

République de Côte d'Ivoire

~~~~~  
Ministère de l'Enseignement  
Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



Université de Cocody



UFR des Sciences de la Terre et  
des Ressources Minières

**N° d'ordre : 591/209**

*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 à Abidjan

*Pour obtenir le grade de*

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE COCODY**

**Spécialité : Géologie Marine et Sédimentologie**

*Par*

**ADOPO KOUASSI LAURENT**

## **THÈME:**

**CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDRO-SEDIMENTAIRE D'UN  
ENVIRONNEMENT ESTUARIEN EN ZONE TROPICALE : CAS DE L'EMBOUCHURE DU  
FLEUVE COMOIE A GRAND-BASSAM (Sud-Est de la Côte d'Ivoire).**

**Soutenue publiquement le 28 FEVRIER 2009 devant le jury composé de :**

Professeur BIEMI JEAN .....Président  
Professeur DIBGEHI ZELI BRUNO.....Rapporteur  
Professeur AKA KOUAME .....Directeur de Thèse  
Professeur ABE JACQUES.....Rapporteur  
Professeur MONDE SYLVAIN.....Examineur

# TABLE DES MATIERES

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| REMERCIEMENTS.....          | VI    |
| DEDICACE.....               | IX    |
| LISTE DES FIGURES.....      | X     |
| LISTE DES TABLEAUX.....     | XIII  |
| LISTE DES PHOTOS.....       | XV    |
| LISTE DES ABREVIATIONS..... | XVI   |
| RESUME.....                 | XVII  |
| ABSTRACT.....               | XVIII |

|                   |   |
|-------------------|---|
| INTRODUCTION..... | 1 |
|-------------------|---|

|                                                                                                          |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GENERAL DU LITTORAL IVOIRIEN ET DU BASSIN VERSANT DU FLEUVE COMOE.....</b> | <b>6</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|

|                                                                                                |          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>CHAPITRE 1 : CADRE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DE L'ESTUAIRE DU COMOE.....</b> | <b>7</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1-1. SITUATION GEOGRAPHIQUE L'ESTUAIRE DU COMOE .....            | 7  |
| 1-1-1. Localisation.....                                         | 7  |
| 1-1-2. Climat.....                                               | 7  |
| 1-1-3. Température et insolation.....                            | 9  |
| 1-1-4. Hygrométrie.....                                          | 9  |
| 1-2. REGIME PLUVIOMETRIQUE ET HYDROLOGIQUE.....                  | 10 |
| 1-2-1. Régime pluviométrique.....                                | 10 |
| 1-2-2. Régime hydrologique.....                                  | 12 |
| 1-2-2-1. Hydrologie anté-ouverture du canal de Vridi.....        | 13 |
| 1-2-2-2. Hydrologie post-ouverture du canal de Vridi.....        | 13 |
| 1-2-3. Apports fluviaux.....                                     | 14 |
| 1-2-4. Apports océaniques.....                                   | 14 |
| 1-3. GEOLOGIE DE LA COTE D'IVOIRE.....                           | 15 |
| 1-3-1. Socle cristallin.....                                     | 15 |
| 1-3-1-1. Domaine Kenema-Man ou domaine archéen.....              | 16 |
| 1-3-1-2. Domaine Baoulé-Mossi ou domaine paléoprotérozoïque..... | 16 |
| 1-3-2. Bassin sédimentaire.....                                  | 16 |
| 1-3-2-1. Bassin sédimentaire émergé.....                         | 16 |
| 1-3-2-2. Bassin sédimentaire immergé.....                        | 17 |
| 1-3-3. Stratigraphie du bassin sédimentaire ivoirien.....        | 18 |

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUE HYDRODYNAMIQUE DU LITTORAL ET DU FLEUVE COMOE.....</b> | <b>21</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 2-1. TRAITS MORPHOLOGIQUES DU LITTORAL.....           | 21 |
| 2-1-1. Orientation de la côte.....                    | 21 |
| 2-1-2. Morphologie côtière.....                       | 21 |
| 2-2. MORPHOLOGIE DE LA PLAGES.....                    | 22 |
| 2-2-1. Classification et comportement des plages..... | 22 |
| 2-2-2. Variation de profil de la plage .....          | 24 |

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2-3- DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ACTUELLE DU LITTORAL IVOIRIEN.....                           | 24        |
| 2-3-1. Agents dynamiques littoraux.....                                                  | 24        |
| 2-3-1-1. Houle.....                                                                      | 24        |
| 2-3-1-2. Influence de la houle sur les mouvements sédimentaires.....                     | 26        |
| 2-3-1-3. Vent.....                                                                       | 27        |
| 2-3-1-4. Courant.....                                                                    | 28        |
| 2-3-1-5. Marée.....                                                                      | 28        |
| 2-3-1-6. Dérive littorale.....                                                           | 29        |
| 2-3-1-7. Transit des sables.....                                                         | 30        |
| 2-3-2. Saisons lagunaires et marines .....                                               | 30        |
| 2-3-2-1. Saisons lagunaires.....                                                         | 30        |
| 2-3-2-2. Saisons marines.....                                                            | 31        |
| 2-4. MECANISME DE TRANSPORT SOLIDE ET DE SEDIMENTATION.....                              | 32        |
| 2-4-1. Transport des particules sédimentaires.....                                       | 32        |
| 2-4-2. Transport solide.....                                                             | 32        |
| 2-4-2-1. Transport solide par charriage.....                                             | 33        |
| 2-4-2-2. Transport solide en suspension.....                                             | 34        |
| 2-4-3. Mécanismes généraux de la sédimentation.....                                      | 34        |
| 2-4-3-1. Sédimentation des particules détritiques .....                                  | 34        |
| 2-4-3-2. Sédimentation des colloïdes.....                                                | 34        |
| 2-5. IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIO-ECONOMIQUE DE LA FERMETURE<br>DU GRAU DU COMOE..... | 35        |
| <b>DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES .....</b>                                      | <b>38</b> |
| <b>CHAPITRE 3. MORPHOLOGIE DE L'ESTUAIRE ET DU CORDON LITTORAL...39</b>                  |           |
| 3-1. MATERIEL.....                                                                       | 39        |
| 3-2. METHODES D'ETUDES.....                                                              | 40        |
| 3-2-1. Morphologie de la plage.....                                                      | 40        |
| 3-2-1-1. Levé topographique sur le terrain.....                                          | 41        |
| 3-2-1-2. Tracé des profils.....                                                          | 43        |
| 3-2-1-3. Calcul des surfaces d'érosion et d'engraissement.....                           | 43        |
| 3-2-1-4. Calcul des volumes de sable érodé et engraisé.....                              | 45        |
| 3-2-2. Morphologie de l'estuaire.....                                                    | 46        |
| 3-2-2-1. Levé bathymétrique.....                                                         | 46        |
| 3-2-2-2. Traitement des données d'échosondage.....                                       | 46        |
| <b>CHAPITRE 4. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'ESTUAIRE...50</b>                 |           |
| 4-1. MATERIEL UTILISE.....                                                               | 50        |
| 4-2. METHODES UTILISEES.....                                                             | 51        |
| 4-2-1. Prélèvements et technique d'étude des paramètres physico-chimiques.....           | 51        |
| 4-2-2. Evaluation des flux solides en suspension.....                                    | 52        |
| 4-2-3. Analyse en composantes principales (ACP).....                                     | 53        |

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CHAPITRE 5 : ETUDE DES SEDIMENTS ESTUARIENS.....</b>                                      | <b>54</b> |
| 5-1 : MATERIEL UTILISE.....                                                                  | 54        |
| 5-2. METHODES UTILISEES.....                                                                 | 54        |
| 5-2-1. Technique d'étude des sédiments .....                                                 | 54        |
| 5-2-1-1. Analyse granulométrique des sédiments.....                                          | 55        |
| 5-2-1-2. Traitement des résultats de l'analyse granulométrique.....                          | 57        |
| 5-2-2. Séparation densimétrique.....                                                         | 60        |
| 5-2-3. Analyse statistique.....                                                              | 60        |
| <br>                                                                                         |           |
| <b>CHAPITRE 6. ANALYSE MINERALOGIQUE, MORPHOSCOPIQUE ET MORPHOMETRIQUE DU QUARTZ.....</b>    | <b>61</b> |
| 6-1. MATERIEL UTILISE.....                                                                   | 61        |
| 6-2. METHODES UTILISEES.....                                                                 | 62        |
| 6-2-1. Analyse minéralogique.....                                                            | 62        |
| 6-2-2. Analyse morphoscopique.....                                                           | 63        |
| 6-2-2-1. Méthode de Krumbein .....                                                           | 63        |
| 6-2-2-2. Méthode de Cailleux.....                                                            | 64        |
| 6-2-3- Analyse morphométrique.....                                                           | 64        |
| 6-2-3-1. Indice d'aplatissement.....                                                         | 64        |
| 6-2-3-2. Indice de dissymétrie.....                                                          | 65        |
| <br>                                                                                         |           |
| <b>TROISIEME PARTIE : RESULTATS, INTERPRETATIONS ET DISCUSIONS.....</b>                      | <b>67</b> |
| <br>                                                                                         |           |
| <b>CHAPITRE 7- PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES A L'EMBOUCHURE DU COMOE.....</b>                 | <b>68</b> |
| 7-1- EVOLUTION DE LA GRANULOMETRIE DES SEDIMENTS.....                                        | 68        |
| 7-2. MINERALOGIE.....                                                                        | 69        |
| 7-3. INTERET ET IMPLICATION DE L'ETUDE DES MINERAUX LOURDS.....                              | 72        |
| 7-3-1- Evaluation de la teneur des minéraux lourds pendant la grande saison des pluies ..... | 72        |
| 7-3-2- Evaluation de la teneur des minéraux lourds pendant la petite saison sèche.....       | 74        |
| 7-3-3- Teneur des minéraux lourds pendant la petite saison des pluies.....                   | 75        |
| 7-3-4- Evaluation de la teneur des minéraux lourds pendant la grande saison sèche.....       | 78        |
| 7-4. MORPHOSCOPIE DES MINERAUX LOURDS.....                                                   | 79        |
| 7-5. MINERAUX LEGERS.....                                                                    | 83        |
| 7-6. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA PLAGE .....                                               | 83        |
| 7-6-1. Evolution des profils de la station 1 (à 800 m à l'Ouest de l'embouchure).....        | 84        |
| 7-6-2. Evolution des profils de la station 2 (à 600 m à l'Ouest de l'embouchure).....        | 85        |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7-6-3. Evolution des profils de la station 3 (à 400 m à l'Ouest de l'embouchure) ..... | 86 |
| 7-6-4. Evolution des profils à l'embouchure .....                                      | 87 |
| 7-6-5. Evolution des profils de la station 5 (à 200 m à l'Est de l'embouchure) .....   | 88 |
| 7-6-6. Evolution des profils de la station 6 (à 400 m à l'Est de l'embouchure).....    | 89 |
| 7-6-7. Evolution des profils de la station 7 (à 600 m à l'Est de l'embouchure).....    | 90 |
| 7-7. REMANIEMENTS SEDIMENTAIRES ANNUELS DE LA PLAGE.....                               | 92 |
| 7-7-1. Estimation des mouvements sableux entre Juin et Juillet 2006.....               | 93 |
| 7-7-2. Estimation des mouvements sableux entre Août et Septembre 2006 .....            | 93 |
| 7-7-3. Estimation des mouvements sableux entre Octobre et Novembre 2006 .....          | 94 |
| 7-7-4. Estimation des mouvements sableux entre Mars et Avril 2007.....                 | 95 |
| 7-7-5. Synthèse de l'évolution de la plage à l'embouchure du fleuve Comoé.....         | 95 |
| 7-8. DISCUSSION.....                                                                   | 95 |

## **CHAPITRE 8: DISTRIBUTION SPATIALE ET CARACTERISATION DES SEDIMENTS A L'ESTUAIRE DU COMOÉ.....99**

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8-1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....                                                                      | 99  |
| 8-1-1. Description des faciès sédimentaires.....                                                       | 99  |
| 8-1-2. Paramètres granulométriques et répartition des faciès sédimentaires de l'estuaire du Comoé..... | 99  |
| 8-1-3. Mode de transport des sédiments.....                                                            | 103 |
| 8-2. CARTOGRAPHIE DES FACIES MINERALOGIQUE.....                                                        | 104 |
| 8-2-1. Morphoscopie du quartz.....                                                                     | 104 |
| 8-2-2. Relation morphoscopie – nature du sédiment.....                                                 | 105 |
| 8-2-3. Morphométrie du quartz.....                                                                     | 106 |
| 8-2-3-1. Indice de dissymétrie et indice d'aplatissement.....                                          | 106 |
| 8-2-3-2. Relation indices morphométriques – nature du sédiment.....                                    | 107 |
| 8-2-4. Minéralogie.....                                                                                | 108 |
| 8-3. DISCUSSION.....                                                                                   | 109 |

## **CHAPITRE 9: HYDRO-MORPHOLOGIE DU FOND ESTUAIRIEN DU COMOÉ ..111**

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| 9-1. MORPHOLOGIE DE L'ESTUAIRE DU FLEUVE COMOÉ.....       | 111 |
| 9-2. CONFIGURATION DES CHENAUX.....                       | 113 |
| 9-3. EVOLUTION DU FOND DE L'ESTUAIRE DU FLEUVE COMOÉ..... | 116 |
| 9-4. DISCUSSION.....                                      | 116 |

## **CHAPITRE 10 : CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE ET TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION DANS L'ESTUAIRE DU FLEUVE COMOÉ.....119**

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 10-1. VARIATION DES DEBITS LIQUIDE .....                           | 119 |
| 10-2. EVOLUTION SAISONNIERE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ..... | 120 |
| 10-2-1. Evolution saisonnière verticale.....                       | 120 |
| 10-2-1-1. pH.....                                                  | 120 |
| 10-2-1-2. Salinité.....                                            | 122 |

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| 10-2-1-3. Température.....                                   | 123        |
| 10-2-1-4. Conductivité.....                                  | 123        |
| 10-2-1-5. Oxygène dissous.....                               | 124        |
| 10-2-1-6. Potentiel redox.....                               | 124        |
| 10-2-1-7. Turbidité.....                                     | 125        |
| 10-2-1-8. MES (Matière en Suspension).....                   | 125        |
| 10-2-2. Evolution saisonnière spatiale.....                  | 126        |
| 10-3. TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION .....                   | 128        |
| 10-4. ANALYSE COMPARATIVE DES DEPOTS MARINS ET FLUVIAUX..... | 130        |
| 10-4-1. Dépôts fluviaux.....                                 | 130        |
| 10-4-2. Dépôts marins.....                                   | 130        |
| 10-5-LES CAUSES DE L'EROSION COTIERE.....                    | 133        |
| 10-6-LES CONSEQUENCES DE L'EROSION COTIERE.....              | 134        |
| 10-5. DISCUSSION.....                                        | 134        |
| <b>CONCLUSION GENERALE.....</b>                              | <b>137</b> |
| <b>Perspectives.....</b>                                     | <b>140</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                    | <b>141</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>                                          | <b>155</b> |

## **REMERCIEMENTS**

Ce mémoire est l'aboutissement de quatre années de travaux consacrés aux processus hydrosédimentaires affectant l'embouchure du fleuve Comoé. Au moment où cette thèse de Doctorat prend forme, il me paraît nécessaire de témoigner ma sincère reconnaissance à toutes les personnes, institutions et organismes qui, par leurs soutiens divers, ont contribué à la réalisation des présents travaux de recherche.

Je voudrais exprimer mes sentiments de profonde gratitude pour l'attention et l'intérêt soutenus que mon encadreur scientifique Professeur AKA KOUAME m'a accordé dans ce travail, et ce, en dépit de ses nombreuses charges académiques et ses lourdes tâches administratives en sa qualité de président de la Commission Scientifique de l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM).

Ses observations critiques et ses orientations scientifiques m'ont facilité la réalisation de ce travail. Ses encouragements ont été pour moi de véritables réconforts. Sa rigueur scientifique, ses qualités humaines de disponibilité et de simplicité font de lui un modèle. Il m'est particulièrement agréable de le remercier très sincèrement. Puisse le seigneur Dieu le garder encore longtemps en bonne santé parmi nous.

Le professeur BIEMI JEAN, Doyen de l'UFR-STRM trouvera ici mes remerciements pour la réalisation de ce travail dans la structure qu'il dirige. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance pour les critiques constructives et les sages conseils qu'il ne cesse de nous prodiguer.

Le professeur POTHIN KABLAN, pour ses conseils de sage et surtout ses critiques dans la rédaction de ce travail.

Il m'est agréable de dire merci au Professeur SOMBO BOKO CELESTIN pour tout le soutien qu'il m'a apporté dans la réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur DIBGEHI ZELI BRUNO, Responsable de formation du 3<sup>ème</sup> cycle des Sciences de la Terre et des Ressources Minières pour tous les conseils et les enseignements que j'ai reçus de lui dans la filière géologie marine et sédimentologie. Merci Professeur d'avoir également accepté d'examiner ce présent travail.

Je remercie vivement le Professeur AFFIAN KOUADIO, Directeur du Centre Universitaire de Recherche et d'Application à la Télédétection (CURAT) de l'Université de Cocody pour les critiques et les suggestions qu'il m'a apportées dans la réalisation de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements au Professeur MONDE SYLVAIN, Directeur du laboratoire de Géologie Marine et Sédimentologie. J'ai eu l'honneur de bénéficier de ses conseils avisés dans la réalisation de cette thèse. Il m'a surtout guidé dans la réalisation de mon article et est toujours présent dans les phases de la présentation de mes résultats. Qu'il trouve en ces lignes l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements au Docteur WOGNIN AMA VALERIE. Sa rigueur au travail et sa constante sollicitude ont apporté une contribution active à la réalisation de cette étude. Qu'elle reçoive ici, l'expression de ma respectueuse gratitude. Puisse le seigneur Dieu la garder encore longtemps en bonne santé parmi nous.

Je dois une reconnaissance particulière au Docteur KOUASSI KOUAKOU LAZARE, qui en dépit de son temps très chargé, a accepté de suivre ce travail. Il a été toujours disponible pour écouter mes préoccupations et m'a proposé les solutions qui lui semblent les meilleures. Il a pris une part active dans la réalisation de mes articles.

Je dois une reconnaissance particulière au Docteur MARTINE TAHOUX, Directrice du Centre de Recherche en Ecologie (CRE) qui, avec beaucoup d'enthousiasme, m'a accueilli au CRE pour faciliter la réalisation de ce travail après le décès de Dr YACE PATRICE. Elle m'a ouvert ses portes et a toujours été disponible pour écouter mes préoccupations et m'a proposé les solutions qui lui semblent les meilleures.

Cette recherche a bénéficié d'un appui financier et scientifique de la Fondation Internationale pour la Science (IFS, Suède). Je voudrais que la Direction de cette institution trouve en ces lignes l'expression de ma profonde gratitude.

Ma reconnaissance va à l'endroit de mes chers maîtres : Les professeurs YACE IGNACE, feu ASSA AYEMOU, JOURDA PATRICE, BOFFOUE OLIVIER, EMERUWA EDJIKEME et Les Docteurs COULIBALY AOUA, LASM THEOPHILE, OGA MARIE-SOLANGE, COULIBALY YACOUBA, AGHUI N'GUESSAN, SALEY BACHIR, DJRO CHERUBIN, DJAGOUA ERIC, KOUAME FERNAND, KOUAMELAN ALAIN, ETTIEN DJETCHI, N'GUESSAN YAO ALEXIS, KOUAME INNOCENT, KOUAME KAN, AHOUSSY. Tous ont contribué à ma formation au sein de l'UFR-STRM et à la réalisation de ce travail. Les discussions que nous avons souvent eues ont été aussi bien instructives que constructives.

J'ai eu l'avantage de travailler au sein d'une équipe dynamique et efficace au laboratoire de Géologie Marine et Sédimentologie de Cocody et au SGE d'Abobo-Adjamé. C'est le lieu d'exprimer ma plus vive sympathie à messieurs WANGO TED, MELEDJE HERMANN, YAH FRANCIS, GAHOU VALERY, MANI BI EDMOND et mesdemoiselles AMANI MIREILLE et AKOBE COLETTE.

Un témoignage d'amitiés à tous mes amis. La liste est évidemment longue et je m'excuse à l'avance pour tout oubli, bien sûr involontaire : Dr VODY CLEMENT, KOUAME ADONIS, MOBIO ABAKA, AKAFFOU ARMEL, AFFRAN AKOMIAN, KOUAKOU N'DRI CELESTIN, BROU EMILE, YAPO ACHY PAULIN, KOMAN LUCIEN, KACOU ABEL, YAPOGA DONACIEN, KICHIEDOU ODILE, Mme OKA BERTINE, KAMAN AKOCHY, N'GUETTA DESIRE et KOFFI PATRICE pour leur amitié et la bonne ambiance qu'ils ont entretenue avec moi.

S'il n'y avait pas de risque de passer pour un ingrat, j'aurais préféré m'abstenir de remerciements, tant le risque de commettre une injustice en oubliant quelqu'un est grand. Je précise donc d'emblée que cette liste ne présente aucun caractère d'exhaustivité.

**DEDICACE**

**À**

**Mon père, feu KOUASSI ADOPO JACQUES**

**Ma mère YAPO KOUASSI-BAH**

**A feu Dr .YACE PATRICE**

**Et à ma fille bien-aimée, ADOPO JULIA CHIA LYNE-DESIREE**

**Que le nom de l'éternel Dieu, qui détient le souffle de vie de toute chair, soit béni**

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1:</b> Localisation géographique de l'embouchure du fleuve Comoé .....                                                     | 8  |
| <b>Figure 2 :</b> Courbes d'évolutions des températures et insolation moyennes à l'embouchure du fleuve Comoé de 1990 à 2004.....    | 9  |
| <b>Figure 3 :</b> Courbes de variations de l'humidité relative aux environs du fleuve Comoé de 1990 à 2004.....                      | 10 |
| <b>Figure 4 :</b> Typologie des climats dans le bassin versant du fleuve Comoé.....                                                  | 10 |
| <b>Figure 5 :</b> Courbes d'évolution de la pluviométrie aux environs du fleuve Comoé de 1990 à 2004.....                            | 11 |
| <b>Figure 6 :</b> Histogramme et courbe d'évolution des précipitations et débits Moyens à l'embouchure du Comoé de 1982 à 2006 ..... | 12 |
| <b>Figure 7 :</b> Carte géologique de la Côte d'Ivoire.....                                                                          | 15 |
| <b>Figure 8 :</b> Littoral de Côte d'Ivoire : géologie et morphologie.....                                                           | 20 |
| <b>Figure 9:</b> Modèle de la morphologie des plages .....                                                                           | 23 |
| <b>Figure 10:</b> Principales division de la zone littorale en fonction de la propagation de la houle ..                             | 25 |
| <b>Figure 11:</b> Principales types de réfraction (PAN <i>et al.</i> , 2001): a) vallée sous-marine, b) cap et c) île.....           | 26 |
| <b>Figure 12:</b> Principales types de diffraction (PAN <i>et al.</i> , 2001): a) embouchure, b) jetée ..                            | 26 |
| <b>Figure 13 :</b> Présentation qualitative de la théorie du point nul.....                                                          | 27 |
| <b>Figure 14 :</b> Modes de transport solide.....                                                                                    | 33 |
| <b>Figure 15 :</b> Répartition des stations de mesure et d'échantillonnage à l'embouchure du fleuve Comoé.....                       | 41 |
| <b>Figure 16 :</b> Schéma d'utilisation du théodolite.....                                                                           | 42 |
| <b>Figure 17 :</b> Méthode des moindres carrées appliquée aux profils de plage.....                                                  | 43 |
| <b>Figure 18 :</b> Schéma d'un trapèze.....                                                                                          | 44 |
| <b>Figure 19 :</b> Schéma d'un triangle.....                                                                                         | 44 |
| <b>Figure 20 :</b> Principe de détermination de la distance D.....                                                                   | 45 |
| <b>Figure 21:</b> Type de relations entre fichiers et commandes sur le logiciel "Surfer" .....                                       | 47 |
| <b>Figure 22:</b> Plan de position des radiales à l'estuaire du fleuve Comoé .....                                                   | 49 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure 23 :</b> Carte de prélèvement des échantillons d'eau dans l'estuaire du fleuve Comoé...                                      | 52  |
| <b>Figure 24 :</b> Carte des points de prélèvement de sédiment à l'embouchure du fleuve Comoé.                                         | 55  |
| <b>Figure 25 :</b> Types fondamentaux de courbes granulométriques .....                                                                | 57  |
| <b>Figure 26 :</b> Diagrammes d'évaluation des pourcentages relatifs des grains de quartz.....                                         | 62  |
| <b>Figure 27 :</b> Charte visuelle de Krumbein.....                                                                                    | 63  |
| <b>Figure 28 :</b> Schéma théorique des indices d'aplatissement du grain de quartz.....                                                | 64  |
| <b>Figure 29 :</b> Schéma de l'évolution de l'indice d'aplatissement en fonction de la forme....                                       | 65  |
| <b>Figure 30 :</b> Schéma théorique des indices de dissymétrie.....                                                                    | 65  |
| <b>Figure 31 :</b> Histogramme de la taille des minéraux lourds dans les différentes zones de l'embouchure du fleuve Comoé.....        | 69  |
| <b>Figure 32:</b> Histogramme du pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'embouchure du fleuve Comoé (Juin 2006).....   | 72  |
| <b>Figure 33:</b> Histogramme du pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'embouchure du fleuve Comoé (Août 2006).....   | 74  |
| <b>Figure 34:</b> Histogramme du pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'embouchure du fleuve Comoé (Octobre2006)..... | 76  |
| <b>Figure 35:</b> Histogramme du pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'embouchure du fleuve Comoé (Mars 2007) .....  | 78  |
| <b>Figure 36 :</b> Levés des profils de la station 1 .....                                                                             | 85  |
| <b>Figure 37 :</b> Levés des profils de la station 2.....                                                                              | 86  |
| <b>Figure 38 :</b> Levés des profils de la station 3.....                                                                              | 87  |
| <b>Figure 39 :</b> Levés des profils de la station 4.....                                                                              | 88  |
| <b>Figure 40 :</b> Levés des profils de la station 5.....                                                                              | 89  |
| <b>Figure 41 :</b> Levés des profils de la station 6.....                                                                              | 90  |
| <b>Figure 42 :</b> Levés des profils de la station 7.....                                                                              | 90  |
| <b>Figure 43 :</b> Mouvements sédimentaires à l'embouchure du fleuve Comoé.....                                                        | 91  |
| <b>Figure 44:</b> Répartition des faciès des sédiments superficiels dans l'estuaire du fleuve Comoé.....                               | 101 |
| <b>Figure 45 :</b> Diagrammes de dispersion granulométrique de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                         | 102 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure 46:</b> Courbes granulométriques et mode de transport des sables à l'estuaire du fleuve Comoé.....                           | 103 |
| <b>Figure 47:</b> Histogramme montrant l'évolution de l'indice d'aplatissement en fonction des faciès sédimentologiques.....           | 107 |
| <b>Figure 48:</b> Histogramme montrant l'évolution de la dissymétrie en fonction des faciès sédimentologiques.....                     | 107 |
| <b>Figure 49 :</b> Cortège minéralogique de l'estuaire du Comoé.....                                                                   | 108 |
| <b>Figure 50 :</b> Bathymétrie de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                                                      | 113 |
| <b>Figure 51 :</b> Profils bathymétrique en divers points de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                           | 115 |
| <b>Figure 52:</b> Profils bathymétrique en divers points de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                            | 116 |
| <b>Figure 53 :</b> Variations de cote du fond de l'estuaire du fleuve Comoé entre 2005 et 2007..                                       | 117 |
| <b>Figure 54 :</b> Carte interpolée des zones d'érosion et d'engraissement dans l'estuaire du Comoé (2005 et 2007).....                | 118 |
| <b>Figure 55 :</b> Histogramme des débits moyens annuels du fleuve Comoé de 1982 à 2007.....                                           | 120 |
| <b>Figure 56 :</b> Variation du pH de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur.....                                            | 123 |
| <b>Figure 57 :</b> Variation de la salinité de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur....                                    | 124 |
| <b>Figure 58 :</b> Variation de la température de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur.....                                | 125 |
| <b>Figure 59 :</b> Variation de la conductivité de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur.....                               | 126 |
| <b>Figure 60:</b> Variation de l'oxygène dissous de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur.....                              | 127 |
| <b>Figure 61:</b> Variation du potentiel redox de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur.....                                | 128 |
| <b>Figure 62:</b> Variation de la turbidité de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur...                                     | 128 |
| <b>Figure 63:</b> Variation des MES de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur.....                                           | 129 |
| <b>Figure 64:</b> Moyennes saisonnières des paramètres physico-chimiques de l'amont vers l'embouchure du fleuve Comoé 2005 à 2007..... | 130 |

## **LISTE DES TABLEAUX**

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau I :</b> Minéralogie des roches du bassin versant du fleuve Comoé.....                                                                                         | 17 |
| <b>Tableau II :</b> Orientation du trait de côte selon les zones et leur nature géologiques.....                                                                         | 21 |
| <b>Tableau III:</b> Variation annuelle de la vitesse des vents en fonction de leur direction.....                                                                        | 27 |
| <b>Tableau IV:</b> Fiche de description de l'embouchure du Comoé.....                                                                                                    | 42 |
| <b>Tableau V:</b> Coefficient d'arrondi et de sphéricité selon KRUMBEIN.....                                                                                             | 63 |
| <b>Tableau VI:</b> Variation saisonnière des indices de classement et du skewness des sédiments de plage de l'embouchure du fleuve Comoé en 2006 et en 2007.....         | 70 |
| <b>Tableau VII :</b> Inventaire des minéraux lourds identifiés à l'embouchure du fleuve Comoé en juin 2006 et en mars 2007.....                                          | 71 |
| <b>Tableau VIII :</b> Abondance relative des minéraux lourds à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé.....                                                              | 73 |
| <b>Tableau IX :</b> Variation du pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé en période de crue.....                   | 73 |
| <b>Tableau X :</b> Abondance relative des minéraux lourds à l'Est de l'embouchure.....                                                                                   | 75 |
| <b>Tableau XI:</b> Proportion des minéraux lourds par niveau d'estran à l'Est de l'embouchure du fleuve Comoé.....                                                       | 75 |
| <b>Tableau XII :</b> Pourcentages relatifs des minéraux lourds à l'Ouest de l'embouchure.....                                                                            | 77 |
| <b>Tableau XIII :</b> Pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé.....                                                 | 77 |
| <b>Tableau XIV:</b> Proportion relative des minéraux lourds à l'Ouest de l'embouchure.....                                                                               | 79 |
| <b>Tableau XV:</b> Abondance des minéraux lourds par niveau d'estran à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé.....                                                      | 79 |
| <b>Tableau XVI :</b> Caractéristiques morphoscopiques des minéraux lourds à l'embouchure du fleuve Comoé.....                                                            | 82 |
| <b>Tableau XVII :</b> Synthèse morpho-sédimentaire et granulométrique de l'embouchure du fleuve Comoé.....                                                               | 92 |
| <b>Tableau XVIII:</b> Tendances évolutives de la plage (embouchure du fleuve Comoé) selon les données de surfaces érodées ou accumulées entre Juin et Juillet 2006. .... | 92 |
| <b>Tableau XIX:</b> Tendances évolutives de la plage (embouchure du fleuve Comoé) selon les données de surfaces érodées ou accumulées entre août et septembre 2006.....  | 93 |

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tableau XX :</b> Tendance évolutive de la plage (embouchure du fleuve Comoé) selon les données de surfaces érodées ou accumulées entre octobre et novembre 2006.... | 94  |
| <b>Tableau XXI :</b> Tendance évolutive de la plage (embouchure du fleuve Comoé) selon les données de surfaces érodées ou accumulées entre mars et avril 2007.....     | 94  |
| <b>Tableau XXII:</b> Estimation du volume total de sables (Juin 2006 à Avril 2007 des 7 stations).....                                                                 | 95  |
| <b>Tableau XXIII :</b> Description lithologique des sables de l'embouchure du fleuve Comoé...100                                                                       |     |
| <b>Tableau XXIV :</b> Proportion relative des différents types morphoscopiques du quartz.....                                                                          | 104 |
| <b>Tableau XXV:</b> Coefficients moyens d'arrondi et de sphéricité des minéraux de quartz de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                           | 105 |
| <b>Tableau XXVI :</b> Coefficients d'arrondi et de sphéricité en fonction des faciès sédimentologiques.....                                                            | 105 |
| <b>Tableau XXVII:</b> Indices moyens de dissymétrie et d'aplatissement des minéraux de quartz des sables de l'estuaire du fleuve Comoé.....                            | 106 |
| <b>Tableau XXVIII :</b> Pourcentage des minéraux lourds dans l'estuaire du fleuve Comoé.....                                                                           | 108 |
| <b>Tableau XXIX :</b> Estimation des pourcentages des minéraux sableux à l'estuaire.....                                                                               | 109 |
| <b>Tableau XXX :</b> Représentation des débits moyens annuels .....                                                                                                    | 120 |
| <b>Tableau XXXI:</b> Paramètres statistiques des débits moyens interannuels à l'estuaire.....                                                                          | 121 |
| <b>Tableau XXXII:</b> Moyennes saisonnières des paramètres physico-chimiques de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                                        | 122 |
| <b>Tableau XXXIII :</b> Salinité moyenne saisonnière de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                                                                | 123 |
| <b>Tableau XXXIV :</b> Température moyenne saisonnière de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                                                              | 124 |
| <b>Tableau XXXV :</b> Conductivité moyenne saisonnière de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                                                              | 125 |
| <b>Tableau XXXVI :</b> Teneur moyenne saisonnière en oxygène dissous dans l'estuaire du Comoé.....                                                                     | 126 |
| <b>Tableau XXXVII :</b> Potentiel redox moyenne de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                                                                     | 127 |
| <b>Tableau XXXVIII :</b> Concentration de matière en suspension dans l'estuaire du fleuve Comoé.....                                                                   | 129 |
| <b>Tableau XXXVIX:</b> Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques lors des crues de l'estuaire du fleuve Comoé.....                                     | 131 |
| <b>Tableau XXXX:</b> Moyennes saisonnières des charges solides en suspension à l'estuaire du Comoé .....                                                               | 132 |

## LISTE DES PHOTOS

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Photo 1 :</b> Banc de sable à l'embouchure du fleuve Comoé.....                                                               | 2   |
| <b>Photo 2 :</b> Végétaux aquatiques envahissants à la surface de l'embouchure du fleuve Comoé.....                              | 3   |
| <b>Photo 3 :</b> Porcherie dans la zone ensablée de l'embouchure du fleuve Comoé.....                                            | 3   |
| <b>Photo 4 :</b> Dispositif de levé topographique de la plage.....                                                               | 39  |
| <b>Photo 5 :</b> Echosondeur Lowrance, LMS-160 utilisé pour les levés bathymétriques à l'estuaire du fleuve Comoé.....           | 40  |
| <b>Photo 6 :</b> Turbidimètre utilisé pour mesurer la turbidité de l'estuaire du fleuve Comoé.....                               | 50  |
| <b>Photo 7 :</b> Bouteille hydrologique utilisée pour les prélèvements d'eau de l'estuaire du fleuve Comoé.....                  | 50  |
| <b>Photo 8 :</b> Benne Van Veen utilisée pour les prélèvements de sédiments de l'estuaire du fleuve Comoé.....                   | 54  |
| <b>Photo 9 :</b> Colonne de tamis montée sur la tamiseuse pour tamiser les sédiments de sable de l'estuaire du fleuve Comoé..... | 54  |
| <b>Photo10 :</b> Loupe binoculaire munie d'une caméra et d'un écran.....                                                         | 61  |
| <b>Photo 11 :</b> Une balance électrique.....                                                                                    | 61  |
| <b>Photo 12 :</b> Ilménite magnésienne vue dans le sédiment de sable à l'embouchure du fleuve Comoé.....                         | 80  |
| <b>Photo13 :</b> Divers aspect morphoscopique des grains de sable de l'embouchure du Comoé.....                                  | 81  |
| <b>Photo 14 :</b> Sables grossiers aux abords de l'embouchure.....                                                               | 83  |
| <b>Photo 15 :</b> Méga rides observées sur les rives de l'embouchure du fleuve Comoé en marée basse .....                        | 83  |
| <b>Photo 16 :</b> Grains de quartz ronds mats et émoussés luisants de l'embouchure du fleuve Comoé.....                          | 104 |

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

**CCT** : Centre de Cartographie et de Télédétection

**DHH** : Direction de l'Hydraulique Humaine

**NTU** : Nephroletic Turbidity Unit

**SODEXAM** : Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et  
Météorologique

**UFR-STRM** : Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des  
Ressources Minières.

**ACCT** : Agence de Coopération Culturelle et Technique

**UNESCO** : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture

**SGE** : Sciences et Gestion de l'Environnement

**ACP** : Analyse en Composante Principale

**GPS** : Global Positioning System

**MES** : Matières En Suspension

**VAE** : Végétaux Aquatiques Envahissants

**FIT** : Front Inter Tropical

## **RESUME :**

L'estuaire du fleuve Comoé à Grand-Bassam connaît une dynamique hydrosédimentaire un peu plus particulier que les autres estuaires de la Côte d'Ivoire. En effet, les dépôts successifs de sédiments donnent naissance à un banc de sables qui rompt le contact naturel entre le fleuve Comoé et l'Océan Atlantique. Ceci occasionne la surcharge des eaux, le confinement et l'invasion du milieu estuarien par des végétaux flottants. Le présent travail a pour but de connaître la dynamique spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques, notamment ceux des charges solides en suspension qui participent au comblement de l'estuaire du fleuve Comoé.

Les prélèvements d'eau ont été effectués sur deux cycles saisonniers entre 2005 et 2007 pour quantifier le transport solide en suspension. Les profils de plage ont été déterminés afin d'évaluer la tendance évolutive de la plage.

Dans une première approche, les paramètres physico-chimiques ont été étudiés verticalement et horizontalement sur les saisons hydrologiques du fleuve Comoé. Les eaux de l'estuaire sont moyennement minéralisées et présentent des valeurs de pH proches de la neutralité. La minéralisation est influencée par les saisons. Le milieu est turbide et faiblement oxygéné sur toutes les saisons. Les teneurs en oxygène dissous sont de  $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$  en moyenne pendant les saisons pluvieuses et  $1,6 \text{ mg.L}^{-1}$  pendant les saisons sèches. L'estuaire du fleuve Comoé présente des salinités relativement faibles ( $1 \text{ mg.L}^{-1}$  en moyenne) pendant les saisons sèches.

Dans la deuxième approche, l'analyse des charges solides en suspension et de la nature des sédiments montre que les variations des apports particuliers sont étroitement liées aux saisons hydrologiques. Le bilan global annuel des entrées et sorties des flux de matières en suspension calculé sur la base des apports liquides et des charges solides en suspension montre que l'estuaire du fleuve Comoé retient environ 72000 tonnes de sédiments par an. Près de la moitié de cette charge solide est transportée au cours de la petite saison des pluies. Les sables qui composent les sédiments de l'estuaire du fleuve Comoé sont majoritairement fins à moyens et médiocrement classés avec un grain moyen de  $425 \mu\text{m}$ .

Dans la troisième et dernière approche, l'évolution des profils de plage a permis de quantifier les sédiments à l'embouchure du fleuve Comoé. Ainsi  $421528 \text{ m}^3$  de sédiments se sont déposés contre  $60062 \text{ m}^3$  érodés. Ce qui traduit un engraissement important à l'origine de la fermeture de l'embouchure du fleuve Comoé.

**Mots clés:** bathymétrie, charges solides, sédimentation, estuaire, Côte d'Ivoire.

## **SUMMARY:**

The hydro-sedimentary dynamic of the Comoe River's estuary at Grand-Bassam is a bit more spectacular than other estuaries in Côte d'Ivoire. Indeed, the successive sediment deposits generate a sand bank which interrupts the natural contact between the Comoe River and the Atlantic Ocean. This separates the fresh water from the sea water, increases the water level and the invading floating plants. The purpose of this work is to investigate the space-time dynamic of the physicochemical parameters, in particular the solid loads in suspension which take part in the filling up of the Comoe estuary.

The water samplings were carried out on two seasonal cycles between 2005 and 2007 to quantify solid transport in suspension. Beach profiles were carried out to assess the trend of the beach.

In a first approach, physicochemical parameters were studied vertically and horizontally over the hydrological seasons of the Comoe River. Estuary waters are fairly mineralized and show pH values close to neutral. Mineralization is influenced by seasons. The medium is turbid and slightly oxygenated all seasons. Average dissolved oxygen contents are of  $0.5 \text{ mg.L}^{-1}$  during the rainy seasons and  $1.6 \text{ mg.L}^{-1}$  during dry seasons. Relatively low salinities are observed in the Comoe estuary ( $1 \text{ mg.L}^{-1}$  on average).

In a second approach, analysis of suspended solid loads and sediments nature show that hydrological seasons guide particle contributions. The annual total balance sheet of entries and exits of suspended sediment flux, calculated on the basis of liquid contribution and suspended solid loads, shows that the Comoe River's estuary retains approximately 72000 tons of sediments per annum. About half of this solid load is transported during the small rainy season. Sands of the Comoe River's estuary are mainly fine to medium size and fairly classified with an average grain size of  $425 \mu\text{m}$ .

In the third and last approach, beach profiling was used to quantify sediments trends around the Come inlet. Thus,  $421528 \text{ m}^3$  of sediments were settled while  $60062 \text{ m}^3$  were eroded.

**Key words:** bathymetry, solid load, sedimentation, Estuary, Côte d'Ivoire.

# **INTRODUCTION**

Les estuaires, zones de rencontre entre le fleuve et la mer, présentent une dynamique assez complexe. En effet, les dépôts des particules transportées par les eaux fluviales et marines façonnent la morpho-structure des paysages estuariens (LE NORMANT, 1995). En Côte d'Ivoire, les embouchures des grands fleuves connaissent un fort dynamisme. Citons en exemple, l'estuaire naturel du fleuve Comoé à Grand-Bassam. Dans cet environnement, les dépôts successifs de sédiments génèrent un banc de sables qui rompt le contact naturel entre le fleuve et l'océan (KOFFI et ABE, 1991). Ceci a pour conséquence le comblement accéléré de l'embouchure, la modification de la physico-chimie des eaux et le développement rapide des plantes aquatiques sur la lagune (SANKARE et ETIEN, 1991 ; SANKARE *et al.*, 1991). Rappelons brièvement l'état actuel de l'embouchure du fleuve Comoé et son impact environnemental.

### **Etat actuel de l'embouchure du Comoé**

Depuis l'ouverture du canal de Vridi en 1951, un déficit hydrique a été constaté à l'embouchure naturelle du Comoé car environ 2/3 de son débit empruntent cet exutoire. Le 1/3 restant sort en mer par le canal de Vridi après un parcours de plusieurs kilomètres en lagune Ebrié (VARLET, 1958). Cette diminution des volumes d'eau affecte considérablement la vitesse des courants dans l'estuaire. Ce qui réduit la sortie du fleuve en mer. Elle oscille entre 0,05 et 0,32 m/s (ABE *et al.*, 1996). La réduction significative des débits fluviaux pendant l'étiage, notamment ces dernières décennies du fait de l'influence des fluctuations climatiques, favorise les phénomènes de sédimentation (KOUASSI, 2007). La conjugaison des dépôts fluviaux et du transit littoral occasionne le colmatage rapide de l'embouchure du Comoé (photo 1). Ainsi, depuis la chute des volumes d'eau douce empruntant l'estuaire, le rapport de force est-il en faveur de la dérive littorale qui ensable la passe.



**Photo 1:** Banc de sable à l'embouchure du fleuve Comoé

Le confinement de longue durée de ses eaux modifie leurs paramètres physiques. Par exemple, des relevés effectués par TASTET (1979) après deux ans de confinement (1972-1974) indiquent une baisse de la salinité à 3‰ à l'embouchure. En outre, cette embouchure du Comoé est confrontée à un problème d'eutrophisation qui se manifeste par une colonisation permanente et progressive du plan d'eau par les végétaux aquatiques envahissants (VAE). Aussi, la présence des VAE rend-t-elle la navigation difficile dans l'estuaire du fleuve Comoé et réduit ainsi les champs d'exploitation des pêcheurs. Cette "prairie aquatique" (Photo 2), est composée de jacinthes d'eau, fourgères d'eau, salade d'eau, *lotus*, etc (HAUHOUOT, 2008).



**Photo 2:** Végétaux aquatiques envahissants à la surface de l'embouchure du fleuve Comoé

Il se développe sur le banc de sable certaines activités telles que l'élevage de porc (photo 3). Ce qui entraîne une insalubrité due aux excréments de ces animaux. En outre, cette zone sert de latrines publiques pour la population riveraine.



**Photo 3:** Porcherie dans la zone ensablée de l'embouchure du fleuve Comoé

Tous ces forçages hydrodynamiques et anthropiques font de l'embouchure du fleuve Comoé, objet de ce travail, un environnement qui pose des problèmes. Ces derniers méritent que des solutions soient apportées. Par ailleurs, l'insuffisance d'études sur la dynamique sédimentaire (envasement et ensablement) et de l'hydrologie dans l'estuaire rend difficile la quantification des apports aussi bien liquides que solides. Or, la quantification des stocks sédimentaires présente un grand intérêt pour le contrôle de l'envasement et la gestion durable de l'estuaire du fleuve.

### **Objectifs et plan d'étude**

Cette étude a pour objectif général de comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire sous l'influence des apports du fleuve Comoé et de la mer. C'est pourquoi pour cette étude, nous avons défini comme thème: "*Caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire d'un environnement estuarien en zone tropical: cas de l'embouchure du fleuve Comoé à Grand-Bassam (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)*".

De façon spécifique, il s'agira de :

- déterminer les caractéristiques physico-chimiques et les charges solides en suspension dans l'estuaire du fleuve Comoé ;
- déterminer la morphologie du fond de cet estuaire à partir de la réalisation de carte bathymétrique sur deux années ;
- déterminer les caractéristiques granulométrique, morphoscopique et morphométrique des grains de quartz.
- établir le budget sédimentaire annuel à l'embouchure du fleuve Comoé.

Pour atteindre ces objectifs, le présent mémoire a été subdivisé en trois grandes parties :

- la première partie présentera le contexte général du littoral ivoirien et du bassin versant du fleuve Comoé ;
- la deuxième partie est consacrée à la présentation du matériel et la méthodologie utilisée ;
- la troisième partie présente les résultats, leur analyse ainsi que leur conclusion partielle. Elle porte sur les résultats de l'étude morphologique du fond de l'estuaire du Comoé, la description des mouvements sédimentaires dans l'estuaire du Comoé et l'évolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques. Enfin, elle est complétée par l'étude de la

morphologie de la plage et la quantification des mouvements sableux à l'embouchure du fleuve Comoé.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale qui dresse le bilan des connaissances acquises au cours de cette étude, et des perspectives de recherche.

**PREMIERE PARTIE: CONTEXTE GENERAL DU  
LITTORAL IVOIRIEN ET DU BASSIN VERSANT DU  
FLEUVE COMOE**

## **CHAPITRE 1 : CADRE PHYSIQUE DE L'ESTUAIRE DU FLEUVE COMOÉ**

Ce chapitre présente le cadre géographique, géologique et hydrologique de l'estuaire du Comoé avec une interprétation géodynamique du bassin sédimentaire.

### **1-1. SITUATION GEOGRAPHIQUE**

#### **1-1-1. Localisation géographique**

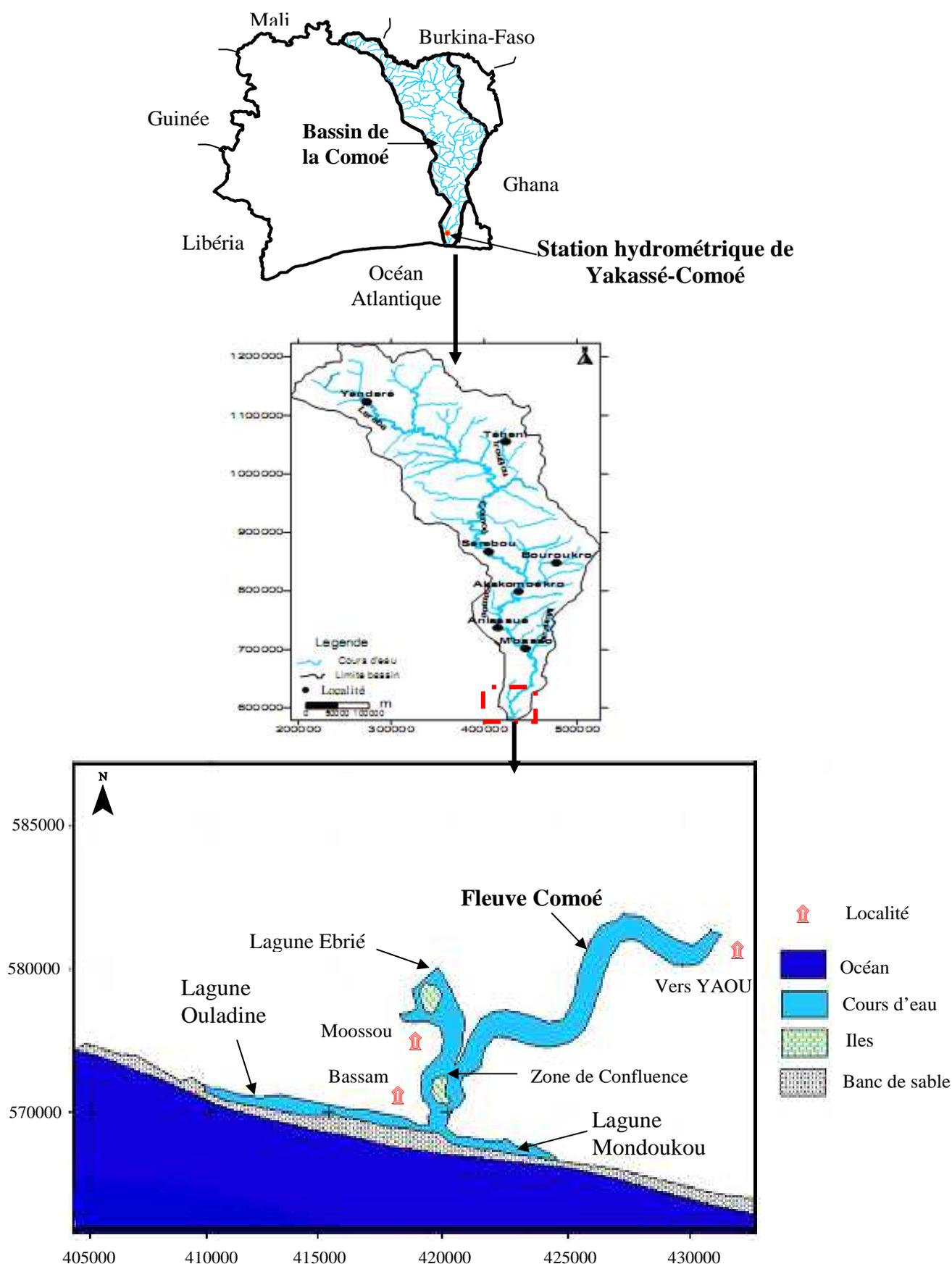
Le bassin du fleuve Comoé est situé entre 3° et 5°30' de longitude Ouest et 5° et 11°30' de latitude Nord. Situé à l'extrémité orientale de la lagune Ebrié entre 5°12' et 5°14' de latitude Nord et entre 3°43' et 3°44' de longitude Ouest, l'estuaire du fleuve Comoé sert à la fois d'exutoire au fleuve Comoé et aux lagunes qui lui sont proches (figure 1).

La lagune Ebrié rejoint le Comoé à Moossou. Quelques kilomètres plus en aval, le fleuve entre en confluence avec deux autres lagunes de taille plus modestes : les lagunes Ouladine et Mondoukou qui sont en fait d'anciens chenaux du Comoé qui ont migré sur près de 11 km latéralement avant d'adopter un écoulement nord-sud (KOFFI et ABE, 1991). Grâce à son débit élevé ( $2300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en moyenne), le fleuve a ouvert des passes à travers le cordon durant tout le temps qu'a duré sa longue migration entre 1845 et 1954. Les traces en sont encore visibles. C'est le cas des crochets façonnés dans le cordon sableux près d'Azureti et au fond de la lagune Ouladine (VARLET, 1958).

#### **1-1-2. Climat**

L'ensemble du bassin du fleuve Comoé est alternativement alimenté par les deux masses d'air qui ont la plus grande influence sur le climat de l'Afrique de l'Ouest au Sud du Sahara (ELDIN, 1971; AKA, 1991). Ces deux masses d'air sont différentes l'une de l'autre par leur teneur en humidité. Il s'agit :

- de l'alizé boréal qui amène du Nord un air sec, chaud et souvent chargé de fines poussières (Harmattan);
- des masses d'air chaud et humide provenant de l'Océan Atlantique (Mousson) poussées vers le Nord par un vent du Sud-Ouest (alizé austral dévié lors de son passage sur l'Equateur).



**Figure 1:** Localisation géographique de l'embouchure du fleuve Comoé

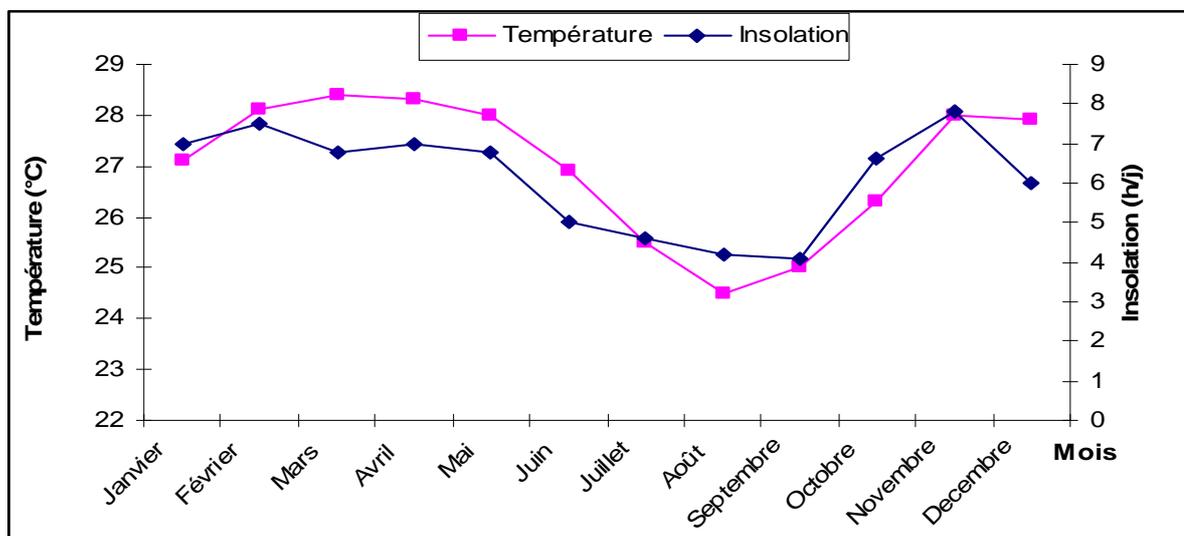
L'harmattan et la mousson restent de part et d'autre d'un plan oblique par rapport au sol, traversant le pays d'Est en Ouest. La trace au sol de leur zone de contact est appelée *Front Intertropical* (FIT). Les déplacements du FIT en latitude, liés au balancement apparent du soleil, entraînent au sol la succession des saisons sèches et pluvieuses (MARTIN, 1973).

### 1-1-3. Température et insolation

Les moyennes mensuelles de la température relevée sur la période de 1990 à 2004 ont montré que les mois de février, mars, avril et mai sont les plus chauds avec une température supérieure à 28°C. Les mois les moins chauds sont ceux de juillet, août et septembre (figure 2) avec une température inférieure à 25°C (KOUAME, 2006).

La variation annuelle de la température est faible (+4°C) du fait de l'influence océanique. Il en est de même pour l'amplitude thermique mensuelle qui est de 7°C en saison sèche et de 5°C en saison pluvieuse (TAPSOBA, 1995).

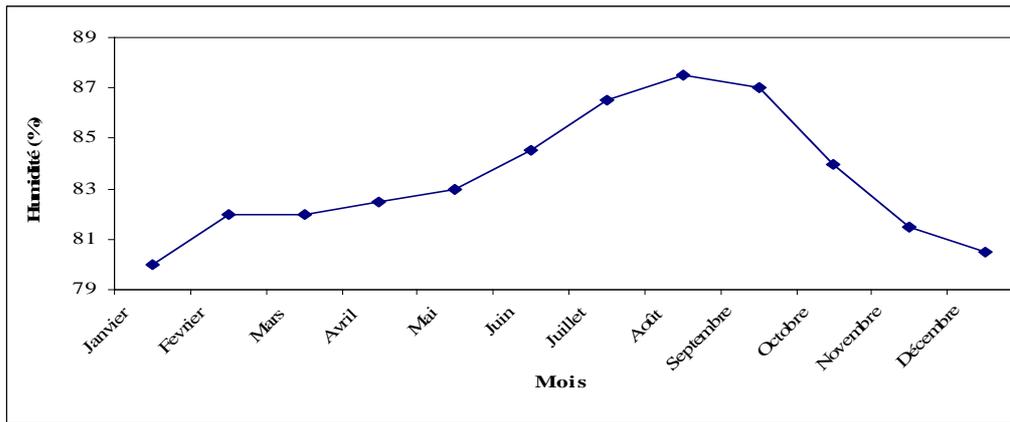
L'insolation, qui exprime la durée totale de l'ensoleillement en fonction du temps, est en corrélation avec l'évolution de la température et la pluviométrie. Les données moyennes de l'insolation les plus courtes s'observent de juin à septembre (4 h.J<sup>-1</sup> en moyenne) où on a des mois pluvieux caractérisés par la présence de nuage.



**Figure 2 :** Courbes d'évolutions des températures et insolations moyennes à l'embouchure du fleuve Comoé de 1990 à 2004 (KOUAME, 2006).

### 1-1-4. Hygrométrie

L'humidité relative moyenne mensuelle observée sur 11 années (1990-2000) et mentionnée sur la figure 3, indique que l'humidité de l'air est comprise entre 80 et 90% (KOUAME, 2006). Les mois de juillet, août et septembre sont les plus humides avec une humidité relative supérieure à 86% tandis que ceux de novembre, décembre, janvier, février, mars et octobre sont moins humides.

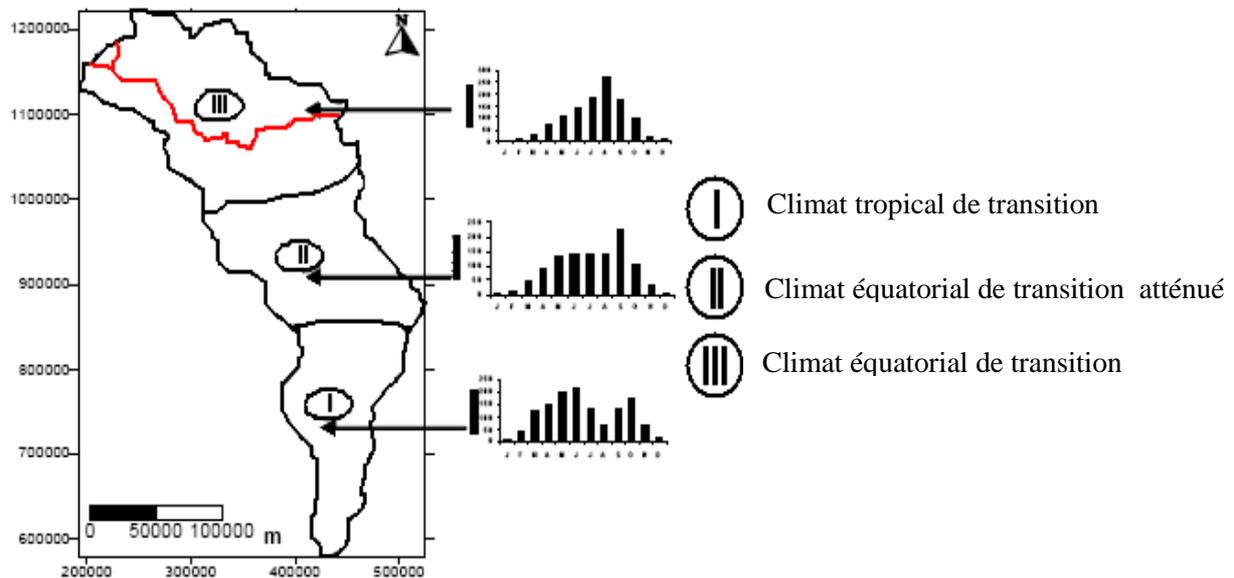


**Figure 3 :** Courbes de variations de l'humidité relative aux environs du fleuve Comoé de 1990 à 2004 (Source : SODEXAM)

## 1-2. REGIME PLUVIOMETRIQUE ET HYDROLOGIQUE

### 1-2-1. Régime pluviométrique

Les critères de distinction des régimes climatiques du bassin du fleuve Comoé sont fonction de la distribution et du rythme des précipitations. Ainsi on distingue trois principaux types de climats (figure 4): le climat tropical de transition ou soudanais au Nord (zone III), le climat équatorial de transition atténué au Centre (zone II) et le climat équatorial de transition au Sud (zone I).



**Figure 4 :** Typologie des climats dans le bassin versant du fleuve Comoé (KOUAKOU *et al.*, 2007).

Du fait de sa situation géographique, l'estuaire du fleuve Comoé subit directement l'influence des trois régimes.

- *Régime tropical de transition (climat soudanais)*

C'est le régime qui couvre la partie septentrionale de la Côte d'Ivoire, située au-dessus du parallèle 8°N. Les mois de juillet, août et septembre sont les plus pluvieux. De novembre à avril, on observe une période sèche.

- *Régime équatorial de transition atténuée (climat baouléen)*

C'est le régime de la région située en-dessous du parallèle 8°N et limité approximativement au Sud par l'axe Abengourou–Toumodi–Soubré. Il est caractérisé par quatre saisons:

- une première saison des pluies de mars à juin (environ 140 à 170 mm par mois);
- un ralentissement des précipitations en juillet et août;
- une seconde saison des pluies en septembre et octobre ;
- une saison sèche marquée de novembre à février avec quelques précipitations.

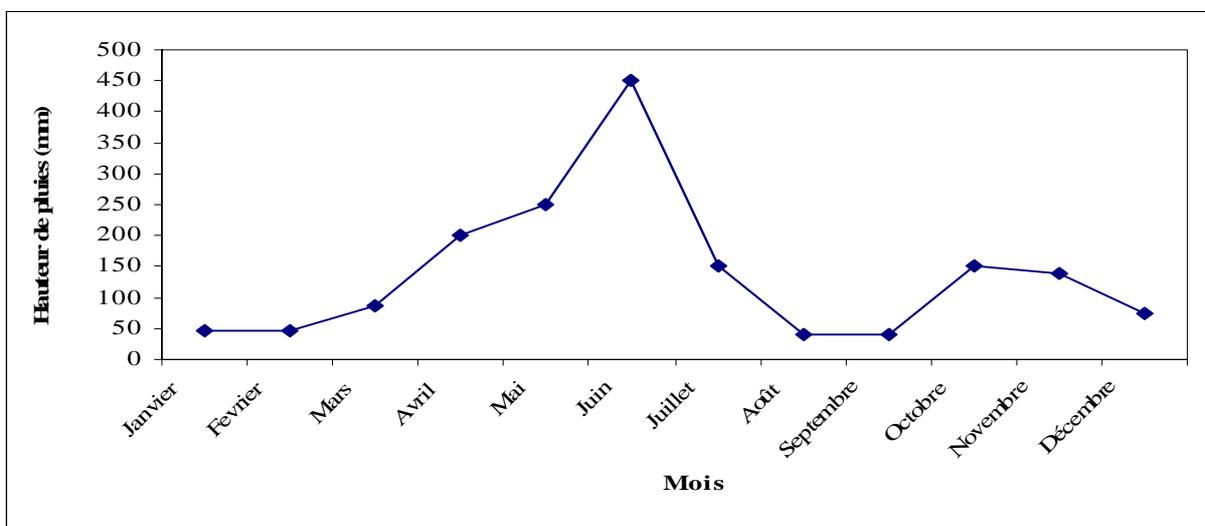
La pluviométrie annuelle a oscillé entre 732 et 1671 mm de 1980 à 2005 avec une moyenne de 1122 mm (WOGNIN *et al.*, 2007)

- *Régime équatorial de transition (climat attiéen)*

C'est le régime de la partie méridionale de la Côte d'Ivoire, située au Sud de l'axe Abengourou–Toumodi–Soubré. Il est caractérisé également par quatre saisons:

- une grande saison des pluies d'avril à juillet avec des précipitations moyennes mensuelles allant de 150 à 190 mm ;
- une petite saison sèche de juillet à septembre ;
- une petite saison des pluies de septembre à novembre, très irrégulière ;
- une grande saison sèche de décembre à mars avec quelques précipitations.

Les données pluviométriques et hydrologiques de la SODEXAM et de la DHH permettent d'apprécier les variations des précipitations à Yakassé-comoé 1990 à 2004 (figure 5).

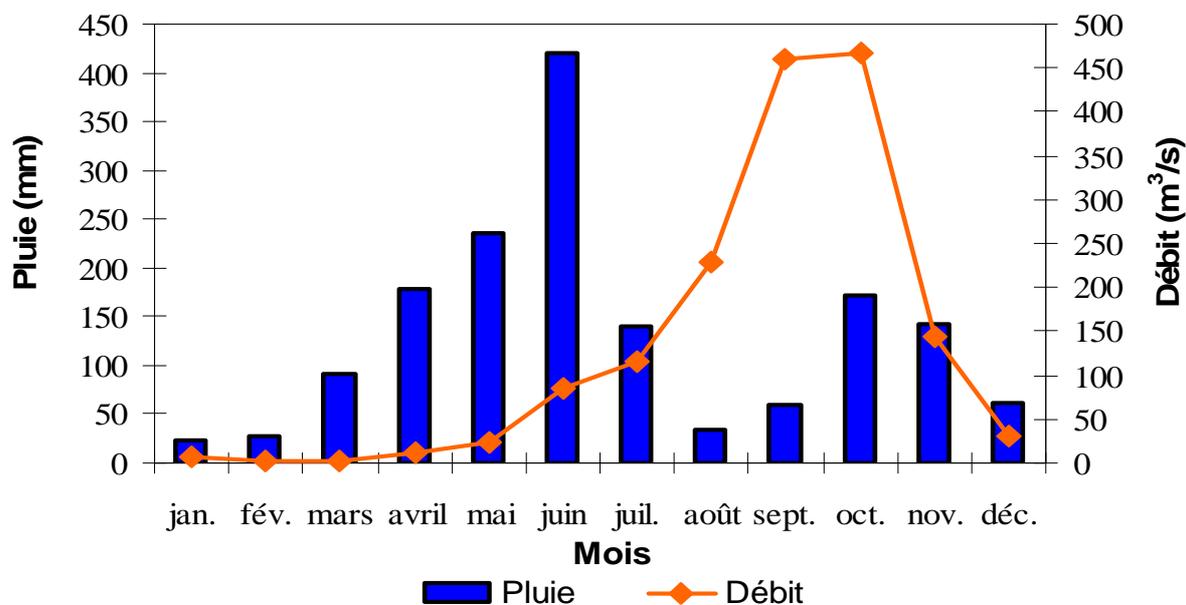


**Figure 5 :** Courbes d'évolution de la pluviométrie aux environs du fleuve Comoé

La pluviométrie annuelle varie de 1500 à plus de 2500 mm par an, répartie entre 90 à 180 jours de précipitations (COMBRES et ELDIN, 1971). Les relevés de la moyenne pluviométrique entre les périodes 1990 et 2004 ont permis d’avoir un minimum de 32 mm en février et en août, et un maximum de 437 mm au mois de juin.

### 1-2-2. Régime hydrologique

Les données pluviométriques et hydrologiques de la SODEXAM et de la DHH présentent les différentes saisons au niveau de l’estuaire du fleuve Comoé. Les écoulements observés au Sud du bassin du fleuve Comoé sont fortement influencés par le régime tropical de transition du Nord. Ce régime comporte généralement une seule période de crue (août-septembre-octobre), suivie d’un tarissement rapide de novembre à décembre (figure 6). Les apports les plus importants sont enregistrés dans la période septembre-octobre pendant les petites saisons des pluies.



**Figure 6 :** Histogramme et courbe d’évolution des précipitations et débits Moyens à l’embouchure du Comoé de 1982 à 2006 (Source : SODEXAM et DHH).

La variation des débits peut être scindée en quatre grandes périodes. On a :

- une période d’étiage qui part du mois de janvier à avril. Pendant cette période, les débits enregistrés sont en générales très faibles. Le débit minimal se situe au mois de mars 1998 ( $5,06 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) avec une moyenne de  $6,88 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Néanmoins, les débits enregistrés peuvent chuter en dessous de  $1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .
- entre mai et juin, on a une période de crue où le débit est évalué à  $52 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  en moyenne ;

- de juillet à octobre, on observe une crue maximale centrée au mois de septembre. La moyenne enregistrée est de  $455 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;

- la période d'étiage est matérialisée par les mois de novembre et de décembre. La moyenne est estimée à  $78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Pendant l'étiage (janvier à Avril) les débits enregistrés sont généralement très faibles (moyenne de  $6,88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Quant à la crue, elle s'observe du mois de juin au mois de novembre avec des pics centrés sur les mois de septembre et d'octobre.

La grande saison des pluies est centrée sur le mois de juin, alors que la petite saison l'est sur octobre (TASTET, 1979).

Il est de même pour la grande et la petite saison sèche, centrées respectivement sur janvier et août. L'inégale répartition des deux saisons de pluies est due aux mouvements ascendants et descendants dans la direction Nord-Sud du FIT (TAPSOBA, 1990).

### **1-2-2-1. Hydrologie anté-ouverture du canal de Vridi**

La pénétration de l'onde de marée par l'unique exutoire du fleuve Comoé se caractérisait par d'énormes pertes de charges dans le cours inférieur du fleuve Comoé. On enregistre un fort amortissement de 6 à 10 correspondants au rapport des marnages en mer et dans l'estuaire (KOFFI et ABE, 1991). La dynamique de l'intrusion saline conférait trois secteurs distincts. Il s'agit de :

- un domaine sous influence marine, sans dilution (salinité supérieure à 30 ‰), à la confluence Ouladine ;

- un domaine saumâtre, 10 à 13 ‰ du cours inférieur du fleuve Comoé à la confluence des lagunes Adjin et Potou ;

- un domaine à salinité inférieure à 10 ‰ dans la zone centrale de la lagune Ebrié (Abidjan) à caractère plus lacustre à l'Ouest.

Les essais de bilan hydrique avec un canal aux dimensions moyennes (largeur : 300 m ; profondeur : 3,5 m) soulignaient une contribution égale du Comoé et de la lagune Ebrié. Les volumes d'eau évacués au jusant et représentant le double des entrées au flot est de  $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (VARLET, 1978)

### **1-2-2-2. Hydrologie post-ouverture du canal de Vridi**

L'estuaire a maintenu un flux principal en direction du canal de Vridi. Cette situation favorisée par le canal et les dimensions du canal artificiel (longueur : 2,7 km ; largeur : 230 m ; profondeur moyenne : 12 m ; section mouillée :  $2760 \text{ m}^2$ ) a provoqué le déplacement du

secteur estuarien. Cette zone est sous forte influence marine (salinité supérieure à 20 ‰) dans la zone centrale de part et d'autre du canal (VARLET, 1978).

L'onde de marée, depuis Vridi, induit dans le secteur de l'embouchure naturelle du fleuve Comoé (confluence Ouladine-Moossou-Ile Vitré) un marnage faible. Ce marnage est sensiblement équivalent à celui occasionné par le flux du canal de Bassam (17 à 33 cm pour 100 cm d'amplitude au large de Vridi). Toutefois, il faut mentionner la réduction sensible du retard de propagation de la marée et l'apparition d'un front salé à la confluence Ouladine lorsque les deux exutoires sont fonctionnels.

### **1-2-3. Apports fluviaux**

Le bassin versant du Comoé, avec une superficie de 78000 km<sup>2</sup>, a un débit moyen annuel de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Ses débits moyens de crue et d'étiage sont respectivement de 1814 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> et de 42 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. (TASTET, 1979). Ce fleuve présente un régime tropical de transition (GIRARD *et al.*, 1971) qui enregistre généralement une crue unique d'août à novembre (60 % du volume total). Le Comoé est le principal fournisseur en eaux douces (75 % des apports fluviaux) de la lagune Ebrié où il débouche dans sa partie orientale (DURAND et GUIRAL, 1994). La Mé et l'Agnéby sont des fleuves côtiers à régime équatorial de transition caractérisé par deux crues annuelles. Ils reflètent le régime des précipitations du climat équatorial (DURAND et CHANTRAINE, 1982). Ces apports d'eaux fluviales en lagune Ebrié sont estimés à 8,410<sup>9</sup> m<sup>3</sup> soit 4 fois le volume lagunaire (DURAND et GUIRAL, 1994). A ceux-ci, s'ajoutent ceux des précipitations (2000 mm.an<sup>-1</sup>) réparties en deux saisons de pluies inégales et ceux des rivières (DURAND et CHANTRAINE, 1982). En l'absence d'une passe à Grand-Bassam, la totalité des apports d'eau douce reçue par le système Ebrié transite par le bassin central de la lagune Ebrié et sont évacués par le canal de Vridi.

### **1-2-4. Apports océaniques**

Le volume d'eau marine qui transite par le canal de Vridi, lorsque le grau de Grand-Bassam est fermé est de 38.10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> par an (VARLET, 1978). Il est 6,8 fois supérieur aux apports continentaux (DUFOUR *et al.*, 1994). Cet apport océanique est maximal au cours des périodes d'étiages des fleuves et minimal au cours des crues. L'intrusion d'eau marine diminue très rapidement quand on s'éloigne du canal de Vridi. TASTET (1979) a estimé au cours d'un cycle de marée à 28,1.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> les entrées d'eau par le canal de Vridi. Ces apports sont modulés au rythme semi-diurne mensuel de la marée. Il ressort du bilan établi par VARLET (1978) que les échanges entre la mer et la lagune Ebrié se font au profit de la mer avec une évacuation en mer de 1210<sup>9</sup> m<sup>3</sup> d'eau par cycle de marée.

### 1-3. GEOLOGIE DE LA CÔTE D'IVOIRE

La Côte d'Ivoire est constituée de deux domaines principaux. D'une part, le socle cristallin d'âge précambrien et d'autre part le bassin sédimentaire. Ils représentent respectivement 97,5 et 2,5 % du territoire national (figure 7).

#### 1-3-1. Socle cristallin

Le socle cristallin appartient au craton Ouest-africain et plus particulièrement à la dorsale de Man. Il est subdivisé en deux domaines: le domaine Kénéma-Man d'âge archéen et le domaine Baoulé-Mossi d'âge protérozoïque inférieur (YACE, 1976 ; POTHIN *et al.*, 2000 ; SOMBO, 2002). Ces deux domaines sont séparés par le grand accident (faille) du Sassandra (TAGINI, 1971, 1972 ; BESSOLES, 1977).

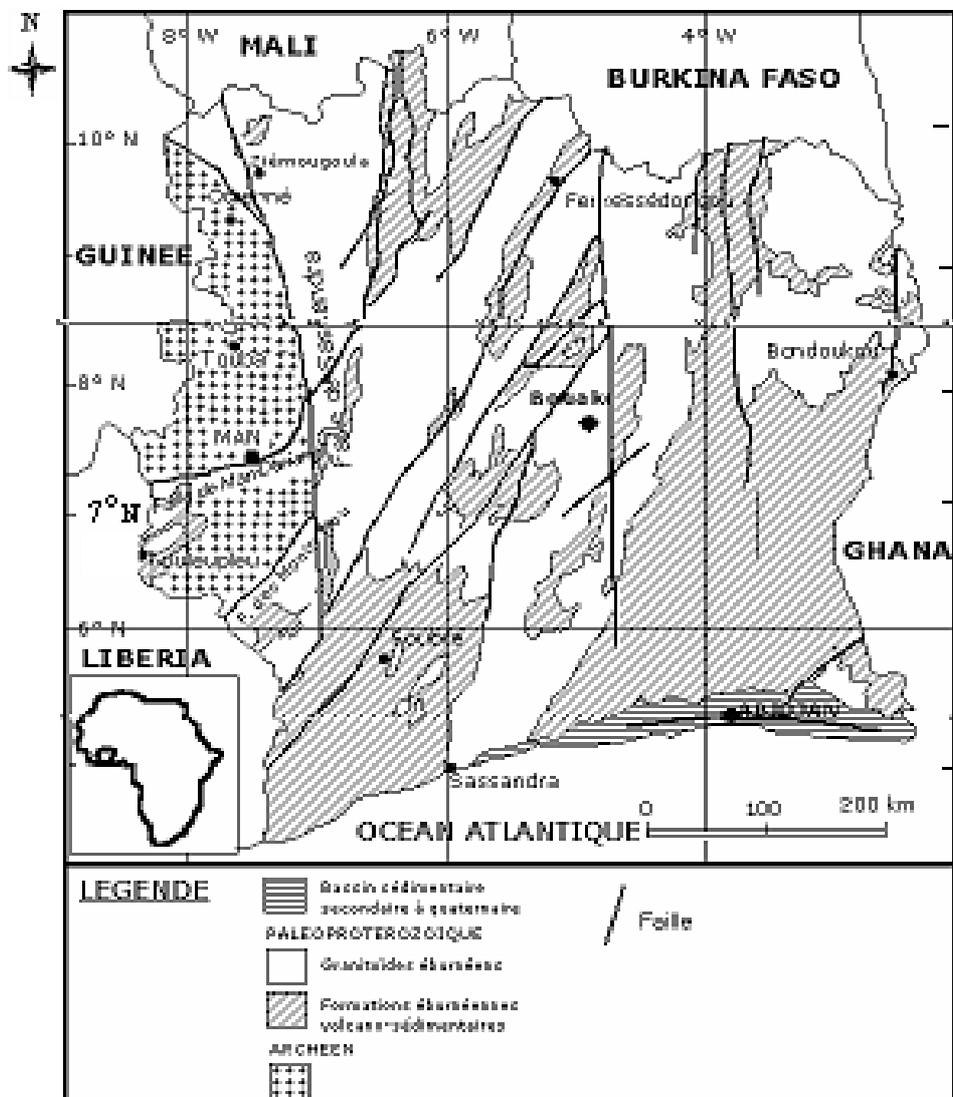


Figure 7 : Carte géologique de la Côte d'Ivoire (TAGINI, 1971 ; KOUAMELAN, 1996 modifiée).

### **1-3-1-1. Domaine Kenema-Man ou domaine archéen.**

Les formations de ce domaine sont d'âge archéen (3000-2300 Ma) et ont été structurées par les cycles orogéniques léonien et libérien. Elles sont localisées à l'Ouest de la faille du Sassandra, dans le Sud-Ouest du pays.

### **1-3-1-2. Domaine Baoulé-Mossi ou domaine paléoprotérozoïque.**

Le domaine Baoulé-Mossi est constitué de formations d'âge protérozoïque inférieur ou paléoprotérozoïque (2300-1700 Ma) qui ont été structurées par le cycle éburnéen. Ces formations occupent le reste du territoire ivoirien situé à l'Est de la faille du Sassandra. Ces formations sont constituées de granitoïdes, de micaschistes, de gneiss ou migmatites et par des filons de dolérite (BESSOLES, 1977; CAMIL, 1984 ; FABRE, 1985 ; LEMOINE, 1988).

### **1-3-2. Bassin sédimentaire**

Le bassin sédimentaire recouvre le socle précambrien et borde le golfe de Guinée (SPENGLER et DELTEIL, 1966). Il s'étend de Sassandra (Ouest) à Axim au Ghana (Est) sur une superficie estimée à 30.000 km<sup>2</sup>. En outre, il présente une partie émergée en forme de croissant et une partie immergée.

#### **1-3-2-1. Bassin sédimentaire émergé**

Il forme un cordon littoral qui est traversé d'Ouest en Est par une faille importante (accident majeur des lagunes) qui sépare deux zones distinctes:

- au Nord, les formations du Continental terminal (argiles, sables argileux et grés plus ou moins ferruginisés) recouvrent le socle précambrien sur une épaisseur de 170 m environ ;
- au Sud, le bassin est comblé par une épaisse série sédimentaire. Seuls affleurent, dans cette zone, des dépôts quaternaires (sables argileux continentaux, cordons sableux d'origine marine et des dépressions plus ou moins comblées de vases organiques ou de sables blancs lessivés lagunaires). L'estuaire englobe des sédiments superficiels du bassin sédimentaire qui forme à Grand-Bassam, une vaste plaine littorale constituée de cordons holocènes dont les plus anciens alternent avec des dépressions marécageuses. Les plus récents forment une plaine compacte qui enveloppe les bras lagunaires (exemple : Lagune Ouladine). Ces cordons sont limités au Sud par l'océan Atlantique et au Nord par une formation sablo-argileuse remarquable par sa couleur ocre connue sous le nom de « Bas Plateau ». Les fonds de l'estuaire sont recouverts de sables moyens et grossiers enfouis sous de la vase et du sable fin (BARD *et al.*, 1991). Les particules fines ont été transportées en suspension par le fleuve puis décantées. A proximité des cordons qui barrent l'embouchure, les fonds sont recouverts de

sable fin d'origine marine. Quand la passe est ouverte, un tri s'opère. Les sédiments fins sont alors remis en mouvement et évacués en mer par le jusant découvrant les faciès de sables de calibre plus important. La composition minéralogique des roches rencontrées dans le bassin versant du Comoé est présentée dans le tableau I.

**Tableau I :** Minéralogie des roches du bassin versant du fleuve Comoé (DELOR *et al.*, 1992)

| <b>Différentes types de roches</b>      | <b>Composition minéralogique</b>                                                                          |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Migmatites indifférenciées              | Quartz, oligoclase, microcline, biotite verte, épidote                                                    |
| Diorite                                 | Feldspath, amphibole, pistachite, apatite, sphène, zircon                                                 |
| Tonalite                                | Oligoclase, microcline, quartz, biotite verte, sulfures                                                   |
| Métatonalite                            | Plagioclase, quartz, biotite, épidote, apatite, sphène,                                                   |
| Métagranite à biotite                   | Microcline, plagioclase, quartz, biotite brun vert, zircon, muscovite, épidote, apatite et zircon,        |
| Métagabbro                              | Hornblende verte, plagioclase, épidote, sphène, trémolite, chlorite, talc, calcite                        |
| Métaarénites                            | Quartz, plagioclase, matrice quartzo-feldspathique, muscovite, chlorite, biotite verte, tourmaline,       |
| Métasillite                             | Quartz, plagioclase, chlorite, muscovite, biotite, niveau quartzo-feldspathique.                          |
| Chloritoschiste                         | Chlorite, amphibole (trémolite, actinote), quartz, plagioclase                                            |
| Quartzite                               | Quartz, muscovite, biotite, calcite et minéraux opaques                                                   |
| Ampélites, ampélites                    | Quartz, matrice muscovite-chlorite, calcite blanche,                                                      |
| Granodiorite à biotite et/ou hornblende | Plagioclase, microcline, quartz, biotite brun vert, muscovite, épidote, sphène, zircon                    |
| Gabbro, amphibolite, Pyroxénite         | Hornblende verte, plagioclase, biotite, orthopyroxène                                                     |
| Dolérite et gabbro                      | Feldspath, amphibole                                                                                      |
| Métasilstone                            | Plagioclases, chlorite, muscovite, biotite, épidote, tourmaline, pyrite ou magnétite, quartz              |
| Granite à biotite                       | Feldspaths, plagioclases, microcline, quartz, biotite verte chloritisée, épidote, sphène, zircon, calcite |
| Monzonite et monzogranite               | Biotite, microcline, plagioclase, quartz, pistachite, apatite, zircon                                     |

### 1-3-2-2. Bassin sédimentaire immergé

C'est la partie la plus développée du bassin sédimentaire et elle présente une superficie de 22000 km<sup>2</sup>. Dans la région dite de la marge d'Abidjan de Grand-Lahou au cap des trois points (PETROCI et BEICIP, 1990) sa puissance est estimée à plus de 12000 m, sous les formations superficielles du plateau continental (DELOR *et al.*, 1992).

### 1-3-3. Stratigraphie du bassin sédimentaire ivoirien

L'histoire du bassin est liée à l'ouverture de l'atlantique. Dans le bassin ivoirien, le rifting aura duré de 145 à 112 Ma, du jurassique terminal à l'Aptien supérieur, soit environ 33 Ma (TASTET *et al.*, 1993). Il débute par le dépôt sur le socle précambrien d'une série continentale formée de conglomérats, grès, sables et argiles versicolores (figure 8). Cette série constitue le « continental de base » vraisemblablement Jurassique supérieur ou Crétacé inférieur. Les sédiments sont des dépôts synrifts (DIGBEHI, 1987).

Le bassin sédimentaire est traversé par la faille des lagunes de direction Est-Ouest. Cette faille présente un rejet, avec au Nord une faible épaisseur des sédiments, tandis qu'au Sud, ces dépôts avoisinent 10000 m. La coupe géologique présentée par TASTET (1985) montre que ces dépôts débutent par le Jurassique supérieur et se termine par le continental terminal (Mio-pliocène) qui porte une faible épaisseur des dépôts quaternaires.

Selon MARTIN (1977), toutes les séries sont pauvres en macrofaunes. Les limites des étages sont essentiellement basées sur l'étude des foraminifères et des ostracodes ainsi que celle des spores et des grains de pollen :

- l'Albo-Aptien (Crétacé inférieur), d'une épaisseur de 2600 m repose en discordance sur une série continentale de base. Il comprend des argiles d'origine marine qui se terminent par les faciès conglomératiques ;

- le Cénomaniens est d'une puissance régulière (600 à 700 m). Il est constitué de faciès conglomératiques, gréseux, sableux passant à des calcaires parfois dolomitiques au centre du bassin ;

- le Sénonien (Crétacé supérieur) est représenté à l'Ouest du bassin par des argiles. Il devient grossièrement détritique au centre du bassin. A l'Est il est de type calcaire biogène ;

- le Paléocène est connu sous un faciès marin transgressif caractérisé par une microfaune abondante (foraminifères). Les sédiments sont argileux et glauconieux, mais à l'Est d'Abidjan le Paléocène est représenté par des sables, des argiles glauconieuses ou des calcaires coquillés rencontrés à l'affleurement à Ebocco ;

- l'Eocène, d'une épaisseur de 490 m au maximum, repose sur la série marine du Paléocène. On distingue un Eocène inférieur formé d'argiles sableuses à petits bancs calcaires et un Eocène moyen à supérieur constitué d'argiles glauconieuses plus ou moins sableuses ;

- l'Oligocène est absent dans le bassin ivoirien. Ceci suppose qu'à cette époque, la subsidence a cessé et que probablement un mouvement de surélévation a pu occasionner l'érosion des formations surmontant le Crétacé « moyen » (TASTET, 1979) ;

- le Miocène a été observé aux environs d'Abidjan dans le bassin réduit dont les dimensions excèdent à peine 35 km. Il a été traversé sur 600 m par un forage réalisé à Port-Bouet, ainsi qu'à Samo, Noé, etc. Des sables plus ou moins argileux surmontés de marnes argilo-silteuses ont été observés. A la base, le Miocène repose en discordance sur Cénomaniens. Cela supposerait que la transgression Miocène a emprunté une zone érodée de l'Oligocène ou du début du Miocène ;

- le Mio-Pliocène (de faciès « Continental Terminal ») marque avec le Quaternaire le dernier épisode de sédimentation dans le bassin ivoirien et s'observe souvent à l'affleurement. Il est essentiellement formé de dépôts détritiques sablo-argileux. Ces formations sont sous forme lenticulaire. Elles occupent la quasi totalité du domaine sédimentaire au Nord des lagunes. Elles constituent un manteau plus ou moins épais et recouvrent les dépôts anciens (LENEUF, 1960 in MONDE, 1997).

Les faciès les plus courants sont des conglomérats ferrugineux, sables, sables argileux, argiles et formations ferrugineuses (MARTIN, 1973);

- le Quaternaire s'étend au sommet de la série stratigraphique et constitue les formations de la plaine littorale. Il comprend des sables grossiers formant les cordons littoraux, épais d'environ 50 m, ainsi que les vases et les sables du fond des lagunes.

Le bassin versant du fleuve Comoé qui a une forme allongée Nord-Sud s'inscrit dans ce contexte géologique.

## **Conclusion**

La Côte d'Ivoire est formée de deux unités géologiques de superficies très inégales. Il s'agit d'une part d'un socle précambrien et d'autre part d'un bassin sédimentaire secondaire-tertiaire. Du point de vue climatique, le bassin du fleuve Comoé est caractérisé par le régime tropical de transition au Nord, le régime équatorial de transition atténué au Centre et le régime équatorial de transition au Sud.

Le bassin versant du fleuve Comoé a une forme allongée. La caractéristique physique de l'estuaire du Comoé révèle qu'elle constitue le plus vaste estuaire du littoral ivoirien. Il est alimenté par les apports fluviaux et marins.

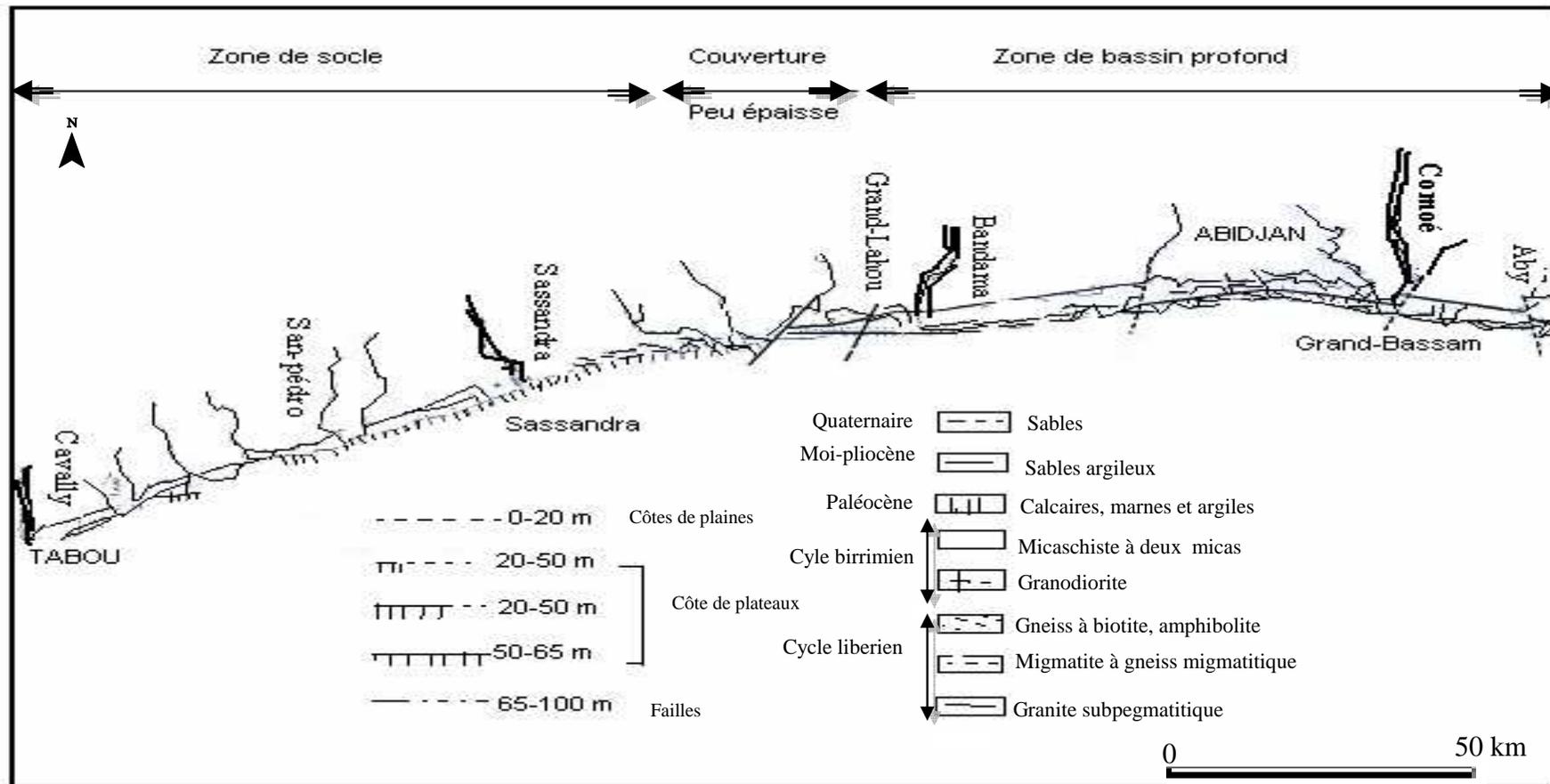


Figure 8 : Littoral de Côte d'Ivoire : géologie et morphologie (TASTET, 1979)

## CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUE HYDRODYNAMIQUE DU LITTORAL ET DU FLEUVE COMOIE

Ce chapitre présente la morphologie de la plage et la dynamique sédimentaire actuelle du littoral. Les éléments morphologiques et la terminologie pour désigner les différentes unités d'une plage sont indiqués.

### 2-1. TRAITS MORPHOLOGIQUES DU LITTORAL

#### 2-1-1. Orientation de la côte

Du cap des Palmes au Ghana sur le littoral, on distingue quatre zones d'orientations différentes correspondant à des formations géologiques distinctes (tableau II).

**Tableau II** : Orientation du trait de côte selon les zones et leur nature géologiques  
(TASTET, 1972)

| Zones                          | Orientation | Nature géologique                            |
|--------------------------------|-------------|----------------------------------------------|
| Tabou à Sassandra              | N67, 50°    | Socle précambrien                            |
| Sassandra à la lagune de Lahou | N80°        | Continental terminal, Paléocène à Fresco     |
| Lagune de Lahou à Abidjan      | N83°        | Cordon sableux holocènes de faible extension |
| Abidjan au Ghana               | N100°       | Cordon sableux holocènes de forte extension  |

#### 2-1-2. Morphologie côtière

Le littoral ivoirien se caractérise par deux types morphologiques. Nous distinguons les cotes de plateaux qui sont des côtes à falaises et les côtes de plaines qui sont des cotes basses.

a) côtes de plateaux : Elles se localisent dans la zone Ouest du pays. L'altitude des plateaux varie de 20 à 100 m, le maximum se situant dans la région de San-Prédro à Sassandra. Le tracé en échelon de la côte (des portions de côtes rectilignes sont décalées les unes par rapport aux autres) est lié à l'érosion différentielle. Dans les côtes de plateaux, nous distinguons les cotes à falaises vives et les côtes à falaises mortes :

- côtes à falaises vives : Ce sont les falaises d'âge paléocène de Fresco. Elles constituent un front de falaises important à l'heure actuelle ;

- côtes à falaises mortes : De la lagune de Lahou à Tabou, le littoral est constitué de falaises toujours situées en retrait d'une plage ou d'un petit épandage continental. Ce sont des falaises non fonctionnelles de nos jours.

b) côtes de plaines : Elles se situent dans la partie Est du pays (de la lagune de Lahou au Ghana). Elles sont bordées par les formations quaternaires (antéholocènes) et immédiatement au Nord de la plage actuelle par les cordons marins holocènes.

Nous distinguons les cotes à transport dominant et les cotes à dépôt dominant :

- côtes à transport littoral dominant : A l'Ouest d'Abidjan, les cordons sont peu nombreux (trois ou quatre) et présentent une largeur de quelques centaines de mètres. Le dépôt littoral a été donc faible depuis le maximum de la transgression holocène.

- côtes à dépôt dominant : A l'Est d'Abidjan, les cordons ont une grande extension (4 à 5 km à Grand-Bassam). TASTET (1985) estime à 1 m/an l'engrèvement de la côte dans cette zone.

## **2-2. MORPHOLOGIE DE LA PLAGES**

### **2-2-1. Classification et dynamisme des plages**

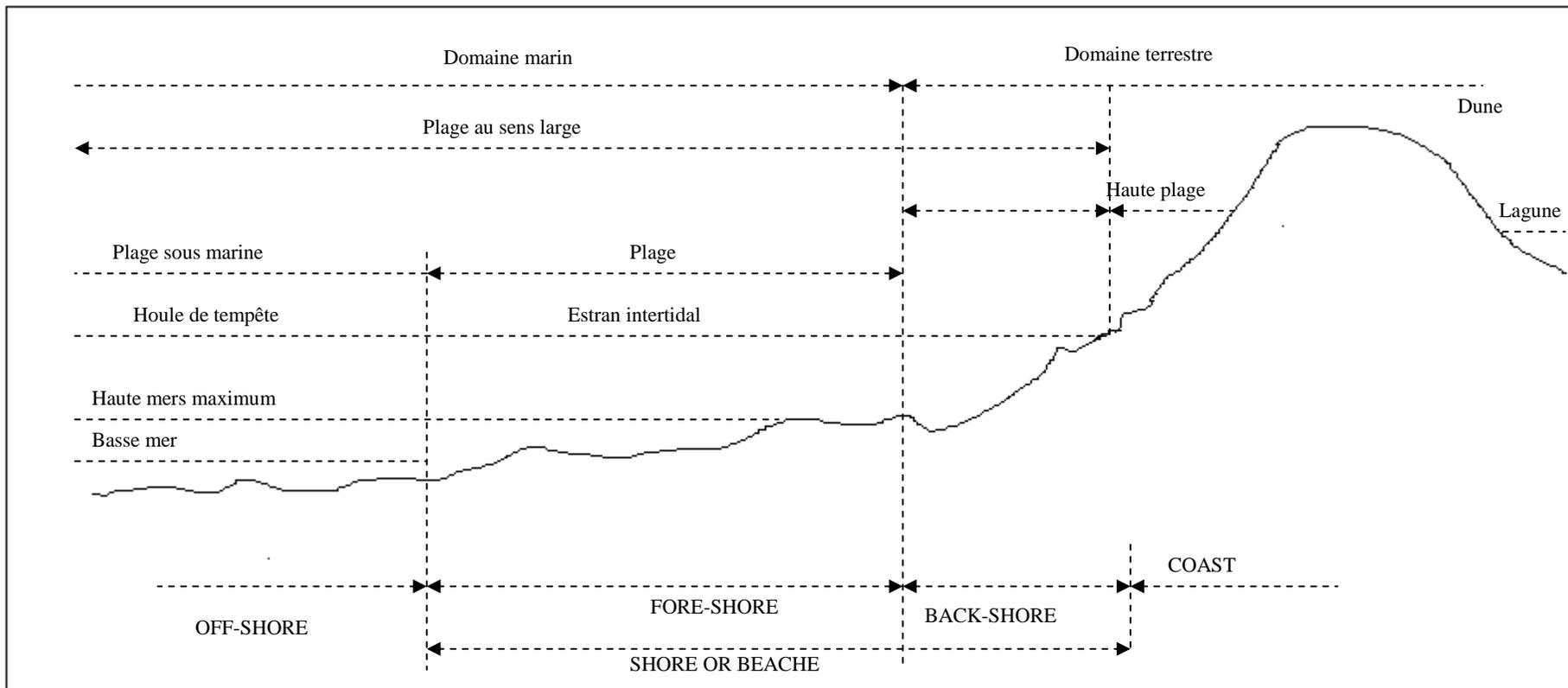
Le profil typique d'une plage basse sableuse comprend de la côte vers le large (figure 9) :

- une zone terrestre, souvent formée de dunes éoliennes : la haute-plage ou arrière-plage (*back shore*) occupée par la mer que lors des tempêtes ou des marées de vives eaux et qui correspond au domaine supra tidal ainsi qu'aux communautés biologiques (biocénoses) caractéristiques de l'étage supra littoral (PERES, 1961 in WOGNIN *et al.*, 2007) ;

- la plage proprement dite ou estran (*shore face*) située entre les niveaux moyens de haute mer et de basse mer (domaine inter tidal ; biocénose de l'étage medio littoral) ;

- l'avant plage ou prisme littoral (*shore face*), dont la partie supérieure est découverte lors des basses mers de vives eaux et dont la partie inférieure a subi l'action des vagues contre le fond (début du domaine infra tidal, étage infra littoral) ;

- la zone de transition soumise aux vagues de tempête contre le fond, et qui passe vers le large aux dépôts plus ou moins envasés de la plate forme continentale proprement dite (*offshore*, biocénoses de l'étage circa littoral).



**Figure 9:** Modèle de la morphologie des plages (WOGNIN, 2004).

WRIGHT et SHORT (1984) ont adopté une nouvelle approche dans l'étude des plages. Elle prend en compte les relations entre les mesures physiques et les variations morphologiques des plages. Ils proposent deux typologies : les plages réfléchives et les plages dissipatives.

- les plages dissipatives sont caractérisées par un déferlement glissant avec une zone de jet de rive (*swash*) très développée, des pentes faibles, du sable moyen et un transport dominant cross shore en suspension. Ce type de plage est caractéristique des plages de Grand-Bassam;

- les plages réfléchives sont affectées d'un déferlement de type plongeant, des pentes fortes, du sable moyen à grossier, un transport dominant "*longshore*" qui est important et s'effectue principalement par charriage.

### **2-2-2. Variation de profil de la plage**

Les modifications des plages par un engraissement ou par une érosion le long d'un même profil sont dues à la houle et aux fluctuations du niveau marin. Elles sont sous l'influence de la marée (WEBER, 1978).

La morphologie des plages est en permanence définie par l'interaction entre les agents dynamiques (houle, courants...) et les sédiments de plage. Ainsi, le profil de plage est-il à considérer comme un "instantané" de l'évolution morphologique (KOFFI et ABE, 1991). En effet, l'évolution morphologique et sédimentologique de la plage est étroitement liée à l'évolution des caractéristiques dynamiques des agents littoraux (YACE, 1987).

## **2-3- DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ACTUELLE DU LITTORAL IVOIRIEN**

### **2-3-1. Agents dynamiques littoraux**

Les mouvements sédimentaires sont engendrés par des agents dynamiques que sont le vent, la houle et les courants de marée. Il s'agit soit de charriage, de saltation, de transport en suspension ou d'écoulements gravitaires.

#### **2-3-1-1. Houle**

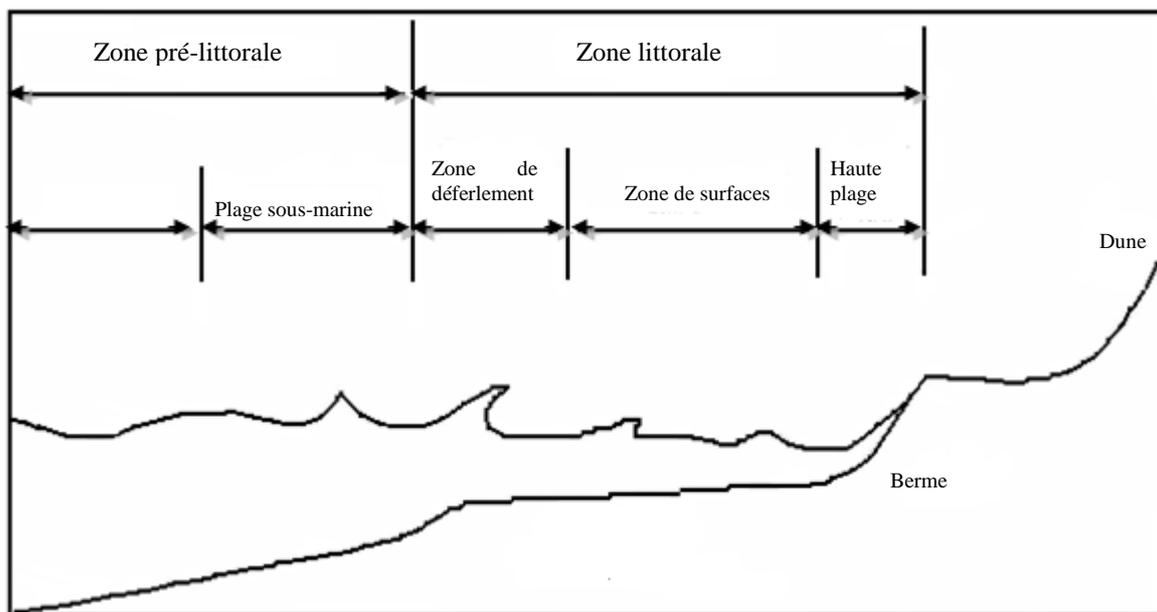
La houle est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui est formé par un champ de vents éloignés (*fetch*) de la zone d'observation. Elle est l'un des phénomènes principaux agissant sur l'évolution des domaines côtiers (DROZ *et al.*, 1985).

Elle engendre l'érosion des plages, la dérive littorale et les surcôtes. A la côte, elle permet le transport sédimentaire par deux mécanismes principaux à savoir la remise en suspension et la formation d'un courant littoral. Son action sur la morphodynamique d'une embouchure tidale est également très importante et entraîne souvent la pérennité du système. Les interactions

houle-courant sont alors très fortes et la morphologie des fonds entraîne une réfraction importante. Par son action, la houle est le principal agent d'évolution dynamique de la bordure littorale car elle dissipe les 75 % de son énergie en arrivant à la côte. D'une manière générale, les houles du littoral ivoirien proviennent du quadrant S-W et S-S-W et sont relativement homogènes sur l'ensemble du littoral (MONDE et AKA, 2001). Les courants engendrés par la houle sont de deux types :

- les courants perpendiculaires à la côte assurent un transport d'eau vers la côte ou vers le large. Ce sont les courants de compensation et de transports de masse. « *Ripcurrents* »
- les courants qui provoquent des mouvements d'eau parallèlement au rivage. Ce sont les courants côtiers ou les courants de dérive dus à la houle.

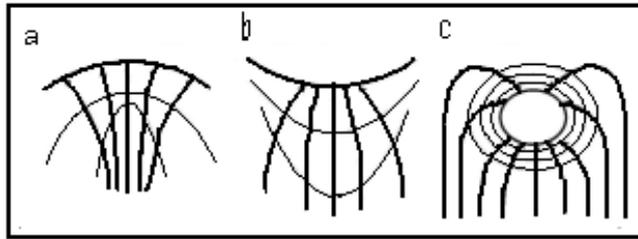
La période des houles varie de 6 à 16 secondes, la moyenne se situerait entre 7 et 11 secondes (VARLET, 1958 in AKA 1991). La propagation de la houle à la côte est caractérisée par des déformations de l'onde. En se réfractant sur le fond, la célérité de la houle diminue et l'amplitude augmente jusqu'au déferlement. Cette zone d'augmentation de la cambrure des vagues est la zone de "*shoaling*" (figure 10). Le déferlement des vagues entraîne une dissipation de l'énergie par turbulence, mais également génère un courant moyen par énergie cinétique. La zone de déferlement varie en fonction de la marée, de la zone turbulence de *surf* et de la zone de jet de rive ou zone de *swash* (PAN *et al.*, 2001).



**Figure 10:** Principales division de la zone littorale en fonction de la propagation de la houle (PAN *et al.*, 2001).

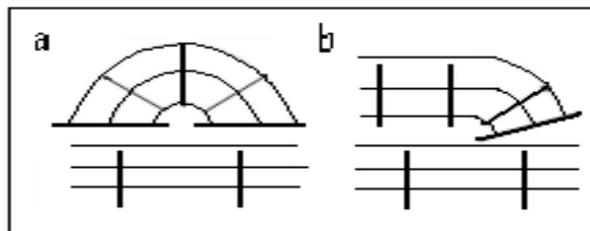
La houle subit plusieurs types de déformations à l'entrée de la zone littorale :

- la réfraction (figure 11) est la modification de provenance et de hauteur de la houle en l'absence d'obstacles apparents. Elle est due à la variation des fonds ou à la présence d'un courant.



**Figure 11:** Principales types de réfraction (PAN *et al.*, 2001): a) vallée sous-marine, b) cap et c) île.

- la diffraction (figure 12) représente un transfert d'énergie, au travers des orthogonales de houle, des zones agitées vers les zones abritées. La propagation de l'onde au travers d'une brèche est l'exemple typique de la diffraction et s'applique précisément au cas des embouchures.



**Figure 12:** Principales types de diffraction (PAN *et al.*, 2001): a) embouchure, b) jetée.

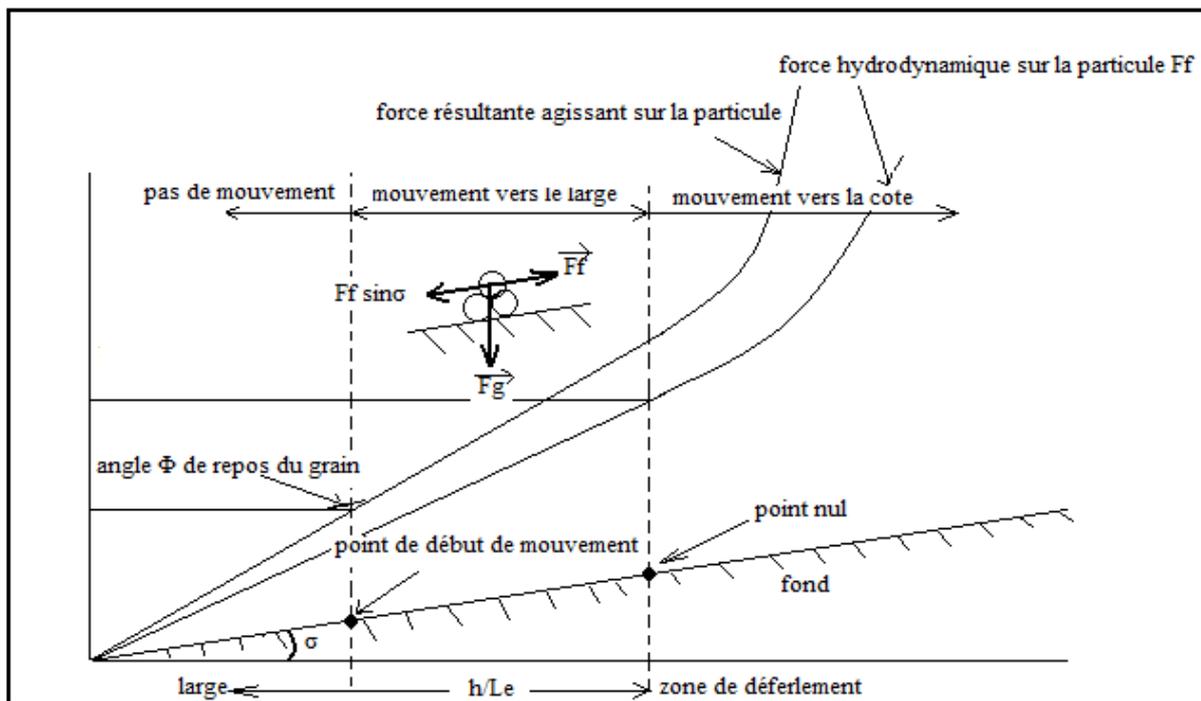
### 2-3-1-2. Influence de la houle sur les mouvements sédimentaires

Pour une houle donnée, il existe une profondeur à partir de laquelle les forces hydrodynamiques (variation oscillante du gradient de pression et de la vitesse près du fond) seront suffisamment importantes. Ces forces hydrodynamiques sont à l'origine de l'instabilité des particules sédimentaires sur le fond (AMINI, 1979). Cette condition est appelée le point de début de mouvement. En amont de ce point (pour une pente régulière) l'action de la houle sur le fond sera suffisante pour maintenir les particules sédimentaires en mouvement oscillant. Ainsi dans un cas théorique, il est possible de définir une profondeur où les forces de gravité et les forces hydrodynamiques ( $F_g$  et  $F_e \cdot \sin \alpha$ ) s'équilibrent. C'est la théorie du point nul (figure 13).

En amont de ce point, les forces hydrodynamiques l'emportent sur les forces de gravité et le transport a lieu vers la côte. En aval de ce point, les forces hydrodynamiques sont justes suffisantes pour causer l'instabilité du grain sur le fond, mais pas assez pour contrebalancer

les forces de gravité. Le grain, une fois en mouvement roulera vers le large (PAN et *al.*, 2001).

La houle dans beaucoup de cas se présente obliquement à la ligne de rivage, ce qui entraîne la création d'un courant de dérive littorale. Du fait de la houle, il y a donc deux processus de déplacement de sédiment : l'un perpendiculairement à la ligne de rivage ; l'autre parallèlement à la ligne de rivage (dérive littorale).



**Figure 13:** Présentation qualitative de la théorie du point nul (AMINI, 1979).

### 2-3-1-3. Vents

Les vents constituent des agents dynamiques importants. Ils sont générateurs de houle et de courants côtiers de surface. Ils sont en outre sur la plage et la dune littorale, responsables des déplacements sédimentaires importants. On distingue le vent local et le vent générateur de la houle. Le vent local, essentiellement d'Ouest à Sud-Ouest et de Sud-Sud-Ouest à Sud, a une vitesse comprise entre 2,7 à 3,9 m/s (tableau III).

**Tableau III:** Variation annuelle de la vitesse du vent en fonction de leur direction (VARLET, 1958).

| Direction | J   | F   | M   | A   | M   | J   | J   | A   | S   | O   | N   | D   |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| W - SW    | 3,0 | 3,1 | 3,1 | 3,3 | 3,5 | 3,4 | 2,9 | 3,0 | 3,3 | 3,6 | 3,2 | 2,8 |
| SSW - S   | 2,7 | 3,0 | 3,3 | 3,4 | 3,8 | 3,7 | 3,9 | 3,2 | 3,3 | 3,7 | 3,4 | 2,9 |

Les moyennes mensuelles des vitesses du vent restent à peu près constantes toute l'année. Les vents locaux peuvent produire des courants de surface. Ces courants circulent dans la même direction que le vent et ont une vitesse égale à 2 ou 3 % de la vitesse du vent (VARLET, 1958).

Le vent générateur de houle : L'énergie du vent appliquée sur un plan d'eau selon une direction constante, sur une distance suffisamment grande et durant un certain temps met en mouvement la masse liquide des couches supérieures.

Le vent peut modifier les caractéristiques de la houle à la côte. On peut observer que, par le vent de terre, les vagues se mélangent au déferlement, alors qu'un vent venant du large accompagne le mouvement des vagues vers la plage. Le vent agit directement sur le sédiment par déflation. Il peut alors être responsable d'apport de sable ou d'érosion de la plage et de la dune. L'apport de sable en pleine mer par un vent très violent est aussi possible. L'action du vent s'exerce particulièrement sur les fractions proches de 250  $\mu\text{m}$  (WEBER, 1978).

#### **2-3-1-4. Courant**

L'influence des courants est primordiale pour la répartition des sédiments sur le plateau continental ivoirien (MARTIN et MEYBECK, 1971). Les eaux du plateau continental ivoirien sont le siège de deux courants antagonistes (LE MASSON et REBERT, 1968) :

- un courant superficiel : c'est le courant de guinée qui porte à l'Est et dont le maximum de vitesse peut atteindre  $150 \text{ cm.s}^{-1}$  (PLUTSCHART, 1966 ; AKA, 1991).
- un sous-courant ou contre-courant dirigé toujours vers l'Ouest qui se situe entre -15 et -80 m (TASTET, 1979). Son épaisseur est d'environ 50 m et sa vitesse de 30 à  $80 \text{ cm.s}^{-1}$ .

#### **2-3-1-5. Marée**

La marée est le mouvement périodique de montée et de descente du niveau de la mer. Elle est causée par la résonance gravitationnelle due à la rotation de la terre par rapport au soleil et la lune. Sur la côte ivoirienne, la marée est de type semi diurne (ARENS *et al.*, 1971). C'est la marée dont le cycle comporte deux pleines mers et deux basses mers pour chaque jour lunaire, avec une inégalité diurne relativement faible. La marée de type «sémi-diurne» à forte inégalité journalière (VARLET, 1958) dont l'amplitude est faible (0,4 à 1,3 m) peut modifier la vitesse des courants. Elle peut également avoir une influence sur les mouvements sédimentaires des petits fonds (AKA, 1991). La marée a une influence importante au niveau des embouchures par l'alternance des courants qu'elle y induit.

Les effets de la marée se font ressentir jusqu'à Alépé, à plus de 70 km en amont de l'embouchure du fleuve Comoé. Si bien que les mesures des débits basés sur la mesure de la hauteur d'eau effectuée par la DHH se sont avérées difficiles à Alépé. La complexité de la forme de la lagune Ebrié (existence de plusieurs baies, excavation des fonds par endroits) fait que la propagation de la marée à l'intérieur de la lagune se fait avec difficulté.

### **2-3-1-6. Dérive littorale**

C'est un mouvement de sable, parallèlement à la côte générée par la houle, le long du littoral. Sous l'action des houles obliques, un courant prend naissance et se dirige parallèlement à la côte. Ce qui entraîne le mouvement de sables. Elle est dirigée dans le même sens que le courant de guinée sur les côtes ivoiriennes, c'est à dire de l'Ouest à l'Est. Son importance est fonction de la période de la houle et de la hauteur des rouleaux (OTTOMANN, 1965).

La dérive littorale a une influence prépondérante sur les phénomènes de dépôt et d'érosion et donc sur la morphologie d'une côte. La dérive littorale a été évaluée à environ  $800000 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  à l'Ouest du canal de Vridi et  $400000 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  à l'Est du canal (VARLET, 1958).

Les sables mis en mouvement par le fait de la houle sont d'origines diverses. On distingue :

- a) **Erosion des altérites** : Les sols les plus représentés de l'arrière pays continental sont de type ferralitique. A ceux-ci s'ajoutent les sols hydromorphes (LE BUANEC, 1972). L'érosion de ces altérites issues du socle précambrien (TAGINI, 1971), constitue une source considérable d'apport de matériaux détritiques dans le domaine marin par le biais des fleuves.
- b) **Erosion du Continental Terminal** : Le Continental Terminal constitue du point de vue géomorphologique les hauts plateaux ; d'altitude comprise entre 50 et 110 m. Il est représenté dans sa plus grande masse par des sables argileux ou sables tertiaires. Les eaux d'infiltration et de lessivage des formations argilo-sableuses de ces plateaux entraînent un départ de matières (LENEUF, 1968).
- c) **Erosion des sables quaternaires** : Ce sont des sables grossiers formant les cordons littoraux fossiles ou actuels. L'obliquité de la houle sur le rivage met ces sables en mouvement.

d) **Processus de compensation** tendant à rétablir l'équilibre du budget sédimentaire lors des fluctuations du niveau de la mer. Le budget sédimentaire est positif lors d'une transgression et négatif au cours d'une régression selon la règle de BRUNN (1962).

#### **2-3-1-7. Transit des sables**

La houle arrivant obliquement par rapport au rivage entraîne le sable sur la plage, qui est repris par le courant de retour en suivant la ligne de plus grande pente. C'est par cette suite ininterrompue de montées et de descentes que se fait le transport. De cette manière s'enrichirait en sédiments la côte sableuse de l'Est au détriment de la côte rocheuse de l'Ouest. Il est difficile de chiffrer le volume des cheminements (HUDSON, 2003).

#### **2-3-2. Saisons lagunaires et marines**

Le cycle climatique influe directement et indirectement sur l'écosystème lagunaire et fluvial. La définition de « saisons lagunaires » est la résultante des saisons « terrestres » et des saisons « marines ».

##### **2-3-2-1. Saisons lagunaires**

L'évolution moyenne des caractéristiques climatiques montre l'existence plus ou moins marquée de deux périodes de maxima annuelles de précipitations. Il se subdivise en quatre saisons caractéristiques (ARFI *et al.*, 1991):

- **une grande saison sèche** : De début décembre à fin février, les précipitations sont faibles (60 mm/mois en moyenne) avec un minimum en janvier. La couverture nuageuse est en général faible avec une bonne visibilité à l'exception de quelques jours, voire quelques semaines, en janvier lors de la période d'harmattan. Les valeurs de la plupart des paramètres augmentent du début à la fin de cette saison et culminent au mois de mars (vent de 1,0 à 1,5 m.s<sup>-1</sup>; rayonnement solaire de 1492 à 1910 cm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>; température de l'air de 26,3 à 27,7°C; évapotranspiration de 106,8 mm en décembre à 141,8 en mars).

De début mars à mi mai, une période de transition s'installe avant la grande saison des pluies. Cette période est caractérisée par une augmentation des précipitations correspondant à des averses de type orageux. La valeur de la vapeur d'eau est maximale alors que celles de tous les autres paramètres tendent à décroître.

- **une grande saison des pluies** : De mi mai à mi juillet, les précipitations sont très abondantes (1100 mm en 2 mois en moyenne) et culminent au mois de juin. Le rayonnement

solaire diminue très nettement (30 % de mai à juillet) ainsi que la température de l'air (de 27,0 à 24,8° C) et l'évaporation (-25 %).

- **une petite saison sèche** : De mi juillet à fin septembre, les pluies sont rares et faibles (41mm en août). Le ciel est uniformément gris, ce qui correspond à une insolation et des températures minimales. L'évaporation conserve des valeurs basses. La vitesse du vent réamorce une remontée qui culmine en septembre (1,7 m.s<sup>-1</sup>).

- **une petite saison des pluies** : D'octobre à novembre les précipitations deviennent élevées (160 mm par mois) sans atteindre celles de la grande saison des pluies. Cette période correspond au maximum secondaire pour le rayonnement solaire, la température de l'air et l'évaporation.

### 2-3-2-2. Saisons marines

Au-delà du plateau continental ivoirien, les facteurs déterminant la hauteur de l'océan entraînent l'apparition de différents types d'eaux permettant la définition des saisons marines (LEMASSON et REBERT, 1968 ; MORLIERE, 1970). On distingue quatre (4) saisons principales :

- **une petite saison froide** : De fin décembre à début janvier, on observe une résurgence d'eau océanique froide (24-25°C) et salée (plus de 35 g.L<sup>-1</sup>). Cette période froide, qui débute à l'Ouest de la Côte d'Ivoire s'étend progressivement sur tout le pays avec des degrés variables dans l'espace et selon les années (ARFI *et al.*, 1991). La température est inférieure à 24°C (ABE, 1995).

- **une grande saison chaude** : Au cours des mois de mars à mai, des eaux océaniques issues du large s'installent devant la Côte d'Ivoire. Leur température oscille entre 27 et 28°C avec une salinité proche de 35 g.L<sup>-1</sup>. La température est largement supérieure à 24°C (ABE, 2005).

- **une grande saison froide** : De juillet à octobre, la côte du littoral ivoirien est affectée par un fort *upwelling* dont l'intensité maximale est située vers l'Est du littoral. La salinité des eaux marines côtières est toujours proche de 35 g.L<sup>-1</sup> avec une température inférieure à 23°C.

- **une petite saison chaude** : En novembre et décembre, des eaux guinéennes chaudes (28°C) et dessalées (3,5 g.L<sup>-1</sup>) viennent recouvrir celles de *l'upwelling*. Les caractéristiques des eaux superficielles suivent une évolution analogue avec des valeurs moyennes légèrement supérieures de 1 à 2°C pour la température et inférieures de 0,5 à 1,0 g.L<sup>-1</sup> pour la salinité.

## **2-4. MECANISME DE TRANSPORT SOLIDE ET DE SEDIMENTATION**

### **2-4-1. Transport des particules sédimentaires**

Les mouvements des fluides porteurs (eau, air) et des particules solides s'effectuent selon des modalités variées. Les paramètres intervenant sont la densité, la viscosité, le type d'écoulement, la vitesse et sa force, la taille, la forme et les propriétés de surface des grains (CHAMLEY, 1987). Les mouvements des particules solides peuvent avoir pour moteur le poids propre, la force du vent et la force de l'eau (JANSSON, 2002).

- l'action du poids peut provoquer des glissements de terrain dans les sols immergés ou émergés.

- l'action des vents est hautement sélective, soit dans la phase où elle recueille des particules solides, soit dans celle où elle les transporte et les dépose. Les poussières fines et les cendres volcaniques peuvent être emportées par une brise légère. Mais les vents proprement dits les soulèvent à grande altitude et peuvent les transporter sur des milliers de kilomètres. En revanche, le sable ne peut être soulevé que près du sol et transporté dans le voisinage immédiat.

Les petits galets ne peuvent être mis en mouvement que par des tempêtes et sont alors traînés brièvement au fond de l'estuaire. Quant aux cailloux, ils ne peuvent pas être soulevés par les vents.

- l'action de l'eau est la principale cause de l'érosion, du transport et de la sédimentation des particules en Côte d'Ivoire. La vitesse du courant et la taille des particules constituent les paramètres fondamentaux qui conditionnent la mise en mouvement et le transport des particules.

Selon que le mouvement relatif du fluide par rapport à la particule en suspension est lent, moyen ou rapide, l'écoulement sera dit laminaire (régime de Stokes), semi-turbulent (régime d'Allen) ou turbulent (régime de Newton-Rittinger). Ces différents régimes correspondent à des nombres de Reynolds déterminés (MIGNIOT, 1982 ; LE NORMANT, 1995). Le nombre de Reynolds caractérise le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Le mode de transport dans les fleuves dépend du régime de l'écoulement caractérisé par le nombre de Froude (KOUASSI, 2007). Ce nombre exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité.

### **2-4-2. Transport solide**

Le transport solide représente l'entraînement de granulats sous l'action d'un écoulement fluide. Les différents phénomènes physiques, naturels peuvent se faire à surface

libre ou en charge. Généralement, deux modes de transport solide sont à considérer (figure 14). Les deux modes diffèrent par deux aspects essentiels :

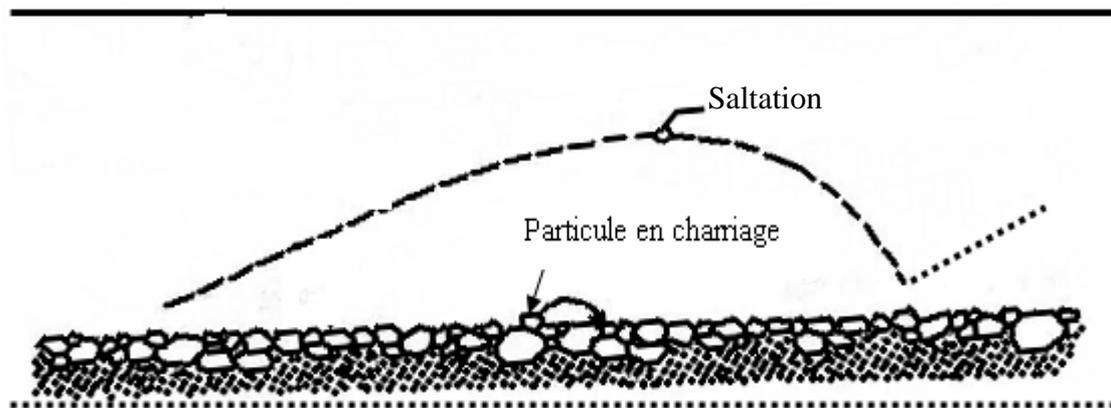
- le transport solide par charriage

Les particules se déplacent par roulement et glissent sur le fond et leurs vitesses sont inférieures à celle de l'écoulement.

- le transport solide en suspension

Les particules se déplacent avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide.

Il n'existe pas de délimitation nette entre ces deux modes de transport. A ces deux modes, s'ajoute un troisième mode intermédiaire qui est la saltation, où les particules se déplacent par des bonds, en alternant le charriage et la suspension (PROBST et BAZERBACHI, 1989). Le mode de transport dépend essentiellement de la taille du sédiment transporté.



**Figure 14:** Modes de transport solide (GRAF et ALTINAKAR, 2002)

#### 2-4-2-1. Transport solide par charriage

Le transport solide par charriage représente la progression de sédiments grossiers (sables, graviers, galets et blocs) de diamètre supérieur à 1 mm. Ils se déplacent par roulement ou glissement au voisinage immédiat du fond du cours d'eau et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace (GRAF et ALTINAKAR., 2002). Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont difficiles à mener en l'absence de bases de données. On se contente généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total (KOUASSI *et al.*, 2007). Pour quelques bassins versants le taux de charriage a été estimé à 12,5 % de la suspension (BODGE, 1999).

### **2-4-2-2. Transport solide en suspension**

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sable fins) de taille micrométrique. Ils sont maintenus en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement (BODGE, 1999). Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval. Le transport en suspension se fait par flottaison et ne comporte que très épisodiquement des retombées des sédiments sur le fond. La turbulence est le facteur principal de la suspension des sédiments.

### **2-4-3. Mécanismes généraux de la sédimentation**

#### **2-4-3-1. Sédimentation des particules détritiques**

Les phénomènes de sédimentation varient en fonction de la vitesse du courant. La granulométrie d'un sédiment est déterminée par les conditions hydrodynamiques du milieu au moment du dépôt. Dans les milieux estuariens, les actions hydrodynamiques sont relativement faibles. Il se produit le plus souvent des phénomènes de décantation et permet la chute lente des particules élémentaires et agrégats vers le fond, sans transport. Dans ce cas, les particules élémentaires sont soumises à trois forces : force de gravité (proportionnelle à la masse de la particule), poussée d'Archimède et force de viscosité (résistance opposée par le fluide au mouvement de la particule).

La décantation est le mode de séparation le plus fréquent des matières en suspension et des colloïdes. Lorsqu'une suspension décante sous conditions d'eau calme, les matériaux les plus gros atteignent le fond avant les plus fins. C'est pourquoi, dans les sédiments ainsi formés, on trouve les matériaux les plus grossiers à la base du dépôt, et les plus fins dans sa partie supérieure. C'est ce qu'on appelle le classement vertical progressif ou granoclassement vertical (DEGREMONT, 1989). Lorsque la sédimentation est affectée par des courants, au classement vertical s'ajoute un classement horizontal. Plus les matériaux mettent du temps à se déposer, plus ils sont entraînés au loin par la dérive.

#### **2-4-3-2. Sédimentation des colloïdes**

Lorsqu'à l'état désagrégé les particules transportées par les eaux courantes sont de dimensions subcolloïdales ou colloïdales, la décantation est complexe. Car à l'état individuel, ces particules se repoussent mutuellement à cause de leurs charges électriques en surface de même signe (négatif). Du fait de leur petit poids, ces particules peuvent être maintenues longtemps en suspension par les mouvements d'agitation du fluide. Dans ce cas, la

décantation ne survient qu'après une floculation, c'est-à-dire une agglomération des particules individuelles en agrégats de dimensions importantes.

Pour des particules de diamètres inférieurs à 0,004 mm, des phénomènes de floculation peuvent se produire et la vitesse de sédimentation dépend alors du taux de floculation (DHI, 2003). Ces variations de la floculation sont sous la dépendance de plusieurs paramètres dont la température, la concentration en matières en suspension, la teneur en matières organiques et l'agitation mécanique due aux turbulences (LE NORMANT, 1995 ; WOGNIN, 2004).

Les particules plus ou moins floculées ont des tailles et des vitesses de décantation variables. Lorsque la concentration est faible, la vitesse de chute augmente au fur et à mesure que les dimensions du floc s'accroissent. Il s'agit d'un phénomène de décantation diffuse. Cependant, pour des concentrations plus élevées, l'abondance de floccs crée une décantation d'ensemble freinée, c'est la décantation en piston (DEGREMONT, 1989).

Au regard de ces différents mécanismes, on remarque que les particules qui pénètrent dans le milieu estuarien sous forme dissoute ou particulaire peuvent s'incorporer aux sédiments. Elles peuvent être assimilées par les organismes aquatiques avant d'être évacuées à l'aval de l'estuaire.

## **2-5. IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIO-ECONOMIQUE DE LA FERMETURE DU GRAU DU COMOÉ**

L'ouverture du canal de Vridi, provoqua le déséquilibre dynamique entre le transit sédimentaire et la marée, le courant de chasse et la vidange de crue. La baisse des courants de chasse et le détournement des eaux en direction du canal de Vridi ont favorisé le colmatage définitif de ce grau, l'ensablement de la passe, le confinement du milieu et des problèmes d'inondations. En outre, la couverture du plan d'eau par les végétaux flottants entraîne une gêne du transport lagunaire, l'appauvrissement des eaux en oxygène, une baisse de l'activité touristique et des nuisances odorantes.

### *Qualité des eaux*

Depuis la fermeture de l'embouchure du fleuve Comoé, les polluants de diverses origines, véhiculés par les particules en suspension, affectent la qualité des eaux estuariennes et la vie aquatique.

Les particules fines qui renferment le plus souvent de fortes teneurs en éléments nutritifs (azote, phosphore) peuvent provoquer l'eutrophisation des estuaires et réduire les possibilités pour le développement des organismes aquatiques (VIVIER, 1972 ; RYDING et RAST,

1994). La décomposition de la matière organique (biomasse submergée et apports fluviaux) dans l'estuaire produit de nombreux gaz (méthane, hydrogène sulfureux, etc.). Ils peuvent avoir des effets néfastes sur la qualité de l'eau et sur la vie des organismes aquatiques (GALY-LACAUX *et al.*, 1996).

La pollution d'une retenue par les matières particulaires constitue un réel danger pour les organismes aquatiques ainsi que pour la population qui utilise l'eau pour ses besoins.

#### *Envahissement des végétaux flottants*

Sur le fleuve Comoé, l'envahissement du plan d'eau par les végétaux flottants, notamment la jacinthe d'eau du système lagunaire de la zone Ebrié-Aghien-Potou-Ono-Bas Comoé, est un facteur aggravant des effets pervers de la fermeture de l'embouchure sur les activités de pêche. De fait, les jacinthes d'eau privent de lumière les eaux des fleuves ou des lagunes. La privation d'air provoque la mortalité ou la réduction massive de la faune aquatique. Ces végétaux flottants gênent la navigation, l'usage des filets et l'accès aux casiers des fermes piscicoles. Outre la pêche, la navigation est perturbée. La masse des jacinthes d'eau ne permet pas le passage des embarcations. Il y a aussi les transports à longue distance qui sont arrêtés depuis des années. Il est impossible pour les habitants des villages d'utiliser les voies d'accès par pirogue pour arriver à leurs plantations (HAUHOUOT, 1997).

#### *Aspect économique*

La fermeture de l'embouchure du Comoé donne lieu à une modification de la répartition des poissons et des crustacés dans l'estuaire et les lagunes proches. En cas d'ouverture, pénètrent en lagune les espèces tolérant une montée du taux de salinité : Citons le hareng de lagune, la carpe blanche etc. Certaines ont un grand intérêt commercial. La diminution ou la perte de la population de certaines espèces aquatiques telles que les poissons et les crevettes affectent l'économie de certaines régions où la pêche représente l'une des principales activités économiques de la population. Ce sont autant de villages des sous-préfectures de Grand-Bassam, Bonoua et Alépé qui, depuis des années, voient leurs activités de pêche diminuées de rendement (HAUHOUOT, 1997). En outre, les populations sont obligées de faire de grands détours de 15 à 20 km par voie routière pour joindre les plantations lorsque, les végétaux flottants envahissent le plan d'eau lagunaire et donc rendent impossibles la navigation dans l'embouchure du Comoé.

## **Conclusion**

Les plages représentent les zones littorales directement exposées à l'action prépondérante des agents dynamiques du littoral. Tout comme ces agents dynamiques, elles sont aussi confrontées aux agents hydrodynamiques. Les matériaux, tout comme la morphologie des plages subissent un remaniement permanent. Le profil typique d'une plage sableuse comprend de la côte vers le large une zone terrestre, la plage proprement dite, l'avant plage et la zone de transition. L'estuaire du fleuve Comoé est soumis au régime terrestre, marin et lagunaire.

## **DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES**

## CHAPITRE 3. MORPHOLOGIE DE L'ESTUAIRE

Dans cette partie, sera abordé la présentation du matériel utilisé pour effectuer l'essentiel des travaux sur le terrain et au laboratoire. Un accent sera mis sur les outils utilisés dans le cadre du levé topographique et du levé bathymétrique.

### 3-1. MATERIEL

La navigation dans l'estuaire du fleuve Comoé a été effectuée à bord d'un hors-bord appartenant à des particuliers. Elle possède un faible tirant d'eau, ce qui permet des prélèvements dans les eaux peu profondes (de l'ordre de 1 m).

Un GPS portatif, modèle GARMIN GPS 40 a été utilisé pour déterminer les coordonnées géographiques des points sur l'estuaire. Ce système de positionnement se présente sous la forme d'une constellation de 24 satellites dont 21 satellites principaux en service et 3 satellites de réserves (KOUASSI, 2002). Le GPS arrive à capter au moins quatre de ces satellites en tout point de la terre et donne des coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude).

Pour effectuer les profils de plage, un théodolite a été utilisé (photo 4). Il permet de visualiser sur une mire les différentes positions choisies.



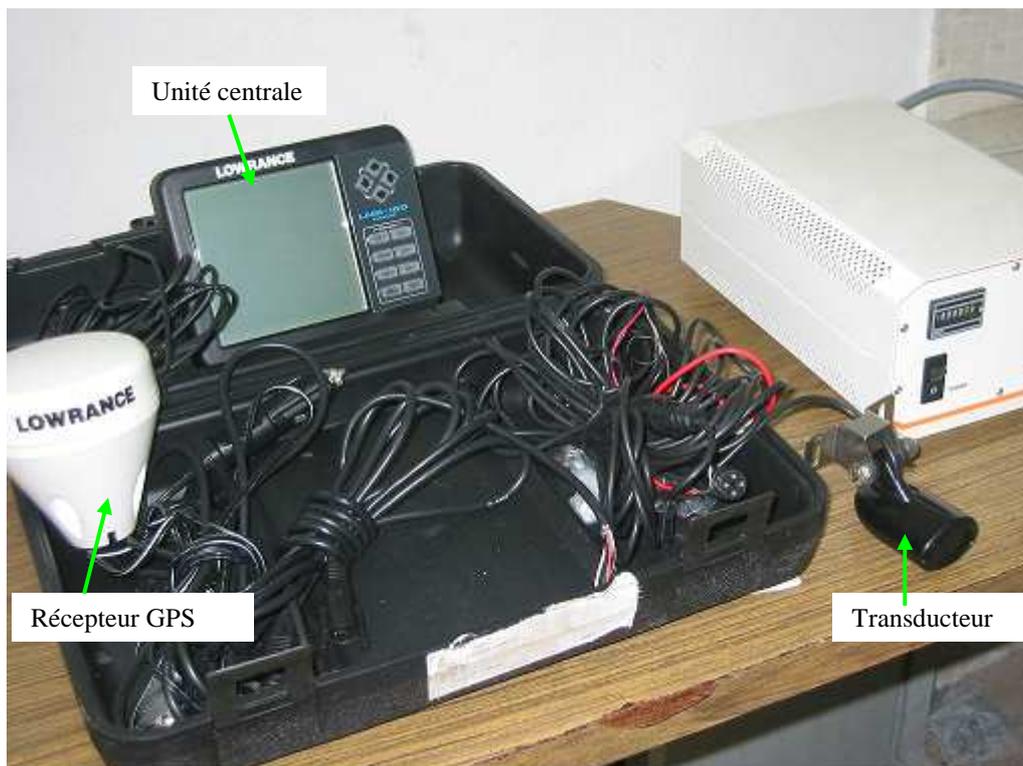
**Photo 4 :** Dispositif du levé topographique de la plage

Pour suivre l'évolution de la morphologie de l'estuaire du fleuve Comoé, il a été effectué des levés bathymétriques. Le levé bathymétrique consiste à mesurer les profondeurs du plan d'eau. Cette opération a été réalisée au moyen de l'échosondeur de modèle Lowrance, LMS-160 (photo5). Cet appareil est constitué de trois parties :

\* un transducteur qui est l'un des principaux éléments d'un équipement de détection acoustique. Il convertit l'énergie électrique en énergie acoustique pendant l'émission et inversement, lorsqu'il reçoit un écho, le convertit en signaux électriques ;

\* un récepteur GPS qui donne de façon continue les coordonnées géographiques du point de mesure ;

\* une unité centrale reliée aux autres composantes et à une batterie de 12 volts émet, reçoit et convertit les signaux analogiques en données numériques.



**Photo 5:** Echosondeur de type Lowrance, LMS-160, utilisé pour les levés bathymétriques du fleuve Comoé

Les cartes du bassin versant du Comoé au 1/50.000 et 1/200.000 ont été réalisées par le CCT (Centre de cartographie et de Télédétection).

## 3-2. METHODES D'ETUDES

### 3-2-1. Morphologie de la plage

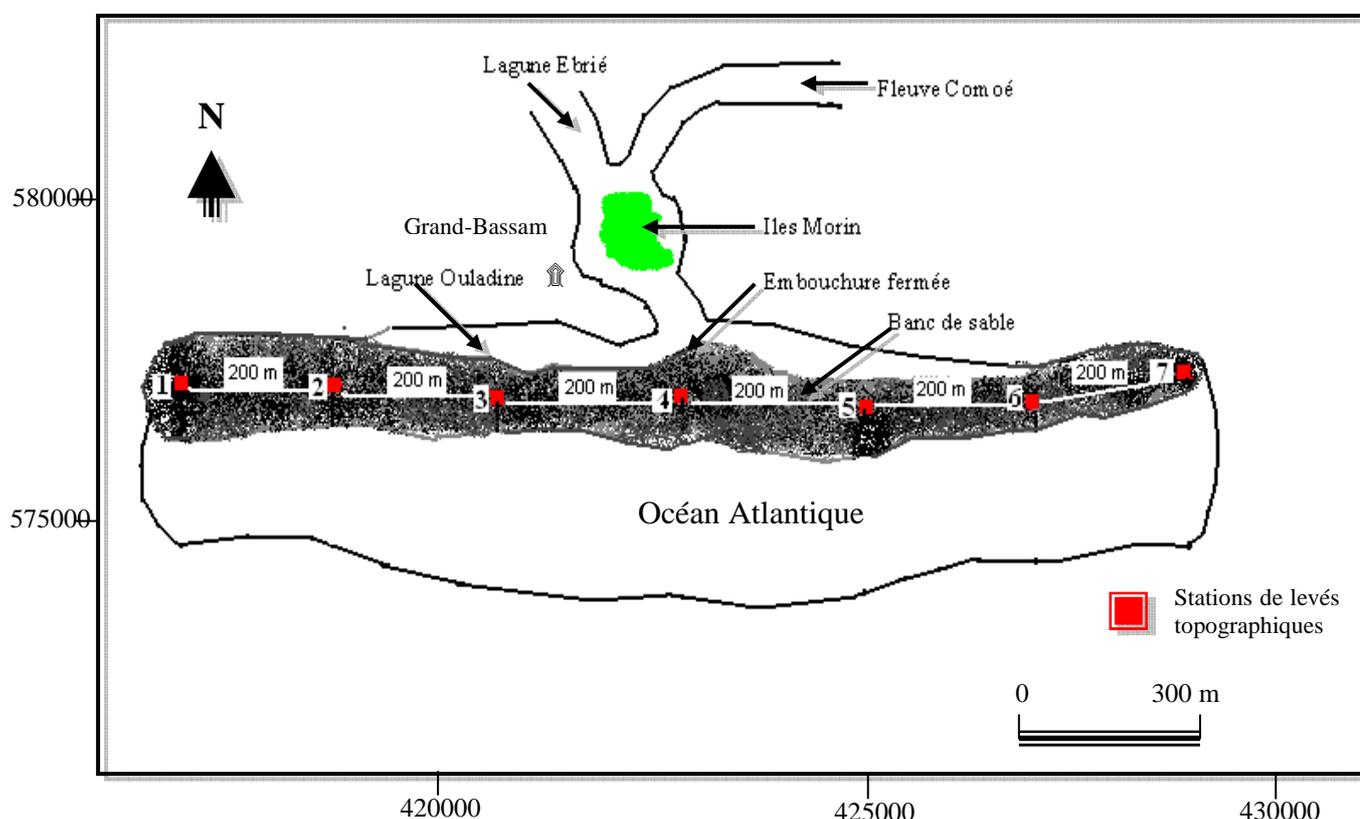
L'objectif visé est de déterminer la quantité de sable engraisé ou érodé sur un cycle saisonnier. Les travaux menés dans ce cadre se scindent en deux parties :

- le levé topographique sur le terrain ;
- le tracé et la superposition des profils

### 3-2-1-1. Levé topographique sur le terrain

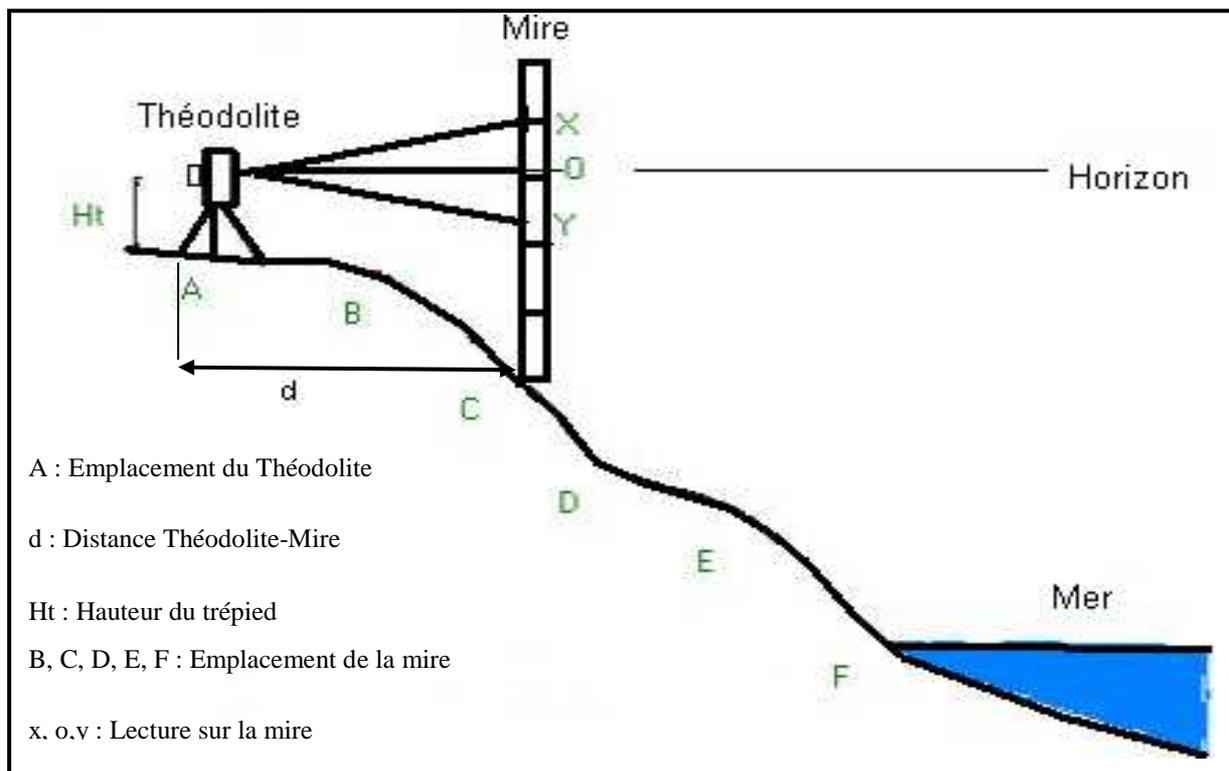
Les levés topographiques ont été effectués à l'aide d'un théodolite et d'un trépied associé à une mire. Les levés ont été réalisés sur sept (7) profils de part et d'autre de l'embouchure. Les points de mesure sont choisis de façon équitable de part et d'autre de l'embouchure, dont trois points de mesure à l'Est de la passe, trois à l'Ouest et un sur le lit principal du fleuve à l'embouchure (figure 15). En raison de la morphologie moins accidentée de la plage, le pas de mesure entre deux stations consécutives a été fixé à 200 m. Les points de mesure matérialisés par des objets fixes (cocotier, maison..) et leurs coordonnées obtenues par un GPS. A chaque station, les coordonnées géographiques sont relevées.

Le levé consiste à déterminer à partir d'un repère fixe sur le haut estran, les distances et les altitudes de certains points en progressant vers la mer (figure 16).



**Figure15:** Répartition des stations de mesure et d'échantillonnage à l'embouchure du fleuve Comoé

Le principe consiste à poser verticalement le théodolite sur le trépied au point de mesure où point zéro. Ce point sert à viser la mire qu'on déplace de proche en proche sur les points caractéristiques du profil. Trois lectures sont effectuées (la valeur élevée x, la valeur moyenne o et la valeur basse y).



**Figure16:** Schéma d'utilisation du théodolite

A chaque profil, on mesure la hauteur (Ht) du trépied du sol jusqu'à la lunette. Elle permet de calculer la hauteur (H) correspondant à l'élévation du point visé puis la distance (D) entre le point de mesure et la mire. Les formules suivantes sont utilisées.

$$D = (x - o) + (o - y) \dots \dots \dots (3.1)$$

$$H = Ht - o \dots \dots \dots (3.2)$$

La fiche de description des mesures de terrain se présente comme suit (tableau IV) :

**Tableau IV:** Fiche de description de l'embouchure du fleuve Comoé

| Points de mesure  | 1      | 2   | 3   |
|-------------------|--------|-----|-----|
| <b>Paramètres</b> |        |     |     |
| <b>x</b>          | 139.50 | 337 | 441 |
| <b>y</b>          | 122,50 | 239 | 370 |
| <b>o</b>          | 131,00 | 288 | 365 |
| <b>X=x-o</b>      | 8,50   | 49  | 76  |
| <b>Y=o-y</b>      | 8,50   | 49  | 76  |
| <b>D=X+Y</b>      | 17,00  | 98  | 102 |
| <b>Ht (cm)</b>    | 157,00 | 153 | 157 |
| <b>H=Ht -o</b>    | 26,00  | 135 | 231 |

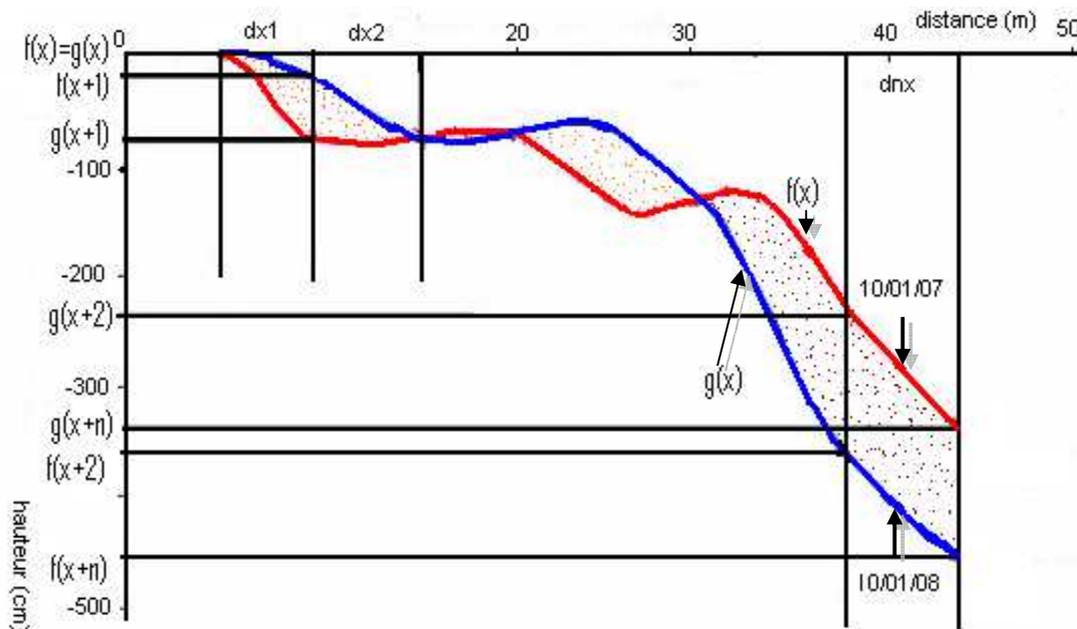
1 ; 2 ; 3 représentent les points de mesure consécutifs d'un radial sur la plage

### 3-2-1-2. Le tracé des profils

Les résultats obtenus pour chaque position permettent de tracer les profils de plage à une date donnée. Ils sont tracés à l'aide du logiciel Excel avec en abscisse la distance D (m) et en ordonnée la hauteur Z (cm). On superpose ensuite deux à deux les profils sur un même graphique pour déduire la tendance évolutive de la plage. Un profil a été réalisé pendant les mois caractéristiques de chaque saison.

### 3-2-1-3. Calcul des surfaces d'érosion et d'engraissement

La méthode des moindres carrés appliquée aux trapèzes et aux triangles a été utilisée pour déterminer les surfaces d'érosion et d'engraissement. La représentation de deux profils réalisés à une même station durant deux périodes différentes permet de définir des surfaces triangulaires et trapézoïdales (figure 17). Soit  $f(x)$  et  $g(x)$  deux fonctions associées aux profils de plage sur différentes périodes avec  $f(x)$  étant le profil récent et  $g(x)$  le profil ancien.



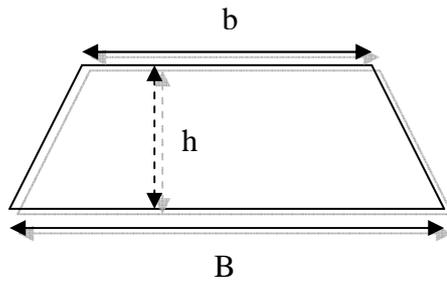
**Figure17:** Méthode des moindres carrés appliquée aux profils de plage

### Méthode de calcul de surface d'un trapèze

L'axe des abscisses est subdivisé en plusieurs segments de dimension  $dx$  en tenant compte de la surface délimitée par les deux profils. Ces droites découpent la surface entre les courbes en plusieurs trapèzes.

$$dx = x_n - x_{n-1} \dots\dots\dots (3.3)$$

Pour une surface trapezoidale (figure 18)



**Figure 18:** Schéma d'un trapèze

on a :

$$s = \frac{(B + b) \times h}{2} \dots\dots\dots(3.4)$$

B : grande base du trapèze ; b : petite base du trapèze ; h : hauteur du trapèze

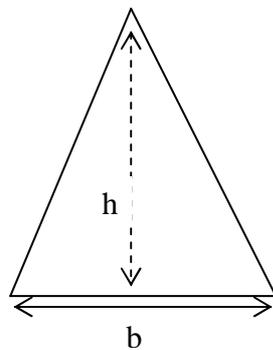
S : surface du trapèze

La surface délimitée par les deux profils se calcule de la manière suivante :

$$S = \frac{([ f(x) - g(x) ] + [ f(x+n) - g(x+n) ] ) \times dx}{2} \dots\dots\dots(3.5)$$

**Méthode de calcul de surface d'un triangle**

L'axe des abscisses est subdivisé en plusieurs segments de dimension dx en tenant compte de la surface délimitée par les deux profils. Ces droites découpent la surface entre les courbes en plusieurs triangles. Pour une surface triangulaire (figure 19)



**Figure 19 :** Schéma d'un triangle

on a :

$$s = \frac{b \times h}{2} \dots\dots\dots(3.6)$$

b : base du triangle ; h : hauteur du triangle ; S : surface du triangle

La surface délimitée par les deux profils se calcule de la manière suivante :

$$S = \frac{(f(x+n) - g(x+n)) \times dx}{2} \dots\dots\dots(3.7)$$

Le planimétrage de la surface délimité entre les profils superposés permet de faire la somme des surfaces positives et celles des surfaces négatives.

La surface positive traduit l’engraissement (+) et la surface négative une érosion (-).

### 3-2-1-4. Calcul des volumes de sable érodé et engraisé

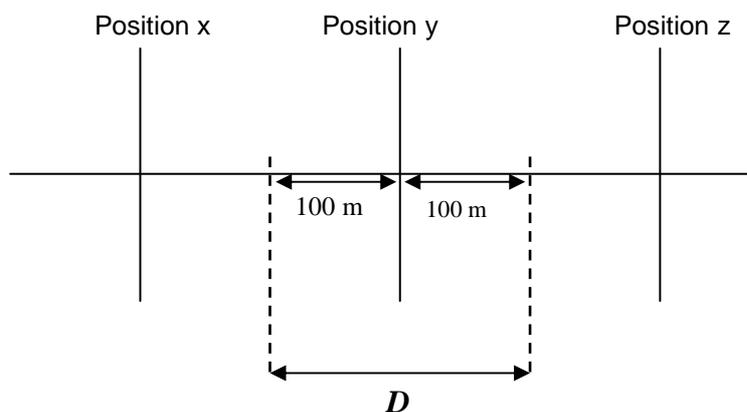
Le volume de sable érodé ou apporté à la côte entre deux périodes distinctes est déterminé par la formule suivante (WOGNIN *et al.*, 2008):

$$V = \sum S \times D \dots\dots\dots (3.8)$$

V (m<sup>3</sup>) : volume de sable érodé ou apporté.

S (m<sup>2</sup>) : surfaces érodées ou engraisées en mètre carré linéaire.

D (m) : somme des demi-distances de la position considérée aux positions voisines (figure 20) avec D= 200 m (D = 100 m + 100 m = 200 m).



**Figure 20:** Principe de détermination de la distance D

Une appréciation des volumes déplacés (érosion ou engraissement) dans l’estuaire a été effectuée entre le premier levé (février 2005) et le deuxième (juin 2007). Les cartes topographiques réalisées pour établir la morphologie de la zone pour ses deux périodes seront utilisées. La coregistration et la circonscription de la zone d’étude ont été effectuées à l’aide du logiciel ArcView 3.2. Ce logiciel permet d’évaluer, les variations des cotes du fond ainsi que les volumes de sédiments déposés ou érodés. Pour y parvenir, nous avons transformé les isobathes en courbes de niveau en utilisant la cote du plan d’eau (1,14 m) lors des relevés bathymétriques comme plan de référence.

## **3-2-2. Morphologie de l'estuaire**

### **3-2-2-1. Levé bathymétrique**

Des levés bathymétriques ont été effectués à l'aide de l'échosondeur Lowrance, LMS-160. Le levé a consisté à mesurer les différentes profondeurs de la colonne d'eau. Avant la campagne de mesure, nous avons procédé à l'étalonnage du GPS de l'échosondeur à partir du point géodésique RGIR001 au CCT, à Abidjan. Les sondages ont été réalisés avec une fréquence de 160 kHz, ce qui permet aux signaux émis de ne pas pénétrer les vases (LOWRANCE, 1998). Les sondes obtenues représentent ainsi la mesure entre la position du transducteur de l'échosondeur et l'interface eau-sédiment. Les radiales, séparées d'une distance de 1 km, ont été orientées suivant deux directions principales (figure 22). Le premier groupe de radiales est de direction E-W et le second groupe, de direction N-S.

### **3-2-2-2- Traitement des données d'échosondage**

Ce travail consiste à la correction de sondes et à l'élaboration de la carte bathymétrique.

#### **- Corrections de sondes**

Les sondes ont été mesurées et la lecture faite directement sur l'écran de l'unité centrale. Les corrections sont effectuées afin de déterminer la profondeur réelle à chaque point. Ces corrections concernent la profondeur d'immersion du transducteur et la marée dynamique. A chaque point, la sonde réelle est obtenue après avoir ajouté, à la profondeur affichée, la profondeur d'immersion du transducteur, plus ou moins le marnage.

$$S_r = P_e + P_{it} \pm M$$

Avec :

$S_r$  : Sonde réelle

$P_e$  : Profondeur sur l'échosondeur

$P_{it}$  : Profondeur d'immersion du transducteur

$M$  : Marnage

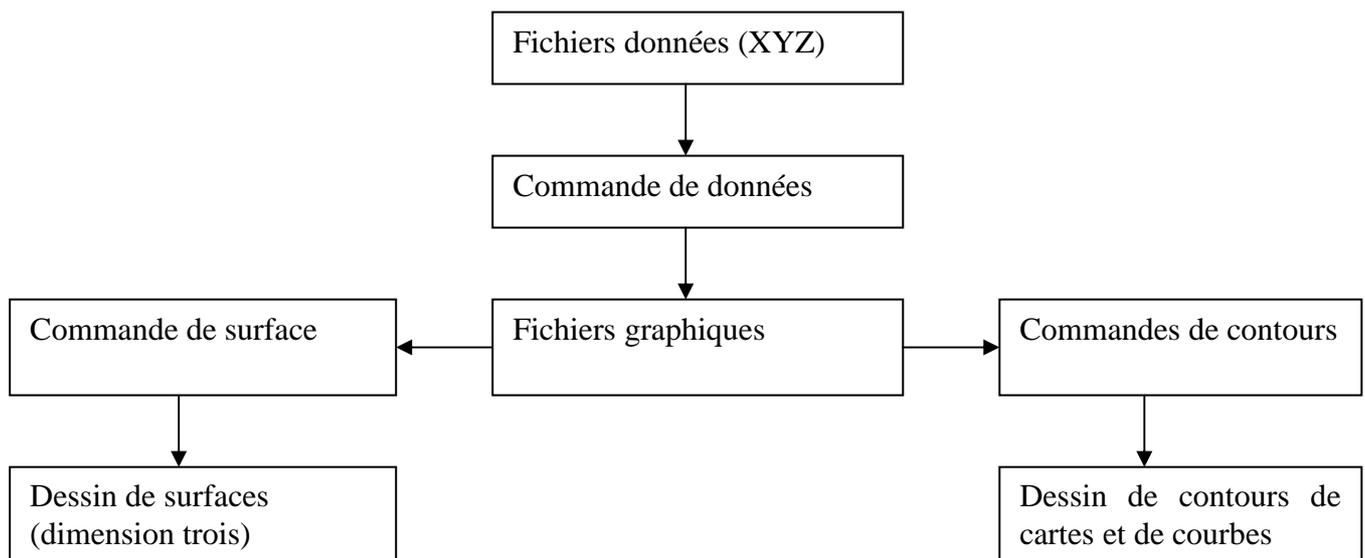
Après correction, les données de sonde sont traitées et analysées à l'aide des logiciels de cartographie (Surfer, Windig et Mapinfo). Ils permettent de tracer des contours de cartes, des courbes d'isovaleurs dans un plan et des cartes 3D de l'estuaire du fleuve Comoé.

#### **- Elaboration de la carte bathymétrique**

Les Cartes bathymétriques ont été élaborées au moyen du logiciel de cartographie "Surfer" qui est un programme écrit par Golden Software Inc. La version 8.02 a été utilisée

pour le traitement des données. Ce logiciel fonctionne sur Microsoft windows. Il permet de tracer des contours de cartes, des courbes d'isovaleurs dans un plan et de dessiner des cartes en trois dimensions (3D ou blocs diagrammes). "Surfer" procède par interpolation pour la construction des documents à partir des fichiers de données, rangées en colonne à l'aide d'un tableur. Pour ce travail, les données sont contenues dans trois colonnes : X représente la longitude du point de sonde ; Y la latitude du point de sonde et Z la valeur de la profondeur corrigée de la sonde (N'GUESSAN, 2008). "Surfer" dispose de quatre types de fichiers :

- les fichiers de "données" (*data files*) : ils contiennent les données X, Y et Z rangées en colonnes. Leur extension est [.DAT]. Ils ont été créés à l'aide du tableur "Excel.4". Ces fichiers servent à produire les fichiers "graphiques" et positionner les points de mesures sur les cartes et les blocs diagrammes ;
- les fichiers "graphiques" (*grid files*), d'extension [.GRID] : ils permettent de décider de l'algorithme mathématique à utiliser pour l'interpolation (interpolation linéaire, triangulation...). Ils décident du pas d'échantillonnage et construit la grille ;
- les fichiers de "contours" (*boundary file*) : ils créent les contours à partir des fichiers GRID et permettent l'amélioration de ces contours par lissage ou non ;
- les fichiers de type "Surfer" d'extension [.SRF], permettent de sauvegarder tous les éléments et tous les travaux effectués (cartes et blocs diagrammes) sur "Surfer". La figure 21 présente les relations entre les fichiers et les commandes sur "Surfer".



**Figure 21:** Type de relations entre fichiers et commandes sur le logiciel "Surfer"

L'établissement des cartes bathymétriques de la zone d'étude (estuaire du Comoé) au moyen de "Surfer 8.02" consiste à créer des fichiers graphiques à partir des fichiers de données (longitude, latitude, profondeur).

"Surfer" 8.02 offre plusieurs méthodes d'interpolation à partir des fichiers de données (XYZ). Les différences entre ces méthodes d'interpolation sont liées à l'algorithme mathématique utilisé. Ainsi, chaque méthode donne une représentation différente des autres à partir d'un même fichier de données.

Le choix de la méthode est fonction du type de données et de la morphologie de la zone. Dans notre étude, nous avons testé toutes les méthodes. Les données de ce travail étant très nombreuses, la méthode de krigeage apparaît la mieux indiquée pour leur interpolation.

Sur le tableur "Excel.4" les fichiers de "données" sont créés, afin de les exporter sur "Surfer" lors de l'élaboration proprement dite des cartes bathymétriques. "Surfer" dispose d'une grille de points régulièrement répartis. A chaque point de cette grille, est affectée une valeur de la variable calculée à partir des valeurs originelles du fichier de données. Le logiciel construit ainsi les cartes par interpolation à partir des valeurs mesurées sur le terrain. Par exemple, entre deux sondes mesurées, il calcule des sondes par interpolation.

A l'aide de certaines commandes proposées par "Surfer" comme "Recherche", "anisotropie" et autres, les extrapolations énormes ont été corrigées. Ainsi, des cartes bathymétriques correspondant à une zone donnée sont réalisées.

## **Conclusion**

Cette étude a permis de quantifier le volume de sédiment engraisé ou érodé à l'aide du logiciel Arc-View. Le traitement des données a surtout été effectué à l'aide du logiciel Surfer. La réalisation de profils morphologiques a été effectuée à l'aide d'Excel.

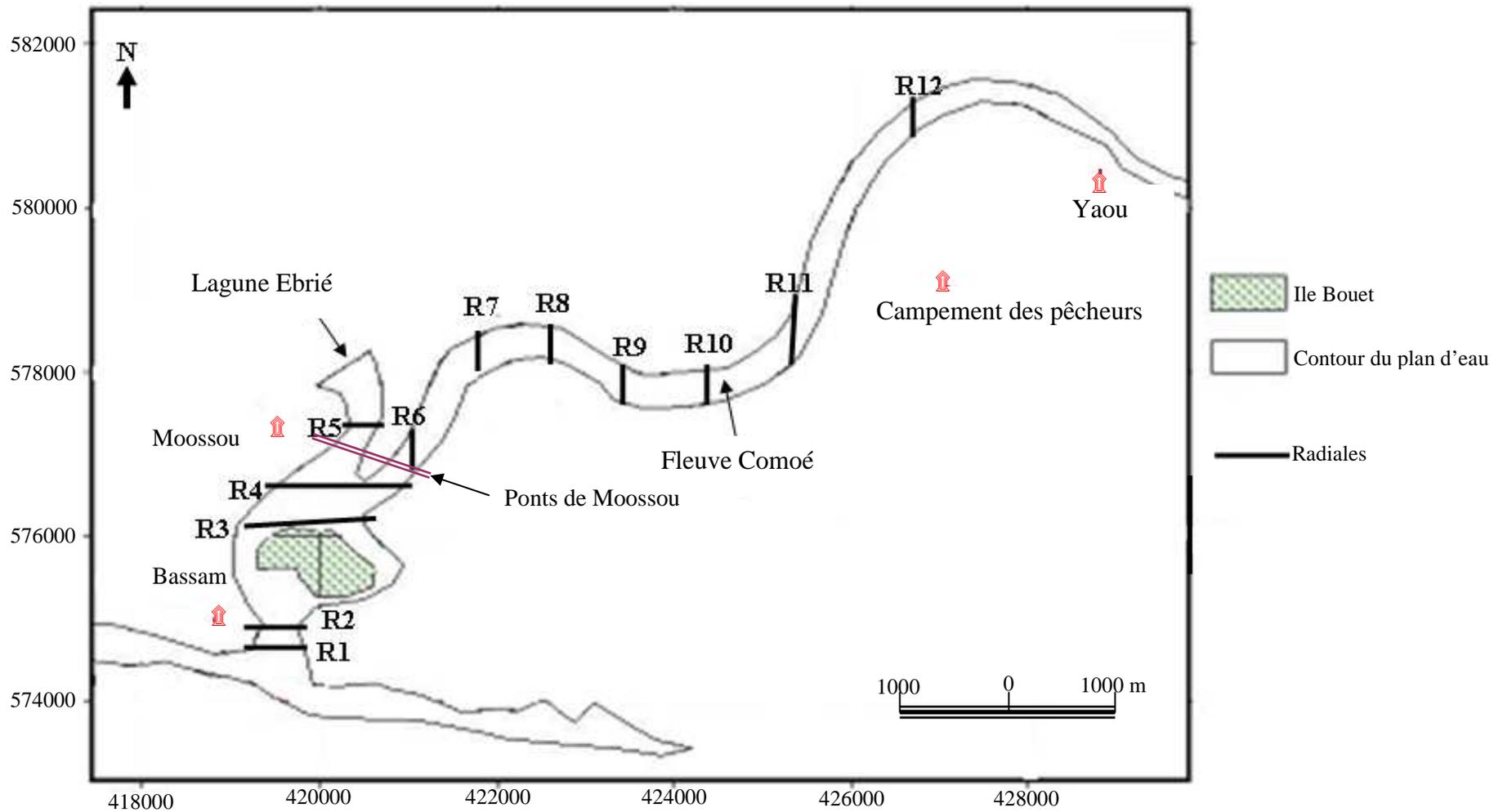


Figure 22: Plan de position des radiales à l'estuaire du fleuve Comoé

## CHAPITRE 4. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CIMIQUES DE L'ESTUAIRE

Nous présenterons dans ce chapitre, le matériel et les méthodes d'acquisition des différents paramètres ainsi que les méthodes de traitement utilisées pour caractériser les paramètres physico-chimiques de l'eau.

### 4-1. MATERIEL UTILISE

Les prélèvements d'eau ont été effectués à l'aide d'une bouteille hydrologique puis conditionnés dans des flacons étiquetés en vue de déterminer la concentration en matière en suspension. Les paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH, la salinité, le potentiel redox et la conductivité ont été mesurés in situ au moyen d'une sonde multiparamètre de marque W.T.W. 82362. Un oxymètre, modèle CRISON OXi 330, a également permis de mesurer in situ la teneur en oxygène dissous. La turbidité a été déterminée au laboratoire avec un turbidimètre de marque HANNA, modèle LP 2000.

Les photos 6 et 7 présentent l'essentiel des appareils utilisés pour effectuer les travaux sur le terrain.



**Photo 6:** Turbidimètre utilisée pour mesurer la turbidité de l'estuaire du fleuve Comoé



**Photo 7 :** Bouteille hydrologique utilisée pour les prélèvements d'eau du fleuve Comoé

## 4-2. METHODES UTILISEES

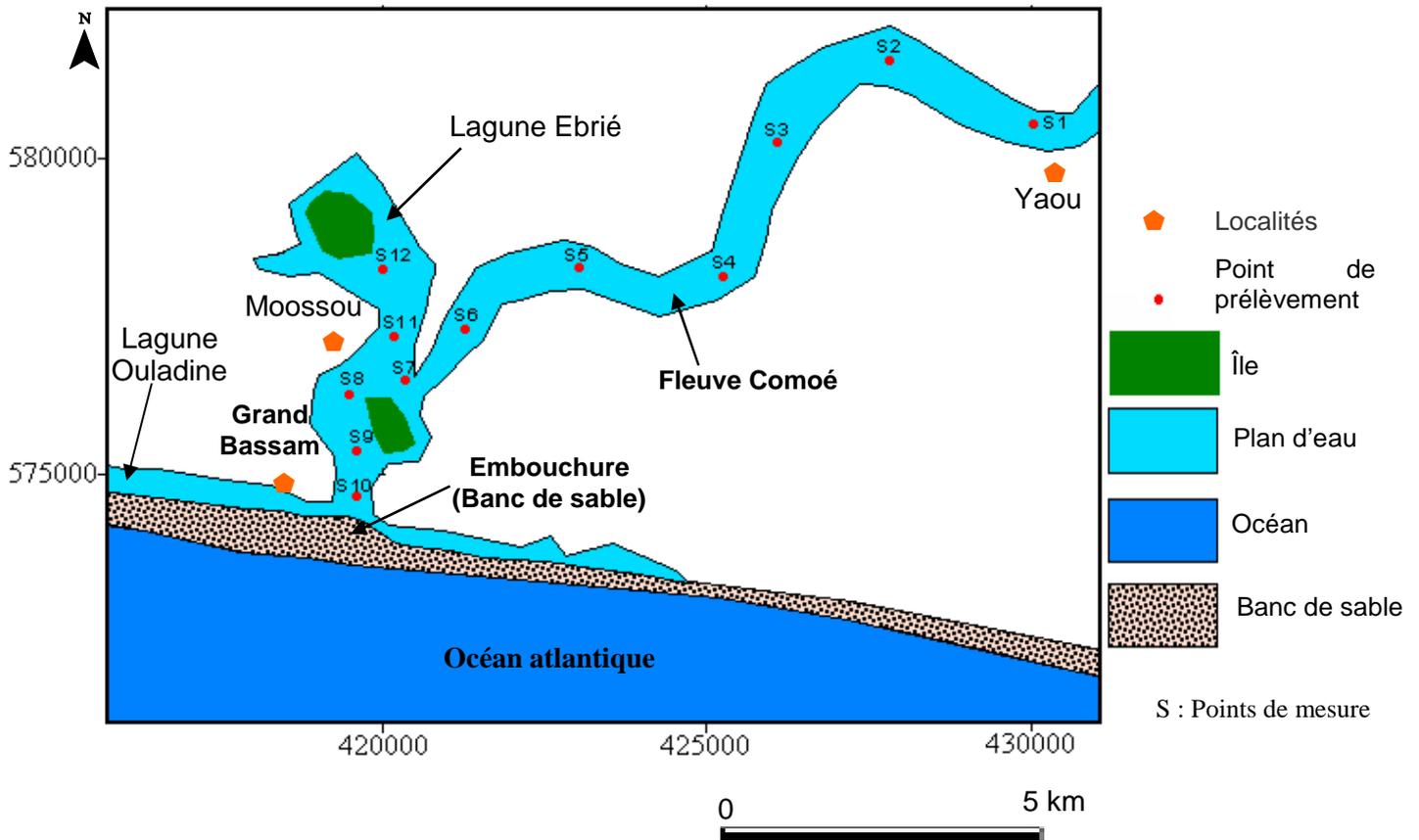
### 4-2-1. Prélèvements et technique d'étude des paramètres physico-chimiques

Les prélèvements d'eaux ont été effectués sur deux cycles saisonniers entre 2005 et 2007. Ils ont été réalisés de façon hebdomadaire pendant les mois caractéristiques des quatre saisons hydrologiques. Ainsi, des échantillonnages ont eu lieu pendant les mois de février, juin, août et octobre. Ces mois correspondent respectivement à la grande saison sèche, la grande saison des pluies, la petite saison sèche et la petite saison des pluies. Sur le terrain, 1344 échantillons d'eau ont été prélevés en raison de 168 échantillons par saison sur 13 stations de mesure (figure 23). La profondeur maximum du fleuve étant 14 m, les échantillons d'eau ont été prélevés à 0,5 ; 2 ; 5 et 10 m en vue de conserver une certaine homogénéité. Les mesures de température, de pH, de conductivité, du potentiel d'oxydo-réduction et de salinité ont été effectuées *in situ* au moyen d'une sonde multi-paramètres de modèle W.T.W. 82362. L'oxygène dissous et la turbidité ont également été mesurés sur le terrain respectivement avec un oxymètre portatif, modèle CRISON OXi 330 et un turbidimètre HANNA, modèle LP 2000.

Au laboratoire, les échantillons d'eau destinés à la mesure des concentrations en matières en suspension ont été filtrés sur une rampe millipore à l'aide de filtres WHATMAN GF/F circulaires de 47 mm de diamètre et de porosité 0,45  $\mu\text{m}$  préalablement pesés. Après séchage à l'étuve à 105°C pendant deux heures, les filtres sont soigneusement récupérés et pesés à nouveau afin de déterminer les concentrations totales de matières en suspension (AFNOR, 1996).

Les résultats obtenus ont été représentés selon un gradient longitudinal et un gradient vertical. De l'amont vers l'aval (embouchure), la dynamique des différents paramètres physico-chimiques a été observée au niveau des 13 stations séparées d'environ 1 km.

La figure 23 présente la localisation des treize (13) station (S). Toutefois, la treizième station, S<sub>13</sub>, qui correspond à la station située dans le village de Yakassé-Comoé, n'apparaît pas sur cette carte.



**Figure 23:** Carte de prélèvement des échantillons d'eau dans l'estuaire du fleuve Comoé

#### 4-2-2. Evaluation des flux solides en suspension

La charge solide annuelle de l'estuaire du fleuve Comoé a été obtenue à partir de la moyenne des concentrations des échantillonnages saisonniers. A partir des valeurs de la concentration des MES obtenues et celles du débit liquide disponibles, le débit solide en suspension a été évalué de la manière suivante :

$$Q_{SS} = Q_L \cdot C \dots \dots \dots (4.1)$$

Avec :

$Q_{SS}$  : Débit solide en suspension (kg/s),

$Q_L$  : Débit liquide ( $m^3/s$ ),

$C$  : Concentration moyenne de matières en suspension (g/L).

Pendant un intervalle de temps  $\delta t$  correspondant à la durée totale de la saison, on déduit les apports solides saisonniers ( $A_S$  en kg) en posant :

$$A_S = Q_{SS} \cdot \delta t \dots \dots \dots (4.2)$$

Le flux annuel des matières solides en suspension transportées par le fleuve dans l'estuaire du fleuve Comoé est finalement obtenu en additionnant les apports solides des quatre saisons.

### **4-2-3- Analyse en Composantes Principales (ACP)**

Nous avons soumis tous les paramètres physico-chimiques mesurés dans l'estuaire du fleuve Comoé à une analyse en composantes principales, afin de déduire les paramètres les plus caractéristiques. L'analyse en composante principale ou ACP, est une méthode de réduction du nombre de variables permettant la représentation géométrique des observations et des variables. Cette réduction n'est possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls (BOUROCHE et SAPORTA, 1980).

Cette méthode géométrique a pour objet la description des données contenues dans un tableau individus-caractères numériques où le nombre de caractères est mesuré sur le nombre d'individus  $n$ . Nous procédons d'abord à la transformation des données initiales et au calcul d'une matrice de corrélation des variables. La méthode a été appliquée à l'estuaire du fleuve Comoé et à neuf (9) variables. Les variables utilisées sont : le pH, la température, la turbidité, l'oxygène dissous, la conductivité, la salinité, le potentiel redox, la concentration en matière en suspension, la profondeur.

### **Conclusion**

Ce travail révèle les différentes techniques utilisées dans la caractérisation des paramètres physico-chimiques. Il permet d'évaluer les flux particuliers en suspension dans l'estuaire du fleuve Comoé. C'est donc une étude préparatoire pour l'établissement de la carte bathymétrique de l'estuaire.

## CHAPITRE 5 : ANALYSE DES SEDIMENTS ESTUARIENS

Cette partie contient d'une part le matériel utilisé pour l'acquisition des données sédimentologiques et d'autre part la méthodologie mise en œuvre pour mener nos différentes études.

### 5-1. MATERIEL UTILISE

Un ensemble de tarières et une benne Van Veen ont permis de prélever les échantillons de sédiments. La benne à mâchoire est un instrument de prélèvement ponctuel de sédiment. L'objectif est de ramener une quantité suffisante de sédiments pour effectuer des analyses granulométriques en laboratoire.

Le séchage et la pesée des échantillons ont été effectués respectivement au moyen d'une étuve de modèle ECOCELL 111 et une balance électronique Sartorius BP 610 de précision 0,1 mg. Une tamiseuse vibrante de modèle D407-020 et une colonne de seize tamis AFNOR ont été utilisées pour tamiser les sables. Un banc de filtration et des filtres WHATMAN GF/F ont été utilisés pour la détermination des charges solides en suspension. Les photos 8 et 9 présentent l'essentiel des appareils utilisés pour effectuer les travaux au laboratoire.



**Photo 8 :** Benne Van Veen utilisée pour les prélèvements de sédiments de l'estuaire du fleuve Comoé



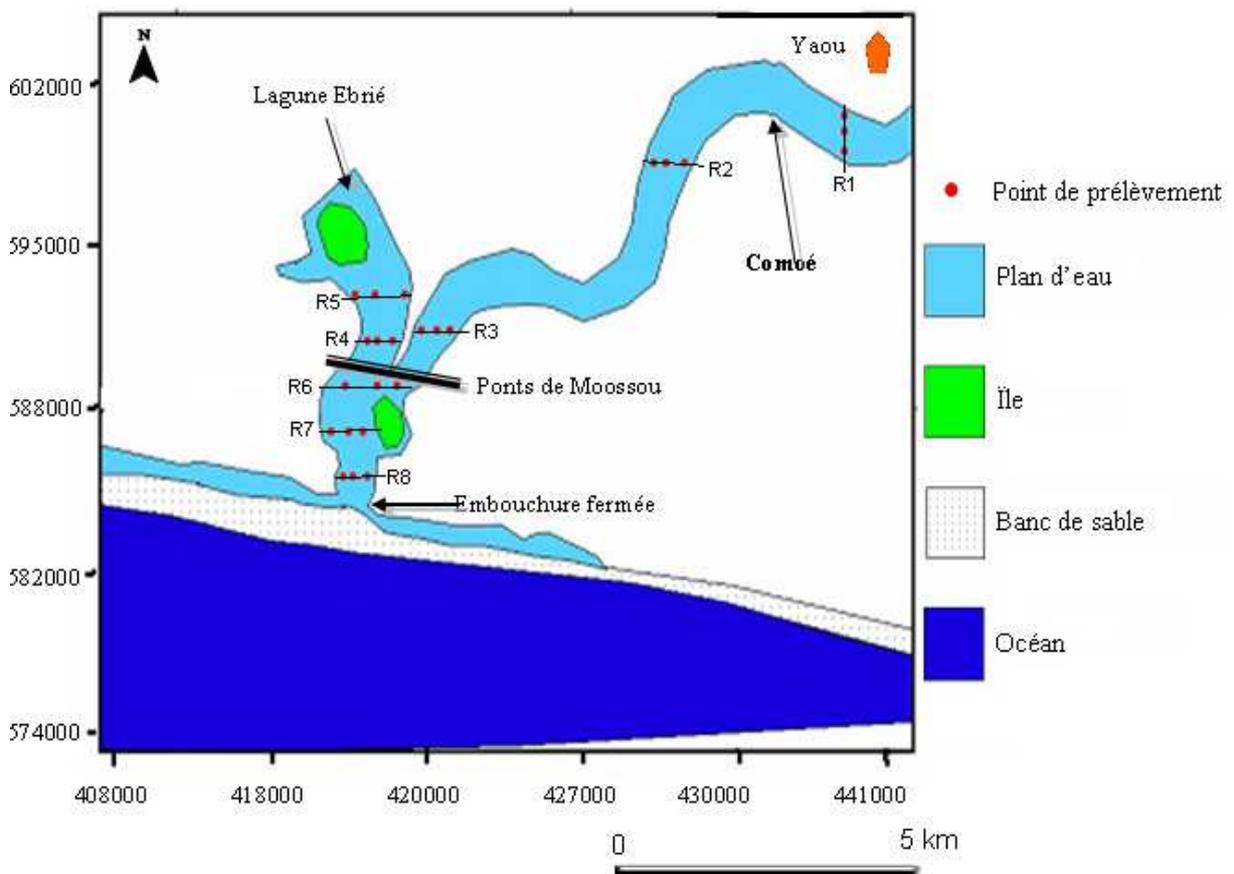
**Photo 9 :** Colonne de tamis montée sur la tamiseuse

### 5-2. METHODES UTILISEES

#### 5-2-1. Technique d'étude des sédiments

L'échantillonnage des sédiments de surface a été réalisé en juin 2006 et octobre 2007 pendant les mois caractéristiques de chaque saison. On dénombre huit (8) stations de mesure avec trois

points d'échantillonnage chacun (deux sur les rives, et un dans le chenal principal du fleuve). Ce choix permet de suivre latéralement la répartition des sédiments d'une rive à l'autre. On dénombre 8 radiales de direction E-W et N-S d'une rive à une autre (figure 24). Ainsi, sur l'ensemble de l'estuaire, 48 échantillons ont-ils été prélevés à la benne Van Veen. Ce type de prélèvement (à la benne Van Veen) a l'avantage de remonter à la surface des sédiments non lessivés. Quelques échantillons ont été prélevés par des prises directes au niveau des petits fonds ou sur les berges dénudées. Les échantillons ont été conditionnés dans des sachets plastiques numérotés et conservés à température ambiante.



**Figure 24:** Carte des points de prélèvement de sédiment à l'embouchure du fleuve Comoé

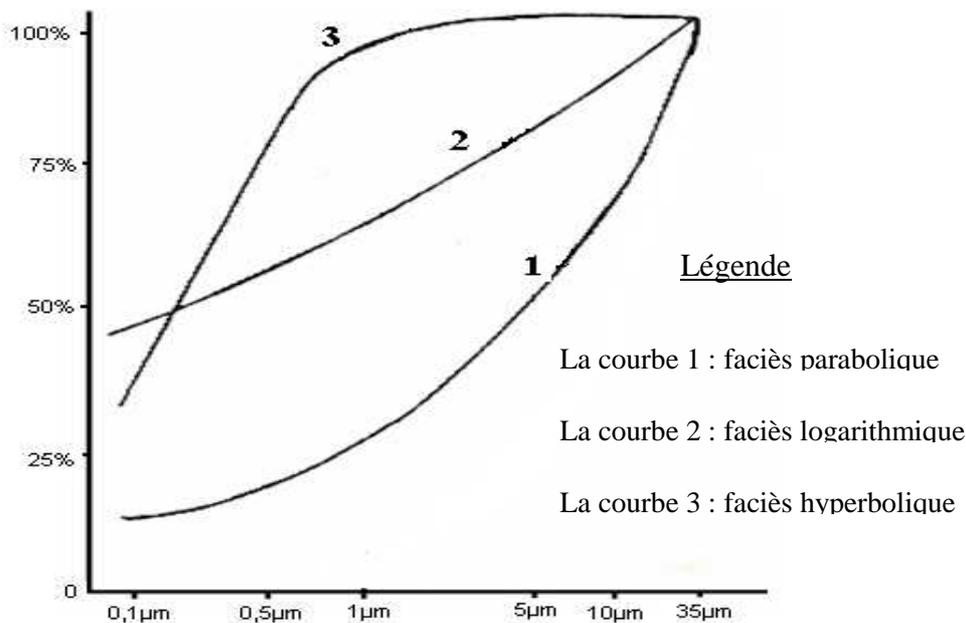
Des prélèvements de sable ont été faits manuellement au bas-estran (échantillon BE), au mi-estran (échantillon ME) et au haut-estran (échantillon HE) dans sept stations. L'étude sédimentologique a été réduite à la caractérisation des échantillons (96 au total) à travers leur granulométrie.

### 5-2-1-1. Analyse granulométrique des sédiments

Les sédiments prélevés ont fait l'objet d'une description visuelle et tactile dans une première phase. Il s'agit de préciser pour chaque échantillon sa couleur, sa nature lithologique, la

présence ou non de débris animaux et/ou végétaux, l'estimation tactile de l'abondance et le type de grains de sable présents dans le sédiment. Dans une seconde phase, les sédiments ont été soumis à une analyse granulométrique classique à sec dont la démarche a consisté à prélever une fraction supérieure à 150 g sur chaque échantillon à l'aide d'une balance électronique. L'échantillon ainsi prélevé est séché à l'étuve à 105°C et pesés à nouveau pour déterminer sa teneur en eau. Il est ensuite lavé à l'eau douce pour éliminer les silts (fraction granulométrique inférieure à 63 µm). L'échantillon est remis à l'étuve à 105°C puis pesé afin de déterminer la fraction inférieure à 63 µm. La matière organique contenue dans l'échantillon est éliminée en l'attaquant à l'eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) à 30 %. L'échantillon est ensuite lavé à l'eau douce et remis à l'étuve à 105°C puis pesé pour déterminer la teneur en matière organique. Par ailleurs, si l'échantillon contient des débris coquilliers, il est attaqué à l'acide chlorhydrique (HCl) à 50 %, lavé à l'eau douce et remis à l'étuve à 105°C puis pesé pour déterminer la teneur en carbonate. La quantité nécessaire de sable pour un bon tamisage est d'environ 100 g (SAAIDI, 1991). Pour ce faire, 150 g de sédiment sont prélevés par échantillons afin qu'après lavage on puisse encore avoir 100 g de sable à tamiser. Le tamisage permet de mesurer l'épaisseur et la largeur du grain, la longueur n'intervient pas. Les sables ont été tamisés au moyen d'un agitateur à colonne vibrante. Le sédiment est placé au sommet d'une série de 16 tamis AFNOR superposés dans l'ordre des mailles de tailles décroissantes. Les dimensions des mailles sont comprises entre 63 µm et 5 mm. Après agitation, on pèse le refus de chaque tamis. On en déduit le pourcentage en poids de chaque classe dimensionnelle par rapport à l'échantillon de départ. Le refus des différents tamis permet de construire des courbes granulométriques qui permettent de déterminer les paramètres granulométriques.

RIVIERE (1960) a mis en évidence trois types de courbes semi-logarithmiques (figure 25) : la courbe 1 correspond au faciès parabolique (Ce sont des dépôts peu évolués ou non évolués. Ils sont caractérisés par une absence d'évolution granulométrique pendant le transport), la courbe 2 au faciès logarithmique (Il est fréquent dans les dépôts fins. Les courbes s'écartent peu d'une droite et correspondent aux sédiments déposés par excès de charge après une longue évolution de transport) et la courbe 3, le faciès hyperbolique (Il caractérise les sédiments fins déposés par décantation loin des bords des grands bassins sédimentaires).



**Figure 25:** Types fondamentaux de courbes granulométriques (RIVIERE, 1960).

### 5-2-1-2. Traitement des résultats de l'analyse granulométrique

Une fois l'analyse achevée, l'ensemble des données est transféré dans un fichier Excel. Un certain nombre de paramètres, utiles dans le cadre de l'étude granulométrique d'une colonne sédimentaire, est calculé (FOLK et WARD, 1957 ; *in* MONDE, 2004).

Le traitement des données issues de l'analyse granulométrique concerne la moyenne, le classement, l'asymétrie, la médiane, l'angulosité et l'indice de tri. La détermination de ces différents paramètres implique la connaissance des centiles que sont les quartiles, les déciles et les pentiles (RIVIERE, 1960).

- les quartiles  $\Phi_{25}$ ,  $\Phi_{50}$  et  $\Phi_{75}$  correspondant respectivement à 25 %, 50 % et 75 %.
- les déciles  $\Phi_{10}$  et  $\Phi_{90}$  correspondant respectivement 10 % et 90 %.
- les pentiles  $\Phi_5$  et  $\Phi_{95}$  correspondant respectivement 5 % et 95 %.

Pour plus de commodité, certains fractiles seront exprimés en unité phi ( $\Phi = -\log_2 d$  (mm)) avec d, le diamètre des grains. Le grain moyen, l'indice de classement et le skewness ont été déterminé à l'aide des méthodes de FRIEDMAN (1967) et FOLK (1974).

#### - Grains moyens ou moyenne

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \dots\dots\dots(5.1)$$

Où  $\Phi$  représente le diamètre des particules. Par exemple  $\Phi_{16}$  est le diamètre des particules correspondant à un pourcentage pondéral de 16 %.

La moyenne permet de définir les faciès suivants:

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

**- Indice de classement ou écart type**

Il permet d'apprécier le classement des sables.

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6} \dots\dots\dots(5.2)$$

Où  $\Phi$  représente le diamètre des particules en unité phi ( $\Phi = -\log_2 d(\text{mm})$ ).

L'indice de classement indique la dispersion des tailles par rapport à la moyenne d'une courbe gaussienne de l'échantillon et permet de distinguer:

- les sables très bien classés :  $\sigma < 0,35$  ;
- les sables bien classés :  $0,35 < \sigma < 0,50$  ;
- les sables assez bien classés:  $0,50 < \sigma < 0,71$  ;
- les sables moyennement classés :  $0,71 < \sigma < 1,00$  ;
- les sables médiocrement classés :  $1,00 < \sigma < 2,00$  ;
- les sables très mal classés :  $2,00 < \sigma < 4,00$ .

**- Asymétrie (skewness)**

$$S_k = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} - \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \dots\dots\dots(5.3)$$

avec  $\Phi$  le diamètre des particules en unité phi ( $\Phi = -\log_2 d(\text{mm})$ ).

L'asymétrie indique la prépondérance ou non des particules fines (valeurs positives) ou des particules grossières (valeurs négatives) par rapport à la moyenne de l'échantillon. On a :

- les fractions grossières mieux triées :  $+1,00 > S_k > +0,30$  ;
- les fractions grossières assez mieux triées :  $+0,30 > S_k > +0,10$  ;
- la symétrie granulométrique de l'échantillon :  $+0,10 > S_k > -0,10$  ;
- les fractions fines assez bien triées :  $-0,10 > S_k > -0,30$  ;
- les fractions fins mieux triées :  $-0,30 > S_k > -1,00$ .

### **-Médiane (Md)**

La tendance centrale de la distribution granulométrique peut être définie par le grain médian Md (médiane) qui représente le diamètre, correspondant à 50% des fréquences pondérales cumulées (MONDE, 2004).

$$Md = \Phi_{50} \dots\dots\dots (5.4)$$

C'est un grain tel que 50% en poids du matériau étudié sont plus gros et 50% plus petits. Elle donne une indication sur la taille globale des grains de l'échantillon. Elle est donnée en phi ( $\Phi$ ) qui est égale au négatif du logarithme en base 2 de la taille en mm de la particule. Plus le phi est grand, plus la taille moyenne des grains est faible.

### **- Angulosité (A)**

L'angulosité d'une distribution traduit un meilleur ou un moins bon classement des particules voisines de la médiane, par rapport au classement de la distribution (VATAN, 1976). Ce paramètre exprime l'angulosité de la courbe de fréquence et mesure le degré de concentration ou de dispersion du mode. Plus la valeur est élevée, plus la taille est homogène. Le mode est alors très représentatif de la population considérée.

Elle est représentée par la formule suivante :

$$A = \frac{\phi_3 - \phi_1}{2(p_{10} - p_{90})} \dots\dots\dots (5.5)$$

Pour établir cette formule, il faut introduire  $p_{10}$  et  $p_{90}$  correspondant aux diamètres de 10% et 90%. Ainsi, lorsque :

- $A > 3$  : la courbe est extrêmement leptocurtique ;
- $3 > A > 1,5$  : la courbe est très leptocurtique ;
- $1,5 > A > 1,11$  : la courbe est leptocurtique ;
- $1,11 > A > 0,9$  : la courbe est curtique ;
- $0,9 > A > 0,67$  : la courbe est platycurtique ;
- $0,67 > A$  : la courbe très platycurtique.

### **- Indice de triage (IT)**

Il indique l'homogénéité des tailles des particules de l'échantillon. Il s'exprime par la formule suivante :

$$IT = \frac{\phi_{25}}{\phi_{75}} \dots\dots\dots (5.6)$$

Plus le tri est bon, plus les particules composants l'échantillon ont une taille similaire. IT est alors petit. Plus le coefficient est voisin de 1, mieux les particules du sédiment sont bien triées (AUBOUIN *et al.*, 1979).

### **5-2-2. Séparation densimétrique**

Le bromoforme (densité 2,89) a permis de séparer des fractions fines (taille inférieure ou égale à 500  $\mu\text{m}$ ) en deux autres fractions :

- une fraction lourde (densité supérieure à 2,89) au fond du bromoforme ;
- une fraction légère (densité inférieure à 2,89) à la surface du bromoforme.

Chaque fraction est recueillie sur du papier filtre portant un numéro d'identification, puis rincée à l'acétone et séchée sur une plaque chauffante avant d'être pesée.

### **5-2-3. Analyse statistique**

L'analyse statistique (abondance) des minéraux lourds en fonction du cycle saisonnier, du niveau d'estran et des différentes zones de l'estuaire a pu être établie à l'aide des tests ANOVA (Analyse de la Variance). Ces tests sont basés sur l'hypothèse nulle pour un niveau de signification  $\alpha = 0,05$  et  $\alpha = 0,01$ . Les tests ANOVA permettent d'évaluer la teneur des minéraux par rapport aux saisons et aux estrans (WOLFF et VISSER, 2003 ; 2005).

Les tests ANOVA permettent de distinguer 3 classes à partir des pourcentages calculés (P):

- si  $P < 0,05$ , alors le pourcentage calculé est significatif (s) ;
- si  $P < 0,01$ , alors le pourcentage calculé est hautement significatif (hs) ;
- si  $P > 0,05$ , alors le pourcentage calculé est non significatif (ns) ;

Tous les tests ont été réalisés avec le logiciel Statistica 7.1.

## **Conclusion**

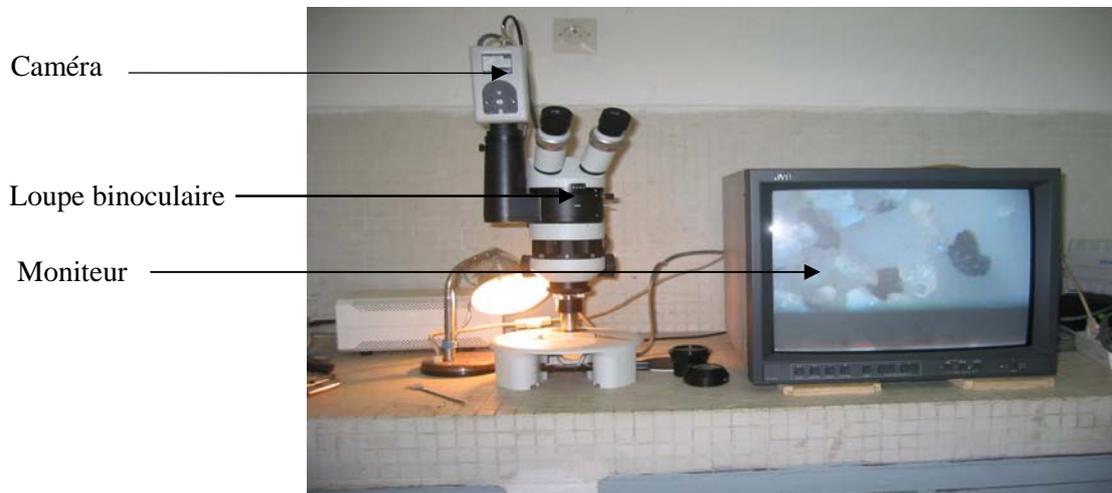
Ce travail permettra d'établir la carte sédimentologique de l'estuaire du Comoé. Il permet de caractériser les sédiments par la détermination des paramètres granulométriques. Le test d'ANOVA est appliqué aux minéraux lourds. Il permet d'évaluer le pourcentage de ces minéraux dans les sédiments afin d'envisager une éventuelle exploitation.

## CHAPITRE 6. ANALYSE MINÉRALOGIQUE, MORPHOSCOPIQUE ET MORPHOMETRIQUE DU QUARTZ

Dans cette partie, seront abordées le matériel et les méthodes d'étude des minéraux. Un accent sera mis sur l'analyse minéralogique, morphoscopique et morphométrique du quartz. Par ailleurs, ce chapitre fait une description des méthodes de caractérisation des sédiments.

### 6-1. MATÉRIEL UTILISÉ

L'observation des minéraux a été effectuée au moyen d'une loupe binoculaire « *Medo Opt.head* » et une loupe binoculaire à écran (photo 10). Une balance électrique a permis de peser les échantillons (photo 11). La composition minéralogique a été établie à l'aide de minéraux tests disponibles au laboratoire.



**Photo10:** Loupe binoculaire munie d'une caméra et d'un écran



**Photo 11:** Une balance électrique de marque sartorius BL 1500S

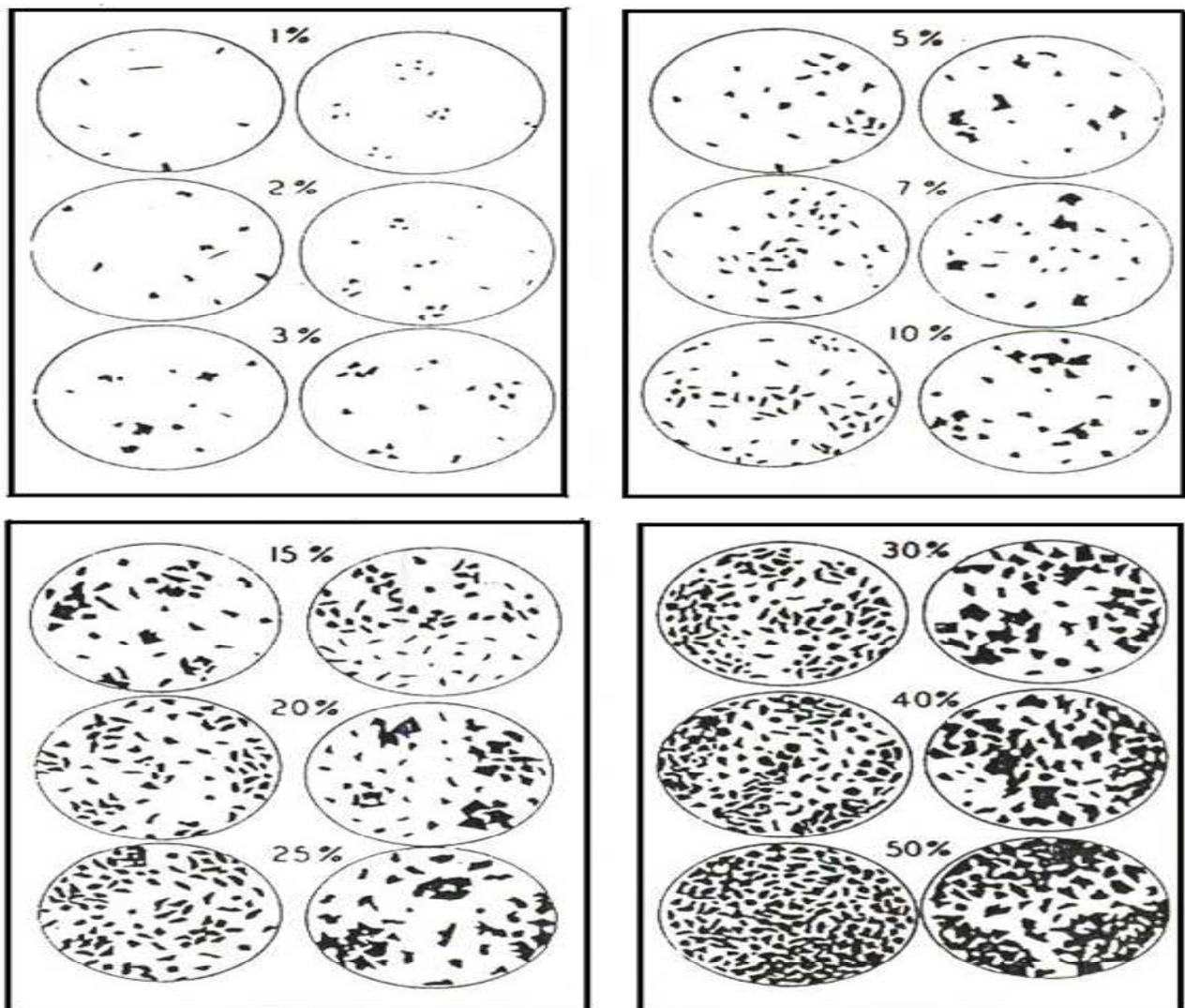
## 6-2. METHODES UTILISEES

### 6-2-1. Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique a concerné les grains dont la taille est comprise entre 63 et 125  $\mu\text{m}$ . C'est cette fraction qui renferme une quantité importante de minéraux lourds (YACE, 1979).

Les échantillons ont été examinés directement à la loupe binoculaire et leur composition minéralogique a été établie à l'aide de minéraux tests disponibles au laboratoire.

Les minéraux tests qui ont servi à l'identification minéralogique sont : l'actinote, l'amphibole, la biotite, la chlorite, le diopside, l'épidote, le grenat, la hornblende, l'ilménite, le leucoxène, la limonite, la monazite, le pyroxène, le rutile, la sillimanite, l'anatase, le muscovite, la quartz, le scheelite, la tourmaline et le zircon. Pour déterminer le pourcentage des minéraux identifiés, la charte visuelle de CAILLEUX et TRICART (1959) a été utilisée (figure 26).



**Figure 26** : Diagrammes d'évaluation des pourcentages relatifs des grains de quartz (CAILLEUX et TRICART, 1959).

### 6-2-2. analyse morphoscopique

La morphoscopie est la description de l'aspect de la surface et de la forme des grains de sables. Nous avons utilisé deux méthodes morphoscopiques :

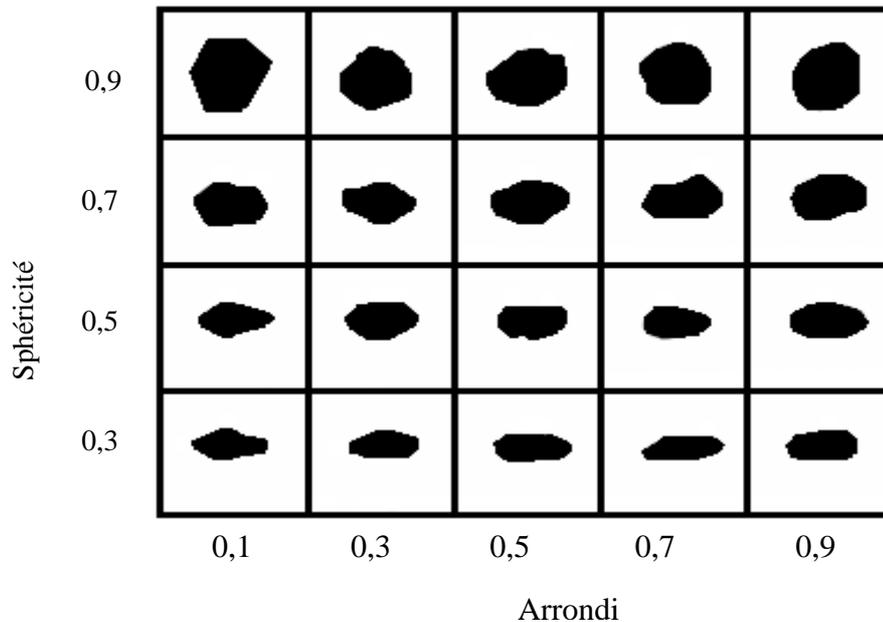
- la méthode de KRUMBEIN (1936);
- la méthode de CAILLEUX (1947).

#### 6-2-2-1- Méthode de Krumbein

La sphéricité est définie comme le rapport des images de projection sur un plan de la longueur sur la largeur. L'arrondi est le rapport du rayon moyen des angles sur le rayon du plus grand cercle inscrit. Il est compris entre 0 et 1 (tableau V). La charte visuelle (figure 27) permet l'estimation de ces deux indices où l'arrondi est en abscisse et la sphéricité en ordonnée (SAAIDI, 1991).

**Tableau V:** Coefficient d'arrondi et de sphéricité selon KRUMBEIN (1936)

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| <b>Sphéricité</b> | 0,3 : Faible         |
|                   | 0,5 et 0,7 : Moyenne |
|                   | 0,9 : Élevée         |
| <b>Arrondi</b>    | 0,1 : Anguleux       |
|                   | 0,3 : Subanguleux    |
|                   | 0,5 : Subarrondi     |
|                   | 0,7 : Arrondi        |
|                   | 0,9 : Très arrondi   |



**Figure 27:** Charte visuelle de KRUMBEIN (1936)

### 6-2-2-2- Méthode de Cailleux

CAILLEUX et TRICART (1959) décrivent quatre types de grains :

- les grains Non Usés (NU) qui sont les fragments anguleux ou esquilleux. Leurs faces peuvent être brillantes ou ternes. Ils impliquent un faible transport en milieu aqueux et un dépôt à proximité des massifs cristallins d'origine.
- les grains Emoussés Luisants (EL) ont des parties saillantes présentant des traces d'usure. Les sommets et les arêtes sont émoussés et luisants. Ils résultent d'un remaniement important ou d'une usure dans l'eau ;
- les grains Ronds Mats (RM) propres, résultent de l'usure par le vent. Ils sont propres parce qu'ils ont été usés peu avant le dépôt ;
- les grains Ronds Mats (RM) salis sont identiques aux précédents et sont salis parce qu'ils sont repris de formations plus anciennes.

Les grains de sables transportés par le vent ont des caractères très différents de ceux transportés par l'eau. Leurs surfaces, couvertes de stries et de traces de chocs microscopiques, ont l'éclat du verre dépoli. Leur forme est à peu près sphérique car dans l'air les chocs sont moins amortis que dans l'eau.

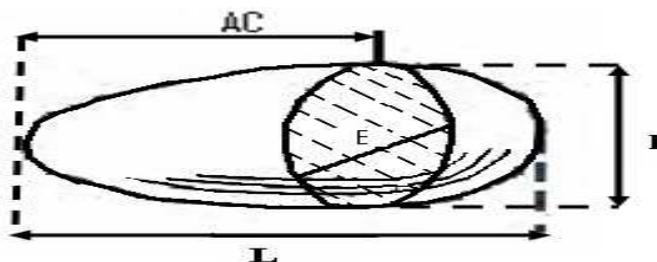
### 6-2-3- Analyse morphométrique

La morphométrie est la mesure des dimensions des galets et des grains de sable. La méthode de CAILLEUX (1947) permet le calcul de deux indices dont la connaissance informe sur le milieu et les conditions de formation et en particulier sur l'usure du quartz. Ce sont l'indice d'aplatissement et l'indice de dissymétrie.

Cette méthode consiste à mesurer la longueur, la largeur et l'épaisseur des grains de sable sur des lots de 50 à 100 éléments afin de calculer les indices d'aplatissement et de dissymétrie.

#### 6-2-3-1- Indice d'aplatissement

Pour déterminer l'indice d'aplatissement d'un galet ou d'un quartz, on mesure sa longueur  $L$ , sa largeur  $l$  et son épaisseur  $E$  (figure 28).

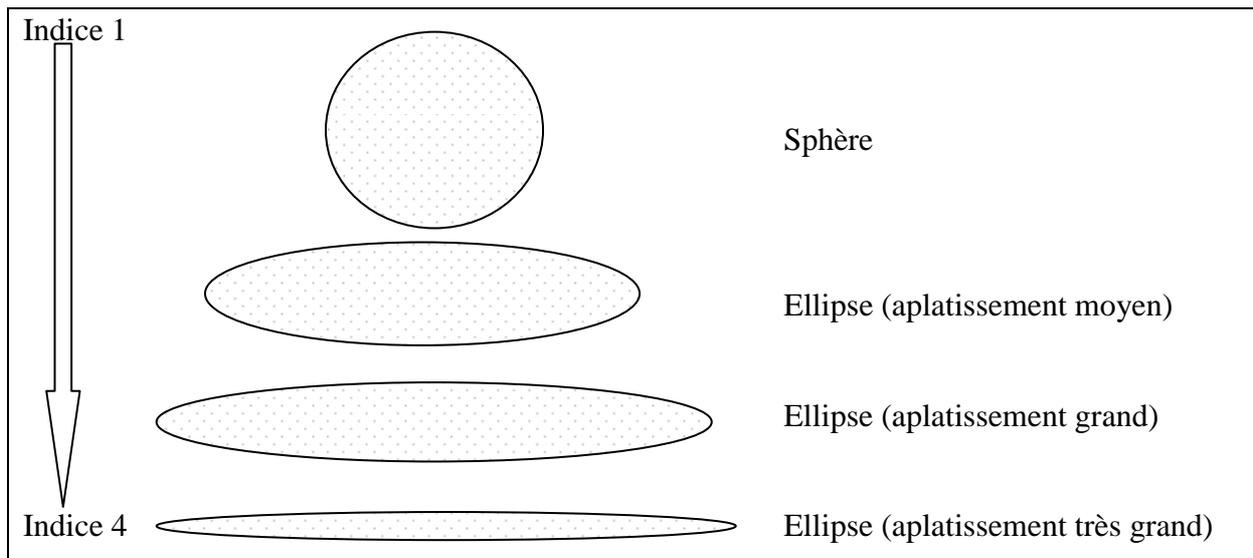


**Figure 28** : Schéma théorique des indices d'aplatissement du quartz (CAILLEUX, 1947)

Les trois dimensions mesurées doivent répondre aux inégalités suivantes :  $L \geq l \geq E$ .

L'indice d'aplatissement est donné par la relation:  $I_a = \frac{L+l}{2E}$  ..... (6.1)

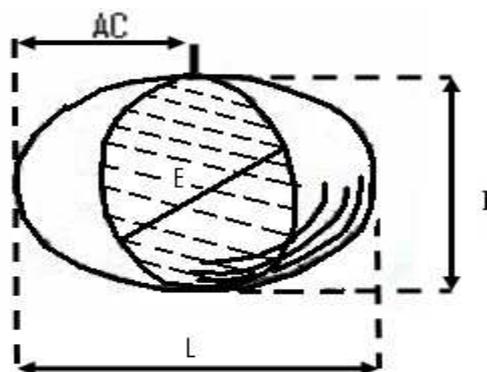
Si  $I_a > 1$  alors le galet ou le quartz a une forme quelconque. Cependant, si  $I_a = 1$ , alors le galet ou le quartz est une sphère. Plus l'indice d'aplatissement est élevé plus on s'écartera de la forme sphérique. Généralement, cet indice est compris entre 1 et 4. Cette évolution de l'indice d'aplatissement en relation avec la forme est résumée par la figure 29.



**Figure 29** : Schéma de l'évolution de l'indice d'aplatissement en fonction de la forme

### 6-2-3-2- Indice de dissymétrie

L'indice de dissymétrie d'un galet ou d'un quartz est obtenu en mesurant dans un plan perpendiculaire à L, la distance comprise entre le point le plus saillant du galet et son extrémité (figure 30).



**Figure 30** : Schéma théorique des indices de dissymétrie (CAILLEUX, 1947)

Cette mesure doit s'effectuer du point le plus saillant vers l'extrémité la plus éloignée. Autrement dit, il faut avoir  $AC > L/2$ . Dans le cas de la sphère,  $AC = L/2$ , c'est-à-dire  $AC/L = 0,5$  ou  $AC \times 100/L = 50$ . Lorsque le galet a une forme quelconque alors  $AC/L > 0,5$ . L'indice de dissymétrie est donné par la relation suivante :

$$I_d = \frac{AC}{L} \dots\dots\dots(6.2)$$

Il sera d'autant plus élevé que le galet sera plus dissymétrique. Les valeurs de la dissymétrie sont moins fortes dans les formations marines que dans les formations fluviales.

**Conclusion**

Le traitement des données des campagnes à l'estuaire du fleuve Comoé a permis d'avoir des résultats sur le plan morphoscopique, morphométrique et minéralogique. Grâce à la méthode de CAILLEUX (1947), les indices de dissymétrie et d'aplatissement ont été déterminés. La méthode de KRUMBEIN (1936) a permis de calculer le coefficient d'arrondi et de sphéricité des grains.

**TROISIEME PARTIE : RESULTATS, INTERPRETATIONS  
ET DISCUSSIONS**

## **CHAPITRE 7- PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES A L'EMBOUCHURE DU COMOÉ.**

Ce chapitre étudie les variations morphologiques et sédimentologiques saisonnières de 7 profils de plage choisis de part et d'autre de l'embouchure. En outre, il évalue à l'échelle locale les mouvements sédimentaires à l'embouchure du fleuve Comoé.

### **7-1- EVOLUTION DE LA GRANULOMETRIE DES SEDIMENTS**

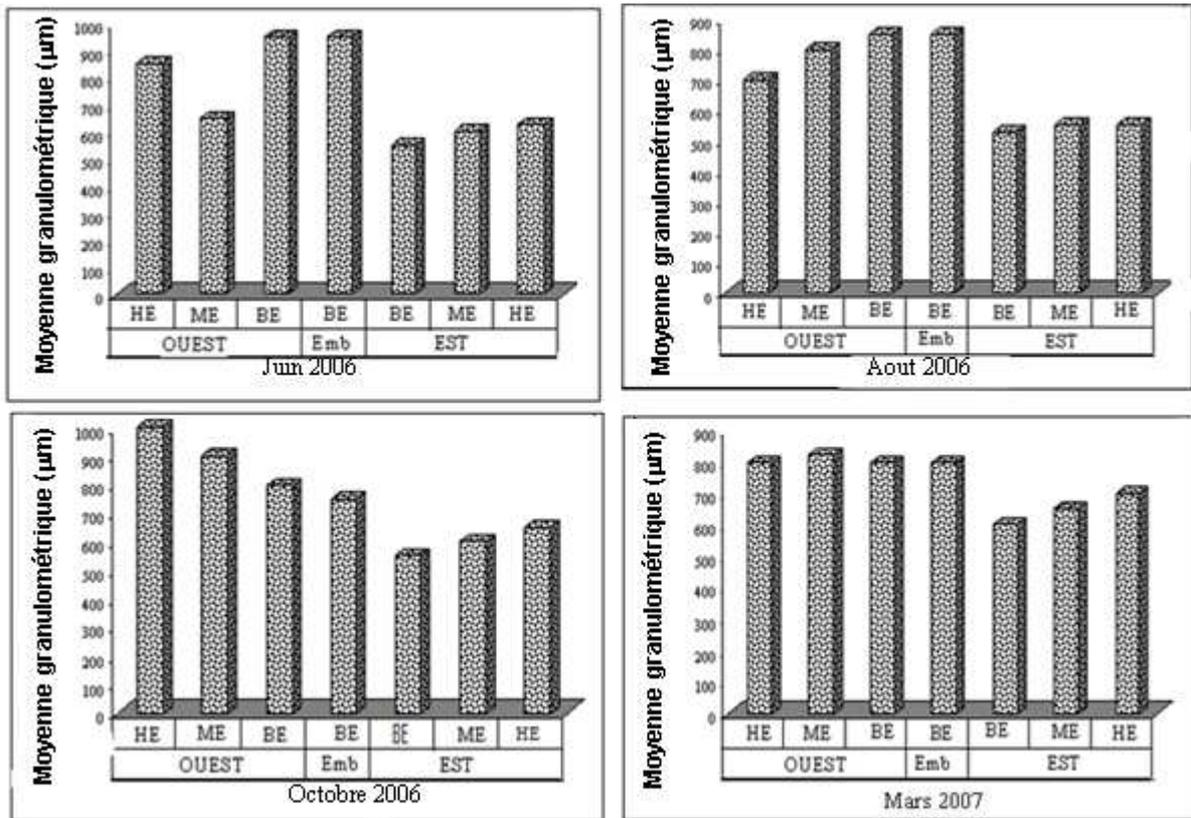
D'une façon générale, les sédiments sont plus grossiers à l'Ouest qu'à l'Est de l'embouchure du fleuve Comoé.

En 2006, cette granulométrie augmente de l'HE vers le BE au mois d'août. Tandis qu'en octobre de la même année, cette tendance s'inverse. Mais en juin 2006, le ME enregistre à l'Ouest, un brusque recul de la granulométrie.

En mars 2007, la granulométrie des grains est plus ou moins constante sur tous les estrans.

Au niveau de l'embouchure tout comme sur tout le littoral, le déplacement des sables se fait de l'Ouest à l'Est.

La différence de taille des minéraux à l'embouchure pourrait s'expliquer par le fait que depuis sa fermeture par le banc de sable, celle-ci se comporte désormais comme une digue d'arrêt de sable. Seuls les minéraux en suspension et les moins grossiers arrivent à traverser facilement cette zone dans le sens du transit sédimentaire en contournant le banc de sable. Si bien que les plus grossiers (incapable de contourner le banc de sable) se déposent à l'Ouest et les moins grossiers à l'Est de l'embouchure.



**HE : Haut Estran**

**ME : Mi Estran**

**BE : Bas Estran**

**Figure 31 :** Histogramme de la taille des minéraux lourds dans les différentes zones de l'embouchure du fleuve Comoé

Une synthèse des paramètres granulométriques tels que l'écart-type et le skweness a été réalisée dans le tableau VI.

A l'Ouest et à l'Est de l'embouchure, les indices de classement varient entre les valeurs 0,25 et 0,35. Les grains de sable sont donc très bien classés Mais, les indices de classement sont plus élevés au haut estran de la plage (tableau VI). A l'Ouest de l'embouchure, les valeurs de skweness sont négatives au haut estran et positives sur les autres estrans sauf en août 2006, où on enregistre la valeur -0,12. Ainsi donc, on peut dire que les fractions fines sont en prédominances assez bien triées. Cependant, sur les autres estrans, ce sont les fractions grossières qui sont les mieux triées.

Au niveau de l'embouchure, les indices de classement et le skweness sont positifs sur tous les estrans et diminuent du HE au BE. Donc les fractions grossières des sédiments de sable sont mieux triées.

**Tableau VI:** Variation saisonnière des indices de classement et du skweness des sédiments de plage de l'embouchure du fleuve Comoé en 2006 et 2007.

| Paramètres                   | Périodes     | Zone       | Haut-Estran | Mi-Estran | Bas-Estran |
|------------------------------|--------------|------------|-------------|-----------|------------|
| <b>Indices de classement</b> | Juin 2006    | Ouest      | 0,34        | 0,31      | 0,30       |
|                              |              | Embouchure | 0,33        | 0,28      | 0,26       |
|                              |              | Est        | 0,31        | 0,29      | 0,28       |
|                              | Août 2006    | Ouest      | 0,32        | 0,30      | 0,31       |
|                              |              | Embouchure | 0,31        | 0,26      | 0,25       |
|                              |              | Est        | 0,30        | 0,29      | 0,28       |
|                              | Octobre 2006 | Ouest      | 0,34        | 0,28      | 0,30       |
|                              |              | Embouchure | 0,30        | 0,29      | 0,28       |
|                              |              | Est        | 0,26        | 0,29      | 0,31       |
|                              | Mars 2007    | Ouest      | 0,35        | 0,27      | 0,29       |
|                              |              | Embouchure | 0,31        | 0,30      | 0,28       |
|                              |              | Est        | 0,31        | 0,26      | 0,30       |
| <b>Skweness</b>              | Juin 2006    | Ouest      | -0,09       | 0,10      | 0,15       |
|                              |              | Embouchure | -0,13       | 0,11      | 0,09       |
|                              |              | Est        | 0,12        | 0,09      | 0,11       |
|                              | Août 2006    | Ouest      | -0,15       | 0,13      | 0,12       |
|                              |              | Embouchure | -0,16       | 0,14      | 0,10       |
|                              |              | Est        | 0,14        | 0,13      | -0,12      |
|                              | Octobre 2006 | Ouest      | -0,08       | 0,10      | 0,14       |
|                              |              | Embouchure | -0,09       | 0,07      | 0,11       |
|                              |              | Est        | 0,02        | 0,09      | 0,11       |
|                              | Mars 2007    | Ouest      | -0,15       | 0,11      | 0,12       |
|                              |              | Embouchure | -0,12       | 0,08      | 0,10       |
|                              |              | Est        | 0,01        | 0,01      | 0,12       |

## 7-2. MINERALOGIE

Le cortège de minéraux lourds observés à l'embouchure est composé de l'amphibole, l'épidote, le leucoxène, la sidérite, le gorceixite, la sillimanite, le rutile, le chrysobéryl, l'ilménite, la limonite, la monazite, la tourmaline, le pyroxène, le diopside, l'or, le grenat et le zircon (tableau VII). La plupart des minéraux se rencontrent dans tous les estrans et à toute période. Seul l'or est moins représenté. Il se rencontre sur toute la longueur de la plage au cours du mois d'octobre correspondant à la petite saison des pluies. Dans son ensemble, la zone littorale regorge d'énormes potentialités en minéraux lourds pour lesquels il est souhaitable d'estimer la teneur en vue de leurs exploitations.

**Tableau VII :** Inventaire des minéraux lourds identifiés à l’embouchure du fleuve Comoé en octobre 2006 et en mars 2007.

| PERIODE      | ZONE  | Haut-Estran                                                                                                                         | Mi-Estran                                                                                                                           | Bas-Estran                                                                                                                          |
|--------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Octobre 2006 | OUEST | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat et l’or.                          | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat et l’or.                          | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat et l’or.                          |
|              | EST   | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat et biotite.                       | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat et biotite.                       | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat et biotite.                       |
| Mars 2007    | OUEST | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon. | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon. | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon. |
|              | EST   | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon.          | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon.          | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon.          |
| Juin 2007    | OUEST | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, monazite, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon.                      | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, monazite, rutile, tourmaline, grenat et zircon                                              | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, monazite, rutile, grenat, tourmaline et zircon                                              |
|              | EST   | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, monazite, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon.                      | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, monazite, rutile, tourmaline et zircon                                                      | Ilménite, amphibole, diopside, épidote, monazite, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon.                      |
| Août 2007    | OUEST | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon.          | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite et biotite                       | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite et biotite                       |
|              | EST   | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite, sillimanite et zircon.          | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite et biotite                       | Ilménite, amphibole, diopside, leucoxène, monazite, pyroxène, rutile, tourmaline, grenat, sidérite et biotite                       |

### 7-3. INTERET ET IMPLICATION DE L'ETUDE DES MINERAUX LOURDS

Une étude typologique permettra d'évaluer la teneur des minéraux lourds rencontrés à l'embouchure du Comoé.

#### 7-3-1. Evaluation de la teneur des minéraux lourds pendant la grande saison des pluies (juin 2006).

Les minéraux observés sur les estrans de l'embouchure présentés à la figure 32 indiquent que les proportions de l'ilménite et du grenat sont croissantes du HE au BE. Le diopside, l'épidote, le leucoxène et la tourmaline présentent des proportions décroissantes du HE au BE. Le pourcentage de l'amphibole est décroissant du HE au ME, et croissant du ME au BE. Le pourcentage du pyroxène et de la monazite est croissant du HE au ME et décroissant du ME au BE. Le rutile a un pourcentage constant du HE au ME, et décroît au BE.

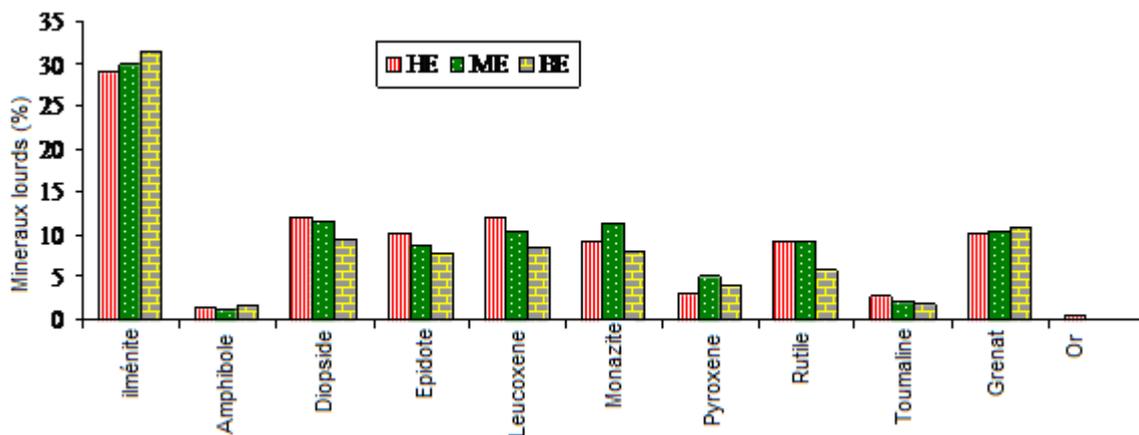


Figure 32: Histogramme du pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'embouchure du fleuve Comoé

Les valeurs obtenues montrent un fort pourcentage d'ilménite suivi, par ordre d'importance, du diopside, du grenat, du leucoxène, de la monazite, de l'épidote, le rutile, du pyroxène, de la tourmaline, de l'amphibole et de l'or sous forme de trace. La probabilité calculée (0,91) est supérieure à la probabilité théorique (0,05), ce qui indique que la différence entre les pourcentages est non significative (tableau VIII) ; elle ne suscite pas d'étude minière.

**Tableau VIII :** Abondance relative des minéraux lourds à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé

| Source de variation (Minéraux lourds) | Pourcentage moyen |
|---------------------------------------|-------------------|
| Ilménite                              | 30,1              |
| Diopside                              | 11,0              |
| Grenat                                | 10,5              |
| Leucoxène                             | 10,3              |
| Monazite                              | 9,5               |
| Epidote                               | 8,9               |
| Rutile                                | 8,1               |
| Pyroxène                              | 4,0               |
| Tourmaline                            | 2,2               |
| Amphibole                             | 1,4               |
| Or                                    | 0,2               |
| F calculée                            | 170,9             |
| P calculée                            | 0,91%             |
| P théorique                           | > 0,05%           |

Les moyennes sur une même ligne suivies de la même lettre diffèrent significativement (tableau IX). Les minéraux à fortes teneurs sont majoritairement obtenus. Le pyroxène, la tourmaline, l'amphibole et l'or sont faiblement représentés. Au niveau des valeurs moyennes, à l'exception de celles de la tourmaline et du rutile, les probabilités calculées sont toutes supérieures au seuil de 0,05. La teneur est donc non significative.

**Tableau IX :** Variation du pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé en période de crue (juin 2006)

| Source de variation (Minéraux lourds) | Pourcentage moyen (%) |      |      | F calculée | Probabilités (P) |           |
|---------------------------------------|-----------------------|------|------|------------|------------------|-----------|
|                                       | HE                    | ME   | BE   |            | Calculée         | Théorique |
| Ilménite                              | 29,0                  | 30,0 | 31,5 | 0,2 ns     | 0,7              | > 0,05    |
| Diopside                              | 12,0                  | 11,5 | 9,5  | 1,6 ns     | 0,2              | > 0,05    |
| Grenat                                | 10,1                  | 10,5 | 11,0 | 0,1 ns     | 0,8              | > 0,05    |
| Leucoxène                             | 12,0                  | 10,5 | 8,6  | 2,5 ns     | 0,3              | > 0,05    |
| Monazite                              | 9,3                   | 11,3 | 8,1  | 2,2 ns     | 0,1              | > 0,05    |
| Epidote                               | 10,2                  | 8,9  | 7,8  | 2,7 ns     | 0,5              | > 0,05    |
| Rutile                                | 9,3                   | 9,3  | 5,8  | 5,7 **     | 0,002            | < 0,01    |
| Pyroxène                              | 3,0                   | 5,0  | 4,0  | 0,8 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Tourmaline                            | 2,7                   | 2,1  | 1,9  | 4,7 *      | 0,04             | < 0,05    |
| Amphibole                             | 1,5                   | 1,1  | 1,7  | 0,5 ns     | 0,5              | > 0,05    |
| Or                                    | 0,5                   | 0,1  | 0,1  | 3,3 ns     | 0,1              | > 0,05    |

HE : Haut Estran

ME : Moyen Estran

BE : Bas Estran

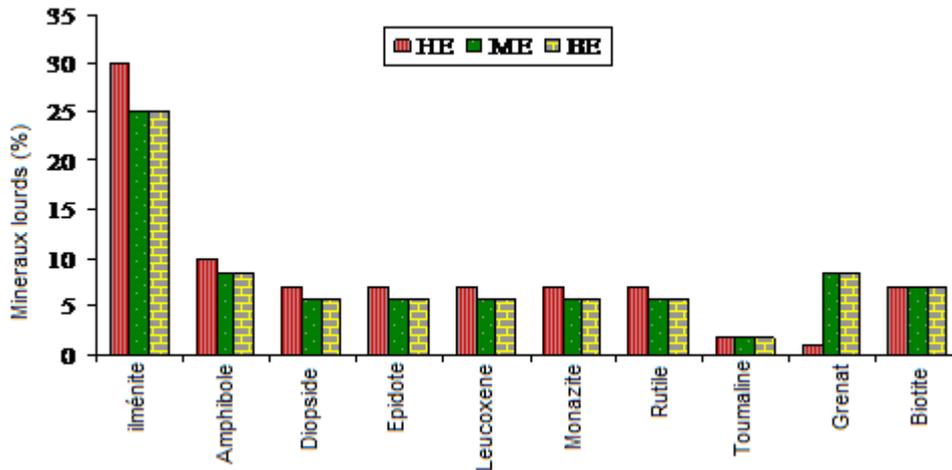
\*Significatif,

\*\* Hautement Significatif,

ns: non Significatif

### 7-3-2. Evaluation de la teneur des minéraux lourds pendant la petite saison sèche (août 2006)

Les minéraux observés à l’embouchure pendant la période d’étéage sont présentés à la figure 33. La plupart de ces minéraux présentent des proportions décroissantes du HE au ME et des proportions constantes du ME au BE sauf le grenat et de la biotite. Le pourcentage de grenat est croissant du HE au ME, et constant du ME au BE. La biotite a un pourcentage constant au niveau de tous les estrans.



**Figure 33:** Histogramme du pourcentage des minéraux lourds par niveau d’estran à l’embouchure du fleuve Comoé

Les mesures effectuées à l’embouchure montrent une abondance de l’ilménite, suivie par ordre décroissante, de la limonite, du grenat, de la monazite, du zircon, de la tourmaline, du leucoxène, de la sidérite, de la sillimanite et de l’amphibole (Tableau X). Selon le test d’ANOVA, la probabilité calculée (0,45) est supérieure à la probabilité théorique (0,05) (Tableau X). Ce qui montre que la différence entre les pourcentages est non significative. Il est donc inopportun de mener toutes études dans le domaine minier.

**Tableau X :** Abondance relative des minéraux lourds à l'Est de l'embouchure du fleuve Comoé.

| Minéraux lourds | Pourcentage moyen |
|-----------------|-------------------|
| Ilménite        | 52,1              |
| Limonite        | 9,0               |
| Grenat          | 6,5               |
| Monazite        | 5,7               |
| Zircon          | 5,1               |
| Tourmaline      | 5,1               |
| Leucoxène       | 4,0               |
| Sidérite        | 3,7               |
| Sillimanite     | 3,6               |
| Amphibole       | 0,5               |
| F calculée      | 246,40            |
| P calculée      | 0,45%             |
| P théorique     | > 0,05%           |

L'analyse des valeurs moyennes de pourcentage (Tableau XI) donne une probabilité calculée supérieure au seuil de 0,05 de la probabilité théorique, ce qui n'indique aucune différence significative.

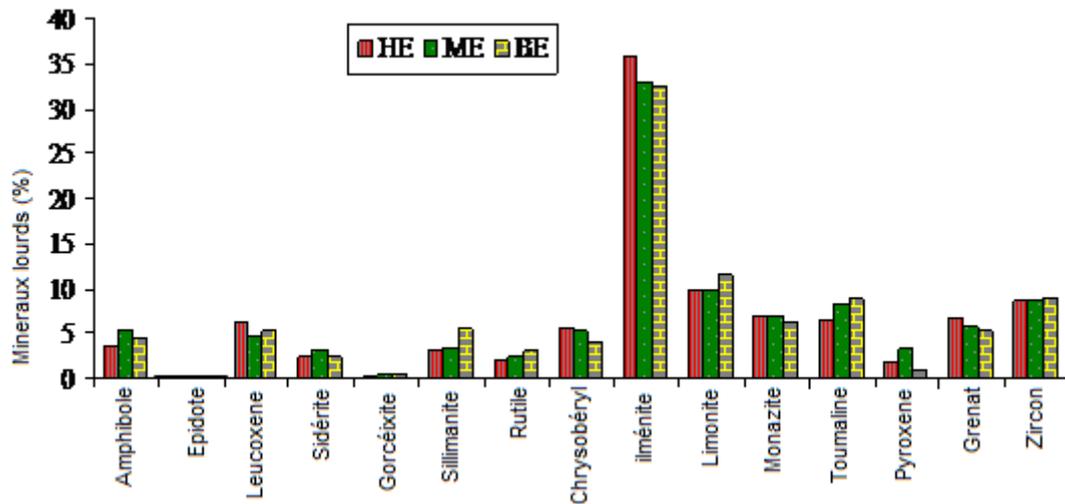
**Tableau XI:** Proportion relative des minéraux lourds par niveau d'estran à l'Est de l'embouchure du fleuve Comoé

| Sources de variation<br>(Minéraux lourds) | Pourcentage moyen |      |      | F calculée | Probabilités (P) |           |
|-------------------------------------------|-------------------|------|------|------------|------------------|-----------|
|                                           | HE                | ME   | BE   |            | Calculée         | Théorique |
| Ilménite                                  | 50,8              | 52,5 | 53,7 | 0,1 ns     | 0,8              | > 0,05    |
| Limonite                                  | 12,5              | 8,3  | 5,0  | 0,8 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Grenat                                    | 5,0               | 6,6  | 8,7  | 0,8 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Zircon                                    | 5,1               | 5,1  | 5,2  | 0,0 ns     | 0,9              | > 0,05    |
| Chrysobéryl                               | 5,1               | 5,1  | 5,0  | 0,3 ns     | 0,7              | > 0,05    |
| Tourmaline                                | 5,1               | 5,1  | 5,0  | 0,3 ns     | 0,7              | > 0,05    |
| Monazite                                  | 5,0               | 5,0  | 3,7  | 1,6 ns     | 0,2              | > 0,05    |
| Sillimanite                               | 4,1               | 4,1  | 5,0  | 0,3 ns     | 0,7              | > 0,05    |
| Leucoxène                                 | 4,1               | 5,0  | 2,5  | 2,1 ns     | 0,1              | > 0,05    |
| Sidérite                                  | 3,3               | 3,3  | 5,0  | 0,8 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Amphibole                                 | 0,3               | 0,1  | 1,2  | 0,9 ns     | 0,4              | > 0,05    |

### 7-3-3- Teneur des minéraux lourds pendant la petite saison des pluies (octobre 2006)

Le cortège de minéraux lourds, observés à l'embouchure pendant cette période, est composé de l'amphibole, l'épidote, le leucoxène, la sidérite, le gorceixite, la sillimanite, le

rutile, le chrysobéryl, l'ilménite, la limonite, la monazite, la tourmaline, le pyroxène, le grenat et le zircon (figure 34). Les pourcentages du chrysobéryl, l'ilménite et le grenat sont décroissants du HE au BE. Ceux de la sillimanite, le rutil, la tourmaline et le gorceixite sont croissants du HE au BE. Les autres minéraux que sont l'amphibole, le leucoxène, la sidérite, la limonite, le pyroxène et le zircon ont une évolution irrégulière du HE au BE. L'épidote n'est pas perceptible sur les trois estrans.



**Figure 34:** Histogramme du pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'embouchure du fleuve Comoé

L'examen des pourcentages des minéraux lourds à l'embouchure indique une forte présence d'ilménite. La limonite, le zircon, la tourmaline, la monazite, le grenat, le leucoxène sont moyennement représentés. Le chrysobéryl, l'amphibole, la sillimanite, la sidérite, le rutil, le pyroxène, le gorceixite et l'épidote sont en faiblement représentés pourcentage. La probabilité calculée est supérieure de la probabilité théorique, ce qui montre que la différence entre les pourcentages est non significative (tableau XII).

**Tableau XII :** Pourcentages relatifs des minéraux lourds à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé

| Sources de variation<br>(Minéraux lourds) | Pourcentage<br>moyen |
|-------------------------------------------|----------------------|
| Ilménite                                  | 33,8                 |
| Limonite                                  | 10,4                 |
| Zircon                                    | 8,7                  |
| Tourmaline                                | 7,8                  |
| Monazite                                  | 6,8                  |
| Grenat                                    | 6,0                  |
| Leucoxène                                 | 5,4                  |
| Chrysobéryl                               | 4,9                  |
| Amphibole                                 | 4,5                  |
| Sillimanite                               | 4,0                  |
| Sidérite                                  | 2,6                  |
| Rutile                                    | 2,5                  |
| Pyroxène                                  | 2,0                  |
| F calculée                                | 339,849              |
| P calculée                                | 0,77%                |
| P théorique                               | > 0,05%              |

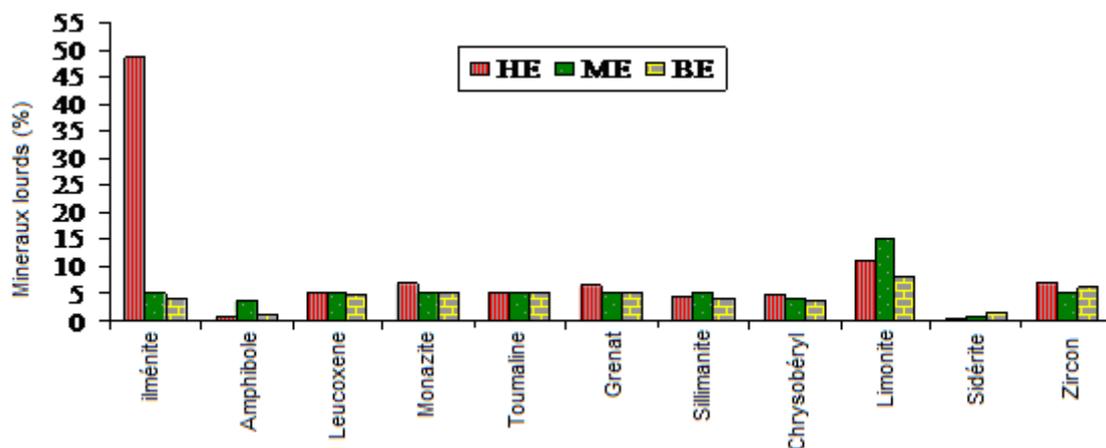
Au niveau de l'analyse des valeurs moyennes de pourcentage (tableau XIII), la probabilité calculée donne des valeurs inférieures au seuil de 0,01 pour le pyroxène et la sillimanite. Ce sont donc des pourcentages hautement significatifs. Au niveau de la tourmaline, la probabilité calculée donne des valeurs inférieures au seuil de 0,05. Le pourcentage est donc significatif. Pour les autres minéraux, la probabilité calculée est supérieure au seuil de la probabilité théorique qui est de 0,05. Ce sont donc des pourcentages non significatifs (ns).

**Tableau XIII :** Pourcentage des minéraux lourds par niveau d'estran à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé.

| Sources de variation<br>(Minéraux lourds) | Pourcentage moyen |      |        | F calculée | Probabilités (P) |           |
|-------------------------------------------|-------------------|------|--------|------------|------------------|-----------|
|                                           | HE                | ME   | BE     |            | Calculée         | Théorique |
| Ilménite                                  | 36,0              | 33,0 | 32,5 a | 0,9 ns     | 0,3              | > 0,05    |
| Limonite                                  | 9,9               | 9,8  | 11,5   | 2,4 ns     | 0,1              | > 0,05    |
| Zircon                                    | 8,7               | 8,7  | 8,9    | 0,0 ns     | 0,9              | > 0,05    |
| Tourmaline                                | 6,6               | 8,1  | 8,8    | 4,8 *      | 0                | < 0,05    |
| Monazite                                  | 7,1               | 7,0  | 6,3    | 0,7 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Grenat                                    | 6,7               | 5,9  | 5,4    | 0,6 ns     | 0,5              | > 0,05    |
| Leucoxène                                 | 6,2               | 4,8  | 5,3    | 1,5 ns     | 0,2              | > 0,05    |
| Chrysobéryl                               | 5,5               | 5,2  | 4,1    | 1,4 ns     | 0,2              | > 0,05    |
| Amphibole                                 | 3,7               | 5,3  | 4,5    | 0,3 ns     | 0,6              | > 0,05    |
| Sillimanite                               | 3,2               | 3,3  | 5,6    | 7,3**      | 0                | < 0,01    |
| Sidérite                                  | 2,3               | 3,1  | 2,4    | 0,8 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Rutile                                    | 2,1               | 2,3  | 3,2    | 2,6 ns     | 0                | > 0,05    |
| Pyroxène                                  | 1,9               | 3,3  | 0,9    | 10,9 **    | 0                | < 0,01    |

### 7-3-4. Evaluation de la teneur des minéraux lourds pendant la grande saison sèche (mars 2007)

Les minéraux lourds observés à l’embouchure, en période de basse eau en mars 2007, sont l’ilménite, l’amphibole, le leucoxène, la monazite, le grenat, la sillimanite, le chrysobéryl, la limonite, la sidérite et le zircon. L’analyse de la figure 35 indique que l’ilménite et le chrysobéryl présentent des pourcentages décroissants du HE au BE. Le leucoxène a un pourcentage constant sur tous les niveaux d’estran. L’amphibole, la sillimanite et la limonite présentent des pourcentages croissants du HE au ME, puis décroissants du ME au BE. La monazite, et le grenat présentent, pour leur part, des pourcentages décroissants du HE au ME et constants du ME au BE. Seule la tourmaline a un pourcentage constant du HE au BE.



**Figure 35:** Histogramme du pourcentage des minéraux lourds par niveau d’estran à l’embouchure du fleuve Comoé

Les mesures effectuées à l’embouchure (tableau XIV) indiquent un très fort pourcentage d’ilménite. L’on trouve ensuite, dans l’ordre décroissant, ceux de la limonite, du zircon, de la monazite, du grenat, de la tourmaline, du leucoxène, de la sillimanite, du chrysobéryl, de l’amphibole et de la sidérite. La probabilité calculée est supérieure de la probabilité théorique, ce qui prouve bien que la différence entre les pourcentages est non significative (tableau XIV).

**Tableau XIV:** Proportion relative des minéraux lourds à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé.

| Sources de variation (Minéraux lourds) | Pourcentage moyen |
|----------------------------------------|-------------------|
| Ilménite                               | 48,3              |
| Limonite                               | 11,6              |
| Zircon                                 | 6,0               |
| Monazite                               | 5,7               |
| Grenat                                 | 5,6               |
| Tourmaline                             | 5,0               |
| Leucoxène                              | 4,9               |
| Sillimanite                            | 4,4               |
| Chrysobéryl                            | 4,0               |
| Amphibole                              | 1,8               |
| Sidérite                               | 0,7               |
| F cal                                  | 230,809           |
| P cal                                  | 0,81%             |
| P théor.                               | > 0,05%           |

L'analyse de la variation des valeurs moyennes (tableau XV) donne pour tous les minéraux, une probabilité calculée supérieure au seuil 0,05 de la probabilité théorique ; ce qui n'indique aucune différence significative.

**Tableau XV:** Abondance relative des minéraux lourds par niveau d'estran à l'Ouest de l'embouchure du fleuve Comoé

| Sources de variation (Minéraux lourds) | Pourcentage moyen |       |      | F calculée | Probabilités (P) |           |
|----------------------------------------|-------------------|-------|------|------------|------------------|-----------|
|                                        | HE                | ME    | BE   |            | Calculée         | Théorique |
| Ilménite                               | 50,8              | 52,50 | 53,7 | 0,1 ns     | 0,8              | > 0,05    |
| Limonite                               | 12,5              | 8,3   | 5,0  | 0,8 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Grenat                                 | 5,0               | 6,6   | 8,7  | 0,8 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Zircon                                 | 5,1               | 5,1   | 5,2  | 0,0 ns     | 0,9              | > 0,05    |
| Chrysobéryl                            | 5,1               | 5,1   | 5,0  | 0,3 ns     | 0,7              | > 0,05    |
| Tourmaline                             | 5,1               | 5,1   | 5,0  | 0,3 ns     | 0,7              | > 0,05    |
| Monazite                               | 5,0               | 5,0   | 3,7  | 1,6 ns     | 0,2              | > 0,05    |
| Sillimanite                            | 4,1               | 4,1   | 5,0  | 0,3 ns     | 0,7              | > 0,05    |
| Leucoxène                              | 4,1               | 5,0   | 2,5  | 2,1 ns     | 0,1              | > 0,05    |
| Sidérite                               | 3,3               | 3,3   | 5,0  | 0,8 ns     | 0,4              | > 0,05    |
| Amphibole                              | 0,3               | 0,1   | 1,2  | 0,9 ns     | 0,4              | > 0,05    |

#### 7-4. MORPHOLOGIE DES MINÉRAUX LOURDS

Les minéraux lourds présentent des formes invariables ou presque (photo 12, 13 et tableau XVI).

Citons le cas du rutile, du zircon, du leucoxène, de la limonite, de l'ilménite (arrondi à très arrondi) et de la sillimanite, de la sidérite, du pyroxène, de l'amphibole (anguleux à subanguleux). D'autres sont présents sous des formes variables, cas de la monazite, de la biotite, du diopside, de l'épidote, du grenat et du chrysobéryl (subarrondi à subanguleux). La morphologie des minéraux montre que le cortège minéralogique provient d'horizon divers. Les minéraux ayant la forme arrondie à très arrondis ont été transportés loin de leur milieu de dépôt. Ceux ayant la forme anguleuse à subanguleux sont proche de leur milieu d'origine.

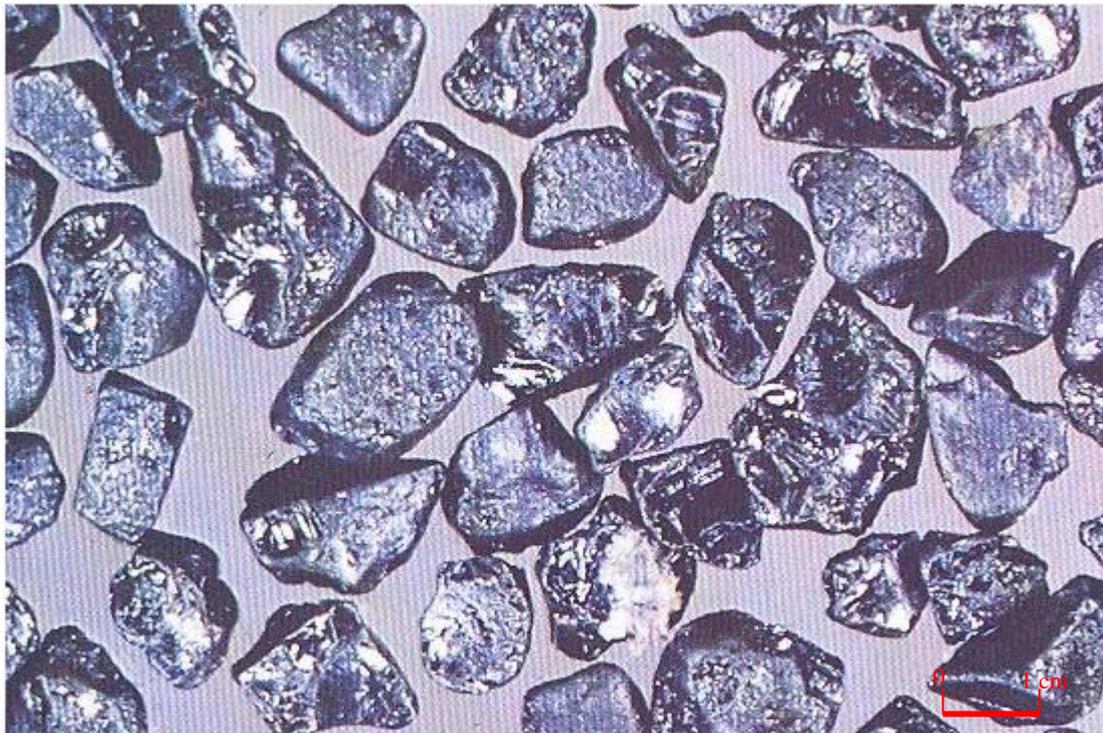
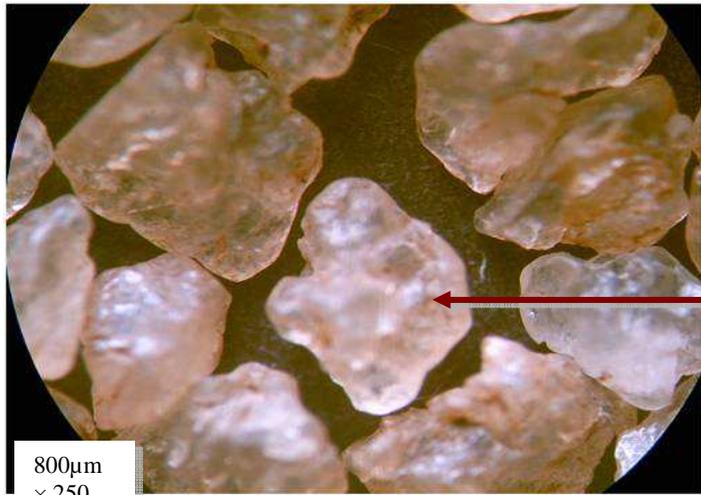
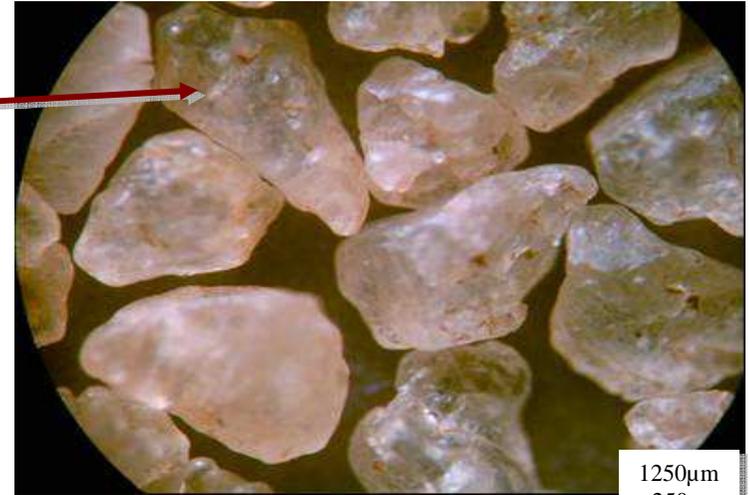


Photo 12: Ilménite magnésienne vue dans le sédiment de sable à l'embouchure du fleuve Comoé



Grain anguleux



Grain sub-anguleux



Grain arrondi



Grain sub-arrondi

Photo13 : Divers aspect morphologiques des grains de quartz de l'embouchure du fleuve Comoé

**Tableau XVI :** Caractéristiques morphoscopiques des minéraux lourds à l’embouchure du fleuve Comoé

| Minéraux    | Juin                                           | Novembre                                   | Septembre                                      | Février                           |
|-------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Amphibole   | Subanguleux à anguleux et aspect peu luisant   | Anguleux et aspect peu luisant             | Anguleux et aspect peu luisant                 | Anguleux et aspect peu luisant    |
| Biotite     | Subarrondi à subanguleux et aspect peu luisant | Subarrondi à subanguleux                   | Subarrondi à anguleux et aspect peu luisant    | Subarrondi à anguleux             |
| Epidote     | Arrondi à subanguleux et peu luisant           | Subarrondi et luisant                      | Arrondi à subanguleux et peu luisant           | Arrondi à subanguleux             |
| Grenat      | Subarrondi à Subanguleux et aspect peu luisant | Subarrondi à subanguleux et aspect luisant | arrondi à Subanguleux et aspect peu luisant    | Subanguleux et aspect luisant     |
| Ilménite    | arrondi et aspect luisant                      | arrondi et aspect luisant                  | arrondi et aspect luisant                      | Arrondi et aspect luisant         |
| Leucoxène   | Arrondi et aspect luisant                      | Arrondi et aspect luisant                  | Arrondi et aspect luisant                      | Arrondi et aspect luisant         |
| Limonite    | arrondi et aspect luisant                      | arrondi et aspect luisant                  | arrondi et aspect luisant                      | arrondi et aspect luisant         |
| Monazite    | Subarrondi à subanguleux et aspect peu luisant | arrondi à subanguleux et aspect luisant    | Subarrondi à subanguleux et aspect peu luisant | subanguleux et aspect peu luisant |
| Pyroxène    | Subanguleux et aspect peu luisant              | Subanguleux et aspect peu luisant          | Subanguleux et aspect très peu luisant         | Subanguleux et aspect peu luisant |
| Rutile      | arrondi et aspect luisant                      | arrondi et aspect peu luisant              | arrondi et aspect peu luisant                  | arrondi et aspect luisant         |
| Sidérite    | Subanguleux et aspect peu luisant              | Subanguleux et aspect peu luisant          | Subanguleux et aspect peu luisant              | Subanguleux et aspect peu luisant |
| Sillimanite | Subanguleux et aspect peu luisant              | Subanguleux et aspect peu luisant          | Subanguleux et aspect peu luisant              | Subanguleux et aspect peu luisant |
| Tourmaline  | arrondi et aspect luisant                      | arrondi et aspect luisant                  | (--)                                           | Arrondi et aspect luisant         |
| Zircon      | Arrondi et aspect luisant                      | Arrondi et aspect luisant                  | Arrondi et aspect luisant                      | Arrondi et aspect luisant         |

(--): Inexistant

## 7-5. MINÉRAUX LÉGERS

L'observation des échantillons révèle la présence de minéraux légers. Dans ce cortège, le quartz est le minéral le plus abondant. Il représente plus de 50% de la totalité de l'échantillon. D'autres minéraux ont été identifiés. Il s'agit des feldspaths et des micas.

L'étude morphoscopique des grains (de quartz) montre que les minéraux en place ont un aspect subarrondi à rond et luisant. Ce qui montre qu'ils ont été transportés très loin de leur milieu d'origine.

Les sédiments bien classés à proximité de l'embouchure témoignent de l'extrême turbulence de cette zone même pendant la phase d'accumulation sableuse. Signalons que pendant les périodes turbulentes, le remaniement sédimentaire laisse aux abords de l'embouchure des sédiments grossiers très bien classés, (photo 14). Ces sédiments sont essentiellement composés de grains de quartz. En effet, les paramètres hydrauliques qui agissent sur cette zone sont complexes. Les allées et venues des vagues, le mouvement oscillatoire des masses d'eau dû à la marée remanient sans cesse les sédiments à l'embouchure. Les méga rides, structures sédimentaires rencontrées sur la plage en marée basse sont les témoins de la grande force du courant à cet endroit (photo 15).

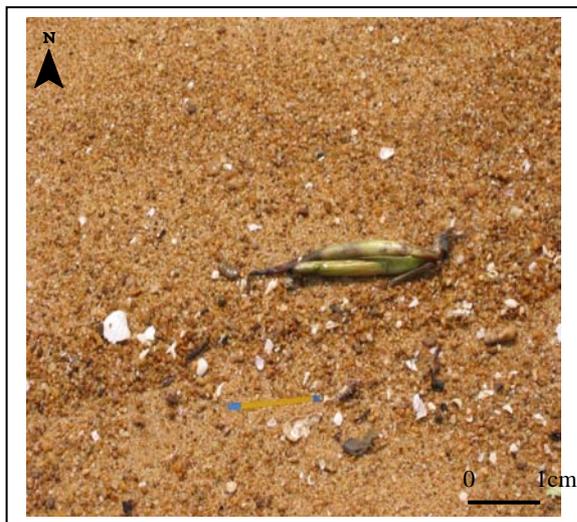


Photo 14 : Sables grossiers, débris de coquille et de végétaux aux abords de l'embouchure

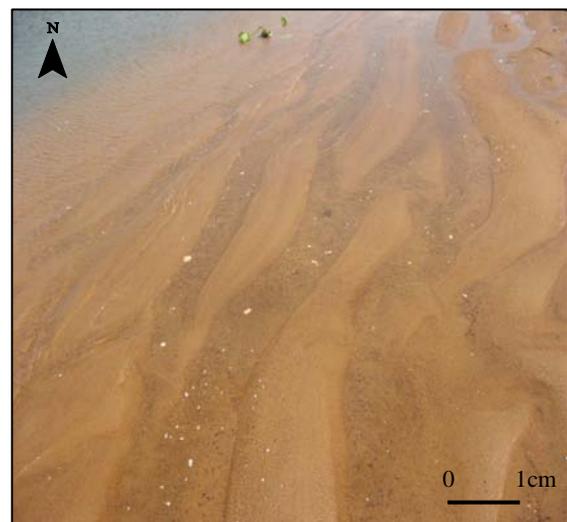


Photo 15 : Méga rides observées sur les rives en marée basse

## 7-6. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA PLAGE

Le suivi morphologique des plages a été réalisé dans sept (7) stations. Présentons l'évolution des différents profils en relation avec les cycles saisonniers afin d'en dégager leur dynamisme.

### **7-6-1. Evolution des profils de la station 1 (à 800 m à l'Ouest de l'embouchure)**

#### *Grande saison des pluies (Juin 2006)*

Le profil est découvert sur une longueur de 49 m de la plage ancienne à la laisse de la basse mer. La plage est caractérisée par une forte pente du HE au BE avec un léger adoucissement vers le ME (figure 36).

#### *Petite saison sèche (Août 2006)*

La longueur du profil a sensiblement diminuée passant de 49 m à 38 m. On observe sur l'ensemble du profil deux phénomènes :

- le profil est en dessous du précédent tout au long du haut et mi-estran la plage. Ce qui fait apparaître une érosion ;
- au BE, le profil change de position. Il est au dessus du profil du mois de juin. On enregistre donc un engraissement de la plage.

#### *Petite saison des pluies (octobre 2006)*

Le profil est découvert sur une longueur de 42 m avec une pente relativement importante.

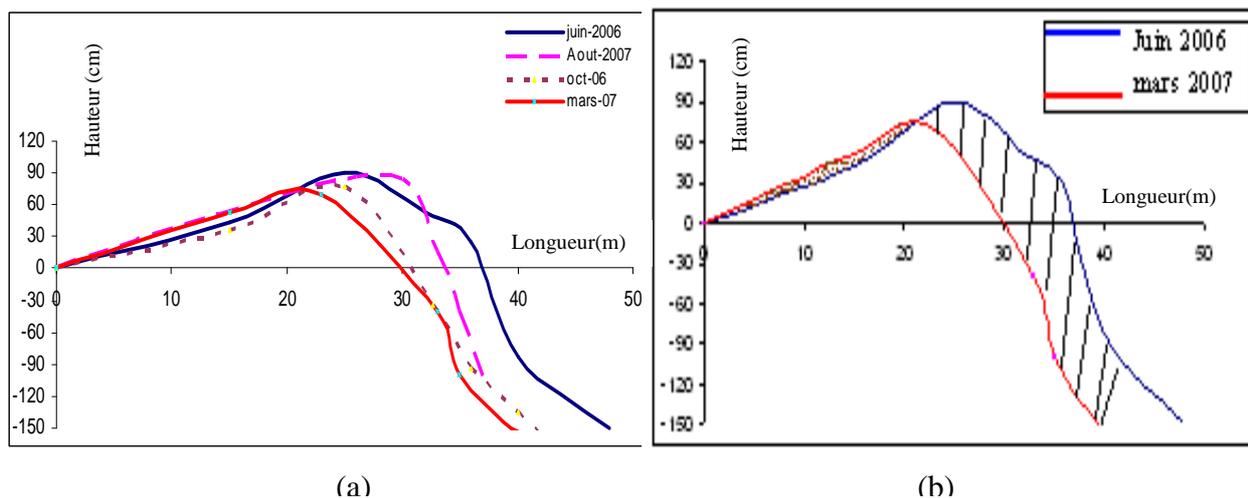
Sur le plan morphologique, on observe les variations suivantes :

- le profil est en dessous du précédent au mi et bas estran. La tendance est donc à l'érosion.
- ce profil se superpose sur le précédent au haut estran. On assiste à une stabilité de la plage.

#### *Grande saison sèche (mars 2007)*

Le profil de ce mois reste quasi identique à celui du mois d'octobre. On ne note pas de variations morphologiques. Cependant, au haut-estran on assiste à un léger engraissement de la plage.

La comparaison des profils des mois de juin 2006 et de mars 2007 montre que la longueur du profil est passée de 49 m à 40 m, soit une diminution de 9 m. Ce qui montre une légère avancée de la mer par rapport au continent. Sur le plan morphologique, le profil du mois de juin est au dessus de celui de mars 2007 au HE et au BE. On enregistre donc une érosion. Toute fois, au HE, nous enregistrons le phénomène contraire, conséquence d'un engraissement de la plage.



**Figure 36:** Levés des profils de la station 1 (a : profil à différentes dates ; b : Profils comparatifs entre le premier et le dernier profil).

### 7-6-2. Evolution des profils de la station 2 (à 600 m à l'Ouest de l'embouchure)

#### *Juin 2006*

C'est la période de la grande saison des pluies. Le profil à cette station a une longueur de 36 m avec la formation d'une berme à 20 m. Il présente une allure concave avec une très forte pente (figure 37).

#### *Août 2006*

C'est la période de la petite saison sèche. On observe sur l'ensemble du profil deux phénomènes.

- au niveau du haut estran, le profil est en dessous du précédant. Ce qui fait apparaître une érosion à ce niveau de la plage ;
- puis il se situe au dessus au niveau du mi et bas estran. Le phénomène observé est l'engraissement de la plage. On constate que la pente du HE s'est adoucie pour devenir une zone relativement plate au niveau du ME avant de replonger au bas de plage.

#### *Octobre 2006*

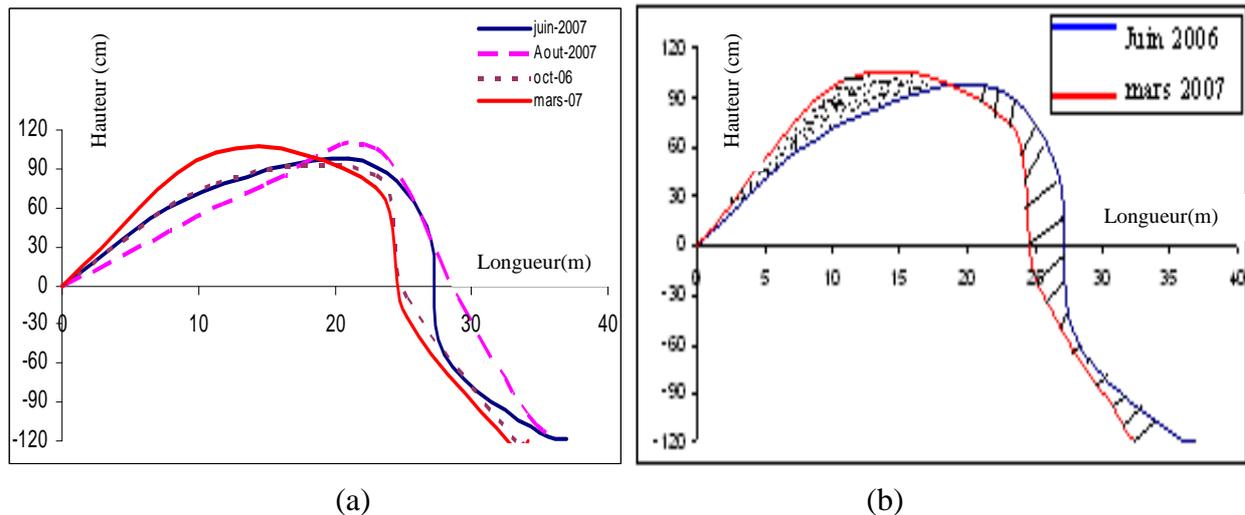
Au cours de cette période de petite saison des pluies, on observe un phénomène contraire à celui d'août. On a un engraissement au haut estran suivi d'une érosion au mi et bas estran.

#### *Mars 2007*

Au cours de cette période de la grande saison sèche, la morphologie de la plage n'a pas changé. On constate un engraissement au haut estran puis une érosion au mi et bas estran.

La comparaison des profils des mois de juin 2006 et de mars 2007 montre que la longueur du profil est passée de 35 m à 30 m, soit une diminution de 5 m. Ce qui montre une avancée de la mer par rapport au continent.

Sur le plan morphologique, le profil du mois de MARS 2006 est au dessus de celui de JUIN 2007 au HE. Il s'agit donc d'un engraissement de la plage. Du ME au BE des même périodes, on constate que le profil du mois récent est en dessous du mois ancien. On enregistre donc une érosion généralisée.



**Figure 37:** Levés des profils de la station 2 (a: Profils à différentes dates ; b : Profils comparatifs entre le premier et le dernier profil).

### 7-6-3. Evolution des profils de la station 3 (à 400 m à l'Ouest de l'embouchure)

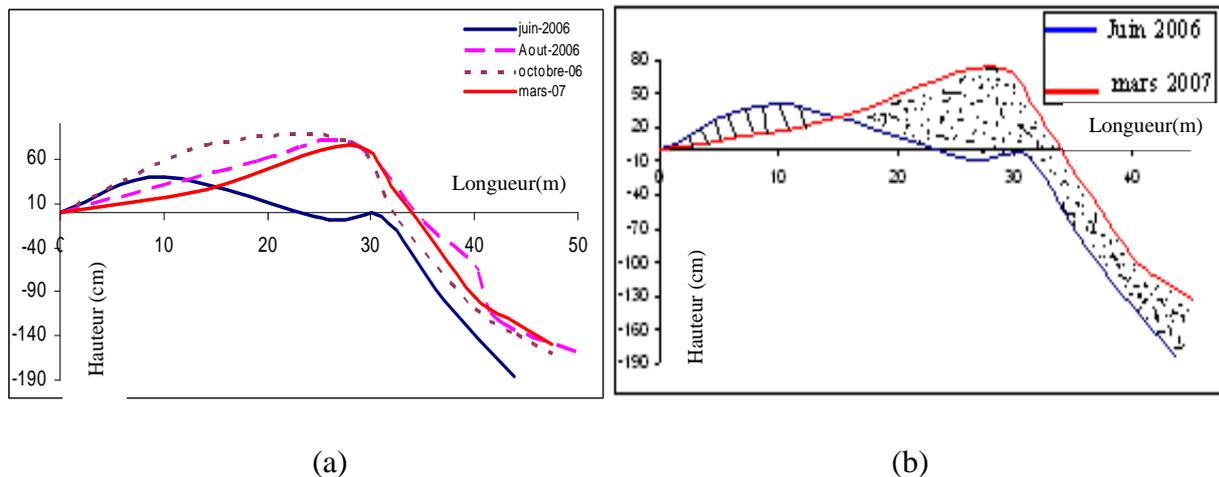
Ce profil au niveau du haut de plage (figure 38) montre une tendance générale à l'érosion de juin à octobre 2006. Il s'agit d'une érosion continue nettement marquée pendant la saison des pluies alors que pendant la saison sèche (octobre 2007), le profil est relativement stable. Cette stabilité se retrouve à la saison sèche de mars 2007 après un engraissement de fin de saison des pluies. Pendant cette période, la longueur du profil a augmentée par rapport au profil précédent et mesure 50 m. Ce qui montre un recul de la mer sur le continent. On observe sur l'ensemble du profil deux phénomènes :

- une petite érosion au haut estran et ;
- un engraissement généralisé au niveau du mi et bas estran de la plage.

L'évolution du profil du bas de plage apparaît ici très mouvementée : à des fortes périodes d'érosion succèdent des périodes d'engraissement. Ainsi un recul prononcé de la plage s'observe d'août à octobre 2006. Les apports de sédiments qui suivent sont perturbés par des érosions sporadiques faibles d'octobre à mars 2007.

La comparaison des profils des mois de juin 2006 et de mars 2007 montre que la longueur du profil n'a pas changé.

Sur le plan morphologique, le profil du mois de MARS 2006 est en dessous de celui de JUIN 2007 au HE. Il s'agit donc d'une érosion de la plage. Du ME au BE des même périodes, on contact que le profil du mois récent est au dessus du mois ancien. On enregistre donc un engraissement généralisée. De plus, on constat que l'épaisseur de dépôt est plus important au ME et avoisine les 30 m.

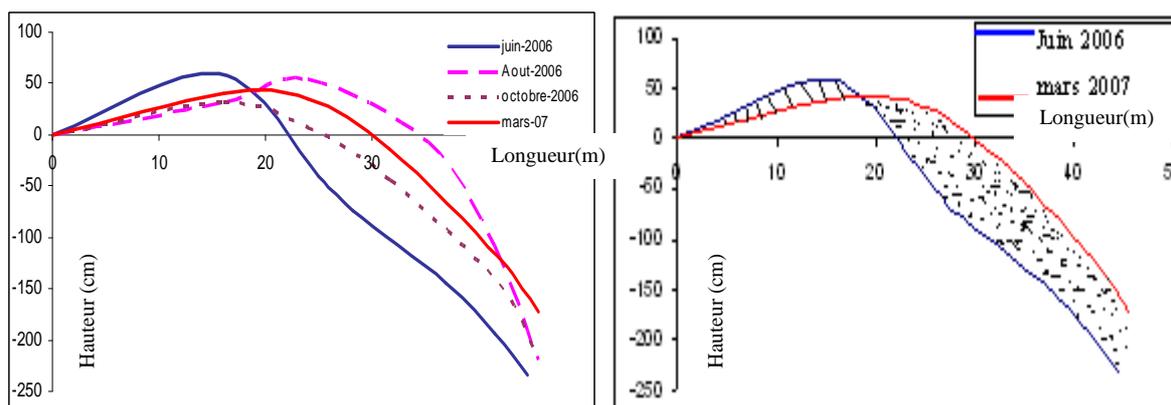


**Figure 38:** Levés des profils de la station 3 (a : Profils à différentes dates ; b : profils comparatifs entre le premier et le dernier profil).

#### 7-6-4. Evolution des profils à l'embouchure

Long de 48 m en juin 2006, le profil garde sensiblement sa même mesure en mars 2007. Le haut de plage reste sensiblement constant pendant toute la période d'étude. Cependant, une petite fluctuation d'amplitude très forte apparaît avec une érosion en saison des pluies et un engraissement en saison sèche. Les fluctuations du bas de plage (figure 39) sont d'amplitude relativement plus forte. Des petites phases d'érosions alternent avec des petites phases d'engraissement. Les mois d'août et mars se singularisent par des fortes pointes d'engraissement.

Le suivi des profils de plage, sur un cycle saisonnier, a permis d'apprécier les mouvements sédimentaires au droit de l'embouchure du fleuve Comoé. Long de 48 m, le profil situé dans l'axe de l'embouchure garde sensiblement la même longueur au cours des saisons (figure 3). La morphologie de la plage subit des fluctuations plus importantes au bas estran. La comparaison des profils de juin 2006 à mars 2007 révèle une érosion au haut estran et un engraissement au moyen et au bas estran. Les épaisseurs de dépôts atteignent 1 m par endroits. L'épaisseur moyenne annuelle de dépôts est de l'ordre de 60 cm



(a)

(b)

**Figure 39:** Levés des profils de la station 4 (a : Profils à différentes dates ; b : Profils comparatifs entre le premier et le dernier profil).

#### 7-6-5. Evolution des profils de la station 5 (à 200 m à l'Est de l'embouchure)

La courbe cumulative des variations du profil de haut estran (figure 39) montre une érosion hivernale de juin 2006 à mars 2007.

En juin 2006, le profil a une longueur de 55 m avec la formation de deux bermes à 20 et 40 m du point de départ (figure 40). Le profil présente une allure concave avec une très forte pente. En août 2006, la longueur du profil a sensiblement diminué par rapport au profil précédent et mesure 53 m. Soit une avancée de la mer d'environ 2 m sur le continent. Le profil subit un mouvement sédimentaire faisant déplacer les bermes respectivement à 25 m et 35 m. Dans l'ensemble, le profil est au dessus du précédent sur toute sa longueur. On observe donc un engraissement de la plage. Le bas de plage est caractérisé par un comportement très mouvementé de la plage

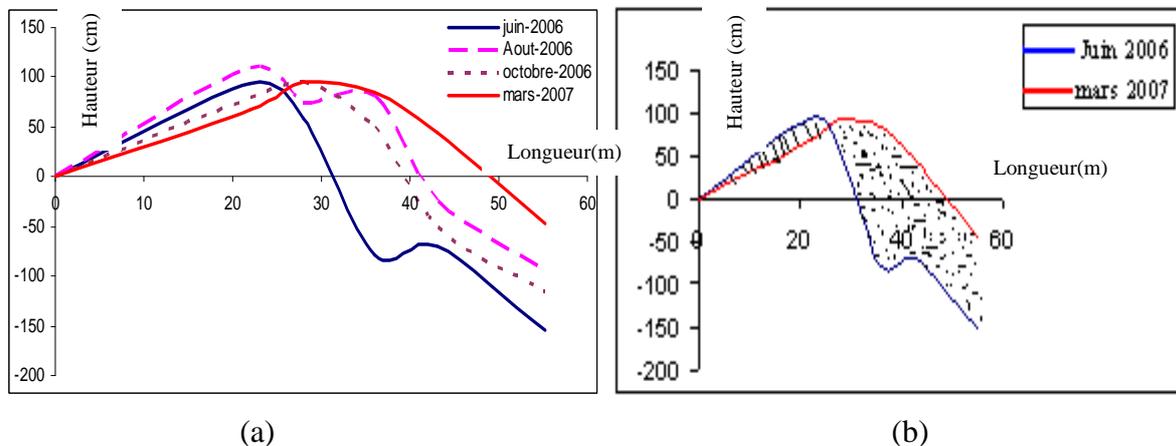
De juin à août 2006, les phases d'érosions alternent avec des périodes d'engraissements.

En mars 2007, le profil mesure 55 m. Sa longueur a augmentée de 2 m et correspond à une avancée du continent sur la mer. Le HE subi une érosion qui se prolonge au ME. On constate par la suite que la plage se reconstitue par un engraissement au mi et bas estran.

La comparaison des profils des mois de juin 2006 et de mars 2007 (figure 40-b) montre une érosion au haut estran et un engraissement sur le reste de la plage. La longueur du profil a augmenté de 55 à 58 m soit une augmentation de 3 m. Il y a eu une avancée de la mer sur le continent.

Sur le plan morphologique, le profil du mois de MARS 2006 est en dessous de celui de JUIN 2007 au HE. Il s'agit donc d'une petite érosion de la plage. Du ME au BE des même périodes,

on contact que le profil du mois récent est au dessus du mois ancien. On enregistre donc un engraissement généralisée. Les épaisseurs de dépôts atteignent 1,5 m par endroits. L'épaisseur moyenne annuelle de dépôts est de l'ordre de 100 cm.



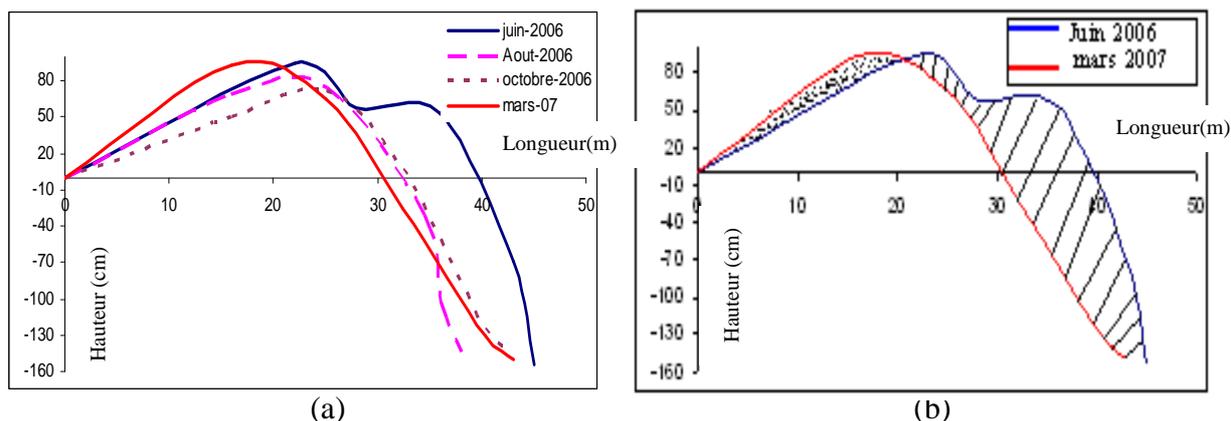
**Figure 40:** Levés des profils de la station 5 ; (a: Profils à différentes dates ; b: Profils comparatifs entre le premier et le dernier profil).

#### 7-6-6. Evolution des profils de la station 6 (à 400 m à l'Est de l'embouchure)

D'une longueur de 45 m au début des mesures (juin 2006), ce profil passe à 42 m en mars 2007 (figure 41). Il est également peu incliné et est en engraissement rapide. Les variations morphologiques affectent toute la plage. Ainsi, on observe en octobre 2006, une érosion sur le haut estran suivie d'un petit engraissement au ME, qui s'achève au bas estran (BE). La longueur du profil reste inchangée.

Au mois de mars 2007, la longueur du profil demeure inchangée. Il est caractérisé par un croissant de plage assez développé qui montre une pente très raide au HE. Au niveau du HE (haut-estran) la courbe est au dessus de la précédente. On assiste donc à un engraissement de la plage. Le phénomène contraire s'observe au niveau du BE (bas-estran). Il se produit une érosion à ce niveau.

Le suivi des profils de plage, sur un cycle saisonnier, a permis d'apprécier les mouvements sédimentaires au droit de l'embouchure du fleuve Comoé. Long de 45 m en juin 2006, le profil du mois de mars 2007 diminue sensiblement sa longueur au cours de l'année. Il a eu une avancée de la mer sur le continent. Au plan morphologie la plage subit des fluctuations plus importantes au ME et au bas estran. La comparaison des profils de juin 2006 à mars 2007 révèle un engraissement de la plage au haut estran et une érosion au haut estran. Les épaisseurs de sable enlevé atteignent 90 cm par endroits. L'épaisseur moyenne annuelle de dépôts est de l'ordre de 40 cm



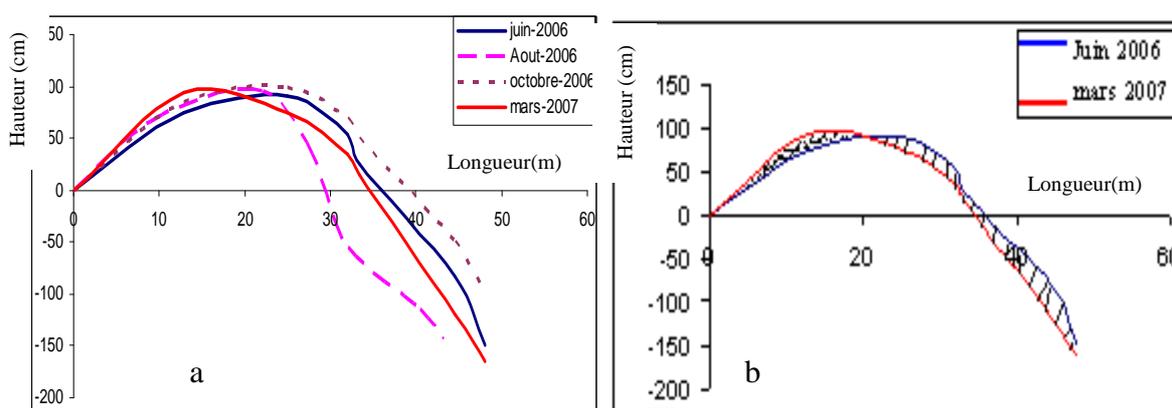
**Figure 41:** Levés des profils de la station 6 ; (a: Profils à différentes dates ; b: comparaison entre le premier et le dernier profil).

### 7-6-7. Evolution des profils de la station 7 (à 600 m à l'Est de l'embouchure)

De 50 m en juin 2006, elle diminue jusqu'à 43 m en août 2006 et se stabilise sur le reste des périodes (figure 42). Les variations morphologiques du haut estran se caractérisent par un engraissement pendant le début de la saison des pluies. Le début de la petite saison des pluies est marquée par un nouvel engraissement (octobre 2006), qui se prolonge par une nouvelle période de stabilisation qui se maintient jusqu'au mi-estran. L'évolution du bas de plage est marquée par deux périodes distinctes de comportement différent :

- une période érosive allant de juin à août 2006 et d'octobre à mars 2007 ;
- une période de dépôt comprise entre août et octobre 2006.

Dans le détail, la saison des pluies du début de la première période correspondant à une intense érosion qui s'achève en octobre 2006. On note un engraissement au mois suivant.

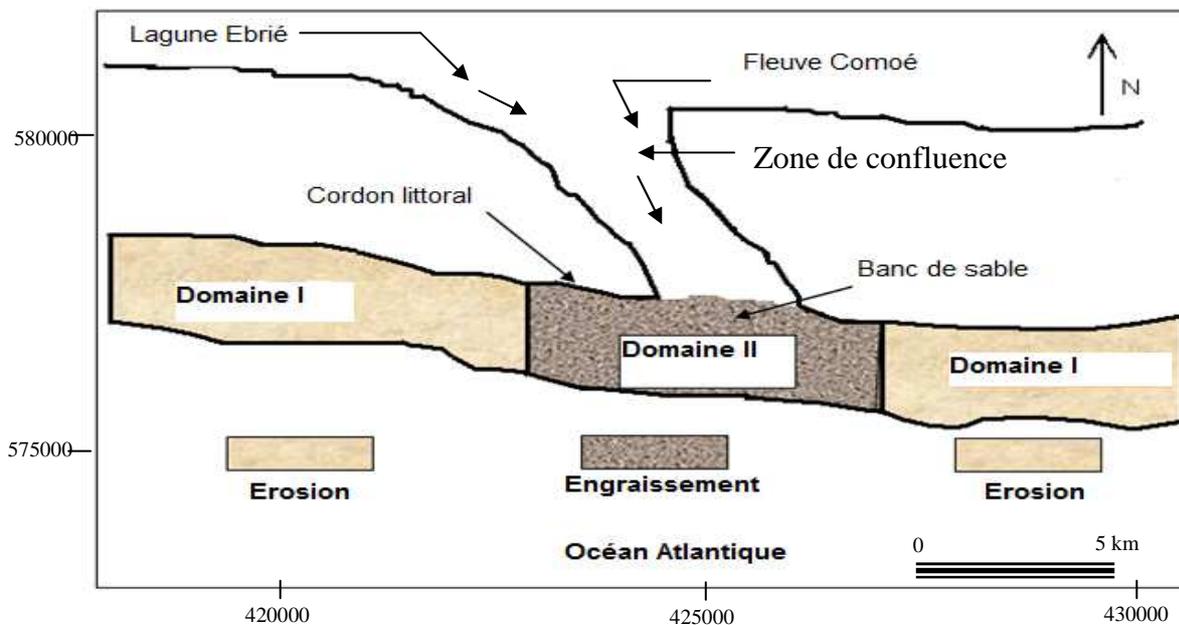


**Figure 42:** Levés des profils de la station 7 ;(a : Profils à différentes dates ; b: comparaison entre le premier et le dernier profil).

La comparaison des profils des mois de juin 2006 et de mars 2007 montre que la longueur du profil est sensiblement identique

Au plan morphologique, le profil du mois de MARS 2006 est en dessous de celui de JUIN 2007 au HE. L'épaisseur moyenne de dépôt est de l'ordre de 10 cm Il s'agit donc d'un petit engraissement de la plage. Du ME au BE des même périodes, on contact que le phénomène contraire au précédent. On enregistre donc une érosion de la plage.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'existence de deux domaines (figure 43) :



**Figure 43 :** Mouvements sédimentaires à l'embouchure du fleuve Comoé

- **Le domaine I**, représenté par les stations 1, 2, 6 et 7 est influencé essentiellement par la dynamique sédimentaire naturelle qui se traduit par une dérive littorale de sable d'Ouest en Est. On enregistre un engraissement périodique et saisonnier lié à l'hivernage et aux tempêtes. Les stations dans ce domaine, malgré les protections de fortunes artisanales des lieux d'habitations, restent sensibles aux attaques érosives. On remarque que ces stations subissent une érosion intensive et continue quelque soit la période (tableau XVII).
- **Le domaine II**, représenté par les stations 3, 4 et 5 est influencé par le dynamisme fluvial créé à l'embouchure du fleuve. L'embouchure étant l'exutoire du fleuve, bénéficie des échanges fleuve-océan. Le transit sédimentaire qui se fait de l'Ouest vers l'Est est perturbé. On assiste donc à un développement d'un banc de sable au fur et à mesure que les dépôts ont lieu à l'embouchure.

**Tableau XVII :** Synthèse morpho-sédimentaire et granulométrique de l'embouchure du fleuve Comoé.

| Station | Erosion continue | Engraissement | Granulométrie    |
|---------|------------------|---------------|------------------|
| 1       | ( - )            |               | Moyen à Grossier |
| 2       | ( - )            |               | Moyen à Grossier |
| 3       |                  | ( + )         | Moyen à Grossier |
| 4       |                  | ( + )         | Moyen à Grossier |
| 5       |                  | ( + )         | Moyen à Grossier |
| 6       | ( - )            |               | Moyen à Grossier |
| 7       | ( - )            |               | Moyen à Grossier |

### 7-7. REMANIEMENTS SEDIMENTAIRES ANNUELS DE LA PLAGE

Nous faisons ici une étude comparée des stations d'une saison à l'autre en analysant l'évolution sur 1 an à partir des mois caractéristiques. Pour ce faire, il est indiqué de calculer le volume de sable érodé ou engraisé de tous les profils. Le tableau ainsi obtenu permet de visualiser l'évolution saisonnière de chaque profil, grâce à l'individualisation des zones érodées et des zones engraisées. Il est alors possible de faire une synthèse sur toute la plage.

#### 7-7-1. Estimation des mouvements sableux entre Juin et Juillet 2006

Les stations les plus éloignées de l'embouchure (1 et 2) à l'Est et (6 et 7) à l'Ouest ont subi une érosion. Cependant, celles proches de l'embouchure (3, 4 et 5) subissent un engraissement. Ainsi, de juin à juillet 2006, la somme des surfaces érodées sur le profil 1 est de 9,7 m<sup>2</sup> tandis que seulement 4,70 m<sup>2</sup> sont engraisés (tableau XVIII).

**Tableau XVIII:** Tendence évolutive de la plage (embouchure du fleuve Comoé) selon les données de surfaces érodées ou accumulées entre Juin et Juillet 2006.

| Station | surfaces érodées (m <sup>2</sup> /linéaire) | Volume de sable érodé (m <sup>3</sup> ) | surfaces engraisées (m <sup>2</sup> /linéaire) | Volume de sable déposé (m <sup>3</sup> ) | Différence (m <sup>2</sup> ) | Tendance évolutive |
|---------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1       | 9,7                                         | 1940                                    | 4,70                                           | 940                                      | -5                           | Erosion            |
| 2       | 8,41                                        | 1682                                    | 5,2                                            | 1040                                     | -3,21                        | Erosion            |
| 3       | 6,75                                        | 1350                                    | 13                                             | 2600                                     | +6,25                        | Engraissement      |
| 4       | 5,50                                        | 1100                                    | 15                                             | 3000                                     | +10,5                        | Engraissement      |
| 5       | 6,5                                         | 1310                                    | 25                                             | 5000                                     | +19,5                        | Engraissement      |
| 6       | 11,72                                       | 2354                                    | 6,68                                           | 1336                                     | -5,04                        | Erosion            |
| 7       | 10,7                                        | 2140                                    | 5,58                                           | 1116                                     | -5,12                        | Erosion            |

En considérant la distance entre deux stations qui est de 200 m on peut estimer le volume total de sédiments déposés sur l'ensemble du profil. Ainsi 14092 m<sup>3</sup> de sédiments se sont déposés contre un volume de 11856 m<sup>3</sup> érodés. La tendance générale dans la zone d'étude durant cette période est à l'engraissement.

### 7-7-2. Estimation des mouvements sableux entre Août et Septembre 2006

Les sédiments de la plage ont été peu remaniés. Cependant, on assiste à des phénomènes d'érosion à l'Est de l'embouchure dans les stations éloignées de l'embouchure. D'une manière générale, la plage s'est engraisée sauf à la station 4 située dans la passe du fleuve Comoé. Le tableau XIX présente la synthèse des surfaces érodées par rapport à celles engraisées.

**Tableau XIX:** Tendance évolutive de la plage (embouchure du fleuve Comoé) selon les données de surfaces érodées ou accumulées entre août et septembre 2006.

| Profil | Total surfaces érodées (m <sup>2</sup> /linéaire) | Volume de sable déplacé (m <sup>3</sup> ) | Total surfaces engraisées (m <sup>2</sup> /linéaire) | Volume de sable déposé (m <sup>3</sup> ) | Différence (m <sup>2</sup> ) | Tendance évolutive |
|--------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1      | 11,8                                              | 2360                                      | 7,1                                                  | 1420                                     | -4,7                         | Erosion            |
| 2      | 5,3                                               | 1060                                      | 42                                                   | 8400                                     | +36,7                        | Engraissement      |
| 3      | 9,4                                               | 1880                                      | 30                                                   | 6000                                     | +20,6                        | Engraissement      |
| 4      | 10,61                                             | 2122                                      | 6,8                                                  | 1360                                     | -3,19                        | Erosion            |
| 5      | 7,2                                               | 1440                                      | 35                                                   | 7000                                     | +27,8                        | Engraissement      |
| 6      | 9,3                                               | 1860                                      | 60                                                   | 12000                                    | +11,75                       | Engraissement      |
| 7      | 7,3                                               | 1460                                      | 51                                                   | 10200                                    | +43,7                        | Engraissement      |

Au cours de cette période d'étude, le volume de sables érodés et déplacés est de 12182 m<sup>3</sup> contre 70560 m<sup>3</sup> de sables déposés. La tendance générale dans la zone d'étude durant cette période est à l'engraissement.

### 7-7-3. Estimation des mouvements sableux entre Octobre et Novembre 2006

Sur l'ensemble des profils, la morphologie de la plage reste identique. On assiste à un phénomène d'érosion généralisée. Cependant, plus à l'Est de l'embouchure (profil 1), on constate que la plage a subi un engraissement au niveau du bas-estran (tableau XX). Au cours de cette période d'étude, le volume de sable érodé et déplacé est de 20586 m<sup>3</sup> contre 12766 m<sup>3</sup>. La tendance générale dans la zone d'étude durant cette période est à l'érosion.

**Tableau XX :** Tendance évolutive de la plage (embouchure du fleuve Comoé) selon les données de surfaces érodées ou accumulées entre octobre et novembre 2006

| Profils | surfaces érodées (m <sup>2</sup> /linéaire) | Volume de sable déplacé (m <sup>3</sup> ) | surface engraisée (m <sup>2</sup> /linéaire) | Volume de sable déposé (m <sup>3</sup> ) | Différence (m <sup>2</sup> ) | Tendance évolutive |
|---------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1       | 5,03                                        | 1100                                      | 9,6                                          | 1920                                     | +4,57                        | Engraissement      |
| 2       | 11,19                                       | 2238                                      | 7,26                                         | 1452                                     | -3,93                        | Erosion            |
| 3       | 20,57                                       | 4094                                      | 10,57                                        | 2114                                     | -10                          | Erosion            |
| 4       | 19,9                                        | 3920                                      | 12,9                                         | 2580                                     | -7                           | Erosion            |
| 5       | 16,91                                       | 3382                                      | 9,5                                          | 1900                                     | -7,41                        | Erosion            |
| 6       | 16,82                                       | 3364                                      | 6,5                                          | 1300                                     | -10,32                       | Erosion            |
| 7       | 12,51                                       | 2502                                      | 7,45                                         | 1550                                     | -5,06                        | Erosion            |

#### 7-7-4. Estimation des mouvements sableux entre Mars et Avril 2007

Sur l'ensemble de la plage considérée, l'on observe un dépôt général de sédiments à l'Ouest et à l'Est de l'embouchure du fleuve Comoé. Cependant, quelques surfaces d'érosions s'observent sur le haut-estran à l'Ouest et sur le bas-estran du côté Est. En terme de bilan, l'accrétion ou l'érosion des plages en termes de volume est présentée dans le tableau XXI.

Au cours de cette période d'étude, le volume de sable érodé et déplacé est de 15438 m<sup>3</sup> contre 37780 m<sup>3</sup> de sables déposés. La tendance générale dans la zone d'étude durant cette période est à l'engraissement.

**Tableau XXI :** Tendance évolutive de la plage (embouchure du fleuve Comoé) selon les données de surfaces érodées ou accumulées entre mars et avril 2007.

| Profils | Total surface érodée (m <sup>2</sup> ) | Volume de sable déplacé (m <sup>3</sup> ) | Total de Surface engraisées (m <sup>2</sup> ) | Volume de sable déposé (m <sup>3</sup> ) | Différence (m <sup>2</sup> ) | Tendance évolutive |
|---------|----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1       | 22,5                                   | 4500                                      | 8,4                                           | 1680                                     | -14,1                        | Erosion            |
| 2       | 7,97                                   | 1594                                      | 25                                            | 5000                                     | +17,03                       | Engraissement      |
| 3       | 8,98                                   | 1796                                      | 35                                            | 7000                                     | +26,02                       | Engraissement      |
| 4       | 9,07                                   | 1814                                      | 42                                            | 8400                                     | +32,93                       | Engraissement      |
| 5       | 9,5                                    | 1900                                      | 50                                            | 10000                                    | +40,5                        | Engraissement      |
| 6       | 10,02                                  | 2004                                      | 21                                            | 4200                                     | +10,98                       | Engraissement      |
| 7       | 9,15                                   | 1830                                      | 7,50                                          | 1500                                     | -2,45                        | Erosion            |

Les différents résultats obtenus au niveau de chaque profil suivant les saisons permettent de dresser le bilan sédimentaire au niveau de l'embouchure du fleuve Comoé entre juin 2006 et mars 2007.

#### 7-7-5. Synthèse de l'évolution de la plage à l'embouchure du fleuve Comoé

Une analyse des évolutions morphologiques, entre juin 2006 et mars 2007 montre que la partie Ouest de l'embouchure du Comoé présente une tendance croissante au dépôt de sédiment alors que la partie Est présente une tendance à l'érosion. Le bilan sédimentaire montre que la tendance générale est au dépôt (tableau XXII).

**Tableau XXII:** Estimation du volume total de sables (Juin 2006 à Avril 2007 des 7 stations)

| Périodes                                  | Juin - Juil | Août - Sept | Oct - Nov | Mar – Avr. | Total des volumes |
|-------------------------------------------|-------------|-------------|-----------|------------|-------------------|
| Surface érodée (m <sup>2</sup> )          | 59,28       | 60,91       | 102,93    | 77,19      | 300,31            |
| Surface engraisée (m <sup>2</sup> )       | 75,16       | 231,9       | 63,88     | 187,9      | 558,84            |
| Volume de sable déplacé (m <sup>3</sup> ) | 41856       | 32182       | 30586     | 45438      | <b>-120.062</b>   |
| Volume de sable déposé (m <sup>3</sup> )  | 114812      | 228680      | 128776    | 445260     | <b>+880.520</b>   |
| Différence (m <sup>3</sup> )              | +72956      | +196498     | -98190    | +389822    | <b>+760.458</b>   |
| Tendance évolutive                        | Dépôt       | Dépôt       | Erosion   | Dépôt      |                   |

A l'embouchure du fleuve Comoé, s'accumule un important volume de sable formant un banc de sable de 50 m de long qui empêche désormais le contact entre le fleuve et la mer. Les surfaces totales érodées à l'Est et à l'Ouest de l'embouchure indiquent que même si pendant la période d'étiage la plage se reconstitue, cette reconstitution n'est pas totale.

Le bilan morpho-sédimentaire des stations (1 à 7) réalisé à partir de levés de terrain entre juin 2006 et mars 2007 montre que le volume de dépôt est estimé à 880.520 m<sup>3</sup> contre 120.062 m<sup>3</sup> de sables érodées ; soit un apport de **+760.458 m<sup>3</sup>** de sédiments.

#### 7-8. DISCUSSION

##### - Distribution des facies granulométriques

La taille des grains des sédiments sableux croit du haut estran au bas estran sauf en octobre 2006 où on a une tendance contraire à l'Ouest de l'embouchure. Par ailleurs, les

sédiments sont plus grossiers à l'Ouest qu'à l'Est de l'embouchure. Ils sont, en général, de plus en plus grossiers du haut estran (HE) vers le bas estran (BE) et de l'Ouest vers l'Est.

Les pourcentages élevés de minéraux lourds sur le HE se justifient par la faiblesse des courants de retour qui n'arrivent pas à ramener vers le large les minéraux lourds déposés par les courants littoraux.

Le skewness indique des valeurs allant de -0,15 à 0,14. Les valeurs négatives sont en générales obtenues à l'Ouest de l'embouchure et au HE. A ce niveau, les éléments fins sont mieux triés. Dans la partie Est, la morphologie des sables est à une symétrie granulométrique. Cette tendance de l'évolution de la granulométrie confirme les travaux de COFFIE (2002). La majorité des minéraux lourds se présentant dans une forme arrondie et sous un aspect luisant. Cela confirme l'origine continentale de ces minéraux. On constate également que les sables ont une coloration rousse, ce qui témoigne de la présence d'oxyde de fer MARTIN, (1987).

#### **- Minéraux lourds**

Au cour des quatre (4) saisons, on a constaté que le pourcentage de l'ilménite est plus élevé sur tous les estrans. En effet l'ilménite est un minéral largement représentée dans les sédiments. Etant très résistante aux agents de transport et à l'érosion, elle arrive à se concentrer en quantité importante dans certains cordons ou sur certaines plages ou elle constitue alors des gisements exploitables. Cette étude a montré que la probabilité des pourcentages des minéraux calculée varie et reste supérieure à la probabilité théorique. Ce qui indique que la différence entre les pourcentages est non significative. A l'embouchure du Comoé, le pourcentage observé de l'ilménite est très négligeable. Une exploitation n'est donc pas souhaitable. Toute fois, il sera intéressant de mener une étude encore plus approfondie dans la zone, vu le nombre important de minéraux lourds rencontrés.

A l'embouchure du Bandama, les études de KOUAKOU (2004) et de KESSE (2008) ont révélées l'abondance de l'ilménite. De plus la probabilité des pourcentages des minéraux calculés varie et reste inférieure à la probabilité théorique.

#### **- Morphologie**

La faible largeur de la plage aérienne et la présence des croissants de plage permettent de décrire la plage au niveau de l'embouchure du Comoé comme étant des plages réfléchives, comparables à celles décrites par YACE (1979) et SHORT (1980). La formation des croissants de plage est attribuée à l'action de différents mécanismes tels que le « swash », les courants d'arrachement et les mécanismes de propagation de la houle. Cette étude a montrée

que les mouvements verticaux, déduits de la comparaison des profils mensuels sont de deux types. Il s'agit des mouvements d'érosion et d'engraissement. Nos résultats sont en accord avec ceux de WOGNIN (2004) à l'embouchure du fleuve Bandama et sur le cordon littoral par ABE (2005). L'observation des profils montre que le haut de plage subit une légère érosion. La tendance à l'érosion des secteurs du côté Est et Ouest de l'embouchure peut être mise en relation avec la nature même de la plage. En effet, WRIGHT *et al.* (1979) et ABE (2005) rapportent que les plages réfléchives, bien que représentant le stade ultime d'une séquence d'accrétion, sont très sensibles à l'érosion à cause du faible stockage sédimentaire. Aussi, toute modification négative, même minimale, de ce stock sédimentaire accentue-t-elle leur sensibilité à l'érosion. Ce constat a été également fait par YACE (1979) qui note une tendance au dépôt sur 300 m de plage de part et d'autre de l'embouchure du Comoé avec un déficit sédimentaire de la plage aérienne de l'ordre de 45000 m<sup>3</sup>.

La nouvelle morphologie créée par la perturbation reste le plus souvent transitoire, car la plage tend à retrouver la morphologie initiale ANTIA (1989). L'augmentation ou la diminution des longueurs des profils pourrait être liée à l'action des vagues. Elle influe sur l'avancée ou sur le recul de la mer par rapport au continent. L'observation des surfaces érodées à l'Est et à l'Ouest de l'embouchure permet de dire que même si pendant la période calme, la plage est reconstruite. Cette reconstruction n'est pas suffisante pour parer à l'effet dévastateur de l'érosion. L'évolution normale et progressive d'un profil peut être perturbée par l'avènement d'une tempête.

Les profils situés à proximité de la passe continuent d'être engraisés par les apports fluviaux associés aux sédiments issus de l'érosion du cordon Est et Ouest du littoral. En effet, nos résultats ont montré que les stations les plus éloignées de part et d'autre de l'embouchure ont subi le phénomène d'érosion et celles situées à proximités sont soumises à l'engraissement.

Le pourcentage élevé des minéraux lourds en septembre et novembre 2005 (période de hautes eaux) et un faible pourcentage en février 2006 (période de basses eaux) traduit la présence des apports du fleuve Comoé dans les dépôts à l'embouchure. En effet, les périodes de septembre et novembre correspondent aux périodes de crue pendant lesquelles le fleuve Comoé dispose d'assez d'énergie pour transporter la plus grande quantité de matériaux (TASTET, 1979).

## **Conclusion**

L'étude réalisée a révélé que les sédiments prélevés au niveau de l'embouchure du fleuve Comoé sont en général des sables grossiers modérément classés et à asymétrie vers les éléments fins. Ces sédiments sont de plus en plus grossiers du haut estran vers le bas estran et de la zone Ouest vers la zone Est de l'embouchure. La probabilité calculé de la teneur des minéraux étant supérieure à la probabilité théorique, la teneur de ces minéraux lourds dans la zone est donc non significatif (ns).

Sur le plan minéralogique, les principaux minéraux décelés sont l'ilménite, l'amphibole, le diopside, l'épidote, le leucoxène, la monazite, le pyroxène, le rutile, la tourmaline, le grenat, l'or, la limonite, la biotite, le chrysobéryl, le zircon, le gorcéixite, la sidérite et la sillimanite. La zone Ouest contient de forts pourcentages de ces minéraux lourds que la zone Est.

Les minéraux lourds de l'embouchure du fleuve Comoé sont dominés par l'ilménite.

L'analyse morphoscopique a révélé une diversité de formes et a mis en évidence la prépondérance des minéraux de forme arrondie et d'aspect luisant, ce qui indique un long parcours pour la majorité des minéraux lourds.

L'évolution des profils de plage a fait ressortir deux domaines. Une érosion de part et d'autre de l'embouchure et un engraissement à l'embouchure et aux environnements immédiats.

## **CHAPITRE 8 : DISTRIBUTION SPATIALE ET CARACTERISATION DES SEDIMENTS A L'ESTUAIRE DU COMOÉ.**

Ce chapitre présente la granulométrie, la distribution spatiale, la minéralogie et la morphoscopie des sédiments rencontrés à l'estuaire du Comoé. Il présente également la variation des paramètres morphométriques.

### **8-1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

#### **8-1-1. Description des faciès sédimentaires.**

La description sommaire des sédiments superficiels de l'estuaire du fleuve Comoé met en évidence trois faciès lithologiques. Il s'agit des sables, des sédiments mixtes et des vases (tableau XXIII).

Les sables évoluent de fins à grossiers. Leur couleur est brun-jaunâtre à degré variable. On y trouve, quelques débris végétaux et coquilliers. La taille des grains augmente lorsqu'on tend vers le lit majeur du cours d'eau. Par ailleurs, les sables sont plus grossiers en amont qu'en aval.

Les vases sont de couleur variable. On a les vases de couleur verdâtre riches en matière organique provenant en grande partie de la décomposition des végétaux aquatiques. Les vases fluides noirâtres sont riches en matière organique. Elles se concentrent à proximité des berges du fleuve et des îles.

Les sédiments "mixtes" (Ech.7, 12, 15) sont constitués de sables vaseux et de vases sableuses. Leur coloration varie du noir olive au gris olive. Ils contiennent des débris végétaux et coquilliers.

#### **8-1-2. Paramètres granulométriques et répartition des faciès sédimentaires de l'estuaire du Comoé**

La moyenne granulométrique des sables de l'estuaire du fleuve Comoé est comprise entre 240 et 765  $\mu\text{m}$ . Il s'agit de façon générale des sables fins à moyens avec une moyenne granulométrique de 425  $\mu\text{m}$ . Les indices de classement se situent entre 0,58 et 1,12 avec une moyenne de 0,85. Ceci indique que les sables dans l'estuaire sont modérément classés à mal classés. Les indices d'asymétrie (skewness) s'étendent de 0,06 à 0,25 indiquant une forte asymétrie vers les petites tailles.

**Tableau XXIII : Description lithologique des sédiments de l'estuaire du fleuve Comoé**

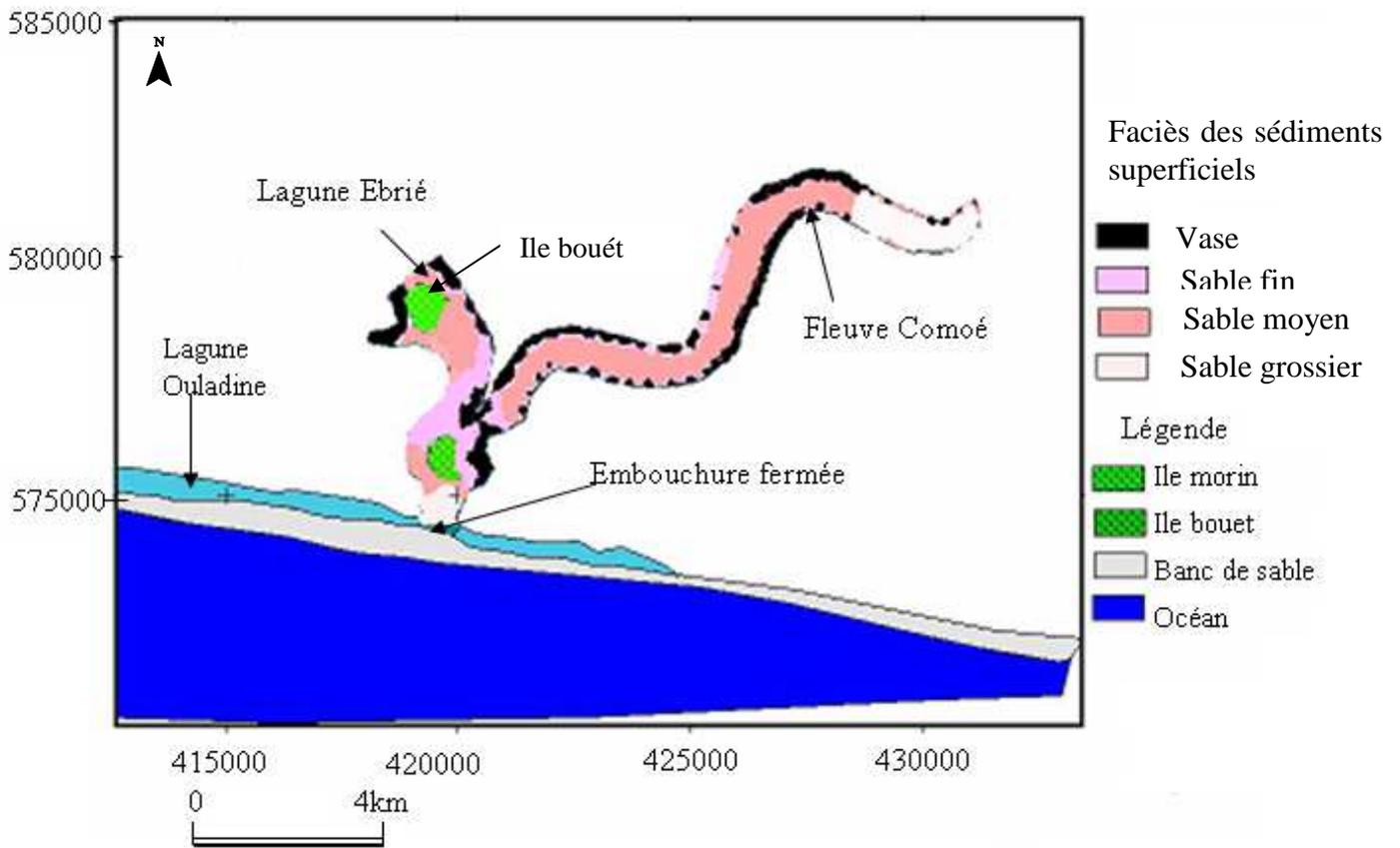
| Ech | Coordonnées     | Description sédimentaire                                                       | Mz   | Sk   | So   | Md  | IT   | A    |
|-----|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|-----|------|------|
| 1*  | 429324 / 581026 | Vase fluide noirâtre ; riche en matières organiques                            | < 63 | (-)  | (-)  | (-) | (-)  | (-)  |
| 2   | 429324 / 580827 | Sables grossiers, roux, modérément classés                                     | 765  | 0,66 | 0,95 | 124 | 0,48 | 0,19 |
| 3   | 429324 / 580477 | Sables grossiers de couleur grise; modérément classés à mal classés            | 515  | 0,82 | 0,23 | 355 | 0,75 | 0,33 |
| 4*  | 425629 / 580028 | Vase fluide noirâtre ; riche en matières organiques                            | < 63 | (-)  | (-)  | (-) | (-)  | (-)  |
| 5   | 425629 / 579728 | Sables grossiers, roux, modérément classés                                     | 625  | 0,75 | 0,55 | 420 | 0,29 | 0,44 |
| 6   | 425629 / 579479 | Sables fins de couleur grise; modérément classés à mal classés                 | 135  | 0,85 | 0,25 | 612 | 0,38 | 0,45 |
| 7   | 421485 / 578181 | Vases sableuses de couleur grise olive à noire olive ; modérément classées     | 73   | 0,81 | 0,29 | 615 | 0,45 | 0,17 |
| 8   | 421485 / 577981 | Sables moyens, roux à grisâtre ; modérément classés                            | 482  | 0,68 | 0,45 | 587 | 0,66 | 0,42 |
| 9   | 421485 / 577731 | Sables fins de couleur grise ; modérément classés à mal classés.               | 240  | 0,85 | 0,26 | 590 | 0,58 | 0,54 |
| 10* | 419885 / 577132 | Crème de vase de couleur verdâtre ; présence de débris végétaux et coquilliers | < 63 | (-)  | (-)  | (-) | (-)  | (-)  |
| 11* | 420085 / 577132 | Vase fluide verdâtre ; riche en matières organiques                            | < 63 | (-)  | (-)  | (-) | (-)  | (-)  |
| 12  | 420387 / 577132 | Vase sableuse de couleur gris olive à noire olive ; modérément classée         | 68   | 0,83 | 0,27 | 325 | 0,68 | 0,75 |
| 13* | 419638 / 577931 | Vase fluide noirâtre ; riche en matières organiques                            | < 63 | (-)  | (-)  | (-) | (-)  | (-)  |
| 14  | 420636 / 577931 | Sables moyens, roux à grisâtre ; modérément classés                            | 412  | 0,76 | 0,50 | 258 | 0,66 | 0,80 |
| 15  | 420037 / 577931 | Vase sableuse de couleur grise olive à noire olive modérément classée          | 67   | 0,84 | 0,29 | 210 | 0,50 | 0,69 |
| 16  | 419438 / 576384 | Sables moyens, roux à grisâtre modérément classée à mal classée                | 358  | 0,66 | 0,52 | 200 | 0,54 | 0,65 |
| 17  | 420087 / 576384 | Sables moyens, jaune roux à grisâtre ; modérément classés                      | 459  | 0,78 | 0,55 | 463 | 0,78 | 0,56 |
| 18  | 420489 / 576384 | Sables moyens, de couleur roux à grisâtre ; modérément classés                 | 476  | 0,77 | 0,48 | 198 | 0,81 | 0,55 |
| 19* | 419138 / 575584 | Crème de vase grisâtre ; riche en matières organiques                          | < 63 | (-)  | (-)  | (-) | (-)  | (-)  |
| 20* | 419488 / 575584 | Crème de vase grisâtre ; présence de débris végétaux et coquilliers            | < 63 | (-)  | (-)  | (-) | (-)  | (-)  |
| 21* | 419788 / 575584 | Vases fluides noirâtres ; riches en matières organiques                        | < 63 | (-)  | (-)  | (-) | (-)  | (-)  |
| 22  | 419388 / 574836 | Sables fins de couleur grise ; modérément classés à mal classés                | 158  | 0,86 | 0,30 | 410 | 0,46 | 0,68 |
| 23  | 419588 / 574836 | Sables fins de couleur grise ; modérément classés à mal classés                | 213  | 0,80 | 0,31 | 521 | 0,39 | 0,52 |
| 24  | 419887 / 574836 | Sables fins de couleur grise ; modérément classés à mal classés.               | 120  | 0,82 | 0,28 | 498 | 0,37 | 0,37 |

\* Stations à proximité de la rive; (-) paramètres non identifiés ; Ech : Echantillon ; Mz : Moyenne ; Sk : Skweness ; So : Indice de classement ; Md : Médiane ; IT : Indice de tri ; A : Angulosité.

Sur le plan spatial, la distribution des sédiments n'est pas homogène à l'estuaire du fleuve Comoé (figure 44). Les sables moyens à grossiers se rencontrent dans le lit principal du fleuve. Entre la zone de confluence et l'île Bouet, les sables sont moyens ( $500 > Mz > 250 \mu\text{m}$ ). Les proportions relatives de ces découpages granulométriques montrent que les sables moyens sont abondants avec 65%. Aux voisinages des îles Bouet et Morin ainsi qu'à la confluence de la lagune Ouladine, les sables sont fins ( $70 < Mz < 120$ ) et représentent environ 75% de la totalité des sédiments.

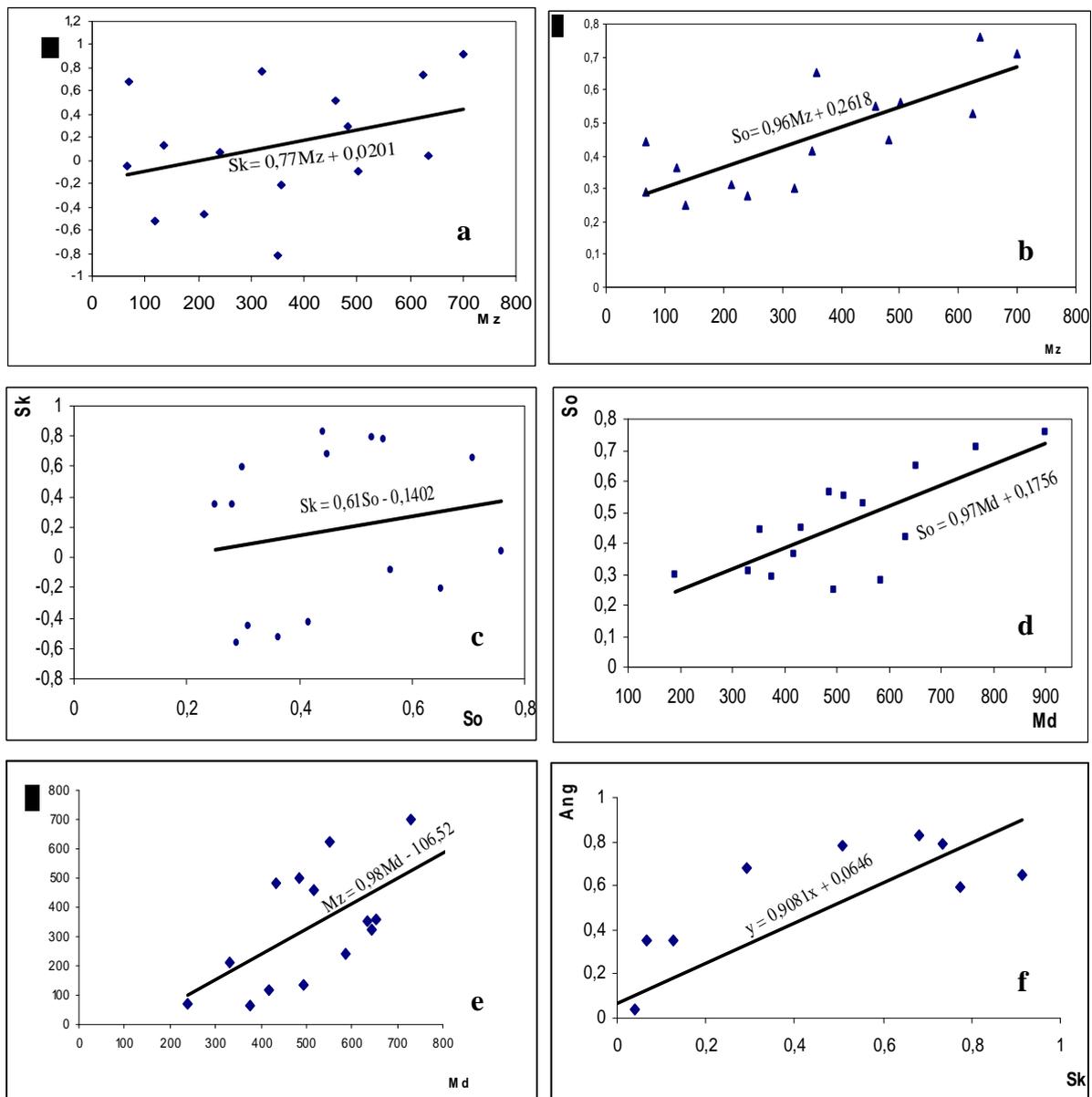
Au niveau des berges, zones occupées par les végétaux flottants depuis la fermeture de l'embouchure, on rencontre essentiellement des vases fluides et de la crème de vase, riches en matières organiques. Aussi, à proximité de l'embouchure, trouve t-on, en abondance 80% des vases fluides de couleur noire olive. Cette zone constitue ainsi une vasière interne en relation avec les apports du fleuve Comoé.

Dans la lagune Ebrié, le faciès granulométrique est caractérisé par des sables vaseux. Les sédiments sont très bien classés et témoignent le caractère calme de cette zone même pendant la phase d'accumulation sableuse.



**Figure 44:** Répartition des faciès des sédiments superficiels dans l'estuaire du fleuve Comoé

Les diagrammes de dispersion des fractions sableuses de l'estuaire du fleuve Comoé montrent que le grain moyen se situe entre 100 et 800  $\mu\text{m}$  (figure 45 a). La médiane varie de 250 à 900  $\mu\text{m}$  (figure 45 d). Les indices de classement varient entre 0,25 et 0,75 (figure 45 b). L'asymétrie a pour valeur minimale -0,75 et +0,90 pour valeur maximale (figure 45 c). L'indice de classement et l'asymétrie sont inférieurs à 1. Les nuages des points de la représentation So-Mz et So-Md sont plus rapprochés de la droite de régression. Il s'agit d'une bonne corrélation. Cependant, celles des représentations Sk-Mz et Sk-So sont dispersés et éloignés de la droite de régression. Il s'agit donc d'une mauvaise corrélation entre ses paramètres. De plus les courbes de tendance des paramètres granulométriques sont des droites croissantes. Le coefficient directeur des droites de régressions (figure 45b, d, e et f) est proche de un (1). Il existe donc une bonne corrélation entre les paramètres caractéristiques.

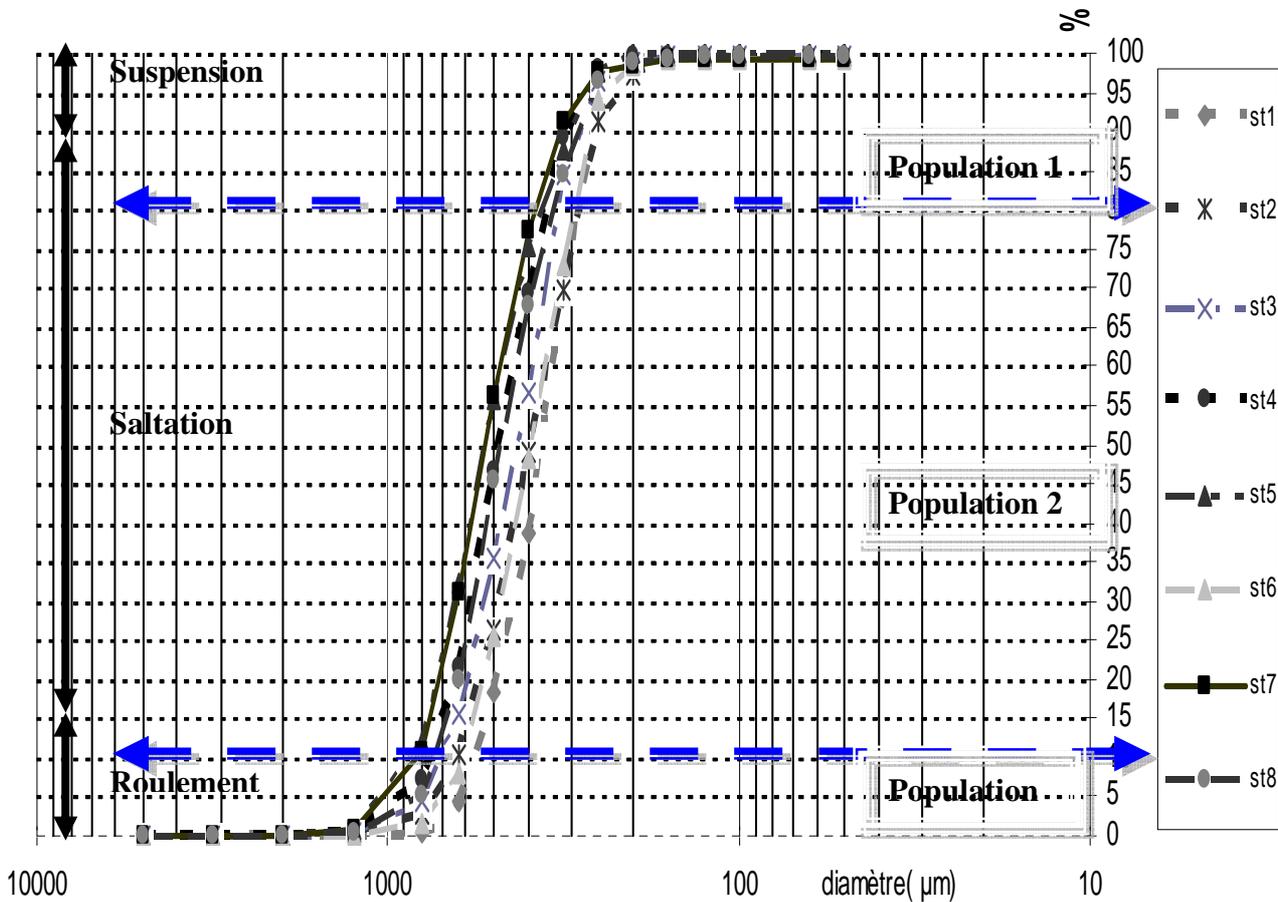


**Figure 45:** Diagrammes de dispersion granulométrique de l'estuaire du fleuve Comoé.

### 8-1-3. Mode de transport des sédiments

L'application du test de VISHNER (1969) aux sédiments de l'estuaire du fleuve Comoé montre trois populations de sables que nous pouvons observer sur la figure 46 présentant les courbes granulométriques de certains échantillons prélevés. On a :

- une première population de sables fins ( $Mz < 200 \mu m$ ) transportés par suspension ;
- une deuxième population, de sable moyens ( $200 < Mz < 500 \mu m$ ) transportés par saltation. Cette tranche inclut aussi quelques cas de transports par suspension ;
- une troisième population de sables grossiers ( $Mz < 500 \mu m$ ) transportés par charriage ou roulement.



**Figure 46:** Courbes granulométriques et mode de transport des sables à l'estuaire du fleuve Comoé

On constate que le charriage est le mode de transport le plus dominant (75 % de saltation et 10 % de roulement) dans les sédiments moyens à fins. Ce type de transport concerne les sables de l'estuaire du Comoé. Plus rarement (15 %), des sédiments de l'estuaire se déplacent par suspension. Dans ces conditions, les grains de sable peuvent alimenter l'embouchure du

fleuve Comoé. Cet apport expliquerait en partie les teneurs croissantes de ces grains moyens et fins dans l'estuaire au fur et à mesure qu'on approche l'embouchure.

## 8-2. CARTOGRAPHIE DES FACIES MINERALOGIQUE

### 8-2-1. Morphoscopie du quartz

D'après le Tableau XXIV et photo 16, la quasi-totalité des échantillons (91,66%) est de type émoussé luisant (EL). Très peu (8,34%) sont de type rond mat propre (RMP).

**Tableau XXIV** : Proportion relative des différents types morphoscopiques du quartz

| Aspects morphoscopiques | Nombre | Proportion (%) |
|-------------------------|--------|----------------|
| Emoussé Luisant (EL)    | 550    | 91,66          |
| Rond Mat Propre (RMP)   | 50     | 8,34           |



**Photo 16** : Grains de quartz ronds mats (a) et émoussés luisants (b) de l'embouchure du fleuve Comoé

Le tableau XXV présente un récapitulatif des indices moyens d'arrondi et de sphéricité des grains de quartz dans les échantillons analysés. Son analyse montre que la moyenne de l'arrondi est de 0,39, la médiane est de 0,40 et l'écart type de 0,03. La sphéricité des grains présente une moyenne de 0,75, une médiane de 0,78 et un écart type de 0,06. La moyenne de l'arrondi varie entre 0,33 et 0,45 alors que celle de la sphéricité varie de 0,64 à 0,82. Le pourcentage des grains émoussés luisants étant supérieur à 30 %, il est donc certain que l'usure ce fait par la mer.

**Tableau XXV:** Coefficients moyens d'arrondi et de sphéricité des minéraux de quartz de l'estuaire du fleuve Comoé.

| Ech | Nature des sédiments | Arrondi     | Sphéricité  |
|-----|----------------------|-------------|-------------|
| 1   | Vase sableuse        | 0,45        | 0,71        |
| 2   | Sable grossier       | 0,40        | 0,65        |
| 3   | Sable grossier       | 0,38        | 0,80        |
| 4   | Sable vase           | 0,33        | 0,81        |
| 5   | Sable grossier       | 0,42        | 0,78        |
| 6   | Sable fin            | 0,43        | 0,68        |
| 7   | Sable vase           | 0,34        | 0,69        |
| 8   | Sable moyen          | 0,40        | 0,82        |
| 9   | Sable fin            | 0,45        | 0,81        |
| 10  | Vase sableuse        | 0,36        | 0,79        |
| 11  | Vase sableuse        | 0,39        | 0,64        |
| 12  | Vase sableuse        | 0,35        | 0,66        |
| 13  | Vase sableuse        | 0,34        | 0,64        |
| 14  | Sable vaseux         | 0,40        | 0,78        |
| 15  | Sable vaseux         | 0,37        | 0,71        |
| 16  | Sable moyen          | 0,44        | 0,82        |
| 17  | Sable moyen          | 0,42        | 0,81        |
| 18  | Sable moyen          | 0,41        | 0,80        |
| 19  | Sable vaseux         | 0,36        | 0,70        |
| 20  | Sable vaseux         | 0,34        | 0,71        |
| 21  | Sable vaseux         | 0,35        | 0,81        |
| 22  | Sable fin            | 0,40        | 0,79        |
| 23  | Sable fin            | 0,41        | 0,78        |
| 24  | Sable fin            | 0,44        | 0,80        |
|     | <b>Moyenne</b>       | <b>0,39</b> | <b>0,75</b> |
|     | <b>Maximum</b>       | <b>0,45</b> | <b>0,82</b> |
|     | <b>Minimum</b>       | <b>0,33</b> | <b>0,64</b> |
|     | <b>Médiane</b>       | <b>0,40</b> | <b>0,78</b> |
|     | <b>Ecart-type</b>    | <b>0,03</b> | <b>0,06</b> |

### 8-2-2. Relation morphoscopie – nature du sédiment

Les moyennes des coefficients d'arrondi et de sphéricité en fonction de la nature des sédiments (tableau XXVI) montrent que le coefficient d'arrondi est plus important dans les sables (0,59). Il y a une valeur relativement faible dans les sables vaseux (0,33) et dans les vases sableuses (0,30). La sphéricité présente une évolution contraire. Elle est importante pour la vase sableuse (0,82). Elle a une valeur relativement faible dans le sable vaseux (0,68) et dans les sables (0,58). Les minéraux observés sont anguleux, sub-anguleux, arrondis et sub-arrondis.

**Tableau XXVI :** Coefficients d'arrondi et de sphéricité en fonction des faciès sédimentologies.

| Faciès sédimentologiques | Arrondi moyen | Sphéricité moyenne |
|--------------------------|---------------|--------------------|
| Sable (S)                | 0,59          | 0,58               |
| Sable vaseux (SV)        | 0,33          | 0,68               |
| Vase sableuse (VS)       | 0,30          | 0,82               |

### 8-2-3. Morphométrie du quartz

#### 8-2-3-1. Indice de dissymétrie et indice d'aplatissement

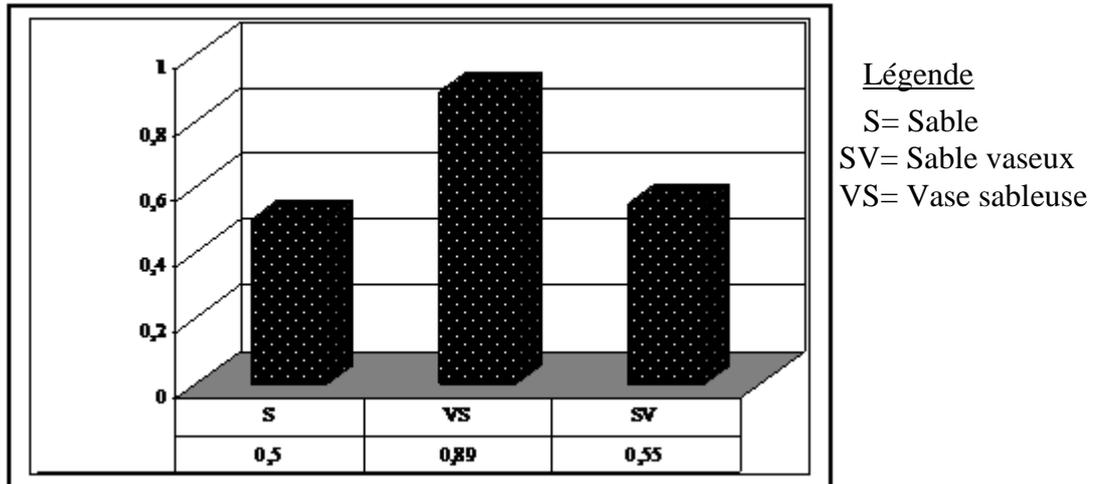
Les indices moyens de dissymétrie des grains de quartz des sables de l'estuaire du fleuve Comoé sont compris entre 0,35 et 0,89 avec une moyenne est de 0,68. Ils ont un écart-type de 0,14 et une médiane de 0,26. Les indices d'aplatissement sont compris entre 1,05 et 2,30. Sa moyenne générale est de 1,39 avec un écart type de 0,43 et une médiane de 1,38. On remarque cependant que les indices d'aplatissement sont proches de un (1) et plus élevés que les indices de dissymétries (tableau XXVII).

**Tableau XXVII:** Indices moyens de dissymétrie et d'aplatissement des minéraux de quartz des sables de l'estuaire du fleuve Comoé.

| Ech | Nature des sédiments | Indice d'aplatissement | Indice de dissymétrie |
|-----|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 1   | Vase sableuse        | 0,58                   | 0,71                  |
| 2   | Sable grossier       | 1,10                   | 0,65                  |
| 3   | Sable grossier       | 1,11                   | 0,45                  |
| 4   | Sable vase           | 1,10                   | 0,56                  |
| 5   | Sable grossier       | 2,30                   | 0,89                  |
| 6   | Sable fin            | 1,98                   | 0,55                  |
| 7   | Sable vase           | 1,15                   | 0,55                  |
| 8   | Sable moyen          | 1,15                   | 0,35                  |
| 9   | Sable moyen          | 1,45                   | 0,81                  |
| 10  | Vase sableuse        | 1,36                   | 0,79                  |
| 11  | Vase sableuse        | 1,39                   | 0,64                  |
| 12  | Vase sableuse        | 2,25                   | 0,66                  |
| 13  | Vase sableuse        | 1,34                   | 0,64                  |
| 14  | Sable vaseux         | 1,40                   | 0,78                  |
| 15  | Sable vaseux         | 1,37                   | 0,79                  |
| 16  | Sable moyen          | 1,44                   | 0,84                  |
| 17  | Sable moyen          | 1,42                   | 0,83                  |
| 18  | Sable moyen          | 1,41                   | 0,77                  |
| 19  | Sable vaseux         | 2,26                   | 0,70                  |
| 20  | Sable vaseux         | 0,98                   | 0,71                  |
| 21  | Sable vaseux         | 0,99                   | 0,84                  |
| 22  | Sable fin            | 1,40                   | 0,72                  |
| 23  | Sable fin            | 1,41                   | 0,68                  |
| 24  | Sable fin            | 0,94                   | 0,50                  |
|     | <b>Moyenne</b>       | <b>1,39</b>            | <b>0,68</b>           |
|     | <b>Maximum</b>       | <b>0,89</b>            | <b>0,89</b>           |
|     | <b>Minimum</b>       | <b>0,35</b>            | <b>0,35</b>           |
|     | <b>Médiane</b>       | <b>1,38</b>            | <b>0,26</b>           |
|     | <b>Ecart-type</b>    | <b>0,43</b>            | <b>0,14</b>           |

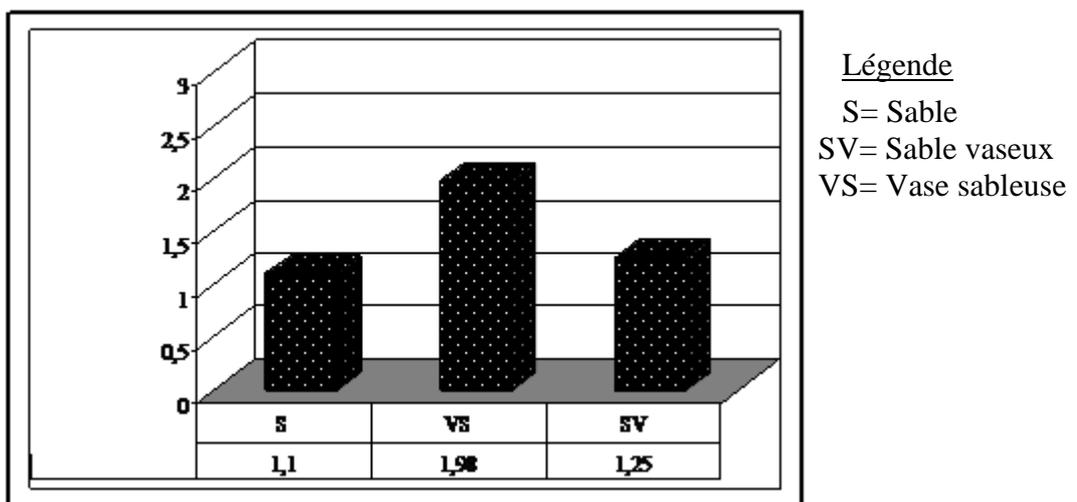
### 8-2-3-2. Relation indices morphométriques – nature du sédiment

L'indice de dissymétrie n'est pas constant dans les différents sédiments étudiés (figure 47). Il est important dans les vases sableuses, moyen dans les sables vaseux et faible dans les sables. Ainsi, la dissymétrie évolue proportionnellement à la quantité de vase présent dans les sédiments.



**Figure 47:** Histogramme montrant l'évolution de la dissymétrie en fonction des faciès sédimentologiques

L'indice d'aplatissement est inégalement repartie dans les sédiments. Il est plus faible dans le sable, moins faible dans le sable vaseux et fort dans le sédiment vaseux sableux (figure 48). Il est donc proportionnel à la quantité de vase présent dans les sédiments. De plus l'indice d'aplatissement est compris entre 1 et 1,85. L'évolution de l'indice peut être matérialisée par une forme ellipsoïdale à aplatissement moyen.



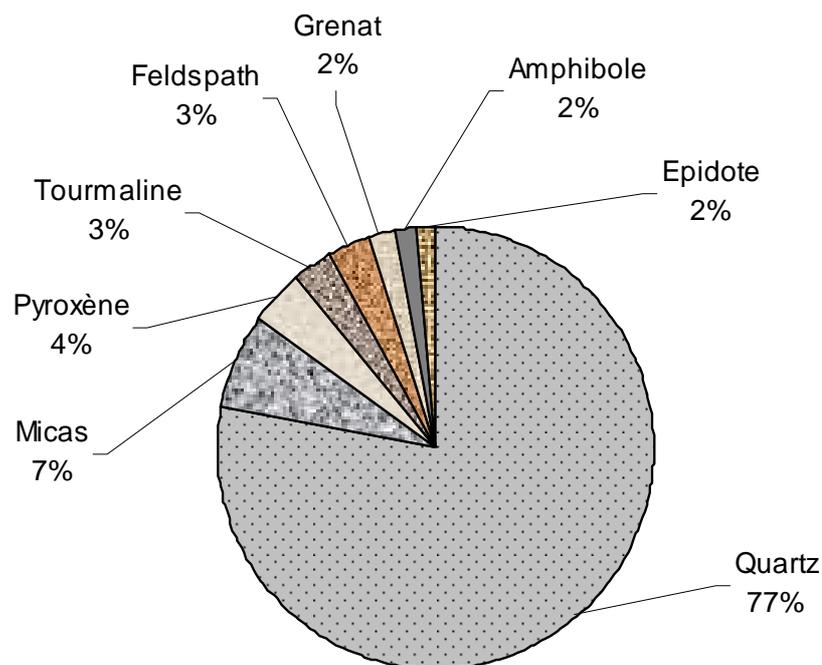
**Figure 48:** Histogramme montrant l'évolution de l'indice d'aplatissement en fonction des faciès sédimentologiques

### 8-2-4. Minéralogie

Le spectre minéralogique est caractérisé par un ensemble de minéraux lourds et de minéraux légers. Les minéraux lourds rencontrés dans la fraction sableuse sont essentiellement du néosilicate représenté par le grenat. On trouve également des inosilicates représentés par l'amphibole et le pyroxène, du cyclosilicate représenté par la tourmaline et du sorosilicate représenté par l'épidote. Parmi les minéraux légers, on retrouve des tectosilicates représentés par le quartz et le feldspath. On rencontre aussi du phyllosilicate représenté par le mica (tableau XXVIII et figure 49).

**Tableau XXVIII :** Pourcentage des minéraux lourds dans l'estuaire du fleuve Comoé

| Minéraux lourds | quartz | micas | pyroxène | tourmaline | feldspath | grenat | amphibole | épidote |
|-----------------|--------|-------|----------|------------|-----------|--------|-----------|---------|
| %               | 77     | 7     | 4        | 3          | 3         | 2      | 2         | 2       |



**Figure 49:** Cortège minéralogique de l'estuaire du Comoé (Août 2006)

Le quartz est le minéral constitutif de la phase sableuse (77% en moyenne), pouvant atteindre des valeurs proches de 85% en amont de l'embouchure. La biotite (7%), le feldspath (3%), le pyroxène (4%), la tourmaline (3%), l'amphibole (2%), le grenat (2%) et l'épidote (2%) complètent le cortège sableux avec des teneurs relativement très faibles (tableau XXIX).

**Tableau XXIX** : Estimation des pourcentages des minéraux lourds

|            | Quartz | Micas | Feldspath | Pyroxène | Tourmaline | Amphibole | Grenat | Epidote |
|------------|--------|-------|-----------|----------|------------|-----------|--------|---------|
| Moy. (%)   | 77     | 7     | 3         | 4        | 3          | 2         | 2      | 2       |
| Ecart-type | 15,5   | 2,10  | 1,5       | 1,6      | 1,5        | 1,15      | 1,15   | 1,15    |
| Minimum    | 45     | 5     | 4         | 3        | 0          | 0         | 0      | 0       |
| maximum    | 85     | 12    | 10        | 15       | 5          | 7         | 5      | 5       |

### 8-3. DISCUSSION

Les analyses des faciès sédimentaires montrent que la distribution des sédiments n'est pas homogène dans l'estuaire de la Comoé. Les vases et les sables fins se localisent aux voisinages des îles et des berges, zones fortement colonisées par les végétaux aquatiques envahissants. La présence de vases sur les berges peut s'expliquer par la décomposition suivie de la sédimentation des végétaux aquatiques et de la végétation en bordure du cours d'eau. Par ailleurs, les vitesses des courants qui sont relativement faibles sur les berges favorisent la décantation des matières organiques.

La localisation des sables moyens et grossiers dans le lit du fleuve Comoé peut s'expliquer par l'énergie du courant qui paraît relativement plus importante sur cet axe. La pente est plus accentuée que les autres parties du fleuve. De l'amont de l'embouchure vers le village Yaou (figure 44), les sables sont plus grossiers qu'en aval (vers l'embouchure). En effet, la fermeture de l'embouchure crée un plan d'eau où les actions hydrodynamiques sont relativement faibles. KOUASSI (2007) et KOUASSI *et al.* (2007) rapportent qu'à l'entrée des plans d'eau les éléments grossiers se déposent à la suite d'une diminution de la compétence de l'énergie des cours d'eau. L'analyse minéralogique des sables révèle la présence de minéraux lourds tels que l'amphibole (actinote, hornblende), le grenat, l'épidote, et la tourmaline. La présence de minéraux légers, notamment le quartz, le mica et les feldspaths, dans chaque sédiment est aussi remarquable. Ces minéraux font partie de ceux décrits par BROCHE *et al.* (1977) dans la partie supérieure du bassin versant du fleuve Comoé.

Le bassin versant du fleuve Comoé de par son étendu est à cheval sur quatre pays. Il traverse donc des formations diverses. Avec le temps, ces formations seront dégradées et transportées. Ainsi, à l'embouchure du fleuve Comoé, se trouve désormais le produit d'altération de ces différentes formations véhiculé par le cours d'eau.

Il existe une bonne corrélation entre la moyenne, l'indice de classement et la médiane. De plus les valeurs de l'indice de classement et de l'asymétrie n'excèdent pas 1. Ces résultats,

peuvent être interprétés comme FRIEDMAN (1967), MONDE et AKA (2001) et N'GUESSAN (2008), selon lesquels, les fractions sableuses des sédiments superficiels de l'estuaire du fleuve Comoé, ont un paléo environnement de type fluvial.

L'analyse morphoscopique montre l'omniprésence de grains arrondis luisants dans l'ensemble de l'estuaire. Ce qui met en évidence l'influence du transport par l'eau des sédiments et de la dynamique fluviale (N'GUESSAN *et al.*, 2008). L'augmentation de la dissymétrie lorsque l'on passe des sables aux vases sableuses est la conséquence de la diminution des chocs entre les minéraux de quartz. Une proportion élevée de vase augmente la viscosité du sédiment dont les éléments sont difficilement déplaçables (HJULSTROM, 1939; LECLERC *et al.*, 1979; SAAIDI, 1991). En effet, plus la proportion de sable est élevée, plus les chocs entre particules sont importants. Ces chocs entraînent une usure des minéraux de quartz, réduisant de ce fait leur indice de dissymétrie. Il en est de même des sables vaseux qui présentent une dissymétrie moins importante que les vases sableuses à cause de la forte proportion de sable dans ces sédiments.

L'indice d'aplatissement qui est moins élevé dans les sables que dans les sables vaseux et les vases sableuses s'explique par le fait que la vase augmente la viscosité du milieu et les frottements entre les particules. Ces frottements sont la cause principale de l'aplatissement des minéraux de quartz (HJULSTROM, 1939; LECLERC *et al.*, 1979; SAAIDI, 1991). Ainsi, le comportement des indices dans les sables, les sables vaseux puis dans les vases sableuses est lié à l'augmentation progressive de la viscosité dans les sédiments et à la réduction des chocs entre les grains de quartz.

L'évolution des indices indique que la granulométrie est en relation avec la forme des grains. Selon N'GUESSAN *et al.*, 2008, lorsque la granulométrie du sédiment est croissante, les minéraux de quartz ont une forme qui se rapproche de la sphère car les indices de dissymétrie et d'aplatissement se rapprochent respectivement des valeurs 500 et 1.

### **Conclusion**

Les analyses granulométrique et minéralogique ont montré que les sédiments rencontrés dans l'estuaire du fleuve Comoé sont constitués de vases, de sables fins, de sables moyens et de sables grossiers. Les sables sont moyens à grossiers en amont de l'estuaire et fins à moyens vers l'embouchure.

L'aspect arrondi et luisant des grains de sables dans la plupart des échantillons prélevés montre que les sables rencontrés dans l'estuaire proviennent de la partie amont du bassin et ont été transportés sur une distance relativement longue par l'eau.

Le cortège minéralogique renferme à la fois des minéraux lourds tels que l'amphibole (actinote, hornblende), la tourmaline, le diopside et l'épidote et des minéraux légers parmi lesquels le quartz est le plus abondant. Cette étude a montré que la distribution des sédiments n'est pas homogène dans l'estuaire du fleuve Comoé. Les vases et les sables fins se retrouvent aux voisinages des berges et près de l'île Bouet où on observe une forte présence de végétaux. En ce qui concerne la nature des sédiments, les valeurs des différents indices (dissymétrie et aplatissement) sont déterminées par la proportion relative de sable et de vase dans les sédiments, donc par la granulométrie. Dans les sables, les indices de dissymétrie et d'aplatissement sont faibles tandis que dans les sables vaseux et vases sableuses ils sont élevés.

## **CHAPITRE 9: HYDRO-MORPHOLOGIE DU FOND ESTUAIRIEN DU FLEUVE COMOË.**

Les résultats présentés dans cette partie concernent la morphologie de l'estuaire.

Au plan morphologique, il s'agit de présenter la carte bathymétrique de l'estuaire du fleuve en vue de déterminer ses éléments caractéristiques.

### **9-1. MORPHOLOGIE DE L'ESTUAIRE DU FLEUVE COMOË**

Les profondeurs de l'estuaire du fleuve Comoé varient entre 0 et 12 m en période d'étiage et entre 0 et 14 m en période de crue. L'examen détaillé de la bathymétrie de l'estuaire du fleuve Comoé fait apparaître une morphologie relativement complexe (figure 50). Le fond de l'estuaire du fleuve présente un relief un peu plus accidenté. L'organisation des courbes bathymétriques met en évidence un chenal de direction NE-SW. On remarque que les fonds remontent de l'amont du fleuve vers l'embouchure. La profondeur maximum de l'estuaire du fleuve Comoé est enregistrée au niveau de Moossou. Cette profondeur est de l'ordre de 14 m. Le bassin estuarien présente, dans l'ensemble, des pentes relativement faibles. Elles varient entre 0,4 et 0,6 %. En aval de la confluence fleuve Comoé-lagune Ebrié, la profondeur passe rapidement de 1,5 à 5 m sur une distance comprise entre 50 et 200 m. La profondeur maximale qui caractérise l'estuaire du fleuve Comoé est de 14 m en période de crue dans le chenal principal.

La morphologie du fond de l'estuaire fait apparaître de nombreuses variations morphologiques. A la confluence du fleuve Comoé et de la lagune Ebrié, se localisent des hauts fonds qui n'excèdent pas 1 m. Il s'agirait d'accumulation de sédiments favorisant le développement de la végétation.

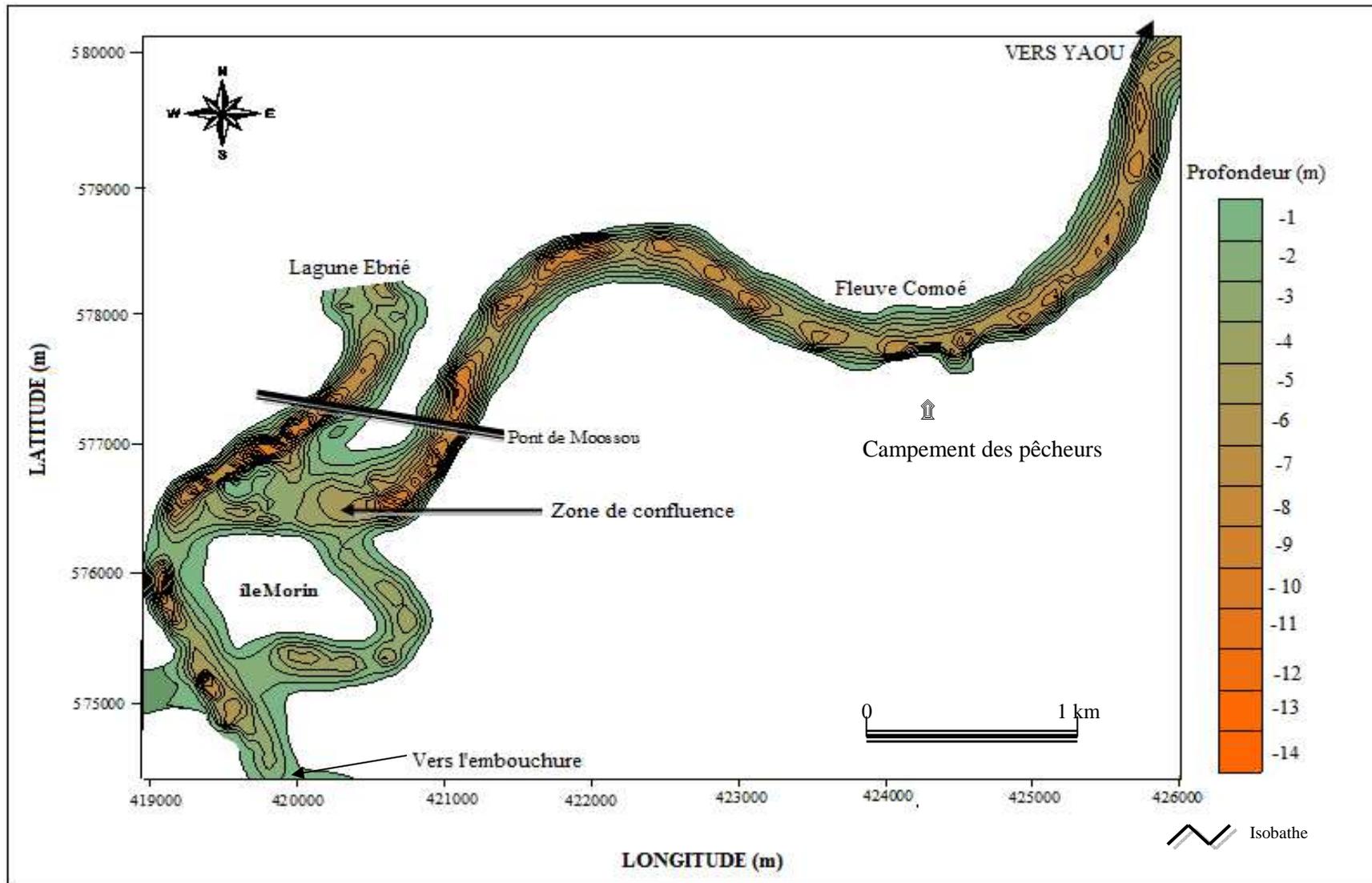


Figure 50 : Bathymétrie de l'estuaire du fleuve Comoé (Octobre 2007)

## 9-2. CONFIGURATION DES CHENAUX

L'évolution spatio-latérale des fonds de l'estuaire du Comoé a été étudiée à partir des radiales  $R_1$  à  $R_{12}$  (figure 22, 51 et 52). Les différents profils ont été regroupés en deux groupes en fonction de la morphologie de l'estuaire.

Dans le lit principal de l'estuaire, le chenal est plus profond du côté de la rive Est sur les radiales 5 et du côté Sud sur les radiales 10, 11 et 12. La profondeur maximale mesurée dans ce secteur est de 12 m.

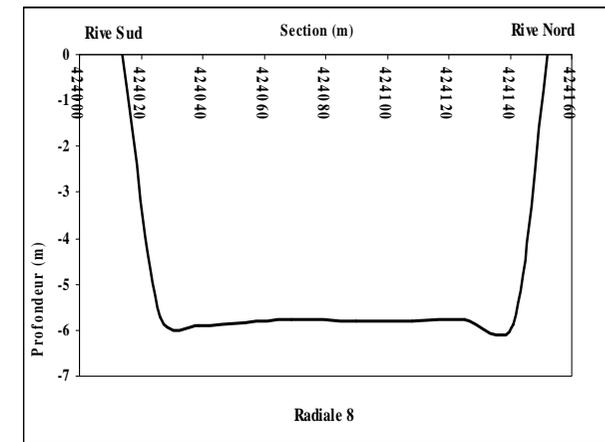
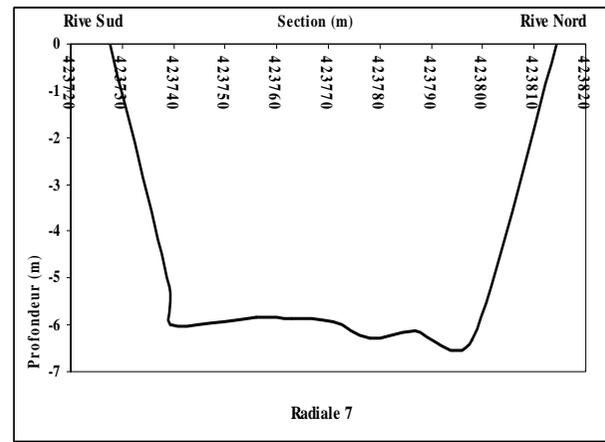
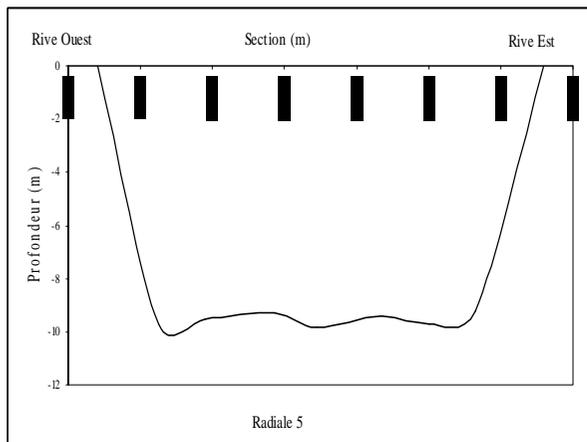
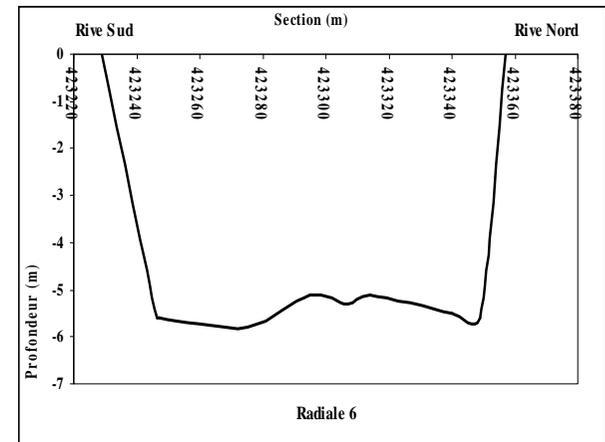
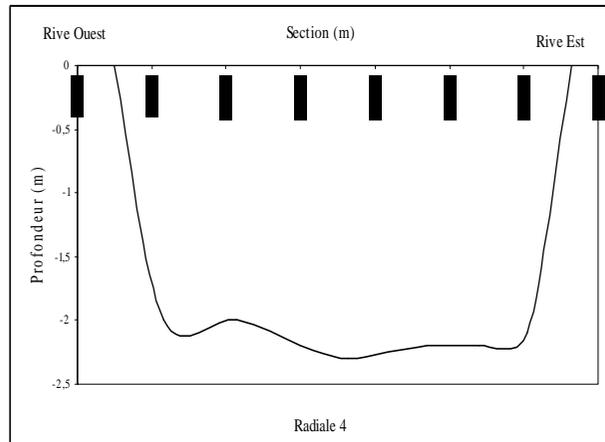
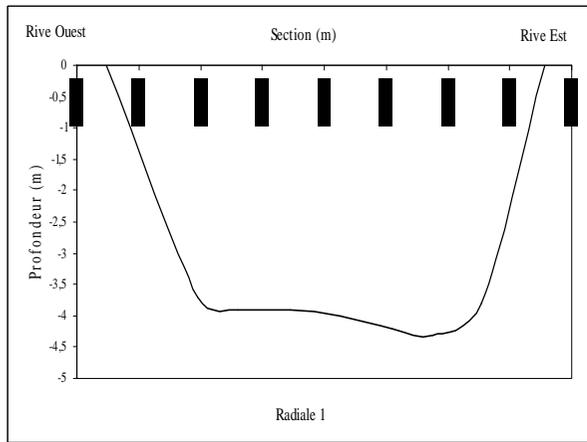
De la rive Est à la rive Ouest, représenté par les radiales 1, 4, 5, 6, 7 et 8, l'estuaire a une morphologie généralement plane. Le type morphologique qui se dégage de cette coupe est le type "U". La pente est moyenne de la berge au chenal principal. La pente du flanc gauche est de 0,82 % et celle du flanc droit est de 13,85. Le profil en "U" est un profil d'équilibre d'action entre les agents d'accumulation et les agents d'érosion (DERREAU, 1962). Nous dirons que le profil est à son équilibre. Mais une nouvelle action érosive peut reprendre et recommencer le travail de creusement. On dit que cette action est cyclique. Aussi parle-t-on parfois de forme cyclique, ce qui signifie « attribuable à l'action de cycles d'érosion » (DERREAU, 1962).

Le deuxième groupe est représenté par les profils 3, 9, 10, 12. La morphologie est en dent de scie. Ces coupes présentent une concavité en forme de pic. Le type morphologique qui se dégage de cette coupe est le type "V".

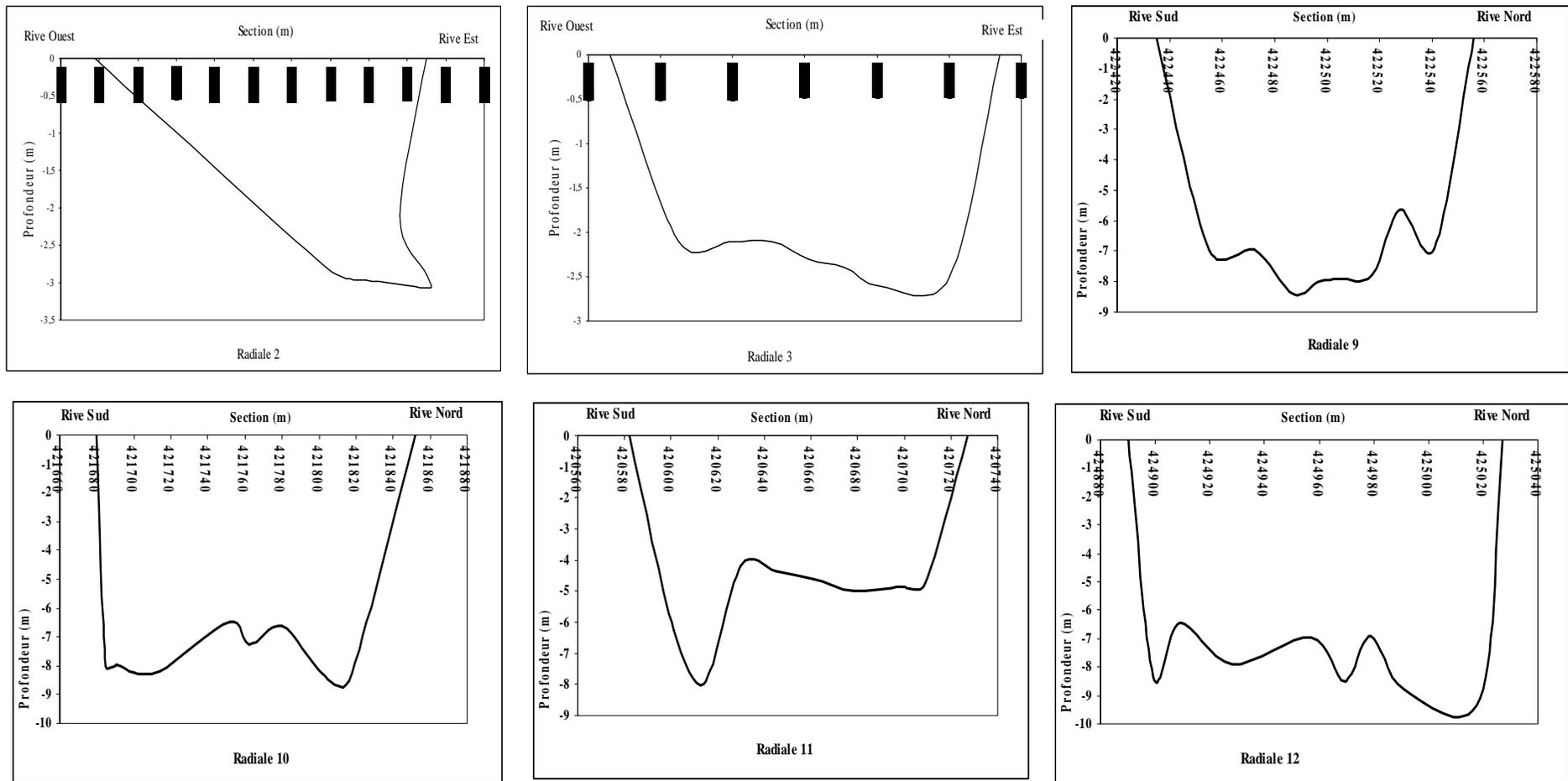
La profondeur maximale pour cette dépression est de 8 m (radiales 11). Le flanc droit a une pente de 0,44 % et celle du flanc gauche est de 0,74 %.

Les chenaux ayant un profil en "V" résultent d'un processus d'érosion (AKA, 1991). L'érosion est l'ensemble des processus qui dégradent le relief (eaux courantes, en réseau organisé ou non, mais aussi gel, vent, actions chimiques, simple gravité, etc.). Son action accentue les dénivellations (DERREAU, 1962). Nous dirons que l'action de l'érosion est intense dans cette zone.

Les profils des radiales 2 et 11 pourraient être considérés comme un profil intermédiaire du point de vue morphologique c'est-à-dire un profil n'ayant pas encore atteint leur forme d'équilibre qui est la forme "U". L'action des agents d'accumulation et celle des agents d'érosion ne s'équilibrent pas. Les agents d'érosion ont une action plus intense que celle des agents d'accumulation. Ils permettent de suivre et de comprendre le processus d'évolution d'un profil d'érosion qui se caractérise par le passage du profil "V" au profil "U".



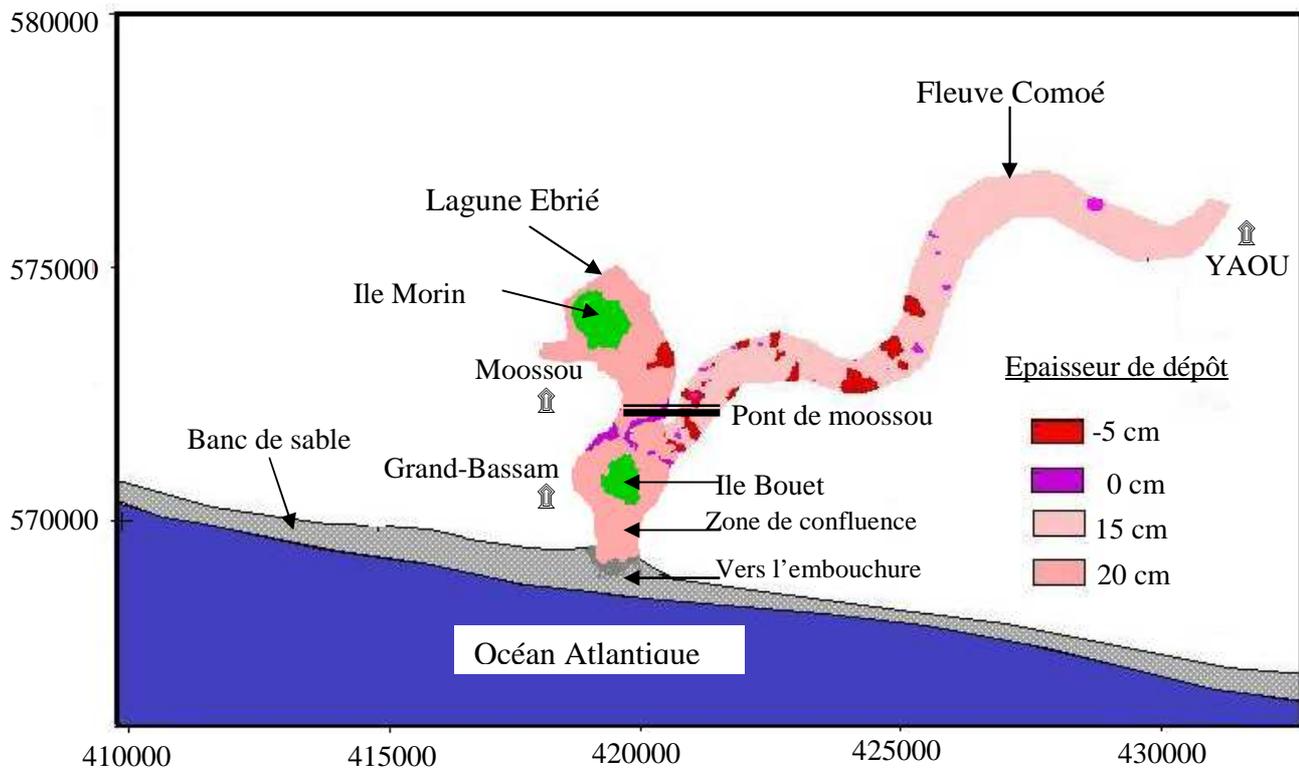
**Figure 51** : Profils bathymétrique en divers points de l'estuaire du fleuve Comoé.



**Figure 52:** Profils bathymétrique en divers points de l'estuaire du fleuve Comoé.

### 9-3. EVOLUTION DU FOND DE L'ESTUAIRE DU FLEUVE COMOÉ

La cote 1,14 m du plan d'eau par convention a été retenue comme niveau de référence pour déterminer les tendances évolutives du fond de l'estuaire. La figure 53 donne des valeurs indicatives des variations de côtes. Elle permet d'apprécier l'intensité des modifications du fond de l'estuaire du fleuve Comoé. L'examen de cette figure permet de constater que, entre 2005 et 2007, le fond du fleuve Comoé a subi, dans l'ensemble, d'importantes modifications qui se caractérisent soit par des érosions (variations négatives d'épaisseur), soit par des dépôts (variations positives d'épaisseur). Ces variations de côte sont de -5cm pour l'érosion. Cependant, il existe des secteurs de dépôts où les modifications de côtes oscillent entre 15 et 20 cm.

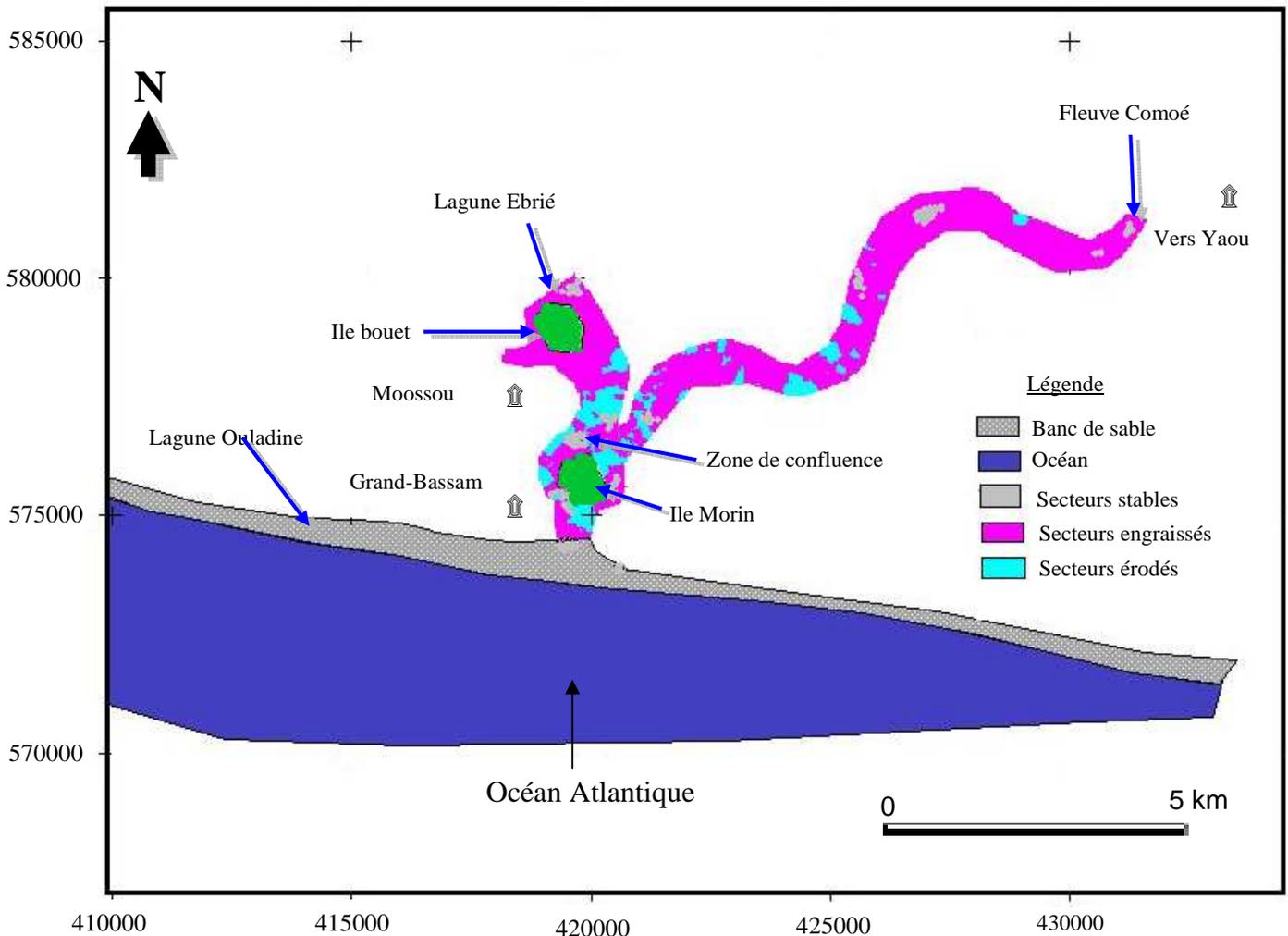


**Figure 53 :** Carte interpolée de la variation de côte du fond de l'estuaire du fleuve Comoé entre 2005 et 2007

### 9-4. DISCUSSION

Les variations de la côte du fond de l'estuaire du fleuve Comoé ont été appréciées à partir des cartes bathymétriques de 2005 et 2007. Ces cartes ont permis de quantifier les volumes de sédiments déposés ou érodés au fond de l'estuaire du fleuve Comoé entre ces deux périodes. La figure 54 présente globalement les secteurs d'engraissement, les secteurs d'érosion et les secteurs relativement stables de l'estuaire du fleuve Comoé. Le bilan des mouvements

sédimentaires entre 2005 et 2007 révèle un engraissement de 580.500 m<sup>3</sup> contre une érosion d'environ 285.000 m<sup>3</sup> sur le secteur délimité.



**Figure 54 :** Carte interpolée des zones d'érosion et d'engraissement dans l'estuaire du Comoé (2005 et 2007)

Les principales zones d'accumulation identifiées dans l'estuaire du fleuve se localisent respectivement dans le chenal principal et dans la zone de confluence de manière saisonnière. En outre, les zones d'accumulations se trouvent dans les chenaux secondaires, par lesquels les eaux arrivent à la mer.

En période d'étiage (Décembre à juillet), plusieurs bancs de sable fluviaux se développent temporairement, obstruent les chenaux et gênent la navigation. La profondeur maximale ne dépasse pas 12 m.

En période de crue (septembre à octobre), ces hauts fonds sont immergés et les sables sont progressivement remobilisés. Cette même observation a été faite par ABE (2005), qui a rapporté que les hauts fonds au niveau de l'estuaire du Comoé sont souvent saisonniers et

émergent pendant la période d'étiage du fleuve Comoé. Dans la zone de confluence précisément au niveau de Moossou, le fleuve atteint sa profondeur maximale (14 m). Cela serait dû aux travaux de dragage réalisés lors de la construction des deux ponts de Moossou. Par ailleurs, dans l'estuaire du fleuve Comoé, les profondeurs maximales enregistrées sont de 14 m. Cette valeur est loin de celle de TASTET (1979) qui s'élève à 18 m.

Une analyse comparative avec les travaux de TASTET (1979) montre qu'il y a eu des arrivées de sédiments. Ainsi les profondeurs sondées seront différentes. L'estuaire du fleuve Comoé, depuis la fermeture de l'embouchure se comporte désormais comme un réceptacle de sédiments. Ainsi, il fait l'objet d'accumulation de toute sorte de sédiments (sable et vase).

Les levés bathymétriques et la carte topographiques réalisées permettent de définir globalement les secteurs de changements du fond de l'estuaire du fleuve Comoé (érosion ou engraissement). Elles permettent de préciser l'intensité de ces modifications (figures 53 et 54). Les valeurs indicatives des volumes de dépôts obtenues, de l'ordre de  $580.500 \text{ m}^3$ , montrent une tendance à l'engraissement alors que  $325.000 \text{ m}^3$  de sédiments se sont érodés.

## **Conclusion**

La morphologie de l'estuaire met en évidence trois types morphologiques (forme V ; forme U et forme intermédiaire). Les chenaux ayant un profil en "V" résultent d'un processus d'érosion (AKA, 1991). Le profil en "U" est un profil d'équilibre d'action entre les agents d'accumulation et les agents d'érosion. Le profil intermédiaire est un profil n'ayant pas encore atteint leur forme d'équilibre qui est la forme "U".

Les travaux prenant en compte les levés bathymétriques et la carte topographique ont permis de quantifier pour la première fois le taux de sédiments déposé ou érodé à l'estuaire du fleuve Comoé sur une période de deux années.

## CHAPITRE 10 : CARACTERISTISATION PHYSICO-CHEMIQUE ET TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION DANS L'ESTUAIRE DU FLEUVE COMOÉ

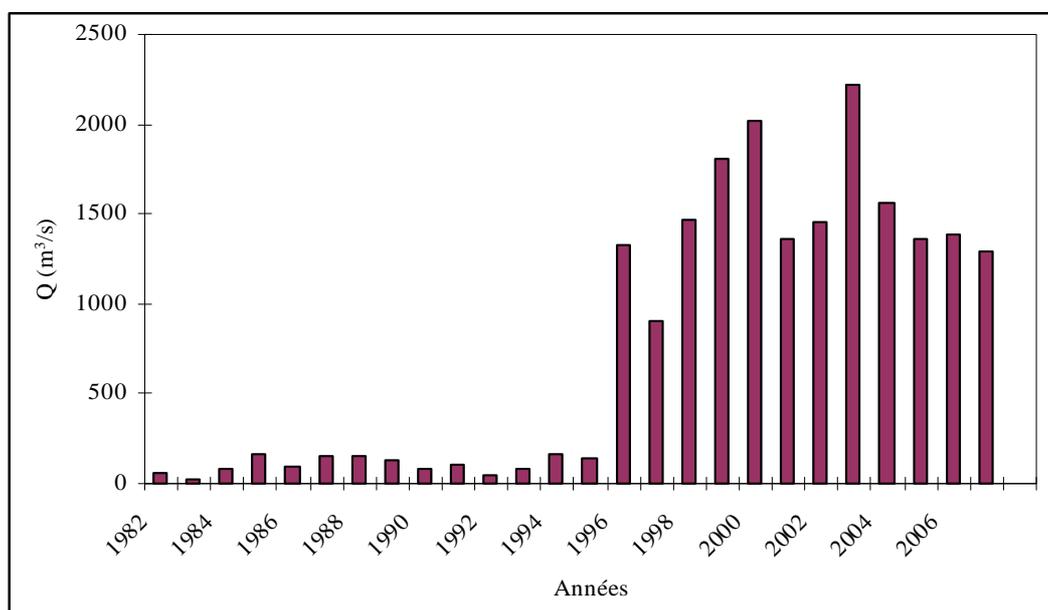
Les résultats présentés dans ce chapitre permettent de connaître les caractéristiques physico-chimiques de l'estuaire du fleuve Comoé. Il s'agit du pH, de la température, de la conductivité, de l'oxygène dissous, de la turbidité et des MES. En outre, l'étude de transport solide permet d'évaluer les apports solides en suspension. Commençons par représenter la variation des débits liquides.

### 10-1. VARIATION DES DEBITS LIQUIDES

L'analyse des débits moyens annuels et interannuels montre une irrégularité très marquée entre les années (tableau XXX et figure 55).

**Tableau XXX :** Représentation des débits moyens annuels

| Années | 1982 | 1984 | 1986 | 1988 | 1990 | 1992 | 1994 | 1996 | 1998 | 2000 | 2002 | 2004 | 2006 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits | 112  | 120  | 250  | 250  | 240  | 240  | 225  | 1500 | 1600 | 2300 | 1700 | 1600 | 1500 |



**Figure 55 :** Histogramme des débits moyens annuels du fleuve Comoé de 1982 à 2006

Il se dégage deux tendances :

- de 1982 à 1995, les débits du fleuve Comoé sont très faibles et ne dépassent pas  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- de 1996 à 2006, on observe une augmentation des débits allant de  $900$  à  $2215 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Pendant la période 1982-1995, le débit minimal enregistré est de  $21 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et le débit maximal de  $166 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Le débit moyen interannuel est de  $105 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Au cours de cette période l'écart-type et le coefficient de variation sont faibles (respectivement 47 et  $0,06 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Cependant, au cours de la période 1996-2006, le débit minimal est de  $903 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et le débit maximal de  $2215 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Le débit moyen est de  $1513 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . L'écart-type est de  $351 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  avec un coefficient de variation de 0,23 (Tableau XXXI). La période de 1980 à 1985 montre des faibles débits occasionnés par la sécheresse généralisée (ABE, 2005).

**Tableau XXXI:** Paramètres statistiques des débits moyens du fleuve Comoé

| <b>Paramètres</b>                          | <b>1982-1995</b> | <b>1996-2006</b> |
|--------------------------------------------|------------------|------------------|
| Débit maximum ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ ) | 166              | 2215             |
| Débit minimum ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ ) | 21               | 903              |
| Moyenne                                    | 105              | 1513             |
| Ecart-type                                 | 47               | 351              |
| Coefficient de variation                   | 0,06             | 0,23             |

## **10-2. EVOLUTION SAISONNIERE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES**

Le tableau XXXII présente les paramètres physico-chimiques de l'estuaire du fleuve Comoé en fonction des saisons hydrologiques.

Les MES, la turbidité, la conductivité et le taux d'oxygène dissous de l'estuaire de la Comoé subissent des fluctuations saisonnières relativement bien marquées. Ainsi, les MES et la turbidité présentent les plus fortes valeurs pendant les saisons pluvieuses. Cependant, la conductivité et l'oxygène dissous enregistrent les plus fortes valeurs en saisons sèches.

On constate que les eaux de l'estuaire sont peu minéralisées et les valeurs de pH sont proches de la neutralité. Le milieu est faiblement oxygéné sur toutes les saisons et présente des salinités relativement faibles.

### **10-2-1. Evolution saisonnière verticale**

L'analyse des figures montre l'évolution saisonnière des valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques de l'estuaire de la Comoé en fonction de la profondeur. Pour chaque saison, la valeur moyenne de chaque paramètre a été calculée respectivement à 0,5 ; 2 ; 5 et 10 m de la surface du plan d'eau.

### 10-2-1-1. pH

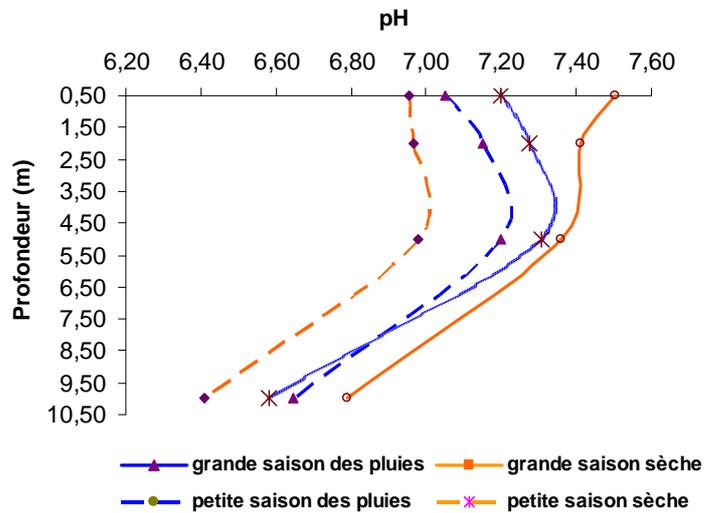
Le pH diminue de la surface vers le fond pour toutes les saisons (figure 56). Il augmente de 0,5 à 5 m puis diminue jusqu'à 10 m de profondeur. Les amplitudes entre les eaux superficielles et les eaux du fond sont, en moyenne, de l'ordre de 0,6 pour le pH. Ce qui engendre un courant. Les mécanismes générateurs de ces courants seraient les forces thermo-halines c'est-à-dire liées au pH.

**Tableau XXXII:** Moyennes saisonnières des paramètres physico-chimiques de l'estuaire du fleuve Comoé (168 échantillons/saison).

| Paramètres                                                        |            | Grande saison sèche | Grande saison des pluies | Petite saison sèche | Petite saison des pluies |
|-------------------------------------------------------------------|------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| <b>Température (°C)</b>                                           | Minimum    | 28,35               | 26,46                    | 26,60               | 26,68                    |
|                                                                   | Maximum    | 30,48               | 27,95                    | 28,89               | 28,68                    |
|                                                                   | moyenne    | 29,44               | 27,54                    | 27,91               | 28,02                    |
|                                                                   | Ecart-type | 0,96                | 0,72                     | 0,96                | 0,91                     |
| <b>pH</b>                                                         | Minimum    | 6,79                | 6,58                     | 6,41                | 6,64                     |
|                                                                   | Maximum    | 7,60                | 7,50                     | 6,75                | 7,11                     |
|                                                                   | moyenne    | 7,33                | 7,24                     | 6,23                | 6,95                     |
|                                                                   | Ecart-type | 0,37                | 0,44                     | 0,15                | 0,21                     |
| <b>Conductivité (<math>\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}</math>)</b> | Minimum    | 258,00              | 105,00                   | 210,00              | 124,00                   |
|                                                                   | Maximum    | 1254,00             | 675,00                   | 1110,00             | 521,00                   |
|                                                                   | moyenne    | 628,00              | 343,50                   | 522,00              | 348,25                   |
|                                                                   | Ecart-type | 434,00              | 264,06                   | 401,14              | 165,94                   |
| <b>Oxygène dissous (<math>\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}</math>)</b> | Minimum    | 1,09                | 1,09                     | 1,03                | 0,32                     |
|                                                                   | Maximum    | 2,16                | 1,55                     | 2,04                | 1,13                     |
|                                                                   | moyenne    | 1,69                | 0,19                     | 1,56                | 0,84                     |
|                                                                   | Ecart-type | 0,45                | 0,19                     | 0,38                | 0,36                     |
| <b>Turbidité (NTU)</b>                                            | Minimum    | 22,74               | 30,55                    | 15,12               | 25,12                    |
|                                                                   | Maximum    | 30,00               | 49,28                    | 27,11               | 33,22                    |
|                                                                   | moyenne    | 25,23               | 36,74                    | 18,63               | 27,48                    |
|                                                                   | Ecart-type | 3,33                | 8,51                     | 5,72                | 3,84                     |
| <b>Salinité (‰)</b>                                               | Minimum    | 0,64                | 0,01                     | 0,10                | 0,02                     |
|                                                                   | Maximum    | 2,83                | 1,06                     | 2,40                | 1,18                     |
|                                                                   | moyenne    | 1,33                | 0,39                     | 0,93                | 0,48                     |
|                                                                   | Ecart-type | 0,88                | 0,40                     | 0,88                | 0,44                     |
| <b>Potentiel Redox (mV)</b>                                       | Minimum    | 18,38               | 17,48                    | 14,39               | 13,00                    |
|                                                                   | Maximum    | 26,73               | 28,14                    | 16,00               | 20,00                    |
|                                                                   | moyenne    | 24,40               | 24,56                    | 14,99               | 16,50                    |
|                                                                   | Ecart-type | 4,02                | 4,80                     | 0,72                | 3,11                     |
| <b>MES (<math>\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}</math>)</b>             | Minimum    | 11,64               | 32,36                    | 11,43               | 32,36                    |
|                                                                   | Maximum    | 20,02               | 54,11                    | 23,45               | 58,37                    |
|                                                                   | moyenne    | 21,66               | 39,16                    | 14,74               | 40,25                    |
|                                                                   | Ecart-type | 3,97                | 10,07                    | 5,83                | 12,17                    |

Les variations du pH présentent globalement deux tendances durant toutes les saisons :

- pendant les saisons pluvieuses et la petite saison sèche, le pH augmente légèrement de la surface à 5 m de profondeur et subit ensuite une diminution rapide vers le fond ;
- pendant la grande saison sèche, le pH subit une diminution rapide de la surface à 5 m de profondeur et lente par la suite jusqu'au fond. Il s'établit ainsi une thermocline à 5 m de profondeur.



**Figure 56** : Variation du pH de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur

### 10-2-1-2. Salinité

Le tableau XXXIII résume les valeurs moyennes de la salinité calculées en fonction de la profondeur de l'estuaire du fleuve Comoé

**Tableau XXXIII** : Salinité moyenne saisonnière de l'estuaire du fleuve Comoé

| Salinité   | octobre | février | juin | août |
|------------|---------|---------|------|------|
| 0,5        | 0,00    | 0,00    | 0,01 | 0,06 |
| 2          | 0,20    | 0,46    | 1,03 | 0,77 |
| 5          | 0,50    | 0,75    | 2,05 | 1,07 |
| 10         | 1,80    | 2,40    | 2,58 | 2,43 |
| Moyenne    | 0,63    | 0,90    | 1,42 | 1,08 |
| Ecart-type | 0,70    | 0,90    | 0,99 | 0,86 |

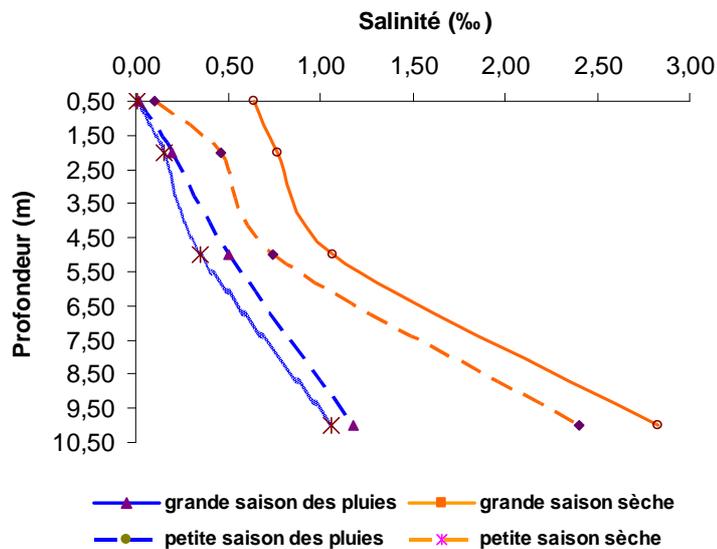
La figure 57 ci-dessous traduit la variation de la salinité moyenne dans la colonne verticale d'eau.

De l'ensemble des observations, il ressort que la distribution verticale de la salinité présente un gradient vertical positif.

En général, les valeurs de la salinité présentent une évolution à deux tendances :

- de la surface à 5 m de profondeur, elles augmentent lentement ;
- à partir de 5 m, on observe une rapide augmentation jusqu'au fond du plan d'eau.

Les amplitudes entre les eaux superficielles et les eaux du fond sont, en moyenne, de l'ordre de 2,3‰ pour la salinité. Ce qui engendre un courant.



**Figure 57** : Variation de la salinité de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur

### 10-2-1-3. Température

Le tableau ci-dessous donne les valeurs moyennes de températures calculées en fonction de la profondeur.

**Tableau XXXIV** : Température moyenne saisonnière de l'estuaire du fleuve Comoé

| T°C               |         |         |       |       |
|-------------------|---------|---------|-------|-------|
| Prof.(m)          | octobre | février | juin  | août  |
| 0,50              | 28,21   | 30,48   | 27,89 | 28,89 |
| 2                 | 28,51   | 29,96   | 27,95 | 28,25 |
| 5                 | 28,68   | 28,99   | 27,86 | 27,92 |
| 10                | 26,68   | 28,35   | 26,46 | 26,60 |
| <b>Moyenne</b>    | 28,02   | 29,44   | 27,54 | 27,91 |
| <b>Ecart type</b> | 0,79    | 0,83    | 0,63  | 0,84  |

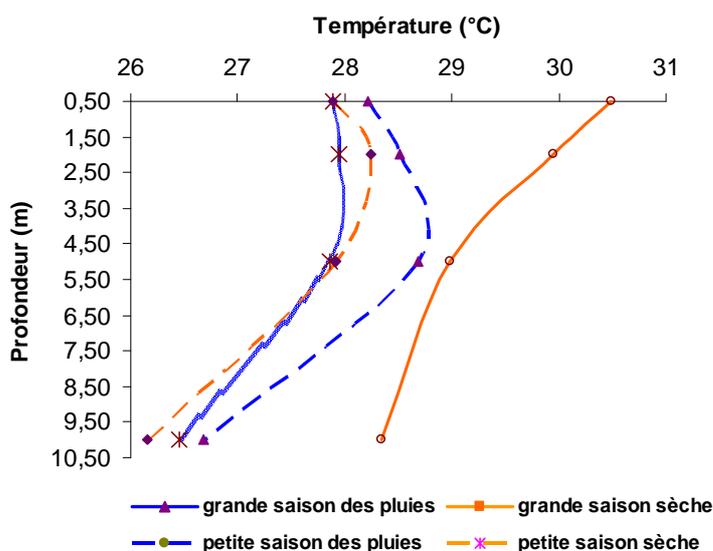
D'après ce tableau, les eaux sont généralement froides le matin et se réchauffent progressivement au cours de la mi-journée jusqu'à l'après midi. Ce processus montre que l'estuaire du fleuve Comoé présente au cours de la journée une stratification thermique.

D'une façon générale, la température de l'eau de l'estuaire du fleuve Comoé diminue de la surface vers le fond pour toutes les saisons (figure 58).

Les amplitudes entre les eaux superficielles et les eaux du fond sont, en moyenne, de l'ordre de 1,7°C. Ce qui engendre un courant.

Les variations de la température présentent globalement deux tendances durant toutes les saisons :

- pendant les saisons pluvieuses et la petite saison sèche, la température augmente légèrement de la surface à 5 m de profondeur et subit ensuite une diminution rapide vers le fond ;
- pendant la grande saison sèche, la température subit une diminution rapide de la surface à 5 m de profondeur et lente par la suite jusqu'au fond. Il s'établit ainsi une thermocline à 5 m de profondeur.



**Figure 58 :** Variation de la température de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur

#### 10-2-1-4. Conductivité

Le tableau XXXV résume les valeurs moyennes de la conductivité calculées en fonction de la profondeur.

**Tableau XXXV :** Conductivité moyenne saisonnière de l'estuaire du fleuve Comoé

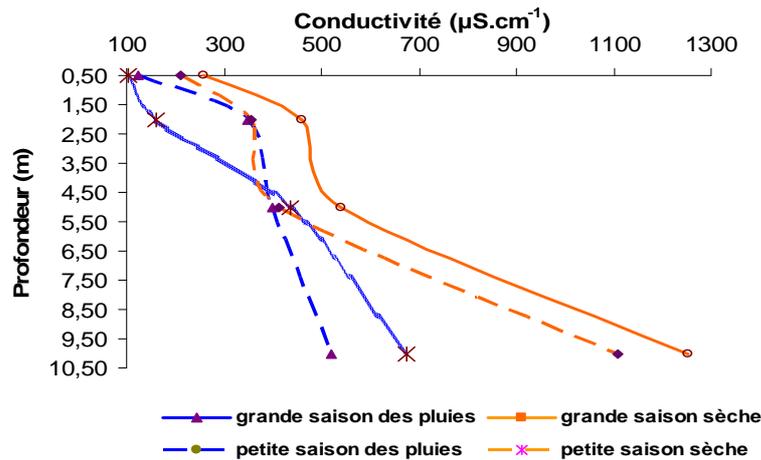
| CONDUCTIVITE      |         |         |        |         |
|-------------------|---------|---------|--------|---------|
| Prof.(m)          | octobre | février | juin   | août    |
| 0,50              | 124,00  | 258     | 105,00 | 210,00  |
| 2                 | 350,00  | 458,00  | 159,00 | 356,00  |
| 5                 | 398,00  | 542,00  | 435,00 | 412,00  |
| 10                | 521,00  | 1254    | 675,00 | 1110,00 |
| <b>Moyenne</b>    | 348,25  | 628,00  | 343,50 | 522,00  |
| <b>Ecart type</b> | 143,71  | 375,86  | 228,68 | 347,40  |

La figure 59 ci-dessous traduit la variation de la conductivité moyenne dans la colonne verticale d'eau. Dans l'ensemble des observations, il ressort que la conductivité des eaux profondes demeure supérieure à celle des eaux superficielles.

La conductivité présente un gradient vertical positif. En général, les valeurs de conductivité présentent une évolution à deux tendances :

- de la surface à 5 m de profondeur, elles augmentent lentement.
- à partir de 5 m, on observe une rapide augmentation jusqu'au fond du plan d'eau.

L'amplitude de la conductivité entre les eaux de surface et celles du fond est en moyenne de  $900 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  pendant les saisons sèches. Les amplitudes entre les eaux superficielles et les eaux du fond sont, en moyenne, de l'ordre de  $715 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  pour la conductivité.



**Figure 59 :** Variation de la conductivité de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur

#### 10-2-1-5. Oxygène dissous

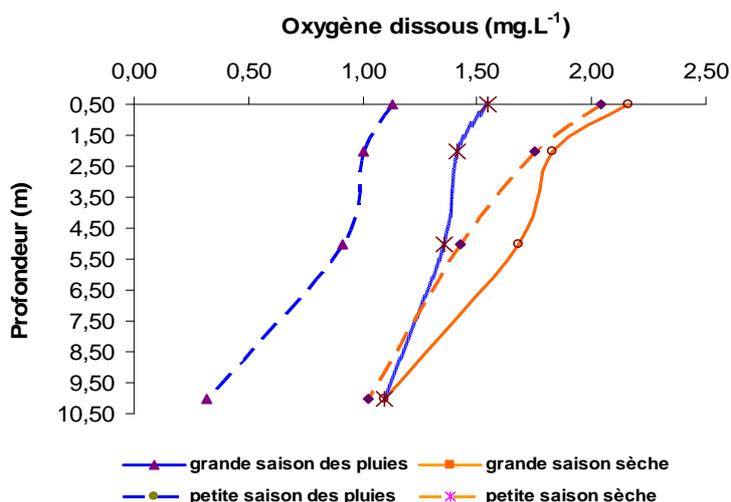
Le tableau XXXVI résume les valeurs moyennes de l'oxygène dissous calculées en fonction de la profondeur.

**Tableau XXXVI :** Teneur moyenne saisonnière en oxygène dissous dans l'estuaire du Comoé

| OXYGENE DISSOUS   |         |         |      |      |
|-------------------|---------|---------|------|------|
| Prof.(m)          | octobre | février | juin | août |
| 0,50              | 1,13    | 2,16    | 1,55 | 2,04 |
| 2                 | 1       | 1,83    | 1,41 | 1,75 |
| 5                 | 0,91    | 1,68    | 1,35 | 1,43 |
| 10                | 0,32    | 1,09    | 1,09 | 1,03 |
| <b>Moyenne</b>    | 0,84    | 1,69    | 1,35 | 1,56 |
| <b>Ecart type</b> | 0,31    | 0,39    | 0,16 | 0,38 |

D'après la figure 60, les eaux de surface sont mieux oxygénées que les eaux profondes et la moyenne des concentrations se situe aux environs des cinq premiers mètres. Le profil vertical montre qu'au-delà de 10 m de profondeur, les eaux sont désoxygénées, le milieu est anoxique.

L'oxygène dissous diminue de la surface vers le fond pour toutes les saisons. Les amplitudes entre les eaux superficielles et les eaux du fond sont, en moyenne, de l'ordre de 0,8 mg.L<sup>-1</sup> pour l'oxygène dissous. L'oxygène dissous subit graduellement une diminution quasi similaire avec la profondeur.



**Figure 60:** Variation de l'oxygène dissous de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur

#### 10-2-1-6. Potentiel redox

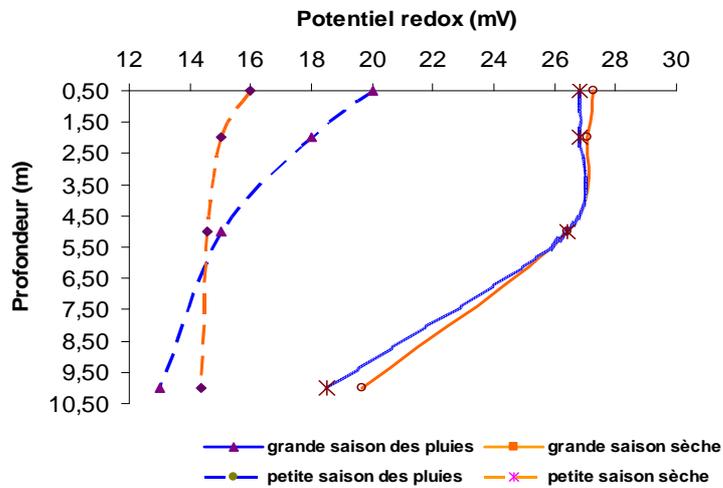
Le tableau XXXVII résume les valeurs moyennes du potentiel redox calculées en fonction de la profondeur.

**Tableau XXXVII :** Potentiel redox moyenne de l'estuaire du fleuve Comoé

| POTENTIEL         |         |         |       |       |
|-------------------|---------|---------|-------|-------|
| Prof.(m)          | octobre | février | juin  | août  |
| 0,50              | 20,00   | 26,73   | 28,14 | 16,00 |
| 2                 | 18,00   | 26,07   | 26,21 | 15,00 |
| 5                 | 15,00   | 26,41   | 26,42 | 14,57 |
| 10                | 13,00   | 18,38   | 17,48 | 14,39 |
| <b>Moyenne</b>    | 16,50   | 24,40   | 24,56 | 14,99 |
| <b>Ecart type</b> | 2,69    | 3,48    | 4,16  | 0,62  |

Le potentiel d'oxydoréduction diminue de la surface vers le fond pour toutes les saisons (figure 61). Les amplitudes entre les eaux superficielles et les eaux du fond sont, en

moyenne, de l'ordre de 6,9 mV pour le potentiel redox. Le potentiel d'oxydoréduction subit graduellement une diminution quasi similaire avec la profondeur.



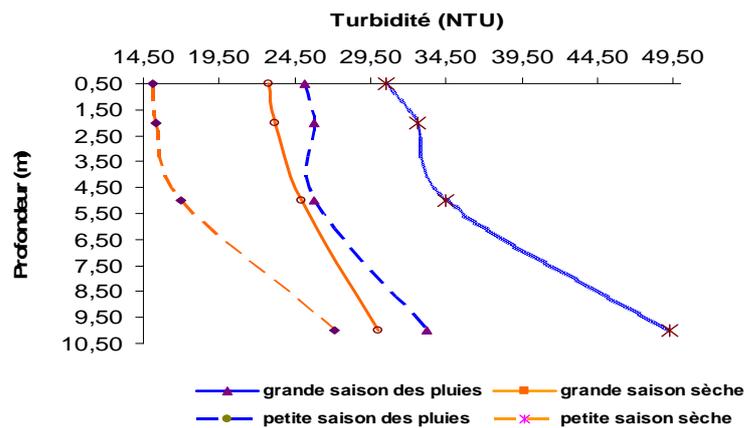
**Figure 61:** Variation du potentiel redox de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur

#### 10-2-1-7. turbidité

La distribution de la turbidité présente un gradient vertical positif (figure 62). En général, les valeurs de la turbidité présentent une évolution à deux tendances :

- de la surface à 5 m de profondeur, elles augmentent lentement.
- à partir de 5 m, on observe une rapide augmentation jusqu'au fond du plan d'eau.

Les amplitudes entre les eaux superficielles et les eaux du fond sont, en moyenne, de l'ordre de 11,5 NTU pour la turbidité.



**Figure 62:** Variation de la turbidité de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur

### 10-2-1-8. MES (Matière en Suspension)

Le tableau XXXVIII résume les valeurs moyennes de la concentration de matière en suspension calculées en fonction de la profondeur.

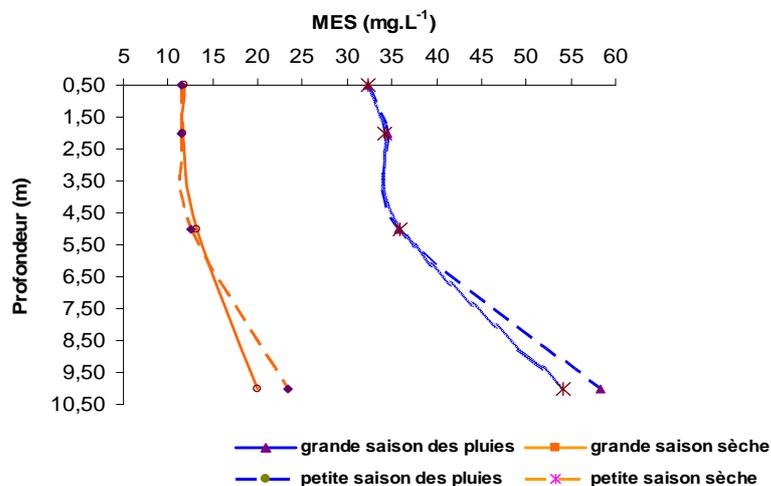
**Tableau XXXVIII :** Concentration de matière en suspension dans l'estuaire du fleuve Comoé

| MES        | octobre | février | juin  | août  |
|------------|---------|---------|-------|-------|
| 0,5        | 32,36   | 11,80   | 32,36 | 11,5  |
| 2          | 34,45   | 11,64   | 34,26 | 11,43 |
| 5          | 35,81   | 13,17   | 35,89 | 12,58 |
| 10         | 58,37   | 50,02   | 54,11 | 23,45 |
| Moyenne    | 40,25   | 21,66   | 39,16 | 14,74 |
| Ecart-type | 10,54   | 16,38   | 8,72  | 5,05  |

La distribution verticale des MES présentent un gradient vertical positif (figure 63). En général, les valeurs de ces quatre paramètres présentent une évolution à deux tendances :

- de la surface à 5 m de profondeur, elles augmentent lentement.
- à partir de 5 m, on observe une rapide augmentation jusqu'au fond du plan d'eau.

Les amplitudes entre les eaux superficielles et les eaux du fond sont, en moyenne, de l'ordre de  $17 \text{ mg.L}^{-1}$  pour les MES.

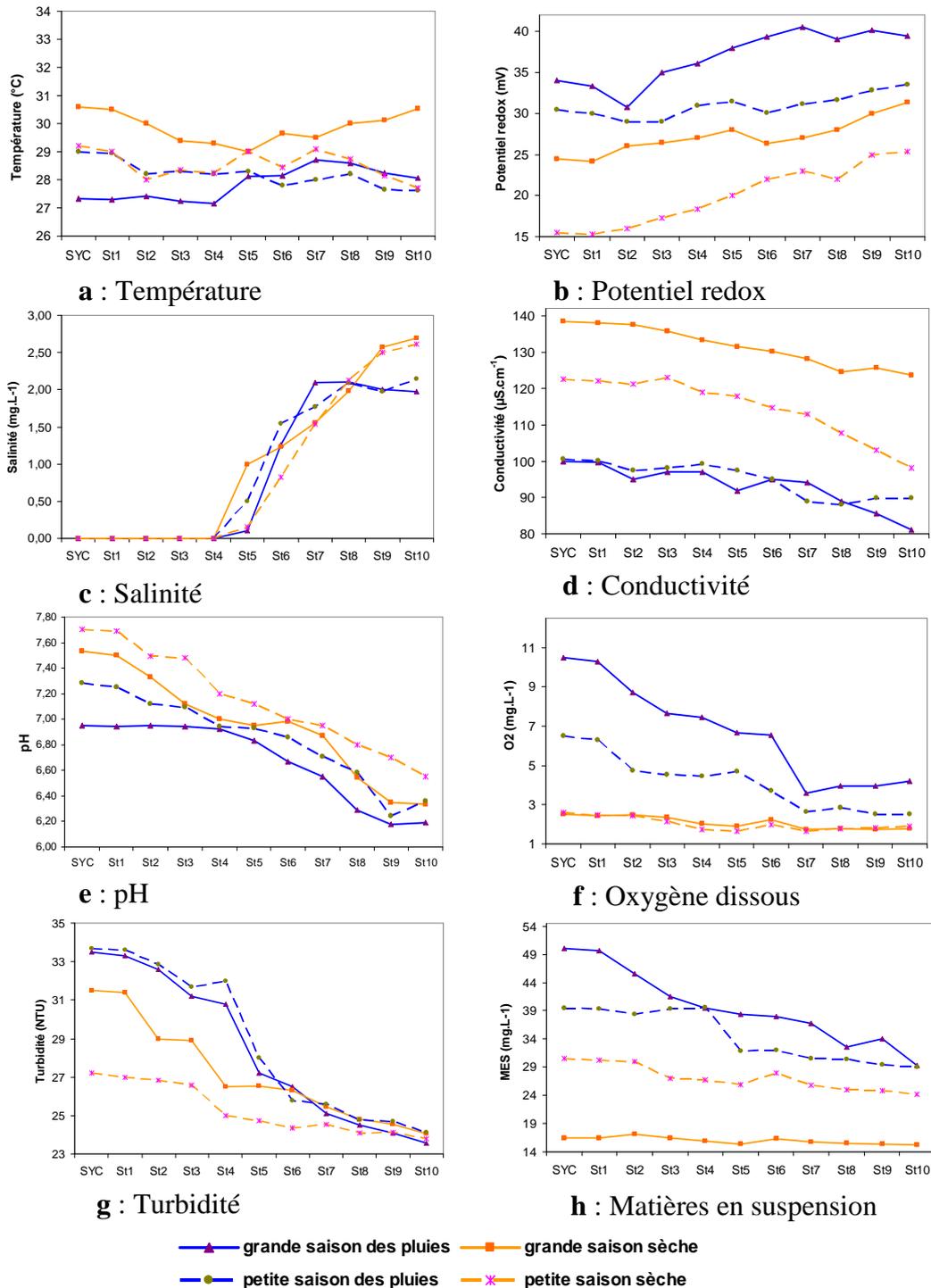


**Figure 63:** Variation des MES de l'estuaire du Comoé en fonction de la profondeur

### 10-2-2. Evolution saisonnière spatiale

La figure 64 présente la distribution des paramètres physico-chimiques depuis l'amont du fleuve Comoé jusqu'à son embouchure. Le suivi spatial des paramètres physico-chimiques a été réalisé sur une distance d'environ 30 km le long du cours d'eau, de la station S<sub>YC</sub> (station Yakassé-Comoé) à la station S10.

La température ne subit pas de fluctuations significatives du cours d'eau à l'embouchure sauf pendant la grande saison sèche où les eaux sont plus chaudes notamment au niveau de l'estuaire (Figure 64 a).



**Figure 64:** Moyennes saisonnières des paramètres physico-chimiques de l'amont vers l'embouchure du fleuve Comoé 2005 à 2007.

Le potentiel redox et la salinité par contre augmentent du cours d'eau vers l'embouchure pendant toutes les saisons (Figure 64 b et c). La salinité passe d'une valeur nulle de la station S1 à environ 0,01 ‰ à la station S<sub>5</sub> et subit ensuite une augmentation rapide pour atteindre les valeurs de 2,5 ‰ à l'embouchure.

Par ailleurs, le pH, l'oxygène dissous, la turbidité et les MES décroissent de l'amont à l'embouchure (Figure 64 e, f, g, et h). Cette diminution est plus marquée pendant les saisons pluvieuses que pendant les saisons sèches.

L'on remarque une baisse des valeurs de la conductivité (Figure 64 d) au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'embouchure. Cette baisse est plus marquée pendant les saisons pluvieuses.

La matrice de corrélation, issue de l'Analyse en Composantes Principales Normées appliquée sur les variables physico-chimiques en fonction des saisons et de la profondeur montre que la conductivité, l'oxygène dissous, la turbidité, les matières en suspension et la salinité sont fortement corrélés (tableau XXXIX). De plus, on remarque que la salinité (0,92) et la conductivité (0,82) sont influencées par la profondeur

**Tableau XXXIX:** Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques lors des crues de l'estuaire du fleuve Comoé

|                                          | Prof (m)     | Temp (°C)   | pH          | Cond (µS.cm <sup>-1</sup> ) | Pot (mV)    | O <sub>2</sub> dis (mg.L <sup>-1</sup> ) | Sal (mg.L <sup>-1</sup> ) | Turb (NTU)  | MES (mg.L <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------------------------|-------------|------------------------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|
| Prof (m)                                 | 1            |             |             |                             |             |                                          |                           |             |                           |
| Temp (°C)                                | -0,28        | 1,00        |             |                             |             |                                          |                           |             |                           |
| pH                                       | -0,31        | <b>0,67</b> | 1,00        |                             |             |                                          |                           |             |                           |
| Cond (µS.cm <sup>-1</sup> )              | <b>0,82</b>  | -0,77       | -0,94       | 1,00                        |             |                                          |                           |             |                           |
| Pot (mV)                                 | -0,37        | -0,58       | -0,91       | <b>0,88</b>                 | 1,00        |                                          |                           |             |                           |
| O <sub>2</sub> dis (mg.L <sup>-1</sup> ) | <b>-0,45</b> | <b>0,86</b> | <b>0,81</b> | -0,91                       | -0,68       | 1,00                                     |                           |             |                           |
| Sal (mg.L <sup>-1</sup> )                | <b>0,92</b>  | -0,64       | -0,78       | <b>0,85</b>                 | <b>0,63</b> | -0,86                                    | 1,00                      |             |                           |
| Turb (NTU)                               | 0,18         | <b>0,76</b> | <b>0,84</b> | -0,92                       | -0,75       | <b>0,89</b>                              | -0,94                     | 1,00        |                           |
| MES (mg.L <sup>-1</sup> )                | 0,22         | <b>0,80</b> | <b>0,82</b> | -0,95                       | -0,81       | <b>0,91</b>                              | -0,80                     | <b>0,90</b> | 1,00                      |

### 10-3. TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

Le tableau XXXX présente les variations moyennes saisonnières des charges solides en suspension à l'estuaire du fleuve Comoé.

**Tableau XXXX:** Moyennes saisonnières des charges solides en suspension à l'estuaire du Comoé

| Période   | Saisons                                           | Petite saison des pluies | Grande saison sèche | Grande saison des pluies | Petite saison sèche | Apports solides annuels (tonne) |
|-----------|---------------------------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 2005-2006 | Débit du Comoé (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 274                      | 17                  | 41                       | 349                 | <b>72134</b>                    |
|           | Concentration en MES (mg.L <sup>-1</sup> )        | 30,1                     | 20,3                | 40,2                     | 10,1                |                                 |
|           | Débit solide de suspension (kg.s <sup>-1</sup> )  | 8,2                      | 0,3                 | 1,6                      | 3,5                 |                                 |
|           | Apport particulaire (tonne)                       | 43395                    | 1789                | 8540                     | 18410               |                                 |
| 2006-2007 | Débit du Comoé (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 281                      | 17                  | 41                       | 355                 | <b>71396</b>                    |
|           | Concentration en MES (mg.L <sup>-1</sup> )        | 30,3                     | 20,4                | 30,5                     | 10,6                |                                 |
|           | Débit solide de suspension (kg.s <sup>-1</sup> )  | 8,4                      | 0,3                 | 1,3                      | 3,6                 |                                 |
|           | Apport particulaire (tonne)                       | 44371                    | 1427                | 6874                     | 18724               |                                 |

Prof : Profondeur ; Temp : Température ; Cond : Conductivité ; Pot : Potentiel redox ; O2 : Oxygène dissous ; Sal : Salinité ; Turb : Turbidité

Les apports solides subissent des fluctuations inter saisonnières plus fortes que les fluctuations inter-annuelles.

Les charges solides en suspension sont de 30 mg.L<sup>-1</sup> en moyenne pendant les saisons pluvieuses et de 15 mg.L<sup>-1</sup> pendant les saisons sèches. Les flux particuliers sont plus élevés pendant la petite saison des pluies où les débits du fleuve et les concentrations en MES connaissent à la fois de fortes valeurs. Durant chacun des deux cycles hydrologiques, l'estuaire a reçu, environ, 72000 tonnes de matières en suspension dont plus de la moitié ont été transportées au cours de la petite saison des pluies.

### 10-4. ANALYSE COMPARATIVE DES DEPOTS MARINS ET FLUVIAUX

#### 10-4-1. Dépôts fluviaux

Les résultats sédimentologiques attestent que la distribution des sédiments n'est pas homogène à l'estuaire du fleuve Comoé. Les sables moyens à grossiers se rencontrent dans le lit principal du fleuve. Leur granulométrie décroît de l'amont vers l'aval. La moyenne granulométrique des sables est comprise entre 240 et 765 µm. Les indices de classement se

situent entre 0,58 et 1,12 avec une moyenne de 0,85. Ceci indique que les sables dans l'estuaire sont modérément classés à mal classés. Les indices d'asymétrie (skewness) s'étendent de 0,06 à 0,25 indiquant une forte asymétrie vers les petites tailles.

Les analyses morphologiques et morphométriques montrent une prédominance de grain de quartz subarrondis et arrondis. Ils ont donc une origine lointaine. L'étude quantitative de la concentration des particules en suspension a montré que 72000 tonnes de sédiments se sont déposées de 2006 à 2007. Ce qui montre que le fleuve apporte peu de sédiment à l'embouchure du fleuve Comoé. Au niveau des berges, les sédiments qui composent le dépôt sont constitués de vases. Les sables occupent les autres parties du bassin.

#### **10-4-2. Dépôts marin**

Dans les dépôts marins, les sédiments sont constitués essentiellement de sable moyens à grossiers. Ils sont inégalement repartis sur les estrans. Ils sont grossiers à l'Ouest de l'embouchure et moyen à l'Est. Cependant, ils sont modérément classés à mal classés avec une asymétrie vers les petites tailles. Les sables ont également une coloration rousse, témoin de la présence d'oxyde de fer.

Ces analyses font ressortir une prédominance de grain de quartz subarrondis et arrondis. Ils ont donc une origine lointaine. L'étude quantitative des sédiments de sables a montré que 361466 tonnes de sédiments se sont déposées de 2006 à 2007. Ce qui montre que la mer apporte cinq fois plus de sédiment à l'embouchure du fleuve Comoé. Le cordon littoral et l'estuaire du fleuve Comoé sont constitués en général des mêmes sédiments.

Le caractère irrégulier des débits du fleuve Comoé et la baisse des courants fluviaux au niveau de l'embouchure après l'ouverture du canal de Vridi pourraient expliquer, en partie, cette fermeture. En effet, la réduction significative des débits de ce cours d'eau pendant les périodes d'étiage, notamment au cours de ces dernières décennies du fait de l'influence des fluctuations climatiques, favorise les phénomènes de sédimentation (KOUASSI, 2007). La conjugaison des dépôts fluviaux et du transit littoral occasionne le colmatage rapide de l'embouchure du fleuve Comoé.

#### **10-5-LES CAUSES DE L'EROSION COTIERE**

Les causes de l'érosion côtière sont très variables et peuvent être différentes d'un secteur à un autre. Ces causes peuvent être d'origine naturelle ou d'origine anthropique. Sur les côtes ivoiriennes, les phénomènes naturels et l'impact de l'Homme sont à l'origine de l'érosion

constatée. En effet, au titre des causes naturelles on peut citer l'élévation du niveau marin, le déficit d'apport sédimentaire, l'instabilité naturelle des pentes, l'absence de structure naturelle capable d'atténuer l'effet de la houle sur l'estran, l'existence de côte basse sableuse, et enfin l'effet conjugué de l'orientation de la ligne de côte et la direction des houles. A côté de ces causes naturelles, l'intervention de l'Homme telle que la construction d'ouvrages de défense perpendiculaires à la côte, la construction de bâtiments sur les plages, les prélèvements de sable de plage sont tout aussi responsables de l'érosion.

## **10-6-LES CONSEQUENCES DE L'EROSION COTIERE**

Lors de conditions météorologiques particulières, qui se manifestent selon des rythmes saisonniers ou journaliers, le littoral peut évoluer comme suit :

- les plages disparaissent,
- les routes littorales et les autres infrastructures jouxtant la côte subissent des dégâts importants,
- les habitations, trop souvent construites en bord de mer, sont sujettes à une dégradation intense,
- la base des falaises est soumise à l'érosion, avec la possibilité d'éboulements et de chutes.

Cette érosion côtière est la cause de l'abandon de plusieurs villages et zones touristiques dont les occupants doivent être recasés ailleurs, le plus connu étant la ville de Grand-Lahou.

## **10-7. DISCUSSION**

### **- Paramètres physico-chimiques**

L'estuaire du fleuve Comoé a une minéralisation moyenne. Les teneurs en oxygène dissous sont de l'ordre de  $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$  pendant les saisons pluvieuses et de  $1,6 \text{ mg.L}^{-1}$  pendant les saisons sèches. Cette faible oxygénation des eaux peut être liée au confinement de l'estuaire et à l'oxydation des matières organiques transportées dans l'estuaire par les eaux de ruissellement. AFFIAN (2003) et MONDE (2004), qui ont fait les mêmes observations, rapportent que les rejets d'eaux usées dans la lagune Ebrié constituent une importante source d'approvisionnement de matières organiques dans l'estuaire du Comoé. Les teneurs en oxygène dissous sont relativement plus élevées dans les zones superficielles du plan d'eau estuarien. Cela pourrait être dû au brassage de l'eau par le vent et aux activités photosynthétiques qui se déroulent généralement avec une plus grande intensité du fait de la forte pénétration de la lumière dans ces zones moins turbides. Selon DUFOUR *et al.* (1994), l'oxygénation par échange avec l'atmosphère et l'oxygénation par photosynthèse sont à

l'origine des fortes teneurs en oxygène dissous dans la partie superficielle du plan d'eau. En revanche, dans les zones profondes, l'oxydation de la matière organique entraîne une désoxygénation des eaux.

On constate un faible taux de la salinité qui varie de 0 à 10,5‰. Cela est dû la fermeture de l'embouchure qui occasionne le confinement de l'estuaire. Nos valeurs de la salinité de l'estuaire du fleuve Comoé sont au moins 20 fois inférieures à celles trouvées par SANKARE *et al.* (1991) et SANKARE et ETIEN (1991) sur le même estuaire (15 à 30‰). En effet, les faibles valeurs de la salinité enregistrées pendant les saisons pluvieuses sont dues à la dilution des eaux estuariennes par les eaux de ruissellement. Par ailleurs, la fermeture de l'estuaire limite t-elle la marée de la salinité dont le front se situe aux voisinages de 4 km de l'estuaire (figure 64 c). Ainsi, la limite supérieure de la remontée saline dans le fleuve Comoé est faible comparativement aux observations de MIGNIOT (1982) et WOGNIN (2004) sur le fleuve Bandama où le front de la marée de salinité se situe vers 30 km de l'embouchure pendant les saisons sèches et 15 km pendant les saisons pluvieuses.

Aussi, la minéralisation des charges organiques qui se traduit par une augmentation de la conductivité mobilise t-elle l'oxygène dissous qui est consommé par les micro-organismes intervenant dans ce processus. Ainsi, après les saisons pluvieuses, les saisons sèches qui suivent constituent les périodes pendant lesquelles la minéralisation des charges apportées en saison pluvieuse atteint son maximum. La minéralisation des matières organiques, conjuguée à l'effet de l'évaporation de l'eau se traduit par des valeurs élevées de la conductivité (figure 64 f).

La diminution de la turbidité et des MES du cours d'eau à l'embouchure est liée aux phénomènes de décantation qui se traduisent par des dépôts progressifs des charges solides lors du transport. Ainsi, l'augmentation de ces deux paramètres de la surface vers le fond est due à la décantation qui provoque un déplacement des particules vers le fond. La turbidité et les charges solides en suspension à l'estuaire du fleuve Comoé sont deux fois plus élevées que celles de l'estuaire du fleuve Bandama où WOGNIN *et al.* (2007), trouve des concentrations moyennes de MES de l'ordre de 18 mg.L<sup>-1</sup> pendant les saisons pluvieuses et 7 mg.L<sup>-1</sup> pendant les saisons sèches. Les faibles charges solides en suspension enregistrées dans le Bandama peuvent s'expliquer par la présence des deux grands barrages (Kossou et Taabo) qui piègent une partie des sédiments transportés par le fleuve (KOUASSI *et al.*, 2007) dans le lac de Taabo et DUMOLARD *et al.*, (2003) dans l'estuaire de la Loire.

La quantité de sédiments, d'environ 72000 t, transportée en suspension chaque année par la Comoé à son estuaire contribue à la fermeture de son embouchure. Ce résultat confirme en partie les travaux antérieurs de ABE *et al.* (1996). Selon cet auteur, la baisse des débits du fleuve Comoé est liée aux fluctuations climatiques qui diminuent l'intensité du courant et la pénétration en mer de ce fleuve. Il se produit par conséquent une sédimentation des matériaux transportés par la Comoé qui, ajoutée au transit sédimentaire, favorisent le colmatage rapide de l'embouchure.

#### **- Analyse en composante principale (ACP)**

Lors de la période des crues, de très fortes corrélations existent entre l'oxygène dissous, les MES (38,01), la turbidité (28,31), la température (28,15) et le pH (6,79) depuis Yaou à la confluence. Ces paramètres sont plus élevés de Yaou à la confluence du fleuve mais faible de la confluence à l'embouchure. La salinité, la conductivité et le potentiel redox présentent-ils un comportement inverse aux précédents dans ces deux zones. L'augmentation de la turbidité et des MES obtenue en période de crues serait liée à l'ampleur du phénomène d'écoulement qui favorise le transport des particules sur le bassin versant.

Lors des crues, la température est relativement uniforme d'amont en aval. La pluie constituerait donc un facteur refroidissant la tranche d'eau et la présence des nuages atténuerait l'ensoleillement de la surface d'eau (CHARRE, 1995 ; MINVIELLE et SOUIAH, 2003).

#### **Conclusion**

Les variations des apports particuliers sont étroitement liées aux saisons hydrologiques. Pendant les saisons de pluies, les eaux sont plus chargées que pendant les saisons sèches. La distribution spatiale des MES présente un gradient amont-aval négatif alors et présente un gradient surface-profondeur positif et vertical. Le bilan annuel des flux particuliers montre que 72000 t/an de matière en suspension se déposent dans l'estuaire chaque année.

L'analyse en composantes principales nous a permis de mettre en évidence les affinités entre les différents physico-chimiques et de déduire les paramètres qui caractérisent au mieux l'estuaire.

## **CONCLUSION GENERALE**

Au terme de cette étude sur la caractérisation de la dynamique des stocks sédimentaires de l'estuaire du Comoé, il convient de faire le bilan des connaissances acquises. Il s'agira d'abord d'analyser l'évolution granulométrique des sédiments superficiels. Ensuite, déterminer les caractéristiques physico-chimiques et les charges solides en suspension d'une part et, d'autre part, la morphologie du fond de l'environnement estuarien du fleuve Comoé. Enfin, il s'agira d'estimer la quantité de sable engraisée ou érodée à l'embouchure.

### **1. Hydrologie de l'estuaire.**

Les paramètres hydrologiques ont montré que le débit du fleuve Comoé possède une période de crue centrée au mois de septembre et une période d'étiage allant de janvier à avril. Ce ci permet d'affirmer que le fleuve possède un régime très irrégulier. Cependant, lorsqu'on se place du point de vue des saisons, on arrive à la conclusion que le fleuve Comoé a un régime régulier puisque les périodes de crue et d'étiage se distinguent nettement. Les conditions optimales d'observation de la pénétration maximale des eaux marines se situent pendant l'étiage du fleuve.

Dans l'estuaire du Comoé, pendant la période de crue, le débit est assez fort. Mais il ne permet pas de vaincre la pression de la marée. On assiste donc à une sédimentation à l'embouchure du Comoé.

Le bilan global annuel des flux de matières en suspension calculé sur la base des apports liquides et des charges solides en suspension montre qu'il se dépose 72000 tonnes de sédiment à l'embouchure du fleuve Comoé.

### **2- Analyse granulométrique et minéralogique**

Les analyses granulométriques et minéralogiques effectuées sur les sédiments prélevés montrent qu'ils sont constitués de vases, de sables fins, de sables moyens et de sables grossiers. Les vases, qui renferment une importante quantité de matières organiques, représentent la grande proportion dans ces sédiments. Les sables présents dans les sédiments de l'estuaire sont majoritairement moyens à grossiers et sont médiocrement classés. Leur distribution n'est pas homogène dans le milieu estuarien. Les vases et les sables fins se rencontrent de façon générale aux voisinages des berges et particulièrement dans les zones profondes et les zones fortement occupées par les végétaux aquatiques envahissants. En revanche, les sables fins et moyens se localisent aux voisinages des îles et en amont du fleuve. Par ailleurs, l'aspect subanguleux à subarrondis et brillants des sables de l'estuaire permet de déduire que ces sables ont subi un transport par l'eau sur une distance relativement courte.

### **3- Analyse morphologique**

L'analyse morphologique de ses divers profils à l'embouchure du fleuve Comoé révèle différents types de comportement. Une érosion de part et d'autre de l'embouchure et un engraissement dans le lit principal du fleuve. L'étude a montré que 111768 m<sup>3</sup> de sable se sont déposés contre 60062 m<sup>3</sup> de sable érodé. Toutefois, la tendance générale de la zone demeure l'engraissement.

Cette étude a permis d'établir la première carte bathymétrique de l'estuaire depuis sa fermeture et d'évaluer le volume de dépôt dans l'estuaire du fleuve Comoé. Pendant la période 2005 à 2007, la quantité de sédiments déposés est de 880500 m<sup>3</sup> contre 325000 m<sup>3</sup> érodés.

### **4- Répartition des sédiments sur la plage**

L'étude réalisée a révélé que les sédiments prélevés pendant les quatre campagnes au niveau de l'embouchure du fleuve Comoé sont en général des sables grossiers assez bien classés et à asymétrie vers les éléments fins. Ces sédiments sont de plus en plus grossiers du haut estran vers le bas estran et de la zone ouest vers la zone est de l'embouchure.

Par ailleurs, les minéraux lourds trouvés ont en général des pourcentages élevés du haut estran vers le bas estran. Ce sont : l'ilménite, l'amphibole, le diopside, l'épidote, le leucoxène, la monazite, le pyroxène, le rutile, la tourmaline, le grenat, l'or, la limonite, la biotite, le chrysobéryl, le zircon, le gorceixite, la sidérite et la sillimanite. Quelque soit la période (crue ou étiage), les minéraux lourds trouvés sont dominés par lilménite.

L'analyse morphométrique a révélé une diversité de formes et a mis en évidence la prépondérance des minéraux de forme arrondie et d'aspect luisant, ce qui indique un long parcours pour la majorité des minéraux lourds.

Des études complémentaires peuvent être envisagées au niveau de l'embouchure du fleuve Comoé et le long du littoral en vue de préciser la concentration en ilménite en raison de son importance.

## **Perspectives**

Une bonne compréhension des phénomènes hydro sédimentaires s'avèrent nécessaires pour élaborer des mesures visant à résoudre le problème d'ensablement de l'embouchure. Aussi dans les travaux futurs nous projetons :

- Un modèle numérique du fonctionnement de l'embouchure doit être établi; ce qui n'a pas pu être réalisé dans cette étude par manque d'un logiciel adapté et une insuffisance de formation ;
- Une étude plus détaillée des débits et des courants d'eau à l'embouchure ;
- Une simulation des phénomènes hydrodynamiques et sédimentaires actuels (modèle 3D);
- Une simulation des phénomènes hydrodynamiques et sédimentaires après une ouverture de l'embouchure (modèle 3D);
- Mener des études hydrologiques en vue de déterminer la limite seuil permettant au fleuve de pénétrer dans l'océan ;
- Le travail va se poursuivre à d'autres estuaires en vue d'une comparaison ;
- Proposer la meilleure option pour sa protection.

## **BIBLIOGRAPHIE**

**ABE J. (1995).** Etude comparative de la dynamique sédimentaire aux embouchures des fleuves du littoral ivoirien. Proc. Inc. Coastal Change 95, Bordeaux, pp. 347-363.

**ABE J. (2005).** Contribution à la connaissance de la morphologie et de la dynamique sédimentaire du littoral Ivoirien (cas du littoral d'Abidjan) : Essais de modélisation en vue d'une gestion rationnelle. Thèse de Doctorat d'Etat Sc. Nat, Univ. de Cocody, 309p.

**ABE J., BAKAYORO S., BAMBA S. et CISSOKO S. (1996).** L'hydrologie de l'estuaire du Comoé à Grand-Bassam (Côte d'Ivoire). Journal ivoirien d'océanologie et de limnologie. Vol. 8 (3), pp. 201-212.

**ADOPO K. L. (2004).** Evolution Morphologique et Sédimentologique du trait de côte entre Jacquerville et Port-bouet. Mém. DEA, Univ. de Cocody, 74 p.

**ADOPO K., WOGNIN A., MONDE S. et AKA K. (2008).** Caractérisation des sédiments et morphologie de l'embouchure du fleuve Comoé (grand-bassam, Côte d'Ivoire). Revue Paralia, Volume 1 (2008) pp 2.1-2.10.

**ADOPO K., WOGNIN A., MONDE S., MELEDJE N. et AKA K. (2008).** Spatial Distribution and Characterisation of the Sediments of the Estuary of Comoé River (Grand-Bassam, Côte d'Ivoire).  
European Journal of Scientific Research. ISSN 1450-216X Vol.20 No.4 (2008), pp.817-827

**AFFIAN K. (2003).** Approche environnementale d'un système lagunaire microtidal (la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire), par des études géochimiques, bathymétriques et hydrologiques: contribution du SIG et de la télédétection. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Univ. de Cocody, Côte d'Ivoire, 216p.

**AFNOR -Association Française de Normalisation. (1996).** Qualité de l'eau 6<sup>ème</sup> édition, Tome 2. Analyses organoleptiques, mesures physico-chimiques, paramètres globaux, composés organiques, 629p.

**AKA K. (1991).** La sédimentation quaternaire sur la marge de la Côte d'Ivoire: Essai de modélisation. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Univ. d'Abidjan, Côte d'Ivoire, n°146, 320p.

**AMINI M. (1979).** Etude des processus dynamiques et de l'évolution sédimentaire sur la côte sableuse d'Aquitaine. Thèse d'Etat ès Science. Nat. de Bordeaux I ; n°623, 373p.

**ANTIA E. E. (1989).** Beach cusps and beach dynamics : a quantitative field appraisal. Coastal Eng., Amsterdam, 13, pp. 263-272.

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

**ARFI R., GUIRAL D. et TORRETON J. (1991).** Cycle hydrologique annuel d'une baie eutrophe: la baie de Biétri (lagune Ebrié, Côte d'Ivoire). Revue Hydrobiol. Trop., 22 (4), pp. 263-273.

**AUBOUIN J., BROUSSE R. et LEHMAN J. P. (1979).** Précis de géologie, Vol. 3, Tectonique, Tectonophysique, Morphologie, 4<sup>ème</sup> édition, Dunod, 760p.

**BARD F.X., GUIRAL D., AMON KOTHIAS J. B. et KOFFI P. K. (1991).** Synthèse des travaux effectués au CRO sur les végétations envahissantes flottantes (1985-1990). Propositions et recommandations. Journal Ivoirien d'Océanologie et Limnologie, Abidjan, Vol. 1, n°2, pp. 1-8.

**BESSELES B. (1977).** Géologie de l'Afrique, le craton ouest africain. Mém. B.R.G.M. n°88, 402p.

**BLAREZ. (1986).** Les marges continentales transformantes ouest africaines ; Guinée, Sierra Leone, Côte d'Ivoire, Ghana. Campagne Equamarge, Brest, Camp Océano. Franç. n°3, IFREMER, 276p.

**BODGE K. R. (1999).** Inlet impacts and families of solutions for inlet sediment budgets. Proceedings, Coastal Sediments 1999. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 703-718.

**BOUROCHE J. M. et SAPORTA G. (1980).** L'analyse des données. 4<sup>ème</sup> Ed. collect. Que Sais-je ? Presse Universitaire de France. 154p.

**BOUANANI A. (2004).** Hydrologie, transport solide et modélisation : étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW –Algérie). Thèse de doctorat d'Etat, Univ. de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 249p.

**BRASINGTON J. et RICHARDS K. (2000).** Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hilles. Hydrological processes. 14, pp. 2559-2574.

**BROCHE., CASSANOVA R. et LOUP G. (1977).** Atlas des minéraux en grain. Identification par photographies en couleurs. Société pour le développement minier de la Côte d'Ivoire, 171p.

**BRUNN P. (1962).** Sea level rise as cause of shore erosion. Journ. Waterways and harbors Div., Proc. Of the Am. Soc. Of Civil Eng., New-York (USA), 88, pp. 117-130.

**CAILLEUX A. (1947).** Distinction des galets marins et fluviatiles, Bull. Soc. Géol. France, 5<sup>ème</sup> série, t. XV, pp. 375-404.

**CAILLEUX A. et TRICART J. (1959).** Initiation de l'étude des sables et des galets. Centre Documentation Univ. Edit. Paris, t. 1, 375p.

**CAMIL J. (1984).** Pétrographie, 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 Doctorat. es Sc. Nat, Univ. Abidjan, n°79, 306p.

**CHAMLEY H. (1987).** Sédimentologie. Collect. Géoscience, Dunod, Paris, 175p.

**CHARRE J. (1995).** Statistique et territoire. Reclus modes d'emploi 92p.

**COFFIE M. P. (2002).** Evolution morphologique et sédimentaire du trait de côte entre Abidjan et Grand-Bassam. Mém. DEA, Univ, 75p.

**COMBRES J. C. et ELDIN M. (1971).** Eléments généraux du climat. In Atlas Côte d'Ivoire. Ministère du plan/ORSTOM/ Institut de Géographie Tropicale, Abidjan.

**DEGREMONT (1989).** Mémento technique de l'eau, t. 1, Edition du cinquantième, Lavoisier, Tec et Doc, Paris, 392p.

**DELOR C., DIABY I. et TASTET J. P. (1992).** Notice explicative de la carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200.000, feuille Grand-Bassam, mém. de la Direction de la géologie de Côte d'Ivoire, n°4, 26p.

**DHI -Danish Hydraulic Institute (2003).** Coastal hydraulic and oceanography, Mud transport module, user guide, 110p.

**DIGBEHI B.Z. (1987).** Etude comparée de la sédimentation de premiers stades d'ouverture de l'Atlantique : golfe de Guinée- golfe de Gascogne (sédimentologie-biostratigraphie). Thèse de doctorat de l'Univ. de Pau et des pays de l'Adour, 296p.

**DROZ L., BLAREZ E. MASCLE J. et SOMBO B.C. (1985).** The «Trou-sans-fond» deep sea fan (off Ivory Coast, Equatorial Atlantic). Mar. Géol. 67, pp. 1-12.

**DUFOUR P., DURAND J-R., GUIRAL D. et ZABI G. S. (1994).** Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire, Tome II : Les milieux lagunaires. Ed. ORSTOM, 546p.

**DUMOLARD P., DUBUS N. et CHARLEUX L. (2003).** Les statistiques en géographie Belin, coll. Atouts, 24p.

**DURANT J. R. et CHANTRAINE J. M. (1982).** L'environnement climatique des lagunes ivoiriennes. Rev. Hydrobiol. Trop. 15, pp. 85-113.

**DURANT J. R. et GUIRAL D. (1994).** Hydroclimat et hydrochimie des lagunes ivoiriennes. In : Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire. Tome II. Les milieux lagunaires, Durant J R., Dufour Ph., Guiral D et Zabi S., éditeurs. Edition ORSTOM, pp. 59-90.

**ELDIN M. (1971).** Le climat. *in* : "Le milieu naturel de Côte d'Ivoire". Mém. ORSTOM, Paris, n°50 : 73-108.

**FABRE R. (1985).** Les effets tectoniques des décrochements N-S senestres dans les formations volcaniques birimiennes de la région du Yaouré, Centre de la Côte d'Ivoire. C. R. Acad. Sc. Paris, t 300, Série II, N°19, pp. 955-960.

**FOLK R. L. (1974).** Petrology of sedimentary rocks. Austin, Texas : Hemphills, 182p.

**FOLK R. L. et WARD W. C. (1957).** Brazos rivers bar: a study in the significance of grain size parameters. Journ. Sc. Petrol. Tulsa Okla, Vol. 27, N° 1, pp. 325-354.

**FRIEDMAN G. M. (1967).** Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. J. Sed., 37, pp. 327-354.

**GALY-LACAUX C., JAMBERT C., DELMAS R., DUMESTRE J-F., LABROUE L., CERDAN P. et RICHARD S. (1996).** Emission de méthane et consommation d'oxygène dans la retenue hydroélectrique de Petit-Saut en Guyane. C. R Acad. Sci., Paris, t.322, série II: 1013-1019.

**GIRARD G., SIRCOULON J. et TOUCHEBOEUF P. (1971).** Aperçu sur les régimes hydrologiques. In: Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM, 50, pp. 73-108.

**GRAF W. et ALTINAKAR M. (2002).** Hydraulique fluviale Tome 1. Ecoulement permanent uniforme et non uniforme. Traité de génie Civil de l'EPFL, 16, 48p.

**HAUHOUOT C. (1997).** Etude cinématique du littoral de Grand-Lahou (Côte d'Ivoire) à l'aide d'un S.I.G. in îles et littoraux tropicaux. Brest Ouest ed, pp. 269-276.

**HAUHOUCOT C. (2008).** Les problèmes de l'aménagement de l'estuaire du fleuve Comoé à Grand-Bassam. Cahiers d'outre-mer, 219, pp. 50-72.

**HJULSTROM F. (1939).** Transportation of detritus by moving water. Recent marine sediments. A symposium, P.D. Trask Edit., pp. 5-31.

**HUDSON P. F. (2003).** Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco basin, Mexico. Catena. 52, pp. 57-76.

**JANSSON M. B. (2002).** Determining sediment source areas in a tropical basin, Costa Rica Catena, pp. 63-84.

**KESSE T. M . (2008).** Granulométrie et distribution des minéraux lourds dans les dépôts du Bandama. Mém. de DEA, Univ. d'Abobo-Adjamé, 58p.

**KLEIN M. (1984).** Anticlockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms : Holbeck catchment ; Yorkshire, England. Catena. 11, pp. 251-257.

**KOFFI. K. et ABE J. (1991).** Contribution à l'étude des modifications hydro-sédimentaires consécutives à la réouverture artificielle de l'embouchure du Comoé à Grand-Bassam. Journal Ivoirien d'Océanologie et Limnologie : Vol. 1, N° 2, pp. 47-60.

**KOUADIO G. R. (2006).** Caractérisation sédimentologique et physico-chimique de la zone de confluence Comoé-lagune Ebrié. Mém. DEA. Univ. Cocody, 56p.

**KOUAKOU N. C. (2004).** Analyse de l'environnement physique à l'embouchure du fleuve Bandama à Grand-Lahou (basse Côte d'Ivoire). Mémoire DEA, Univ. Cocody, 74p.

**KOUAKOU K., GOULA B .T. et SAVANE I. (2007).** Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide: cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire – Burkina-Faso). European Journal of Scientific Research. 16( 1), pp. 31-43.

**KOUAME K. I. (2006).** Caractérisation de la pollution physico-chimique des eaux dans la zone de la décharge d'Akouédo et étude du risque de contamination de la nappe d'Abidjan par un modèle de simulation des écoulements et du transport des polluants. Thèse de doctorat, Univ. d'Abobo-Adjamé, 199p.

**KOUAMELAN A. (1996).** Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implication pour la transition Archéen-Protérozoïque. Mém. Géosciences, Rennes 1, n° 73, 289p.

**KOUASSI K. L. (2002).** Hydrologie et sédimentation dans le lac du barrage hydroélectrique de Taabo : état de la morphologie du fond du lac. Mémoire de DEA. Univ. d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 54p.

**KOUASSI K. L. (2007).** Hydrologie, transport solide et modélisation de la sédimentation dans les lacs des barrages hydro-électriques de Côte d'Ivoire : cas du lac de Taabo. Thèse de doctorat, Univ. d'Abobo-Adjamé, 209p.

**KOUASSI K. L., WOGNIN A. V., GNAGNE T., N'GO Y. A., COURIVAUD J-R., KASSY P., DEME M. et AKA K. (2007).** Caractérisation des sables et morphologie du fond du lac du barrage hydroélectrique de Taabo (Côte d'Ivoire). Science et Nature, 4(1), pp. 93-103.

**KRUMBEIN W. C. (1936).** The use of quartile measures in describing and comparing sédiments. Ann. Journ. Sciences. T. 32, pp. 98-111.

**LE BUANEC B. (1972).** Les principaux sols de Cote d'Ivoire et leurs aptitudes culturales. Annales. Univ. Abidjan, 8, 2, pp. 17-26.

**LECLERC J. P., BELLERSORT B. et MIGNON C. (1979).** Action de houle sur les sédiments. Laboratoire Central d'Hydraulique, Département de sédimentologie, France, 191p.

**LEMASSON L. et REBERT J. P. (1968).** Les courants marins dans le golfe ivoirien. Cah. ORSTOM, série Océanigr., Vol XI, n°1, p. 67-95.

**LEMOINE S. (1988).** Evolution géologique de la région de Dabakala (N-E de la Côte d'Ivoire au protérozoïque inférieur. (Possibilité d'extension au reste de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso) : Similitudes et différences ; les linéaments Greenilles-Ferkessedougou et Grand cress-Niakaramandougou). Thèse de doctorat. d'Etat, Univ. Clermont- Ferrand, 334p.

**LENEUF N. (1968).** Les bordures sédimentaires du Golfe de Guinée. Adiopodoumé, ORSTOM, Série Géol., 5, 2, pp. 155-157.

**LE NORMANT C. (1995).** Modélisation numérique tridimensionnelle des processus de transport des sédiments cohésifs en environnement estuarien. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse ; spécialité physique et chimie de l'environnement, N°1002, 253p.

**LOWRANCE (1998).** LMS-160 et Global Map 1600 ; Directive d'installation et note technique. Lowrance Electronics, Inc. 75p.

**MARTIN J. M. et MEYBECK M. (1971).** Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. Mar. Chem. 7, pp. 173-206.

**MARTIN L. (1973).** Morphologie, sédimentologie et paléogéographie au Quaternaire récent du plateau continental ivoirien. , Thèse Doctorat d'Etat. Univ. Paris VI, ORSTOM, 340p.

**MARTIN L. (1977).** Morphologie, sédimentologie et paléogéographie au quaternaire du plateau continental ivoirien. Trav. Doc. N°61, ORSTOM, Paris, 265p.

**MARTIN C. (1987).** Les mesures de l'érosion chimique dans les bassins versants de roches cristallines ; comparaison des résultats obtenus par différentes méthodes d'investigation dans le massif des Maures (Var, France), Z. Géomorphologie, N.F., 31(1), pp. 73-84.

**MIGNIOT C. (1982).** Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale et Estuarienne. Thèse de doctorat d'Etat ès Sc. Nat., Univ. Paris-Sud, 371p.

**MINVIELLE E. et SOUIAH S. (2003).** L'analyse statistique et spatiale Ed. du Temps, 102p.

**MORLIERE A. (1970).** Les saisons marines devant Abidjan. Doc. Sc. CRO., Abidjan. Vol 1. N°2, p. 1-15.

**MONDE S. (1997).** Nouvelles approches de la cartographie du plateau continental de Côte d'Ivoire: Aspects morphologiques et sédimentologiques. Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle, Univ. d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 175p.

**MONDE S. (2004).** Etude de la modélisation hydrodynamique de la circulation des masses d'eau dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Thèse doc. d'Etat Es Sciences naturelles. Univ. Cocody (Abidjan), 324p.

**MONDE S. et AKA K. (2001).** Analyse sédimentologique et paléoenvironnement des sédiments superficiels des ensembles morphobathymétriques du plateau continental de Côte d'Ivoire. Africa Geoscience Review, vol.8, n° 3, 10p.

**N'GUESSAN Y. A. (2008).** Analyse morphologique, sédimentologique et paléo environnementale des sédiments superficiels des lagunes Adjin et Potou (zone littorale de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Univ. de Cocody, 148p.

**N'GUESSAN Y. A., MONDE S. et AKA KOUAME. (2008).** Sedimentological Analysis and Paléoenvironnement of the Surface Sediments of the Adjin and Potou lagoons. European Journal of Scientific Research .ISSN 1450-216X, Vol.19 n°2 (2008), pp. 391-404.

**OTTOMANN F. (1965).** Une hypothèse sur l'origine des "arrecifes" du Nord-Est brésilien. C.R. Som. Géol . Fr., Fasc. 7, pp. 175-176.

**PAN S., O'CONNOR B., BELL P. et WILLIAMS J. J. (2001).** Interactive numerical modeling of the hydrodynamics of combined waves and tides in the coastal zone. Proceedings 4th Coastal Dynamics, Lund, 11-15 June 2001, p. 162-171.

**PETROCI et BEICIP. (1990).** Côte d'Ivoire petroleum Evaluation, ministere des mines, Abidjan, Cote d'Ivoire, 99 p.

**PLUTSCHART N. (1966).** Guinea current. In. The Encyclopedia of Oceanography., Ed. By R. faibrige, New York, Reinhold, pp. 311-312.

**POTHIN K. B. K., GIOAN. et GRONAYES C.C. (2000).** Bilan géochronologique du socle précambrien de Côte d'Ivoire. Bioterre, Rev. Intern. Sci. de la Vie et de la terre, Vol. I, n°1, 2000, Presse Universitaires de Côte d'Ivoire, pp. 36-47.

**PROBST J. L. et BAZERBACHI A. (1989).** Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Sci. Géol. Bull., 39, 1, pp. 79-98.

**RIVIERE A. (1960).** Contribution à l'étude géologique des sédiments sableux. Ann. Inst. Océano. Edition Masson, nouvelle sér., t. XVII, fasc. 4 plaquette in -4, 28p.

**RYDING S. O. et RAST W. (1994).** Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et réservoirs. Science de l'environnement 9, édition Masson, 294p.

**SAAIDI E. (1991).** Traité de sédimentologie. Pétrographie, environnements sédimentaires. Edition Ellipes, 393p.

**SANKARE Y et ETIEN N. (1991).** Analyse des effets de l'ouverture du chenal de Grand-Bassam (estuaire du fleuve Comoé, Lagune Ebrié) sur la macrofaune benthique lagunaire. Journal Ivoirien d'Océanologie et Limnologie, 1 (2), pp. 81-90.

**SANKARE Y., KOTHIAS A. J-B. et KONAN A. A. (1991).** Les effets de la réouverture de l'embouchure du fleuve Comoé sur la végétation littorale lagunaire (Lagune Ebrié – Côte d'Ivoire). Journal Ivoirien d'Océanologie et Limnologie, 1 (2), pp. 71-79.

**SEEGER M., ERREA M. P., BEGUERIA S., ARNAEZ J., MARTI C. et GARCIA-RUIZ J. M. (2004).** Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant

factors for discharge/suspended sediment hysteresis loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*. 288, pp. 299-311.

**SHORT A. D. (1980).** Beach response to variations in breaker height. In: *Proceeding 17<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 1016-1035.

**SOMBO B. C. (2002).** Etude de l'évolution structurale et sismo-stratigraphique du bassin sédimentaire off-shore de Côte d'Ivoire, marge passive entaillée d'un canyon. Thèse de doctorat d'Etat, ès Sc. Nat. Univ. de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, n°355, 304p.

**SPENGLER A. et DELTEIL J.R. (1966).** Le bassin sédimentaire tertiaire de Côte d'Ivoire. In-Bassin sédimentologique du littoral africain, *annale des serv. Géol. Afr.*, Paris, pp. 99-113.

**TAGINI B. (1971).** Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. SODEMI, Abidjan, 302p.

**TAGINI B. (1972).** Notice explicative à la carte de la Côte d'Ivoire au 1/200000. Rapport interne Soc. Dev. Min. (SODEMI).

**TAPSOBA S. A. (1990).** Etude géologique et hydrogéologique du bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire : Recharge et qualité des eaux dans l'aquifère côtier (Région de Jacqueline), mémoire de DEA, Univ. CHEICK ANTA DIOP-DAKAR, Faculté des Sciences et Techniques, 60p.

**TAPSOBA S. A. (1995).** Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire) : hydrochimie, isotopie et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de doct. 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. de Cocody, Côte d'Ivoire, 200p.

**TASTET J P. (1972).** Quelques considérations sur la classification des côtes. La morphologie cotieres. *Ann. Univ Abidjan*, VII, 2, p. 135-162.

**TASTET J. P. (1979).** Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo et Bénin). Thèse DES, Univ. de Bordeaux I, n°621, 175p.

**TASTET J.P. (1985).** Le littoral ivoirien : géologie, morphologie, dynamique. Annales Univ. Abidjan, France, n°621, 181p.

**TASTET J.P., MARTIN L. et AKA K. (1993).** Géologie et environnement sédimentaires de la marge continentale de Côte d'Ivoire. *In* Environnement et Ressource aquatique de Côte d'Ivoire. Tome I. Le milieu marin. Edition de l'ORSTOM, pp. 23-61.

**VARLET F. (1958).** Le régime de l'Atlantique près d'Abidjan, Et. Eburnéennes, Côte d'Ivoire, t. 7, pp. 97-222.

**VARLET F. (1978).** Le régime de la lagune Ebrié, Côte d'Ivoire. Traits physiques essentiels. Trav. Et Doc. ORSTOM n°83, 162 p.

**VERSTRAETE J. M. (1989).** Le niveau de la mer le long des côtes de l'Afrique de l'Ouest et à l'Equateur, hausse probable du niveau marin à l'échelle séculaire. Publication du COMARAF, UNESCO Série, n°4, pp. 10-43.

**VISHER. (1969).** Physical characteristics of fluvial deposit, in «Recognition of ancient sedimentary environments». Rigby et Haniblin Edt., Soc. Eco. Paleont. Min., Tulsa, spec. publ., n°16, pp. 84-98.

**VIVIER, P. (1972).** La vie dans les eaux douces. Presses universitaires de France, 4<sup>ème</sup> édition, N°233, 126p.

**WEBER O. (1978).** Evolution morphologique et granulométrique d'un profil littoral de la dune à la plage sous-marine à la SALIE (Gironde) en fonction des saisons. Bull., Inst., Bass. d'aquitaine, Bordeaux I, n° 23, pp. 40-54.

**WOGNIN A. (2004).** Caractérisation, Hydrologie et sédimentologie de l'embouchure du fleuve Bandama. Thèse de doctorat, Univ. d'Abidjan, 198p.

**WOGNIN A. V., MONDE S., AFFIAN K., COULIBALY A. et AKA K. (2007).** Modèle de circulation des eaux dans l'estuaire du fleuve Bandama en Côte d'Ivoire. Sud Sciences et Technologies, N°15, pp. 5-12.

**WOGNIN V., MONDE S., COULIBALY A., KOUASSI K.L, ADOPO I., AFFIAN k. et AKA K. (2008).** Waters Model Circulation in the Estuary of Bandama. Rivers Flows and Tide Condition's Incidence. European Journal of Scientific Research. 19 (2), pp. 304-314.

**WOLFF M. et VISSER W. (2003).** Discriminating rural populations in Alaska US Fish & Wildlife Service rapport, 45p.

**WOLFF M. et VISSER W. (2005).** Méthodes et outils pour l'analyse des verbalisations: Une contribution à l'analyse du modèle de l'interlocuteur dans la description d'itinéraires. Activités, 2, pp.99-118.

**WRIGHT L. D., CHAPPELL J., THOM B. G., BRADSHAW M.P. et COWELL P. (1979).** Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: southern Australia. Par. Geol., Amsterdam, 32 (1/2), pp. 105-140.

**WRIGHT L. D. et SHORT A. D. (1984).** Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A Synthesis Marine Geology, v. 56, pp. 93-118.

**YACE I. (1976).** Le volcanisme éburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fettekro en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat d'Etat Sc. Nat. Univ. Abidjan, 373p.

**YACE P. (1979).** Etude sur les techniques de la sédimentologie. Juin- octobre 1979. Rapp. Stage, Univ. Bordeaux I, 56p.

**YACE P. (1987).** Evolution du trait de côte et dynamique sédimentaire du littoral ivoirien entre Grand-Bassam et Jacquville. Thèse de doctorat. Univ. Abidjan, n°28, 109p.

# ANNEXES

## ANNEXE I : Mesure des paramètres physico-chimiques Amont-aval du fleuve

| <b>T°C</b>             | Grande saison des pluies | Grande saison sèche | Petite saison des pluies | Petite saison sèche |
|------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| <b>St<sub>1</sub></b>  | 27,30                    | 30,50               | 28,95                    | 29,00               |
| <b>St<sub>2</sub></b>  | 27,40                    | 30,00               | 28,20                    | 28,00               |
| <b>St<sub>3</sub></b>  | 27,24                    | 29,38               | 28,30                    | 28,36               |
| <b>St<sub>4</sub></b>  | 27,15                    | 29,29               | 28,20                    | 28,25               |
| <b>St<sub>5</sub></b>  | 28,12                    | 29,01               | 28,30                    | 29,00               |
| <b>St<sub>6</sub></b>  | 28,15                    | 29,64               | 27,80                    | 28,45               |
| <b>St<sub>7</sub></b>  | 28,70                    | 29,50               | 28,00                    | 29,10               |
| <b>St<sub>8</sub></b>  | 28,58                    | 30,00               | 28,20                    | 28,75               |
| <b>St<sub>9</sub></b>  | 28,25                    | 30,12               | 27,66                    | 28,15               |
| <b>St<sub>10</sub></b> | 28,06                    | 32,17               | 27,61                    | 27,72               |

### **pH**

|                        | Grande saison des pluies | Grande saison sèche | Petite saison des pluies | Petite saison sèche |
|------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| <b>St<sub>1</sub></b>  | 6,94                     | 7,50                | 7,00                     | 7,69                |
| <b>St<sub>2</sub></b>  | 6,95                     | 7,33                | 7,21                     | 7,49                |
| <b>St<sub>3</sub></b>  | 6,94                     | 7,12                | 7,09                     | 7,48                |
| <b>St<sub>4</sub></b>  | 6,92                     | 7,00                | 6,94                     | 7,20                |
| <b>St<sub>5</sub></b>  | 6,83                     | 6,95                | 6,93                     | 7,12                |
| <b>St<sub>6</sub></b>  | 6,67                     | 6,98                | 6,86                     | 7,00                |
| <b>St<sub>7</sub></b>  | 6,55                     | 6,87                | 6,71                     | 6,95                |
| <b>St<sub>8</sub></b>  | 6,29                     | 6,54                | 6,58                     | 6,80                |
| <b>St<sub>9</sub></b>  | 6,18                     | 6,35                | 6,24                     | 6,70                |
| <b>St<sub>10</sub></b> | 6,19                     | 6,34                | 6,36                     | 6,55                |

### **CONDUCTIVITE**

|                        | Grande saison des pluies | Grande saison sèche | Petite saison des pluies | Petite saison sèche |
|------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| <b>St<sub>1</sub></b>  | 99,79                    | 138,00              | 100,12                   | 122,00              |
| <b>St<sub>2</sub></b>  | 95,00                    | 137,45              | 97,45                    | 121,20              |
| <b>St<sub>3</sub></b>  | 97,00                    | 135,79              | 98,12                    | 123,00              |
| <b>St<sub>4</sub></b>  | 97,00                    | 133,36              | 99,14                    | 119,00              |
| <b>St<sub>5</sub></b>  | 91,85                    | 131,50              | 97,45                    | 117,80              |
| <b>St<sub>6</sub></b>  | 95,00                    | 130,12              | 95,00                    | 114,70              |
| <b>St<sub>7</sub></b>  | 94,00                    | 128,12              | 89,00                    | 112,98              |
| <b>St<sub>8</sub></b>  | 89,01                    | 124,58              | 87,96                    | 107,65              |
| <b>St<sub>9</sub></b>  | 85,59                    | 125,58              | 89,90                    | 103,12              |
| <b>St<sub>10</sub></b> | 81,12                    | 123,55              | 89,85                    | 98,06               |

### **POTENTIEL**

|                        | Grande saison des pluies | Grande saison sèche | Petite saison des pluies | Petite saison sèche |
|------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| <b>St<sub>1</sub></b>  | 33,33                    | 24,18               | 30,00                    | 15,32               |
| <b>St<sub>2</sub></b>  | 30,80                    | 26,00               | 29,00                    | 16,00               |
| <b>St<sub>3</sub></b>  | 35,00                    | 26,44               | 29,00                    | 17,23               |
| <b>St<sub>4</sub></b>  | 36,10                    | 27,05               | 31,00                    | 18,35               |
| <b>St<sub>5</sub></b>  | 38,00                    | 28,00               | 31,50                    | 20,00               |
| <b>St<sub>6</sub></b>  | 39,30                    | 26,34               | 30,10                    | 22,03               |
| <b>St<sub>7</sub></b>  | 40,52                    | 27,00               | 31,12                    | 23,00               |
| <b>St<sub>8</sub></b>  | 39,00                    | 28,00               | 31,70                    | 22,00               |
| <b>St<sub>9</sub></b>  | 40,12                    | 30,00               | 32,80                    | 25,00               |
| <b>St<sub>10</sub></b> | 39,48                    | 31,33               | 33,55                    | 25,33               |

### **OXYGENE DISSOUS**

|            | Grande saison des pluies | Grande saison sèche | Petite saison des pluies | Petite saison sèche |
|------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| <b>St1</b> | 10,80                    | 1,95                | 5,80                     | 1,98                |

|      |                          |                     |                          |                     |
|------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| St2  | 8,23                     | 1,99                | 4,23                     | 1,95                |
| St3  | 7,15                     | 1,86                | 4,05                     | 1,63                |
| St4  | 6,95                     | 1,51                | 3,95                     | 1,25                |
| St5  | 6,15                     | 1,41                | 4,20                     | 1,16                |
| St6  | 6,06                     | 1,74                | 3,22                     | 1,50                |
| St7  | 3,10                     | 1,23                | 2,15                     | 1,17                |
| St8  | 3,45                     | 1,29                | 2,35                     | 1,26                |
| St9  | 3,46                     | 1,25                | 2,01                     | 1,33                |
| St10 | 3,70                     | 1,28                | 2,03                     | 1,41                |
|      | <b>SALINITE</b>          |                     |                          |                     |
|      | Grande saison des pluies | Grande saison sèche | Petite saison des pluies | Petite saison sèche |
| St1  | 0,00                     | 0,00                | 0,00                     | 0,00                |
| St2  | 0,00                     | 0,00                | 0,00                     | 0,00                |
| St3  | 0,00                     | 0,00                | 0,00                     | 0,00                |
| St4  | 0,00                     | 0,00                | 0,00                     | 0,00                |
| St5  | 0,10                     | 1,00                | 0,50                     | 0,15                |
| St6  | 1,26                     | 1,23                | 1,55                     | 0,82                |
| St7  | 2,10                     | 1,56                | 1,77                     | 1,54                |
| St8  | 2,11                     | 1,98                | 2,10                     | 2,13                |
| St9  | 1,50                     | 1,75                | 1,55                     | 1,80                |
| St10 | 1,60                     | 1,70                | 1,57                     | 1,66                |
|      | <b>TURBIDITE</b>         |                     |                          |                     |
|      | Grande saison des pluies | Grande saison sèche | Petite saison des pluies | Petite saison sèche |
| St1  | 33,30                    | 31,40               | 33,60                    | 27,00               |
| St2  | 32,60                    | 29,00               | 32,84                    | 26,85               |
| St3  | 31,20                    | 28,90               | 31,70                    | 26,58               |
| St4  | 30,80                    | 26,50               | 32,00                    | 25,00               |
| St5  | 27,20                    | 26,52               | 28,00                    | 24,74               |
| St6  | 26,50                    | 26,32               | 25,79                    | 24,35               |
| St7  | 25,12                    | 25,45               | 25,58                    | 24,56               |
| St8  | 24,50                    | 24,80               | 24,78                    | 24,10               |
| St9  | 24,10                    | 24,56               | 24,70                    | 24,11               |
| St10 | 23,55                    | 24,05               | 24,14                    | 23,81               |
|      | <b>MES</b>               |                     |                          |                     |
|      | Grande saison des pluies | Grande saison sèche | Petite saison des pluies | Petite saison sèche |
| St1  | 49,10                    | 15,90               | 38,80                    | 29,80               |
| St2  | 45,00                    | 16,60               | 37,90                    | 29,50               |
| St3  | 41,00                    | 16,00               | 38,80                    | 26,50               |
| St4  | 39,00                    | 15,45               | 39,10                    | 26,20               |
| St5  | 37,90                    | 14,90               | 31,40                    | 25,40               |
| St6  | 37,50                    | 15,77               | 31,56                    | 27,48               |
| St7  | 36,20                    | 15,21               | 30,00                    | 25,26               |
| St8  | 32,00                    | 14,94               | 29,87                    | 24,51               |
| St9  | 33,58                    | 14,91               | 28,97                    | 24,29               |
| St10 | 28,77                    | 14,72               | 28,58                    | 23,72               |

**ANNEXE II : Points de mesure des profils à l'embouchure du fleuve Comoé.**

| Mission de Grand-Bassam : Etude morphologique (Août 2007) |   |     |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------|---|-----|------|------|------|------|------|
| Site 1:                                                   |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Position                                                  |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |      |
| x                                                         |   | 115 | 85   | 160  | 218  | 300  |      |
| o                                                         |   | 108 | 71   | 144  | 200  | 282  |      |
| y                                                         |   | 101 | 56   | 127  | 183  | 263  |      |
| X=x-o                                                     |   | 7   | 14   | 16   | 18   | 18   |      |
| Y=o-y                                                     |   | 7   | 15   | 17   | 17   | 19   |      |
| D=X+Y                                                     | 0 | 14  | 29   | 45,4 | 55,2 | 67,4 |      |
| H(t)                                                      |   | 160 | 160  | 160  | 160  | 160  |      |
| Z=H(t)-o                                                  | 0 | 52  | 89   | 16   | -40  | -123 |      |
| Site 2:                                                   |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Position                                                  |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |      |
| x                                                         |   | 90  | 67   | 187  | 277  | 300  |      |
| o                                                         |   | 82  | 55   | 172  | 260  | 280  |      |
| y                                                         |   | 75  | 44   | 158  | 243  | 270  |      |
| X=x-o                                                     |   | 8   | 12   | 15   | 17   | 20   |      |
| Y=o-y                                                     |   | 7   | 11   | 14   | 17   | 10   |      |
| D=X+Y                                                     | 0 | 15  | 28,6 | 42,9 | 46   | 48,8 |      |
| H(t)                                                      |   | 161 | 161  | 161  | 161  | 161  |      |
| Z=H(t)-o                                                  | 0 | 79  | 106  | -90  | -163 | -183 |      |
| Site 3:                                                   |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| position                                                  |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |      |
| x                                                         |   | 100 | 120  | 244  | 300  | 320  |      |
| o                                                         |   | 92  | 105  | 227  | 285  | 305  |      |
| y                                                         |   | 84  | 95   | 212  | 270  | 285  |      |
| X=x-o                                                     |   | 8   | 15   | 17   | 15   | 15   |      |
| Y=o-y                                                     |   | 8   | 10   | 15   | 15   | 20   |      |
| D=X+Y                                                     | 0 | 16  | 30,8 | 39,4 | 49,7 | 56,4 |      |
| H(t)                                                      |   | 161 | 161  | 161  | 161  | 161  |      |
| Z=H(t)-o                                                  | 0 | 69  | -50  | -223 | -295 | -320 |      |
| Site 4:                                                   |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Position                                                  |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| x                                                         |   | 112 | 131  | 190  | 240  | 300  | 350  |
| o                                                         |   | 103 | 116  | 171  | 221  | 280  | 320  |
| y                                                         |   | 93  | 103  | 155  | 200  | 260  | 300  |
| X=x-o                                                     |   | 9   | 15   | 19   | 19   | 20   | 30   |
| Y=o-y                                                     |   | 10  | 13   | 16   | 21   | 20   | 20   |
| D=X+Y                                                     | 0 | 19  | 30   | 42,5 | 51,8 | 52,9 | 68,8 |
| H(t)                                                      |   | 160 | 160  | 160  | 160  | 160  | 160  |
| Z=H(t)-o                                                  | 0 | 13  | -107 | -182 | -170 | -190 | -213 |

| Site 5:  |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|----------|---|-----|------|------|------|------|------|
| Position |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |      |
| x        |   | 137 | 165  | 260  | 320  | 397  |      |
| o        |   | 129 | 153  | 245  | 307  | 380  |      |
| y        |   | 121 | 141  | 231  | 290  | 360  |      |
| X=x-o    |   | 8   | 12   | 15   | 13   | 17   |      |
| Y=o-y    |   | 8   | 12   | 14   | 17   | 20   |      |
| D=X+Y    | 0 | 16  | 23,8 | 41,4 | 50,4 | 68,5 |      |
| H(t)     |   | 160 | 160  | 160  | 160  | 160  |      |
| Z=H(t)-o | 0 | 47  | 60   | -80  | -233 | -550 |      |
| Site 6:  |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| X        |   | 110 | 76   | 118  | 148  | 248  | 330  |
| o        |   | 112 | 64   | 102  | 130  | 238  | 305  |
| y        |   | 95  | 51   | 86   | 112  | 208  | 282  |
| X= x-o   |   | -2  | 12   | 16   | 18   | 10   | 25   |
| Y= o-y   |   | 17  | 13   | 16   | 18   | 30   | 23   |
| D=X+Y    | 0 | 15  | 25   | 47,8 | 50,6 | 62,4 | 75,7 |
| Ht (cm)  |   | 155 | 155  | 155  | 155  | 155  | 155  |
| Z= Ht-o  | 0 | 43  | 91   | 53   | 25   | -83  | -150 |
| Site 7:  |   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| x        |   | 94  | 66   | 125  | 222  | 285  | 295  |
| o        |   | 90  | 58   | 111  | 210  | 270  | 275  |
| y        |   | 85  | 45   | 100  | 194  | 250  | 258  |
| X= x-o   |   | 4   | 8    | 14   | 12   | 15   | 20   |
| Y= o-y   |   | 5   | 13   | 11   | 16   | 20   | 17   |
| D=X+Y    | 0 | 9   | 21   | 33,8 | 50,2 | 56,7 | 60,3 |
| Ht (cm)  |   | 156 | 156  | 156  | 156  | 156  | 156  |
| Z= Ht-o  | 0 | 20  | 30   | 45   | -54  | -114 | -119 |

### ANNEXE III : Analyses granulométriques

| N° éch | Total | 5    | 3,2  | 2     | 1,25  | 0,8   | 0,63  | 0,5   | 0,4   | 0,315  | 0,25   | 0,2    | 0,16   | 0,125  | 0,1    | 0,063  | <63   | µm    |
|--------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| P1HE   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,08  | 1,16  | 6,56  | 13,26 | 25,86 | 25,25 | 21,39  | 5,22   | 0,71   | 0,15   | 0,04   | 0,01   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,08  | 1,16  | 6,58  | 13,30 | 25,94 | 25,33 | 21,46  | 5,24   | 0,71   | 0,15   | 0,04   | 0,01   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,08  | 1,24  | 7,82  | 21,13 | 47,07 | 72,39 | 93,85  | 99,09  | 99,80  | 99,95  | 99,99  | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P1ME   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,45  | 11,54 | 27,13 | 34,54 | 17,30 | 7,55   | 1,59   | 0,06   | 0,02   | 0,01   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,45  | 11,52 | 27,08 | 34,47 | 17,27 | 7,54   | 1,59   | 0,06   | 0,02   | 0,01   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,45  | 11,97 | 39,05 | 73,52 | 90,79 | 98,32  | 99,91  | 99,97  | 99,99  | 100,00 | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P1BE   | 100   | 0,15 | 0,00 | 0,10  | 0,33  | 4,55  | 21,04 | 29,33 | 28,84 | 11,02  | 4,35   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,15 | 0,00 | 0,10  | 0,33  | 4,56  | 21,10 | 29,42 | 28,92 | 11,05  | 4,36   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,15 | 0,15 | 0,25  | 0,58  | 5,14  | 26,25 | 55,66 | 84,59 | 95,64  | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P2HE   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,26  | 2,80  | 13,86 | 15,07 | 19,25 | 16,09 | 32,78  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,26  | 2,80  | 13,84 | 15,05 | 19,23 | 16,07 | 32,74  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,26  | 3,06  | 16,90 | 31,95 | 51,18 | 67,26 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P2ME   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,09  | 1,08  | 13,98 | 32,29 | 32,39 | 12,94 | 5,45   | 1,44   | 0,40   | 0,16   | 0,05   | 0,01   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,09  | 1,08  | 13,94 | 32,20 | 32,30 | 12,90 | 5,43   | 1,44   | 0,40   | 0,16   | 0,05   | 0,01   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,09  | 1,17  | 15,11 | 47,31 | 79,61 | 92,51 | 97,95  | 99,38  | 99,78  | 99,94  | 99,99  | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P2BE   | 100   | 0,00 | 0,10 | 0,89  | 6,90  | 31,86 | 29,65 | 19,12 | 7,17  | 3,26   | 0,86   | 0,30   | 0,15   | 0,06   | 0,03   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,10 | 0,89  | 6,88  | 31,75 | 29,55 | 19,05 | 7,14  | 3,25   | 0,86   | 0,30   | 0,15   | 0,06   | 0,03   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,10 | 0,99  | 7,86  | 39,61 | 69,16 | 88,21 | 95,36 | 98,60  | 99,46  | 99,76  | 99,91  | 99,97  | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P3HE   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,11  | 1,00  | 10,58 | 16,51 | 18,85 | 13,47 | 12,89  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,15  | 1,36  | 14,41 | 22,49 | 25,68 | 18,35 | 17,56  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,15  | 1,51  | 15,92 | 38,41 | 64,09 | 82,44 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P3ME   | 100   | 0,00 | 0,65 | 1,88  | 11,33 | 36,27 | 23,79 | 15,81 | 6,80  | 2,62   | 0,74   | 0,15   | 0,05   | 0,02   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,65 | 1,88  | 11,32 | 36,23 | 23,76 | 15,79 | 6,79  | 2,62   | 0,74   | 0,15   | 0,05   | 0,02   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,65 | 2,53  | 13,84 | 50,07 | 73,84 | 89,63 | 96,42 | 99,04  | 99,78  | 99,93  | 99,98  | 100,00 | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P3BE   | 100   | 1,40 | 2,12 | 8,15  | 22,80 | 34,22 | 16,35 | 9,31  | 3,85  | 1,65   | 0,49   | 0,07   | 0,02   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 1,39 | 2,11 | 8,12  | 22,70 | 34,07 | 16,28 | 9,27  | 3,83  | 1,64   | 0,49   | 0,07   | 0,02   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 1,39 | 3,50 | 11,62 | 34,32 | 68,40 | 84,68 | 93,95 | 97,78 | 99,42  | 99,91  | 99,98  | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P4HE   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,03  | 1,05  | 5,88  | 21,12 | 24,60 | 28,09  | 13,98  | 4,12   | 1,22   | 0,19   | 0,07   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,03  | 1,05  | 5,86  | 21,05 | 24,51 | 27,99  | 13,93  | 4,11   | 1,22   | 0,19   | 0,07   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,03  | 1,08  | 6,94  | 27,98 | 52,50 | 80,49  | 94,42  | 98,53  | 99,74  | 99,93  | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P4ME   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,04  | 0,22  | 4,34  | 12,27 | 18,92 | 14,07 | 12,74  | 4,69   | 0,59   | 0,24   | 0,01   | 0,15   | 0,03   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,06  | 0,32  | 6,35  | 17,96 | 27,70 | 20,60 | 18,65  | 6,87   | 0,86   | 0,35   | 0,01   | 0,22   | 0,04   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,06  | 0,38  | 6,73  | 24,70 | 52,39 | 72,99 | 91,64  | 98,51  | 99,37  | 99,72  | 99,74  | 99,96  | 100,00 |       | cumul |
| P4BE   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,03  | 1,36  | 7,12  | 18,59 | 18,19 | 21,83  | 18,29  | 8,37   | 4,57   | 1,22   | 0,32   | 0,04   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,03  | 1,36  | 7,12  | 18,60 | 18,20 | 21,85  | 18,30  | 8,38   | 4,57   | 1,22   | 0,32   | 0,04   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,03  | 1,39  | 8,52  | 27,12 | 45,32 | 67,17  | 85,47  | 93,85  | 98,42  | 99,64  | 99,96  | 100,00 |       | cumul |
| P5HE   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,04  | 1,31  | 9,18  | 24,95 | 25,16 | 22,52  | 12,39  | 3,45   | 1,00   | 0,19   | 0,07   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,04  | 1,31  | 9,16  | 24,89 | 25,09 | 22,46  | 12,36  | 3,44   | 1,00   | 0,19   | 0,07   | 0,00   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,04  | 1,35  | 10,50 | 35,39 | 60,48 | 82,94  | 95,30  | 98,74  | 99,74  | 99,93  | 100,00 | 100,00 |       | cumul |
| P5ME   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,25  | 1,40  | 11,92 | 21,82 | 25,07 | 15,91 | 13,93  | 6,16   | 2,19   | 0,75   | 0,22   | 0,15   | 0,02   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,25  | 1,40  | 11,95 | 21,87 | 25,12 | 15,94 | 13,96  | 6,17   | 2,19   | 0,75   | 0,22   | 0,15   | 0,02   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,25  | 1,65  | 13,60 | 35,46 | 60,59 | 76,53 | 90,49  | 96,66  | 98,86  | 99,61  | 99,83  | 99,98  | 100,00 |       | cumul |
| P5BE   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,65  | 4,32  | 12,08 | 20,90 | 21,30  | 18,52  | 7,47   | 2,15   | 0,55   | 0,20   | 0,05   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,74  | 4,90  | 13,70 | 23,70 | 24,15  | 21,00  | 8,47   | 2,44   | 0,62   | 0,23   | 0,06   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,74  | 5,64  | 19,33 | 43,03 | 67,18  | 88,18  | 96,65  | 99,09  | 99,72  | 99,94  | 100,00 |       | cumul |
| P6HE   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,04  | 0,68  | 3,54  | 10,47 | 16,84 | 24,41  | 26,09  | 10,47  | 4,87   | 1,35   | 0,50   | 0,05   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,04  | 0,68  | 3,56  | 10,54 | 16,96 | 24,58  | 26,27  | 10,54  | 4,90   | 1,36   | 0,50   | 0,05   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,04  | 0,73  | 4,29  | 14,83 | 31,79 | 56,37  | 82,64  | 93,18  | 98,09  | 99,45  | 99,95  | 100,00 |       | cumul |
| P6ME   | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,03  | 1,12  | 13,79 | 22,73 | 24,63 | 15,52 | 12,83  | 6,42   | 1,99   | 0,60   | 0,16   | 0,13   | 0,00   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0    | 0    | 0,03  | 1,12  | 13,8  | 22,7  | 24,6  | 15,5  | 12,83  | 6,42   | 1,99   | 0,6    | 0,16   | 0,13   | 0      | 0     | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,03  | 1,15  | 14,94 | 37,67 | 62,30 | 77,82 | 90,65  | 97,07  | 99,06  | 99,66  | 99,82  | 99,95  | 99,95  | 99,85 | cumul |
| P6BE   | 100   | 0,00 |      | 0,25  | 1,40  | 11,92 | 21,82 | 25,07 | 15,91 | 13,93  | 6,16   | 2,19   | 0,75   | 0,22   | 0,15   | 0,02   | 0,00  | poids |
|        | 100   | 0,00 | 0,00 | 0,25  | 1,40  | 11,92 | 21,82 | 25,07 | 15,91 | 13,93  | 6,16   | 2,19   | 0,75   | 0,22   | 0,15   | 0,02   | 0,00  | %     |
|        |       | 0,00 | 0,00 | 0,25  | 1,65  | 13,57 | 35,39 | 60,46 | 76,37 | 90,30  | 96,46  | 98,65  | 99,40  | 99,62  | 99,77  | 99,79  | 99,79 | cumul |
| P7HE   | 100   | 0,3  | 0,9  | 0,78  | 4,08  | 22    | 24    | 22    | 13,2  | 8,27   | 3,17   | 1,19   | 0,46   | 0,07   | 0,02   | 0,01   | 0     | poids |
|        | 99,44 | 0,3  | 0,9  | 0,78  | 4,057 | 21,9  | 23,8  | 21,9  | 13,2  | 8,224  | 3,152  | 1,183  | 0,457  | 0,07   | 0,02   | 0,01   | 0     | %     |
|        |       | 0,3  | 1,1  | 1,91  | 5,968 | 27,9  | 51,7  | 73,6  | 86,8  | 95     | 98,15  | 99,34  | 99,79  | 99,86  | 99,88  | 99,89  | 99,9  | cumul |
| P7ME   | 100   | 5,2  | 1,2  | 2,74  | 11,72 | 31,2  | 22,9  | 15,5  | 6,71  | 2,47   | 0,72   | 0,08   | 0,01   | 0      | 0      | 0      | 0     | poids |
|        | 99,26 | 5,1  | 1,2  | 2,72  | 11,63 | 31    | 22,7  | 15,4  | 6,66  | 2,452  | 0,715  | 0,079  | 0,01   | 0      | 0      | 0      | 0     | %     |
|        |       | 5,1  | 6,4  | 9,07  | 20,7  | 51,7  | 74,4  | 89,8  | 96,4  | 98,9   | 99,61  | 99,69  | 99,7   | 99,7   | 99,7   | 99,7   | 99,7  | cumul |