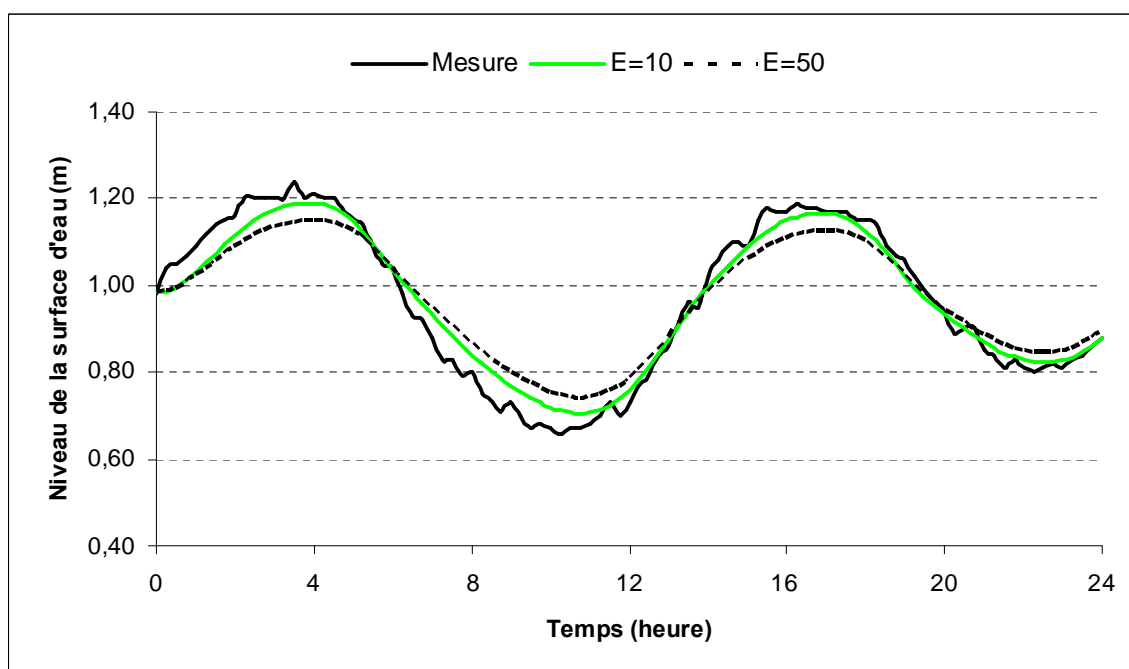


Figure 33 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés (avec $n=0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)

Les paramètres de calage qui conviennent pour les simulations du système lagunaire Ebrié sont n égal à $0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ($C_h \approx 33 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) et E égal à $10 \text{ m}^2/\text{s}$.

1.3. Calage du modèle hydrodynamique dans le chenal central d'Assinie

1.3.1. Calage par analyse des courants de chenaux

Nous avons utilisé des mesures horaires de vitesses en surface effectuées à poste fixe dans le chenal principal de la passe d'Assinie pour le calage du modèle hydrodynamique. Ces mesures (**Tableau X**) ont été réalisées pendant les crues du mois d'octobre, en vive-eau à l'aide d'un courantomètre Valport de type BF008 (Abé et *al.*, 1996).

Tableau X : Vitesses maximales des courants de surface dans le chenal d'Assinie (Abé et *al.*, 1996)

Stations hydrologiques :	Assinie-Est	Assinie-Ouest	Assinie-Sud
Vitesse (m/s)	0,834	0,978	0,923

La station Assinie-Sud est localisée à l'entrée de la passe. Les deux autres stations sont situées plus au Nord, après la confluence des bras lagunaires entre l'île Esso et le village d'Assinie-Mafia (**Figure 34**).

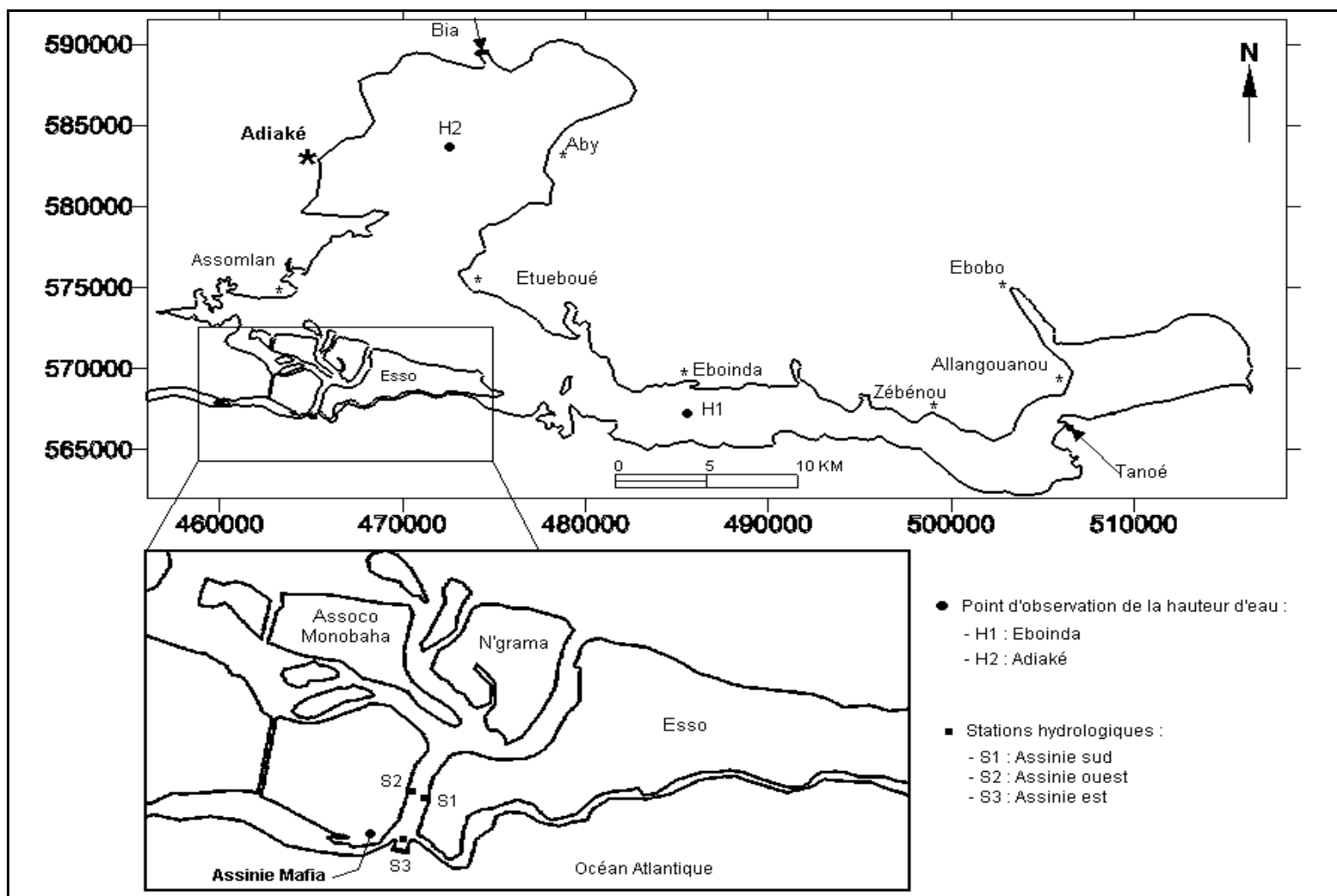


Figure 34 : Stations de mesure des vitesses de courants et points d'observation du niveau de la surface d'eau dans le système Aby

1.3.2. Détermination du coefficient de Manning (n)

Avec un coefficient de dispersion (E) fixé à 5 m²/s, trois cas de rugosité (n) ont été testés : n=0,035, n=0,04 et n=0,05 m^{-1/3}.s. Les vitesses prédites par le modèle sont comparées avec celles mesurées par Abé et *al.*, (1996) dans le **tableau XI**.

Tableau XI : Vitesses simulées et mesurées (E=5 m²/s) dans le chenal central d'Assinie

Stations	Mesures (m/s)	Modèle (m/s)		
		n=0,035	n=0,04	n=0,05
Assinie-Est	0,834	0,943	0,788	0,581
Assinie-Ouest	0,978	1,069	0,965	0,804
Assinie-Sud	0,923	1,046	0,950	0,804

Il ressort de l'analyse du tableau XI que :

- pour n égal à 0,035 m^{-1/3}.s, les vitesses de courant calculées par le modèle sont supérieures à celles mesurées au niveau des trois stations. L'écart est de l'ordre de 0,109 m/s à Assinie-Est, de 0,091 m/s à Assinie-Ouest et de 0,123 m/s à Assinie-Sud ;
- avec n fixé à 0,04 m^{-1/3}.s, les écarts entre le modèle et les mesures *in situ* s'amenuisent : 0,046 m/s à Assinie-Est, 0,013 m/s à Assinie-Ouest et 0,027 m/s à Assinie-Sud ;
- dans le cas de n égal à 0,05 m^{-1/3}.s, le modèle sous-estime fortement les vitesses de terrain.

Les écarts entre les prédictions et les mesures sont plus importants. Ils sont de 0,581, 0,174 et de 0,119 m/s respectivement aux stations Assinie-Est, Assinie-Ouest et Assinie-Sud.

A l'issue de cette comparaison entre vitesses simulées et vitesses mesurées, le coefficient de rugosité retenue après ce premier test est n égal à 0,04 m^{-1/3}.s (ou C_h = 25 m^{1/2}/s).

1.3.3. Détermination du coefficient de dispersion(E)

Une fois le coefficient de rugosité fixé à la valeur de 0,04 m^{-1/3}/s, nous avons simulé deux cas de dispersion : E=5 m²/s et E=20 m²/s. Les vitesses calculées par le modèle et celles mesurées sont présentées dans le **tableau XII**. Les vitesses obtenues avec E égal à 20 m²/s sont plus faibles au niveau des stations Assinie-Est et Assinie-Ouest et plus élevées au niveau de la station Assinie-Sud que celles observées avec E=5 m²/s.

Tableau XII : Vitesses simulées et mesurées ($n=0,04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$) dans le chenal central d'Assinie

	Mesures (m/s)	Modèle (m/s)	
		E=5	E=20
Station Assinie-Est	0,834	0,788	0,755
Station Assinie-Ouest	0,978	0,965	0,944
Station Assinie-Sud	0,923	0,950	0,980

Les tests de sensibilité du coefficient de rugosité (n) et du coefficient qui permettent une bonne reproductibilité des vitesses de courants dans le chenal central d'Assinie sont : n égal à $0,04 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$ ($C_h \approx 25 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) et E égal à $5 \text{ m}^2/\text{s}$.

Discussion

Les différents tests de sensibilité du modèle hydrodynamique au coefficient de Manning (n) et au coefficient de dispersion (E) ont permis d'avoir un bon accord entre les résultats numériques et analytiques. Cependant, on note quelques différences entre les prédictions des modèles et les mesures de terrain. Celles-ci peuvent s'expliquer par plusieurs limitations : la précision du signal de marée, à l'absence de liens entre les coefficients de Manning utilisés pour le calage et la rugosité du fond, la résolution des mailles, la bathymétrie interpolée et utilisée dans le modèle, les fluctuations météorologiques (coup de vent, les variations locales de la pression atmosphérique, etc...).

2. Simulations hydrodynamiques du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire

Les simulations ont été réalisées pour une marée moyenne de marnage $0,64 \text{ m}$ et pour différentes conditions de débits (étiage ou crue). Le modèle a permis de simuler simultanément le fonctionnement hydrodynamique des systèmes lagunaires de Grand-Lahou, d'Ebrié et d'Aby ainsi que le transport du sel et de l'eau douce. La présentation des résultats des simulations se fera au niveau de chaque système lagunaire. Une attention particulière sera accordée aux zones estuariennes des lagunes dans la présentation et l'analyse des résultats des simulations.

2.1. Fonctionnement hydrodynamique du système Grand-Lahou

2.1.1. Fonctionnement en période d'étiage

2.1.1.1. Champs de courants en étiage

La distribution des champs de courants en période d'étiage à l'embouchure de Grand-Lahou est représentée sur la **figure 35**. Les zones "en blanc" sur les figures signifient que les vitesses de courants sont nulles à ces endroits. Le suivi du mouvement des masses d'eau en fonction des heures de marée couvre le cycle tidal pm/bm/pm :

- de pm à pm+2, le mouvement des masses d'eaux se fait du plateau continental vers le système lagunaire. A pm, c'est le maximum de flot. Les masses d'eau qui pénètrent en lagune prennent deux directions principales. Une partie évolue vers le chenal situé à l'Ouest du grau de Grand-Lahou, et l'autre partie emprunte le chenal situé au Nord de la passe. Dans le secteur à l'Est de Braffédon, les vitesses de courants sont nulles. Les champs de vitesses se limitent à l'entrée du fleuve Bandama au Nord de l'île aux chimpanzés ;
- les courants de flot se renversent à pm+3 à Grand-Lahou, c'est le début du jusant qui va atteindre son maximum à bm et durer jusqu'à bm+2. Les masses d'eau se dirigent vers le plateau continental. A l'Est de Grand-Lahou, les courants de marée ne s'opposent plus aux courants fluviaux du Bandama, d'où l'apparition de champs de courants autour de l'île aux chimpanzés ;
- les masses d'eau évoluent de nouveau vers le système lagunaire à partir de bm+3. Elles vont suivre les mêmes directions que lors de la précédente phase de flot, c'est-à-dire évoluées vers les chenaux Ouest et Nord tout en s'opposant aux courants fluviaux qui descendent du fleuve Bandama. Le maximum de remplissage interviendra à pm.

Sur le cycle de marée pm/bm/pm, le flot et le jusant ont eu la même durée à Grand-Lahou, soit 5h. La vitesse maximale de remplissage est simulée à pm, tandis que la vitesse de vidange est simulée à bm.

La visualisation des champs de courants au maximum de flot (pm) dans tout le système lagunaire montre que les courants de marée en période d'étiage atteignent la lagune Tadio à l'Ouest de l'exutoire du fleuve Boubo et la lagune Nyouzoumou entre Groguida et Ebonon (**Figure 36**).

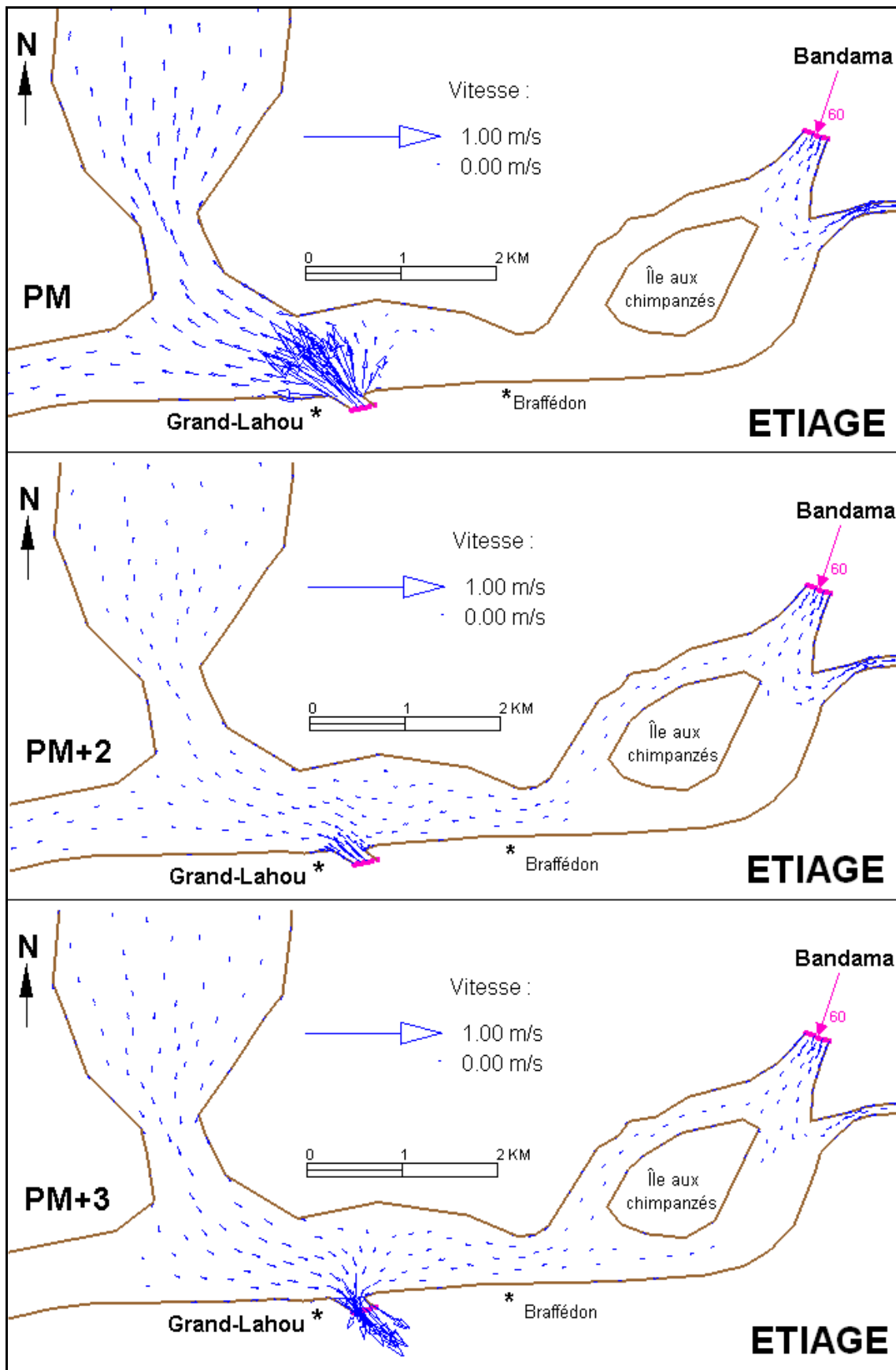


Figure 35a : Champs de courants à Grand-Lahou en étiage et à pm, pm+2, pm+3

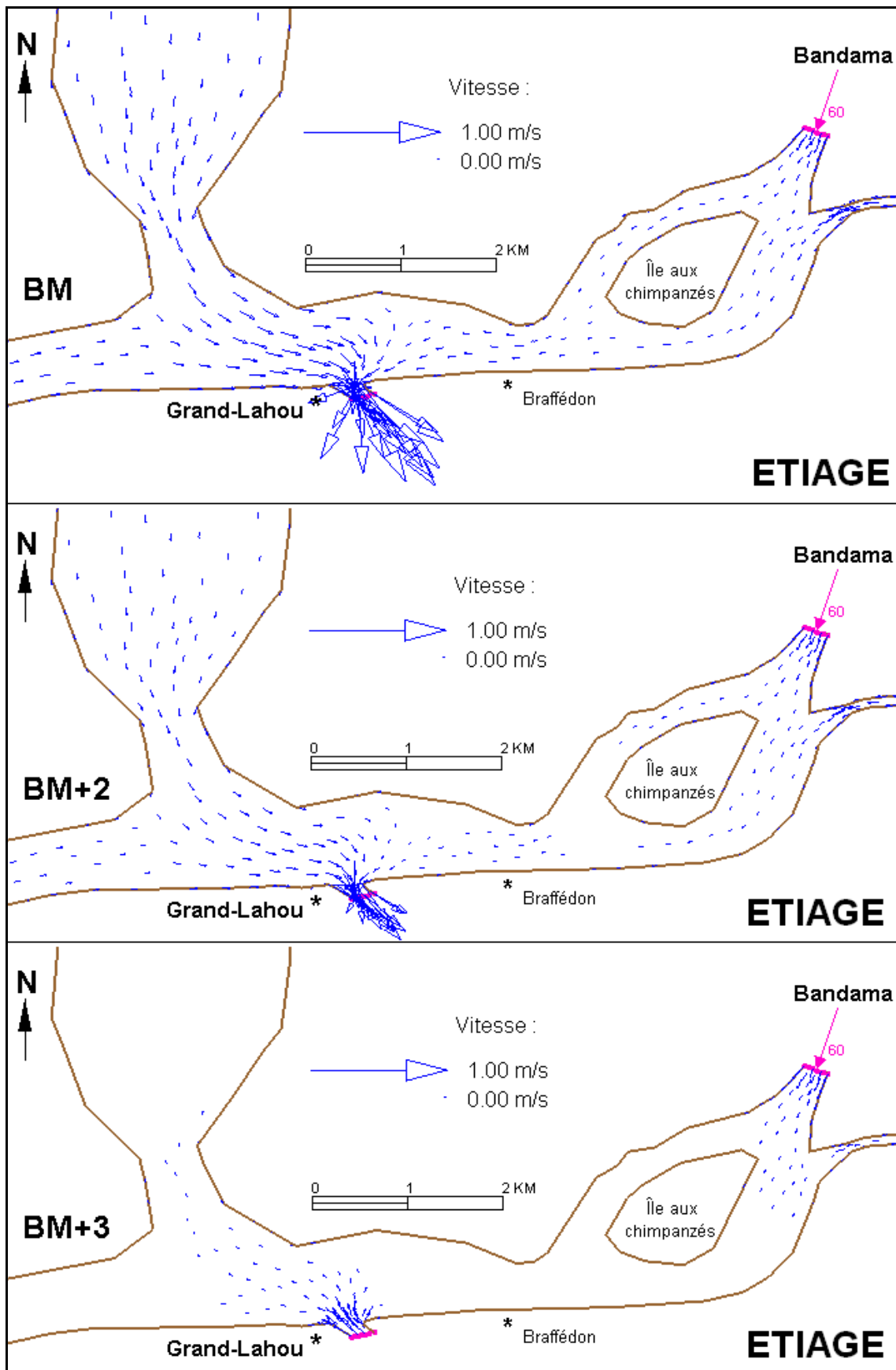


Figure 35b : Champs de courants à Grand-Lahou en étiage et à bm, bm+2, bm+3

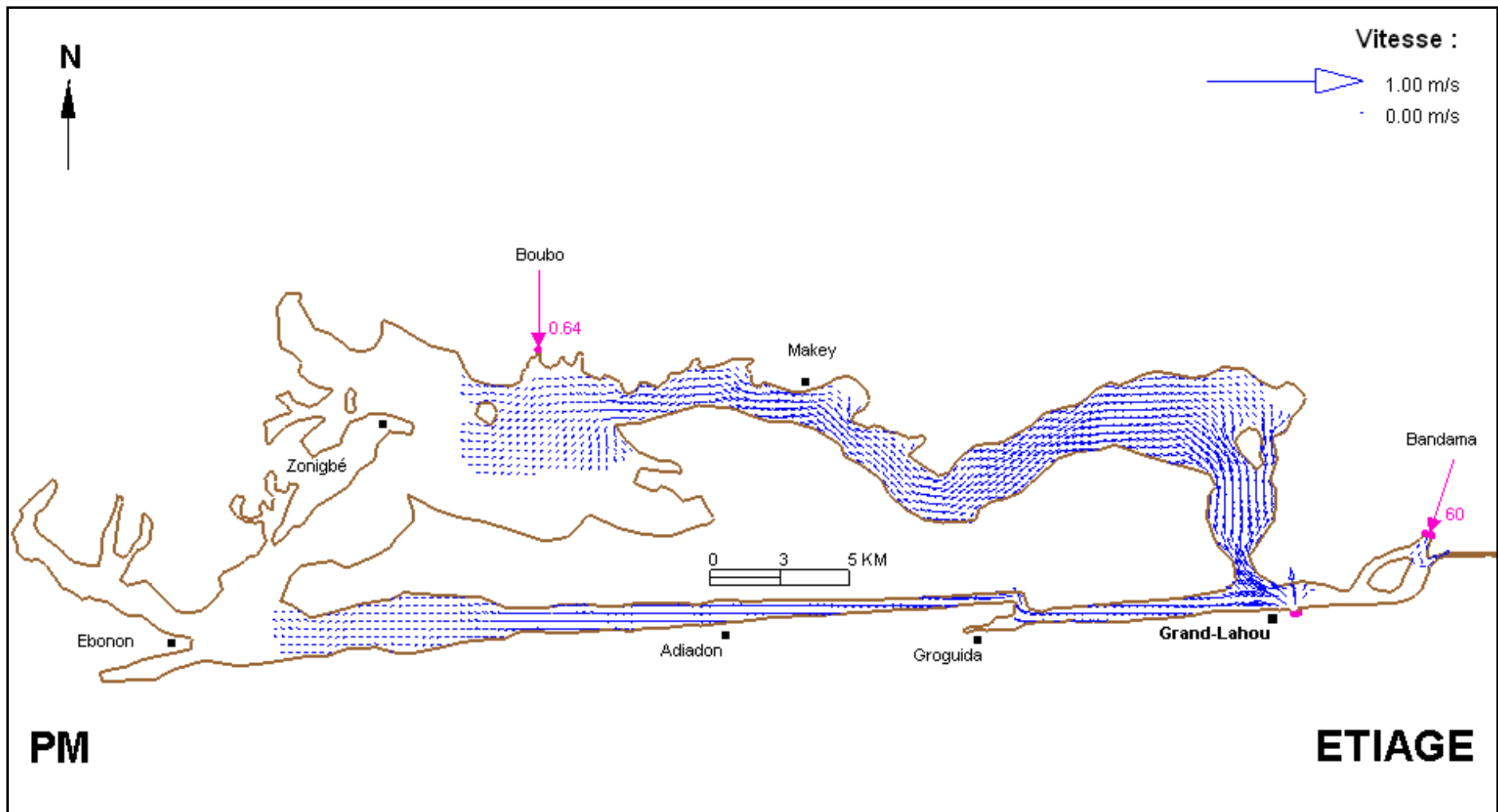


Figure 36 : Champs de courants dans le système Grand-Lahou en étiage et à pm

2.1.1.2. Variation du niveau de la surface d'eau en étiage

Trois points sont choisis en fonction de la morphologie pour analyser l'amplification et le déphasage de l'onde de marée lors de sa propagation en lagune (Figure 29, page 66). La marée de référence est celle introduite à Grand-Lahou. Sur la **figure 37**, on présente l'évolution temporelle des niveaux d'eau dans le système Grand-Lahou :

- à la confluence entre l'île aux chimpanzés et l'exutoire du fleuve Bandama, la surface d'eau a varié entre 0,93 et 1,18 m. On en déduit un marnage de 0,25 m. La pleine mer arrive en ce point à 6h30, soit avec un retard de 15 mn (ou $\frac{1}{4}$ d'heure) par rapport à la pleine mer à Grand-Lahou. Le flot et le jusant ont duré respectivement 5h et 6h30 ;
- à Adiadon, le niveau d'eau a oscillé entre 1,02 et 1,07 m, ce qui correspond à un marnage de 0,05 m. Le jusant a duré 7h30 et le flot 5h. La pleine se produit à 8h, soit 2h après la pleine mer à l'embouchure ;
- à Makey, le marnage est de 0,07 m, car le niveau de la surface d'eau a atteint un niveau maximal de 1,08 m et la basse mer un niveau minimal de 1,01 m. La pleine mer se produit à Makey à 8h30, ce qui équivaut à un retard de 2h30 par rapport à la pleine mer à Grand-Lahou. Le flot et le jusant ont duré respectivement 5h et 7h30.

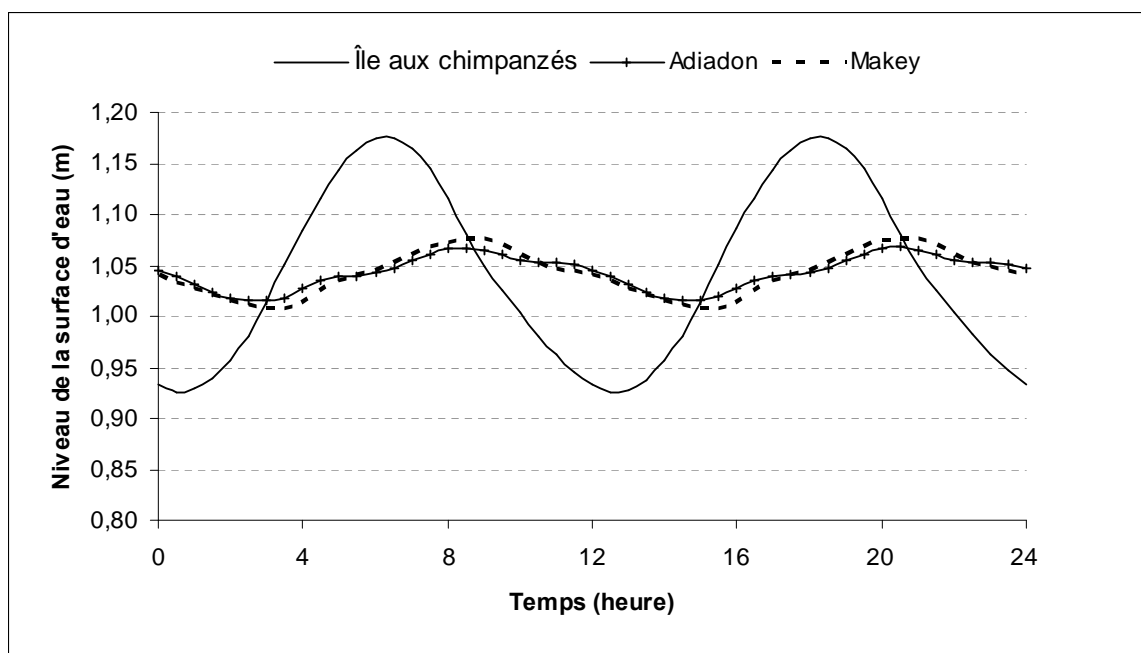


Figure 37 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Grand-Lahou en étiage

La représentation en plan à pm et à bm, montre que les variations sont plus importantes à l'embouchure de Grand-Lahou que partout ailleurs dans la lagune (**Figure 38**). Le niveau de la surface d'eau a atteint 1,27 et 0,54 m respectivement à pm et à bm à l'embouchure de Grand-Lahou.

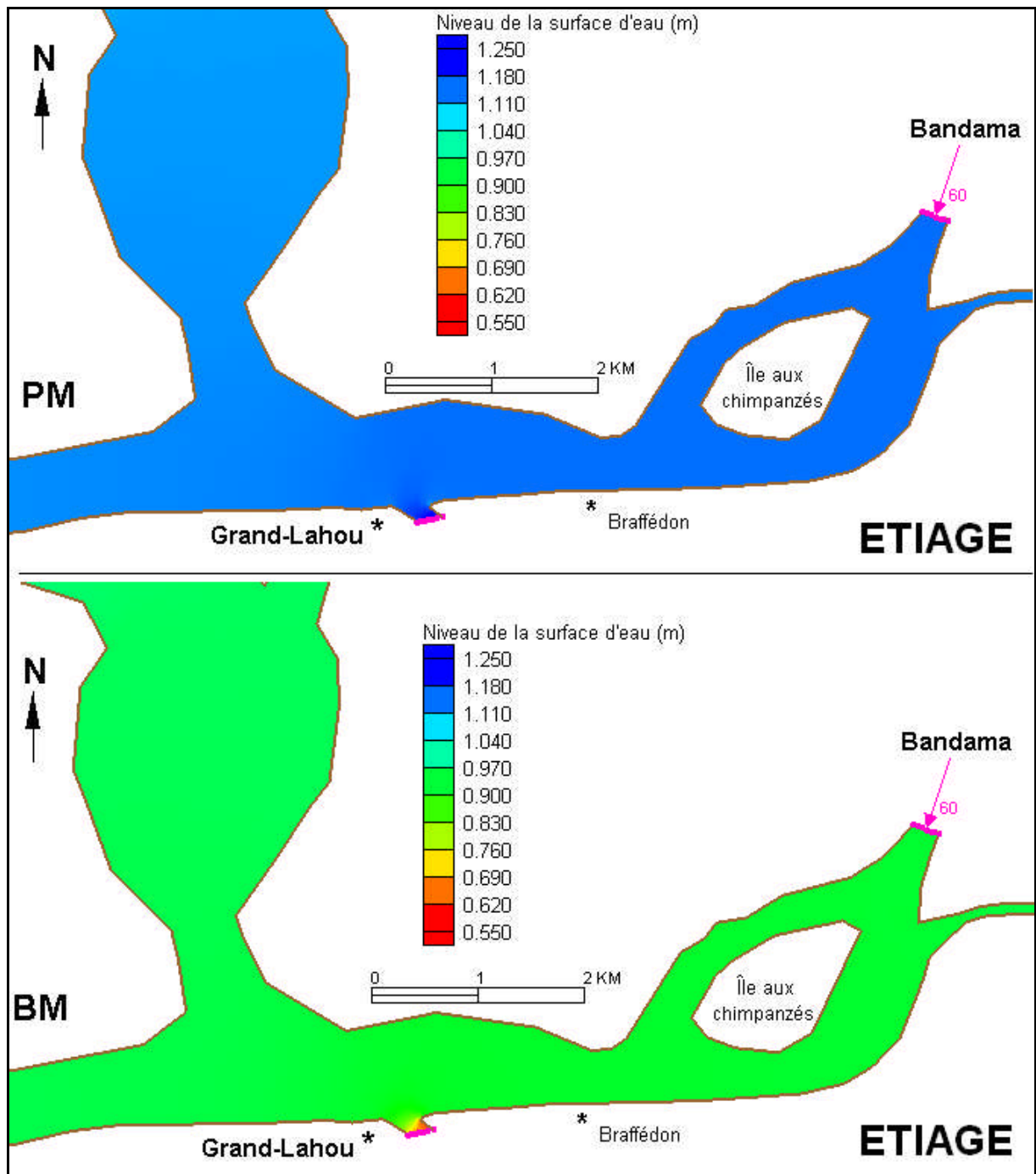


Figure 38 : Niveau de la surface d'eau à l'embouchure de Grand-Lahou en étiage

2.1.1.3. Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en étiage

Les évolutions temporelles de débits et volumes d'eau échangés entre le système lagunaire et la mer sont représentées respectivement sur les **figures 39** et **40**. Les débits à Grand-Lahou ont variés au maximum entre $+935 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit entrant au maximum de flot) et $-900 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit sortant au maximum de jusant) en 24 heures. En moyennant à l'échelle de la journée ces débits instantanés, on obtient un débit résiduel faible de l'ordre $-70 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit sortant).

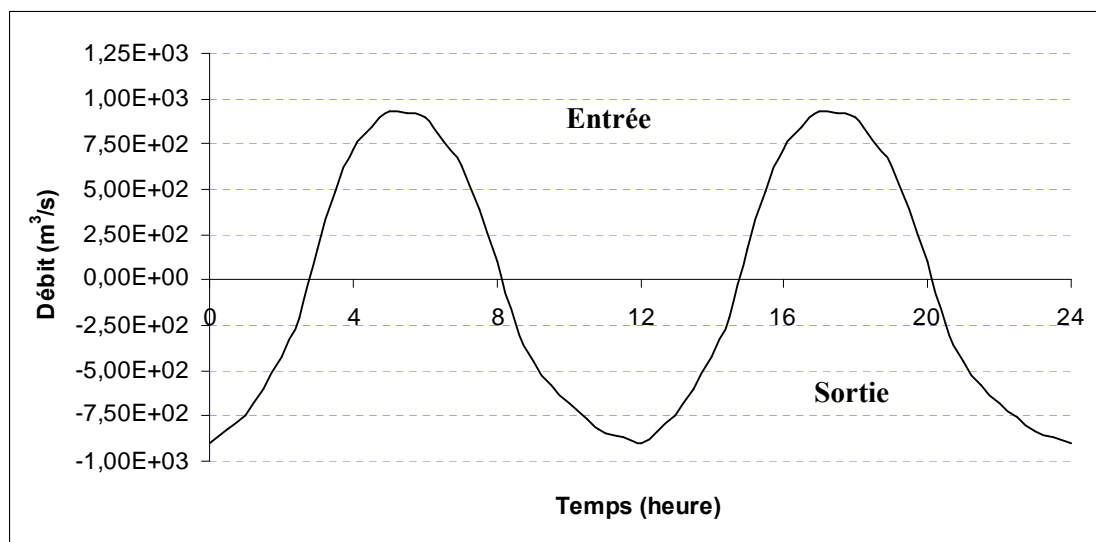


Figure 39 : Evolution temporelle des débits à Grand-Lahou en période d'étiage

Le volume moyen d'eau de la lagune ($5,79 \cdot 10^8 \text{ m}^3$) a atteint au maximum de flot $5,86 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ et au maximum de jusant $5,73 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, soit une variation de $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sur un cycle de marée (12h) ou un volume de $26 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 24 heures (**Figure 40**). Le temps de renouvellement moyen des eaux est alors de 22,3 jours.

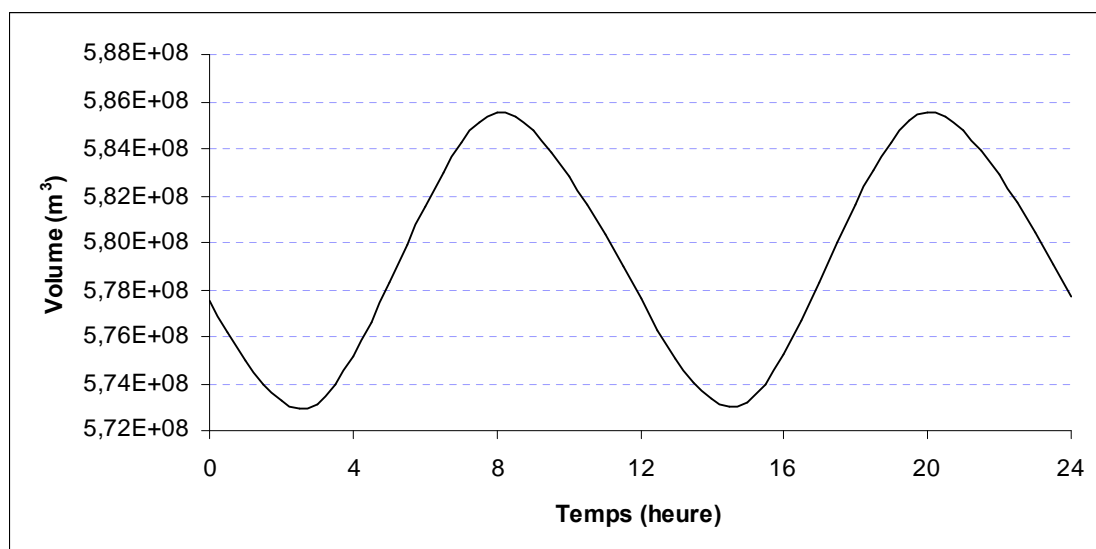


Figure 40 : Evolution temporelle des volumes à Grand-Lahou en période d'étiage

2.1.2. Fonctionnement en période de crue

2.1.2.1. Champs de courants en crue

L'évolution des vitesses en période de crue à l'embouchure de Grand-Lahou au cours du cycle tidal est illustrée par les cartes de champs de courants (**Figure 41**). A l'analyse, il ressort que :

- de la pm à pm+1, les courants de marée pénètrent par la passe de Grand-Lahou. Les masses d'eau qui pénètrent en lagune sont repoussées vers l'Ouest par les courants fluviaux qui affluent du Bandama ;
- la renverse des courants de flot intervient à pm+2 durant la crue au lieu de pm+3 en période d'étiage (**Figure 35a, page 77**). C'est le début du jusant à Grand-Lahou qui va atteindre son maximum à bm. En ce moment, tous les courants dans le système sont dirigés vers la mer : c'est la vidange maximale. Les courants de jusant vont ensuite faiblir progressivement entre la bm et la bm+3 et céder le pas aux courants de flot à bm+4 ;
- les courants de flot qui reprennent le relais à bm+4 au lieu de bm+3 en période d'étiage atteindront leur maximum à pm.

La circulation des masses d'eau en période de crue autour de l'île aux chimpanzés est différente de celle observée en période d'étiage. En effet, on note la présence de champs de courants quelle que soit l'heure de la marée durant la crue. En revanche, en étiage, les champs de courants n'apparaissent qu'au maximum de jusant (à bm) dans cette zone. Comme en étiage, les courants de marée atteignent la lagune Tadio (à l'Ouest du fleuve Boubo) en période de crue (**Figure 42**). La lagune Nyouzoumou qui ne reçoit aucun apport fluvial, la circulation des masses d'eau en crue est la même qu'en étiage. Les champs de courants sont visibles à pm entre Groguida et Ebonon.

Les courants de jusant ont été plus forts que les courants de flot en période de crue. De plus, la phase de flot a duré 3h et celle de jusant 7h. Le jusant dure donc 4h de plus que le flot. Les courants de marée deviennent dissymétriques avec l'augmentation du débit fluvial.

Que ce soit en marée basse ou en marée haute, on assiste à un afflux de courants fluviaux du Bandama vers Grand-Lahou, alors qu'en période d'étiage, ces courants fluviaux se limitaient à l'entrée du fleuve à cause de l'opposition des courants de flot.

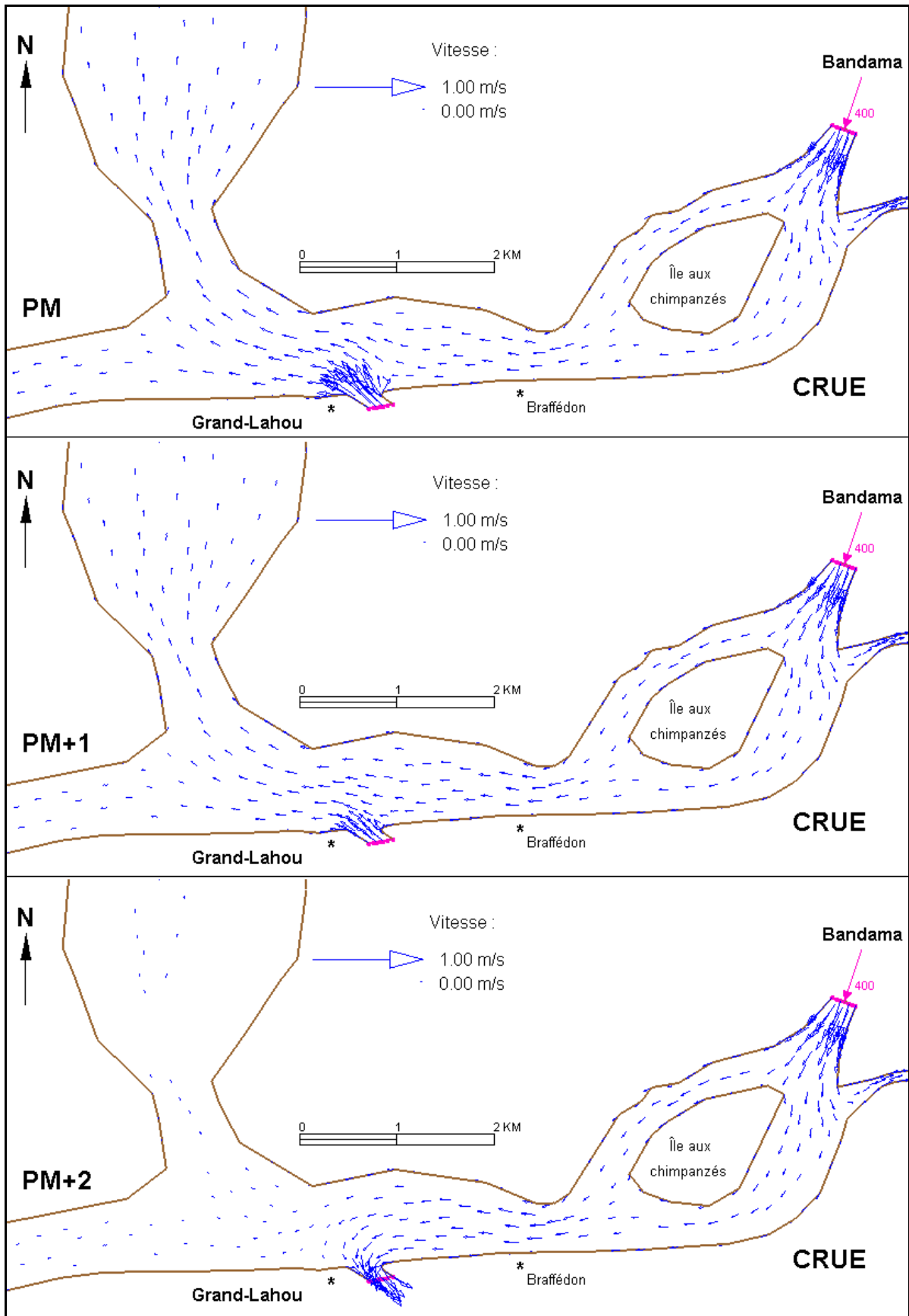


Figure 41a : Champs de courants à Grand-Lahou en crue et à pm, pm+1, pm+2

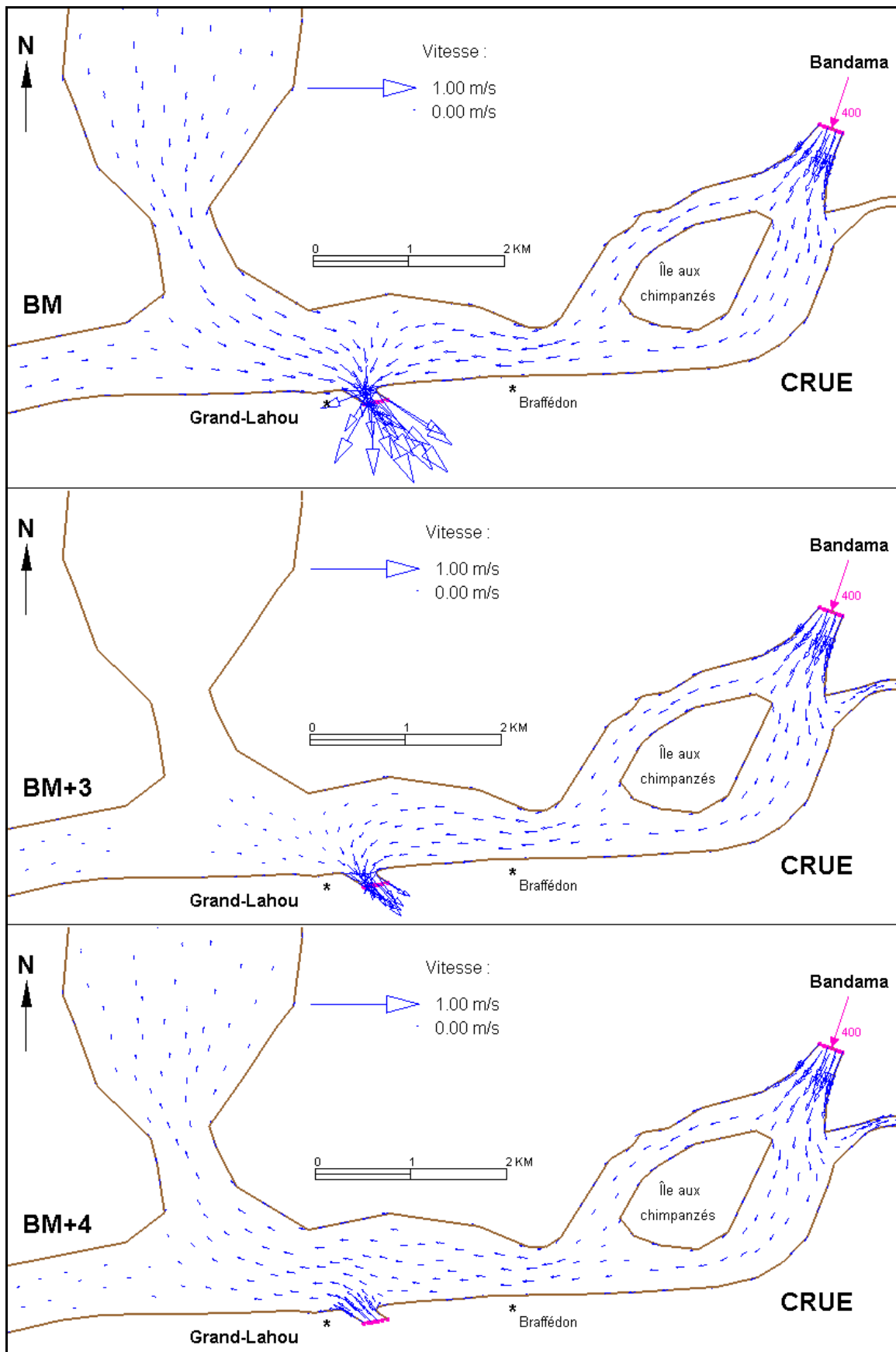


Figure 41b : Champs de courants à Grand-Lahou en crue et à bm, bm+3, bm+4

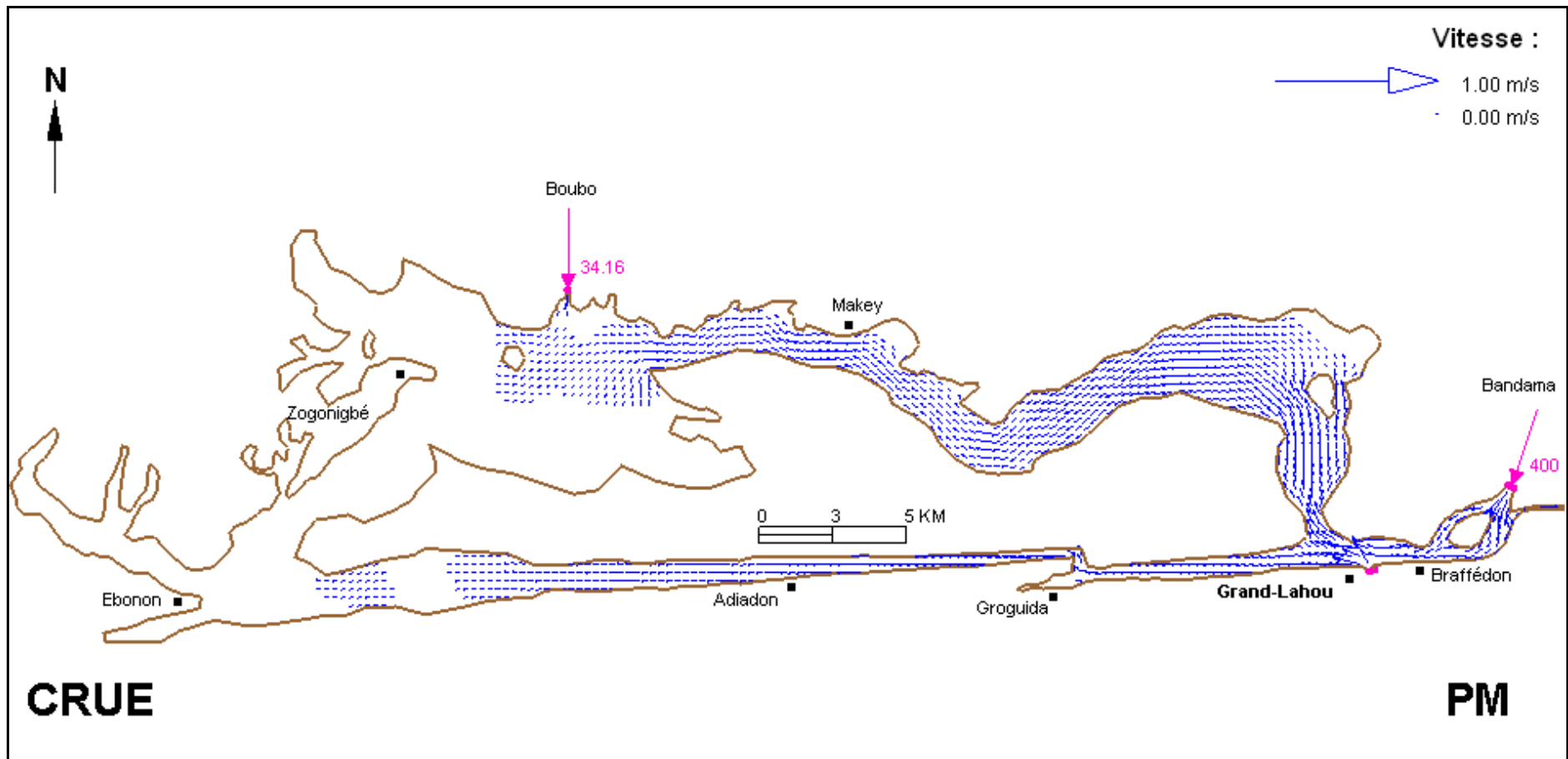


Figure 42 : Champs de courants dans le système Grand-Lahou en crue et à pm

2.1.2.2. Variation du niveau de la surface en crue

Les courbes de variations des hauteurs d'eau montrent une allure sinusoïdale au niveau de la station Bandama et sub-sinusoïdale à Adiadon et à Makey (**Figure 43**) :

- au niveau de la station île aux chimpanzés, le niveau de la surface d'eau a varié au maximum entre 1,25 et 1,07 m. Le marnage est alors de 0,18 m contre un marnage de 0,25 m en étiage. Le flot a duré 5h comme en étiage, quant au jusant, il a duré 7h en crue contre 6h30 en étiage ;
- à Adiadon dans la lagune Nyouzoumou, le flot a duré 5h comme en étiage et le jusant 8h30, soit 1h30 de plus qu'en étiage. Le marnage est passé de 0,05 m en étiage à 0,04 m en crue, car le niveau de la surface d'eau a varié entre 1,14 et 1,10 m ;
- à Makey, la pleine mer a atteint au maximum 1,15 m et la basse mer 1,09 m, ce qui correspond à un marnage de 0,06 m en crue contre un marnage de 0,07 m en étiage. Le flot et le jusant ont duré respectivement 5h et 7h30 comme en étiage.

L'analyse comparative des hauteurs d'eau en étiage et en crue montre que le niveau des pm et des bm a augmenté de 0,07 à 0,08 m à l'Ouest de Grand-Lahou. A l'Est de Grand-Lahou, le niveau de la pm a augmenté de 0,07 m et celui de la bm de 0,14 m, soit deux fois plus que le niveau des pm. Il en résulte une baisse du marnage de l'ordre de 0,07 m et de 0,01 m respectivement à l'Est et à l'Ouest de Grand-Lahou. De plus, l'onde de marée devient dissymétrique lors de sa propagation en lagune. Ce phénomène s'amplifie en crue. La distribution spatiale des hauteurs d'eau simulées à pm et à bm montre que les variations du niveau de la surface d'eau sont plus sensibles à l'embouchure de Grand-Lahou (**Figure 44**).

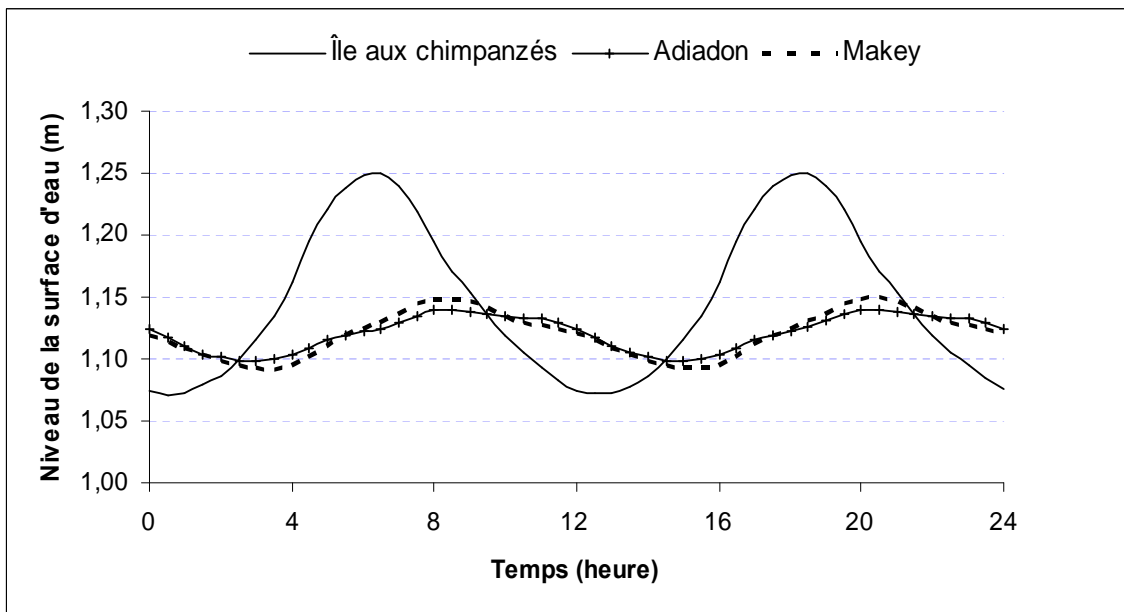


Figure 43 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Grand-Lahou en crue

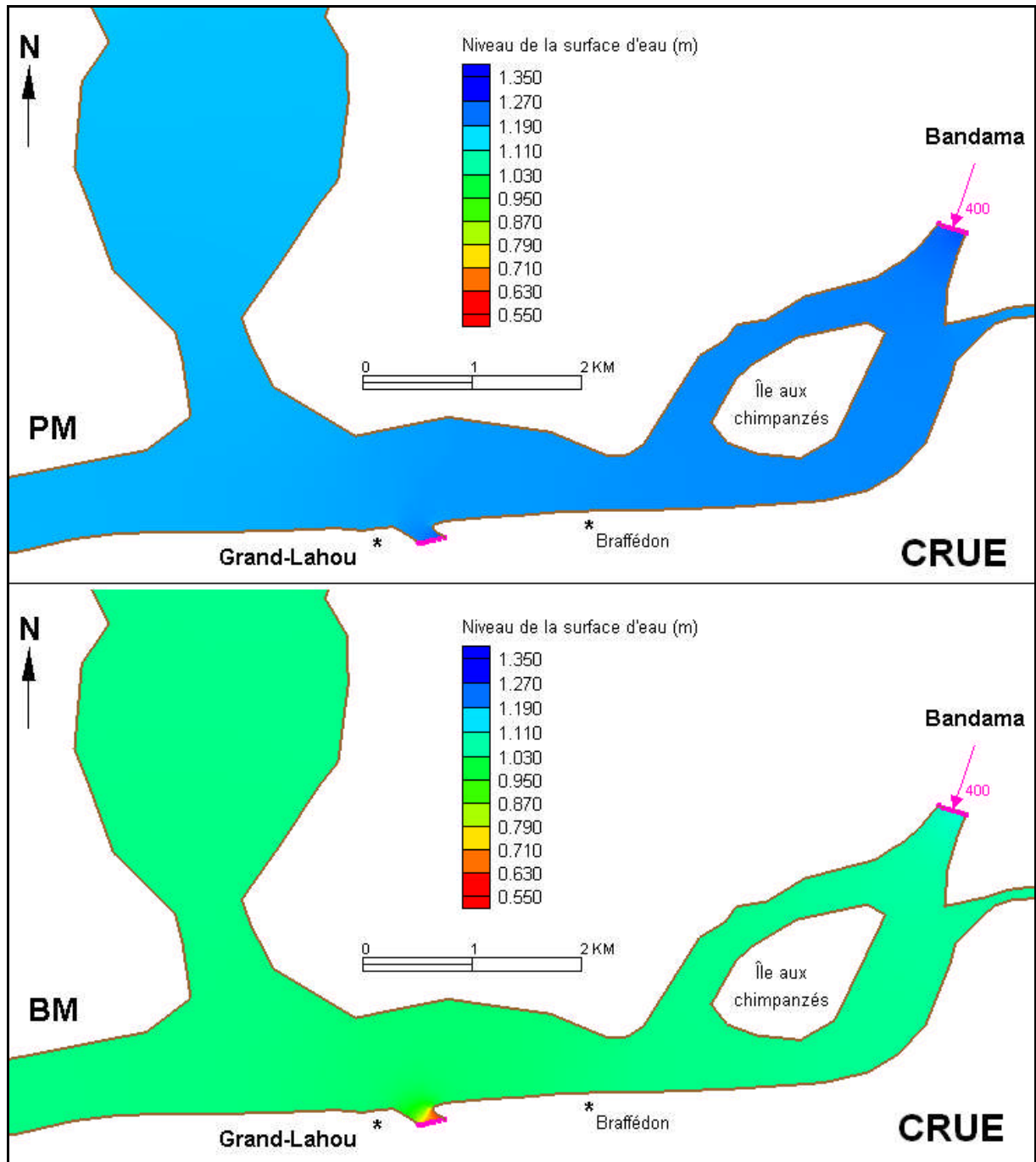


Figure 44 : Niveau de la surface d'eau à l'embouchure de Grand-Lahou en crue

2.1.2.3. Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en crue

L'évolution temporelle des débits simulés à l'embouchure du Bandama en crue, est représentée sur la **figure 45**. Au cours du cycle de marée, le modèle a calculé un débit maximum entrant de $+500 \text{ m}^3/\text{s}$ et un débit maximum sortant de $-1080 \text{ m}^3/\text{s}$. On en déduit un débit moyen de $-410 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit maximum entrant est inférieur au débit maximum sortant.

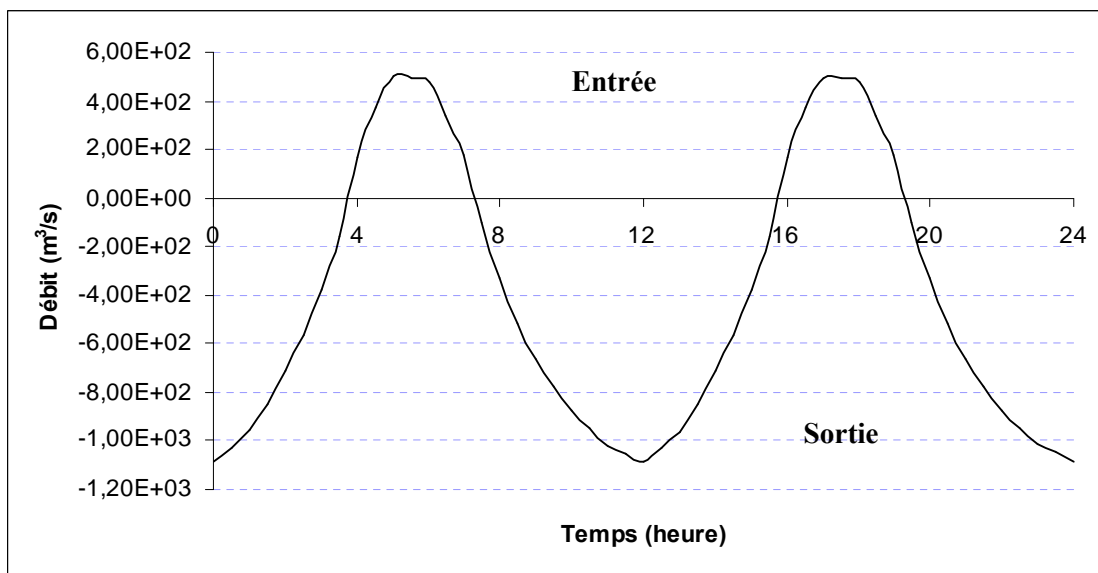


Figure 45 : Evolution temporelle des débits à Grand-Lahou en période de crue

Le volume moyen de la lagune ($5,95 \cdot 10^8 \text{ m}^3$) a varié au maximum entre $5,90 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ et $6,10 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, ce qui correspond à un volume sortant quotidien de $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (**Figure 46**). Il en résulte un temps moyen de renouvellement des eaux de 30 jours en crue au lieu de 22,3 en étiage.

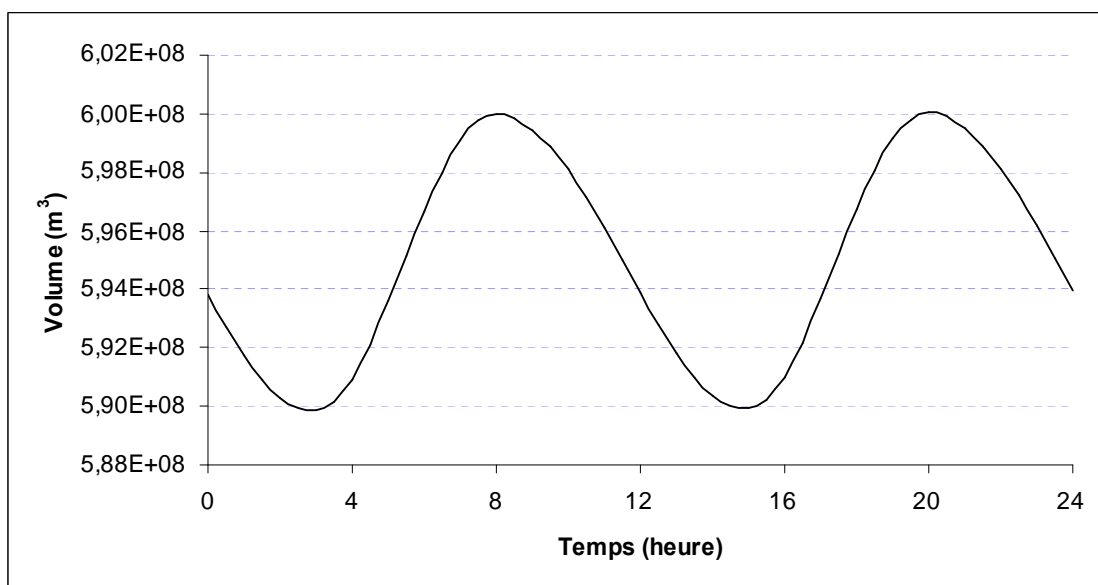


Figure 46 : Evolution temporelle des volumes à Grand-Lahou en période de crue

2.2.Fonctionnement hydrodynamique du système Ebrié

2.2.1. Champs de courants en étiage et en crue

Les **figures 47** et **48** présentent l'évolution des champs de courants dans la zone estuarienne du système Ebrié respectivement en étiage et en crue. Les masses d'eau en étiage présentent les caractéristiques suivantes (**Figure 47**) :

- de pm à pm+2, les eaux marines pénètrent en lagune par le canal de Vridi, puis remontent le bassin central avant d'emprunter les chenaux centraux Ouest et Est. Au plateau (entre les baies du Banco et de Cocody), les vitesses de courants sont accélérées à cause du resserrement des sections ;
- à pm+3, c'est le début du jusant, les masses d'eau évoluent vers la mer. Dans le bassin central, les courants sont tourbillonnaires, car cette zone est large (2 à 3 km) et caractérisée par de grandes profondeurs (-26 m au maximum) ; alors que dans les chenaux centraux, les courants sont alternatifs. Le maximum de jusant intervient à bm et tous les vecteurs vitesses pointent vers la sortie en mer. La phase de jusant prend fin à bm+2 ;
- à bm+3, c'est le début du flot et on assiste à une entrée d'eau océanique dans le système lagunaire. Le maximum de remplissage interviendra à pm.

En période de crue, le suivi temporel du mouvement des masses d'eau (**Figure 48**) montre que de pm à pm+1, les eaux marines pénètrent en lagune. Dès la pm+2, c'est le début du jusant et le transfert des masses d'eau se fait alors de la lagune vers le milieu marin. Les courants de marée provenant des extrémités Est et Ouest de la lagune vont, à l'entrée du bassin central, s'affaiblir à cause de l'élargissement des sections et des grandes profondeurs. Les masses d'eau vont ensuite s'engouffrer dans le canal de Vridi et sortir en mer.

Le jusant qui atteint son maximum à bm va durer jusqu'à bm+2. Le mouvement des masses d'eau s'inversera à bm+3. Les baies d'Abidjan restent toujours très peu affectées par les courants de marée en période de crue.

En résumé, sur le cycle de marée pm/bm/pm, le flot et le jusant ont chacun duré 5h en étiage avec 2h de période d'instabilité. En revanche en période de crue, le flot a duré 4h et le jusant 6h. Ces résultats confirment les observations de Mondé (2004). En outre, on note toujours la présence de structure tourbillonnaire de part et d'autre du canal de Vridi en étiage et en crue, ce qui prouve que cette structure 3D n'est pas liée au débit fluvial mais à la morphologie (Pouvreau, 2002).

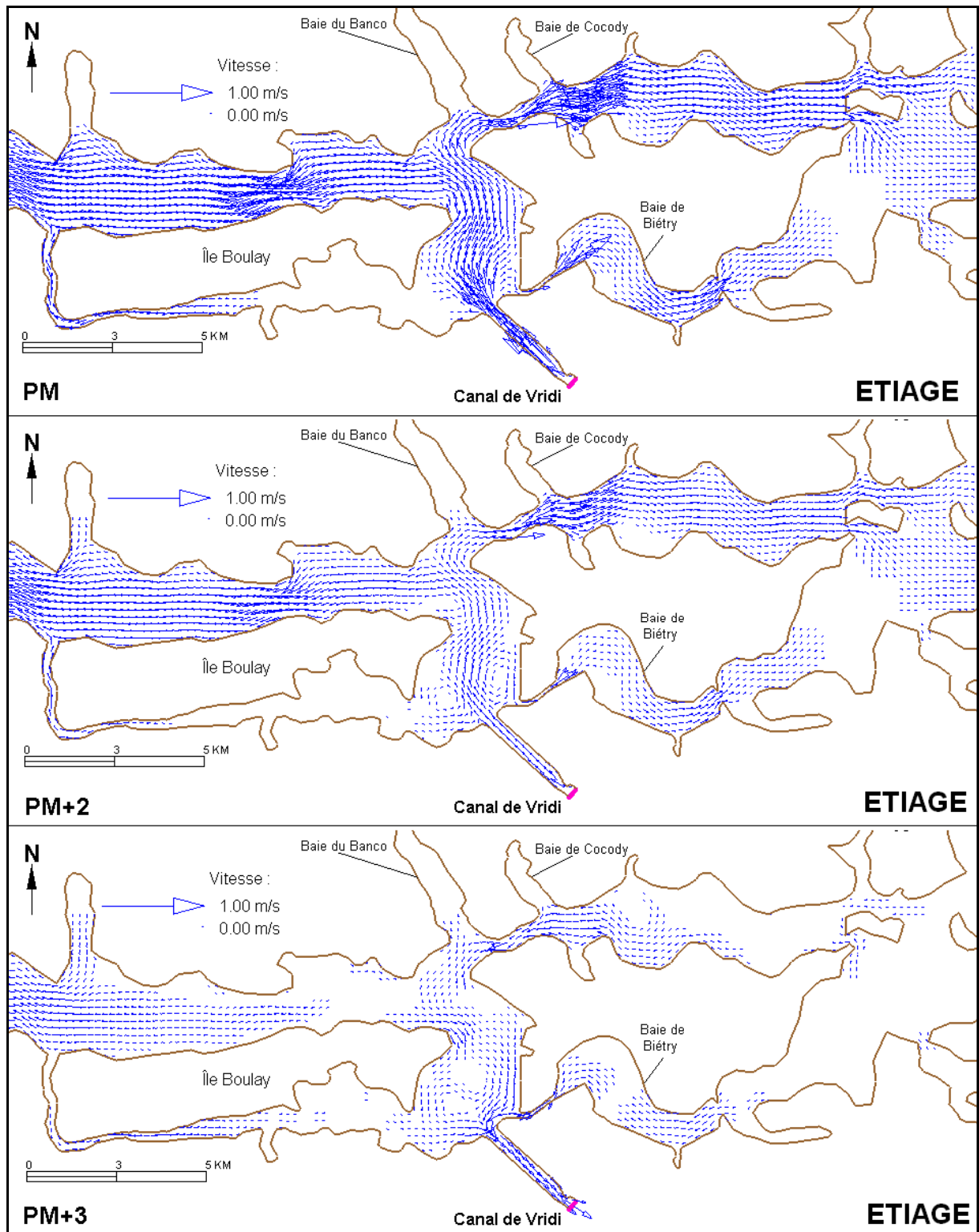


Figure 47a : Champs de courants dans le système Ebrié en étiage et à pm, pm+2, pm+3

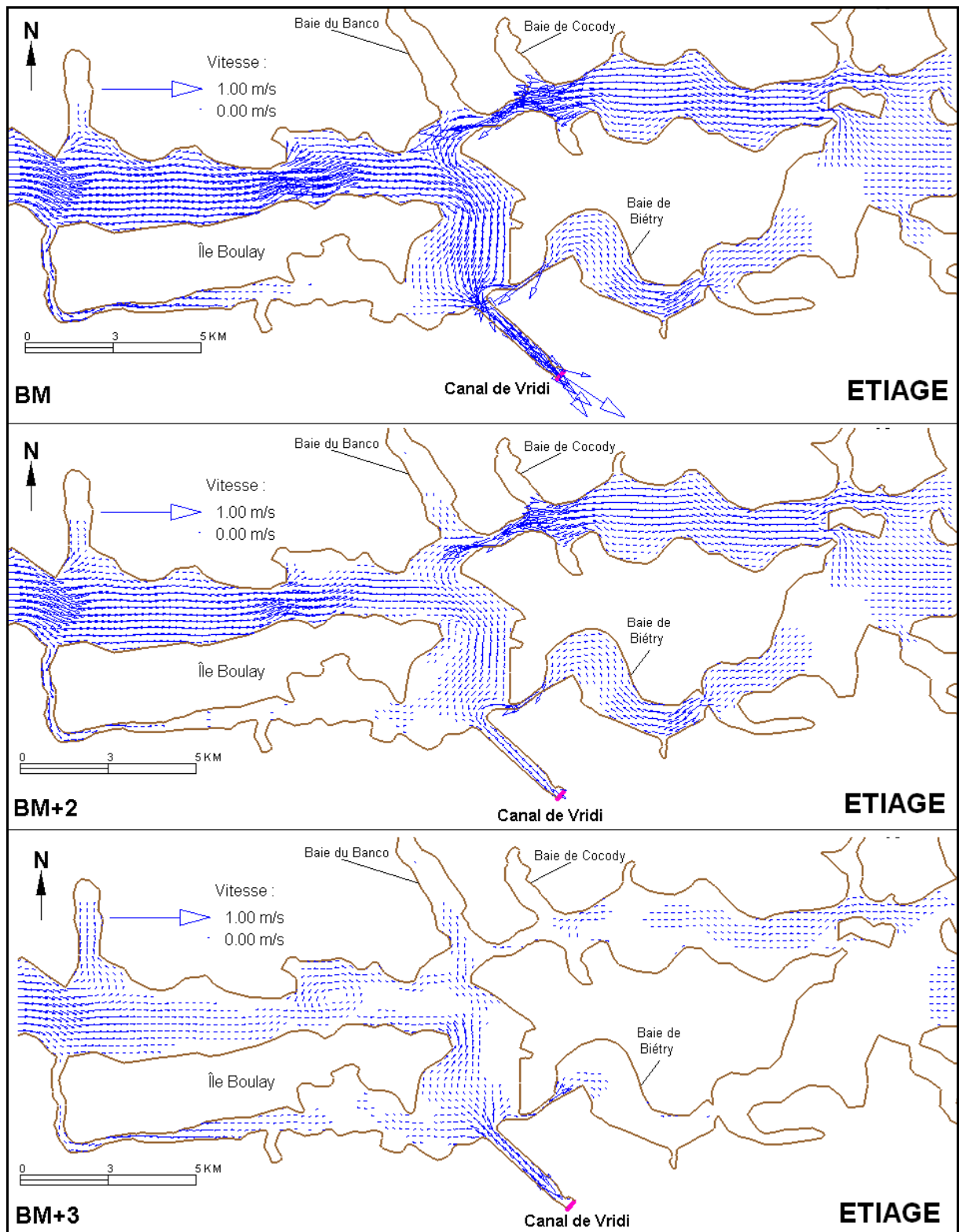


Figure 47b : Champs de courants dans le système Ebrié en étiage et à bm, bm+2, bm+3

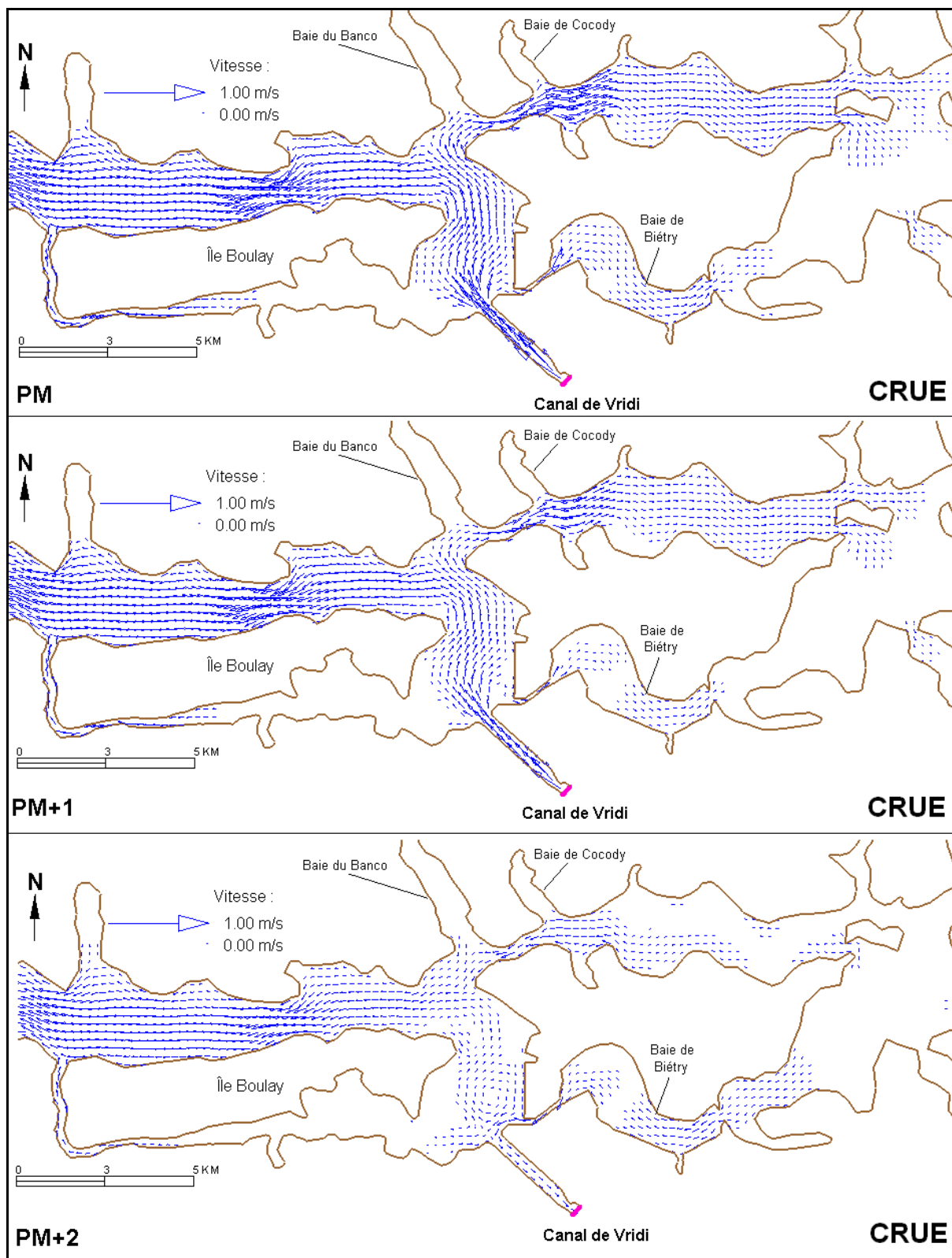


Figure 48a : Champs de courants dans le système Ebrié en crue et à pm, pm+1, pm+2

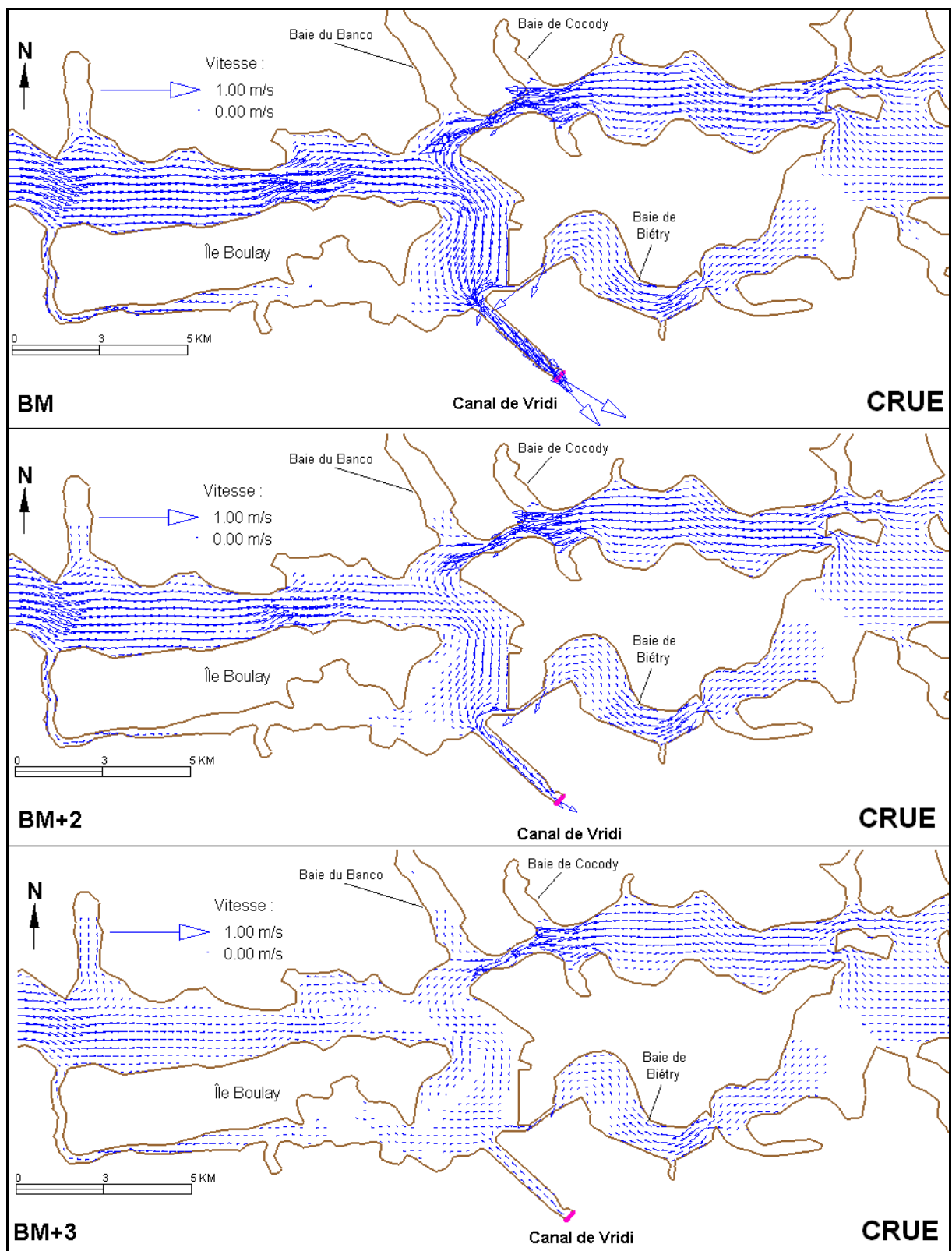


Figure 48b : Champs de courants dans le système Ebrié en crue et à bm, bm+2, bm+3

2.2.2. Variation du niveau de la surface d'eau en étiage et en crue

La variation du niveau de la surface d'eau a été analysée en deux points situés à la même profondeur (2,5 m) et à la même distance (25 km) de part et d'autre du canal de Vridi (figure 30, page 69). Il s'agit de la station de Songon-Té et de celle de l'île Vitré. Les pleines mers et les basses mers à Vridi sont prises comme référence. L'évolution des hauteurs d'eau en étiage pour un marnage à Vridi de 0,64 m montre que (**Figure 49**) :

- la marée haute arrive à Songon-Té avec $\frac{1}{4}$ d'heure de retard et un marnage de 0,08 m. Le niveau de la pleine mer est de 1,06 m et celui de la basse mer de 0,98 m. Le flot et le jusant ont duré respectivement 5h et 8h ;
- à l'Est de Vridi (Île Vitré), la haute mer arrive avec un retard de 2h30 et un marnage de 0,22 m, le niveau de la surface d'eau ayant varié au maximum entre 0,91 et 1,13 m. La durée du flot est estimée à 5h30 et celle du jusant à 6h30.

L'onde de marée se propage beaucoup plus rapidement vers Songon-Té, mais avec un marnage plus faible (0,10 m). A l'Est de Vridi, devant l'Île Vitré, le retard est plus long (2h30). Le marnage, quant à lui, représente presque le double de celui calculé à l'Ouest de Vridi (0,22 m). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Varlet (1978), Pouvreau (2002) et Mondé (2004).

En période de crue, le niveau des eaux monte en amont de la lagune (**Figure 50**) :

- le niveau de la pleine mer et de la basse mer a augmenté de 0,03 m à Songon-Té. Le marnage est resté identique à celui calculé en étiage, soit 0,08 m. Le flot et le jusant ont duré chacun 5h et 8h30 ;
- du côté Est de Vridi, le niveau de la surface d'eau a varié entre 1,25 et 1,06 m. On note une augmentation de 0,12 m du niveau de la pm en crue. La bm, quant à elle, a vu son niveau passé de 0,91 m en étiage à 1,06 m crue, soit une augmentation de 0,15 m. Le marnage est donc passé de 0,22 m en étiage à 0,19 m en crue, soit une baisse de 0,03 m. Le flot et le jusant ont duré respectivement 4h et 8h en période de crue.

La variation dans le plan des niveaux de la surface d'eau en période d'étiage et de crue est présentée respectivement sur les **figures 51 et 52**. Ces figures montrent que les variations sont plus importantes dans le canal de Vridi, le bassin central, la baie du Banco et aux exutoires des fleuves Comoé et Mé à l'Est de Vridi.

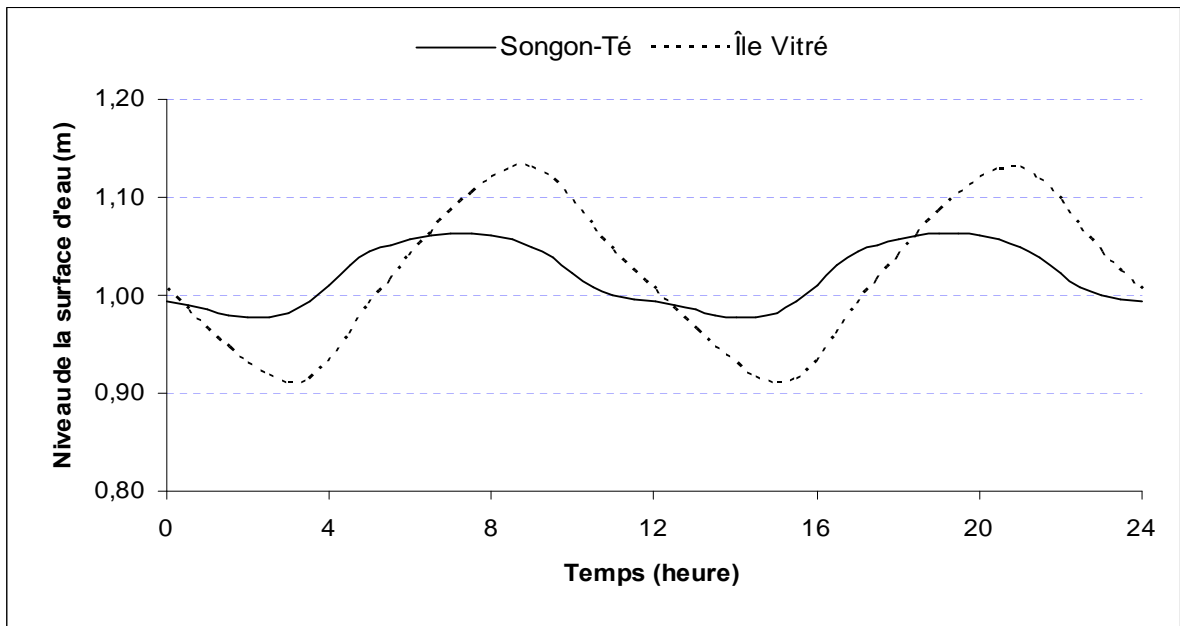


Figure 49 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Ebrié en étiage

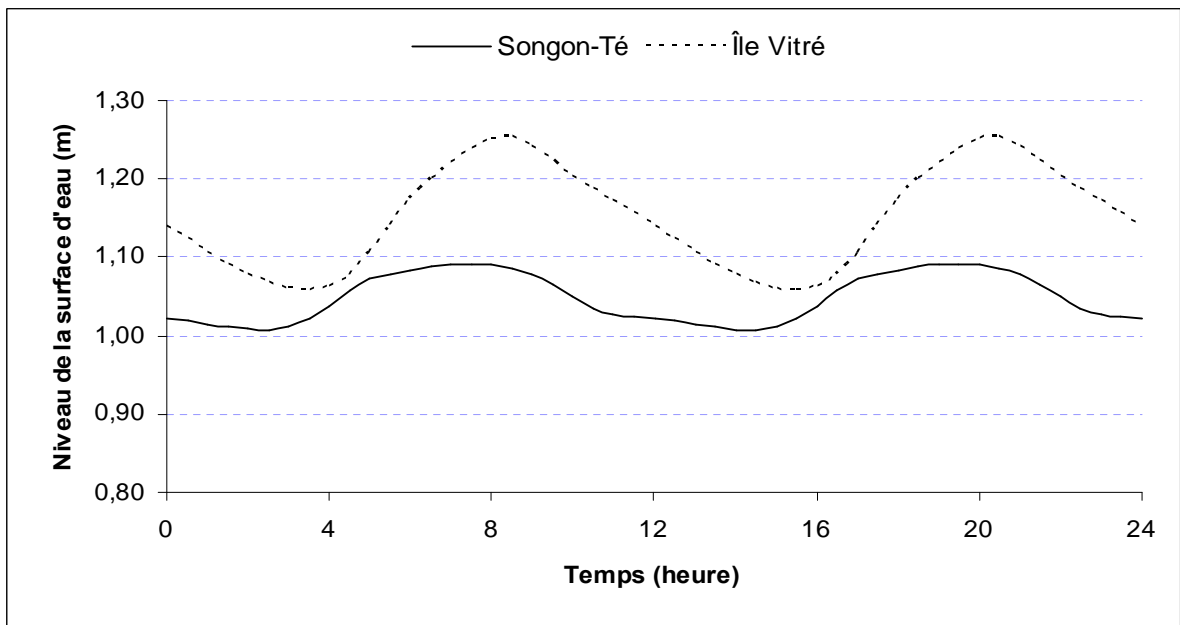


Figure 50 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Ebrié en crue

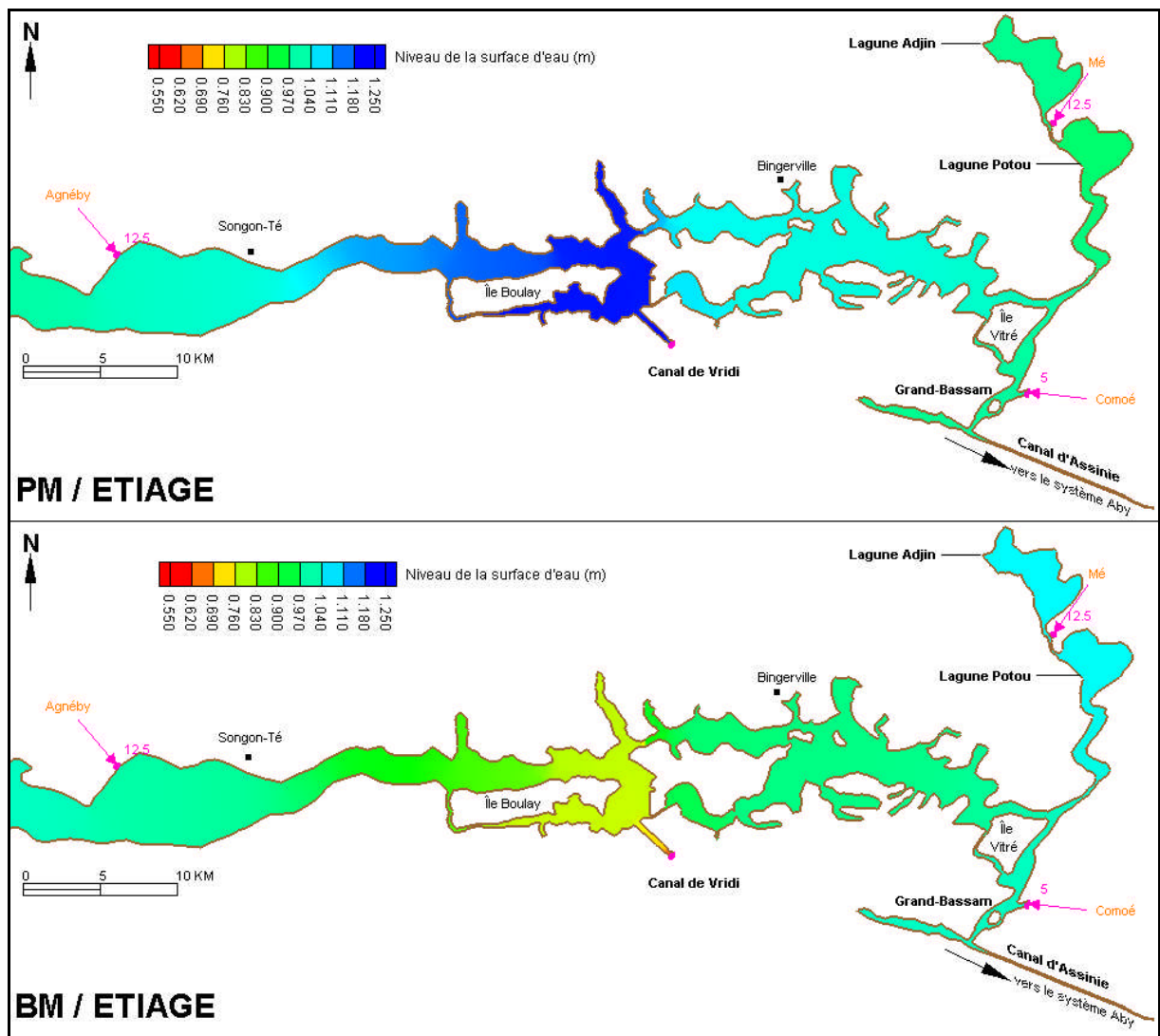


Figure 51 : Niveau de la surface d'eau dans le système Ebrié en étiage

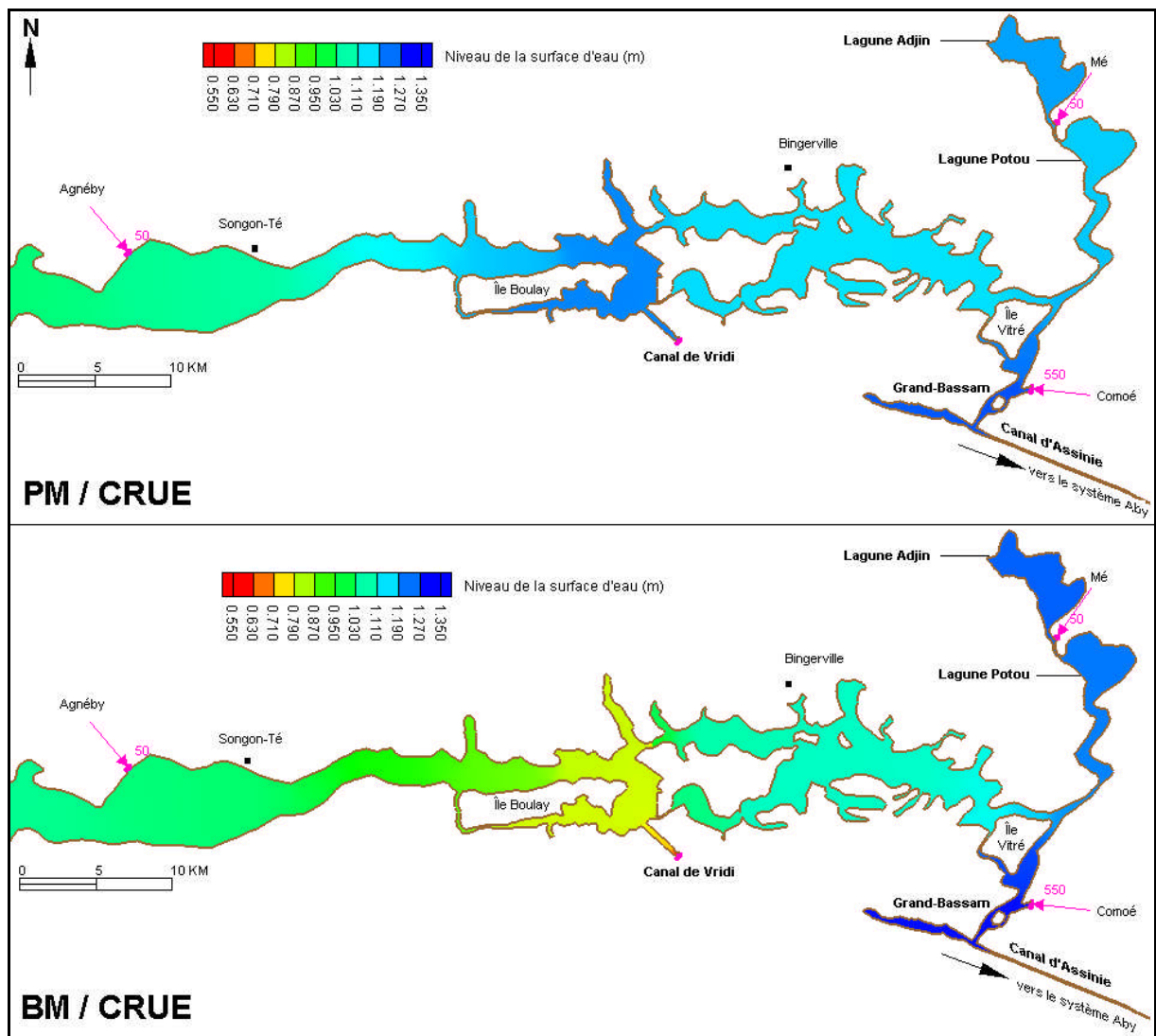


Figure 52 : Niveau de la surface d'eau dans le système Ebrié en crue

2.2.3. Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en étiage et en crue

Les courbes de variations des débits en fonction du temps présente une allure sinusoïdale (**Figure 53**) :

- les débits entrants en étiage dans le système lagunaire Ebrié sont supérieurs aux débits entrants en période de crue. Le débit maximal a atteint +3210 m³/s en étiage contre +2590 m³/s en crue (**Tableau XIII**) ;
- quant aux débits sortants, ils sont plus élevés en crue qu'en étiage. En effet, le débit sortant au maximum de jusant est de -3310 m³/s en étiage et de -3620 m³/s en crue.

Que ce soit en étiage ou en crue, les flux d'eau sortants du système Ebrié sont supérieurs aux flux entrants. Il sort en moyenne -100 m³/s d'eau en étiage et -708 m³/s en crue en une marée à Vridi.

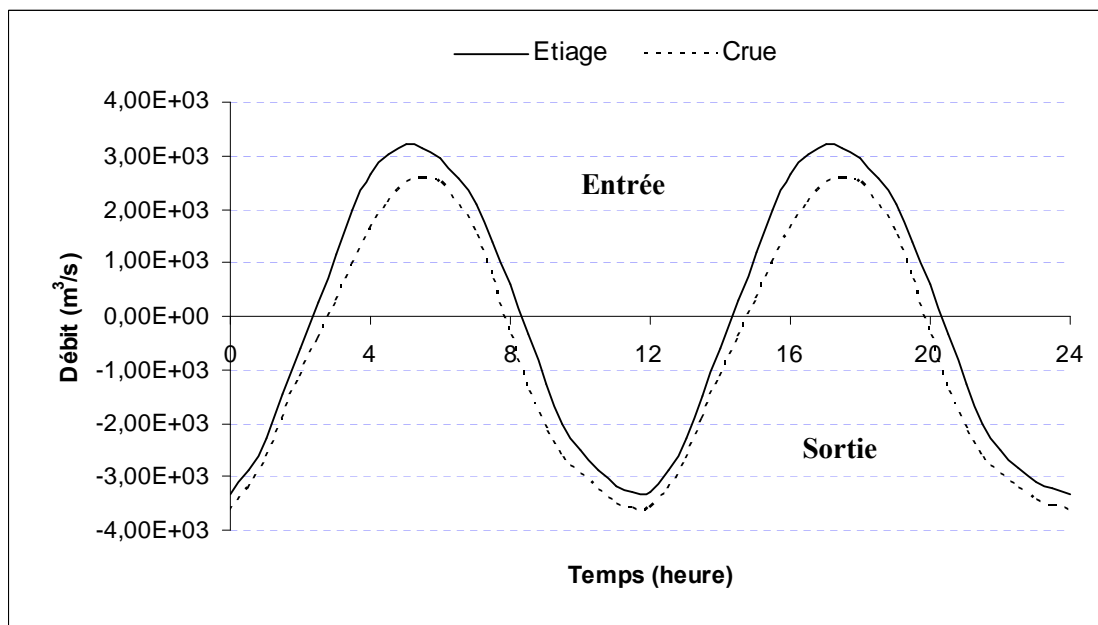


Figure 53 : Evolution temporelle des débits au canal de Vridi en étiage et en crue

Tableau XIII : Débits (en m³/s) calculés en étiage et en crue à Vridi

Débit (m ³ /s)	Période d'étiage	Période de crue
Débit moyen	-100	-708
Débit maximal entrant	+3210	+2590
Débit maximal sortant	-3310	-3620

Le modèle a permis également de calculer les variations des volumes d'eau transitant par Vridi en fonction du temps (**Figure 54** et **tableau XIV**). La courbe de variation des volumes simulés en crue est au-dessus de celle simulés en étiage, car le volume moyen d'eau de la lagune est passé de $2,36.10^9 \text{ m}^3$ en étiage à $2,39.10^9 \text{ m}^3$ en période de crue. On a donc une augmentation du volume moyen de l'ordre 3.10^6 m^3 lors de la crue.

Le volume moyen de la lagune a varié au maximum entre $2,38.10^9$ et $2,33.10^9 \text{ m}^3$ en étiage, ce qui équivaut à un volume d'eau quotidien sortant de 100.10^6 m^3 . On en déduit un temps moyen de séjours des eaux de l'ordre de 23,6 jours en étiage. En période de crue, le volume moyen lagunaire a oscillé en une marée entre $2,41.10^9$ et $2,37.10^9 \text{ m}^3$. En conséquence, le volume journalier d'eau transitant par la lagune est de 80.10^6 m^3 . Le temps moyen de renouvellement des eaux résultant est égal à 30 jours en crue. Le temps de séjours moyen des eaux en crue est supérieur à celui calculé en étiage.

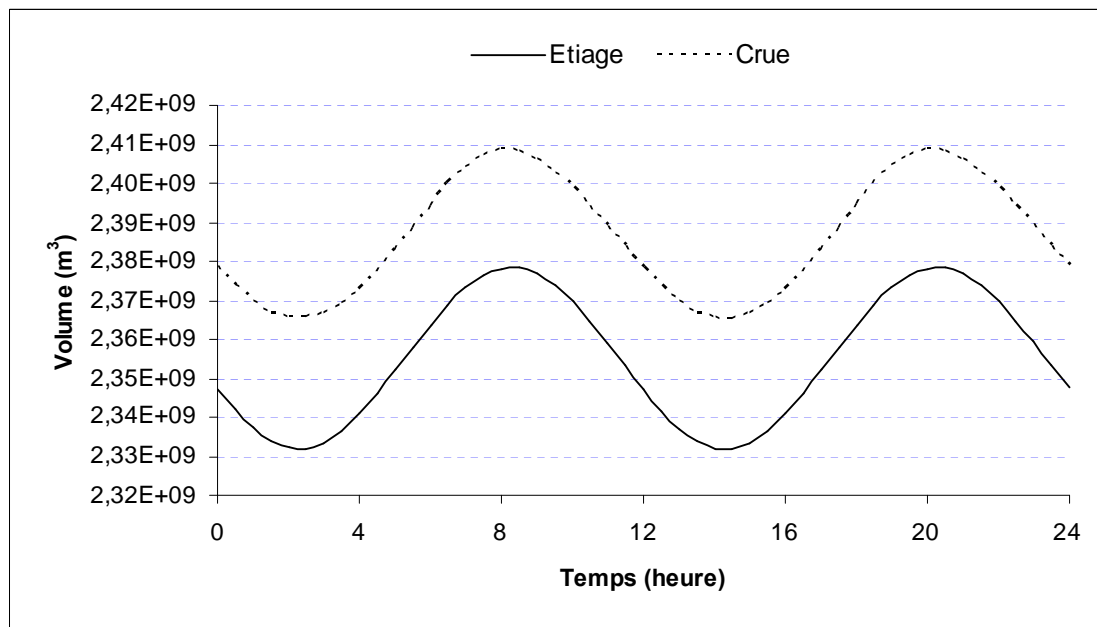


Figure 54 : Evolution temporelle des volumes au canal de Vridi en étiage et en crue

Tableau XIV : Volumes simulés et temps de renouvellement des eaux du système Ebrié

Volume (m^3)	Période d'étiage	Période de crue
Volume moyen (m^3)	$2,36.10^9$	$2,39.10^9$
Volume maximal (m^3)	$2,38.10^9$	$2,41.10^9$
Volume minimal (m^3/s)	$2,33.10^9$	$2,37.10^9$
Volume sortant (m^3/jour)	100.10^6	80.10^6
Temps de renouvellement (jours)	23,6	30

2.3.Fonctionnement hydrodynamique du système Aby

2.3.1. Fonctionnement en période d'étiage

2.3.1.1. Champs de courants en étiage

La distribution des champs de courants en période d'étiage dans le système lagunaire Aby est représentée sur la **figure 55**. Au cours du cycle tidal pm/bm/pm, les masses d'eau suivent les mouvements suivants :

- de la pm à pm+2, les masses d'eau pénètrent à l'intérieur de la lagune par le chenal central d'Assinie et progressent ensuite vers les chenaux secondaires qui séparent les différentes îles (Esso, N'grama etc.). A la sortie des chenaux (côté lagune), les vitesses de courants faiblissent à cause de l'élargissement des sections. Les masses d'eau vont ensuite vers Etuéboué et Mama à l'Est. Dans la lagune Aby-Nord, les masses d'eau sont immobiles, car les vitesses de courants sont presque nulles ;
- à partir de pm+3, les courants dans le chenal central et les chenaux secondaires se renversent. Ils sont tous dirigés vers la sortie en mer : c'est le début du jusant. Les courants qui pénètrent dans les chenaux secondaires en direction de la passe sont accélérés, à cause du rétrécissement des sections. Le maximum de jusant intervient à bm où tous les courants dans la lagune sont dirigés vers Assinie. Les eaux continuent de sortir du système lagunaire jusqu'à bm+2 ;
- à bm+3, les courants de jusant se renversent, les masses d'eau océaniques pénètrent à nouveau dans la lagune en suivant les mêmes directions que lors de la première phase de remplissage du système. Le maximum de flot interviendra à pm.

Sur l'ensemble du cycle de marée pm/bm/pm, les courants de jusant et de flot ont duré 5h chacun. Le jusant et le flot ont eu la même durée, mais les courants de jusant ont été plus forts que les courants de flot.

Les cartes de répartitions des champs de courants montrent que la lagune Aby-Nord peut être considérée comme une lagune "morte", car les courants de marée y sont très faibles. En revanche, dans l'axe formé par la lagune Aby-Sud et les lagunes Tendo et Ehy, on observe une circulation des masses plus importante, à cause du resserrement des sections et des faibles profondeurs (<5 m). Au maximum de flot, les courants de marée pénètrent dans la lagune Ehy située à l'Est du fleuve Tanoé (**Figure 56**).

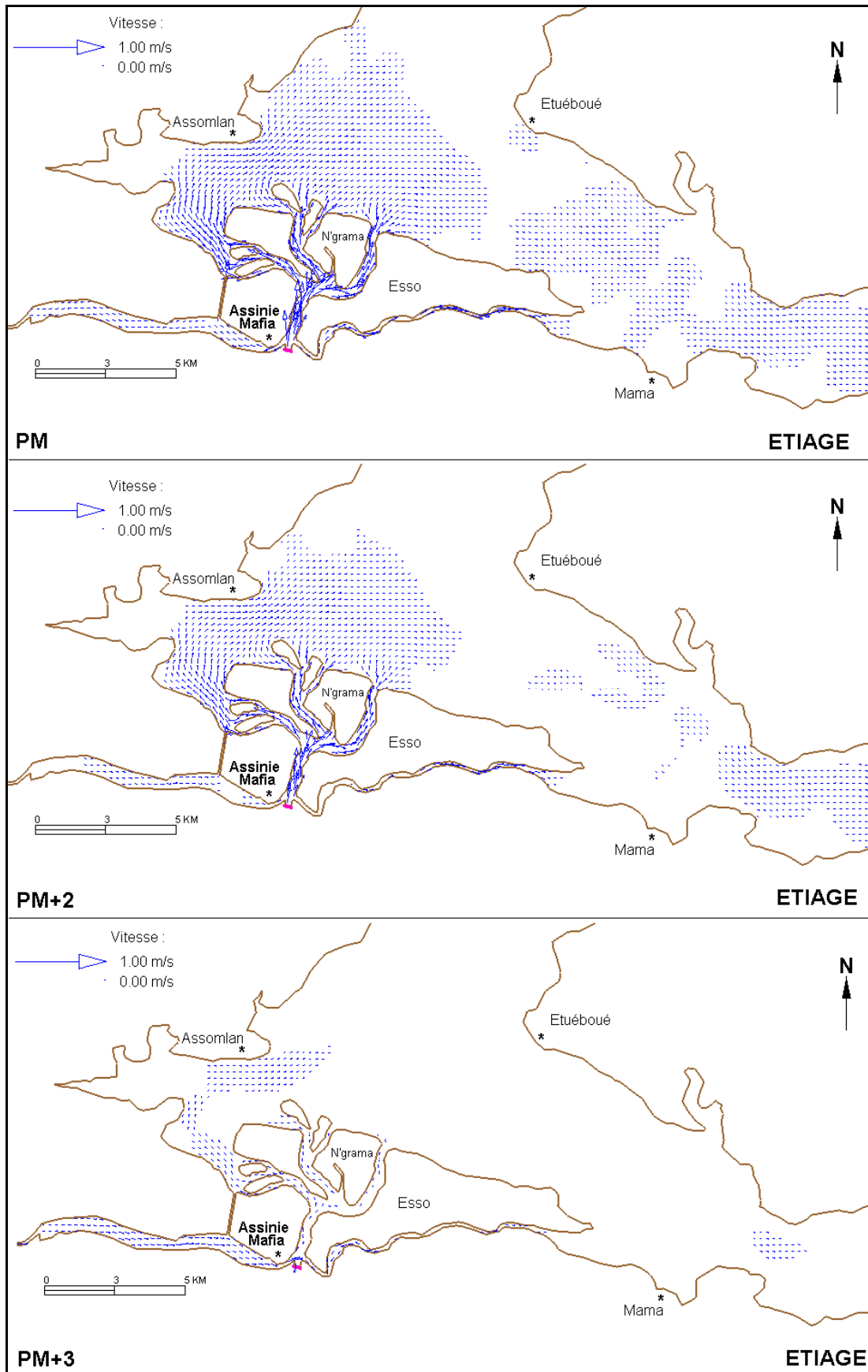


Figure 55a : Champs de courants à Assinie Mafia en étiage et à pm, pm+2, pm+3

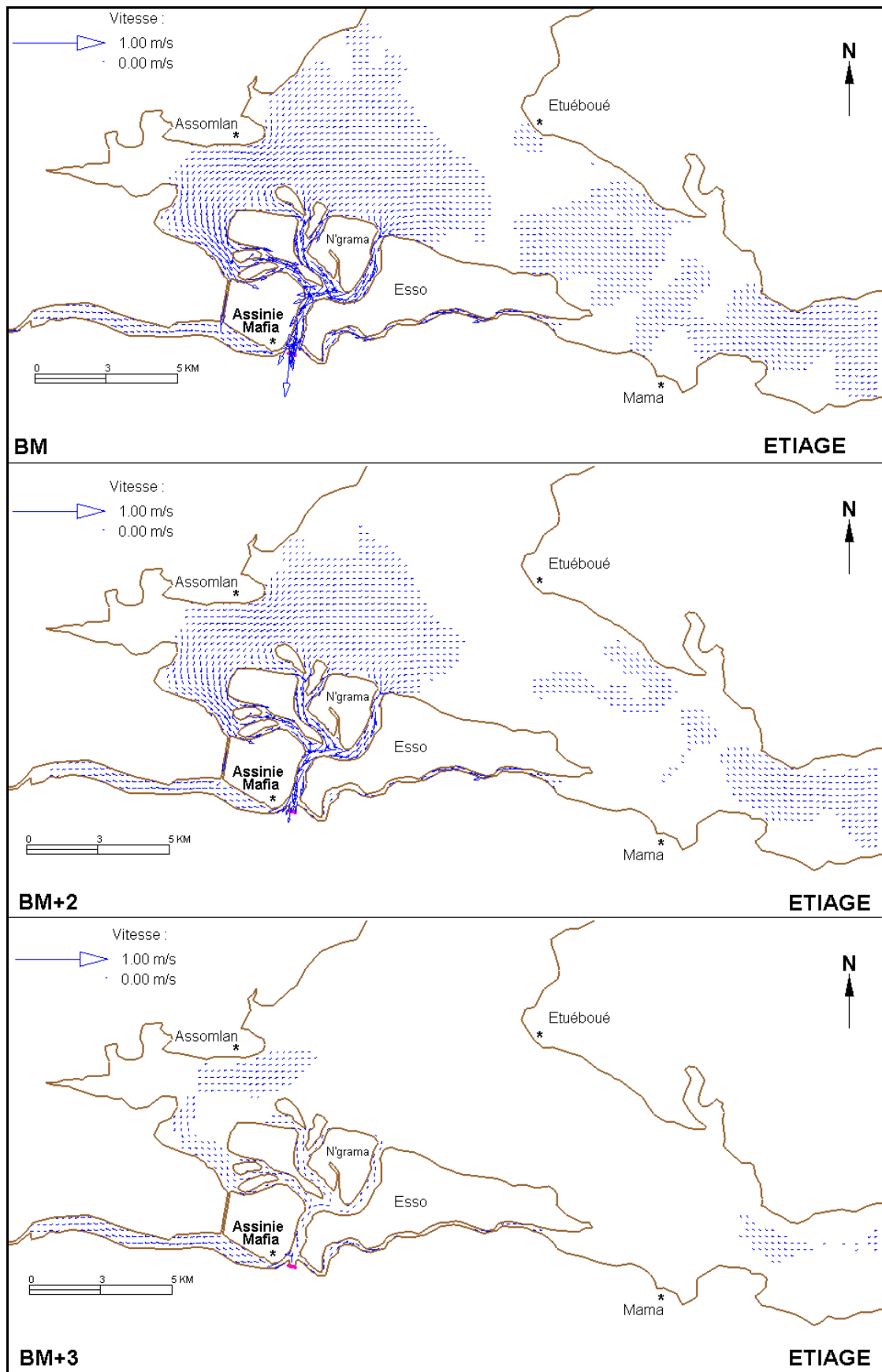


Figure 55b : Champs de courants à Assinie Mafia étiage et à bm, bm+2, bm+3

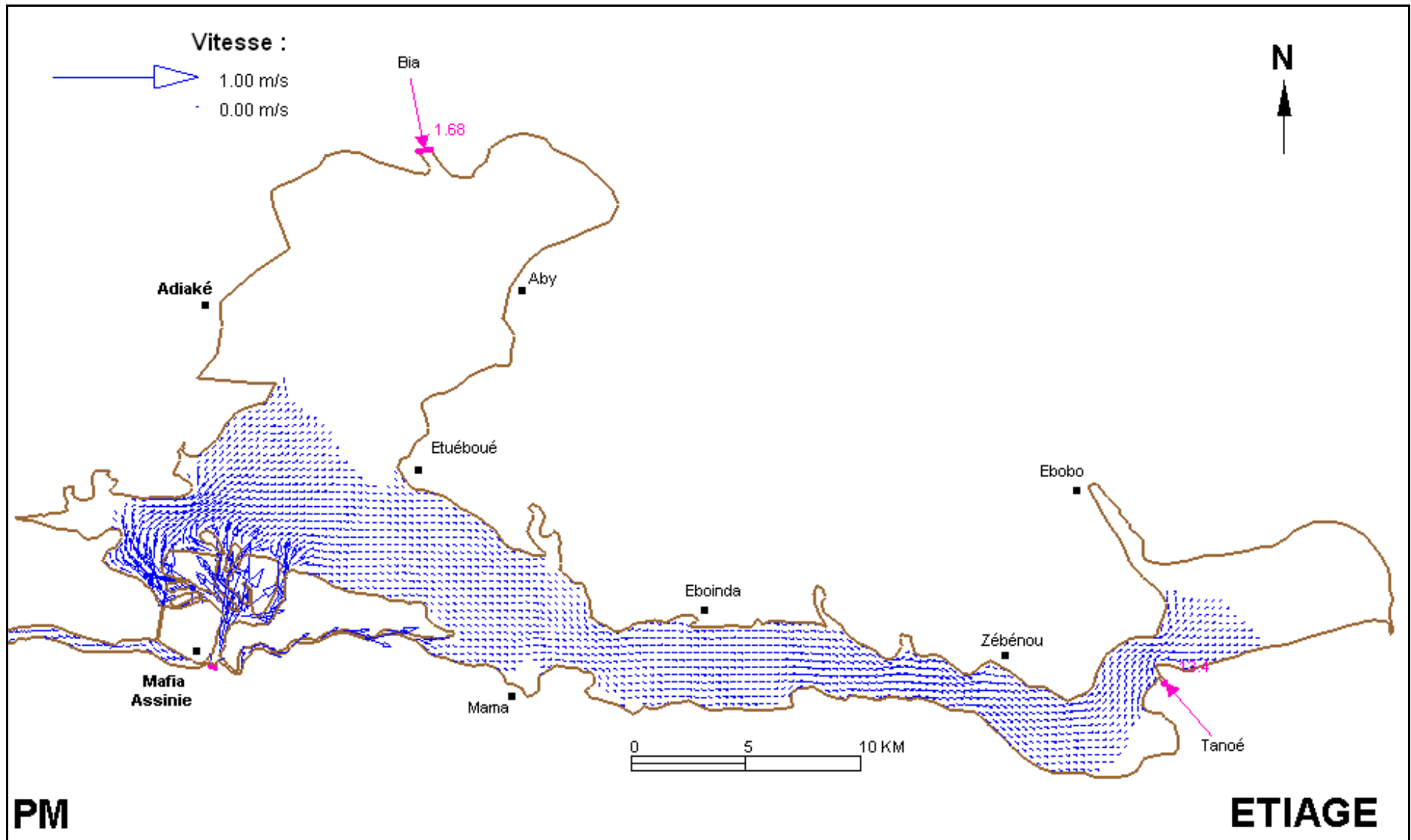


Figure 56 : Champs de courants dans le système Aby en étiage et à pm

2.3.1.2. Variation du niveau de la surface d'eau en étiage

La variation du niveau de la surface d'eau a été étudiée à Adiaké et à Eboinda (Figure 34, page 73). La marée de référence est celle introduite à Assinie. Les courbes d'évolution ont une allure sinusoïdale (**Figure 57**). Pour un marnage de 0,64 m à Assinie, la hauteur d'eau présente les caractéristiques suivantes :

- à Adiaké, la marée haute se produit à 8h30 soit 2h30 après la pleine mer à Assinie. La pleine mer et la basse mer ont un niveau respectif de 1,02 m et de 0,99 m, ce qui correspond à un marnage de 0,03 m. Le jusant a duré 6h30 et le flot 5h30 ;
- à Eboinda, l'onde de marée a évolué au maximum entre 1,03 m à pm et 0,99 m à bm. Il en résulte un marnage de 0,04 m supérieur de 1 mm à celui calculé à Adiaké (0,03m). Le flot a duré 5h30 et le jusant 6h.

L'onde de marée se propage donc beaucoup plus vite vers le Nord que vers l'Est d'Assinie, mais avec un marnage plus faible (<0,01 m).

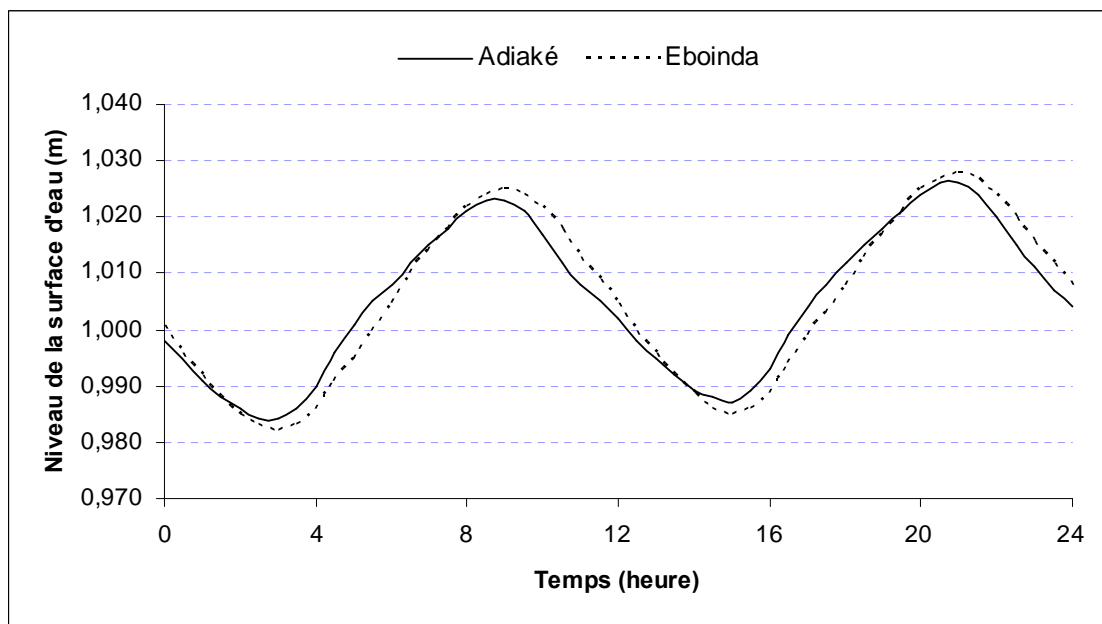


Figure 57 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Aby en étiage

Une vue d'ensemble de la distribution des hauteurs à pm et à bm montre que les variations de la hauteur d'eau sont très faibles dans le reste du système Aby à l'exception des chenaux situés dans la région d'Assinie Mafia (**Figure 58**). Ainsi, dans le chenal situé au Sud d'Assinie-Mafia et conduisant au canal d'Assinie, le niveau de la surface d'eau varie au maximum entre 0,72 et 1,24 m, ce qui équivaut à un marnage de 0,52 m.

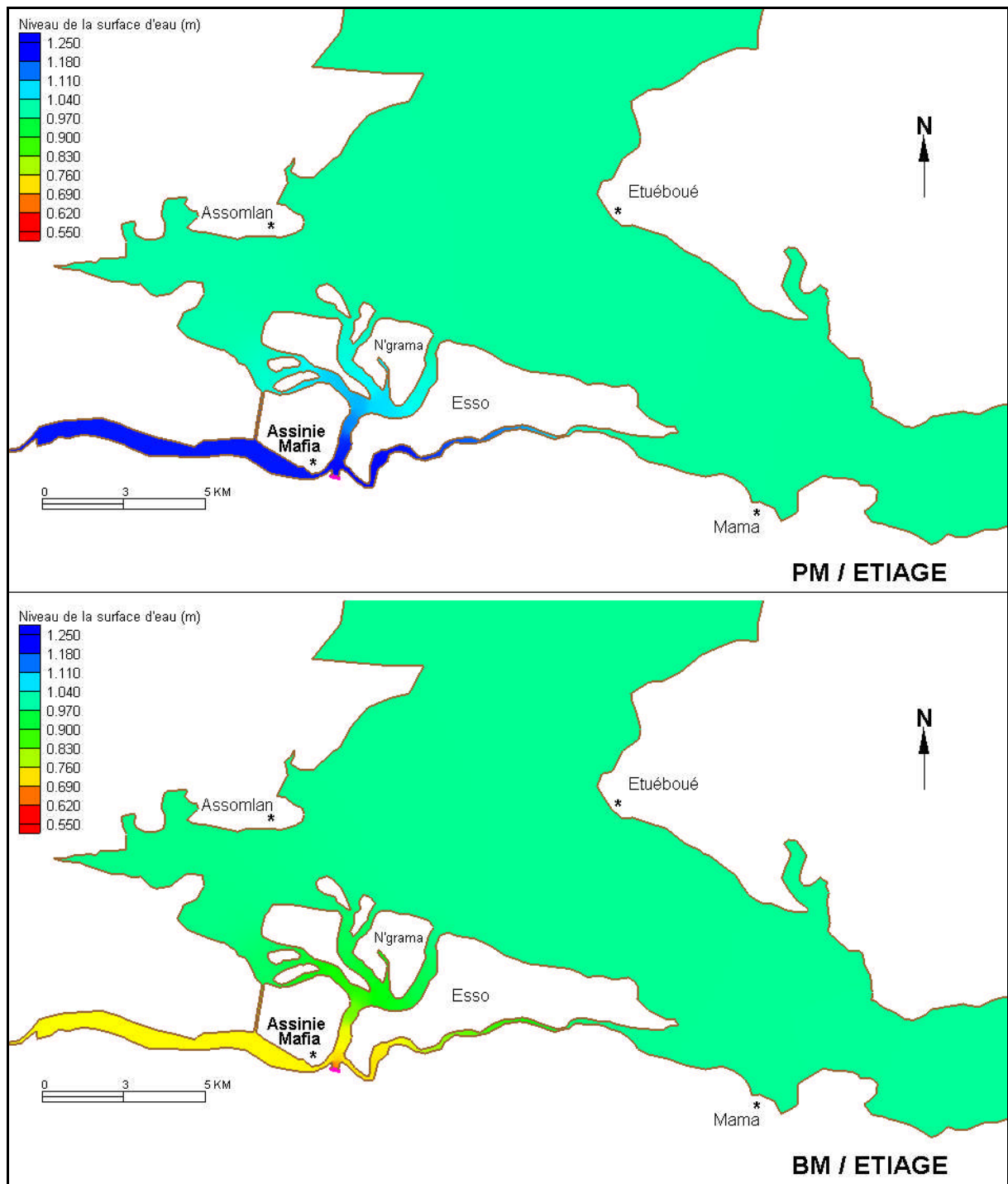


Figure 58 : Niveau de la surface d'eau dans les chenaux d'Assinie en étiage

2.3.1.3. Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en étiage

L'évolution temporelle des débits échangés entre la lagune et la mer présente une allure sinusoïdale (**Figure 59**). Le débit moyen sortant ($-26 \text{ m}^3/\text{s}$) a oscillé au maximum entre $+1050 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit maximal entrant) et $-1080 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit maximal sortant). Le débit entrant est donc inférieur au débit sortant.

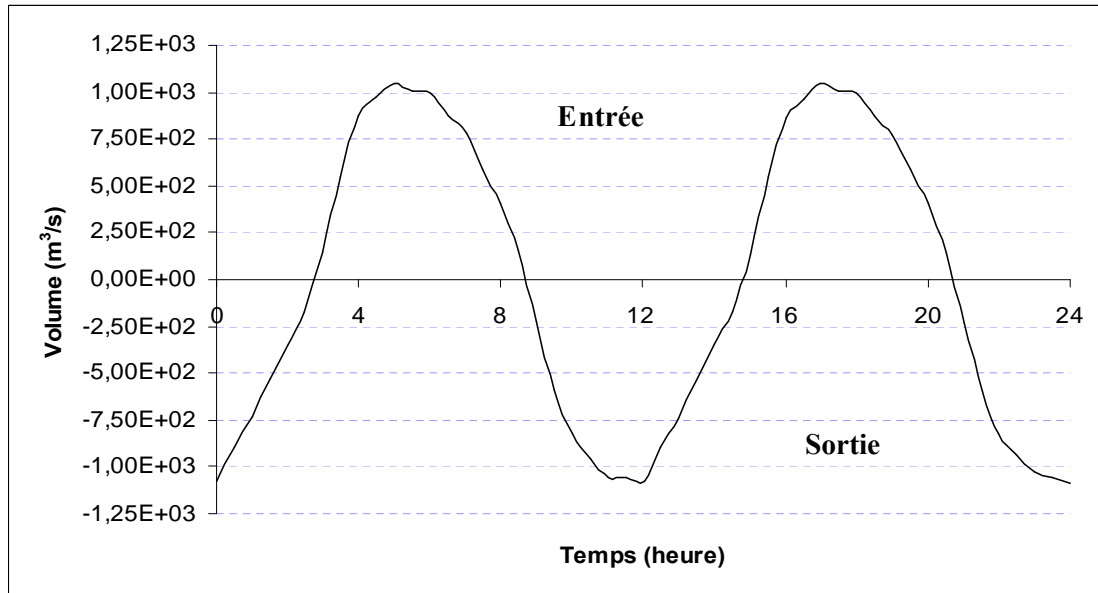


Figure 59 : Evolution temporelle des débits à Assinie en période d'étiage

Les variations de débits s'accompagnent d'une variation du volume d'eau lagunaire (**Figure 60**). Le volume moyen de $1,77 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ a oscillé entre un volume maximal de $1,78 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ et un volume minimal de $1,76 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Il sort donc quotidiennement un volume d'eau de $40 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Le temps moyen de renouvellement des eaux est donc de 44,3 jours.

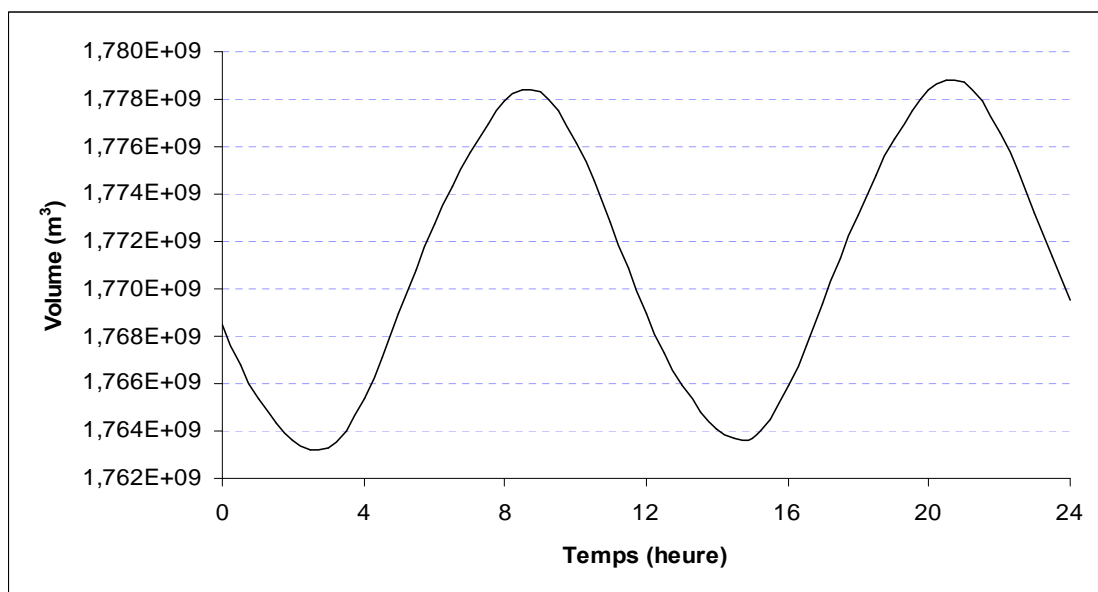


Figure 60 : Evolution temporelle des volumes à Assinie en période d'étiage

2.3.2. Fonctionnement en période de crue

2.3.2.1. Champs de courants en crue

Au cours du cycle de marée pm/bm/pm, le mouvement des masses d'eau en période de crue s'est fait de la manière suivante à Assinie (**Figure 61**) :

- de pm à pm+2, le transfert des masses d'eau, se fait du milieu marin vers le milieu lagunaire ;
- de pm+3 à bm+3, le mouvement s'inverse, les masses d'eau sortent de la lagune pour évoluer en mer. Ce transfert atteindra son maximum à bm où tous les vecteurs vitesses dans la lagune, sont dirigés vers Assinie ;
- à bm+4, les courants de jusant renversent, c'est la seconde phase de pénétration des masses d'eau en lagune. La deuxième phase de remplissage atteindra son maximum à pm.

En comparant l'évolution des champs de courants en crue à celle de l'étiage, on note les différences suivantes :

- la renverse des courants de jusant intervient à bm+3 en étiage et 1h plus tard en crue c'est-à-dire à bm+4 ;
- en période de faible débit fluvial (ou étiage), le flot avait duré 5h alors qu'en période de fort débit fluvial (ou crue), il a duré 4h, soit 1h ;
- en crue, la phase de jusant a duré 6h, tandis qu'en étiage, elle avait duré 5h, soit 1h de moins.

Au total, dans les mêmes conditions de marée, on constate sur l'ensemble du cycle pm/bm/pm, une réduction de la durée de la phase de flot et un allongement de celle du jusant suite à l'augmentation du débit fluvial. Les courants de flot s'affaiblissent et les courants de jusant s'intensifient avec le débit fluvial.

Entre Adiaké, Aby et le fleuve Bia, la circulation des masses en période de crue est presque nulle à pm (**Figure 62**). Cette situation est identique à celle observée en étiage. Du côté Est d'Assinie, les courants fluviaux du fleuve Tanoé sont déviés dans la lagune Ehy au maximum de flot. Entre l'exutoire de ce fleuve et Mama, on observe des vitesses uniquement près des rives du système lagunaire.

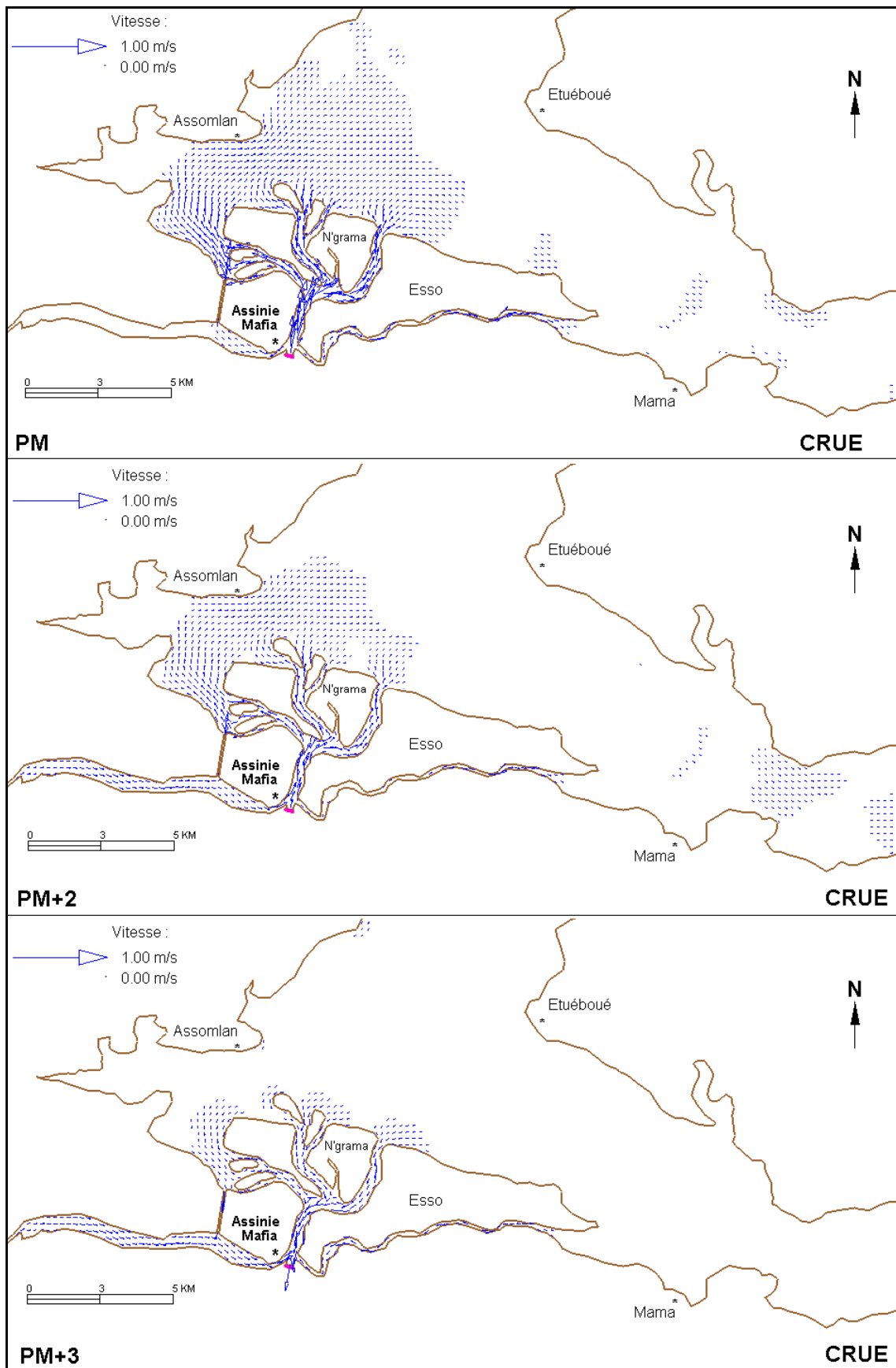


Figure 61a : Champs de courants à Assinie Mafia en crue et à pm, pm+2, pm+3

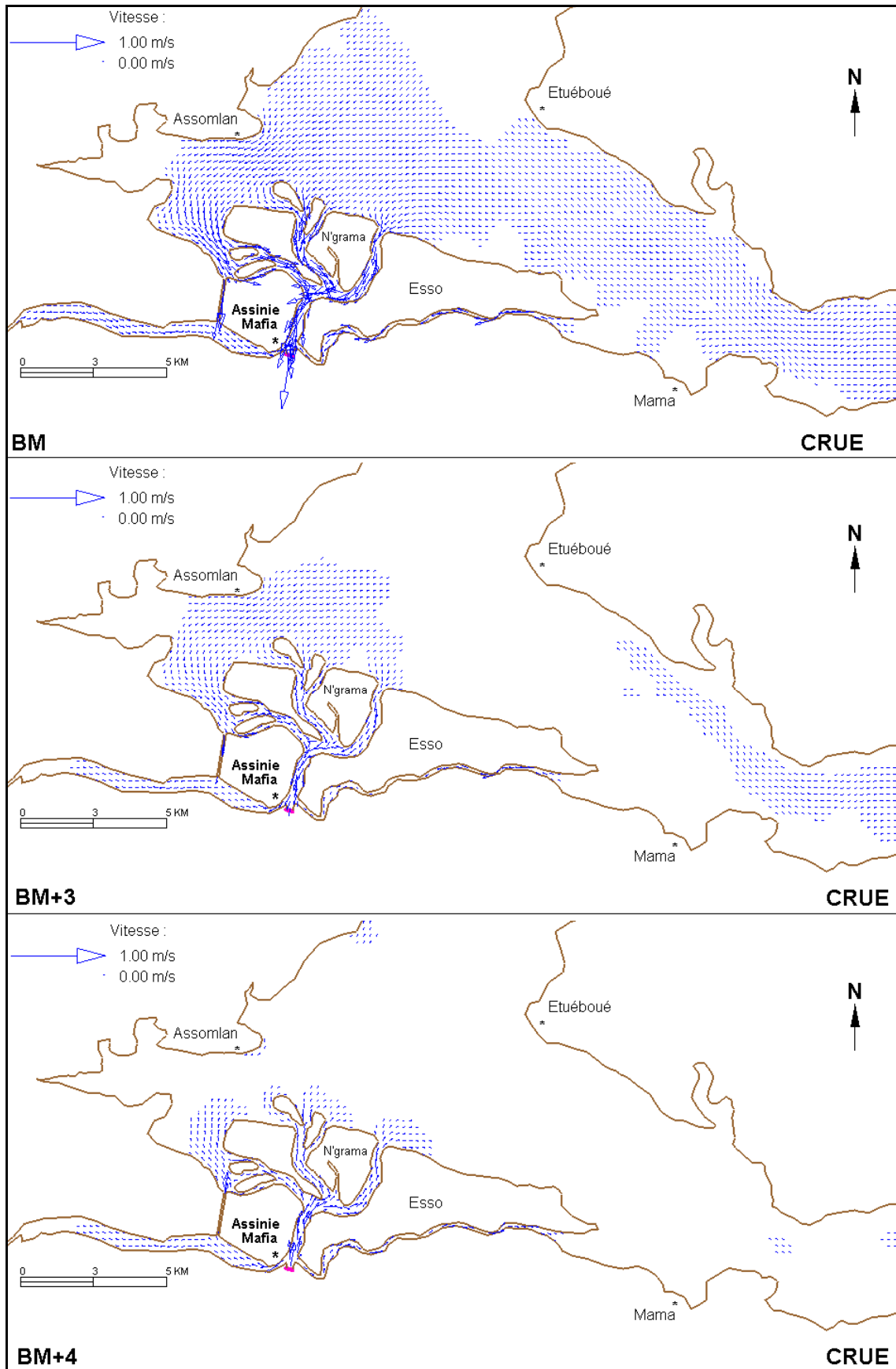


Figure 61b : Champs de courants à Assinie Mafia en crue et à bm, bm+3, bm+4

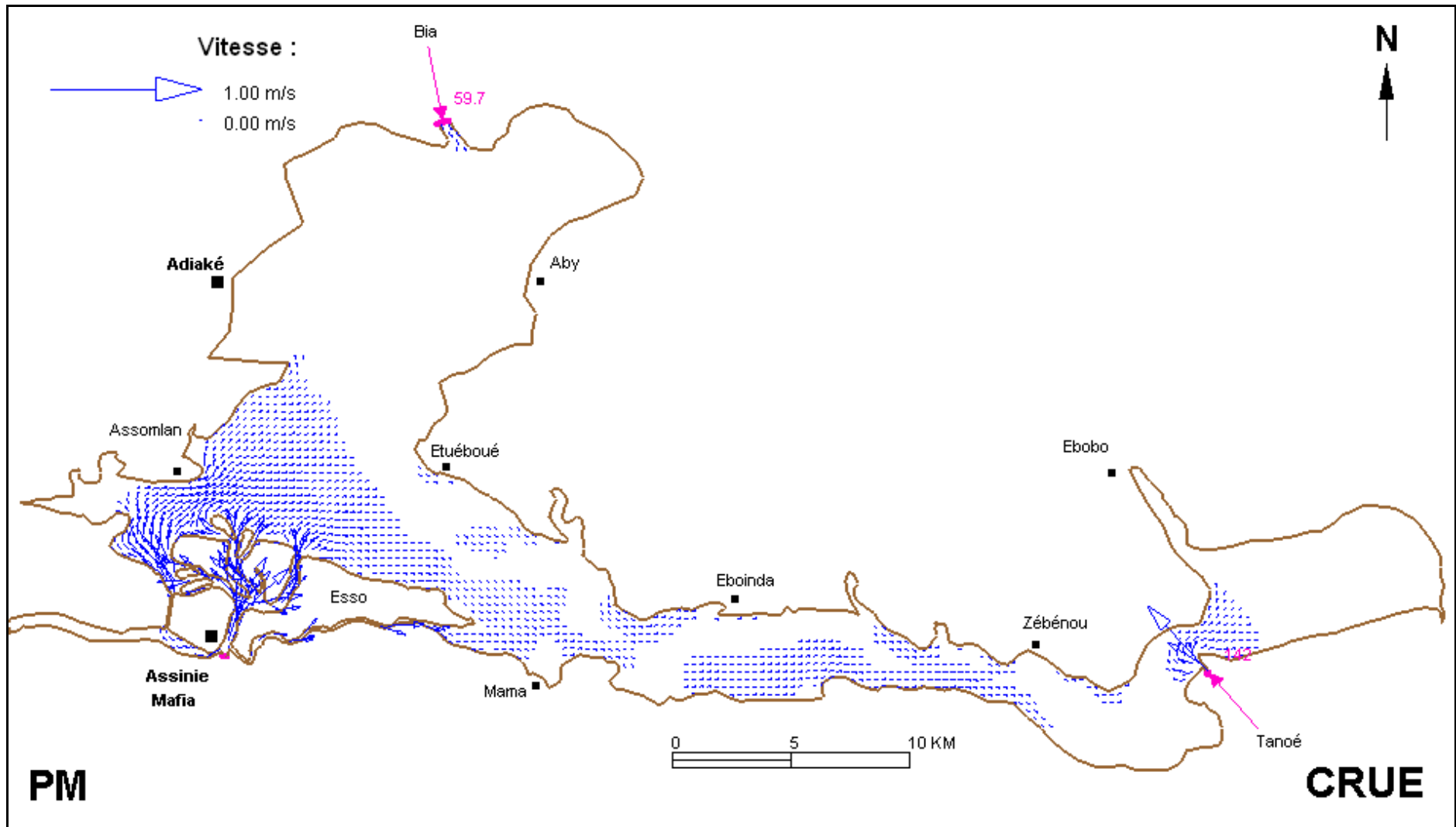


Figure 62 : Champs de courants dans le système Aby en crue et à pm

2.3.2.2. Variation du niveau de la surface d'eau en crue

L'onde de marée qui pénètre dans le système Aby au cours de la période de crue présente les caractéristiques suivantes (**Figure 63**) :

- à Adiaké, la pleine mer a atteint un niveau maximum de 1,09 m et la basse mer un niveau de 1,04 m. On en déduit un marnage de 0,03 m identique à celui simulé en période d'étiage. Le jusant a duré 6h30 comme en étiage. Quant au flot, il a duré $\frac{1}{4}$ d'heure de moins qu'en étiage, soit 5h ;

- à Eboinda, l'onde de marée a atteint un niveau maximal de 1,09 m et un niveau minimal de 1,05 m, ce qui correspond à un marnage de 0,04 m comme en étiage. Le jusant a duré 7h en crue, soit 1h de plus qu'en étiage. Quant au flot, il a duré $\frac{1}{4}$ d'heure de moins qu'en étiage, soit 5h.

Malgré une augmentation du niveau moyen du système lagunaire de l'ordre de 0,06 m en crue, le marnage a très peu varié. Il est resté identique à celui calculé en étiage.

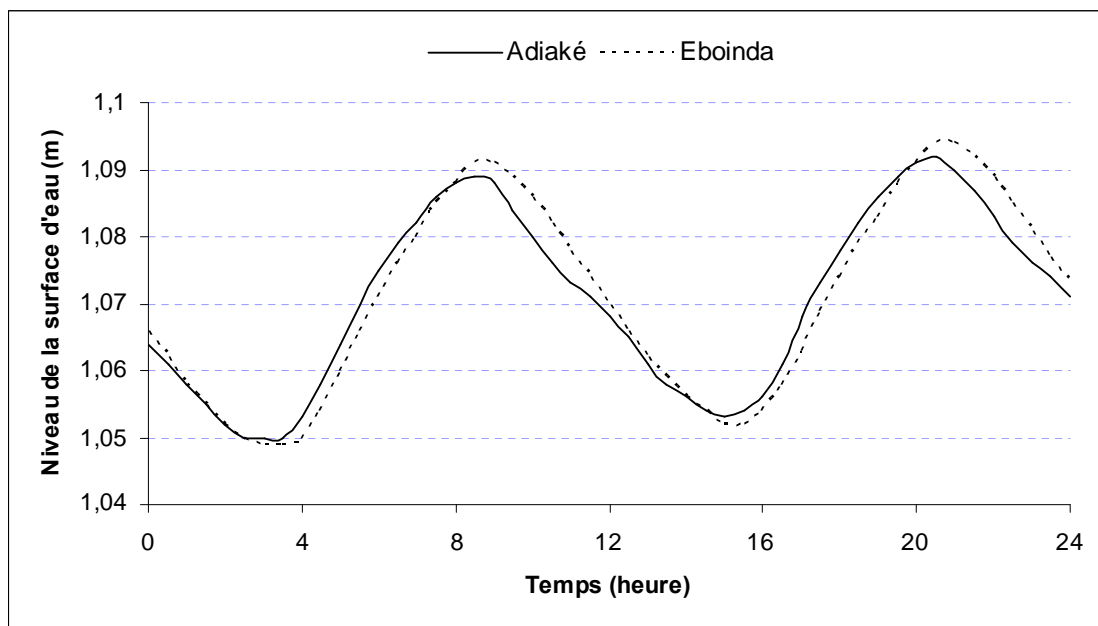


Figure 63 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le système Aby en crue

Comme en étiage, les variations du niveau de la surface d'eau entre la pm et la bm sont plus importantes dans les chenaux d'Assinie que partout ailleurs dans le reste du système lagunaire Aby (**Figure 64**). En effet, le niveau de la surface d'eau a varié entre 0,74 et 1,25 m. On en déduit un marnage de 0,51 m. Le marnage a donc baissé de 1 mm en période de crue dans ce chenal.

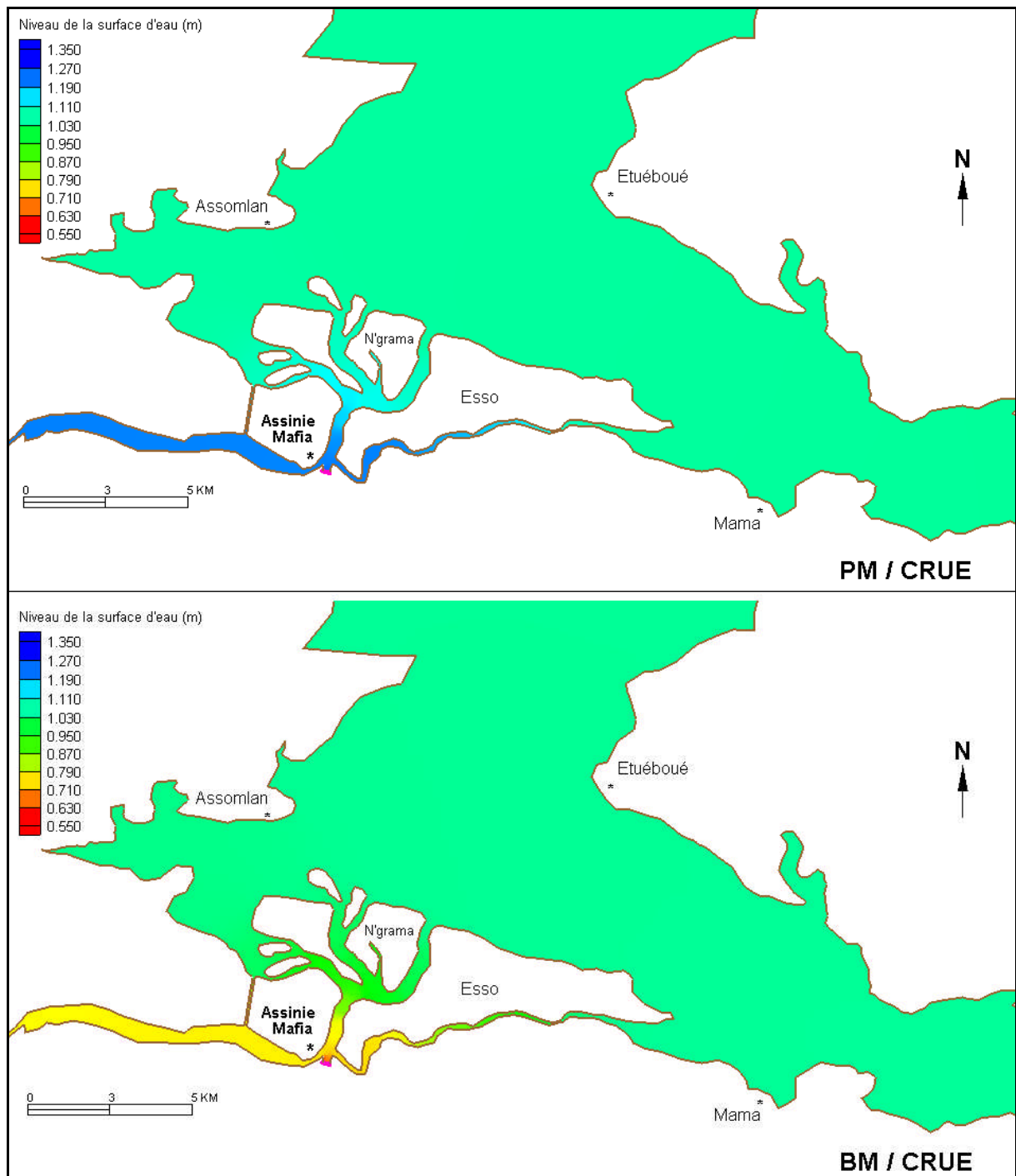


Figure 64 : Niveau de la surface d'eau dans les chenaux d'Assinie en crue

2.3.2.3. Bilan de masses et temps de renouvellement des eaux en crue

L'évolution temporelle des flux échangés entre lagune et mer en période de crue est représentée sur la **figure 65**. Le débit moyen ($-212 \text{ m}^3/\text{s}$) a varié entre un débit maximum entrant de $+940 \text{ m}^3/\text{s}$ et un débit maximum sortant de $-1160 \text{ m}^3/\text{s}$. Les débits entrants sont donc inférieurs aux débits sortants.

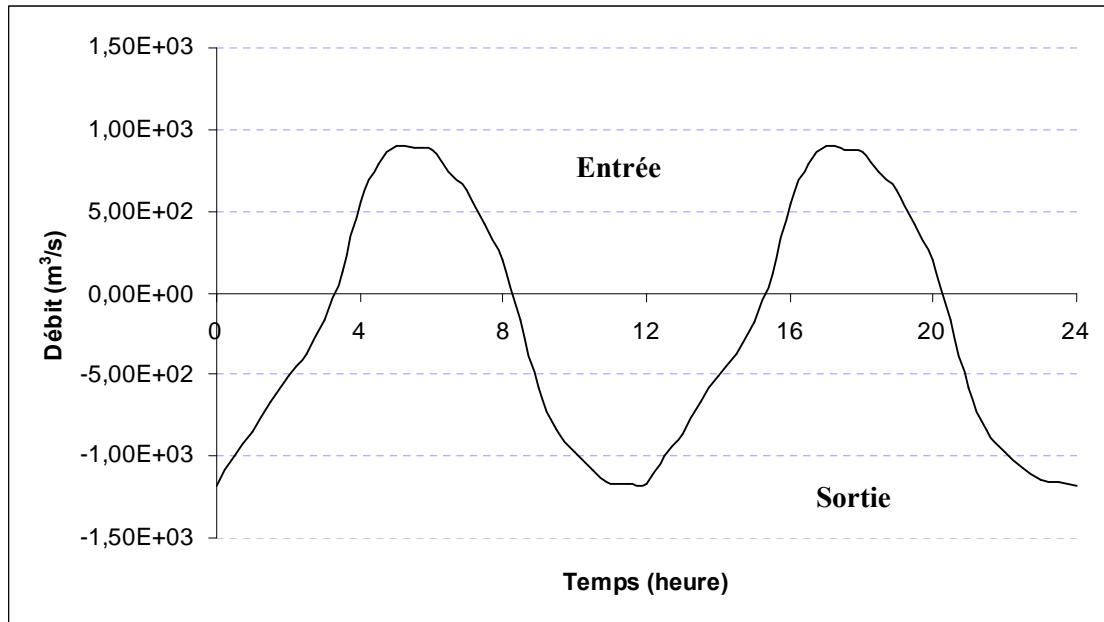


Figure 65 : Evolution temporelle des débits à Assinie en période de crue

Le volume d'eau sortant par jour de la lagune est resté inchangé en période de crue, il est égal à 40.10^6 m^3 comme en étiage, car le volume moyen ($1,80.10^9 \text{ m}^3$) a varié au maximum entre $1,79.10^9 \text{ m}^3$ et $1,81.10^9 \text{ m}^3$ (**Figure 66**). Le temps de renouvellement des eaux obtenu en crue est de 45 jours. Il est proche de celui calculé en étiage et qui est de 44,3 jours.

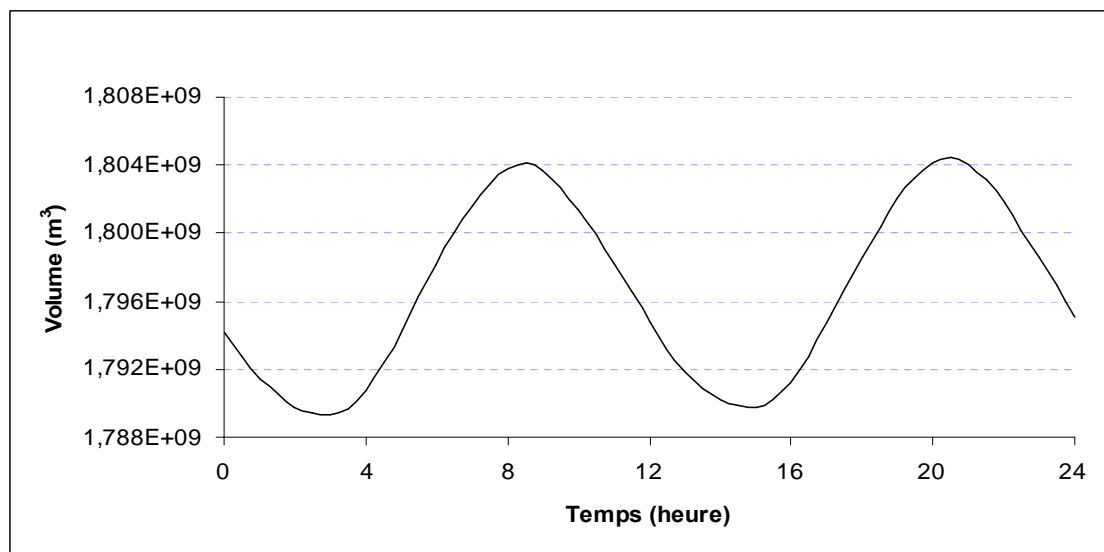


Figure 66 : Evolution temporelle des volumes à Assinie en période de crue

2.4. Fonctionnement hydrodynamique du canal d'Assagny

2.4.1. Fonctionnement en période d'étiage

2.4.1.1. Champs de courants en étiage

L'évolution des masses d'eau dans le canal d'Assagny, au cours du cycle de marée pm/bm/pm, est représentée sur la **figure 67**. De pm à pm+3 les champs de courants sont dirigés vers l'Est. Les masses d'eau s'écoulent donc en direction du système Ebrié. Les courants s'inverseront à pm+4 dans le canal, soit une heure après la renverse des courants de flot à Grand-Lahou (pm+3). Les masses d'eau s'écoulent en sens inverse et en direction du fleuve Bandama. Le jusant, qui atteint son maximum à bm, va durer jusqu'à bm+3 puisqu'à bm+4, les champs de courants s'orientent vers Ebrié. Les courants sont donc alternatifs en période d'étiage.

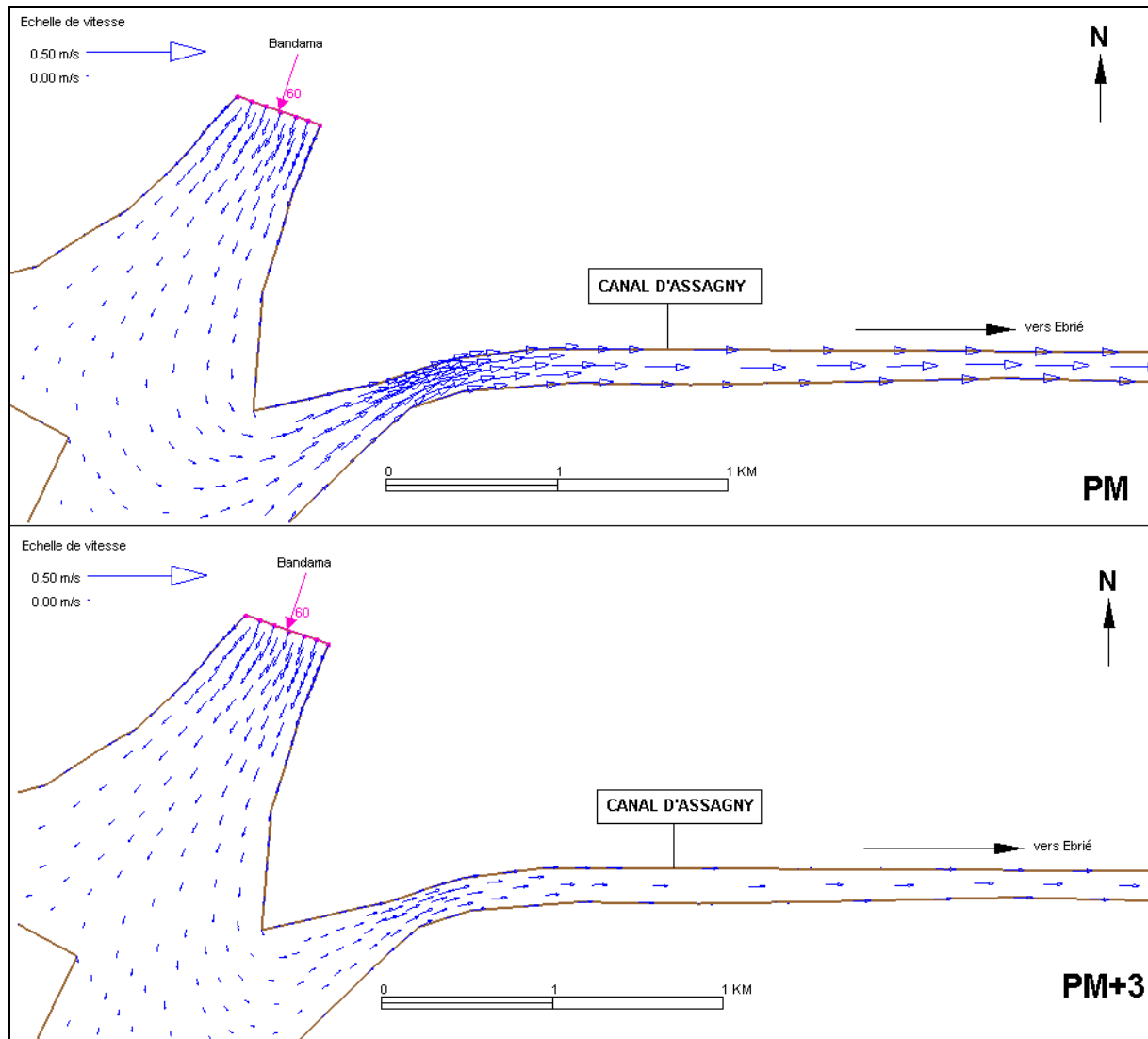


Figure 67a : Champs de courants dans le canal d'Assagny en étiage et à pm, pm+3

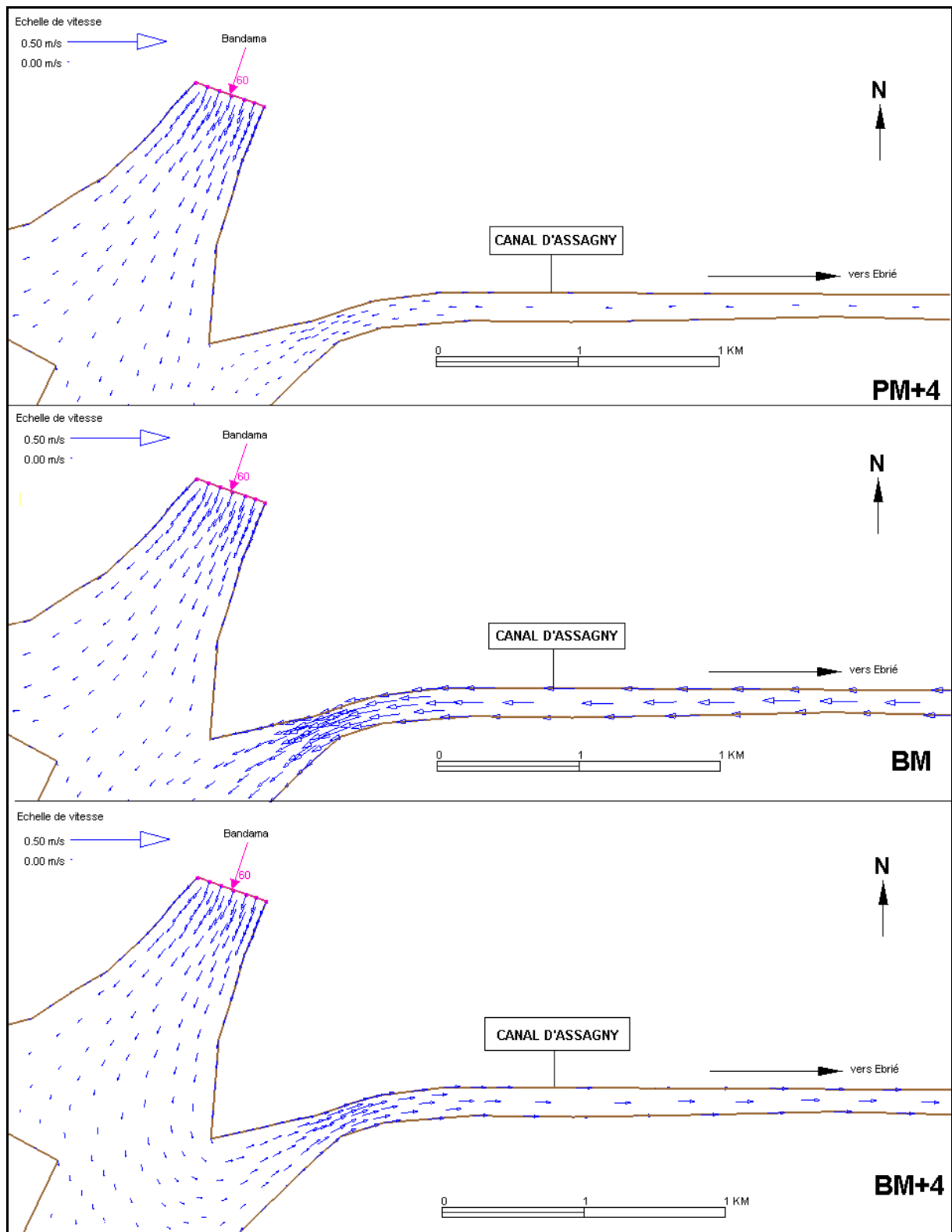


Figure 67b : Champs de courants dans le canal d'Assagny en étiage et à pm+4, bm, bm+4

2.4.1.2. Variation du niveau de la surface d'eau en étiage

Deux points (Figure 25, page 56) ont été choisis dans le canal d'Assagny pour analyser la variation du niveau de la surface d'eau. Ce sont les stations de Noumouzou et Amessandon situées à la même profondeur (2,5 m) et respectivement à 4 km et 13 km de l'exutoire du fleuve Bandama en lagune. L'évolution temporelle du niveau de la surface d'eau est illustrée par la **figure 68** :

- l'onde de marée est sinusoïdale à Noumouzou et elle varie entre 0,97 et 1,10 m. Le marnage est égal à 0,13 m. La pm se produit à 6h30, soit $\frac{1}{4}$ d'heure après la pm à Grand-Lahou (6h). Le jusant et le flot ont duré respectivement 7h et 5h à Noumouzou ;
- du côté d'Amessandon, la hauteur d'eau a oscillé entre 0,99 et 1,06 m, ce qui représente un marnage de 0,07 m. La pm se produit à 9h à Amessandon, soit 2h après la pm à Noumouzou et 3h après la pm à Grand-Lahou. Le jusant a duré 7h et le flot, 5h.

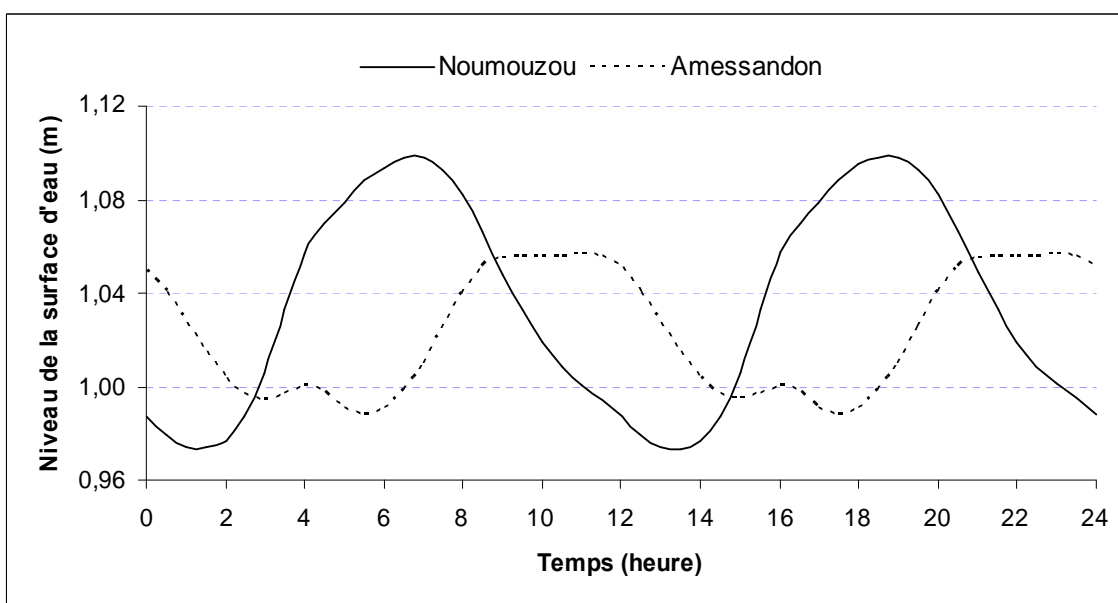


Figure 68 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le canal d'Assagny en étiage

2.4.1.3. Relation entre vitesse et niveau d'eau en étiage

Les **figures 69** et **70** illustrent l'évolution des vitesses de courants en relation avec le niveau d'eau dans le canal. Les vitesses évoluent en dents de scie et montrent deux pics caractérisant une pénétration des eaux en deux phases sur le cycle de marée pm/bm/pm :

- à Noumouzou, les pics de vitesse se situent à 0,22 m/s et sont observés à la pm locale. Le second pic de vitesse (0,19 m/s) coïncide avec la bm locale (**Figure 69**) ;
- à Amessandon, on observe un déphasage entre le niveau d'eau et les vitesses. Les vitesses sont presque nulles ($\sim 0,01$ m/s) à la pm locale (qui a duré environ 3h) et maximales (0,22 m/s) à la bm locale (**Figure 70**).

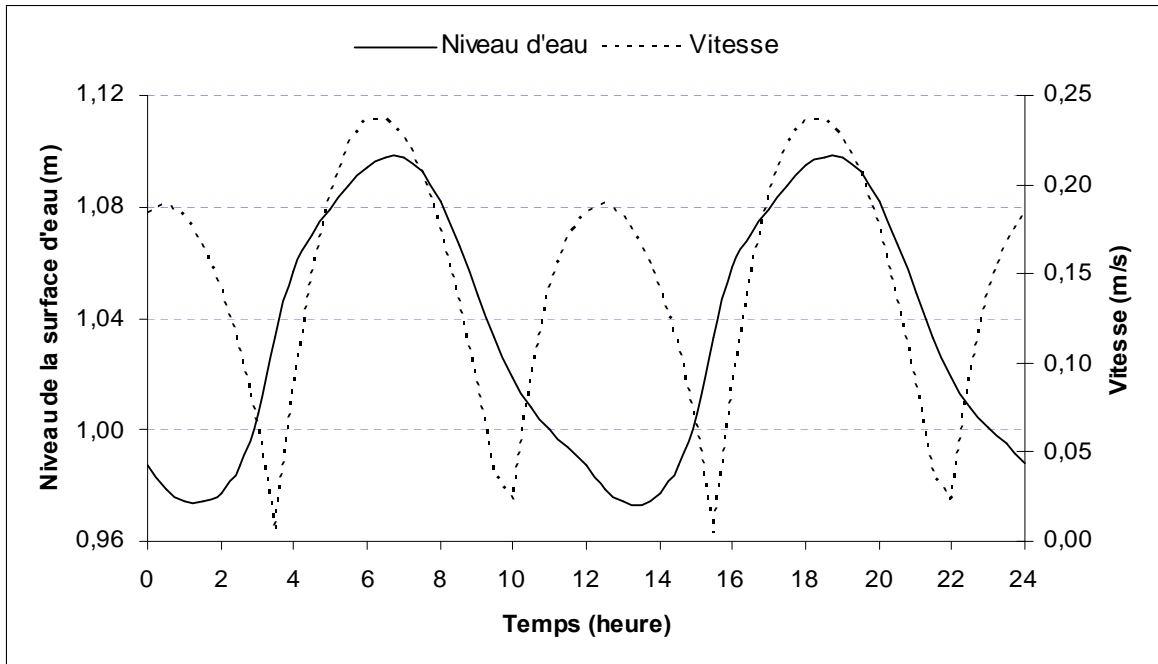


Figure 69 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Noumouzou en étiage

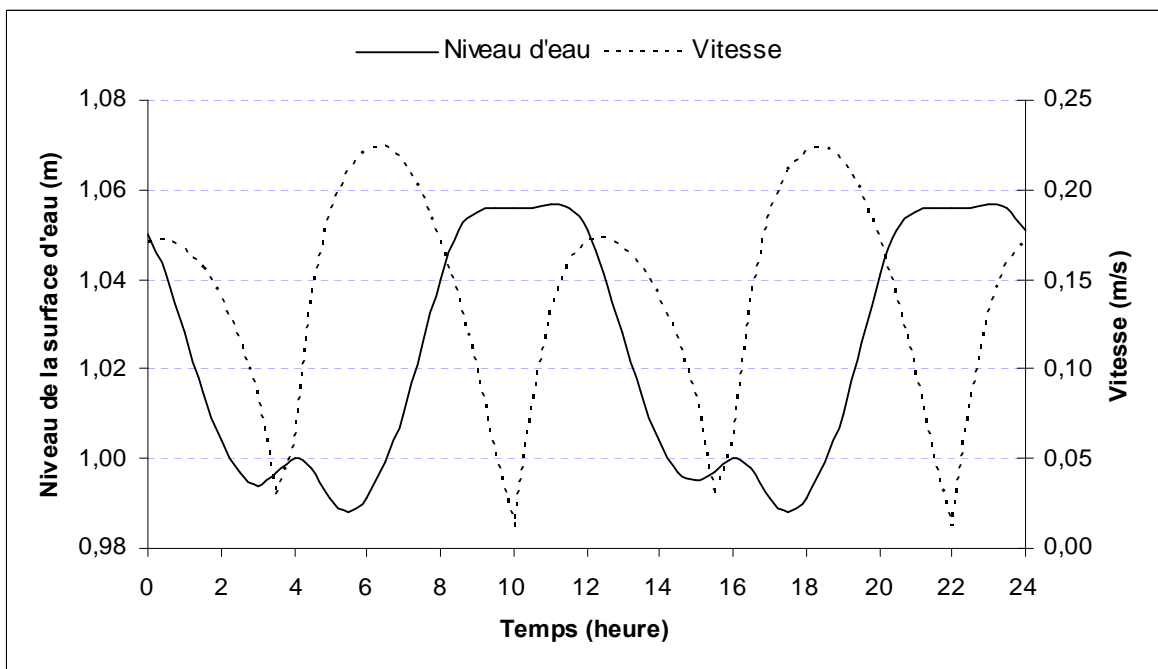


Figure 70 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Amessandon en étiage

2.4.2. Fonctionnement en période de crue

2.4.2.1. Champs de courants en crue

L'analyse des champs de courants en période de crue dans le canal d'Assagny montre les mouvements suivants (**Figure 71**) :

- de pm à pm+5, les courants sont dirigés vers l'Est, malgré la renverse des courants de flot à pm+2 à Grand-Lahou (**Figure 41a, page 84**) ;
- entre la bm et bm+1, les vitesses sont presque nulles et les masses d'eau sont stagnantes dans le canal ;
- à partir de bm+2, des champs de courants réapparaissent mais sont dirigés vers le système Ebrié. Les masses d'eau s'écoulent donc vers le système lagunaire Ebrié.

Le mouvement alternatif des masses d'eau observé en étiage disparaît en période de crue. Les courants sont presque toujours dirigés vers le système Ebrié : ils sont unidirectionnels.

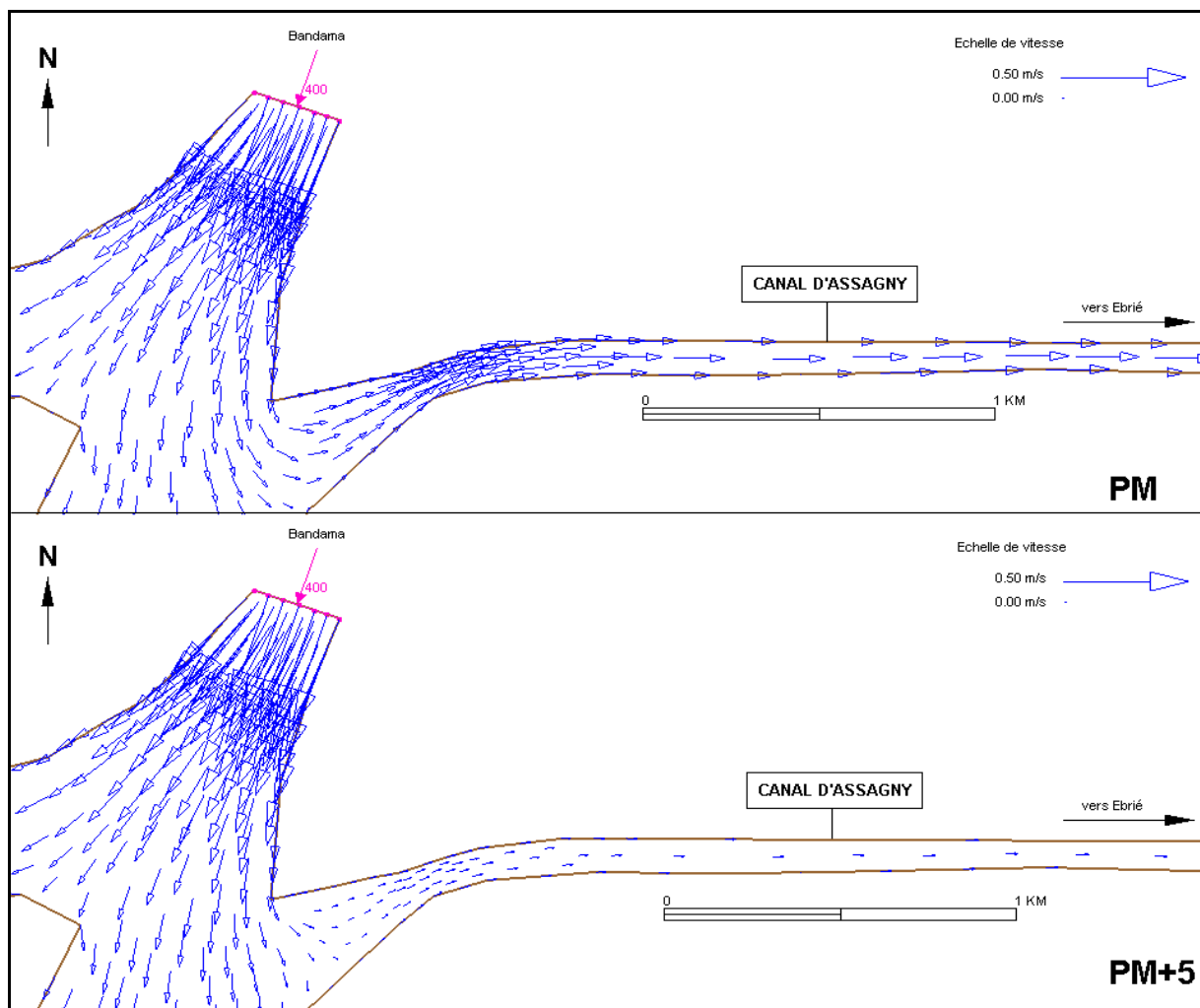


Figure 71a : Champs de courants dans le canal d'Assagny en crue et à pm, pm+5

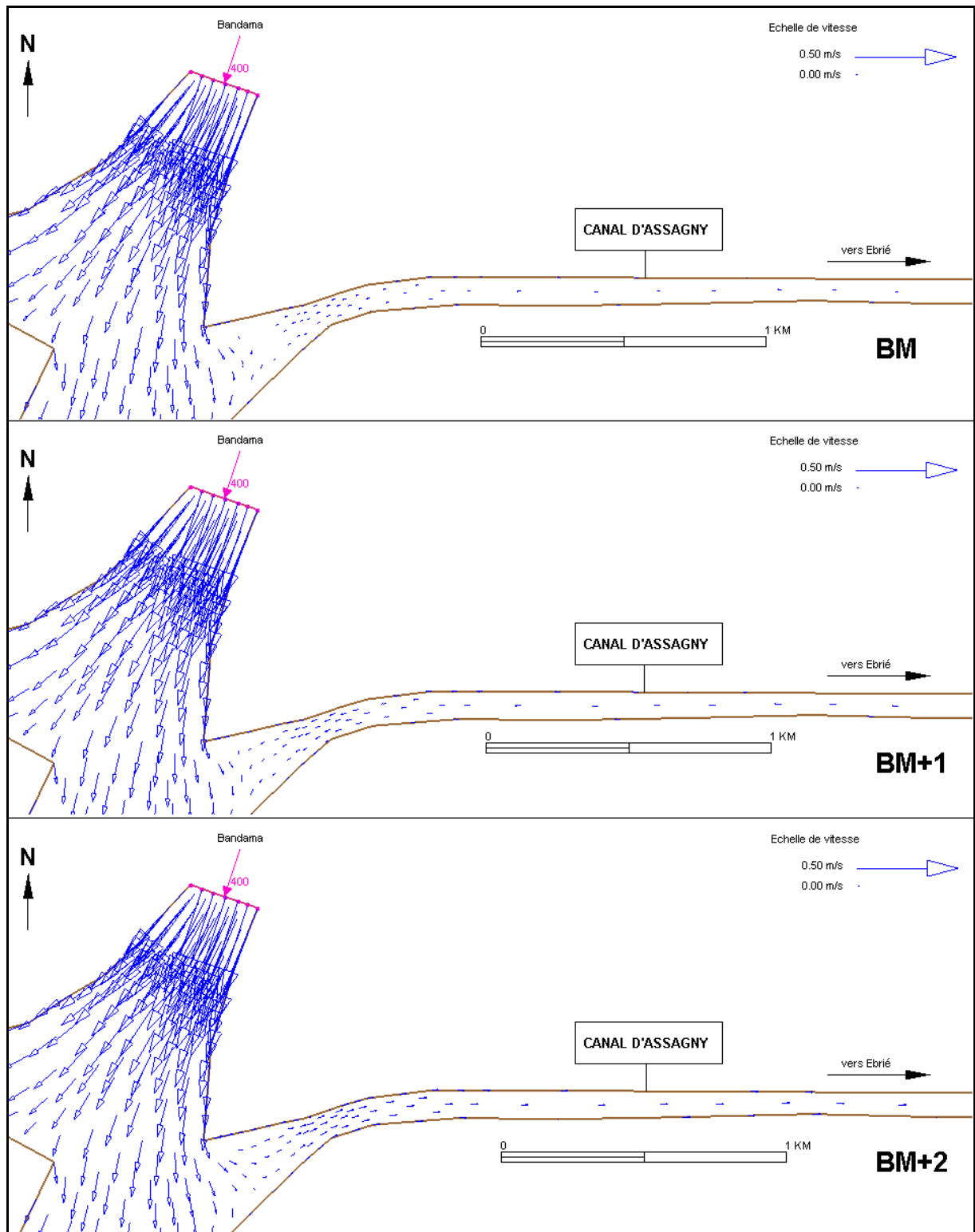


Figure 71b : Champs de courants dans le canal d'Assagny en crue et à bm, bm+1, bm+2

2.4.2.2. Variation du niveau de la surface d'eau en crue

Les hauteurs d'eau présentent une allure sinusoïdale (**Figure 72**) :

- à Noumouzou, le niveau de la pm passe de 1,10 m en étiage à 1,11 m en crue et celui de la bm de 0,97 m en étiage à 1,02 m en crue. On observe donc, une augmentation de 0,01 m du niveau de la pm et de 0,05 m de celui de la bm. On en déduit un marnage plus faible en crue de l'ordre 0,09 m qu'en étiage (0,13 m). Le jusant a duré 7h30 et le flot 4h30 ;
- à Amessandon, la pm présente une longue étale d'environ 2h. Le niveau d'eau a varié au maximum entre 1,03 et 1,10 m, soit un marnage de 0,07 m comme en étiage. Le niveau de la pm et le niveau de la bm a augmenté de 0,04 m en période de crue. Quant au marnage, il a diminué de 1 cm en crue. Le flot et le jusant ont duré respectivement 5h30 et 8h.

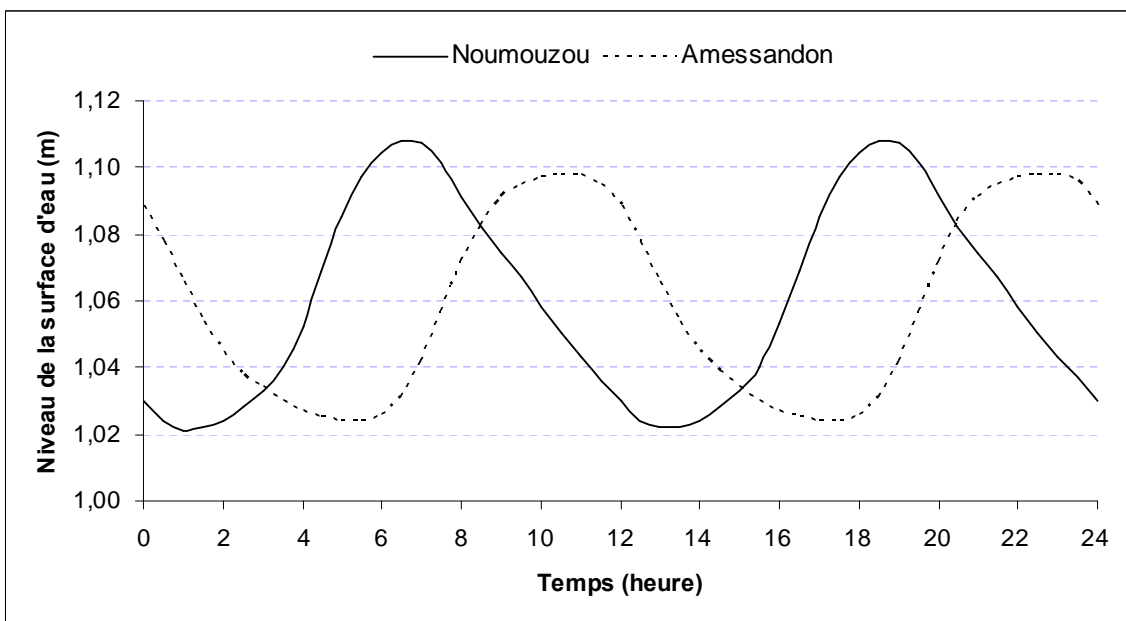


Figure 72 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le canal d'Assagny en crue

2.4.2.3. Relation entre vitesse et niveau d'eau en crue

La courbe de vitesse à Noumouzou montre deux pics de vitesse d'importance très inégale. Le premier pic est à 0,26 m/s, il coïncide avec la pm à Noumouzou. Le second pic de vitesse est nul et se confond avec la bm locale (**Figure 73**). L'évolution des vitesses de courants semble suivre celle des niveaux de la surface d'eau.

A Amessandon (**Figure 74**), le déphasage entre la courbe de vitesse et la courbe de niveau de la surface d'eau s'accroît pendant la période de crue. La pm locale étant de plus en plus retardée. La vitesse maximale (0,25 m/s) est simulée à bm.

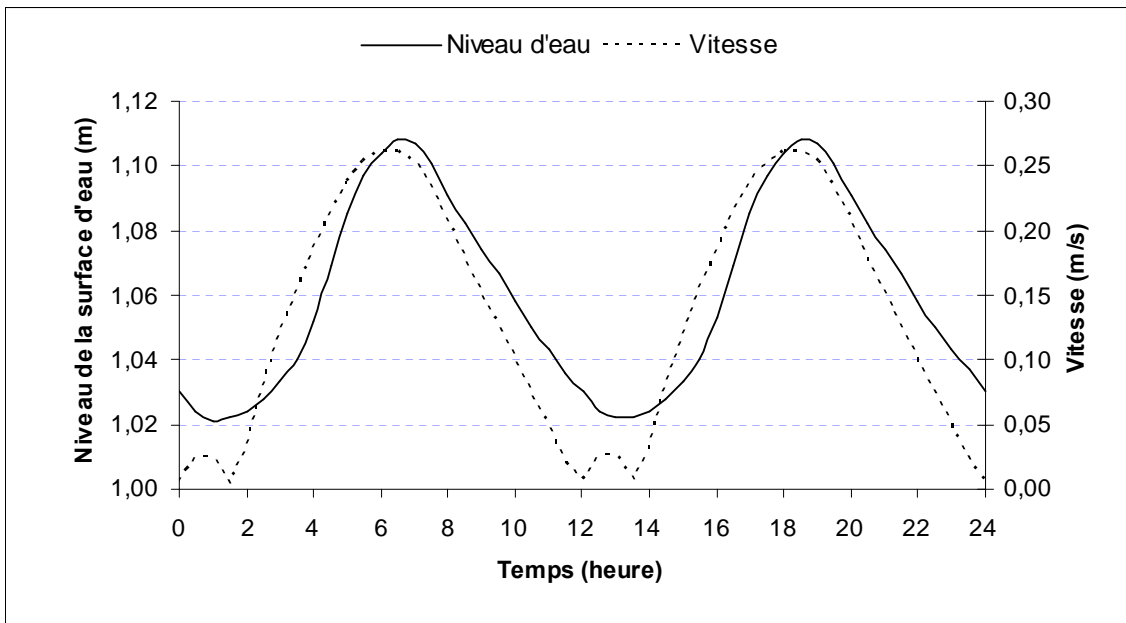


Figure 73 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Noumouzou crue

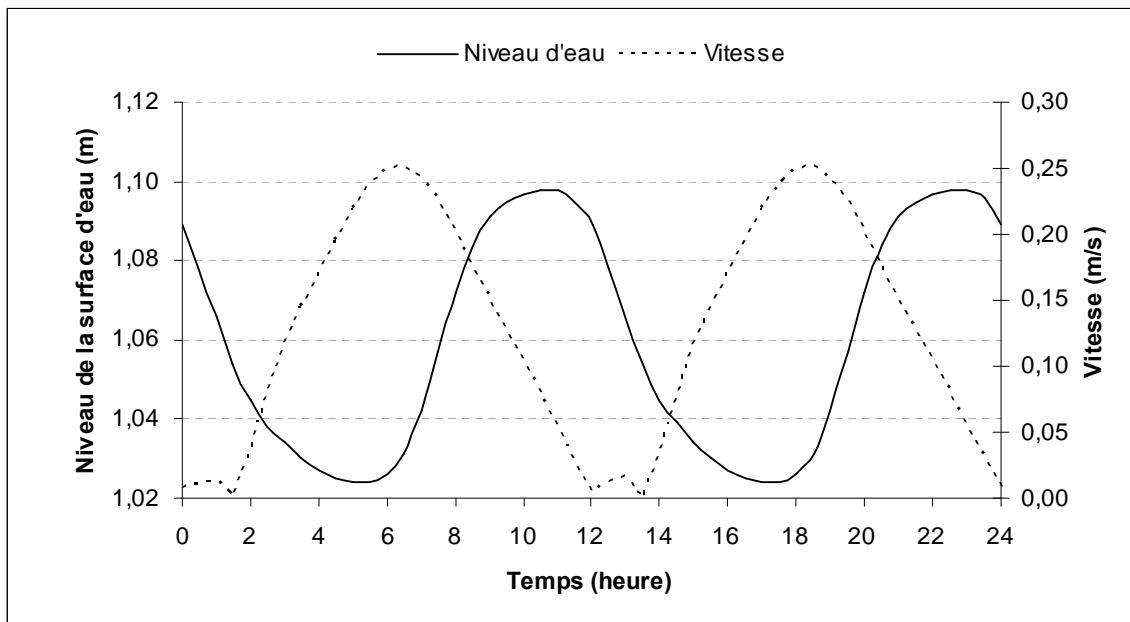


Figure 74 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Amessandon en crue

2.5. Fonctionnement hydrodynamique du canal d'Assinie

2.5.1. Fonctionnement en période d'étiage

2.5.1.1. Champs de courants en étiage

Sur la **figure 75**, on présente l'évolution des champs de courants dans le canal d'Assinie pendant l'étiage. De pm à pm+2, les masses d'eau vont vers l'Ouest en direction de Grand-Bassam. Les vecteurs vitesses s'inversent de 180° à pm+3 et le mouvement des masses se fait vers le système Aby. Ce mouvement de sortie des eaux du canal vers Assinie atteint son maximum à bm. A partir de bm+3, les masses d'eau vont re-évoluer vers Grand-Bassam. Les courants sont donc alternatifs en période d'étiage dans le canal d'Assinie.

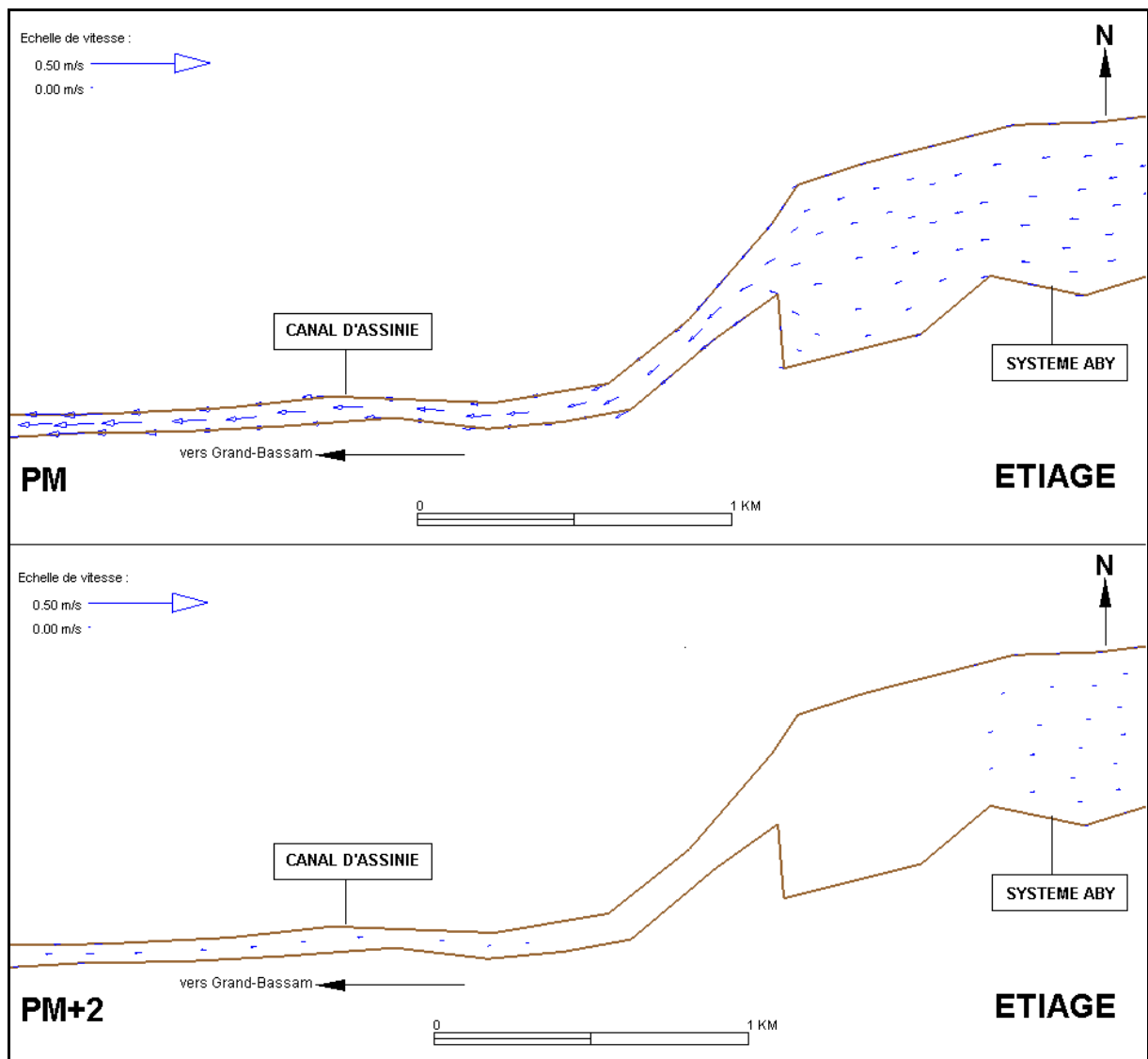


Figure 75a : Champs de courants dans le canal d'Assinie en étiage et à pm, pm+2

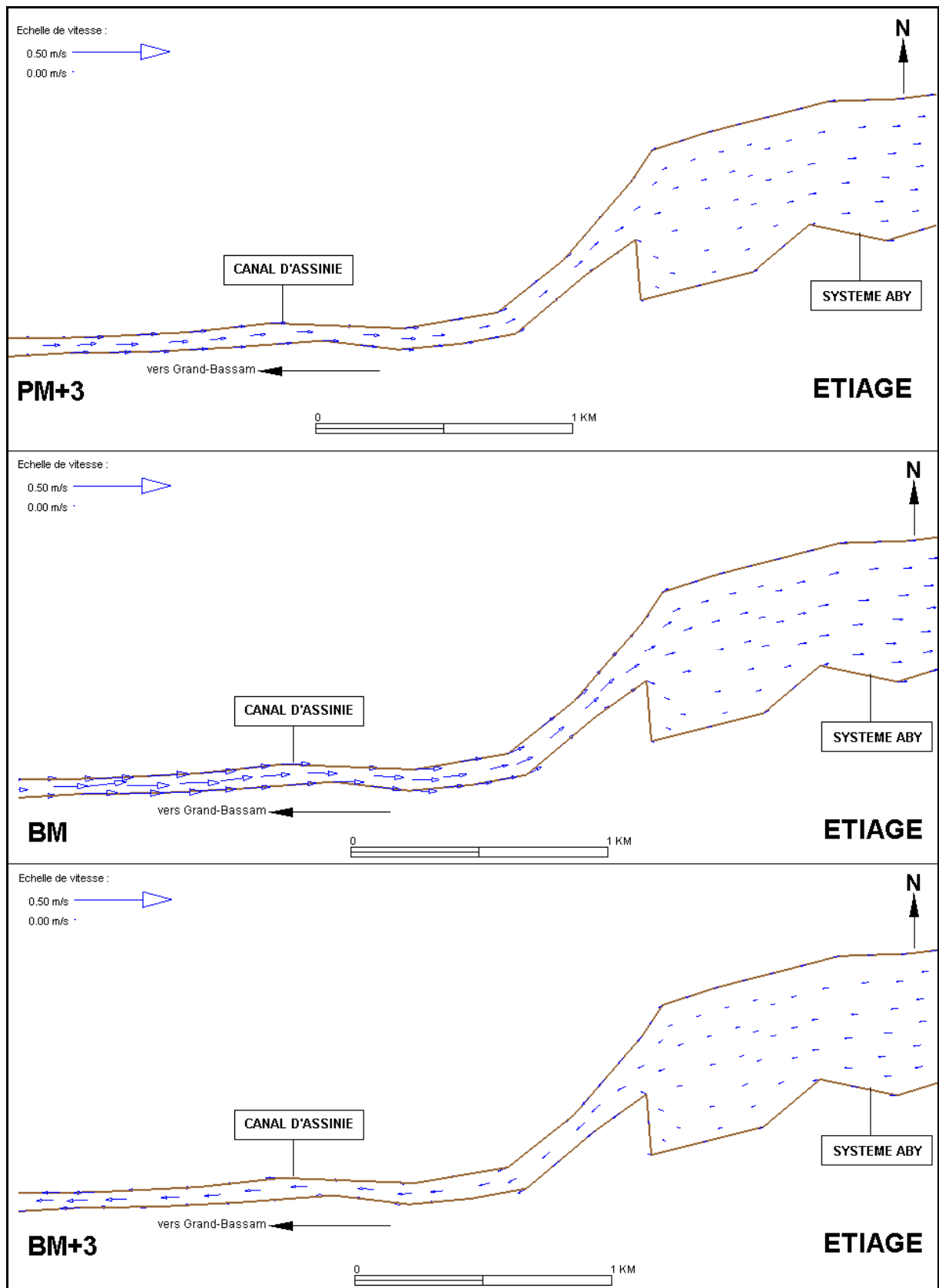


Figure 75b : Champs de courants dans le canal d'Assinie en étiage et à pm+3, bm, bm+3

2.5.1.2. Variation du niveau de la surface d'eau en étiage

L'étude de la variation des hauteurs d'eau dans le canal d'Assinie s'est faite au niveau des stations de Moamé et d'Asséoufoué situées respectivement à 30 et 44 km de la passe d'Assinie (**Figure 26, page 57**). L'allure de l'onde de marée est sinusoïdale à Moamé et sub-sinusoïdale à Asséoufoué (**Figure 76**). Elle est déformée lors de sa propagation dans le canal :

- à Moamé, le niveau d'eau a atteint 1,13 et 0,88 m respectivement à pm et à bm. On en déduit un marnage de 0,25 m. Le jusant dure 6h30 et le flot 5h30 ;
- le marnage à Asséoufoué est de l'ordre de 0,19 m, car le niveau de la surface d'eau a atteint 1,11 m à pm et 0,92 m à bm. Le jusant a duré 6h et le flot, 5h30.

L'onde de marée met 1h30 pour atteindre Moamé et 3h pour arriver à Asséoufoué. L'onde de marée met donc 1h30 pour aller de Moamé à Asséoufoué.

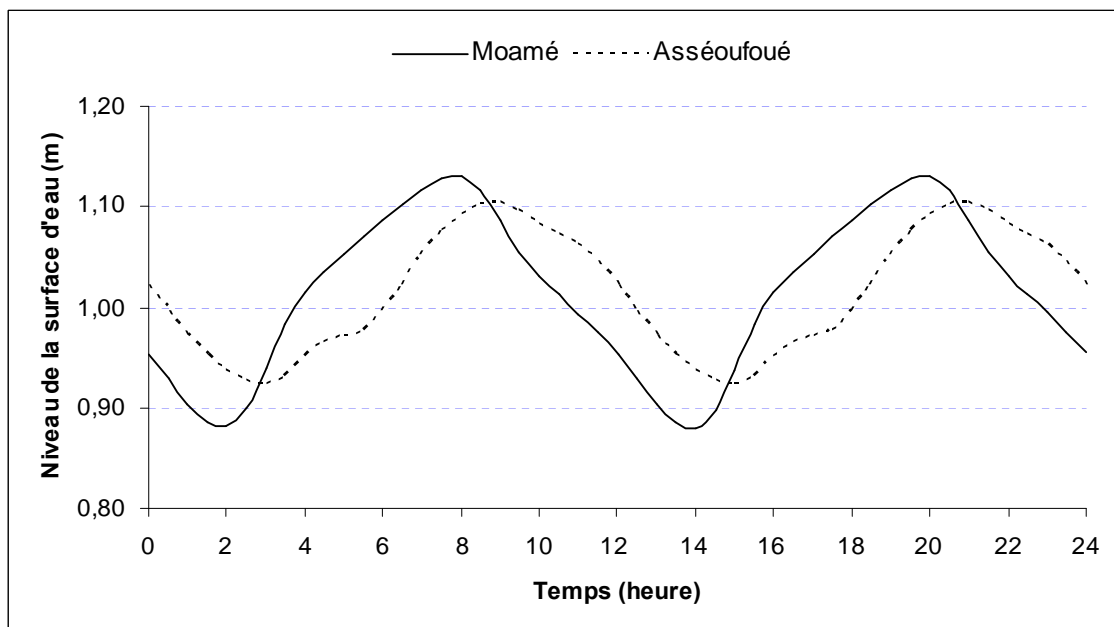


Figure 76 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le canal d'Assinie en étiage

2.5.1.3. Relation entre vitesse et niveau d'eau en étiage

Les **figures 77 et 78** soulignent le retard entre les courbes de vitesses et celles du niveau de la surface d'eau respectivement à Moamé et à Asséoufoué :

- à Moamé, le premier pic de vitesse de l'ordre de 0,17 m/s est observé à 1h30 avant la pm locale (1,13 m). Le deuxième pic d'amplitude 0,18 m/s est calculé à 1h30 avant la bm (0,88 m) locale (Figure 77) ;
- du côté d'Asséoufoué, la courbe de vitesse présente une longue étale de 3h30. La vitesse est de l'ordre de 0,09 m/s pendant le jusant qui a duré 6h. Les vitesses sont nulles à pm (Figure 78).

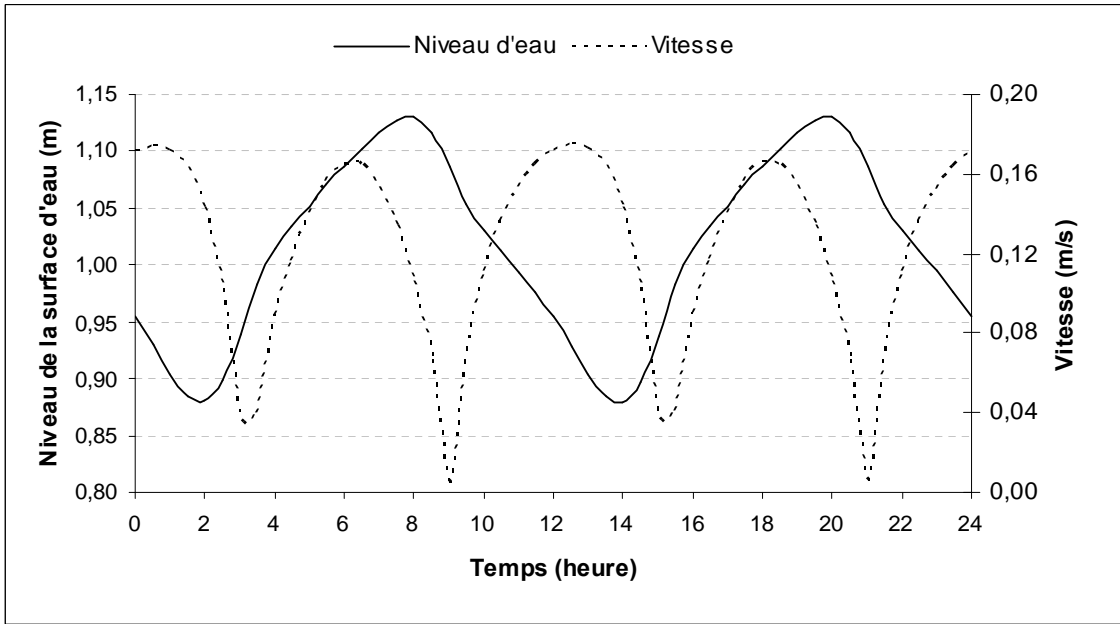


Figure 77 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Moamé en étiage

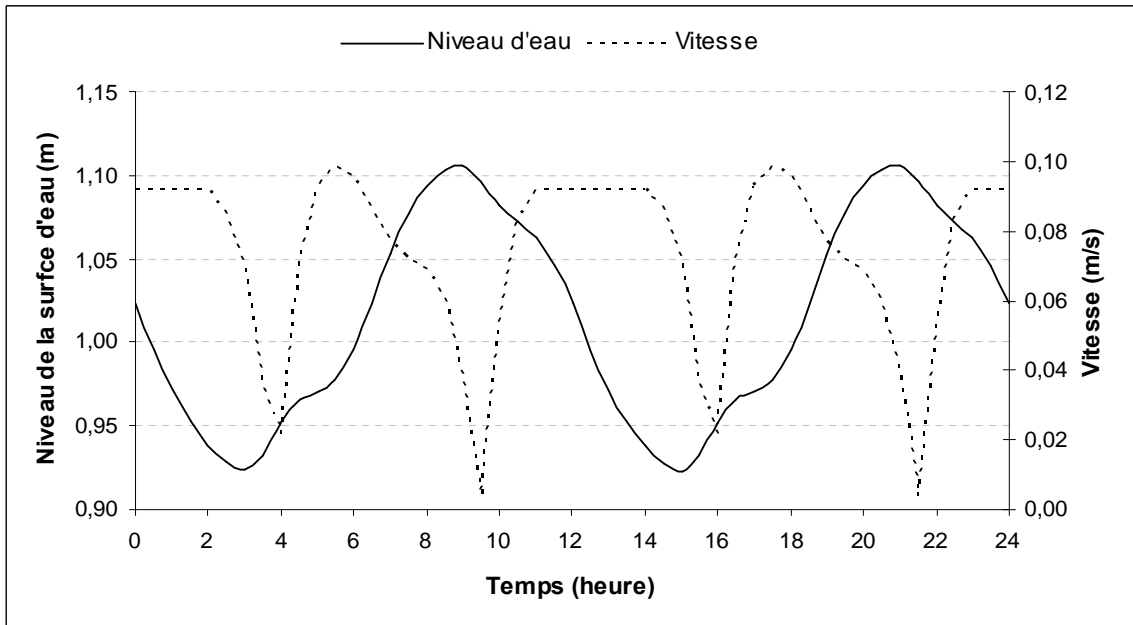


Figure 78 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Asséfoué en étiage

2.5.2. Fonctionnement en période de crue

2.5.2.1. Champs de courants en crue

Par comparaison avec l'évolution des masses d'eau en période d'étiage dans le canal d'Assinie, on présente en période de crue les champs de courants simulés à pm, pm+2, pm+3, bm et bm+3 sur la **figure 79**. Il ressort que les champs de courants dans le canal sont toujours orientés vers le système lagunaire Aby. Les courants sont unidirectionnels et les masses d'eau en période de crue évoluent constamment vers la passe d'Assinie. Les champs de courants à pm sont de faible amplitude par rapport à ceux de la bm. Les courants fluviaux s'opposent aux courants de flot, tandis qu'ils renforcent les courants de jusant.

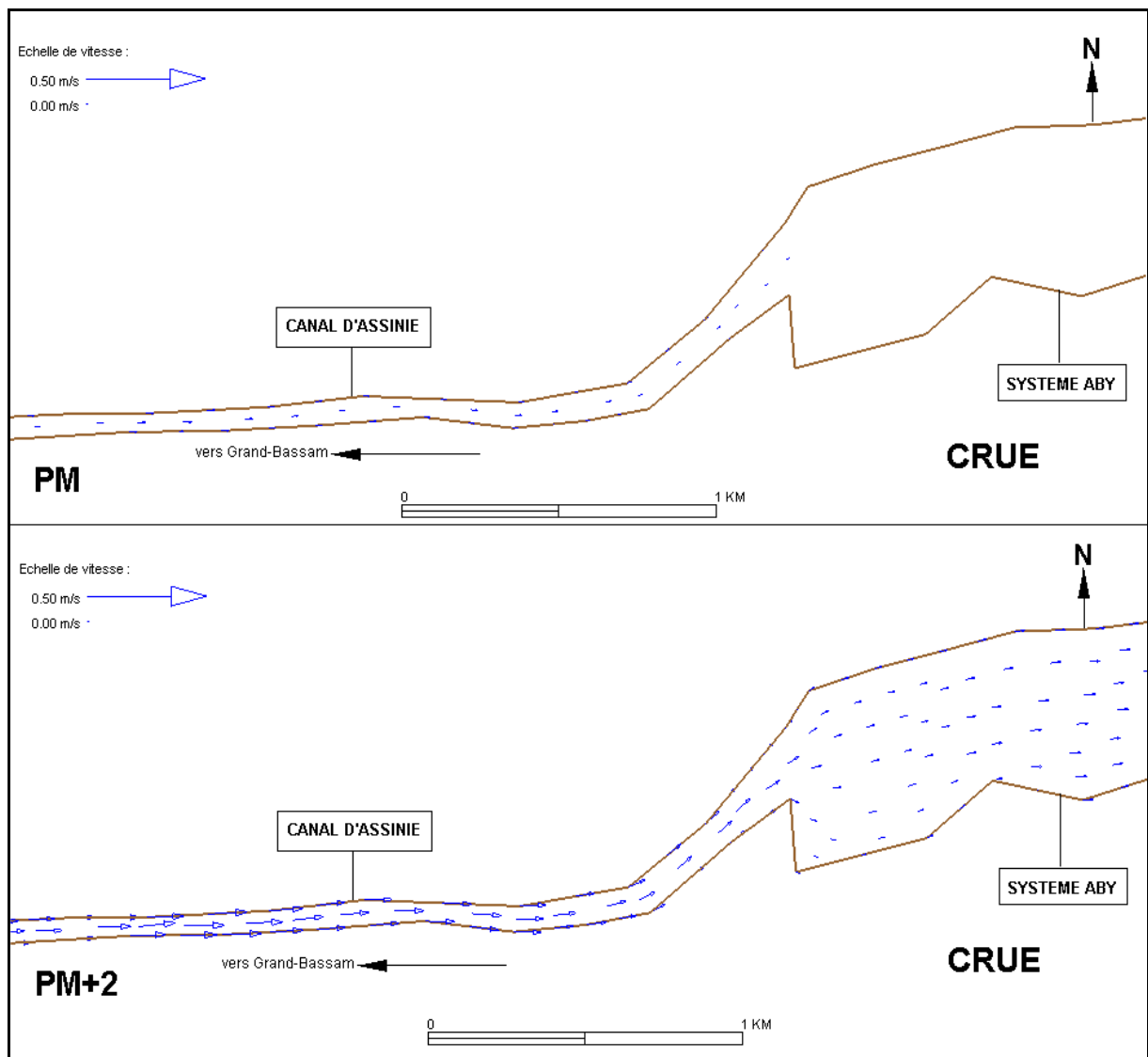


Figure 79a : Champs de courants dans le canal d'Assinie en crue et à pm, pm+2

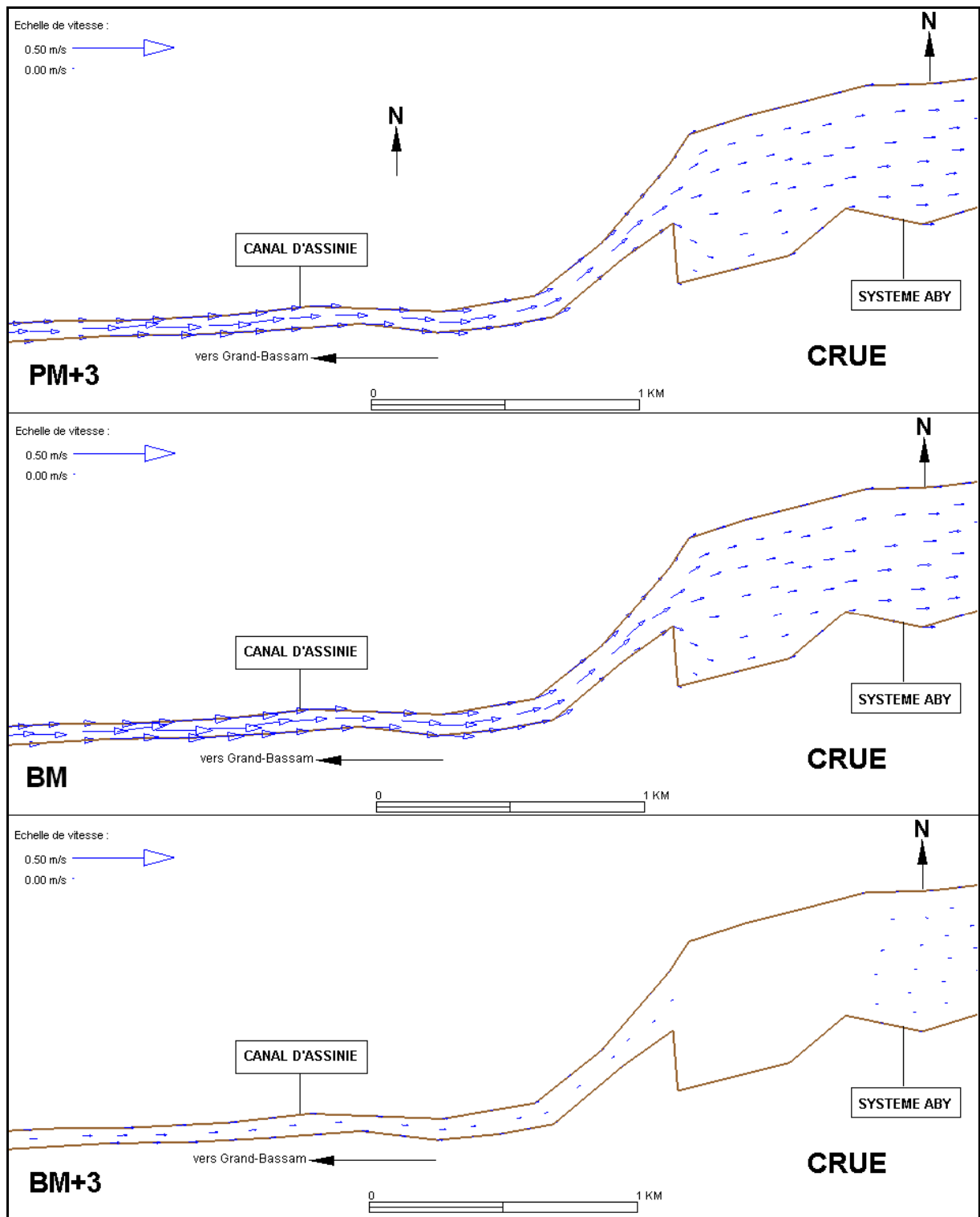


Figure 79b : Champs de courants dans le canal d'Assinie en crue et à pm+3, bm, bm+3

2.5.2.2. Variation du niveau de la surface d'eau en crue

L'évolution du niveau de la surface d'eau dans le canal d'Assinie au cours de la période de crue est illustrée sur la figure (**Figure 80**) :

- le niveau de la pm a augmenté de 0,14 m à Moamé et celui de la bm de 0,20 m pendant la crue. Le marnage est passé de 0,25 m en étiage à 0,19 m en crue, soit une diminution de 0,06 m. La durée du flot a été réduite de 1h, car elle est passée de 5h30 en étiage à 4h30 en crue. En revanche, celle du jusant a été prolongée de 1h30, soit 8h en crue contre 6h30 en étiage ;
- le niveau de la surface d'eau à Asséoufoué a varié entre 1,22 et 1,14 m, ce qui correspond à un marnage de 0,08 m. Le marnage a donc baissé de 0,11 m en crue. Le flot à cette station a eu la même durée qu'en étiage, soit 5h30. Quant au jusant, il a duré $\frac{1}{4}$ d'heure de plus en crue, soit 6h30.

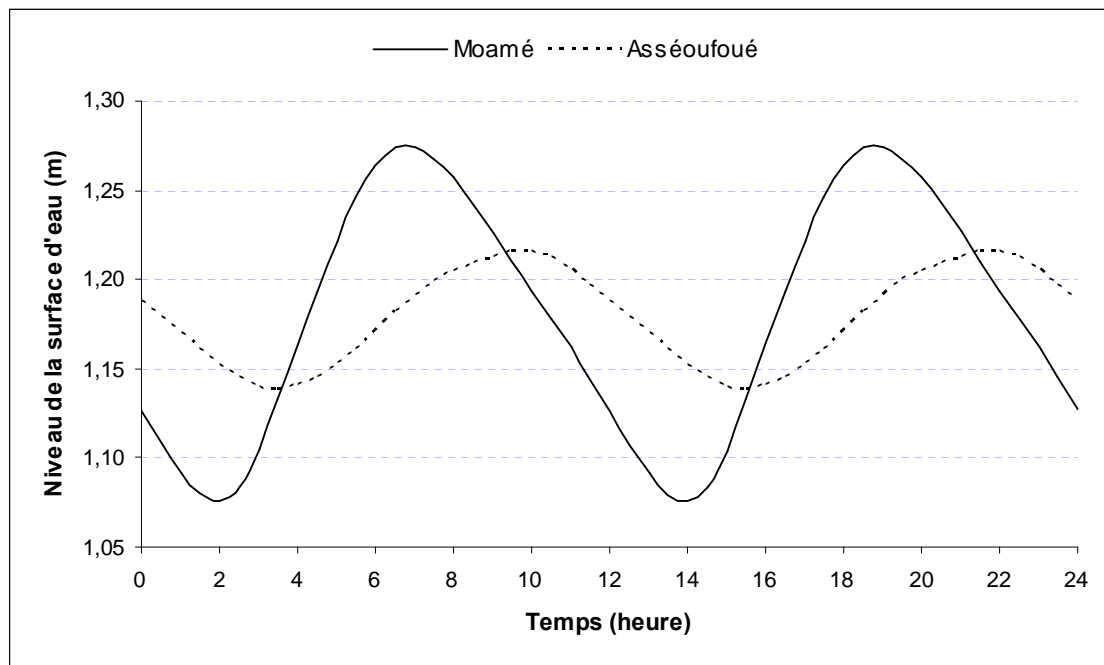


Figure 80 : Variation temporelle du niveau d'eau dans le canal d'Assinie en crue

2.5.2.3. Relation entre vitesse et niveau d'eau en crue

Sur le cycle de marée pm/bm/pm, les courbes de vitesses et de niveau d'eau évoluent en sens contraire. En outre, les courbes de vitesses montrent un seul pic en période de crue contre deux pics en période d'étiage.

A Moamé, la vitesse maximale d'amplitude 0,25 m/s est simulée à la bm locale, tandis que la vitesse minimale de l'ordre 0,05 m/s est calculée à pm (**Figure 81**). Au niveau d'Asséoufoué, la vitesse minimale (0,05 m/s) est simulée à mi-flot tandis que la vitesse maximale (0,16 m/s) est calculée à 1h30 avant la bm locale (**Figure 82**).

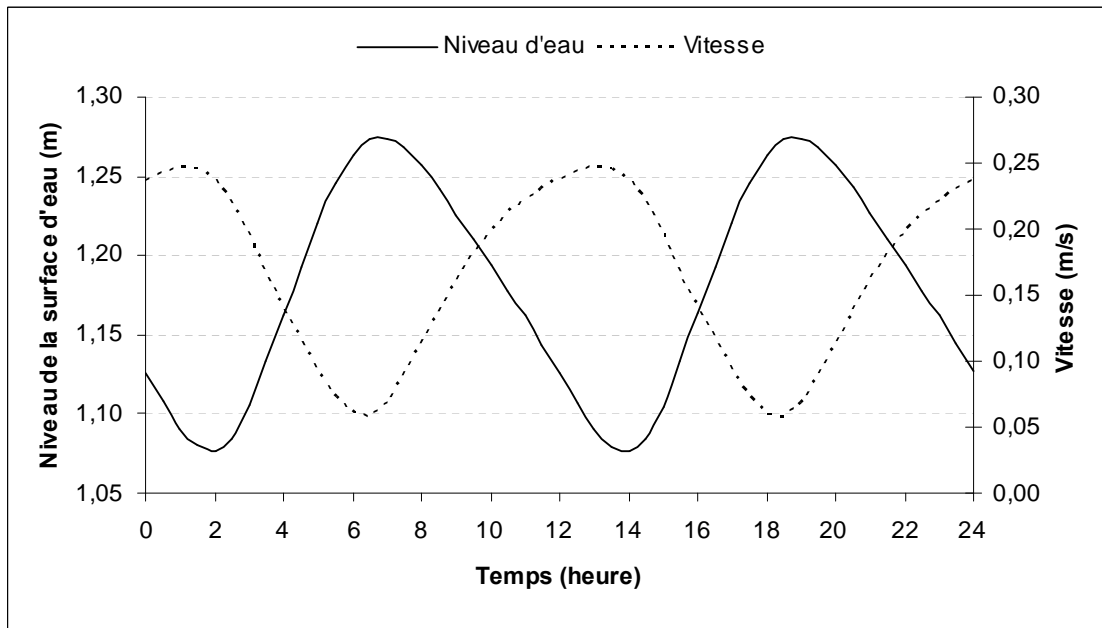


Figure 81 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Moamé en crue

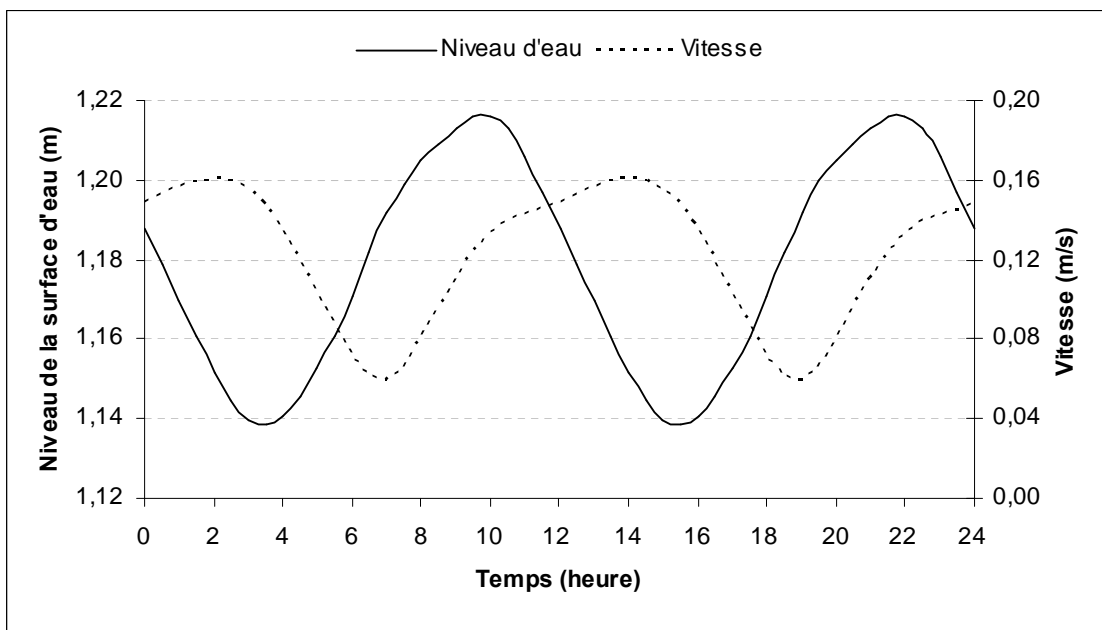


Figure 82 : Corrélation entre vitesse et niveau de la surface d'eau à Asséoufoué en crue

3. Modélisation de la dispersion sel-eau douce

Le modèle de transport (*RMA4*) couplé au modèle hydrodynamique (*RMA2*) a permis de simuler qualitativement la dispersion du sel et de l'eau douce dans le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire (clc) sous le forçage d'une marée moyenne et de débits fluviaux. Les points d'injection des traceurs (sel et eau douce) sont les limites océaniques et les débouchés des fleuves en lagune. En effet, ces sites sont des points d'entrée potentiels de polluants :

- le développement des activités d'exploitation pétrolière au large des côtes ivoiriennes augmente le risque de marées noires (Marée noire au large de Jacqueline le 24 mai 2006) qui pourraient se propager dans le clc ;
- les fleuves sont de potentiels voies de contamination du complexe lagunaire car leurs bassins versants font l'objet d'exploitations agricoles industrielles (pesticides et sels nutritifs lessivés) ou minières (l'exploitation de l'or associée à l'amalgamation par le mercure).

3.1. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le système Grand-Lahou

3.1.1. Evolution diurne des salinités

3.1.1.1. Evolution en période d'étiage

L'évolution diurne des transferts sel-eau douce en étiage est illustrée sur la **figure 83** :

- à pm+1 (7h), le panache salin atteint son extension maximale à l'embouchure de Grand-Lahou (sur près de 2 km). Il est orienté vers les chenaux Nord et Ouest du grau de Grand-Lahou. La concentration en sel à l'embouchure de Grand-Lahou a augmenté, passant de 20 psu (concentration initiale) à 35 psu (concentration en sel des eaux marines) ;
- de pm+2 à bm+1 (13h), le transfert de la salinité se fait vers la mer. L'aire du panache se rétrécit et sa concentration en sel baisse jusqu'à 25 psu ;
- de bm+2 à pm+1, la dispersion saline s'étend à nouveau à l'embouchure et retrouve la situation observée à pm+1, mais le panache salin présente une extension légèrement plus importante que celle observée lors de la première phase de pénétration des eaux salées.

Parallèlement à l'intrusion des eaux salées du golfe de Guinée dans le complexe lagunaire, on assiste à un afflux d'eau douce du fleuve Bandama à l'Est de Braffédon et à une baisse de la salinité dans la zone. La concentration est passée de 20 à 2 psu à l'exutoire du Bandama. La progression des eaux douces vers l'île aux chimpanzés est plus rapide pendant la phase de retrait (jusant) des eaux salées de la lagune que pendant la phase de pénétration (flot).

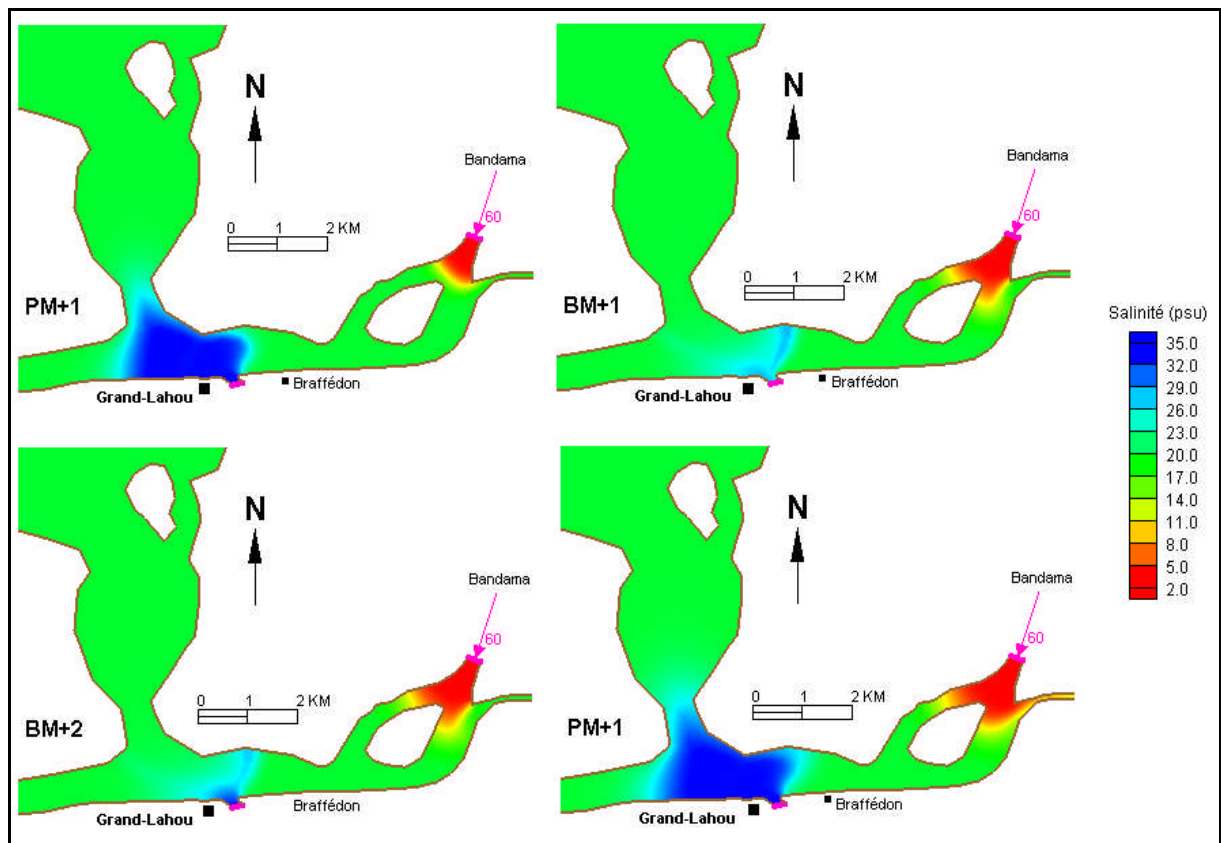


Figure 83 : Evolution diurne des salinités à l'embouchure de Grand-Lahou en étiage

3.1.1.2. Evolution en période de crue

L'évolution de la salinité ainsi que celle de l'eau douce à l'embouchure est illustrée sur la **figure 84**. L'extension maximale du panache de sel est observée à pm+1 comme en étiage. Cependant, le panache salin présente une extension moins importante (<2 km) et se dirige principalement vers le chenal Ouest sous l'effet des eaux douces du fleuve Bandama qui entourent toute l'île aux chimpanzés. Le panache de sel entame son retrait de l'embouchure pour disparaître totalement de l'embouchure à bm+2. On peut observer des salinités différentes de part et d'autre du grau de Grand-Lahou. De l'embouchure à l'exutoire du Bandama, la salinité varie de 10 à 2 psu, tandis qu'à l'Ouest, la concentration est proche de la salinité initiale (20 psu). A bm+3, les eaux salées de l'océan Atlantique vont de nouveau pénétrer dans la lagune. A pm+1, la phase de pénétration des eaux salées est à son maximum. La limite des eaux dessalées du Bandama est repoussée vers le chenal situé en face du grau de Grand-Lahou.

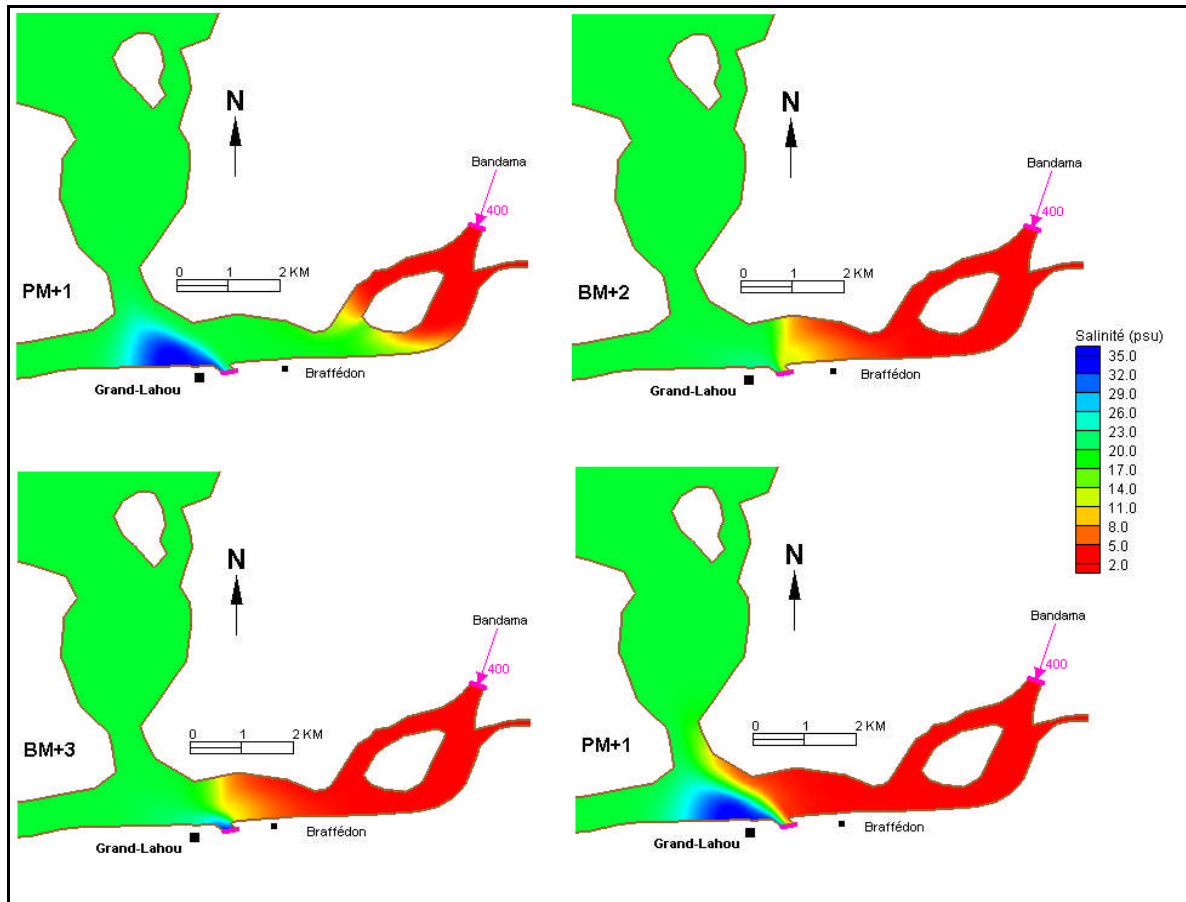


Figure 84 : Evolution diurne des salinités à l'embouchure de Grand-Lahou en crue

3.1.2. Evolution mensuelle des salinités

L'évolution de la salinité en étiage et en crue dans le système lagunaire de Grand-Lahou au bout d'un mois de simulation est représentée sur la **figure 85**. En période d'étiage, le panache salin progresse vers Groguida et Makey, alors qu'en période de crue, le panache salin se trouve encore près de l'embouchure. Le transport des eaux marines est donc plus efficace en période d'étiage qu'en période de crue. On observe la présence d'eau fluviale (2 psu) entre l'exutoire du fleuve Boubo et Makey d'une part et d'autre entre l'embouchure et l'entrée du Bandama en lagune. La zone de contact entre les eaux salées du golfe de Guinée et les eaux fluviales est située à l'Est de l'embouchure en étiage, alors qu'en période de crue, elle migre vers le chenal Nord sous l'action des courants de flot.

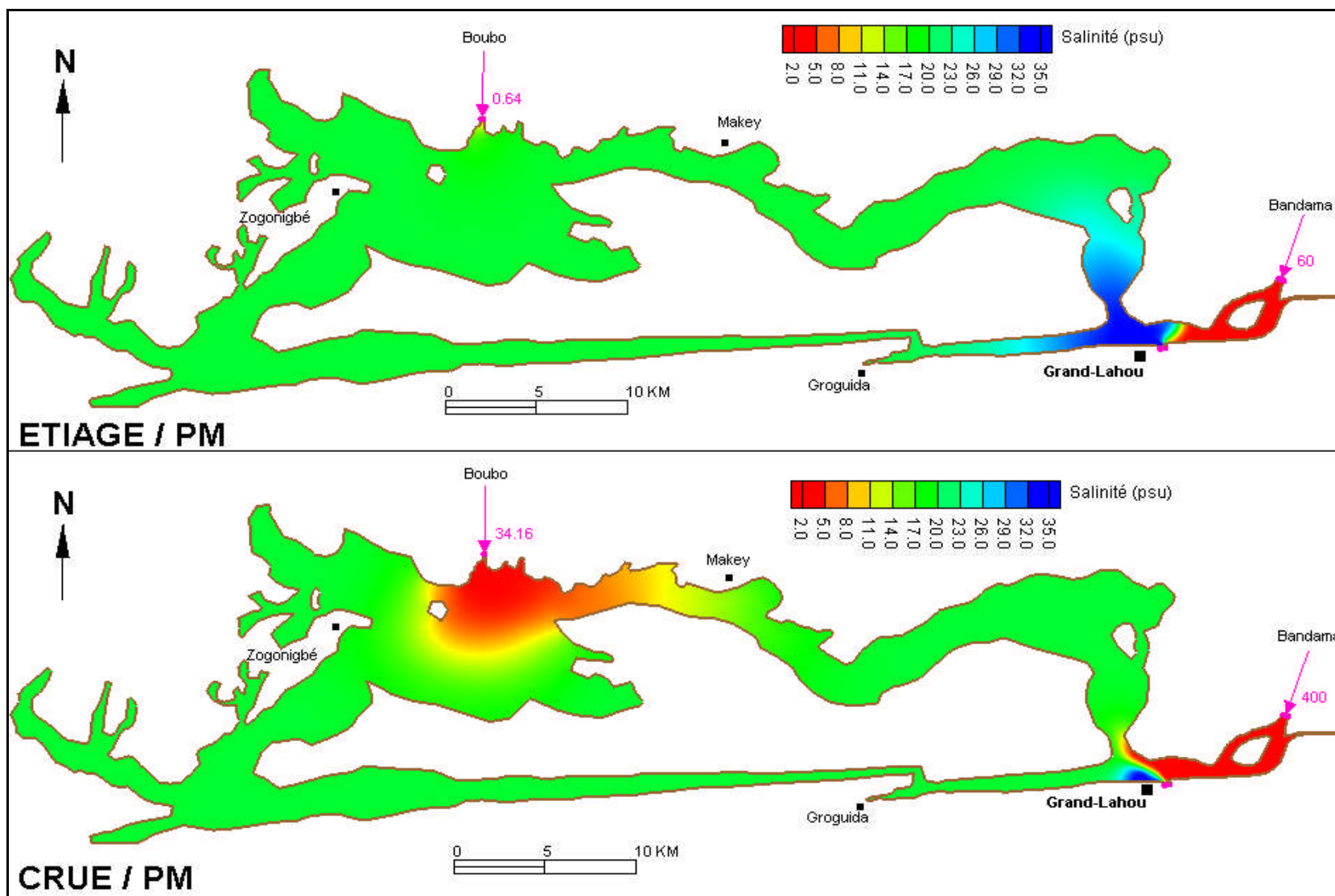


Figure 85a : Evolution mensuelle des salinités dans le système Grand-Lahou à pm

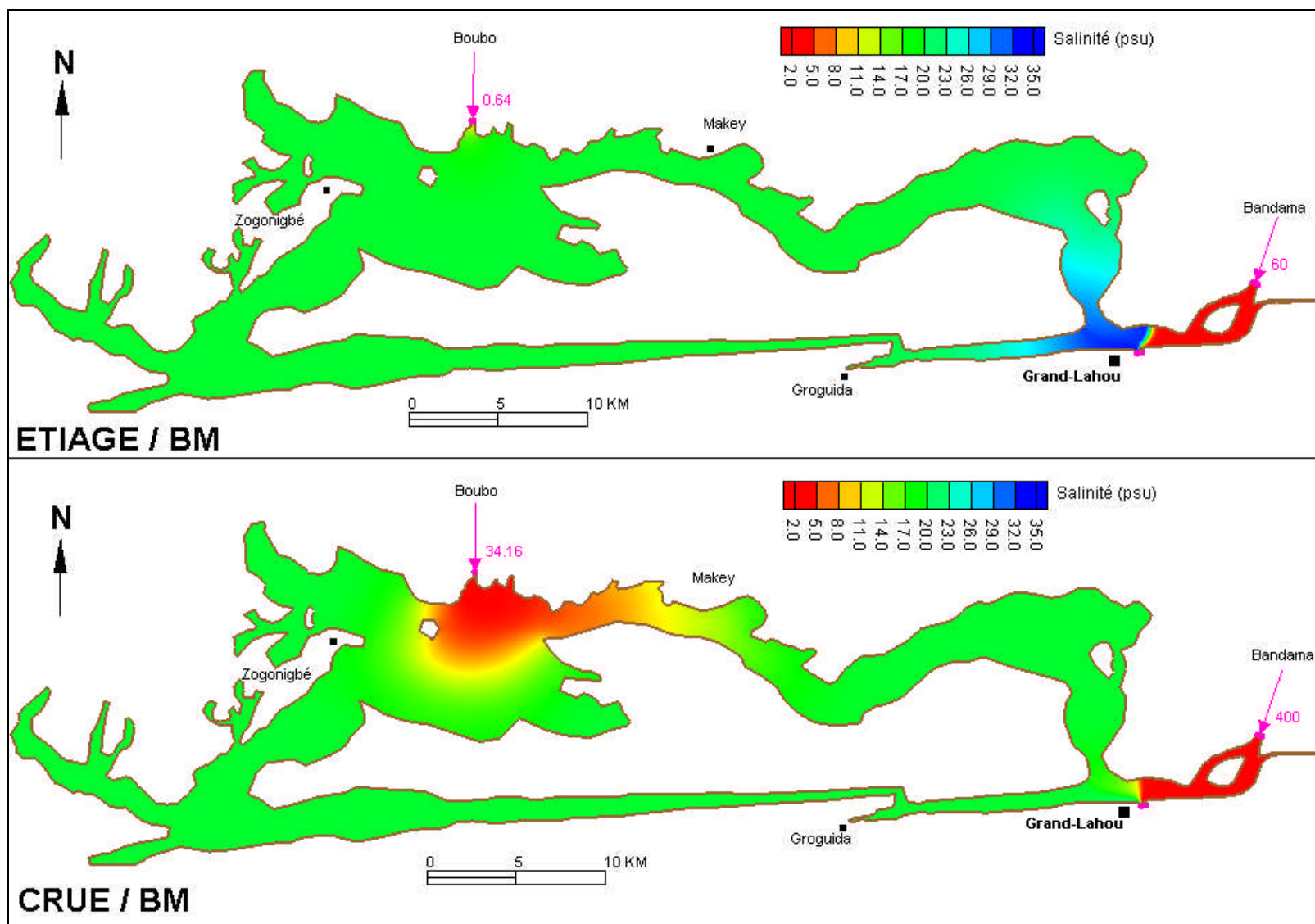


Figure 85b : Evolution mensuelle des salinités dans le système Grand-Lahou à bm

3.2. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le canal d'Assagny

3.2.1. Evolution diurne des salinités

Le canal d'Assagny relie les systèmes lagunaires Grand-Lahou et Ebrié. Il débouche à l'exutoire du fleuve Bandama à l'Ouest, et à l'Est dans le système Ebrié. Il faut environ 7 jours pour que la concentration initiale des eaux du canal d'Assagny devant Noumouzou passe de 20 psu à 2 psu en période de faible débit fluvial alors qu'en période de fort débit fluvial du Bandama, il faut à peine 17h de simulation. La **figure 86** présente l'évolution de l'eau douce au bout de 24h de calcul.

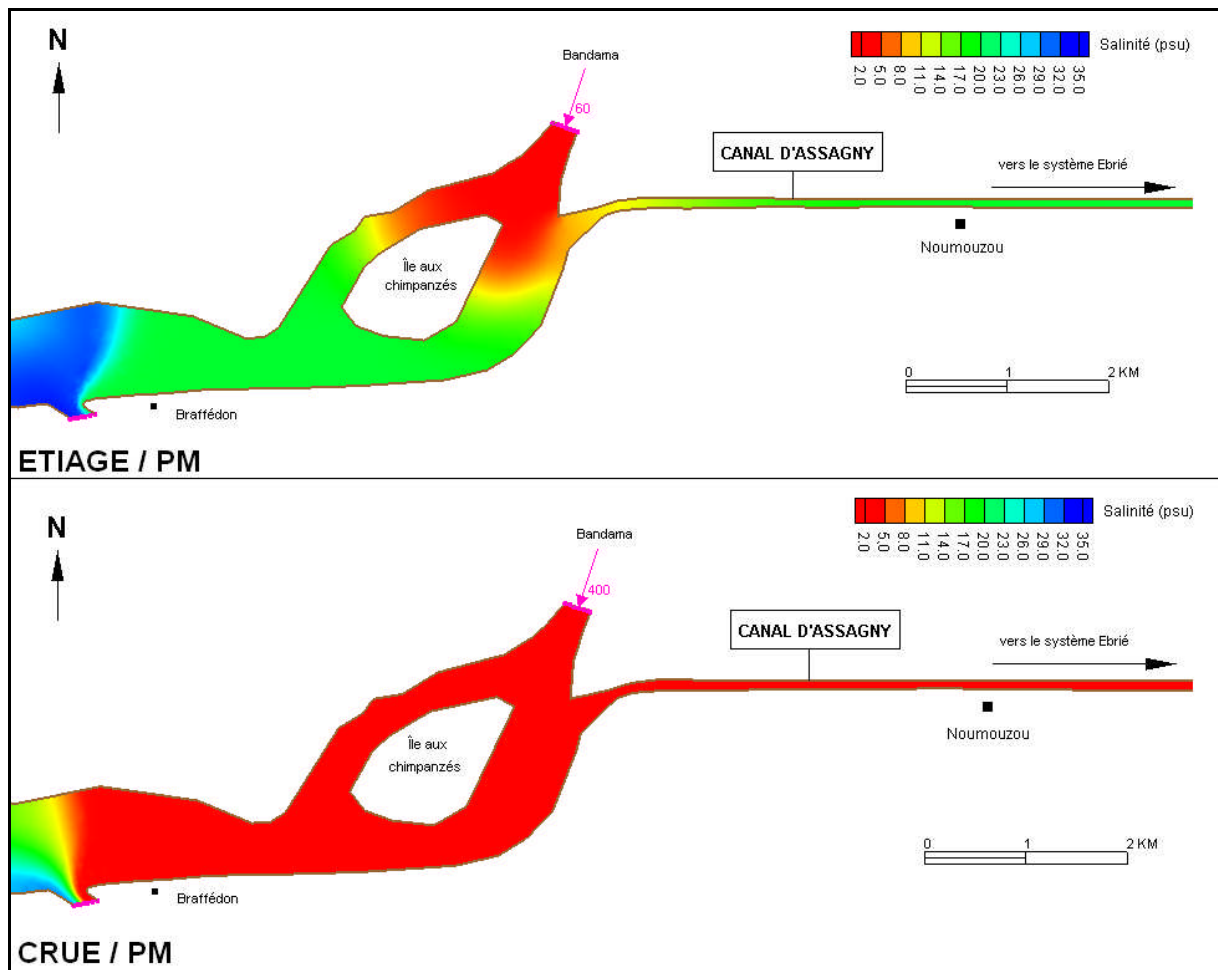


Figure 86 : Evolution diurne (pm) des salinités dans le canal d'Assagny

3.2.2. Evolution mensuelle des salinités

Au bout d'un mois de simulation, on constate que l'extension géographique des eaux douces issues du Bandama dans le système Ebrié se limite à l'entrée du canal alors qu'en période de crue, ces eaux douces couvrent une vingtaine de km. En étiage, la salinité à l'Ouest du système Ebrié est descendue jusqu'à 5 psu au minimum alors qu'en crue, la salinité a chuté jusqu'à 2 psu (**Figure 87**).

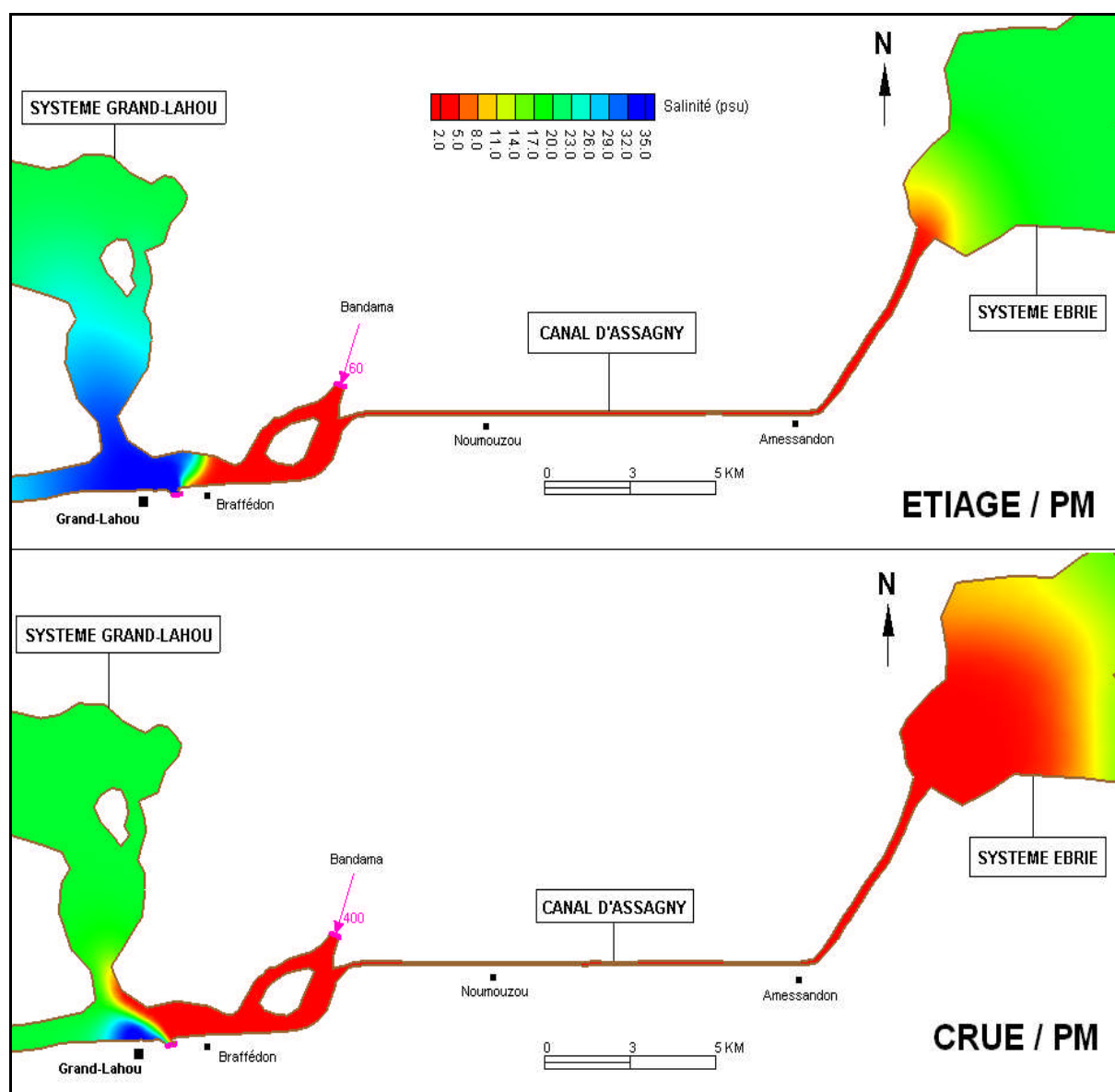


Figure 87 : Evolution mensuelle (pm) des salinités dans le canal d'Assagny

Le renouvellement des eaux est rapide en période de crue, car les courants de marée sont forts ($> 0,25$ m/s, pages 121 et 122) à Noumouzou et à Amessandon. Par contre, en étiage, les courants sont moins intenses (0,17 à 0,22 m/s), d'où un renouvellement lent des eaux. En outre les courants de marée étant alternatifs en période d'étiage dans le canal, les eaux douces qui se dirigent vers le système Ebrié sont animés d'un mouvement de va-et-vient. On peut associer à ce type de mouvement une vitesse résiduelle (en opposition à instantanée). En période de fort débit fluvial, par contre, le mouvement de ces eaux est unidirectionnel.

3.3. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le système Ebrié

3.3.1. Evolution diurne des salinités

3.3.1.1. Evolution en période d'étiage

L'évolution diurne des salinités en période d'étiage est illustrée sur la **figure 88** :

- les eaux salées du golfe de Guinée de concentration 35 psu, occupent tout le canal de Vridi. Elles pénètrent ensuite dans le bassin central en formant un panache autour du canal de Vridi à pm+1 ;
- de pm+2 à bm+1, le panache se détache progressivement du canal de Vridi tout en diminuant en taille et en concentration (30 psu au maximum) ;
- à bm+2, les eaux marines débutent leur seconde phase de pénétration en lagune de la journée. Elles vont atteindre leur extension maximale à pm+1. Tout le bassin central est occupé par des eaux d'origine océanique.

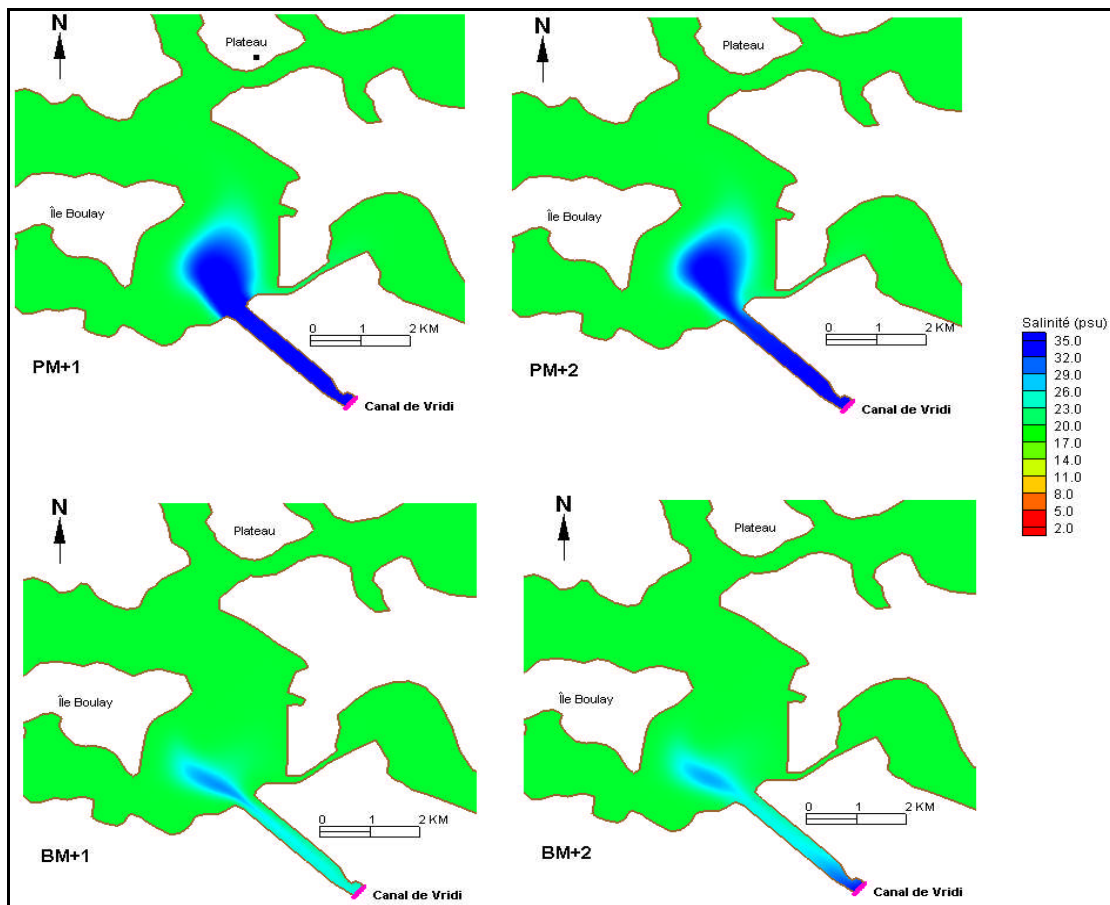


Figure 88 : Evolution diurne des salinités dans le système Ebrié en étiage

3.3.1.2. Evolution en période de crue

En comparaison à l'évolution des salinités en période d'étiage, on présente la répartition des masses d'eau marine dans la lagune en période de fort débit fluvial sur la

figure 89. L'extension maximale du panache salin est constatée à pm+1 comme en période d'étiage mais avec un faible diamètre. Le transfert du panache salin de la lagune vers le plateau continental débute à pm+2 avant de disparaître du bassin central à bm+1. A bm+2, le transfert des eaux salées se fait du plateau continental vers le bassin central jusqu'à pm+1.

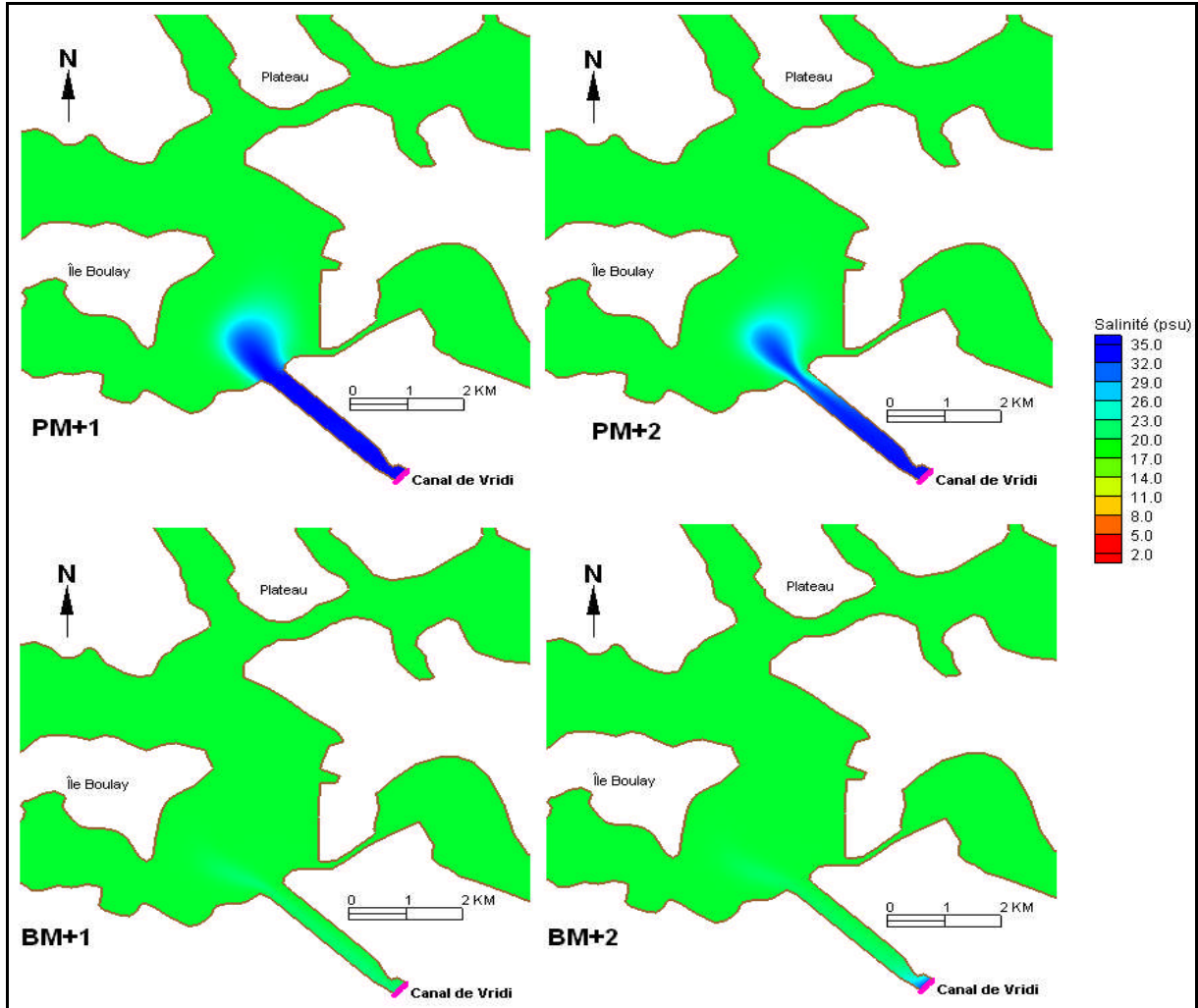


Figure 89 : Evolution diurne des salinités dans le système Ebrié en crue

3.3.2. Evolution mensuelle des salinités

En étiage, les eaux marines colonisent tout le bassin central et les baies situées dans la région d'Abidjan. Les plus fortes concentrations en sel (35 psu) sont observées dans le canal de Vridi et le bassin central (**Figure 90**). Quant aux eaux fluviales, elles restent cloisonnées autour des exutoires des fleuves en lagune. En revanche, en période de fort débit fluvial, ce sont les eaux douces issues de la Mé et du Comoé qui migrent vers Abidjan. Ces eaux d'origine continentale font baisser la salinité des eaux estuariennes d'Abidjan avant de s'engouffrer dans le canal de Vridi pour être ensuite évacuées en mer pendant la marée descendante.

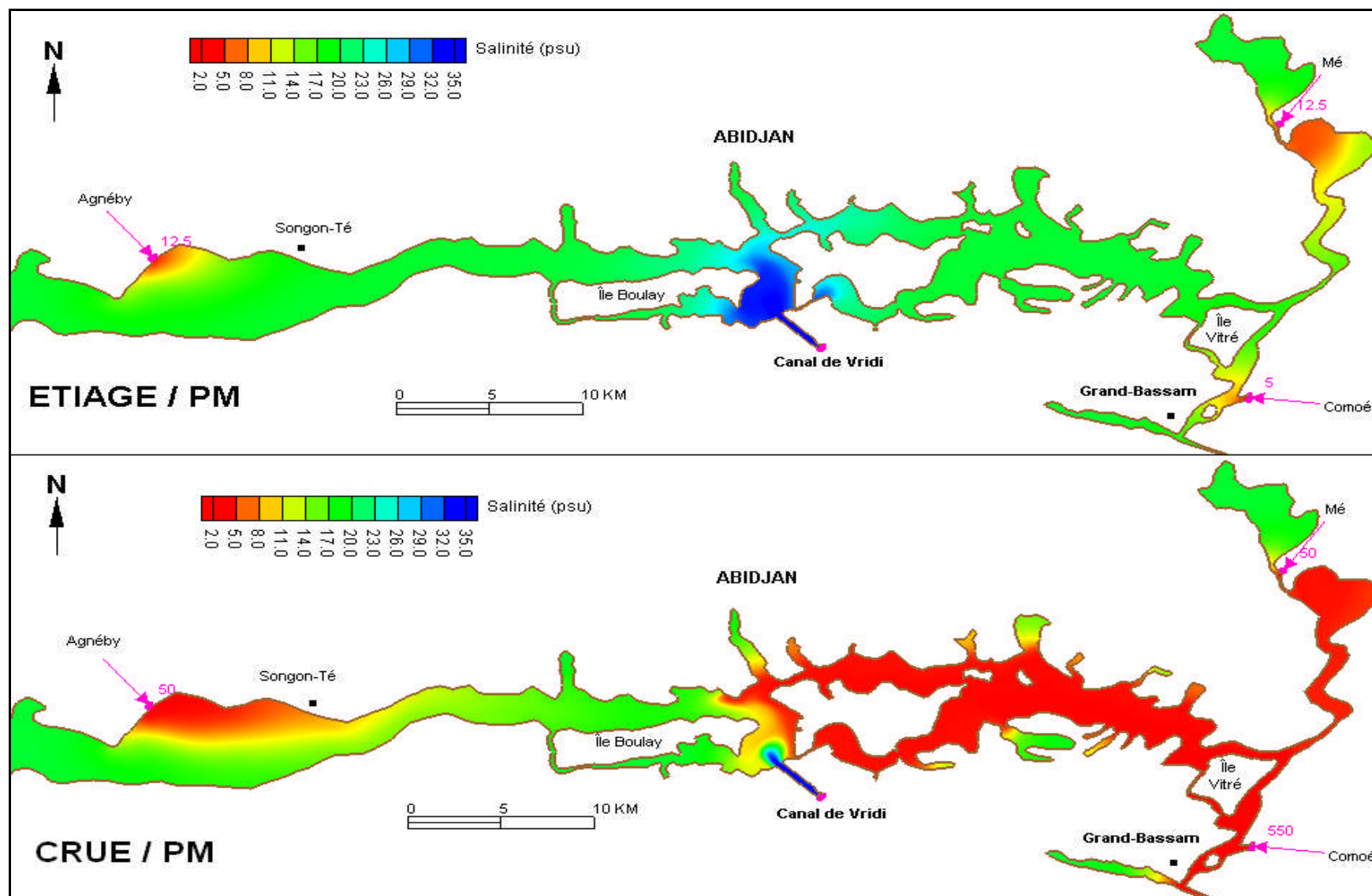


Figure 90a : Evolution mensuelle des salinités dans le système Ebrié à pm

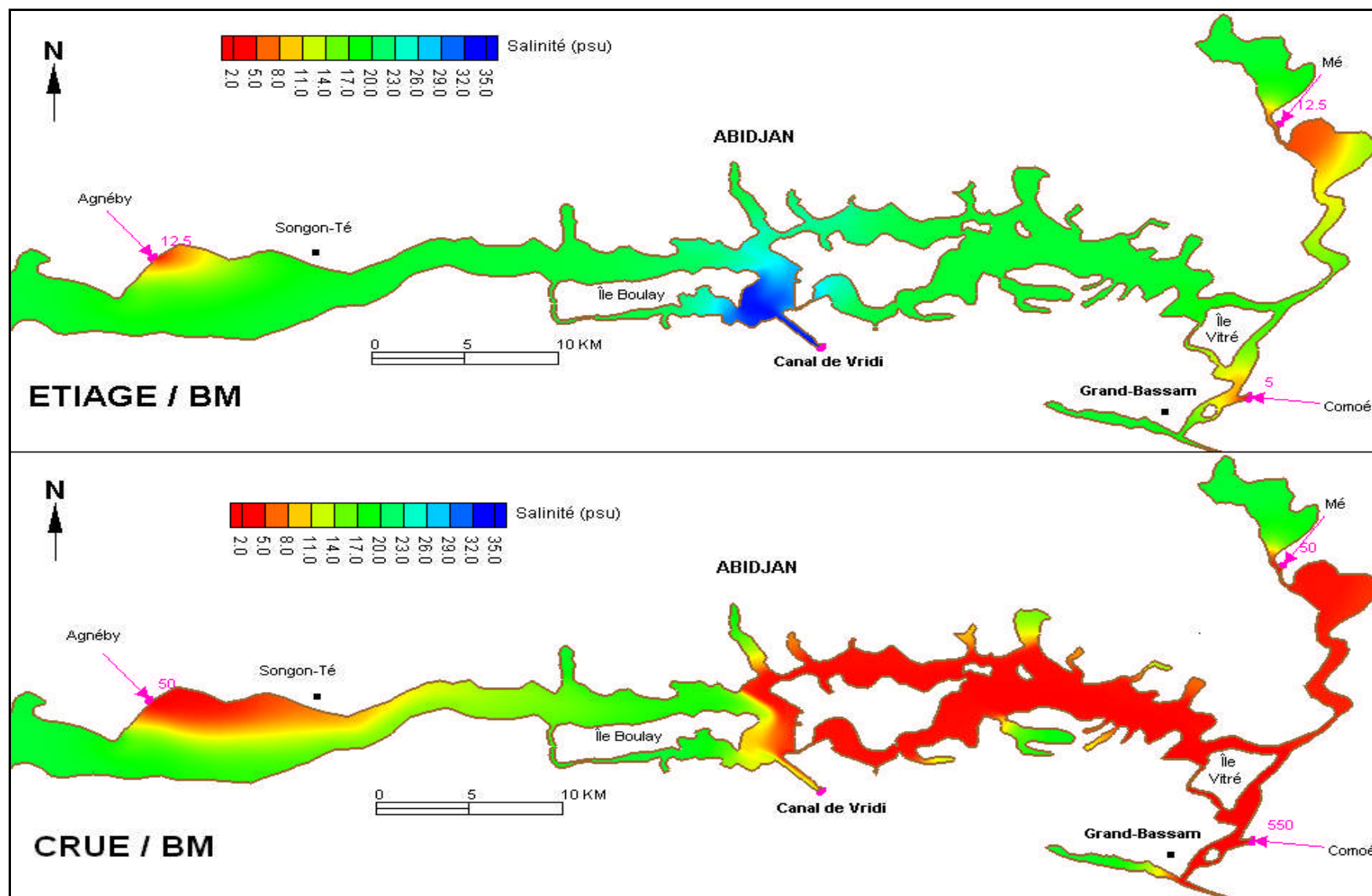


Figure 90b : Evolution mensuelle des salinités dans le système Ebrié à bm

3.4. Modélisation de la dispersion sel-eau douce dans le canal d'Assinie

Le canal d'Assinie est long de 48 km. Il relie le système lagunaire Ebrié au système lagunaire Aby. A l'Ouest, le canal débouche à l'embouchure du fleuve Comoé, tandis qu'à l'Est, son exutoire est situé à une dizaine de kilomètre du grau d'Assinie.

3.4.1. Evolution diurne des salinités

Après un jour de simulation du rejet d'eau salée du golfe de Guinée et d'eau douce du Comoé dans la lagune, on constate que la salinité initiale (20 psu) des eaux du canal d'Assinie a très peu varié en étiage et en crue (**Figure 91**).

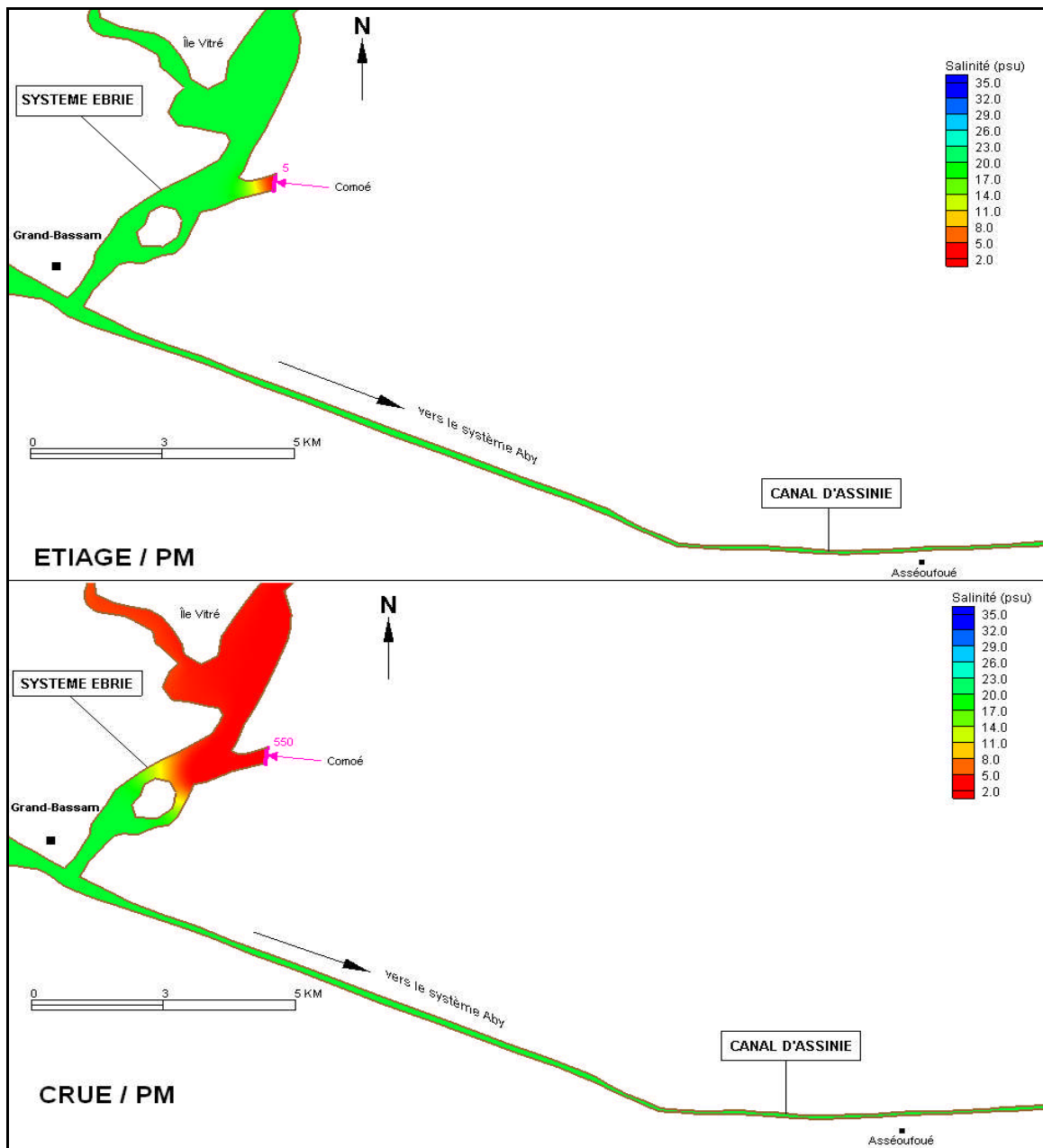


Figure 91 : Evolution diurne (pm) des salinités dans le canal d'Assinie

3.4.2. Evolution mensuelle des salinités

La salinité des eaux du canal a très peu varié en période d'étiage même après 30 jours de simulation (**Figure 92**). En période de fort débit fluvial par contre, il faut environ 10 jours pour le renouvellement total des eaux du canal par celles issues du Comoé. En effet, les eaux injectées par le fleuve avec une concentration de 2 psu vont migrer vers le système Aby à travers le canal d'Assinie. C'est ce qui explique la baisse de la concentration en sel des eaux du canal.

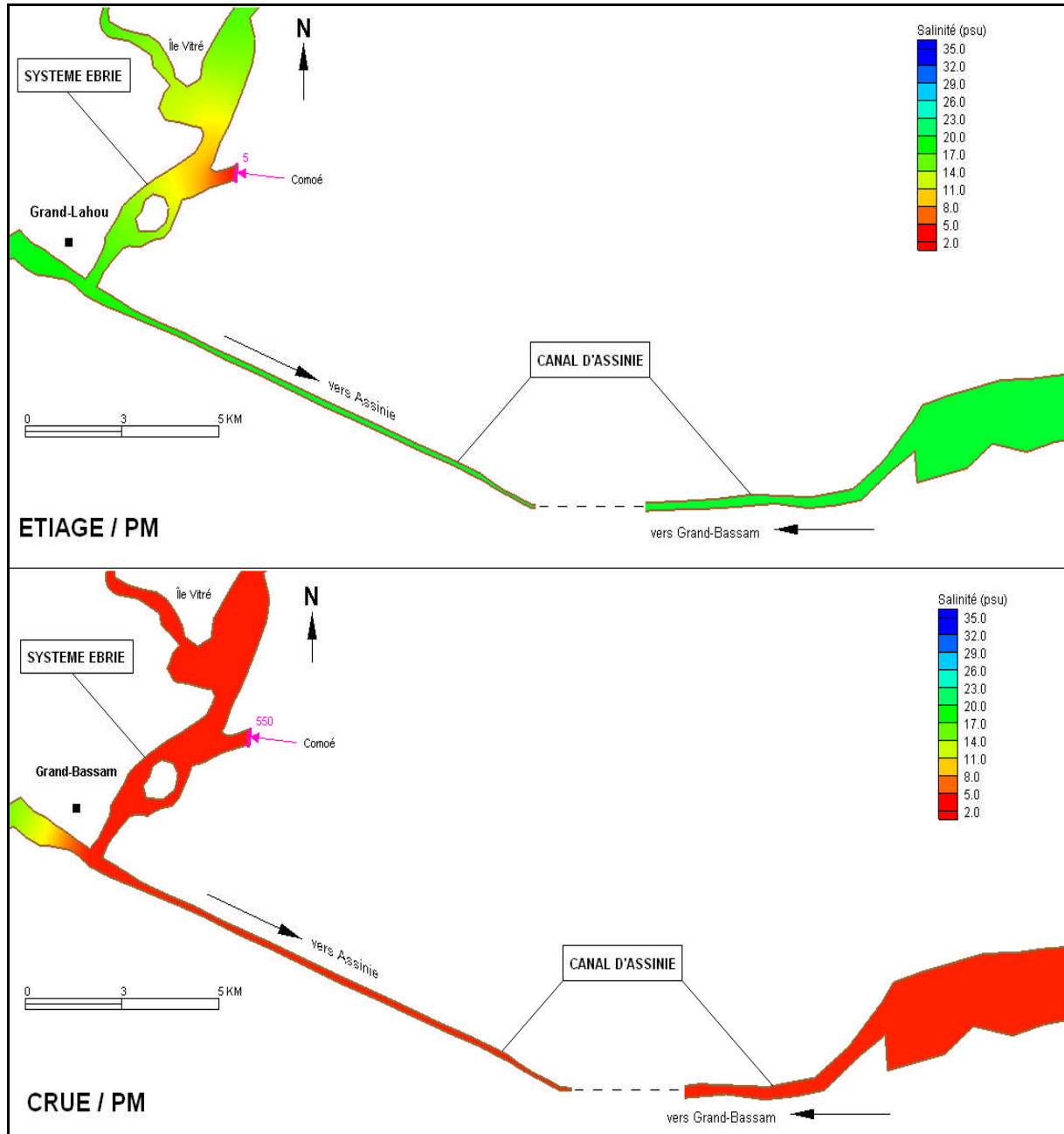


Figure 92 : Evolution mensuelle (pm) des salinités dans le canal d'Assinie

3.5. Modélisation de la dispersion du sel-eau douce dans le système Aby

3.5.1. Evolution diurne des salinités

3.5.1.1. Evolution en période d'été

La propagation des eaux salées du golfe de Guinée dans les chenaux d'Assinie en une marée et en période de faible débit fluvial est illustrée sur la **figure 93**. A pm+2, les eaux marines atteignent leur maximum d'extension dans le chenal central d'Assinie puis colonisent ensuite les chenaux secondaires. La concentration est maximale dans le chenal central (35 psu). A partir de pm+3, ces eaux salées vont se retirer progressivement des chenaux pour évoluer en direction de la mer. Au terme de ce retrait à bm+1, la concentration en sel des eaux dans le chenal est de l'ordre de 26 psu. Dès la bm+2, le transfert des eaux salées se fait du plateau continental vers le système lagunaire. Le panache salin atteindra son extension maximale (4 km) à pm+2. Au bout de 24h de simulation, les eaux salées restent confinées dans les chenaux de la passe d'Assinie.

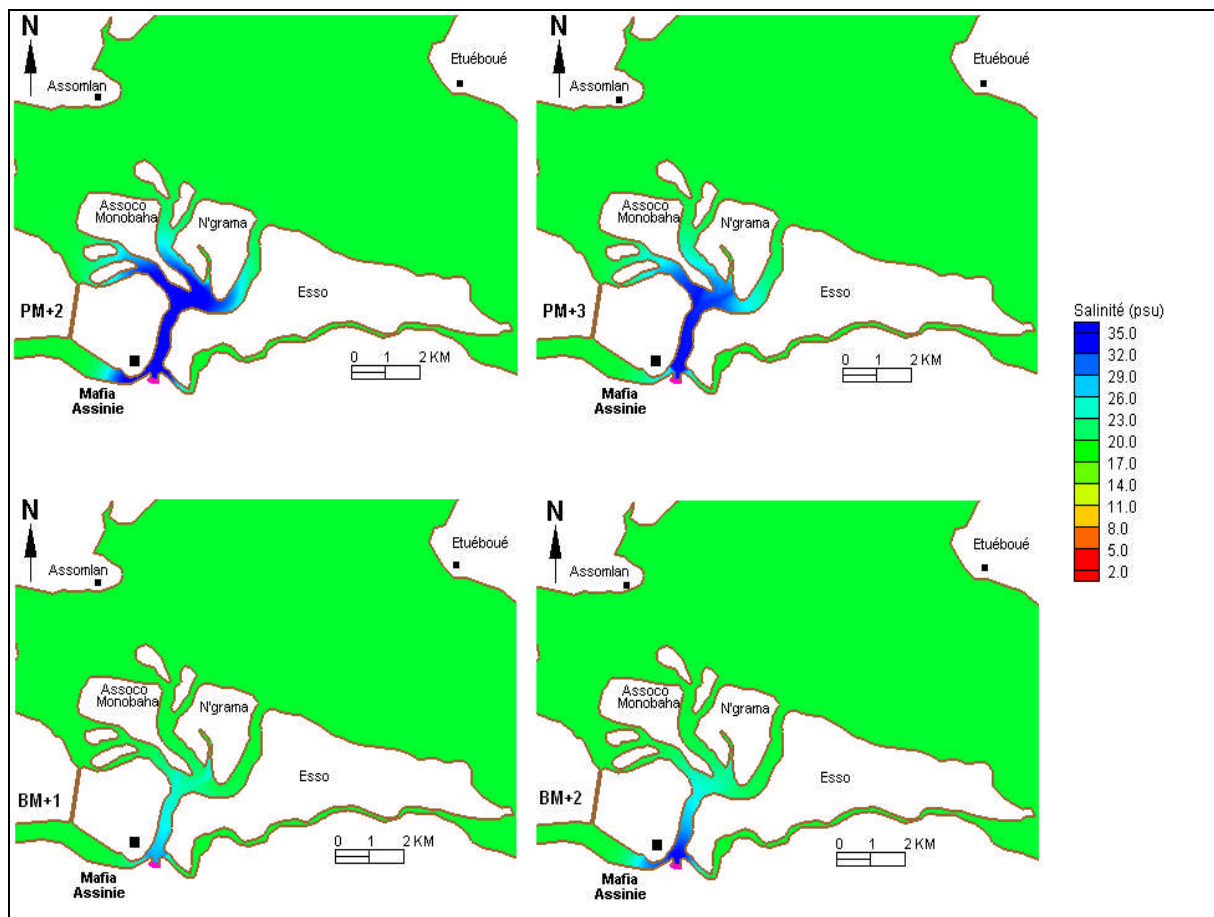


Figure 93 : Evolution diurne des salinités dans le système Aby en été

3.5.1.2. Evolution en période de crue

La **figure 94** illustre l'évolution des salinités à l'embouchure d'Assinie au cours d'un cycle de marée. A pm+2, le panache salin pénètre dans le chenal central et s'étend sur environ 3 km alors qu'en étiage, il s'étendait sur près de 4 km environ. De pm+3 à bm+2, on assiste au transfert des eaux salées du milieu lagunaire vers le milieu marin, car, le panache salin diminue en taille et en concentration. A bm+3, les eaux salées pénètrent dans l'embouchure pour envahir progressivement les chenaux secondaires de la zone deltaïque d'Assinie.

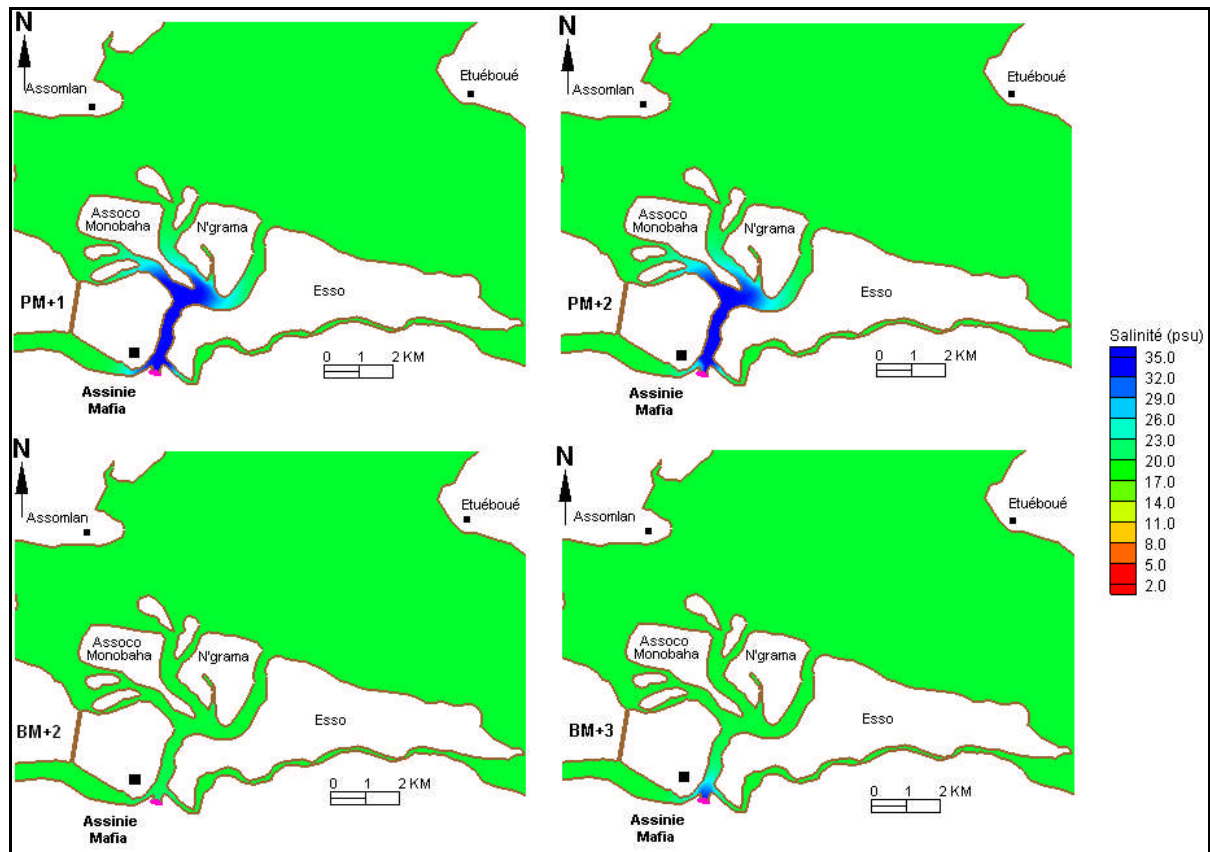


Figure 94 : Evolution diurne des salinités dans le système Ebrié en crue

3.5.2. Evolution mensuelle des salinités

La simulation sur plusieurs cycles de marée (30 jours) montre un apport d'eaux douces venant du Nord (fleuve Bia), de l'Est (fleuve Tanoé) et de l'Ouest (fleuve Comoé) via le canal d'Assinie. Ces apports sont faibles en étiage (**Figure 95**) et plus importants en période de crue. Dans la lagune Aby-Nord, les eaux fluviales de la Bia forment des auréoles autour de l'exutoire du fleuve. Les eaux douces issues du fleuve Comoé sont drainées par le canal d'Assinie dans le système Aby, où elles seront ensuite évacuées en mer. Les variations de salinité se limitent uniquement aux chenaux d'Assinie en période de crue tandis qu'en étiage, la salinité a légèrement augmenté (29 psu) à la sortie des chenaux en lagune.

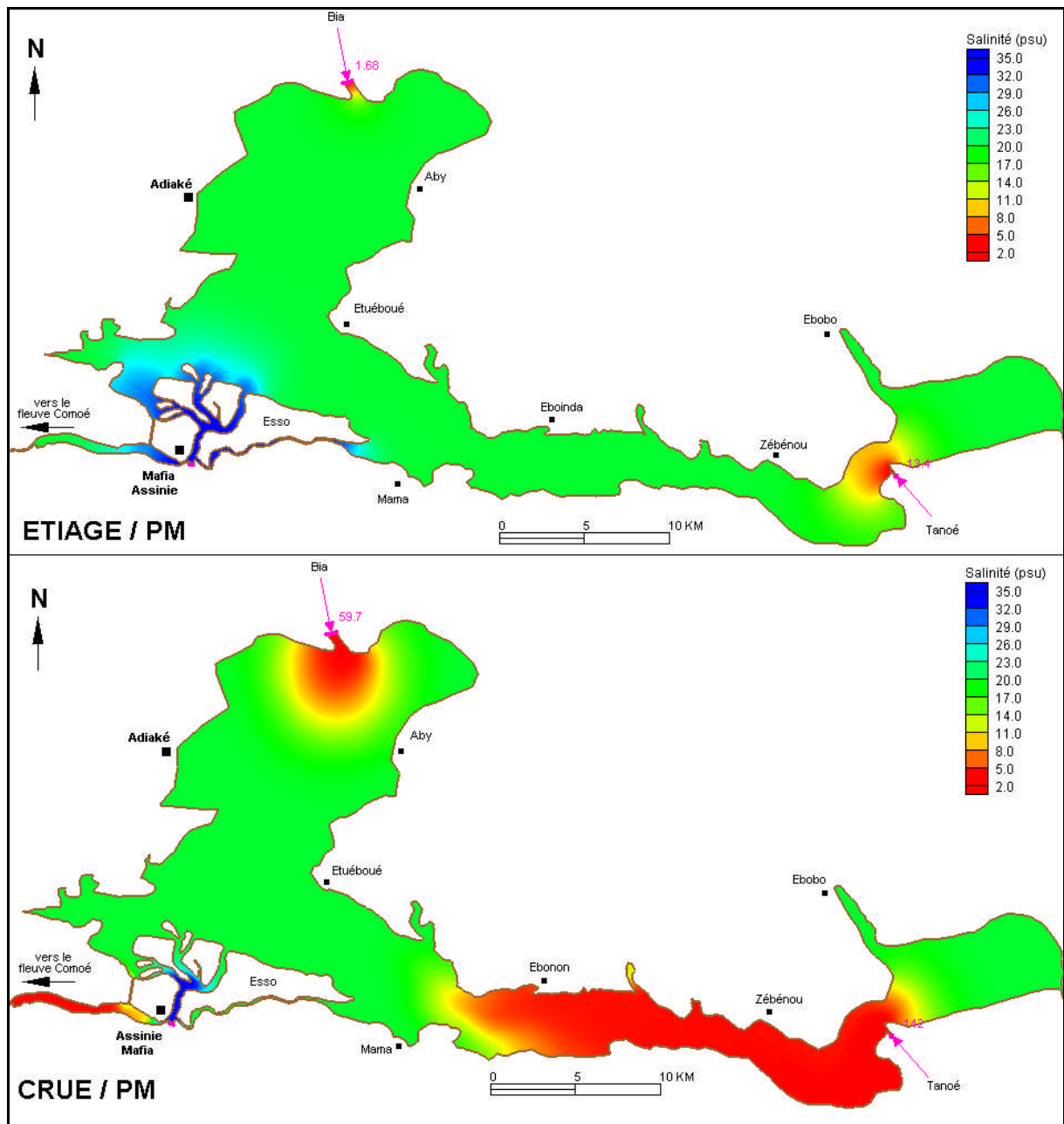


Figure 95a : Evolution mensuelle des salinités dans le système Aby à pm

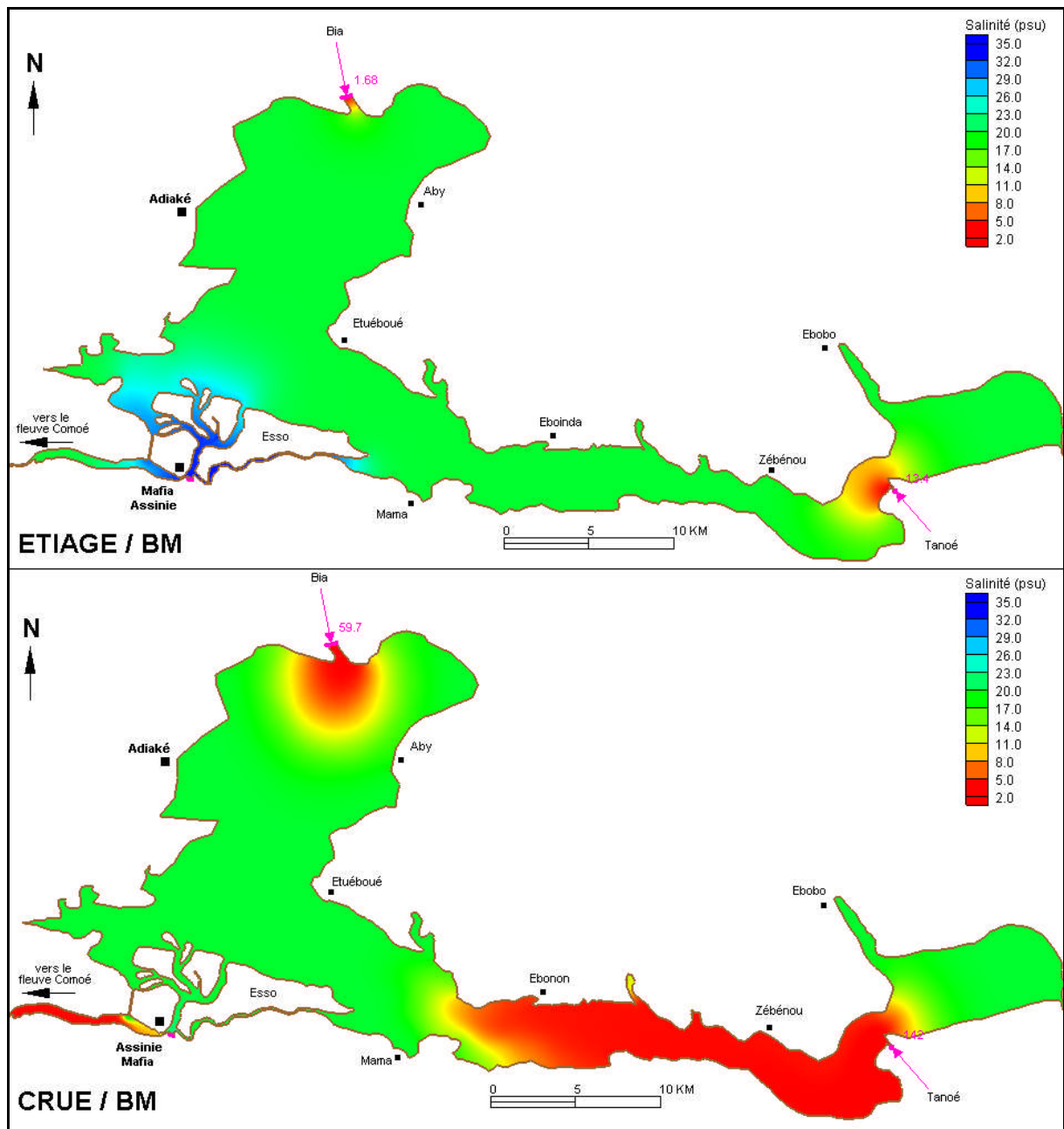


Figure 95b : Evolution mensuelle des salinités dans le système Aby à bm

3.6. Discussion

Rappelons que le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire (clc) est composé de trois systèmes de lagunes (Grand-Lahou, Ebrié et Aby) reliés entre eux par deux canaux artificiels (Assagny et Assinie). Nous avons alors simulé d'une part l'hydrodynamique et d'autre part la dispersion du sel et de l'eau douce dans ce complexe lagunaire.

Champs de courants et durée des transferts des masses

En période d'étiage, sur le cycle de marée pm/bm/pm, les courants de flot et de jusant ont eu la même durée aux trois frontières ouvertes océaniques du modèle (embouchure de Grand-Lahou, canal de Vridi et grau d'Assinie). Ils sont symétriques et le transfert des masses d'eau entre le clc et la mer est synchrone à ces trois frontières ouvertes maritimes du modèle. En revanche, en période de crue, ces courants de marée sont dissymétriques. En effet, les courants fluviaux plus intenses en période de fort débit fluvial, vont s'opposer aux courants de flot et renforcer les courants de jusant, d'où la phase de flot plus brève que celle du jusant. Au canal de Vridi et au grau d'Assinie, les courants de marée ont eu la même durée en période de crue : 4h pour le flot et 6h pour le jusant. A l'embouchure de Grand-Lahou, le flot ayant duré 1h de moins et le jusant 1h de plus. Cette distinction entre l'embouchure de Grand-Lahou et les deux autres frontières ouvertes maritimes (canal de Vridi et passe d'Assinie), peut s'expliquer par la proximité du fleuve Bandama qui débouche à moins de 5km de la passe de Grand-Lahou. Le transfert des masses d'eau entre le milieu lagunaire et le milieu marin reste donc synchrone uniquement au canal de Vridi et au grau d'Assinie en période de crue.

Dans les canaux d'Assagny et d'Assinie, les courants de marée sont alternatifs en période d'étiage et unidirectionnels vers l'Est en période de crue.

Variation du niveau de la surface d'eau

En s'éloignant vers l'amont, la courbe de marée s'éloignent de la forme sinusoïdale, la marée montante de plus en plus rapide et descendant de plus en plus lentement (Allen et *al.*, 1980). On observe une amplification du marnage en étiage et une réduction de l'amplitude en période de crue en raison du rehaussement du niveau des eaux en amont.

Débits et volumes d'eau échangés

L'analyse de débits d'eau échangés montre que le bilan liquide du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire est négatif quelque soient les conditions de débits fluviaux. Ceci est dû au principe de conservation de masse du modèle numérique et aux frontières physiques imperméables du modèle.

En ce qui concerne les volumes d'eau oscillants aux trois frontières ouvertes maritimes du clc en une marée, le modèle a mis en évidence une augmentation des volumes tidaux en période de faible débit fluvial et une réduction en période de fort débit fluvial.

Temps de renouvellement des eaux

Le temps de renouvellement peut être exploité dans le cadre de recherches visant à estimer la capacité de support d'une lagune (Koutitonsky et *al.*, 2006). Il est causé par la marée et les débits fluviaux. Le temps de renouvellement des eaux est plus rapide en étiage qu'en crue. Cela s'explique par le fait que le volume tidal du système est réduit en période de fort débit fluvial.

Dispersion du sel et de l'eau douce

Les simulations de la dispersion du sel et de l'eau douce ont montré un échange de masses d'eau entre les trois systèmes de lagunes à travers les canaux artificiels (**Figure 96**). Le mouvement résiduel des masses d'eau dans le canal d'Assagny, se fait du système Grand-Lahou vers le système Ebrié. Dans le canal d'Assinie, il se fait également du système Ebrié vers le système Aby. En période de crue, les eaux des canaux sont entièrement remplacées par les eaux du Bandama et du Comoé qui peuvent drainer des polluants minéraux. D'un point de vue de la pollution, on ne peut pas étudier séparément les systèmes lagunaires Grand-Lahou, Ebrié et Aby.

La distribution spatiale des salinités dans le clc montre que le renouvellement des eaux par la marée est constant dans le temps alors que celui produit par les fleuves varie en fonction des débits fluviaux et donc de la saison d'étiage (Koutitonsky et *al.*, 2004a). En outre ces résultats montrent que le temps de renouvellement varie dans l'espace et dans le temps dans le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire.

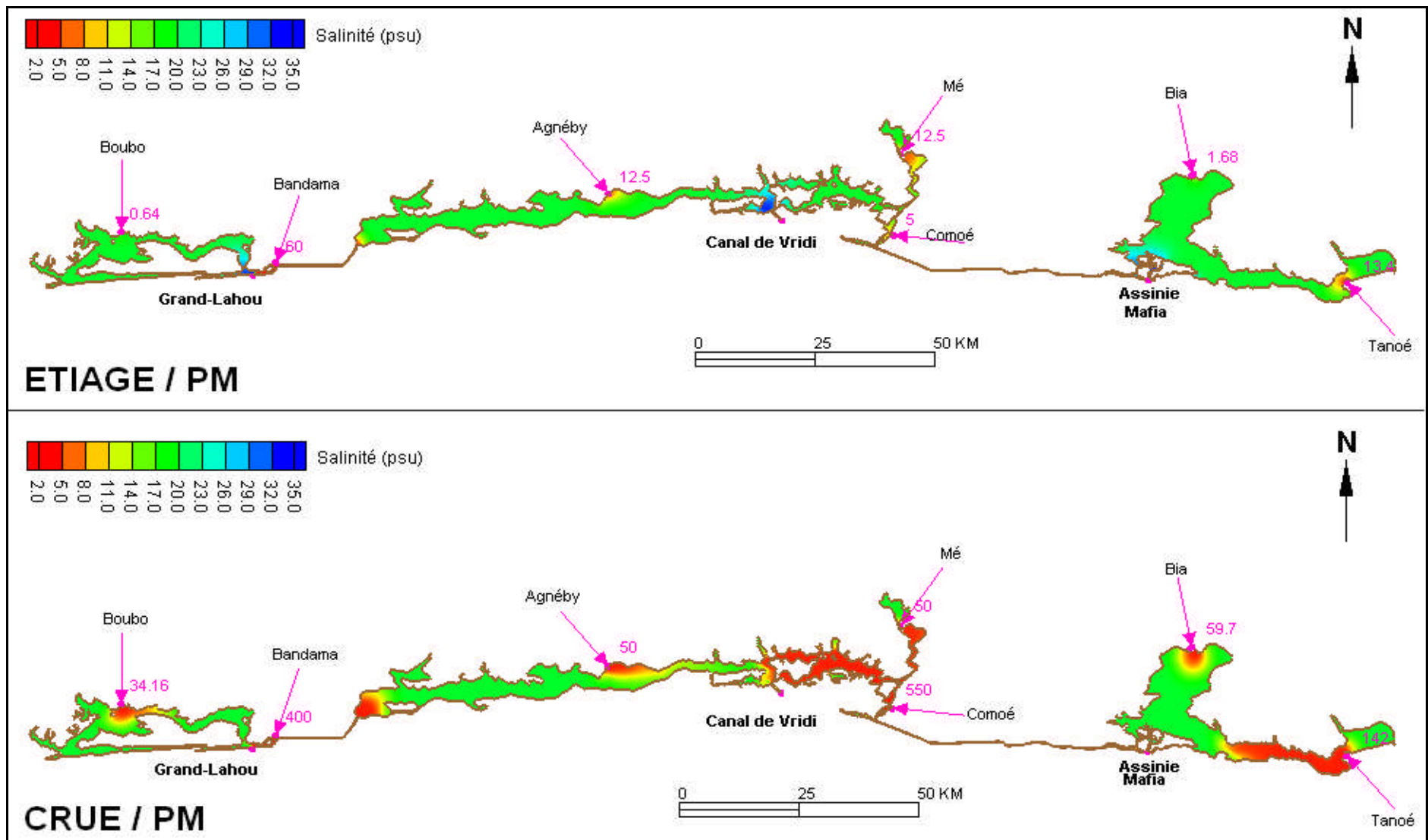


Figure 96 : Evolution mensuelle des salinités dans le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire

**CONCLUSION GENERALE
&
PERSPECTIVES**

Nous venons de développer pour la première fois un modèle hydrodynamique 2D à mailles fines du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire (clc). L'outil de modélisation choisi est le logiciel *SMS*. Il comprend un module hydrodynamique (*RMA2*) et un module de transport (*RMA4*). La grille de calcul générée par le module *GFGEN* comprend 43271 nœuds et 19552 éléments de nœuds avec sept frontières ouvertes fluviales (Boubo, Bandama, Agnéby, Mé, Comoé, Bia et Tanoé) et trois frontières ouvertes maritimes (Embouchure de Grand-Lahou, canal de Vridi et grau d'Assinie).

Les paramètres de calage (n et E) qui conviennent aux simulations de l'hydrodynamique du clc sont :

- $n=0,05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ et $E=30 \text{ m}^2/\text{s}$ pour le système lagunaire Grand-Lahou ;
- $n=0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ et $E=10 \text{ m}^2/\text{s}$ pour le système lagunaire Ebrié ;
- $n=0,04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ et $E=5 \text{ m}^2/\text{s}$ pour le système lagunaire Aby.

Les simulations numériques du clc ont été effectuées sous la combinaison de deux forçages hydrodynamiques imposés aux frontières ouvertes du modèle :

- un forçage par une marée moyenne imposée aux frontières ouvertes océaniques de la grille de calcul ;
- un forçage par des débits fluviaux d'étiage ou de crue injectés aux exutoires des sept principaux fleuves débouchant dans le clc.

Circulation et transfert des masses d'eau

La marée et les débits fluviaux contribuent à la création de courants de circulation dans le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire. Le transfert des masses d'eau entre le clc et le milieu marin a duré 10h avec 2h d'instabilité en étiage et en crue.

En période d'étiage, les courants de marée ont durée 5h chacun à l'embouchure de Grand-Lahou, au canal de Vridi et à la passe d'Assinie. Les courants de marée sont donc symétriques en période de faible débit fluvial. Il en résulte un transfert des masses d'eau synchrone à l'embouchure de Grand-Lahou, au canal de Vridi et au grau d'Assinie en étiage.

En période de crue, le flot a duré 3h à Grand-Lahou et 4h à Vridi et à Assinie. Quant au jusant, il a duré 7h à Grand-Lahou, et 6h à Vridi et à Assinie. Les courants de marée deviennent dissymétriques en crue. Le transfert des masses d'eau entre le clc et le plateau continental, reste synchrone uniquement au canal de Vridi et à la passe d'Assinie. A l'embouchure de Grand-Lahou, le flot ayant duré 1h de moins et le jusant 1h de plus.

Dans les deux canaux artificiels (Assagny et Assinie), les courants de marée sont alternatifs en période d'étiage, tandis qu'en période de crue, ces courants sont toujours dirigés vers l'Est, ils sont unidirectionnels par opposition à alternatif.

Amplification et déphasage de l'onde de marée

Lors de sa propagation dans le clc, l'onde de marée subit une déformation qui se caractérise par :

- une dissymétrie entre le flot et le jusant ;
- une amplification en étiage ou une réduction en période de crue en raison de la remontée des fonds ;
- un déphasage des pleines mers et des basses mers ; les pleines mers étant retardées vers l'amont.

Echanges liquides entre le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire et la mer

L'analyse des courbes de débits a montré un comportement régulier des flux liquides entre le clc et le golfe de Guinée. Pour un marnage de 0,64 m en mer, le débit d'eau moyen simulé en 24 heures est de $-70 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'embouchure de Grand-Lahou, de $-100 \text{ m}^3/\text{s}$ au canal de Vridi et de $-26 \text{ m}^3/\text{s}$ à la passe d'Assinie en période de faible débit fluvial. On en déduit un débit moyen pour tout le clc de l'ordre de $-196 \text{ m}^3/\text{s}$ en étiage. En période de crue, le débit résiduel calculé par le modèle a atteint -410 , -708 et $-212 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement à l'embouchure de Grand-Lahou, au canal de Vridi et à la passe d'Assinie. Il en résulte un débit moyen de $-1330 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le clc. Le bilan liquide du complexe est donc toujours négatif.

Le clc a échangé en période d'étiage un volume tidal de 26, 100 et 40 millions de m^3 (Mm^3) respectivement à Grand-Lahou, Vridi et Assinie, ce qui représente un volume tidal cumulé aux trois embouchures de l'ordre 166 Mm^3 . Au cours de la période de crue, ce volume tidal a atteint successivement 20 Mm^3 à Grand-Lahou, 80 Mm^3 à Vridi et 40 Mm^3 à Assinie. On en déduit un volume tidal total de l'ordre 140 Mm^3 en période de fort débit fluvial. Plus de la moitié des flux liquides entre le complexe lagunaire et le plateau continental transitent par le canal de Vridi. Le prisme tidal diminue à Grand-Lahou et à Vridi quand le débit fluvial augmente, mais reste inchangé à Assinie quel que soit le débit. Ces résultats indiquent que l'impact de la marée sur le milieu lagunaire est maximal en période d'étiage et réduit en période de crue.

Temps de renouvellement des eaux

En étiage, le temps moyen de renouvellement des eaux est de 22,3 jours pour le système lagunaire Grand-Lahou, de 23,6 jours pour le système lagunaire Ebrié et de 44,3 jours pour le système lagunaire Aby. En période de crue, ce temps est de 30 jours pour les systèmes lagunaires Grand-Lahou et Ebrié et de 45 jours pour le système lagunaire Aby. Pour l'ensemble du clc, le temps de séjours moyen des eaux est estimé à 26,2 jours en étiage et à 34,2 jours en crue.

Intrusion saline et dispersion des eaux douces

La distribution spatiale des salinités reflète l'intensité et la direction des courants de marée dans le milieu. L'extension géographique du panache salin dans le milieu lagunaire est plus importante en étiage qu'en période de crue. Le suivi spatio-temporel de la salinité a montré un transport d'eaux douces du système Grand-Lahou vers le système Ebrié à travers le canal d'Assagny, puis du système Ebrié vers le système Aby *via* le canal d'Assinie confirmant ainsi les échanges entre les systèmes lagunaires. Ce transport est minimal en étiage et maximal en période de crue.

Perspectives

Les résultats de ce travail ouvrent des perspectives de recherches à conditions que d'autres mesures sont faites. Dans les simulations, nous avons adopté un coefficient de frottement uniforme dans chaque système lagunaire. Il serait plus réaliste d'utiliser des coefficients de frottement variables dans l'espace en fonction de la composition du fond (substrat).

Le modèle hydrodynamique (RMA2) peut être couplé au modèle hydro-sédimentaire (*SED-2D*) pour reproduire le transport de particules en suspensions déversées par la mer et les fleuves dans le clc. En outre, l'intrusion des eaux douces par les fleuves (de même que l'intrusion des eaux marines par les passes) pourrait générer une stratification en densité dans ces milieux (les eaux douces flottent en surface à cause de leur masse volumique plus faible), du moins dans les zones proches des embouchures des fleuves (ou des passes). L'étude de ces phénomènes (stratification probable dans quelques zones en période de crues et d'étiage) nécessiterait l'utilisation d'un modèle tri-dimensionnel (ou 3D).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABE J., BAKAYOKO S., BAMBA S. B. et CISSOKO S. (1993). Morphologie et hydrodynamique à l'embouchure du fleuve Bandama, Abidjan, Côte d'Ivoire. *JOL : Journal Ivoirien d'Océanologie et de Limnologie*, pp. 9-24.

ABE J., BANDAMA B. S., BAKAYOKO S., KOFFI P. K. et CISSOKO S. (1996). Influence des régimes hydrologiques sur les variations morphologiques actuelles d'une passe lagunaire en domaine microtidal tropical (la passe d'Assinie en lagune Aby-Côte d'Ivoire). *Laboratoire de Physique et de géologie Marine, Centr. Rech. Océanogr*, 52 p.

AFFIAN K. (2003). Approche environnementale d'un écosystème lagunaire microtidal (la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire), par des études géochimiques et hydrologiques, bathymétriques et hydrologiques : contribution du S.I.G. et de la télédétection. *Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody*, 225 p.

AKA K. (1991). La sédimentation quaternaire sur la marge de Côte d'Ivoire. Essai de modélisation. *Thèse de Doctorat. Ès. Sc. Nat. Université d'Abidjan*, 233 p.

ALLEN G.P., SALOMON, J.C., BASSOULET P., DU PENHOAT Y et DE GRANPRE C. (1980). Effects of Tides on mixing and suspended sediment transport in Macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology*, 26, pp. 69-90.

ANONYME (2001). Bloc CI-40, phase 2 puits d'exploitation et d'évaluation : étude d'impact environnemental. Ranger Oil. *Rapport technique 84 p.*

ARENS G., DELTEIL J.R., VALERY P., DAMOTTE B., MONTADERT L. et PATRIAT P. (1971). The continental margin of the Ivory Coast and Ghana. in DELANY F. (Ed) : *The geology of the East atlantic continental margin, Vol. 4 Africa. Inst. Geol. Sci., London, Report 70/16*, pp. 61-68.

ARFI R., DUFOUR P. et MAYER D. (1981). Phytoplankton et pollution : premières études en baie de Biétry (Côte d'Ivoire). Traitement mathématique des données. *Oceanologica Acta*, pp. 319-329.

ARFI R., GUIRAL D. et TORRETON J. P. (1989). Cycle hydrologique annuel d'une baie lagunaire eutrophe : la baie de Biétry (Lagune Ebrié, Côte d'Ivoire). *Rev. Hydrobiol. Trop. n° 22, vol. 4*, pp. 263-273.

ARFI R. et GUIRAL D. (1994). Un écosystème estuarien eutrophe : la baie de Biétry. In Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire Tome II. *Les milieux lagunaires, Durand J.R., Dufour Ph., Guiral D. et Zabi S., éditeurs. Edition de l'ORSTOM*, pp. 59-90.

ASSEMIEN A., FILLERON J., MARTIN L. et TASTET J. P. (1970). Le Quaternaire de la zone littorale de Côte d'Ivoire. *Bull. Ass. Sénégal. Et. Quater. Ouest Afric., Dakar, n°25, pp. 65-78.*

BACHER C., SOCHARD S., FREISSINET C. et SAUVAGET P. (2000). Vers une modélisation opérationnelle pour l'aménagement des zones côtières : l'exemple du bassin de Marennes-Oléron (France). *La houille blanche 7/8, pp. 66-73.*

BESSELES B. (1977). Géologie de l'Afrique : le craton Ouest-africain. *Mém. BRGM, n°88, 402 p.*

BIDET J. C., CARRUESCO C. et GENSOUS B. (1977). Un milieu sédimentaire actuel ; la lagune de Moulay-Bou-Salham (Côte Atlantique Marocaine). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine Bordeaux ; n°22, pp. 189-230.*

BLEU (2005). Diagnostic du niveau de pollution par les nutriments et l'endosulfan des plans d'eau des mangroves du système lagunaire de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Dea, Université de Cocody, 74 p.*

BOUET E. (1949). Exploration de la rivière de Grand-Bassam (Afrique Occidentale), Abidjan, Côte d'Ivoire. *Annal Hydrographique, Vol. 2, pp. 155-156.*

BRENON I. (1997). Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine. *Thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale, n°501, 260 p.*

BROCHE J., et PESCHET J. L., (1983). Enquête sur les pollutions actuelles et potentielles en Côte d'Ivoire. *In : P. Dufour et J.M. Chantraine (EDS), Réseau national d'observation de la qualité des eaux marines et lagunaires en Côte d'Ivoire. Paris, Orstom et ministère de l'Environnement, 451 p.*

CAMIL J. (1984). Pétrographie et chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest-africain. *Thèse de Doctorat Ès. Sc. Nat. Université d'Abidjan, 306 p.*

CENTRE INTERNATIONAL POUR LA FORMATION et LES ECHANGES GEOLOGIQUES – C.I.F.F.E.G. (1982). L'approche géologique des environnements lagunaires. *Institut de Géologie du Bassin Aquitaine – Université de Bordeaux I. 110 p.*

- CENTRE POUR L'ENVIRONNEMENT et LE DEVELOPPEMENT EN AFRIQUE - CEDA (1997).** Principaux problèmes environnementaux de la zone côtière. In Côte d'Ivoire – Profil environnemental de la zone côtière. *Rapport Ministère du logement, du cadre de vie et de l'environnement, Grand écosystème marin du golfe de Guinée*, pp. 44-47.
- CHANTRAINE J. M. (1980).** La lagune Aby (Côte d'Ivoire) : morphologie, hydrologie, paramètres physico-chimiques. *CRO : Centre de Recherche Océanographique, Abidjan*, pp. 1-38.
- CHARLES-DOMINIQUE E. (1993).** L'exploitation de la lagune Aby (Côte d'Ivoire) par la pêche artisanale. Dynamique des ressources, de l'exploitation et des pêcheries. Biologie des populations et Ecologie. *Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc*, 403 p.
- CHENG R. T., BURAU J. R. et GARTNER J. W. (1991).** Interfacing data analysis and numerical modeling for tidal hydrodynamic phenomena. In: Parker, B. B. (Ed.), *Tidal Hydrodynamics. Wiley, New York*, pp. 201-219.
- CLAON S. (1999).** Evaluation de l'exposition au mercure, à l'arsenic et au sélénium de l'écosystème et des populations de la lagune Aby (Côte d'Ivoire). Impacts de l'extraction aurifère au Ghana. *Dea Université Joseph Fourier, ufr de Pharmacie, Grenoble*, 55 p.
- DROZ L., BLAREZ E., MASCLE J. et SOMBO B. C. (1985).** The "Trou-sans-fond" deep sea fan (off Ivory Coast, Equatorial Atlantic). *Marine Geology* 67, pp. 1-11.
- DUFOUR P. et SLEPOUKHA M. (1975).** L'oxygène dissous en lagune Ebrié : influence de l'hydroclimat et des pollutions. *CRO : Centre de Recherche Océanologique, Abidjan, Vol. 6, N°2*, pp. 75-118.
- DUFOUR PH. (1982).** Les frontières naturelles et humaines du système lagunaire Ebrié. Incidences sur l'hydroclimat. *Hydrobiologia*, n°94, pp. 105-120.
- DUFOUR PH. (1984).** La biomasse des lagunes côtières. Exemple de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Rev. Hydrobiol. Trop.* n°27, pp. 207-233.
- DUFOUR P., LEMOALLE J. et ALBARET J.J. (1994).** Le système Ebrié dans les typologies lagunaires. In Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire Tome II. Les milieux lagunaires, Durand J.R., Dufour Ph., Guiral D. et Zabi S., éditeurs. *Edition de l'Orstom*, pp. 17-24.

- DURAND J. R. et SKUBICH M. (1980).** Les lagunes ivoiriennes, *aquaculture*, n° 27, pp. 211-250.
- DURAND J. R. et CHANTRAINE J. M. (1982).** L'environnement climatique des lagunes ivoiriennes. *Rev. Hydrobiol. Trop.* pp. 85-113.
- DURAND J. R. et SKUBICH M. (1982).** Recherche sur les lagunes ivoiriennes. CRO : *Centre de Recherches Océanographique, Abidjan*, pp. 54.
- DURAND J. R. et GUIRAL D. (1994).** Hydroclimat et hydrochimie. Dans Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire : *Les milieux lagunaires. Tome 2 Edit. Orstom*, pp. 59-90.
- ELDIN M. (1971).** Le climat. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoire Orstom*, 50, pp. 72-108.
- FERNANDES E. H. L., DYER K. R., MOLLER O. O. et NIENCHESKI L. F. H. (1998).** The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event. *Continental Shelf Research*, n°22, pp. 1699-1713.
- FERNANDES E. H. L., DYER K. R. et NIENCHESKI L. F. H. (2001).** Calibration and validation of the TELEMAC-2D Model to the Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research Special Issue*, n° 34, pp. 470-488.
- FREDOUX A. (1977).** Etude palynologique de quelques sédiments du Quaternaire ivoirien, *Bull. Ass. Franc. Etud. Quatern.*, Paris, n°5, pp. 181-187.
- GALLARDO Y. (1978).** Assymetry and anomalies of circulation and vertical mixing in the branching of a lagoon estuary. In: J.C.J. Nihoul (Ed), *Hydrodynamics of estuaries and fjords. Amsterdam, Elsevier, Oceanographic series*, n° 23, pp. 197-206.
- GERLOTTO F. (1975).** Les études de biologie des pêches en lagune. CRO : *Centre de Recherche Océanographique, Abidjan, Rapport*, pp. 6.
- GIRARD G., SIRCOULON J., et TOUCHEBOEUF P. (1971).** Aperçu sur les régions hydrologiques. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mém. Orstom*, N°50, pp. 109-156.
- GORINI M. A. (1981).** The tectonic fabric of the equatorial atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to northeastern Brazil, PETROBAS, *série PROJETO REZMAC*, N°9, pp. 7-116.

- GUIRAL D. (1992).** L'instabilité physique, facteur d'organisation et de structuration d'un écosystème tropical saumâtre peu profond : la lagune Ebrié. *CRO : Centre de Recherche Océanographique, Abidjan, N° 42, pp. 73-92.*
- GUIRAL D. et LANUSSE A. (1984).** Contribution à l'étude hydrodynamique de la baie de Biétry, lagune Ebrié, Côte d'Ivoire. *CRO : Centre de Recherche Océanographique, Abidjan, Vol. 15 N°1, pp. 1-18.*
- HAYES M. O. (1975).** Barrier isystème Abynd morphology as a function of tidal and wave regime. In *P. Leatherman (Ed) Barrier Isystème Abynd. Academic Press, pp. 1-71.*
- HIE-DARE J. P. (1984).** Etude sur l'aménagement des pêches sur la lagune Tiagba (Côte d'Ivoire). *CRO : Centre de Recherche Océanographique, Abidjan, 2 p.*
- JOBET (1701).** Plan de la rivière d'Isiny situé au dit royaume de la côte d'or en Afrique, *Paris. Bibl. Nat. Vol 3, 20 p.*
- JOUINI Z. (2003).** Le fonctionnement hydrodynamique et écologique du Lac Sud de Tunis après les aménagements. *Mémoire de Master, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunisie, Tunisie, 175 p.*
- 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 l'université Rennes France 277p in : BIOTERRE, rev inter. sci. de la vie et de la terre, vol.1, n°1, 2000, 38 p.*
- KOUTITONSKY V. G. K. T., GUYONDET A. St., HILLAIRE S. C. et BOHGEN A. (2004a).** Water renewal estimates for aquaculture developments in the Richibucto estuary, Canada. *Estuaries, 27(5), pp. 839-850.*
- KOUTITONSKY V. G. et TITA, G. (2006).** Temps de renouvellement des eaux dans la lagune de Grande-Entrée aux Îles-de-la-Madeleine. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. *Rapport de recherche-développement no 151. 73 p.*
- KOUTITONSKY V. G. K. T (2007).** Cours POGO <<la zone côtière et ses variables>>. *Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec, 31 p.*
- LANKFORD R. R. (1977).** Coastal lagoons of Mexico; their origin and classification. In: M. Wiley (Ed). *Estuarine processes. Acad press, Vol. 2, pp. 182-216.*

- LAE R. (1982).** Premières observations sur la pêche en lagune de Grand-Lahou. *Mém. Dea d'océanographie, Brest*, 30 p.
- LE BOURDIEC P. (1958).** Aspects de la morphologie plio-quaternaire en basse Côte d'Ivoire. *Rev. Géomorph. Dyn., Strasbourg. Vol. 9*, pp. 33-42.
- LE FLOCH J. (1970).** Mesures différentielles de courants au large de la Côte d'Ivoire. *Cahier Océano.*, 22, N°8, pp. 781-799.
- LE LŒUFF P. et MARCHAL E. (1993).** Géographie littorale. In Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire Tome I. Le milieu marin, Le Lœuf P., Marchal E., et Amon Kothias J-B., éditeurs. *Edition de l'Orstom*, pp. 17-24.
- LEMOINE S. (1988).** Evolution géologique de la région de Dabakala (NE-Côte d'Ivoire) au Protérozoïque inférieur. Possibilités d'extension au reste de la Côte d'Ivoire et au Burkina-Faso : Similitudes et différences ; les linéaments Greenville-Ferkessedougou et Grand Cess-Niakaramadougou. *Thèse Université Clermont Ferrand II, N°E393*, 400 p.
- LE RIBAUT L. et TASTET J. P. (1979).** Apport de l'exoscopie des quartzs à la détermination de l'origine des dépôts quaternaires littoraux de Côte d'Ivoire. *Intern. Symp. on Coastal Evol. Quat., Sao Paolo (Brésil)*, pp. 573-587.
- LEMASSON L. et REBERT J. P. (1973).** Les courants marins dans le golfe ivoirien. *Cah. Orstom, série Océanogr., vol. XI, n°1*, pp. 67-95.
- KONE M. et AKA K. (1996).** Les lagunes d'Abidjan asphyxiées par la pollution. *Africa Geoscience Review, Vol. 3, n° 3/4*, pp. 461-470.
- MALM O. (1998).** Gold mining as Source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. *Environmental research*. pp. 73-78.
- MARTIN L. (1973).** Morphologie, sédimentologie et paléogéographie au Quaternaire récent du plateau continental ivoirien. *Thèse Université, Paris VI, Orstom*, 340 p.
- MARTIN L. (1974).** Le Trou-Sans-Fond, canyon sous-marin de la Côte d'Ivoire. *Cah. Ortom, Sér. Géol., vol. VI, n°1*, pp. 67-76.
- MARTIN L. (1977).** Morphologie, sédimentologie et paléogéographique au Quaternaire récent du plateau continental ivoirien. *Paris, trav. Doc. ORSTOM, N°61*, 266 p.

- METONGO B. S. (1985).** Hydroclimat d'une lagune à forte influence continentale : la lagune Aby (Côte d'Ivoire), Abidjan, Côte d'Ivoire. *CRO : Centre de Recherche d'Océanographique, Abidjan, N°16, pp 45-64.*
- METONGO B. S. (1989).** Production primaire d'une lagune tropicale à forte influence continentale : la lagune Aby (Côte d'Ivoire). *CRO : Centre de Recherche d'Océanographique, Abidjan, N°17, pp. 1-27.*
- MONDE S. (1997).** Nouvelles approches de la cartographie du plateau continental de Côte d'Ivoire. Aspects morphologiques et sédimentologiques. *Thèse Doctorat 3^e cycle, Université d'Abidjan, 175 p.*
- MONDE S. (2004).** Etude et modélisation hydrodynamique de la circulation des masses d'eau dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Thèse de Doctorat d'Etat, Université d'Abidjan, 324 p.*
- MONDE S., AKA K., GERARD J. et LEENHARDT O. (1998).** Nouvelles cartes bathymétriques et sédimentologiques du plateau continental de Côte d'Ivoire. *Géologues, N°117, pp. 17-23.*
- MONNET C. (1972).** Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama, Côte d'Ivoire. Evolution des éléments chimiques des eaux de son estuaire. *Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Nice, 427 p.*
- MORLIERE A. (1970).** Les saisons marines devant Abidjan. *CRO : Centre de Recherche Océanographique, Abidjan, N°1, Vol. 2, pp. 1-15.*
- MOUSSA M. (2002).** Fascicule de Modélisation dynamique. *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie, 40 p.*
- MOUSSA M. (2006).** Maîtrise des logiciels CORMIX et SMS. *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie, 68 p.*
- N'GUESSAN Y. A. (2008).** Analyse morphologique, sédimentologique et paleoenvironnementale des sédiments superficiels des lagunes Adjin et Potou (zone littorale de la Côte d'Ivoire). *Thèse Unique. Université de Cocody, 160 p.*
- NICHOLS M. et ALLEN G. (1981).** Sedimentary processes in lagoons. In: Coastal lagoon Research, present and future. Proceedings of a seminar, Duke University, August 1978 (Unesco, IABO). *Unesco technical papers in Marine Science, 33 p.*

- PAGES J., LEMASSON L. et DUFOUR P. (1979).** Eléments nutritifs et production primaire dans les lagunes de Côte d'Ivoire. Cycle annuel. *Arch. Sci. CRO : Centre de Recherche Océanographique, Abidjan, pp. 1-60.*
- PAGES L., DUFOUR P. et LEMASSON L. (1980).** Pollution de la zone urbaine de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *CRO : Centre de Recherche Océanographique, Abidjan, N°2, pp. 79-107.*
- PLANT-CUNY M.R. (1977).** Pigments photosynthétiques et production primaire du microphytobenthos d'une lagune tropicale, la lagune Ebrié (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Cah. Ortom, sér. Océanogr., 15 (1), 25 p.*
- PLUTCHART N. (1966).** Guinea current. Dans FAIRBRIDGE R. Ed. *The Ency. of Ocean., New York, Reinhold, pp. 311-312.*
- PORT AUTONOME D'ABIDJAN – PAA (1994).** Les conséquences de l'ouverture du canal de Vridi sur l'évolution géomorphologique du littoral. 8^{ème} journée géographique de Côte d'Ivoire : « Economie portuaire et structuration de l'espace national : Espaces littoraux et vie marine » *Rapport interne, 20 p.*
- PORT AUTONOME D'ABIDJAN – PAA (2001).** Etude sur modèle physique sédimentologique pour une ouverture permanente de l'embouchure de la Comoé. Rapport général. *Rapport 55 2014 R2. Sogreah, 45 p.*
- POUVREAU N. (2002).** Impact des forçages hydrodynamiques sur la circulation des masses d'eau dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Dea, Université de La Rochelle, Centre Littoral De Géophysique, 45 p.*
- RAMANY, B.P. (1979).** Le système lagunaire Ebrié en Côte d'Ivoire : fonctionnement hydrodynamique et salinité. *Thèse de Doctorat d'Ingénieur. Institut National Polytechnique de Toulouse, 179 p.*
- RANASINGHE, R. et PATTIARATCHI, C. (1998).** Flushing characteristics of a seasonally-open tidal inlet: A numerical study. *Journal of Coastal Research, 14 (4), pp. 1405-1421.*
- ROUGERIE G. (1951a).** Etude morphologique du bassin français de la Bia et des régions littorales de la lagune Aby. *Etudes Eburnéennes, pp. 11-58.*

ROUGERIE G. (1951b). Recherche de l'évolution structurale et morphologique de la région Bia-lagune Aby. *Etudes Eburnéennes*, 222 p.

SHERWIN T. (2000). The significance of residual currents in the interpretation of the EU urban wastewater treatment directive in coastal locations. *Marine Pollution Bulletin* 40, pp. 17-21.

SOMBO B. C. (2002). Etude structurale et sismo-stratigraphie off-shore de Côte d'Ivoire, marge passive entaillée d'un canyon. *Thèse de Doctorat d'Etat. Université d'Abidjan*, 350 p.

SMS (2003). Surface-Water Modeling System. Users guide to RMA2 WES, version 4.3. *US Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station*, 240 p.

SPENGLER A. et DELTEIL J.R. (1966). Le bassin sédimentaire secondaire-tertiaire de Côte d'Ivoire. *Ann. Ser. Géol. Afric., Paris*, pp. 99-113.

STRUSKI C. (2005). Modélisation des flux de matières dans la baie de Marennes-Oléron : couplage de l'hydrodynamique, de la production primaire et de la consommation par les huîtres. *Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle*, 299 p.

TAGINI B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse Université de Lausanne. *Soc. Dév. Min. Côte d'Ivoire (SODEMI) Bull., n°5*, 302p., Abidjan.

TASTET J. P. (1974). L'environnement physique du système lagunaire Ebrié. I et II Univ. Abidjan. *Sér. Doc. N°11*, 28 p.

TASTET J. P. (1979). Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo et Bénin). *Thèse de Doctorat d'Etat ès Sc. Nat. Université de Bordeaux I, N°621*, 175 p.

TASTET J.P., CAILLON L. et SIMON B. (1985). La dynamique sédimentaire littorale devant Abidjan: impacts des aménagements. Contribution à la compréhension des phénomènes d'érosion et de sédimentation. *UNCI-PAA*, 39 p.

TASTET J. P. et GUIRAL D. (1994). Géologie et sédimentologie. In Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire. Les milieux lagunaires. T. 2 Edit. *Orstom*, pp. 36-56.

VARLET F. (1958). Le régime de l'Atlantique près d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Essai d'océanographie littorale. *Etude Eburnéennes, Abidjan, vol. 5. pp. 101-220.*

VARLET F. (1978). Le régime de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Trav. Doc. Orstom*, 83 p.

WOGNIN V. (2004). Caractérisation hydrologique et sédimentologique de l'embouchure du fleuve Bandama. *Thèse de Doctorat, Université de Cocody, 195 p.*

ZABI G. S. (1982). Les peuplements benthiques lagunaires liés à la pollution en zone urbaine d'Abidjan (Côte d'Ivoire). In : P. Lasserre, H. Postma (Eds), Coastal lagoons. *Oceanologica Acta, vol. spec. 5 (4), pp. 441-455.*

ANNEXE

ANNEXE A1

(Exemple de fichiers des paramètres utilisés par le module *RMA2* du logiciel *SMS*)

```
RMA2 RUN CONTROL (BC) INPUT [ascii]= Grand-Lahou_étiage.bc
FULL PRINT LISTING FILE [ascii]    = Grand-Lahou_étiage.ot2
GFGEN OUTPUT GEOMETRY [binary]= Grand-Lahou_étiage.bin
RMA2 solution output [binary]= Grand-Lahou_étiage.sol
```

```
ECHO of all I/O Logical Units assignments      after SUPERFILE was read
  Input BC file (ascii)                        = 2
  Input altbc file (ascii)                     = 0
  Input geometry (binary)                     = 60
  Input hotstart (binary)                     = 0
  Output hotstart (binary)                    = 0
  Output u,v,h solution (binary)              = 35
  Output vorticity solution (binary)          = 0
  Output salt solution (binary)               = 0
  Output full results listing                  = 3
  Output summary results listing              = 0
  Output auto-parameter assignment            = 0
```

1

```
FINITE ELEMENT METHOD FOR FLUID FLOW ... RMA-2
TWO-DIMENSIONAL HYDRODYNAMICS IN THE HORIZONTAL PLANE
VERSION 4.35  AUGUST 1995
```

```
COMPUTER TYPE ID IS SET TO= 1
NORMALLY -IVRSID= (DOS=1,UNIXws=4,CRAY=5)
```

1

```
RMA2 VERSION 4.35  1D & 2D CAPABILITY.
LAST MODIFICATION DATE: 02-09-1998
```

THIS PROGRAM IS DIMENSIONED AS FOLLOWS

```
MAX NO. OF NODES                60000
MAX NO. OF ELEMENTS              20000
MAX NO. OF EQUATIONS             100000
MAX FRONT WIDTH                   1400
MAX NO. OF CONTINUITY CHECK LINES  150
MAX BUFFER SIZE                   1000000
MAX PRINT-SUMMARY BUFFER          60000
```

RUN CONTROL PARAMETERS

```
ELEMENTS                3244
ELEMENT TYPES            1
COORDINATE CARDS        0
BOUNDARY SPECS          0
WIDTH CARDS              0
ELEMENT FLOW             0
PRINT OPTION            0
CONT CHECKS             3
```

ANNEXE A2

(Exemple de fichiers des paramètres utilisés par le module *RMA4* du logiciel *SMS*)

TABS-MD FINITE ELEMENT WATER QUALITY CONSTITUENT MODEL

//// Original Author: Ian P. King of RMA ////

//// Modified and Maintained by USAE WES-HL ////

===== RMA4 VERSION 4.30 1D AND 2D CAPABILITY =====

===== LAST MODIFICATION DATE: 10-02-1997 =====

RMA4 Program Dimensions for this executable:

MAX NODE = 30000
MAX ELEMENT = 10000
MAX FRONT WIDTH = 700
MAX CONTINUITY CHECKS = 150
MAX TIME STEPS = 1500
SCRATCH BUFFER = 400000
MAX SUMMARY PRINT BUFFER = 24000
MAX CONSTITUENTS = 6

RMA4 run control input file name= Létiage.trn

RMA4 full results listing file name= Létiage.ot3

Gfgen binary geometry output file name= Létiage.bin

Hydro velocity (u,v,h) file name [binary]= Létiage.sol

Solution output file name [binary]= Létiage.qsl

ECHO of all I/O Logical Units assignments after SUPERFILE was read

Input BC file (ascii) = 3
Input altbc file (ascii) = 0
Input velocity file (ascii) = 20
Input geometry (binary) = 10
Input hotstart (binary) = 0
Output hotstart (binary) = 0
Output transport solution (binary) = 31
Output full results listing = 33
Output summary results listing = 0

...NUMBER OF EQUATIONS IS 7274.....

--> RMA4 write Binary Results time= 0.5000 RMA2 time used= 112.5000

1

RMA4 VERSION 4.30 (1D-2D)

FINITE ELEMENT WATER QUALITY MODEL ... LU= 3

PREQTM HAS DETERMINED VALUE OF ISTYLE= 1

1

RMA4 VERSION 4.30 (1D-2D)

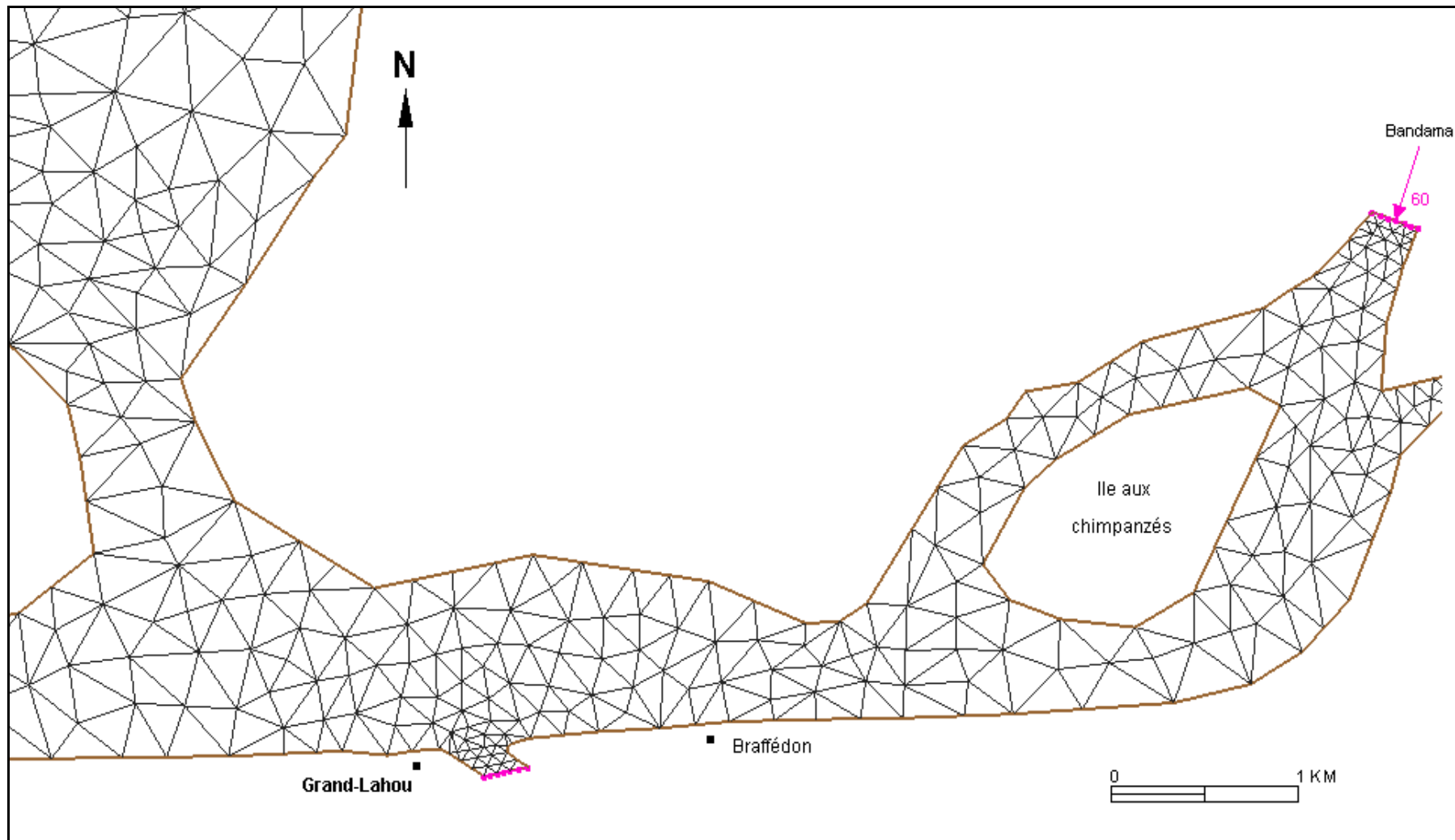
FINITE ELEMENT WATER QUALITY MODEL ... LU= 3

PREQTM HAS DETERMINED VALUE OF ISTYLE= 1

SIMTIM-IRESL-IT-TET-TCORR= 1.000000 0 2

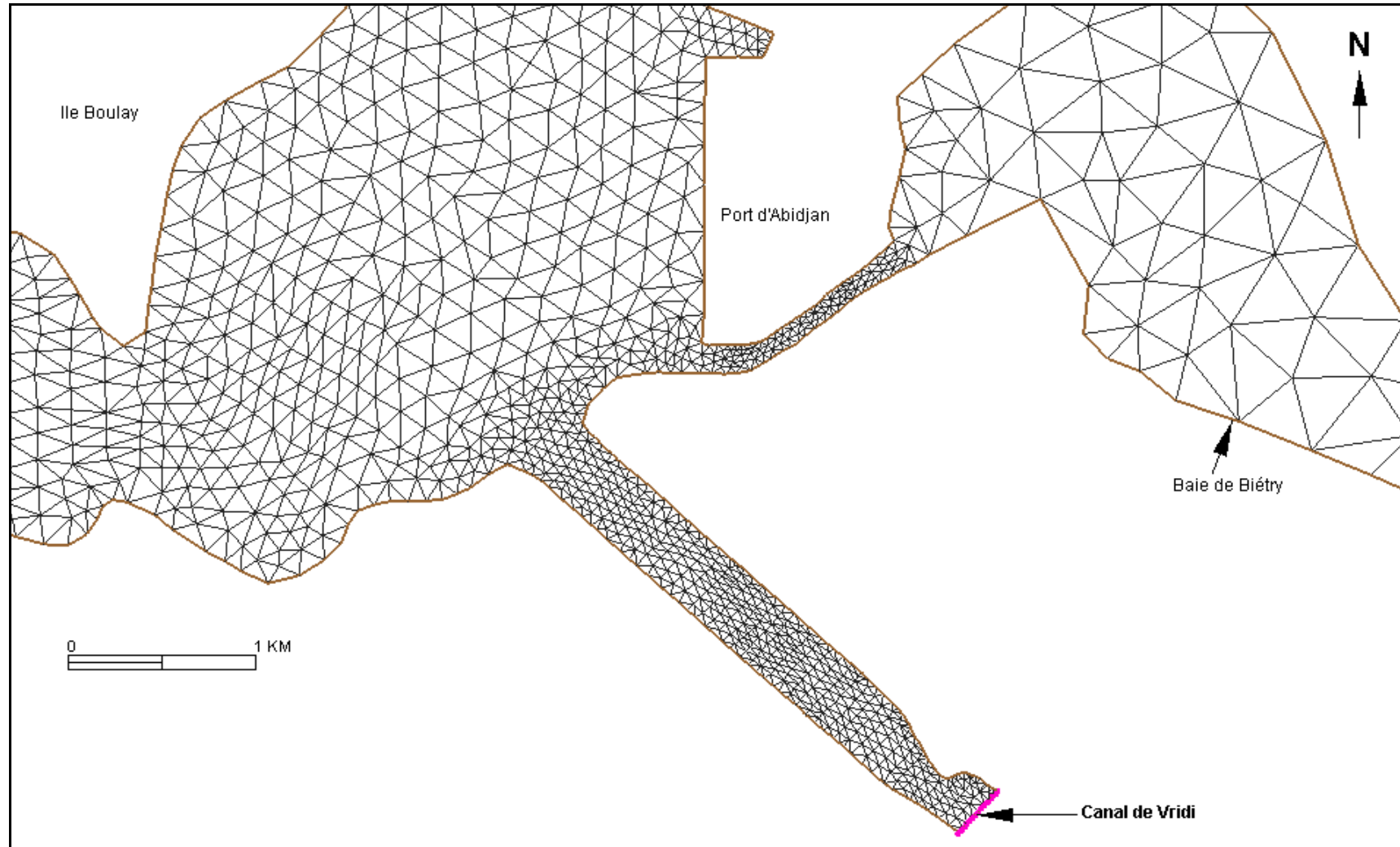
ANNEXE B1

(Maillage de l'embouchure de Grand-Lahou)



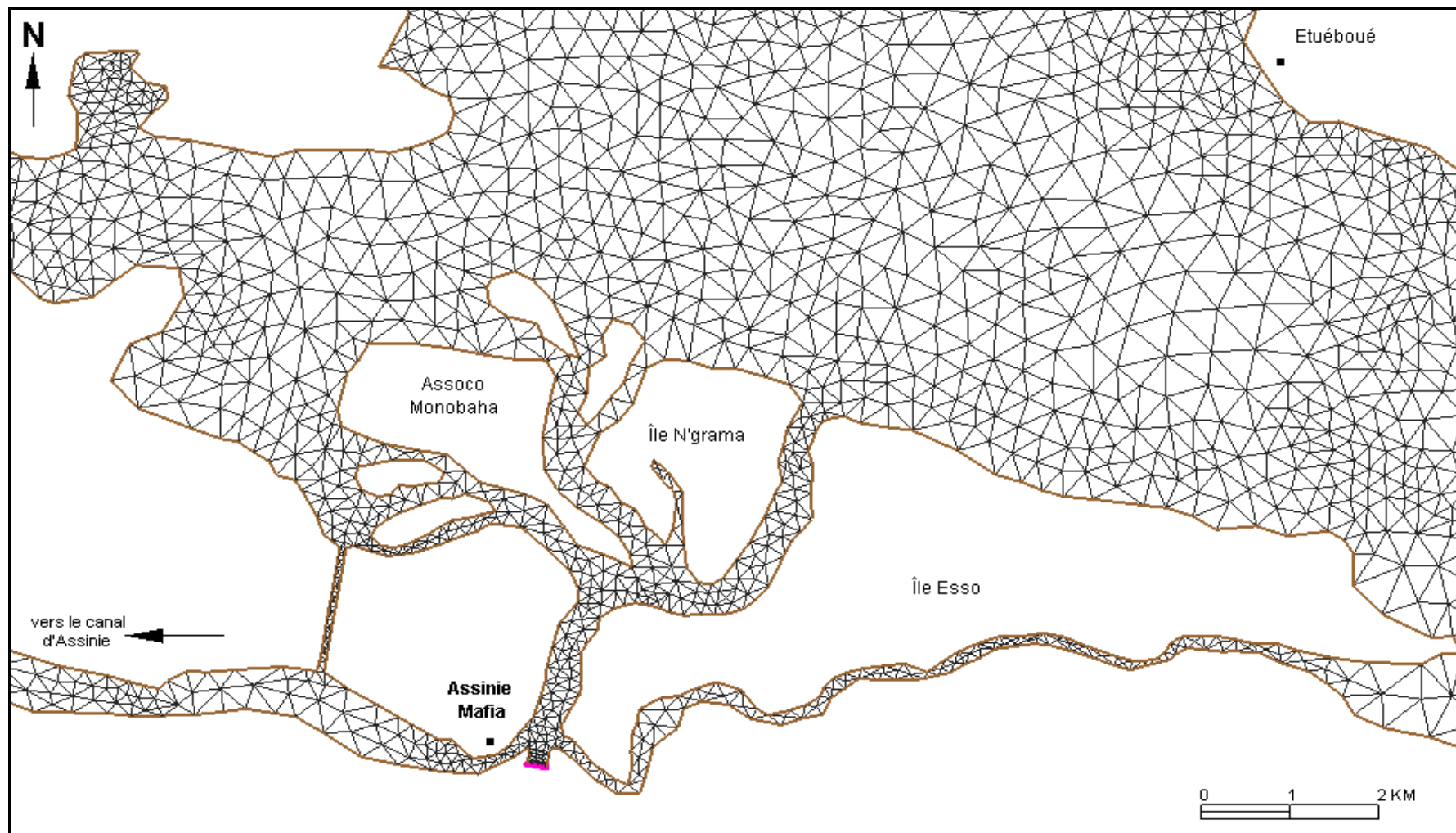
ANNEXE B2

(Maillage de l'embouchure de Grand-Lahou)



ANNEXE B3

(Maillage des chenaux de la passe d'Assinie)



RESUME

Le logiciel SMS est un modèle numérique à deux dimensions intégré sur la verticale. Il a été utilisé pour modéliser pour la première fois la totalité du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire sous la combinaison d'une marée moyenne et de débits fluviaux. Le calage du modèle a donné des coefficients de Manning de l'ordre 0,05, 0,03 and 0,04 $m^{-1/3}.s$ respectivement pour les systèmes lagunaires Grand-Lahou, Ebrié et Aby. Les résultats des simulations indiquent que la marée et les débits fluviaux contribuent à la création des courants de circulation et aux échanges avec la mer. Les courants de marée sont symétriques en étiage et dissymétriques en crue. Avec un marnage en mer de 0,64 m, le prisme tidal pour l'ensemble du complexe lagunaire est de $166.10^6 m^3$ en étiage et de $140.10^6 m^3$ en crue. Le temps moyen de séjours des eaux est de 26,2 jours en étiage et de 34,2 jours en crue. Le modèle de qualité des eaux a montré une augmentation des salinités dans le complexe lagunaire durant la période de faible débit fluvial et une dessalure en période de crue.

Mots-clés : SMS, modèle, simulation, Manning, marée, étiage, crue, prisme tidal, temps de renouvellement des eaux

ABSTRACT

SMS is a two-dimensional depth-average numerical model has been used to modelling for the first time the totality of the Complex Lagoon of Côte d'Ivoire under an average tide and flows river. The calibration of the model gave Manning coefficients of about 0.05, 0.03 and $0.04 m^{-1/3}.s$ respectively for the Grand-Lahou, Ebrié and Aby lagoon system. The results of simulations indicate that the tide and the flows river contribute to the creation of the currents of circulation and the exchanges with the sea. The tide currents are symmetrical in low water and dissymmetrical in rising. With a tidal range at sea of 0.64 m, the tidal prism for the whole of the lagoon complex is $166.10^6 m^3$ in low water and $140. 10^6 m^3$ in rising. The residence time of waters is 26.2 days in low water level and 34.2 days in rising. The quality model of the waters shows an increase in salinities in the lagoon complex during period of low water and a decrease salinity in period of rising.

Key words : SMS, model, simulation, Manning, tide, low water, rising, tidal prism, renewal time waters